발간등록번호
71-6411789-000002-10

변화의 중심
기회의 경기

2022년도
시험연구 사업보고서

2022 Annual Report of Research Project



제32호



경기도 경기도해양수산자원연구소


변화의 중심
기회의 경기

목 차

Ⅰ. 풍요로운 경기바다 만들기

1. 갯벌 유용패류 인공종자 생산기술 개발 ····· 7
2. 새우류 생산기술 개발 ····· 26
3. 해조류 양식기술 개발 ····· 35
4. 경기만 새꼬막 양식 적합어장 개발시험 ····· 57

Ⅱ. 기후변화 대응 생태환경 연구

1. 경기바다 환경조사 ····· 71
2. 경기갯벌 생태조사 ····· 98

Ⅲ. 기후변화 대응 친환경양식 기술개발 보급

1. 수산중심 아쿠아포닉스 기술개발 시험 ····· 125
2. 유용미생물 생산보급 연구 ····· 146

Ⅳ. 종 보존 및 복원 기술개발보급

1. 버들치 인공종자 생산 연구 ····· 153
2. 미유기 인공종자 생산 연구 ····· 176

Ⅴ. 내수면 생태환경 조사

1. 도내 주요하천 민물고기 서식현황 조사 ····· 185
2. 한강하구 서식어종 생태조사 ····· 223

Ⅵ. 수산생물 위해요소 모니터링

1. 염분농도별 흰다리새우의 질병 감염력 비교 연구 ····· 231
2. 경기연안 미세플라스틱 오염 모니터링 ····· 242
3. 경기바다 방사능 오염 모니터링 연구 ····· 251

Ⅰ 풍요로운 경기바다 만들기

1. 갯벌 유용패류 인공종자 생산기술 개발

2. 새우류 생산기술개발

3. 해조류 양식기술개발

4. 경기만 새꼬막 양식 적합어장 개발시험

변화의 중심
기회의 경기

갯벌 유용패류 인공종자 생산기술 개발
- 바지락, 동죽, 가무락 -

김병권 · 김광범 · 김봉현

서 론

경기 갯벌에서 산업적으로 생산되는 주요 패류 종으로는 바지락, 굴류, 고둥류 등 약 9종이 서식하고 있다. 경기도의 패류는 과거 `00년도 약 15,514톤으로 높은 생산량과 품종의 다양화로 어민들의 주요 소득원이었으나 현재 `21년 생산량이 2,739톤으로 약 83%가 줄었으며 생산품종 역시 바지락, 굴류, 고둥류가 전체 생산량의 70% 이상을 차지할 정도로 패류 종 다양성 또한 줄어든 상황이다.

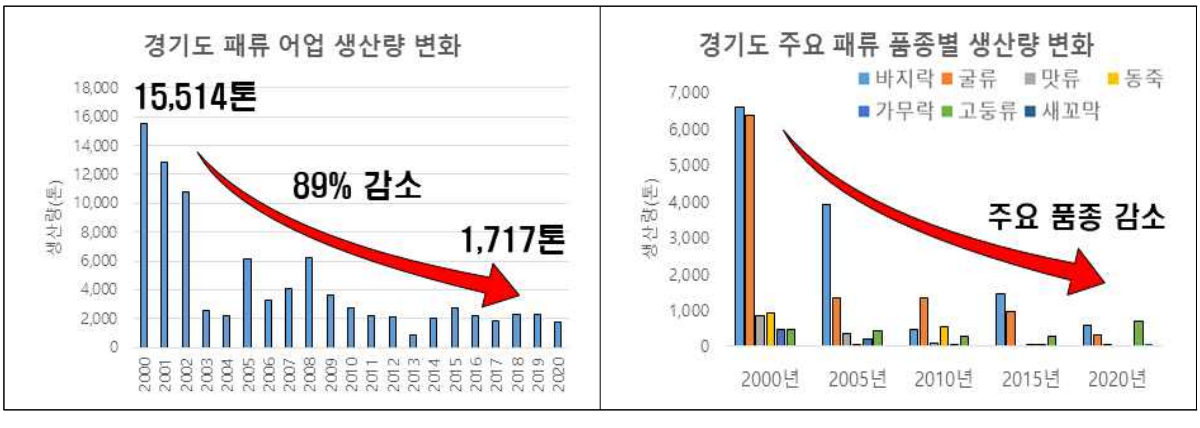


그림 1. 경기도 주요 패류 생산량 변화. (통계청)

이에 연구소에서는 패류 자원량 증진 및 종 다양성 회복을 위하여 경기 갯벌환경에 안정적으로 정착이 가능한 품종으로 바지락, 가무락, 동죽 3품종을 선정하여 시험연구를 추진하였다.

첫째, 바지락(*Ruditapes phillippinarum*)은 분류학적으로 연체동물문 이매패강 백합목 백합과에 속하는 종으로서 한국, 일본, 중국을 비롯하여 미국 북서 해안과 유럽 국가들의 조간대에 널리 분포하고 있는 주요 어업자원이다. 또한 서식 환경으로 담수의 영향을 받으면서 간출시간 3-5시간 되는 곳에서부터 수심 3-4m 사이의 모래, 자갈, 진흙이 섞인 사니질 지역에 서식하며 기타 패류들에 비해 환경변화에 민감하지 않은 종으로 알려져

있다. 바지락은 경기도 전 연안 갯벌에서 쉽게 발견할 수 있으며 경기도의 대표 패류로 잘 알려져 있다.

가무락(*Cyclina sinensis*)은 '모시조개'로 불리기도 하며 분류학적으로 연체동물문, 이매패강, 백합목, 백합과에 속하는 종으로 서해, 남해, 베트남, 일본, 중국 등 연안에 서식한다.

서식환경으로 진흙질 갯벌에서 물의 흐름이 완만한 내만이나 연안 근처 좁은 해역에 서식하며 패각은 서식 환경에 따라 검은색 또는 갈색을 띄며 각정부는 다소 높고 앞쪽으로 치우쳐 있으며 가는 성장맥이 규칙적으로 나있고 껍질 둘레는 옅은 보라색이다(권, 1993).

가무락은 패각의 크기에 비해 육질 비중은 적으나 국이나 탕요리에서 구수하고 깊은 맛을 내며 타우린 함량이 높아 요리에 많이 이용된다. 가무락은 경기도 시흥시 오이도 갯벌, 안산시 대부남동 일부 갯벌, 화성시 서신면 일부 갯벌에서 발견되고 있다.

동죽(*Mactra veneriformis*)은 분류학적으로 연체동물문 이매패강, 백합목, 개량조개과에 속하는 종으로 서해, 남해, 베트남, 중국 등의 연안에서 발견되며 서식환경으로 간조시 노출시간이 3~4시간 되며 뻘과 모래가 섞인 굵은 모래질 갯벌에 서식하며 환경 적응성이 좋은 종으로 알려져 있다. 동죽조개는 경기도 시흥시 오이도 갯벌과 안산시 대부북동 일부 갯벌에서 서식하고 있다.

본 연구에서는 경기도 갯벌 패류 자원의 감소 및 다양성 부족 문제에 대하여 다양한 패류자원의 안정적인 종자수급을 위한 연구로 바지락, 가무락, 동죽 3품종의 인공종자 생산 연구를 실시하였다.

첫째로 바지락은 지난 3년간의 대량생산 실험을 통해 올해에는 고밀도 대량생산 안정화 실험을 진행하였고, 둘째로 가무락조개와 동죽조개의 인공종자 생산실험을 진행하였다. 마지막으로 `21년도 연구소 자체 생산 후 살포한 바지락 치패의 살포효과 실험과 `22년도 연구소에서 자체 생산한 어린 조개의 갯벌 현장시험 살포를 진행하였다.

재료 및 방법

1. 바지락 인공종자 고밀도 대량생산 안정화 시험

1.1. 어미확보 및 채란

바지락 종자생산을 위한 어미는 `22년 4월부터 성성숙도 조사를 통해 충분히 성숙한 모패 50kg을 6월 화성시 백미리 어촌계에서 확보하였다. 바지락의 성성숙도 조사 방법은 바지락 생식소 절개 후 생식소 조직을 광학현미경을 이용하여 난모세모와 정모세포의 성숙도를 확인하였다. 확보한 모패의 평균 크기 및 중량, 생식소/육질부 비율(%)은 아래 표 1과 같다.

표 1. 바지락 실험용 모패 크기 및 중량 측정값

각장(㎜)	각고(㎜)	각폭(㎜)	전중(g)	생식소/육질부 비율(%)
37.2±2.0	26.0±1.9	18.1±2.5	11.1±2.0	49.8%

확보한 바지락 50kg 중 모양 및 크기가 양호한 것들만을 선별하여 세척 및 해감 후 산란자극(음건처리, 수온자극)하여 주어 산란을 유도하였다. 채란을 위해 사용한 사육수는 1㎛ 카트리지필터로 여과한 해수를 사용하였으며 8ton 사각수조(6.5m(W) × 1.8m(L) × 1.5m(H)) 3개에 수용하였고 공기를 주입하면서 산소 유지와 교반하였다.

1.2. 유생사육

수조 내에서 방란·방정이 일어나면 약 24시간 경과 후 36㎛ 뮬러가재(수거망)를 이용하여 수정란을 수거한 뒤 여과해수로 3~4회 세란 후 초기 사육밀도가 5~10마리/㎖ 되도록 8ton 패류사육수조 3개에 수용하여 사육하였다. 총 수거된 수정란은 10억 개였으나, 적정 사육을 위하여 수정란 3억 개만 분류하여 실험에 사용하였다.

먹이생물 공급은 *Isochrysis galbana, Chaetoceros gracilis, Pavlova lutheri*를 혼합하여 하루에 사육수조 내 총 3×10^4cell/㎖ 밀도로 3회 나누어 공급해 주었다. 사육수는 1㎛ 카트리지필터로 여과한 해수를 사용하였으며 환수는 2일 간격으로 유생의 크기보다 작은 뮬러가재(수거망)를 이용하여 전량 환수하였다. 사육기간 동안 수온은 23±1℃로 유지하였다.

1.3. 치패사육

사육 15일경부터 일부 족사가 출현하여 침착기 유생으로 발달이 진행되었고, 사육 약 30일경부터 부유유생이 없음을 확인하고 유수식으로 사육하였다. 사육방법은 별도의 침착기질 없이 유수식을 이용한 하류식시스템(Down-Welling system) 방식을 이용하여 사육하였다.

하류식 방법에 사용한 수조는 지름 45㎝ 크기의 원형수조를 이용하였으며 바닥면은 120㎛의 뮬러가재로 물 순환이 잘되며 치패가 빠져나가지 않도록 하였다. 유수량은 1일 2~3회전이 되도록 관리하였으며 사육수는 10㎛ 카트리지필터로 여과한 해수를 사용하였다.

먹이생물 공급은 *Isochrysis galbana, Tetraselmis* sp., *Chaetoceros gracilis, Pavlova lutheri* 4종을 혼합하여 하루에 사육수조 내 총 3×10^4cell/㎖ 밀도로 3회 나누어 공급하다가 치패의 성장에 따라 공급량을 늘려주었다. 수온은 자연해수를 사용하여 사육기간 동안 18~25℃로 유지하였다.

2. 가무락조개 인공종자 생산 시험

2.1. 어미확보 및 채란

가무락 종자생산을 위한 어미는 경기도 시흥시 오이도 어촌계 어장에서 '22년 4월부터 주기적 성성숙도 조사를 수행하여 충분히 성숙한 7~8월 총 40kg을 확보하여 종자생산용 모패로 사용하였고 현미경 관찰을 통해 생식세포를 관찰하였다.

확보한 모패는 평균 크기 및 중량, 생식소/육질부 비율(%)은 아래 표 2과 같다.

표 2. 가무락 종자생산용 모패 크기 및 중량 측정값

각장(㎜)	각고(㎜)	각폭(㎜)	전중(g)	생식소/육질부 비율(%)
49.7±2.0	50.2±2.0	30.0±2.0	40.0±2.0	50.3%

확보한 가무락 40kg 중 모양 및 크기가 양호한 것들만을 선별하여 세척 및 해감 후 산란자극(음건처리, 수온자극)하여 주어 산란을 유도하였다. 채란을 위해 사용한 사육수는 1㎛ 카트리지필터로 여과한 해수를 사용하였으며 8ton 사각수조(6.5m(W) × 1.8m(L) × 1.5m(H)) 2개에 수용하였고 공기를 주입하면서 산소 유지와 교반하였다.

2.2. 유생사육

가무락조개는 수조 내에서 방란·방정이 일어나면 약 24시간 경과 후 36㎛ 뮬러가재(수거망)를 이용하여 수정란을 수거한 뒤 여과해수로 3~4회 세란 후 3~4마리/ml의 밀도로 8ton 사육수조 2개에 수용하여 사육하였다.

먹이생물 공급은 *Isochrysis galbana, Chaetoceros gracilis, Pavlova lutheri*를 혼합하여 하루에 사육수조 내 총 3×10^4cell/mℓ 밀도로 3회 나누어 공급해 주었다.

사육수는 1㎛ 카트리지필터로 여과하여 사용하였으며 환수는 2일 간격으로 유생의 크기보다 작은 사이즈의 뮬러가재(수거망)를 이용하여 전량 환수하였다. 사육수온은 25±2℃로 유지하였고 공기를 약하게 주입하면서 산소 유지와 교반하였다.

2.3. 치패사육

가무락 조개는 사육 6일경부터 일부 족사가 출현하면서 침착기가 시작되어 부유생활을 마치고 수조 바닥으로 가라앉기 시작하였다. 침착기 유생을 100㎛ 뮬러가제로 수거하여 하류식시스템(Down-Welling system) 방식을 이용하여 사육하였다. 하류식 방법에 사용한 수조는 지름 50㎝ 크기의 원형수조를 이용하였으며 바닥면은 120㎛의 뮬러가재로 사육수 순환이 잘되며 치패가 빠져나가지 않도록 하였다. 유수량은 1일 2~3회전이 되도록 관리하였으며 사육수는 10㎛ 카트리지필터로 여과한 해수를 사용하였다.

먹이생물 공급은 *Isochrysis galbana, Tetraselmis* sp., *Chaetoceros gracilis, Pavlova lutheri* 4종을 혼합하여 하루에 사육수조 내 총 3×10^4cell/mℓ 밀도로 3회 공급하였고 치패의 성장에 따라 공급량을 늘려주었다. 사육수온은 자연해수로 사육기간 내내 20±2℃로 유지하였다.

3. 동죽조개 인공종자 생산 시험

3.1. 어미확보 및 채란

동죽조개 종자생산을 위한 어미는 경기도 시흥시 오이도 어촌계 마을어장에서 '22년 4월부터 주기적 성성숙도 조사를 수행하여 충분히 성숙한 5월 동죽 어미조개 60kg을 확보하여 종자생산용 모패로 사용하였다. 확보한 모패는 평균 크기 및 중량, 생식소/육질부 비율(%)은 아래 표 3과 같다.

표 3. 동죽 종자생산용 모패 크기 및 중량 측정값

각장(㎜)	각고(㎜)	각폭(㎜)	전중(g)	생식소/육질부 비율(%)
42.0±2.0	37.0±2.0	28.0±2.0	24.8±2.0	48.5%

확보한 동죽 60kg 중 모양 및 크기가 양호한 것들만을 선별하여 세척 및 해감 후 산란 자극(음건처리, 수온자극)하여 주어 산란을 유도하였다. 채란을 위해 사용한 사육수는 1㎛ 카트리지필터로 여과한 해수를 사용하였으며 8ton 사각수조 2개에 수용 후 산소 유지와 교반하였다.

3.2. 유생사육

동죽조개는 수조 내에서 방란·방정이 일어나면 약 24시간 경과 후 36㎛ 뮬러가재(수거망)로 수정란 수거한 뒤 여과해수로 3~4회 세란 후 3~4마리/ml의 밀도로 8ton 사육수조 2개에 수용하여 사육하였다. 먹이생물은 *Isochrysis* sp., *Chaetoceros* sp., *Pavlova* sp.를 혼합하여 하루에 사육수조 내 총 3×10^4cell/mℓ 밀도로 3회 나누어 공급해 주었다.

환수는 2일 간격으로 전량 환수하였고 사육수온은 20±2℃ 유지, 산소 공급과 교반하였다.

3.2. 치패사육

동죽조개는 사육 13일경부터 일부 족사가 출현하면서 침착기가 시작되어 부유생활을 마치고 수조 바닥으로 가라앉기 시작하였다. 침착기 유생을 100㎛ 뮬러가제로 수거하여 하류식시스템(Down-Welling system) 방식을 이용하여 사육하였다. 사육기질은 모래를 이용하여 어린치패가 잠입을 할 수 있게 해주었다. 유수량은 1일 2~3회전이 되도록 관리하였으며 사육수는 10㎛ 카트리지필터로 여과한 해수를 사용하였다.

먹이생물 공급은 *Isochrysis galbana, Tetraselmis* sp., *Chaetoceros gracilis, Pavlova lutheri* 4종을 혼합하여 하루에 사육수조 내 총 3×10^4cell/mℓ 밀도로 3회 공급하였고 치패의 성장에 따라 공급량을 늘려주었다. 사육수온은 자연해수로 사육기간 내내 20±2℃로 유지하였다.

4. 어린 조개 갯벌 살포 현장시험

4.1. `22년 바지락조개 시험살포 효과조사

`21년 10월 경기도 바지락 자원조성을 위하여 살포한 바지락 인공종자 치패(각장 5mm, 총 300만 마리, 밀도 : 300마리/$m^2$ 살포)의 살포 효과조사를 위하여 살포지역 5개소에 대하여 `22년 8~9월 살포 효과조사를 수행하였다.

표 4. '21년 바지락 현장 갯벌 시험 살포량

총 계	안산시 선감동	안산시 대부북동	화성시 백미리	화성시 제부리	시흥시 오이도
5개소/ 300만 마리	50만 마리	100만 마리	50만 마리	50만 마리	50만 마리

각각의 개소당 무작위로 3개의 정점을 선정하여 m^2내 서식하는 바지락을 채취하였고 분류망을 이용하여 크기별로 분류하였다. `21년도에 살포한 바지락의 크기는 5㎜인 점과 살포 후 자연에서의 1년 성장도를 고려하였을 경우 `22년 10~20㎜ 크기일 것을 고려하여 채집된 10~20㎜인 개체 중 자연 발생량 50%를 제외한 개체를 생존률에 나타내었다.

생존률 계산식(%) : 개체수(10~20㎜ 바지락) × 0.5(자연발생량) / 300 마리(살포량) × 100

4.2. `22년 바지락, 가무락, 동죽 치패 시험 살포

'22년 시험 생산한 바지락 치패(5mm) 500만 마리와 가무락 치패(5mm) 50만 마리, 동죽 치패(10m)는 경기도 연안 갯벌 7개소에 살포하였다. 살포 이전 `22년 7~9월 사전답사 후 치패가 서식하기 적합한 곳을 선정하였고, 국립수산과학원에 방류 협의 요청과 인천수산자원연구소에 질병 검사 후 시험 살포를 진행하였다. 살포 방법은 갯벌이 노출된 후 살포식 방법으로 밀식되지 않도록 균등하게 살포하였다.

5. 먹이생물 배양

패류 먹이생물인 식물플랑크톤 *Isochrysis galbana, Tetraselmis suecica, Chaetoceros gracilis, Pavlova lutheri* 원종은 '22년 군산대학교에서 원종을 확보하였으며, 연구소에서 계대배양을 통해 원종을 유지하고 대량생산에 사용하였다.

식물플랑크톤의 대량생산을 위하여 원종관리 → 소량배양 → 중간배양 → 대량배양의 과정을 거쳐 생산하였다. 소량 배양까지 멸균된 해수를 이용하였으며 중간배양은 70℃, 12시간 가온한 살균해수를 이용하였고 대량배양은 화학처리로 배양수를 준비하여 사용하였다. 배지는 중간배양은 Conway 배지를 대량배양에는 농업용 비료를 이용하였다.

표 5. 패류 먹이생물 배양에 사용된 영양분 구성표(CONWAY MEDIA & Agricultural fertilizer)

CONWAY MEDIA

1. Macro nutrients stock sol.	
1.1 Na2EDTA	45g/L
1.2NaNO3	100g/L
1.3H3BO3	33.6g/L
1.4NaH2PO4·2H2O	20g/L
1.5MnCl2·4H2O	0.4g/L
1.6FeCl3·6H2O	1.3g/L
2번 Micro nutrients	1㎖
- 사용량 1000ppm (1L/1ton) (1번+2번 stock sol. 항목 혼합 후 사용) - 비타민 첨가	

Agricultural fertilizer(ECO-SOL)

1. Macro nutrients (%)	
Total nitrogen(N)	25
Phosphorous(P2O5)	9
Potassium(K2O)	18
Magnesium(MgO)	1
2. Micro nutrients (ppm) : Iron(Fe):250ppm, Manganese(Mn):250ppm, Boron(B2O3):500ppm, Zinc(Zn) : 75ppm, Copper(Cu) : 75ppm, Molybdenum(Mo) : 5	
- 사용량 100 ppm (100g/1ton), 비타민첨가	

결 과

1. 바지락 인공종자 대량생산 안정화 시험

1.1. 어미확보 및 채란

산란 후 1시간 이내에 대부분 수정되어 1,000,000 × 10^3개의 수정란을 생산하였고 그 중 300,000 × 10^3개를 실험에 사용하였다. 극체가 형성된 이후 2 cell, 4 cell, 8 cell이 진행되면서 관찰 6시간 이후부터 유영하는 개체들이 많이 관찰되었다. 수정 24시간 이후 36㎛ 뮬러가재를 이용하여 유생을 전량 수거하였으며, 총 270,000 × 10^3마리의 D형 유생을 수확하였다.

1.2. 유생사육

1차 수확한 유생은 밀도 1㎖당 5~10개체로 수용하여 3개의 수조로 나누어 사육하였다. 수정란에서 D형 유생은 생존율 90%를 나타내었다. D형 유생은 6~8일경 각정기로 접어들었고, 이후 약 15일경부터 족사가 보이는 개체들이 발생하였다. 침착기 유생(연령 15일)은 총 100,000 × 10^3마리로 생존률 37%를 나타내었다. 침착기 구간 족사가 발달하는 2~3일간 가장 높은 폐사가 발생하였다.

표 6. 바지락 초기 유생(15일) 단계별 생존률

구분	수정란(연령 0일)	D형유생(연령 1일)	침착기유생(연령 15일)
개체수(마리)	300,000×10^3	270,000×10^3	100,000×10^3
생존율(%)	100	90	37
각장(㎛)	87	102	186

1.3. 치패사육

생산된 침착기 유생 총 100,000 × 10^3 마리는 하류식시스템에서 약 120일 사육하였다. 하류식시스템 각 수조당 침착기 유생 약 1,000 × 10^3마리씩 입식하여 15일간 사육하였고 1차 선별작업 및 생존·성장을 측정하였다. 연령 30일 총 개체수는 50,000 × 10^3 마리였으며 15일간 폐사율이 50% 발생하였다. 2차 선별 후 각 수조당 500 × 10^3마리씩 입식 한 후 90일간 생존·성장을 측정하였다. 최종 120일간 생산한 어린 바지락의 개체 크기는 각장 평균 7㎜, 생산량 10,000× 10^3 마리였으며 최종 생존율은 3.33%였다.

표 7. 바지락 종자생산(120일) 단계별 생존률

구분	수정란 (연령 0일)	D형유생 (연령 1일)	침착기유생 (연령 15일)	어린조개 (연령 60일)	어린조개 (연령 120일)
개체수(마리)	300,000×10^3	270,000×10^3	100,000×10^3	30,000×10^3	10,000×10^3
생존율(%)	100	90	37	10	3.33
각장(㎛)	87	102	186	1,170	7,800

2. 가무락조개 인공종자 생산 시험

2.1. 어미확보 및 채란

산란 후 1시간 이내에 대부분 수정되어 60,000 × 10^3개의 수정란을 생산하였다. 극체가 형성된 이후 2 cell, 4 cell, 8 cell이 진행되면서 관찰 6시간 이후부터 유영하는 개체들이 많이 관찰되었다. 수정 24시간 이후 36㎛ 뮬러가재를 이용하여 유생을 전량 수거하였으며, 총 50,000 × 10^3마리의 D형 유생을 수확하였다.

2.2. 유생사육

1차 수확한 유생은 밀도 1㎖당 2~3개체로 수용하여 2개의 수조로 나누어 사육하였다. 수정란에서 D형 유생은 생존율 83%를 나타내었다. D형 유생은 3~4일경 각정기로 접어들었고, 이후 약 6일경부터 족사가 보이는 개체들이 발생하였다. 침착기 유생(연령 6일)은 총 15,000 × 10^3마리로 생존률 25%를 나타내었다. 침착기 구간 족사가 발달하는 2~3일간 가장 높은 폐사가 발생하였다.

표 8. 가무락 초기 유생(6일) 단계별 생존률

구분	수정란(연령 0일)	D형유생(연령 1일)	침착기유생(연령 15일)
개체수(마리)	60,000×10^3	50,000×10^3	15,000×10^3
생존율(%)	100	83	25
각장(㎛)	95	133	160

2.3. 치패사육

생산된 침착기 유생 총 15,000 × 10^3 마리는 하류식시스템에서 약 90일 사육하였다. 하류식시스템 각 수조당 침착기 유생 약 300 × 10^3마리씩 입식하여 30일간 사육하였고 1차 선별작업 및 생존·성장을 측정하였다. 연령 36일 총 개체수는 5,000 × 10^3 마리였으며 30일간 폐사율이 66% 발생하였다. 2차 선별 후 각 수조당 100 × 10^3마리씩 입식 한 후 약 60일간 생존·성장을 측정하였다. 최종 90일간 생산한 어린 가무락의 개체 크기는 각장 평균 5㎜, 생산량 600× 10^3 마리였으며 최종 생존율은 1%였다.

표 9. 가무락 종자생산(90일) 단계별 생존률

구분	수정란 (연령 0일)	D형유생 (연령 1일)	침착기유생 (연령 6일)	어린조개 (연령 약 30일)	어린조개 (연령 90일)
개체수(마리)	60,000×10^3	50,000×10^3	15,000×10^3	5,000×10^3	600×10^3
생존율(%)	100	83	25	8.3	1
각장(㎛)	95	133	160	380	5,000

3. 동죽조개 인공종자 생산 시험

3.1. 어미확보 및 채란

산란 후 1시간 이내에 대부분 수정되어 100,000 × 10^3개의 수정란을 생산하였다. 극체가 형성된 이후 2 cell, 4 cell, 8 cell이 진행되면서 관찰 6시간 이후부터 유영하는 개체들이 많이 관찰되었다. 수정 24시간 이후 36㎛ 뮬러가재를 이용하여 유생을 전량 수거하였으며, 총 80,000 × 10^3마리의 D형 유생을 수확하였다.

3.2. 유생사육

1차 수확한 유생은 밀도 1㎖당 3~5개체로 수용하여 2개의 수조로 나누어 사육하였다. 수정란에서 D형 유생은 생존율 80%를 나타내었다. D형 유생은 5~7일경 각정기로 접어들었고, 이후 약 13일경부터 족사가 보이는 개체들이 발생하였다. 침착기 유생(연령 13일)은 총 60,000 × 10^3마리로 생존률 60%를 나타내었다.

표 10. 동죽 초기 유생(13일) 단계별 생존률

구분	수정란(연령 0일)	D형유생(연령 1일)	침착기유생(연령 13일)
개체수(마리)	100,000×10^3	80,000×10^3	60,000×10^3
생존율(%)	100	80	60
각장(㎛)	62	85	221

3.3. 치패사육

생산된 침착기 유생 총 60,000 × 10^3 마리는 하류식시스템에서 약 150일 사육하였다. 하류식시스템 각 수조당 침착기 유생 약 1,000 × 10^3마리씩 입식하여 30일간 사육하였고 1차 선별작업 및 생존·성장을 측정하였다. 연령 45일 총 개체수는 20,000 × 10^3 마리였으며 30일간 폐사율이 66% 발생하였다. 2차 선별 후 각 수조당 500 × 10^3마리씩 입식 한 후 약 100일

간 생존·성장을 측정하였다. 최종 150일간 생산한 어린 동죽의 개체 크기는 각장 평균 10㎜, 생산량 50× 10^3 마리였으며 최종 생존율은 0.05%였다.

표 11. 동죽 종자생산(150일) 단계별 생존률

구분	수정란 (연령 0일)	D형유생 (연령 1일)	침착기유생 (연령 13일)	어린조개 (연령 약 40일)	어린조개 (연령 150일)
개체수(마리)	100,000×10^3	80,000×10^3	60,000×10^3	20,000×10^3	50×10^3
생존율(%)	100	80	60	20	0.05
각장(㎛)	62	85	221	1,500	10,000

4. 어린 조개 갯벌 살포 현장시험

4.1. `22년 바지락조개 시험살포 효과조사

`21년 10월 경기 갯벌 5개소(안산2, 화성2, 시흥1)에 살포한 바지락 치패의 `22년 10월에 측정한 살포 효과조사 결과 평균 생존율 23.0%(최소 1%, 최대 50%), 평균 성장 5㎜ → 1.5㎜의 효과를 나타내었다. 화성시 제부리 갯벌의 바지락 발생량이 대폭 증가하였으며, 시흥시 오이도 갯벌(조사정점 해당)은 니질화가 심하여 대량폐사가 발생하였다.

표 12. 바지락 시험살포 효과조사 결과

정점	'21년 방류량 (마리)	'21년 방류량 (마리/m^2)[A]	'22년 생물량 (개체수/m^2)		방류효과 (생존율 %) [C/A×0.5×100]*
			총 개체수[B]	2㎝ 이하 개체[C]	
5개소	**3,000,000**	-	-	-	**평균 23.0%**
안산시 선감지선	500,000	300	174	60	10%
안산시 대부북동	1,000,000	300	150	100	16.7%
화성시 백미리	500,000	300	420	225	37.5%
화성시 제부리	500,000	300	2,220	1,200	50%**
시흥시 오이도	500,000	300	12	5	1%

*방류효과 생존율 계산식 : 1~2㎝ 마리수(C) × 자연 발생량 50% / 방류량(A) × 100

** 제부리 갯벌은 계산결과 200%이나, 종자 방류시 생존율 50% 넘기 어려움. 서식지 적합으로 최대값 50% 선정

방류지역 바지락 생물량 변화 조사결과 경기갯벌 5개소 중 4개소(화성시 백미리, 화성시 제부리, 안산시 선감지선, 안산시 대부북동)는 `21년 대비 생물량이 증가하였으며 1개소(시흥시 오이도)는 생물량이 2.5배 감소하였다.

표 13. 방류지역 바지락 생물량 변화

정점	`21년 생물량(마리/m^2)	`22년 생물량(마리/m^2)	생물량 증감율
안산시 선감지선	120	174	1.45배↑
안산시 대부북동	80	150	1.90배↑
화성시 백미리	398	420	1.10배↑
화성시 제부리	150	2,200	14.6배↑
시흥시 오이도	30	12	2.50배↓

4.2. `22년 바지락, 가무락, 동죽 치패 시험 살포

`22년 10월 연구소에서 자체 생산한 어린 조개 3종(바지락, 가무락, 동죽) 총 555만 마리를 경기 갯벌 7개소에 시험 살포하였다(바지락 500만[5개소], 가무락 50만[1개소], 동죽5만[1개소]).

표 14. `22년 바지락, 가무락, 동죽 시험 살포

품종	크기	방류량	방류정점
계	-	-	**7개소**
바지락	5㎜	500만 마리	안산2(섬감지선,흥성리), 화성2(백미리,제부리), 시흥1(오이도)
가무락	5㎜	50만 마리	시흥1(오이도)
동죽	10㎜	5만 마리	시흥1(오이도)

고 찰

경기도에서 생산되는 패류 종으로는 바지락, 굴류, 고둥류 등 총 9종이 있으며 우선으로 자원조성이 필요하고 지역 정착이 가능할 것으로 판단되는 바지락, 동죽, 가무락 3종을 선정하여 시험연구를 진행하였다.

이 중 바지락은 지난 3년간 대량생산 시험을 진행하였고 올해는 대량생산 안정화 실험을 진행하여 총 1,000만 마리의 어린 바지락을 생산하였다. 사육법으로 하류식 시스템 도입으로 기존 바닥식 방법보다 생산력이 10배 이상 향상되었으며 종자생산 과정 시 수행되는 매일 환수 등의 과정이 줄어들어 노동력 측면 또한 향상되었다. 연구소의 바지락 종자 대량생산은 안정적 기술을 확보하였으나 방류를 통한 안정적 자원증진을 위해서는 최소 1억 마리 이상 생산이 요구되기에 아직 더 높은 생산성 향상을 위한 추가 실험이 필요하다.

가무락조개는 종자생산 방법이 어려운 품종으로 잘 알려져 있고, 종자생산 방법에 대한 선행연구가 많이 미흡한 종이다. 가무락 종자 대량생산 결과는 국내에서는 최초이며 국외 일부 논문에서 초기 단계 종자생산에 성공한 결과가 있으나 타 종에 비해 사례가 많이 부족하다. 올해 연구소는 어린 가무락 5㎜ 개체 60만 마리, 1%의 낮은 생존율 결과를 나타내었다. 가무락은 기타 패류종 보다 산란이 늦어(7~8월) 방류를 수행하기 위한 사육기간이 짧다는 어려움이 있다. 게다가 사육시 수질관리가 어려운 부분과 초기 성장이 느려 초기에 대량 폐사가 발생 되는 등의 어려움이 있다. 올해 가무락 종자생산 성공의 원인으로는 폐사율이 가장 높은 침착기로 변하는 시기에 하류식시스템 도입으로 환수시 발생하는 외부요인에 대한 폐사율을 줄일 수 있었던 점과 사육시 선별을 통한 폐사 개체간의 오염을 줄인 것이 원인으로 보여진다. 하지만 아직 낮은 성장성을 해결하기 위한 연구와

생존율 향상 연구가 추가로 필요하다.

동죽조개는 지난 실험에서 침착기 구간 전량 폐사하여 어린 조개 생산을 성공하지 못하였지만 올해 처음으로 어린 조개(10㎜) 5만 마리를 생산 성공하였다.

`21년 살포한 바지락 치패 시험살포 효과조사 결과는 `22년 평균 생존율 23.0%, 평균 성장 0.5㎝ → 1.5㎝ 결과를 보였다. 정점별 생존율 차이가 크게 났으며 최고 생존율 50.0%(화성 제부리), 최저 생존율 1.0%(시흥 오이도)로 나타났다. 생존율이 낮은 시흥 오이도는 저질 변화(니질화)가 매우 크게 발생하여 방류효과가 낮은 결과를 보였다.

`23년에는 패류 종자생산 기술개발 내용으로 기존 3종(바지락, 가무락, 동죽)에 대한 연구를 더욱 강화하여 생산력을 높이는 연구와 신규로 1종(새조개)을 추가로 연구하여 기후변화 대비 특화 품종개발을 위한 연구를 수행하여 고밀도 생산기술 확립과 연구소 내 다양한 품종연구의 기반을 다지고자 한다.

참 고 문 헌

- 김용호, 한국 서해산 가무락조개, *Cyclina sinensis*의 번식생태 및 기생충에 관한 연구. 2000.
- 경상남도 수산자원연구소 시험연구사업보고서. 2017~2019.
- 농림수산식품부 사업보고서(가무락 인공종패생산 가능성 시험). 2008
- 이재경, 바지락(*Ruditapes philippinarum*) 자원회복을 위한 어장조성 모델. 2016
- 인천광역시 수산자원연구소 시험연구사업보고서. 2013.
- 월간 아쿠아인포 부록 No.3 (2015). 패류종묘생산기술.
- 유성규, 천해양식, 2000.
- 수산정보포털. 2022.
- Wenshan Liu, Rearing Venus clam seeds, Cyclina sinensis (Gmelin), on a commercial scale. 2002.

새우류 생산기술 개발

임성률 · 김광범 · 김봉현

서 론

흰다리새우(*Litopenaeus vannamei*, whiteleg shrimp)는 보리새우과(Family Penaeidae)에 속하는 새우로 연중 수온이 20℃ 이상인 멕시코에서 페루에 이르는 중남미 태평양 동부 연안의 열대 해역이 자연 서식지이다. 주 생산국가는 중국, 인도네시아, 인도, 에콰도르, 베트남, 태국, 멕시코이며 광염성(1~40 psu), 질병저항성, 빠른 성장, 높은 생존율 등 장점이 있어 많은 국가에서 양식되고 있다.

대하(*Fenneropenaeus chinensis*, fleshy prawn)는 온대에서 아열대에 걸쳐 넓게 분포하고 있는 보리새우 속중 우리나라 서해 연안의 천해에 분포하고 있는 대표적인 새우이며 크기 50mm, 체장 200mm, 무게 70g 이상까지 자라는 대형종이다(해양수산부, 2000).

국내 새우류 양식은 2000년 초까지 대하가 양식되다가 2000년경부터 흰반점바이러스병으로 인하여 대량폐사가 발생하였으며, 이에 대한 대책으로 흰반점바이러스병에 강한 품종인 흰다리새우(아열대성 새우)가 2003년 하와이로부터 도입되어 현재까지 국내 양식되는 새우는 대부분 흰다리새우가 차지하고 있다(표 1).

표 1. 최근 3년간 대하와 흰다리새우 양식 생산량

년도	대하		흰다리새우	
	생산량(톤)	금액(억원)	생산량(톤)	금액(억원)
`22년	0	0	9.504	1,683
`21년	0	0	9,545	1,537
`20년	1	0.29	8,124	1,392

※출처 : 수산정보포털 (https://www.fips.go.kr/)

흰다리새우는 도입시기에는 흰반점바이러스병에 강하였으나 점차 질병감염으로 인한 피해가 늘어나고 있다. 이에 대한 대책을 마련하기 위해 다양한 방법이 연구되었는데, 흰반점바이러스병의 병원체를 원천 차단하거나 병원성을 약하게 만드는 환경을 조성하는 방법이 이용되고 있다.

병원체 차단하는 폐쇄식 BFT방식으로 흰다리새우 중간육성 시스템은 5~7kg/㎥, 집약적 못 양식시스템은 10~12kg/㎥, 반집약적 못 양식시스템은 2.5~4kg/㎥을 생산하고 있다.

또 다른 방법은 바이러스 병원체의 활성을 낮추고 항병력을 증강 시키는 방법으로 사육수 염분농도를 낮추거나 β-glucan을 투여하는 방법이 있다. 흰다리새우는 저염도에서도 성장이 가능하며 수질에 강한 편이다(Davis et al., 2004).

경기도의 경우 연안에 인접한 평택, 화성일대 양식장에서 저염분의 지하수를 이용하여 흰다리새우를 양식하고 있다. 내륙의 지하수를 이용한 흰다리새우 양식장은 사료 과다 투여, 조류 물변화 등으로 암모니아, 아질산 수치가 높아져 대량폐사가 자주 발생하고 있다.

국내 흰다리새우 양식생산량은 2019년까지 7,542톤이 생산되었으나 2020년 8,124톤, 2021년 9,545톤을 생산하여 꾸준히 증가하는 추세다. 경기도는 2021년 기준, 흰다리새우 양식장 28개소에서 411톤을 생산하였으며, 이는 2020년 생산량 256톤의 약 1.6배, 전국생산량의 4.3%에 해당한다(그림 1).

흰다리새우의 종자 공급은 전국 6개소(충남3, 전남2, 제주1)에서 이루어지고 축제식 또는 BFT방식으로 양식하고 있다.

새우류의 수입량은 2019년 68,563톤에서 2020년 65,220톤, 2021년 65,502톤으로 매년 65,000톤 이상 수입되고 있으며 수입금액은 5천억을 상회하고 있다(그림2).

본 연구는 최근 양식 생산이 지속적으로 확대되고 있는 흰다리새우의 월동어미를 이용한 종자생산 가능성을 검증하고 질병발생과 환경으로 인해 생산량이 급감한 대하의 종자생산 기술을 개발하고 보급함으로써 어업인들의 안정적인 새우양식을 지원하는데 목적이 있다.



그림 1. 국내 및 경기도 흰다리새우 양식생산량(단위: 톤), ※ 출처 : 수산정보포털

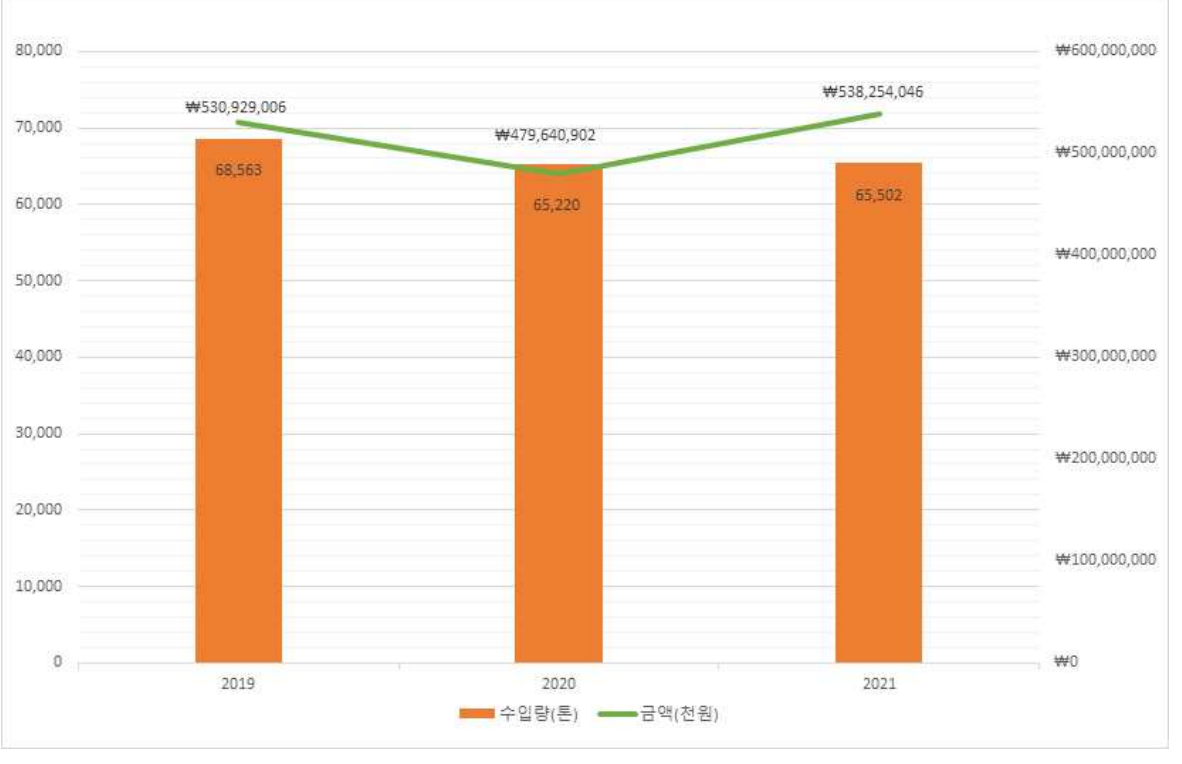


그림 2. 새우류 수입량(단위: 톤), ※ 출처 : 수산정보포털

재료 및 방법

1. 종자생산 시설

흰다리새우 및 대하 종자생산용 사육수조는 28톤 수조(Φ6.0m×h1.0) 5개를 이용하였다. 이 중 흰다리새우 암컷수조 1개, 수컷수조 1개는 겨울철 월동관리로 수온을 각각 23℃, 20℃ 이상으로 유지시켜 주었다. 대하는 28톤 수조(Φ6.0m×h1.0m) 1개 수조를 이용하였다. 어미새우를 입식하기 전 수조 및 에어스톤 등을 염소로 소독하고 담수로 세척, 건조 후 종자생산에 이용하였다. 흰다리새우 및 대하의 종자생산 시설은 일반적으로 지수식을 사용하기 때문에 수조 바닥의 배설물과 유기물 배출을 위해 40~50개의 에어스톤을 설치하였다(그림 3).

2. 어미새우 확보

흰다리새우 어미는 기 2021년 기 구입하여 20~23℃에서 월동 관리한 개체 100마리를 이용하였고 대하 어미는 산란기인 5월1일~6월30일 전 4월 말에 전남 고흥지역 일대에서 포획한 성숙한 암컷 60마리를 구입하여 이용하였다(그림 4). 어미새우는 1톤 활어 수송차에 산소를 공급하고 15~16℃로 적정 수온을 유지하여 수송하였으며, 수송 직후 산란유도 수조에 수용하였다.

3. 산란유도

흰다리새우 산란유도는 겨울철 월동관리 한 암컷 50마리와 수컷 50마리(암수비율 1:1)를 어두운 실내 수조에 수용하여 암컷은 28℃, 수컷은 25℃전후로 관리하였다. 성숙수조에 수용 일주일 후 생식소 성숙과 탈피 촉진을 위해 암컷의 한 쪽 눈자루를 절제(안병절제)하여 수용하였다(그림 5).

대하의 산란유도는 어미대하를 채란용 28톤 수조 2개 수조에 각 30마리씩 수용하였고, 수온을 18~21℃까지 상승하여 수온자극으로 산란유도를 실시하였다. 산란의 유도는 충분한 양이 산란되었을 경우 다음 수조로 어미를 이동 수용하여 산란을 유도하였다.

4. 유생관리 및 사료공급

가. 유생관리(흰다리새우, 대하)

수질관리는 노플리우스, 조에아 단계에서 지수식으로 관리하고 매일 전체 수량의 10%를 증가시켜 주었다. 미시스, 후기 유생단계는 매일 전체 수량의 20% 환수 및 유수식 관리가 일반적이나 조에아 단계에서 수질악화로 인한 전량폐사가 발생하였다. 수조내 수질관리를 위해 수질정화제를 매일 오후 17:00에 1g/1ton의 농도로 살포하여 주었다.

나. 사료공급(흰다리새우, 대하)

사료공급은 모든 유생단계(조에아~미시스)에서 4시간 간격으로 6회/일 공급하였다.

종자생산 기간 동안 배합사료는 유생 단계별로 입자크기를 달리하여 메쉬로 거른 후 해수에 풀어 사육수조 전체에 골고루 공급하였다(그림 6).

그림 3. 흰다리새우 월동관리 및 대하 사육지

결과 및 고찰

1. 어미새우 산란

가. 흰다리새우

흰다리새우는 일몰 직후 교미행동을 관찰할 수 있었으며 다음과 같았다. 1)수컷이 걸어서 뒤쪽에서 암컷 가까이 접근, 2) 수컷이 암컷의 꼬리 아래로 파고듬, 3) 수컷이 암컷과 나란히 옆에서 쫓아다님, 4) 수컷이 복부를 위로 돌려 암컷의 몸에 붙임. 3)의 과정까지 관찰할 수 있었고 교미전을 붙이는 단계는 순식간에 이루어져 관찰이 어려웠다. 하지만 이후 정포를 부착한 암컷을 관찰할 수 있었다. 흰다리새우의 산란은 정포 부착 후 2시간 정도에 이루어졌다. 하지만 발생과정에서 노플리우스로 부화되지 못하고 전량 폐사하였다. 일반적으로 흰다리새우가 발생과정에서 유생으로 변태하지 못하는 경우는 어미의 성숙 상태로 판단할 수 있다. 그 주요 원인으로 보온덮개 시설을 하였으나 겨울철 해수의 수온이 너무 낮아 가온을 하여도 25℃이상 지속적으로 유지가 힘들었던 것이 가장 큰 원인으로 추정되며 흰다리새우의 냉동먹이인 냉동염장갯지렁이, 냉동바지락, 냉동오징어와 배합사료 공급에 원인이 있었던 것으로 추정된다. 특히 갯지렁이는 흰다리새우의 성숙에 가장 큰 영향을 끼치는 먹이로 알려져 있어 향후 살아있는 갯지렁이의 공급도 고려해야 할 것으로 생각된다.

나. 대하

어미대하의 산란은 2022년 4월 30일 자연산 어미로 구입한 대하 60마리를 28톤 수조 2개에 각각 나누어 수용하였고 22시~02시에 수일에 걸쳐 부분 산란하였다. 3회에 걸쳐 산란하였고 총 산란량은 1,000만개로 산란 시 수심은 40cm, 수온은 20~21℃를 유지하였다.

2. 유생사육 관리

대하는 산란 후 바로 다음 날 노플리우스 단계로 부화하였다. 노플리우스 유생기간은 3~4일이 소요되었다. 조에아 단계로 발달직전 미리 해산 로티퍼를 공급하여 자연 먹이에 대한 적응을 유도하였다

부화 후 4~5일 째 조에아 단계로 발달하였고 조에아 시기부터 먹이를 공급하기 시작하였다. 먹이는 자연먹이로 연구소에서 자체 대량배양한 *Isochrysis galbana., Chaetoceros gracilis. Tetraselmis sp.*를 이용하였고 시판용 배합사료와 자연먹이를 4시간(7시, 11시, 15시, 19시,

23시, 03시/일) 간격으로 공급하였다. 하지만 조에아 1기 단계에서 단눈이 형성된 후 1기에서 미시스 단계로 발달하지 못하고 폐사하였다. 그 원인으로는 자연먹이 공급량의 조절이 어려워 과도하게 공급되었던 자연먹이가 죽어서 수조의 바닥에 쌓이게 되고 그 상태에서 배합사료의 공급이 추가로 이루어졌기 때문에 수질이 악화되어 폐사한 것이 가장 큰 원인으로 추정된다. 일반적으로 대하 양식장은 자연먹이로 물만들기 후 배합사료와 자연먹이를 적정량 공급하는데 지자체 연구소에서는 배합사료만으로도 대하 종자크기까지 성장시킨 사례가 있어 향후 수질관리에 용이한 배합사료만으로 공급하는 방안도 고려해야할 것으로 생각된다.

참 고 문 헌

- 해양수산부, 2000. 대하(*Fenneropenaeus chinensis*)의 친하 관리와 성 성숙 조절에 의한 수정란 대량확보 기술개발. 166pp.
- 해양수산부 국립수산과학원. 2018. 흰다리새우 양식표준매뉴얼.
- 해양수산부 수산정보포털(https://www.fips.go.kr/)
- Davis, D. Allen, Samocha, Tzachi M., Boyd, C. E. 2004. Acclimating Pacific white shrimp, *Litopenaeus vannamei*, to inland, low-salinity waters. Stoneville, Mississippi: Southern Regional Aquaculture Center.

해조류 양식기술 개발

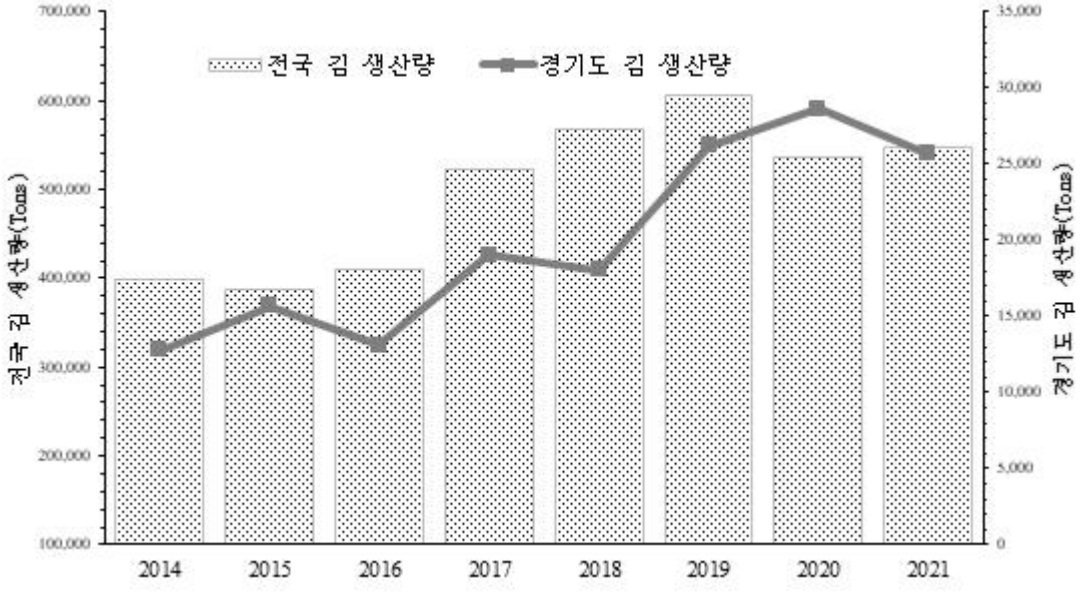
- 경기만 해조류(김) 종자 발굴 및 양식기술 개발-

김성민 · 김달영 · 김병권 · 배재용 · 이승진 · 임성률 · 김봉현

서 론

김은 우리나라에서 역사적으로 가장 오래된 주요 양식 종으로써 대나무 섶을 이용한 양식법을 시작으로 지주식 망홍 방식으로 거쳐 현재의 부류식 양식법까지 양식생산성을 높이기 위한 양식법을 고안하고 개발하며 발전해왔다. 특히, 1960년대 이후 김 종묘 개발, 시설자재의 발전, 어장의 확대, 냉장·냉동망의 보급 및 중성포자망 이용 등 김 양식산업 전반이 발전함으로써, 지난 10여년의 양식생산량이 최저 2010년 235,534톤에서 2021년에는 547,413톤으로 증가하는 등 비약적인 양식생산성 증가로 이어졌다(수산통계, 2021).

마찬가지로 경기도 김 양식 생산량 또한 지난 10년간 증가하여 2010년 12,405톤에서 2021년 25,692톤으로 생산량이 증가하였을 뿐만아니라 김 양식 시설량도 2017년 31,774책에서 2022년 49,640책으로 증가하고 있는 추세이다(경기도 자체통계, 2022).



이러한 경기도 김 양식업은 겨울철 수온이 남해안보다 상대적으로 낮고 생장에 적합한 수온 기간이 길어 상대적으로 양식 어기가 길고 갯병 발생율이 낮은 장점이 있다. 뿐만아니라 경기만은 지리적으로 담수 유입이 원활하여 김 양식 시 필요한 영양염을 쉽게 얻을 수 있어 김 양식에 유리한 점이 있다.

그러나 현재 경기도 김 양식은 전남·충남 지역의 김 패각 종자를 분양받아 봉투식 채묘 방법으로 설치할 김발에 포자를 직접 부착시켜 양식하거나, 충남·경남지역의 육상에서 종자를 채묘하여 김 유엽이 부착된 김발을 분양받아 양식장에 설치하여 양성하고 있다.

따라서 경기도 김 양식은 전남·충남 지역에서 이용되는 김 종자를 분양받아 경기도 해역에 그대로 이식시켜 양식을 하므로 종자 자체의 생태학적 적응의 문제점(성장 약세 및 병해 등)을 안고 양식을 해야하므로 위와 같이 김 양식에 적합한 환경조건에도 불구하고 책당 생산량은 2017년 535kg/책에서 2022년 475kg/책으로 낮아지고 있는 추세에 있다.

따라서, 본 연구는 경기도에 양식하기에 적합한 김 종자를 개발하기 위해서 경기만에 자생하는 김의 종류와 종자를 확보하여 종자 및 엽체의 생장 특성을 구명할 뿐만 아니라 경기도 김 양식 현장에 적용 가능성을 확인하고자 한다.

당해연도 연구는 경기만에서 자생하고 있는 김 시료를 채취하고 종자를 유도하여 경기만 품종을 확보한 뒤 그 중에 우량한 종자를 선별하여 해상에서 시험재배를 하였으며, 이에 따르는 각종 배양 기법, 종자 대량 배양 및 유전계통 분석 등을 수행하였다.

재료 및 방법

1. 해조류(김) 양식개발 기반 구축

가. 해조류(김) 엽체 확보 및 종자 유도·관리

김의 생활사는 9~10월에 육안으로 확인이 가능할 정도로 유엽에 성장하여 수온이 하강하는 11월부터 이듬해 2~3월까지 번무한다. 따라서 김 종자를 확보하기 위해서는 유엽이 성장하는 11월경부터 이듬해 3월까지 건강하고 우량한 형질을 지닌 엽체를 확보하는 것이 중요하다.

대부분 어가에서 선호하는 우량한 형질이란 성장이 우수하고, 병해에 강할 뿐만 아니라, 해당 해역에 적응하여 김 양식 어기 동안 꾸준하게 채취할 수 있는 것을 의미한다. 따라서 건강하고 우량한 김 종자를 확보하기 위하여 다양한 경기만 내 도서 지역을 방문하고 성장이 우수하거나, 해역에 적응하여 자생하고 있는 엽체를 채취하여 종자를 유도하였다.

채취한 엽체에서 김 종자 유도 방법으로는 엽체의 정단이나 가장자리를 육안이나 현미경으로 검경하여 성숙 부위를 확인한 후 담수로 엽체를 씻은 뒤, 2~3cm 크기로 잘라 6 well-plate에 여과 멸균 해수에서 과포자를 유도하였다. 이 후 약 2~3주가 지나 Well-plate 바닥에 흑갈색

반점이 생기면 화염멸균한 칼이나 포셉으로 바닥의 사상체를 긁거나 해당 부분을 분리하여 P.E.S 배지를 채운 Well-plate로 다시 옮긴다.

분리한 Well-plate에 약 2~3mm 가량의 사상체 덩어리가 생기면 삼각플라스크에 옮긴 후 3 ~ 4주마다 계대 배양하여 사상체 건강도를 유지하였고, 모든 확보된 종자는 해조류 연구동 내 종자배양실에서 관리하였다.

표 2. 김 종자(사상체)배양실 관리 환경 조건

Temperature(℃)	Light quantity(lx)	L : D cycle	Gas flowrate(vvm)
17~19	2,000~3,000	12 : 12	0.04

나. 해조류(김) 유전자 분석

1) 게놈 DNA 추출

'21년에 확보한 김 종자의 분자계통 분석과 더불어 나아가 유전자 마커 개발을 할 수 있는 기반을 마련하기 위하여 MOU 기관인 아쿠아진텍㈜에 의뢰하여 18S 리보솜 RNA 유전자(18S rDNA)와 엽록체 ribulose-1,5-biphosphate carboxylase/oxygenase large subunit 유전자(rbcl) 영역의 DNA 염기서열을 해독하여 분석하였다.

먼저 게놈 DNA 추출하기 위하여 Ashahida et al. (2006), DNeasy Blood & Tissue Kit(QIAGEN, Germany) 2가지 방법을 병행하였으며, 먼저 Ashahida et al. (2006) 방법으로는 멸균가위와 핀셋으로 적절한 크기로 시료를 잘라 1.5ml 튜브에 넣은뒤 DNA 추출용액(10 mM Tris-HCl pH 8.0; 125 mM NaCl; 10 mM EDTA pH 8.0; 1% SDS; 8 M Urea) (Asahida et al. 1996) 600 µl와 Proteinase K 용액(20 mg/ml) 6 µl를 넣고 60°C에서 12시간 동안 반응시켰다. 그 다음 PCI 용액 600 µl를 첨가하여 볼텍서에서 강하게 흔들고 10분 동안 교반기를 이용하여 섞은 후, 13,000 rpm에서 5분 동안 원심한 뒤 상층액 400 µl를 새로운 튜브에 옮기고 아세트산나트륨 0.1배와 100% 에탄올 2배를 첨가하였다.

해당 샘플을 위아래로 섞으면서 게놈 DNA 다발 생성을 확인한 뒤 실온에 10분간 방치 후 13,000rpm에서 5분동안 원심하고 상층액 제거 후 다시 70% 에탄올 700µl를 첨가하고 다시 13,000rpm에서 1분간 원심분리한 다음 상층액을 제거한 후 바닥에 남은 에탄올을 제거하고 뚜껑을 열어 둔 채로 60°C에서 약 10분 동안 방치하였다.

에탄올이 모두 제거된 샘플에 TE 완충액[10 mM Tris.HCl (pH 8.0), 1 mM EDTA (pH 8.0)] 50 µl을 첨가하고 실온에서 약 10분 동안 방치한 뒤 분광광도계(spectrophotometer) (DS-11, DeNovix)를 이용하여 추출된 게놈 DNA의 흡광도(A260/280)를 측정하여 그 농도와 순도를 확인한다. TE 용액을 이용하여 게놈 DNA의 농도를 20 ng/µl로 희석한 후 분석에 사용하기 전까지 -20°C에 보관하였다. 이외에 다른 방법인 DNeasy Blood & Tissue Kit를 이용한 게놈 DNA 추출은 제조사에서 제공한 프로토콜에 따라 추출하였다.

2) DNA 염기서열 해독과 분석

(가) PCR 프라이머 조합 설계

미국국립생물정보센터(National Center for Biotechnology Information)의 GenBank 데이터베이스에서 김류(*Porphyra* spp.)를 비롯한 이와 근연한 분류군들의 유전체 정보를 내려받아 진핵생물 핵 18S 리보솜 RNA 유전자(18S rDNA)와 엽록체 ribulose-1,5-bisphosphate carboxylase/oxygenase large subunit 유전자(rbcL)를 중심으로 이와 인접한 유전자들의 핵산 염기서열 정보를 비교분석하여 보존성이 높은 영역을 탐색하였다. 이를 바탕으로 PCR 증폭반응을 위한 잠재적으로 프라이머 사이트를 결정하고 Oligonucleotide를 설계하고 합성하였다. 이렇게 새롭게 설계된 PCR 프라이머 조합을 이용한 PCR 증폭반응을 아래와 같이 진행하였다.

(나) PCR 증폭반응과 정제

핵 18S 리보솜 RNA 유전자(18S rDNA)와 엽록체 ribulose-1,5-bisphosphate carboxylase/oxygenase large subunit 유전자(rbcL) 영역의 PCR 증폭반응을 수행하기 위해 AccuPower® PCR PreMix (바이오니아, 대한민국)를 이용하여 아래와 같이 PCR 반응액을 만들었다.

표 3. PCR 반응액 조제

Reagent	Amount
Genomic DNA (20 ng/μl)	1 μl
Forward primer (5 pmol)	1 μl
Reverse primer (5 pmol)	1 μl
PCR-grade water	17 μl
Total	20 μl

다음, PCR 증폭장치 ProFlex PCR System (Thermo Fisher Scientific, 미국)을 이용하여 아래와 같은 조건으로 PCR 증폭반응을 수행하였다. 그 결과 생성된 PCR 증폭산물은 AccuPrep® PCR Purification Kit (바이오니아, 대한민국)의 사용자 설명서를 참조하여 정제하였다.

표 4. PCR 증폭반응 조건

Step	Temperature	Time	No. cycles
Initial denaturation	95˚C	5 min	1
Denaturation	95˚C	20 s	35
Annealing	55˚C	20 s	
Elongation	72˚C	2 min	
Final elongation	72˚C	5 min	1
Storage	8˚C	∞	1

(다) DNA 염기서열 정보 해독과 편집

정제된 PCR 증폭산물은 BTSeq™ 기술(㈜셀레믹스)을 이용하여 DNA 염기서열을 해독하였다. 생성된 원본데이터는 BioEdit 7.2.5 (http://www.mbio.ncsu.edu/bioedit/bioedit.html) (Biological Sequence Alignment Editor) (Hall 1999)를 이용하여 오류를 수정하고 불필요한 부분을 적절히 잘라냈다. 편집된 DNA 염기서열은 미국 국립생물정보센터(National Center for Biotechnology Information, NCBI)의 BLAST 검색(http://blast.ncbi.nlm.nih.gov/)을 이용하여 GenBank 데이터베이스와 비교하였다.

(라) 분자계통수 작성

GenBank에 등록된 근연종들의 DNA 염기서열을 내려받아 이번에 해독된 해양 홍조식물 김류를 대상으로 MEGA 7 (http://www.megasoftware.net/) (Kumar et al. 2006)를 이용하여 근린접합(Neighbor-Joining, NJ) 분자계통수를 작성하였다. 이때 적용된 분석모델은 Kimura 2-parameter이었으며, 각 분지의 지지도는 부트스트래핑(bootstrapping)을 총 1,000회 수행하여 산출하였다.

2. 해조류(김) 종자 대량배양 및 패각이식

가. 해조류(김) 종자 대량배양 및 패각 잠입

경기만 각지에서 확보한 김 종자의 형질이 우수하고 병해에도 강하더라도 그 종자의 배양 자체가 어렵거나 오염에 취약하고 대량 배양이 어렵다면 종자 개발로 나아가기 힘들다.

따라서, 확보한 종자가 우량한 형질도 갖고 있어야 하지만 대량 배양이 되는 것 또한 필수적이다. 그러므로 본 시험연구 시 1L 둥근 플라스크 기준으로 배양 시 Wet biomass가 약 1,000mg~3,000mg 가량 성장하는 것을 대량 배양의 기준점으로 설정하였고, 이를 선별하기 위하여 분리되어 확보한 종자를 대상으로 대량 배양 가능성을 시험하였다.

대량 배양은 둥근 플라스크 1L 이상 배양하는 것으로, 배양 배지는 기존의 P.E.S 배지를 그대로 사용하였으며 온도는 약 20±1℃, 광량은 약 2,000lx, L:D cycle은 12 : 12로 맞추었으며 공기공급은 약 0.04vvm 정도로 교반이 원활할 수 있도록 하였다.

뿐만 아니라 일반적으로 현재 김 양식 산업에서 사용되고 있는 채묘 방법으로 패각 종자를 이용한 채묘방식이 주로 사용되므로 안정적으로 김 종자를 보급하고 개발하기 위해서는대상 종자를 패각으로 이식하고 관리하는 것 또한 필수적이다.

특히 이번 해에는 기존에 종자 이식에 사용하던 중국산 패각의 수입이 코로나 19로 인해 어려워졌을 뿐만아니라 그에 따라 패각 구입 가격이 상승되는 등 장기적으로 중국산 패각 수급이 어려워 질 것으로 판단되어 남해안에서 양식하고 폐기되는 한국산 굴 패각을 물리적 처리를 한 후 미생물로 최종 처리하여 패각 이식에 사용하였다.

따라서 개발하고자 하는 김 종자를 패각으로 이식하기 위하여 Wet biomass 기준으로

이식하고자 하는 1 패각 당 종자량이 약 80~100mg가 되도록 종자를 대량 배양하여 준비하였으며 배양된 종자는 패각 이식 전 믹서기에 넣고 길이가 약 150㎛~250㎛이 되도록 현미경으로 검경하며 세단하였다. 믹서기로 세단 시 배양액의 온도가 오르지 않도록 주의하였으며, 세단한 종자는 물뿌리개에 넣은 후 준비된 패각에 뿌려주는 방법으로 이식하였다.

이 때의 패각은 흰 면이 천장 방향을 보도록 패각을 배치하였고 이식한 후 5 ~ 7일간은 암처리하고 최대한 배양액의 유동이 없도록 조치하여 총 3 ~ 4주간 배양하였다.

나. 해조류(김) 패각 종자 관리

겨울철에 번무하는 김은 수온이 높아지는 3월경부터 접합포자를 방출하여 복상체인 사상체의 형태로 바뀌어 여름을 나게 되는데, 이에 착안하여 패각으로 막 이식한 종자 또한 자연환경(10~15℃, 3,000~5,000lx, 1.020~1.024 등)과 유사하게 맞추어 주는 것이 필요하다. 따라서, 2 ~ 3월경에 종자배양실에서 이식하고자 하는 종자를 대량 배양 후 패각으로 이식하고 해조류연구동의 트랙수조에서 수하식으로 패각을 관리하였다. 수하식으로 패각을 관리 시 패각의 상하의 성장이 불균형해질 수 있으므로 1주일에 한번 패각 아래위를 바꾸어주며 관리하였으며 3주마다 수조를 50% 환수하여 영양염을 보충할 수 있도록 하였다. 그 외에 시기별로 배양환경 조성조건은 다음 표와 같다.

표 5. 시기별 패각종자 배양환경 조성조건

<table>
<tr><th>월별
항목</th><th>2월</th><th>3월</th><th>4월</th><th>5월</th><th>6월</th><th>7월</th><th>8월</th><th>9월</th><th>10월</th></tr>
<tr><td>광 량</td><td colspan="5">1,000~3,000lx, 규조 발생되지 않을 정도</td><td colspan="2">약 3,500lx</td><td colspan="2" rowspan="2">극단적인 자극X</td></tr>
<tr><td>수 온</td><td colspan="2">10~15℃</td><td colspan="3">10~24℃</td><td colspan="2">28℃이하</td></tr>
<tr><td>비 중</td><td colspan="5">1.020~1.024</td><td colspan="2">1.023~1.024</td><td colspan="2">1.022~1.023</td></tr>
<tr><td>생육단계</td><td colspan="3">과포자부착기</td><td colspan="4">포자낭형성기</td><td>성숙기</td><td>채묘기</td></tr>
</table>

여름철 고수온기에 패각 종자는 각 포자낭을 활발히 형성하고 채묘시기(약 9월~10월경)에 가까워질때는 각포자 방출부위인 개구부를 형성한 뒤 각포자를 방출하게 된다. 따라서, 고수온기 이후에 수온이 떨어지는 시기에는 수조 내에서 포자가 방출되지 않도록 온도, 비중 등 이 급변하지 않도록 관리해주었으며 이를 확인하기 위하여 시기별로 패각 내 각포자낭 형성과 성숙 정도를 확인하고 관찰하였다.

3. 해조류(김) 해상 채묘 및 재배

가. 해조류(김) 종자 해상채묘

김은 고수온기에 각포자낭을 형성하고, 9~10월경에 각포자낭 끝의 개구부에서 일제히 방출하여 기질에 부착한 뒤 어린 유엽으로 자라게 된다. 따라서 실내 트랙수조에서 관리하던 패각 종자의 각포자낭 형성여부를 관찰하여 적당히 성숙한 패각 종자를 선별한 뒤 500mm × 800mm 크기에 비닐봉투에 2개씩 담아 해상채묘에 사용하였다. 이 때 비닐 봉투는 채묘에 사용될 김 해태망(2.2m × 40m)에 노끈을 이용하여 부착하였으며, 패각이 건조해지거나 담수에 노출되지 않도록 유의하였다.

채묘 준비를 끝낸 패각은 제부도 인근 (37,1016, 126.3630)에 제부수산 소유의 종자 채묘 양성장에서 약 3 ~ 4주간 해상에서 채묘하였으며, 해당 해역의 해상 기후에 따라 유엽의 부착과 생장 등을 관찰하였다.

나. 해조류(김) 해상재배 시험

유엽의 크기가 약 3~5cm가량으로 육안으로 확인이 가능할 때에는 보다 해수 흐름이 좋은 곳에서 유엽의 성장을 촉진하는 것이 필요하므로 겹망으로 채묘한 망을 분리한 후 김 양성장으로 옮겨야 한다.

따라서 약 3 ~ 4주간 종자채묘장에서 7 ~ 8 망을 겹쳐서 채묘를 유도한 김 망을 육상으로 옮긴 후 1 망씩 따로 떼고, 채묘 시 사용했던 비닐과 노끈을 제거하는 작업을 한 후 제부도 인근 김 양성장(37.9268, 126.3502)에 고르게 펼쳐서 설치한 후 엽체의 생장을 관찰하였다.

결 과

1. 해조류(김) 양식개발 기반 구축

가. 해조류(김) 엽체 확보 및 종자 유도·관리

경기만 각지에서 김의 생육을 조사하고 채취한 김 엽체와 사상체 확보현황은 다음 표와 같으며, 이 중에서 엽체는 확보되었으나 사상체가 유도되지 않거나 사상체가 유도되더라도 대량 배양에 어려움이 있거나, 규조류 오염에 노출되어 성장이 어려운 경우도 있었다.

먼저 육도 본섬과 중육도, 구비도에서 채취한 시료는 채취일이 2월경으로 엽체 크기와 상태가 양호하였으나 현미경으로 엽체 검경 시 접합포자체가 드물어 포자는 유도되었으나 사상체로 전환되지 않았다.

또 국화도 인근 갯바위에서 채취한 시료 3점은 엽체가 충분히 성숙되었고 현미경 검경 시 접함포자체 또한 관찰되어 사상체 유도하였으나, 그 중에 국화도 동북쪽 해안가에서 발견된 시료만 사상체로 전환되어 추가 확보하였다. 그러나 사상체 유도 시 미처 분리해내지 못한 규조류에 오염되어 사상체 성장이 어려워 지는 것이 관찰되었다. 따라서 규조류로 오염된 사상체가 규조류와 분리 배양이 될 수 있도록 Well-plate나 T-flask로 사상체를 7~10일 간격으로 옮겨서 배양할 수 있도록 조치하였다.

반면, 송교리 윤돌에서 채취한 엽체는 육안으로도 상태가 양호하였으며 사상체를 유도하기에 필요한 접합포자체 분포도 다량 관찰되어 약 3주 후 깨끗한 사상체를 얻을 수 있었다.

표 5. 경기만 김 엽체 확보일자 및 위치

Station	Date	Location		Concho-celis	Remark
		Latitude	Longitude		
육도(본섬)	2022-02-03	37.0982	126.4533	X	
중육도	2022-02-03	37.0932	126.4577	X	
송교리 윤돌	2022-02-04	37.8235	126.3818	O	
구비섬	2022-02-21	37.0236	126.4308	X	
국화도(선착장)	2022-03-03	37.0339	126.3336	X	
국화도(동북)	2022-03-03	37.0348	126.3315	△	
국화도(서)	2022-03-03	37.0923	126.3649	X	

나. 해조류(김) 유전자 분석

1) 게놈 DNA 추출

'22년 경기만 각지에서 채취하거나, 종자를 유도하여 확보한 개체 중 유전계통을 분석한 개체는 총 6개체로, 각 개체의 DNA의 농도와 순도, 채취 정점은 다음 표와 같다. 게놈DNA 추출은 Ashahida *et al.* (2006)의 방법에 따라 분광광도계를 이용하여 추출된 그 농도와 순도를 점검하였다. 추출한 순도를 평가할 수 있는 흡광도 값($A_{260}/_{280}$)은 1.35~1.72으로 일반적으로 순도가 양호하다고 판단되는 1.8~2.0의 범위에서 다소 벗어나는 것도 있었으나 PCR 증폭반응에 크게 영향을 준 것으로 판단되지는 않았다. 이들 중 게놈 DNA 농도가 20 ng/μl를 넘는 표본을 대상으로 TE 완충액을 이용하여 10 ng/μl의 농도로 희석하였고 이후 PCR 증폭반응을 위한 주형 DNA로 사용하였다.

표 6. 김 시료에서 추출된 게놈 DNA의 농도와 순도

Station	Con. (ng/μl)	$A_{260/280}$	Remark
육도(본섬)	20.22	1.772	GMFRI-PC0015
중육도	2.29	1.354	GMFRI-PC0013
송교리 윤돌	3.00	1.31	GMFRI-PC0014
국화도(선착장)	18.24	1.72	GMFRI-PC0016
국화도(동북)	19.84	1.72	GMFRI-PC0017
국화도(서)	11.06	1.64	GMFRI-PC0018

2) DNA 염기서열 해독과 분석

(가) PCR 프라이머 조합 설계

김류(*Porphyra* spp.)를 비롯한 이와 근연한 분류군들의 유전체 정보를 바탕으로 진핵생물 핵 18S 리보솜 RNA 유전자(18S rDNA)와 엽록체 ribulose-1,5-bisphosphate carboxylase/oxygenase large subunit 유전자(rbcL)의 핵산염기서열 정보를 해독할 수 있도록 PCR 프라이머 조합들을 새롭게 설계하였으며 그 결과는 아래와 같았으며, 이번 분석에 사용한 프라이머는 프라이머의 이름을 밑줄로 표시하였다.

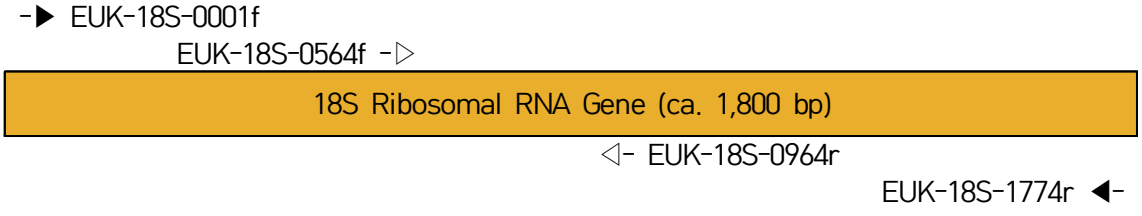
(1) 진핵생물 핵 18S 리보솜 RNA 유전자(18S rDNA)

>EUK-18S-0001f (Euk-A) (Medlin et al. 1988)

AACCTGGTTGATCCTGCCAGTq

>EUK-18S-1774r (Euk-B) (modified from Medlin et al. 1988)

GATCCTTCYGCAGGTTCACCTAC



-▶: PCR 증폭반응용 프라이머

-▷: DNA 염기서열해독용 프라이머

(2) 엽록체 유전자(rbcL)

Porphyra Chloroplast rbcL (Broom *et al.* 2010)

>Kito-F1 (rbcL-0001f) (Broom *et al.* 2010)

ATGTCTCAATCCGTAGAATCA

>JrSR (modified from R-rbcS-start) (Freshwater and Rueness 1994)

AAGCCCCTTGTGTTAGTCTCAC

Porphyra Chloroplast rbcL (Niwa *et al.* 2008)

>rbcL-Rh1 (rbcL-0036f) (Hanyuda *et al.* 2004)

AAGTGAACGTTACGAATCTGG

>rbcS1 (rbcS-0001r) (Hanyuda *et al.* 2004)

AAAAGYYCCTTGTGTTARTCTCAC

Porphyra Chloroplast rbcL (this study) (ca. 1500~1700 bp)

>POR-rbcL-0001f (Kito-F1) (modified from Broom *et al.* 2010)

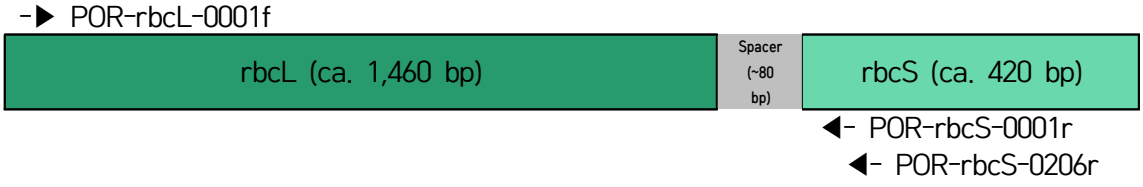
ATGTCTCAATCCGTAGAATCAC

>POR-rbcS-0001r (rbcS1) (Hanyuda *et al.* 2004)

AAAAGYYCCTTGTGTTARTCTCAC

>POR-rbcS-0206r

GTTTTGCTTTTCTGCATGAGC



(나) PCR 증폭반응과 정제

김류 시료 6개를 대상으로 진핵생물 핵 18S 리보솜 RNA 유전자(18S rDNA)와 엽록체 ribulose-1,5-bisphosphate carboxylase/oxygenase large subunit 유전자(rbcL) 영역을 PCR 증폭반응을 수행한 결과는 아래 그림과 같았다.

한편, 일부 시료에서는 예상되는 크기의 증폭산물이 나타나지 않았으며, 핵 18S 리보솜 RNA 유전자 영역의 PCR 증폭 반응 중 일부에서 비특이적인 PCR 증폭산물도 함께 관찰되었다.

(다) DNA 염기서열 정보 해독과 편집

분석한 6 개체 시료의 DNA 서열정보의 길이는 18S rDNA 영역으로 보면 1736~2296bp로 다양하였고, rbcL 영역은 1425~1429 bp로 해독되었다. 이들의 DNA 염기서열을 대상으로 NCBI에서 BLAST를 검색을 수행한 결과는 아래 표와 같았다.

표 7. 해양 홍조식물 김류 시료에서 해독된 미토콘드리아 18S rDNA와 rbcL 영역의 DNA 염기서열의 BLAST 검색 결과

No	Station	Gene	BLAST search	GenBank acc. no.	Similarity
1	육도 (본섬)	18S rDNA	*Pyropia seriata*	HQ687576.1	1974/1982(99.6%)
		rbcL	*Pyropia seriata strain* Hijikuro	LC505534.1	1429/1429(100%)
2	중 육도	18S rDNA	*Pyropia seriata*	HQ687576.1	1976/1982(99.7%)
		rbcL	*Pyropia seriata strain* Hijikuro	LC505534.1	1428/1428(100%)
3	송교리 윤돌	18S rDNA	*Pyropia suborbiculata* strain 34	AB293495.1	1804/1804(100%)
		rbcL	*Pyropia suborbiculata* strain Naurabashi	LC434502.1	1428/1429(99.9%)
4	국화도 (산책장)	18S rDNA	*Pyropia seriata*	HQ687576.1	2296/2302(99.7%)
		rbcL	*Pyropia seriata strain* Hijikuro	LC505534.1	1425/1426(99.9%)
5	국화도 (동북)	18S rDNA	*Pyropia seriata*	HQ687576.1	2294/2302(99.7%)
		rbcL	*Pyropia seriata strain* Hijikuro	LC505534.1	1429/1429(100%)
6	국화도 (서)	18S rDNA	*Pyropia seriata*	HQ687576.1	1736/1741(99.7%)
		rbcL	*Pyropia seriata strain* Hijikuro	LC505534.1	1428/1428(100%)

(라) 분자계통수

김류 시료 6개를 대상으로 해독된 진핵생물 핵 18S 리보솜 RNA 유전자(18S rDNA)와 엽록체 ribulose-1,5-bisphosphate carboxylase/oxygenase large subunit 유전자(rbcL) 영역의 DNA 염기서열정보를 바탕으로 근연종들과의 관계를 밝히기 위해 분자계통수를 작성하였던 결과는 다음과 같았다.

진핵생물 핵 18S 리보솜 RNA 유전자(18S rDNA)영역에 기초하여 작성된 분자계통수(그림 3.)에서 GMFRI-PC0013, GMFRI-PC0015, GMFRI-PC0016, GMFRI-PC0017과 GMFRI-PC0018은 *Neoporphyra seriata* (*Pyropia seriata*)와 높은 지지도를 보이며 함께 분기하였고, GMFRI-PC0014 시료는 근연종이 나타나지 않았다.

엽록체 ribulose-1,5-bisphosphate carboxylase/oxygenase large subunit 유전자(rbcL) 영역에 기초하여 작성된 분자계통수(그림 4.)에서는 GMFRI-PC0013, GMFRI-PC0015, GMFRI-PC0016, GMFRI-PC0017과 GMFRI-PC0018은 *Neoporphyra seriata* (*Pyropia seriata*)와 높은 지지도를 보이며 함께 분기하였고, GMFRI-PC0014는 *Phycocalidia suborbiculata* (*Pyropia suborbiculata*)와 함께 분기하였다.



그림 3. 경기도 김류 표본들의 분자계통분류학적 위치를 밝히기 위해 진핵생물 핵 18S 리보솜 RNA 유전자(18S rDNA) 영역에 기초하여 작성된 분자계통수



그림 4. 경기도 김류 표본들의 분자계통분류학적 위치를 밝히기 위해 엽록체 ribulose-1,5-bisphosphate carboxylase/oxygenase large subunit 유전자(rbcL) 영역에 기초하여 작성된 분자계통수.

2. 해조류(김) 종자 대량배양 및 패각 이식

가. 해조류(김) 종자 대량 배양 및 패각 잠입

이번 해조류(김) 종자 대량배양 및 패각 잠입 시험에 사용된 종자는 '20년에 확보한 방사무늬 김 계열 1 종(PC001)으로, 자체적으로 설정한 대량배양 가능 기준(약 1,000~3,000mg) 이상 배양이 되었을 뿐만 아니라 5L 둥근플라스크에서도 배양이 원활하여 다량의 생물량을 확보할 수 있었다.

또, 이번 시험 연구에 사용된 한국산 및 중국산 굴 패각으로 김 종자를 이식할 때 사용한 패각 수는 약 3,000개로 이에 맞추어 종자를 대량배양을 실시하여 Wetbiomass 기준 약 300g을 저울로 계량하여 맞춘 다음 이식하였으며, 이식 후 약 3 ~ 4주간 종자배양실 및 연구동 내 원형수조에서 정치배양 후 해조류연구동에 설치된 트랙수조에서 수하식으로 자연해수를 유수하며 관리하였다.

이식에 사용되었던 한국산 굴 패각의 이식률은 대조군이었던 중국산 패각에 비해 약 20% 가량밖에 종자가 잠입되지 않았으며, 이식률이 낮아 종자가 이식되지 않은 패각 부분에는 규조류 및 잡조류가 번성되는 것이 관찰되었다.

뿐만아니라 한국산 굴 패각 형태가 중국산에 비해 크기가 작고 패각의 굴곡이 많아 종자가 제대로 안착되지 않는 것으로 보였고, 패각에 석회 부분이 많아 종자는 이식되었으나 성장이 양호하지 않은 것으로 관찰되었다. 또한 한국산 굴 패각은 패각 두께가 얇아 쉽게 부서지는 경향이 있어 연구동 내 트랙수조에서 수하식으로 관리할 때 김 종자가 이식된 부분도 함께 떨어져 나가는 것도 관찰되어 관리상의 어려운 점도 있었다.

나. 해조류(김) 종자 관리

약 3 ~ 4주간 이식을 완료한 패각 종자는 수온이 떨어지는 가을까지 해조류연구동의 트랙수조에서 수하식으로 자연해수를 유수해주며 관리하였고 패각이 골고루 광합성을 할 수 있도록 1주일에 한번씩 위치를 바꿔줬으며, 3주에 50%씩 환수하였다.

이번 해에도 마찬가지로 굴 패각은 1주일에 한번 상하를 교체해주며 이식 부위를 붓으로 털며 같이 붙은 규조류 및 잡조류를 제거하였으나 한국산 굴 패각은 패각의 부서짐 정도가 심했을 뿐만아니라 시간이 지날수록 석회질에 이식된 종자 또한 서서히 탈락되는 것이 관찰되었다.

3. 해조류(김)해상채묘 및 재배

가. 해조류(김) 종자 해상채묘

실내에서 수하식으로 관리한 패각 종자를 10월 중순에 패각 종자를 해상에서 채묘하고자 종자 양성장에 설치하였다. 약 2~3주간 종자 양성장에서 8망을 겹망하여 자연 수온과 해당 해역의 일조 조건에 따라 각포자를 유도한 결과 채묘 시작일로부터 약 10 ~ 14일 경부터 육안으로 어린 유엽이 관찰되었다.

이 때 유엽의 부착을 확인하기 위해서 현미경 배율 40배~200배에서 관찰하였으며, 형광현미경에서 유엽의 활성을 확인하고, 개체수를 확인하였다. 해상에서 채묘한 김 망의 유엽의 부착개수는 김 망의 한 올당 평균 2.4개체로 관찰되었는데, 이를 환산해보면 김 망의 한 그물코(20cm × 20cm)에 약 80여개의 유엽이 부착된 것으로 판단되었다.

이후 4주간 종자 양성장에서 관리한 김발은 육지로 다시 올린 이후 분망하여 김 양성장으로 옮겨주었다.

나. 해조류(김) 엽체 해상 재배시험 연구

종자 양성장에서 4주간 포자를 유도하여 어린 유엽이 부착된 김 망은 육상에서 분망하여 김 양성장으로 옮겨주었으며, 해상에서 재배 시험 시 기존에 양식하던 방사무늬 김 품종에 엽체 길이에 비해 채묘 4주차에는 기존 양식 김과 유의적인 차이가 나지 않았으며, 성엽인 채묘 후 12주차에서도 마찬가지였다. 그러나 너비는 성엽에서는 유의적인 차이가 있었고($p<0.05$), 전체적으로 길고 곧게 자라는 형태를 보였다.

따라서 개발하는 종자는 그 형태의 특성상 김 채묘 시 어린 김이 충분히 부착하였다면같은 시간동안 양성 시 넓게 자라는 기존 양식 김의 엽체보다 수면적을 더 넓게 쓸 수 있고 그에따라 수확 후 다음 수확까지의 양성 시간이 짧아질 수 있어 김 양식에 유리한 점이 발견되었다. 금번 1차년 해상 재배시험 특성 조사 결과는 향후 2개년 이상의 양성한 결과와 취합하여 수산식물 품종보호출원할 예정에 있다.

고 찰

경기도 김 양식 산업은 도내 해면 어업생산량 중 약 80%가량을 차지하는 경기도 어업에서 가장 비중이 높은 산업이나 현재까지 전남·충남해역에 맞는 김 종자를 그대로 이식하여 양식을 함으로써 이식한 종자가 비록 우량한 종자의 형질을 갖고 있더라도 경기만 해역에서 성장 시 적응성의 문제가 발생해왔다.

특히, 전남·충남의 김 양식업은 뒤집기식이나 지주식을 이용함으로써 김 양식 중 노출 시간이 늘어남에 따라 갯병 발생률과 잡조류 부착률이 낮아 어기 중 김을 건강하게 유지할 수 있는 반면 경기도 해역은 부류식으로 김 양식을 하므로 갯병 발생률과 잡조류 부착률이 상대적으로 높아 같은 종자를 사용하더라도 생산량에서 차이가 날 수 밖에 없는 실정이다.

그러나, 경기도 해역은 조류가 강하고 어기 중 평균 수온도 상대적으로 낮으며 영양염 농도는 높은 편으로 경기만 해양환경에서 자생하고 있는 김이나 해역에 적응하여 우량한 형질을 가진 김의 종자를 확보한 다음 어가에 보급할 수만 있다면, 오히려 김 양식 생산성을 현재보다 더 높일 수 있을 뿐만 아니라 앞으로 다가올 기후변화에 따른 고수온현상에 선제적으로 대응할 수 있는 기반을 구축할 수 있으리라 생각된다.

따라서 '22년에 추진한 본 시험연구는 경기만에 자생하며 해역에 적응한 종자를 정점별로 다양하게 확보하고, 유전자 분석을 통해 확보한 김의 유전계통 분류를 실시하였으며, 종자의 대량생산 가능성과 엽체의 형질을 현장에서 확인하는데 초점을 두고 추진하였다.

특히, 올해에 확보한 김 종자 중 화성시 송교리에서 발견된 둥근돌김은 주로 서남해안에서 채묘되고 서식되는 것으로 알려져있는데(황미숙 *et al.,* 2005), 경기만에서 발견된 것은 종자가 기후변화에 의해 경기만이 고수온에 노출되는 횟수가 높아지면서 발견된 것으로 판단된다. 따라서 앞으로 경기만의 수온이 높아지는 것에 대비하여 고수온에서도 생장할 수 있는 종자를 개발해야될 것으로 생각된다.

한편 금번 시험한 김 종자의 한국산 굴 패각으로의 이식 시험은 기존 중국산 패각 이식량에 비해 20%정도밖에 되지 않았으나 한국산 패각의 문제였던 패각의 굴곡진 부분이 많은 것, 석회질 부분에 이식되어 성장이 양호하지 않는 것, 패각 두께가 얇은 것 등의 문제점은 '23년에는 이러한 문제점을 개선한 패각을 납품받아 종자 이식을 시험하였다. 시험한 결과 이전의 이식량 보다 높은 이식률을 보였으며 성장률과 이식률을 산정 중에 있다. 앞으로는 굴 패각외에도 가리비 패각 등 다양한 조개류 패각에 이식을 시도하여 갈수록 수입량이 줄어들고 가격이 상승하는 중국산 굴 패각을 대체할 방법을 연구할 예정이다.

또한 올해 처음 추진한 해상재배시험은 기존 양식에 주로 쓰이는 해풍1호와 비교해서 시험하였는데 채묘 후 4~5주차에 분망 시 어린 김 엽체가 덜 붙거나 붙었더라도 탈락된 개체가 많았고 그 빈 자리에는 파래 등 잡조류가 번성되는 것이 관찰되었다(그림 13). 이러한

현상은 시험했던 경기 김 종자(PC0001) 뿐만 아니라 대조군이었던 종자에서도 발견되었는데 채묘를 했던 10월말의 경기만의 수온이 채묘하기에 충분히 떨어지지 않은 것으로 판단된다. 특히 금번 시험한 경기 김 종자는 넓게 자라는 기존 김 품종에 비해 형태적인 특성상 길고 곧게 자라므로 어린 김이 충분히 붙지 않거나 붙었더라도 뿌리가 깊게 박히지 않은 상황에서는 김 망의 남은 공간에 타 잡조류가 더욱 번성하는 경향을 보였는데 채묘량을 늘리거나 양식 초기에 집중 관리가 필요할 것으로 판단되며 필요에 따라 육상채묘 후 냉동망으로 관리하다가 수온이 충분히 떨어진 후에 해상에서 재배한다면 더욱 높은 성장성을 보일 것이라 판단된다.

한편 시험한 경기 김 종자로 마른 김 가공 시 세척공정이 기존 품종에 비해 절반으로도 가능한 장점이 있어 생산된 물김의 수매가격이 높은 경향이 있었다. 따라서 개발 중인 종자를 보급하여 물김생산량이 앞으로 더욱 많아진다면 어민의 소득이 더욱 높아지는데 기여할 수 있을 것으로 기대된다.

금년에 추진한 1차년 해상재배시험연구를 통해 밝혀진 경기만 김 종자의 특성조사에 더해 '23년에는 2차년도 재배시험연구를 추진한 후 종자의 신규성과 균일성 등이 유지된다면, 결과를 취합하여 경기바다에 적합한 종자를 품종 보호등록 출원을 할 예정이다.

표 9. 수산식물 품종 보호출원을 위한 재배심사 중 특성별 조사 시기

	채묘 후			
	4주(유엽)	6주	8주(성엽)	12주
조생종	1. 엽체 길이 2. 단포자 형성유무 3. 단포자 방출정도	1. 엽체 모양	1. 엽체 길이 2. 엽체 너비 3. 엽체 두께 4. 엽체 중앙부 색 5. 엽체 하부의 색	-
만생종		-	-	1. 엽체 모양 2. 엽체 길이 3. 엽체 너비 4. 엽체 두께 5. 엽체 중앙부 색 6. 엽체 하부의 색

참 고 문 헌

- 국립수산과학원. 2008. 김 품종개량 연구(자생김 우량품종 탐색 및 선발육종).
- 박성우, 이종화, 김영식. 2009. 해조류의 질병. ㈜바이오사이언스출판.
- 장계남. 2002. 갑각류·해조류양식. 삼광출판사.
- 황미숙, 김승오, 이영순, 박은정, 김성철, 하동수, ... & 최한구. 2010. 참김 (Porphyra tenera Kjellman) 색소 및 형태변이체의 순계주 분리 및 특성. 한국수산과학회지, 43(5), 495-502.
- 황미숙, 김선미, 하동수, 백재민, 김형섭, & 최한구. (2005). 한국 남서해안 자연채묘 양식 김의 DNA 염기서열과 종 동정. Algae, 20(3), 183-196.
- Choi, J. S., Cho, J. Y., Jin, L. G., Jin, H. J., & Hong, Y. K. (2002). Procedures for the axenic isolation of conchocelis and monospores from the red seaweed Porphyra yezoensis. Journal of applied phycology, 14(2), 115-121.
- Gall, E. A., Chiang, Y. M., & Kloareg, B. 1993. Isolation and regeneration of protoplasts from Porphyra dentata and Porphyra crispata. European Journal of Phycology, 28(4), 277-283.
- Hollenberg, G. J. 1958. Culture studies of marine algae. III. Porphyra perforata. American Journal of Botany, 653-656.

경기만 새꼬막 양식 적합어장 개발시험

안태영·최지성·정재식·김봉현

서 론

1. 새꼬막 생태 및 양식 현황

새꼬막(*Scapharca subcrenata*)은 돌조개목 돌조개과에 속하는 이매패류로 돌조개과에는 유럽, 아프리카 및 호주 등 전 세계적으로 203종이 분포하고 있으며 한국에는 꼬막(참꼬막), 새꼬막, 피조개, 큰이랑피조개 등 16종이 알려져 있다(국립수산과학원, 2019).

꼬막은 전남을 대표하는 수산물로 일반적으로 판매되는 품종은 꼬막(참꼬막)과 새꼬막으로 나뉘며, 이 중 새꼬막이 꼬막 전체 생산량의 90%를 차지한다. 참꼬막이 감칠맛이 커 선호도가 더 높지만, 가격이 비싸고 양성 기간이 새꼬막에 비해 2배 정도 더 길어 새꼬막이 소비자에게 더 대중적인 품종이다. 참꼬막은 양성주기가 3~4년이고 새꼬막 양성주기는 1~2년이다.

새꼬막은 지역별로 참꼬막, 새조개 등 여러 가지 이름으로 불리고, 외형상 크기는 참꼬막과 피조개의 중간이며, 방사늑의 수도 29~33줄로 꼬막(17~20줄)과 피조개(42~43줄)의 중간 정도이다. 성장이 빠르고, 최대크기 각장 8cm 전후까지도 자라게 되고, 보통 종패에서 1년 자라면 3.5cm 전후로 되어 식용으로 가능하며 3년 이상 자라면 5cm 전후까지 성장하게 된다. 혈액에 헤모글로빈(Hemoglobin)을 함유하고 있어 육질의 색깔이 자색 또는 황적색을 띤다. 표면에는 갈색의 유모각피로 덮여 있고 각은 개체에 따라 변화가 많으나 좌각의 각정부가 과립상으로 솟아 있음이 타종과 구별되는 점이다. 우리나라 새꼬막의 분포는 영일만에서부터 남해안 및 서해안까지 서식하고 있으며, 세계적으로 중국 연안, 일본의 태평양 연안 청림현, 오키나와 등 분포범위가 넓은 패류이다(장, 2002).

우리나라 꼬막류(꼬막, 새꼬막, 피조개)의 전체 생산량은 그림 1과 같이 2015년까지 감소하다가 2016년부터 상승하였으나 2020년부터 감소하고 있으며 생산금액은 2012년 대비 감소하는 추세에 있다. 다만, 2015년까지는 꼬막류 중 꼬막과 피조개가 주로 생산되었으나 2016년 이후 새꼬막 생산량이 집계되면서 2019년부터는 새꼬막이 꼬막류 생산의 70% 이상을 차지하고 있다.



그림 1. 연도별 국내 꼬막류 생산량 및 생산금액

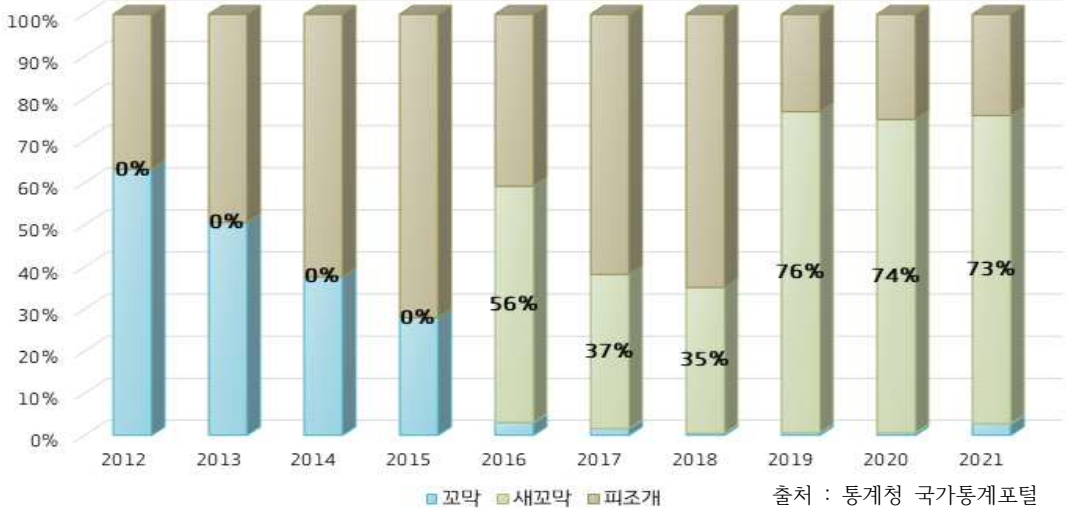


그림 2. 연도별 국내 꼬막류 품종별 생산 비율(새꼬막 비율 별도 표기)

그림 3과 같이 2016~2021년 우리나라 지역별 새꼬막 생산 비율을 살펴보면 전남이 지속해서 가장 많이 차지하고 있고 그다음 경남이 가장 많으나 전남과 많은 차이를 보이며, 그 외 시도에서는 아주 낮은 비율로 생산하고 있다. 다만, 통계청 자료에서 경기도는 2020년에 새꼬막 51톤을 생산한 것으로 나타나나 자체적으로 수협 위판량을 조사한 결과, 총 192톤을 위판한 것으로 확인되어 통계와 실제 생산량에 차이가 클 것으로 보인다.

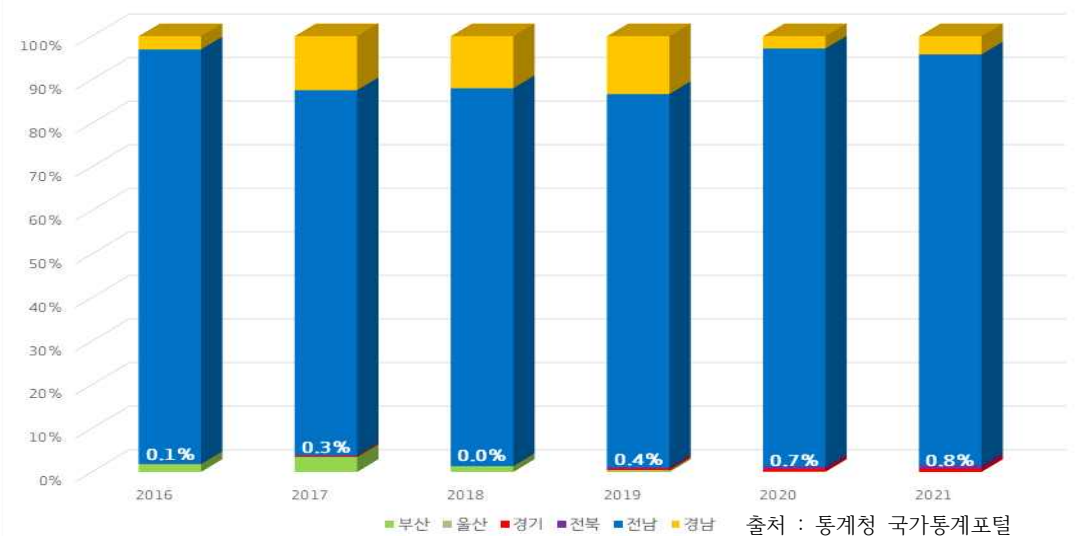


그림 3. 국내 시도별 새꼬막 생산 비율(경기도 비율 별도 표기)

2. 추진 배경

간척과 개발에 따른 환경변화로 경기도뿐 아니라 전국적으로 패류 생산량이 감소하였다. 각 지자체나 어촌계에서는 급격히 감소된 바지락(표 1), 굴과 같은 유용패류의 자원량을 늘리기 위하여 종패를 살포하여 생산량을 유지시키거나 자원 회복을 위한 다양한 시험을 추진하고 있다. 또한 펄 질화 등과 같이 변화한 유휴갯벌에 새로운 품종을 이식하여 신소득원으로 삼고자 노력하고 있다.

표 1. 2002~2020년(3년 주기) 경기도 바지락 생산량 및 생산금액

연도	2002	2005	2008	2011	2014	2017	2020
생산량 (톤)	6,857	3,883	1,974	1,008	1,650	988	556
생산금액 (백만원)	12,185	6,081	3,287	2,138	3,816	2,371	1,704

경기도는 산업종으로 이용되는 주요 유용패류의 생산을 늘리기 위해 고소득 패류 종자 살포사업을 실시하고 있으며, 패류 종자를 직접적으로 갯벌에 살포하거나 패류 종자 발생장을 조성하여 자연적으로 패류 발생량을 늘리기 위한 사업 등을 다양하게 추진하고 있다.

경기도는 기후 및 갯벌환경 변화에 대응하고, 패류 양식에 사용되지 않는 유휴갯벌을 활용하여 새로운 소득 품종을 개발하고자 새꼬막을 2015년부터 연차적으로 이식하기 시작하였다. 2015~2017년 3년간 자체사업으로 5개 어촌계에 연도별 종패를 살포한 결과, 18개

월간 성장도와 생존율(50~60%)을 확인하였다. 그리고 2019~2020년에는 연구교습어장 운영 국비사업으로 시험연구를 추진하여 경기도에서는 간조 시 노출지역이고 모래가 약간 섞인 사니질 저질에 새꼬막 성장 및 생존율이 높음을 확인하였다.

따라서 이번에는 앞선 연구결과를 바탕으로 경기도 내 새꼬막 적합어장을 개발하고 대량생산 가능성을 확인하기 위한 목적으로 연구교습어장 운영 국비사업을 통해 시험연구를 추진하였다.

재료 및 방법

1. 시험어장 선정 및 종패 살포

새꼬막 시험사업을 실시하기 위해 국립수산과학원 '해수면 양식장(새꼬막) 적지조사 기준'과 2019~2020년 추진한 '경기만 새꼬막 생산성 향상시험' 연구·교습어장 사업 자료를 참고하였다. 유휴갯벌로 어장 접근성, 저질 상태, 새꼬막 양식현황, 어촌계의 협조 의지 등을 고려하여 화성시 마을어장 2개소(제부리, 매향2리)를 최종 선정하였다.

선정한 마을어장 내에서 시험어장은 최간조 시 노출되는 부근으로 어장 넓이는 제부리와 매향2리 각각 0.8ha, 1ha이며, 밧줄과 부표를 이용하여 경계를 표시하였다.

시험 종패는 전남 고흥 지역에서 생산된 평균 각장 1.5cm 새꼬막 종패를 2021년 4월 구입하여 전남 여수에서 경기 화성까지 화물차로 이동 후 시험어장 2개소에 각각 2톤씩 살포하였다. 새꼬막 종패는 물때를 고려하여 선상에 실은 후 플라스틱 삽으로 최대한 고르게 살포되도록 하였다.

2. 시험어장 모니터링(성장도, 생존율 및 어장환경 조사)

성장도, 생존율, 어장환경 조사는 시험용 종패 살포 후 물때에 따라 조사가 불가한 경우를 제외하곤 매월 직접 도보로 진입하여 조사하였다. 생존도 및 성장률 조사를 위해 시험어장 내 새꼬막이 분포하고 있는 지점을 무작위로 선택하고 방형구(50×50㎝)를 이용하여 살아 있는 개체와 폐사한 개체를 전량 채취하였다(그림 5). 채취한 새꼬막을 실험실에서 계수 및 폐사 여부를 확인하여 생존율을 산정하였다. 살아있는 새꼬막에 대해서는 성장도 조사를 위해 버니어캘리퍼스와 저울을 이용하여 전중(패각이 포함된 전체 중량), 각장을

측정하였다.



그림 5. 새꼬막 시험어장 직접조사

새꼬막 종패가 살포된 시험어장의 갯벌 퇴적물(저질) 조성 변동 여부를 파악하기 위해 시험어장 내 새꼬막이 서식하고 있는 위치의 퇴적물을 250㎖ 플라스틱 용기에 담아 채취하였다. 채취된 퇴적물은 분석 전까지 냉동(-20℃) 보관하였고 전문 분석기관에 입도, 함수율 등을 의뢰하여 받은 자료를 바탕으로 변화를 파악하였다. 시험어장 비노출기간에 저층의 수온, 용존산소(DO), 염분, 수소이온농도(pH)를 알아보기 위해 우리 연구소 갯벌연구팀에서 추진하는 '경기바다 환경조사' 자료를 협조받아 파악하였다.

결 과

1. 새꼬막 성장도 및 생존율

시험어장 내 새꼬막 성장도 및 생존율 조사 결과는 그림 6과 같다. 2021년 4월에 입식한 새꼬막의 평균 각장 및 전중은 각각 14.8mm, 0.8g이었으며, 최종 조사한 2022년 11월 새꼬막의 평균 각장 및 전중은 각각 제부리 37.5mm, 15.7g, 매향2리 37.3mm, 16g이었다. 각장의 경우 입식 후 6개월간 많은 성장을 보였고 그 이후에는 큰 폭으로 성장하진 않았다. 전중의 경우 각장과 동일하게 입식 후 6개월간 많은 성장을 보였으며, 입식 다음 해 5~9월에도 추가적인 성장을 보였다. 시험어장 두 곳의 살포한 종패 대비 최종 성장도는 거의 유사하게 나타났다.

제부리 및 매향2리의 새꼬막 최종 생존율은 각각 74%, 49%이었다. 시험어장 두 곳 모두 시험기간 내 2021년 9~10월 중 가장 많은 폐사가 발생하였으며, 매향2리는 2022년 1월 추가로 많은 폐사가 발생하였다.

2. 시험어장 환경조사

새꼬막 시험어장 내 퇴적물 입도 조성 및 함수율 변화는 그림 7과 같다. 제부리 시험어장 퇴적물 입도의 경우 2022년 1월 조성인 자갈 1.7%, 모래 48.5%, 니질(실트+점토) 49.8%을 제외하고 모래 55% 이상(56.94~65.9%), 니질 45% 이하(33.5~43.05%) 수치를 나타내었다. 함수율의 경우 2022년 10월 24.2%로 가장 낮았고, 2021년 6월 32.7%로 가장 높았다. 매향2리 시험어장 퇴적물 입도의 경우 2021년 2월과 9월에는 모래 40% 이하(29.74, 37.08%), 니질 60% 이상(62.92, 69.5%)이었고, 나머지는 모래 56% 이상(56.9~70.34%), 니질 41% 이하(27~40.8%) 수치를 나타내었다. 함수율은 2021년 6월 29.9%로 가장 낮았고 2021년 9월 49.4%로 가장 높았다.

시험어장 비노출기간의 저층 수온, 염분, 용존산소, pH 수치는 그림 8와 같다. 저층 수온의 경우 시험어장 두 곳 모두 유사하였는데, 2월에 1.6~1.8℃로 가장 낮았으며, 8월에 25.5℃로 가장 높았다. 저층 염분 농도는 주로 30~32psu였으나 2022년 8~9월에는 두 곳 모두 28~29psu로 나타났다. 저층 용존산소 농도는 주로 6~12mg/L였으나 2022년 8월 매향2리는 4.5mg/L로 나타났다. 저층 pH 농도는 주로 7.8~8.3였으나 2021년 6월에는 두 곳 모두 7.4로 나타났다.

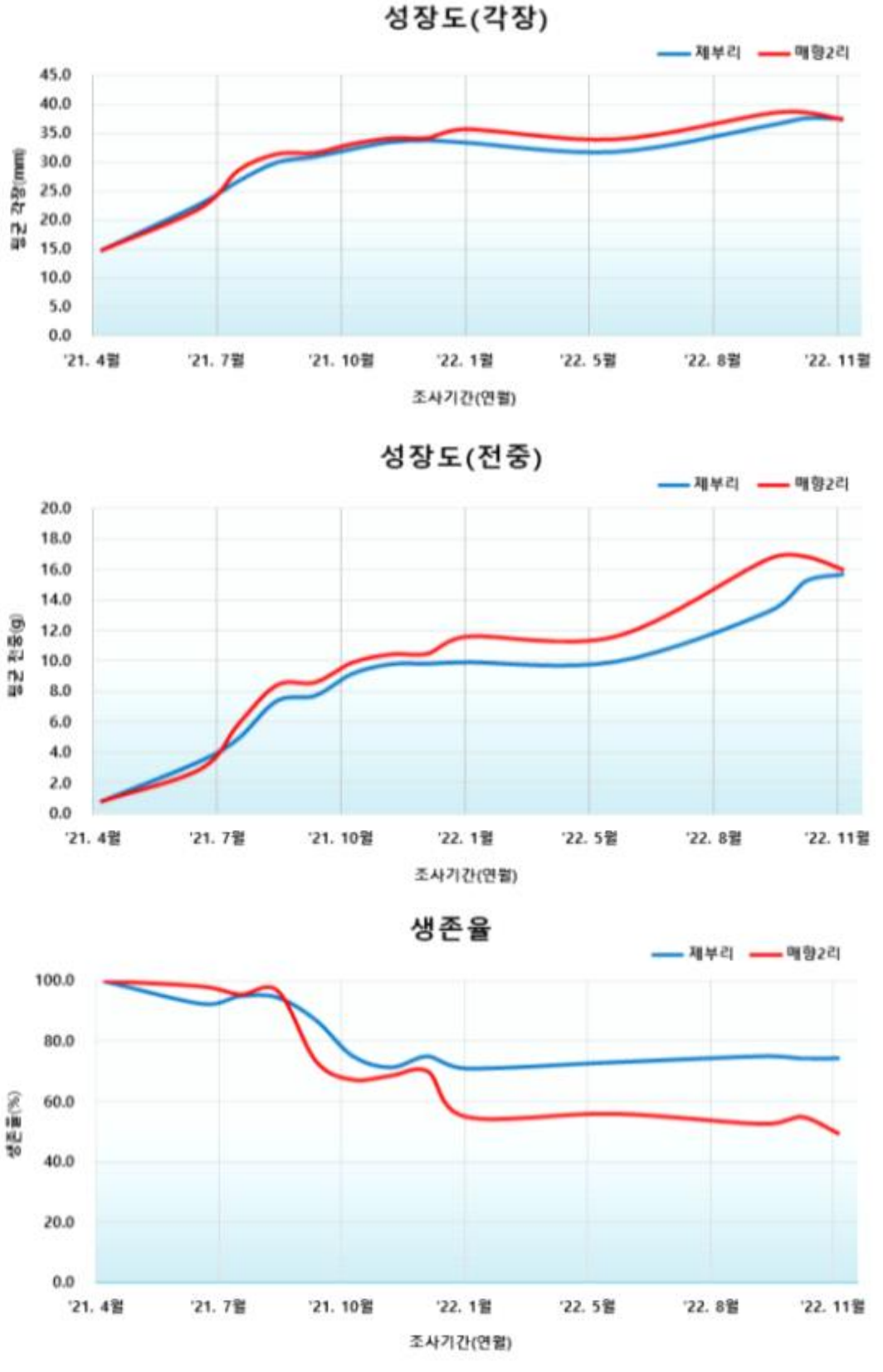


그림 6. 시험어장 내 새꼬막 성장도(각장, 전중) 및 생존율

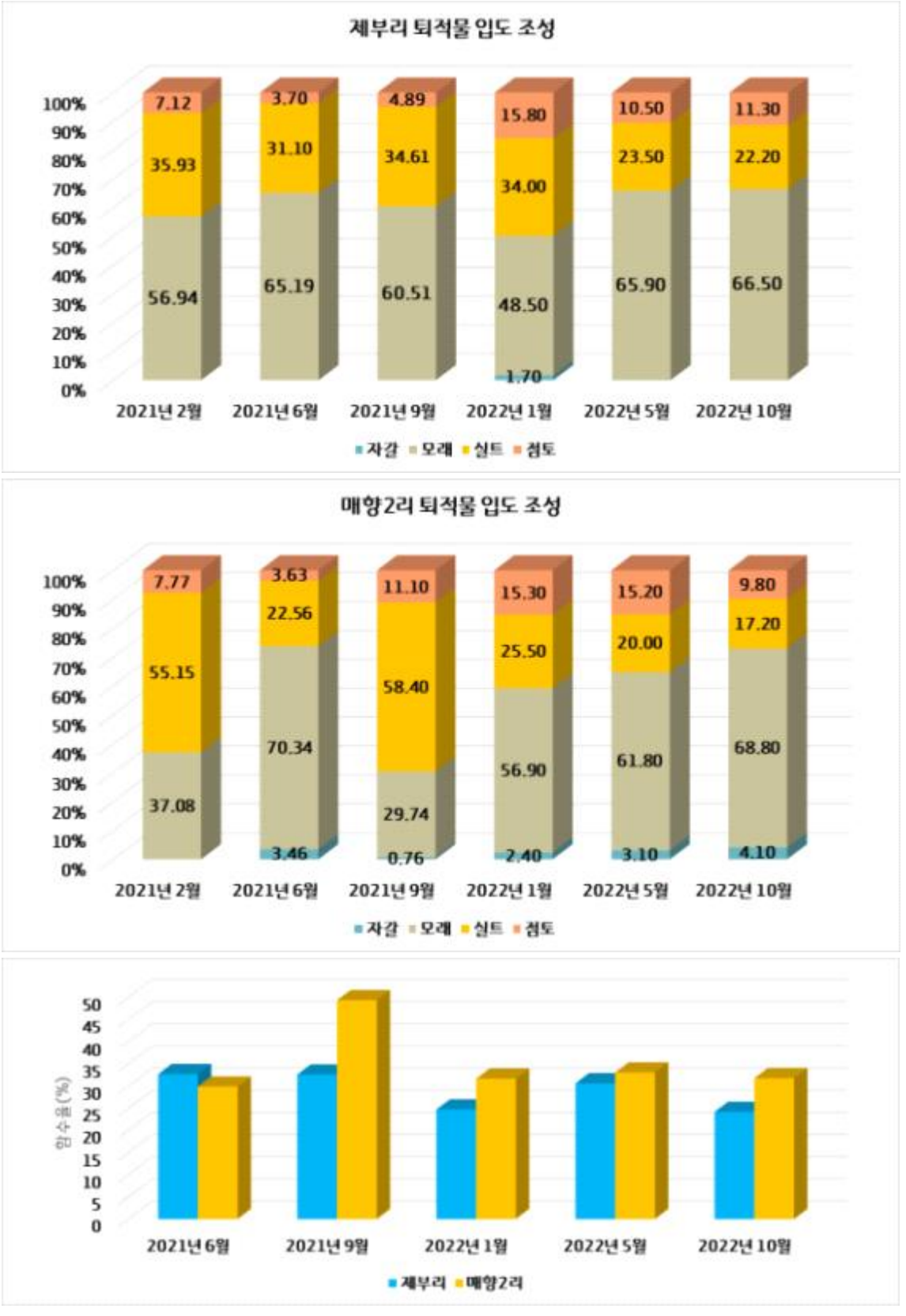


그림 7. 시험어장 내 시기별 퇴적물 입도 조성 및 함수율 변화

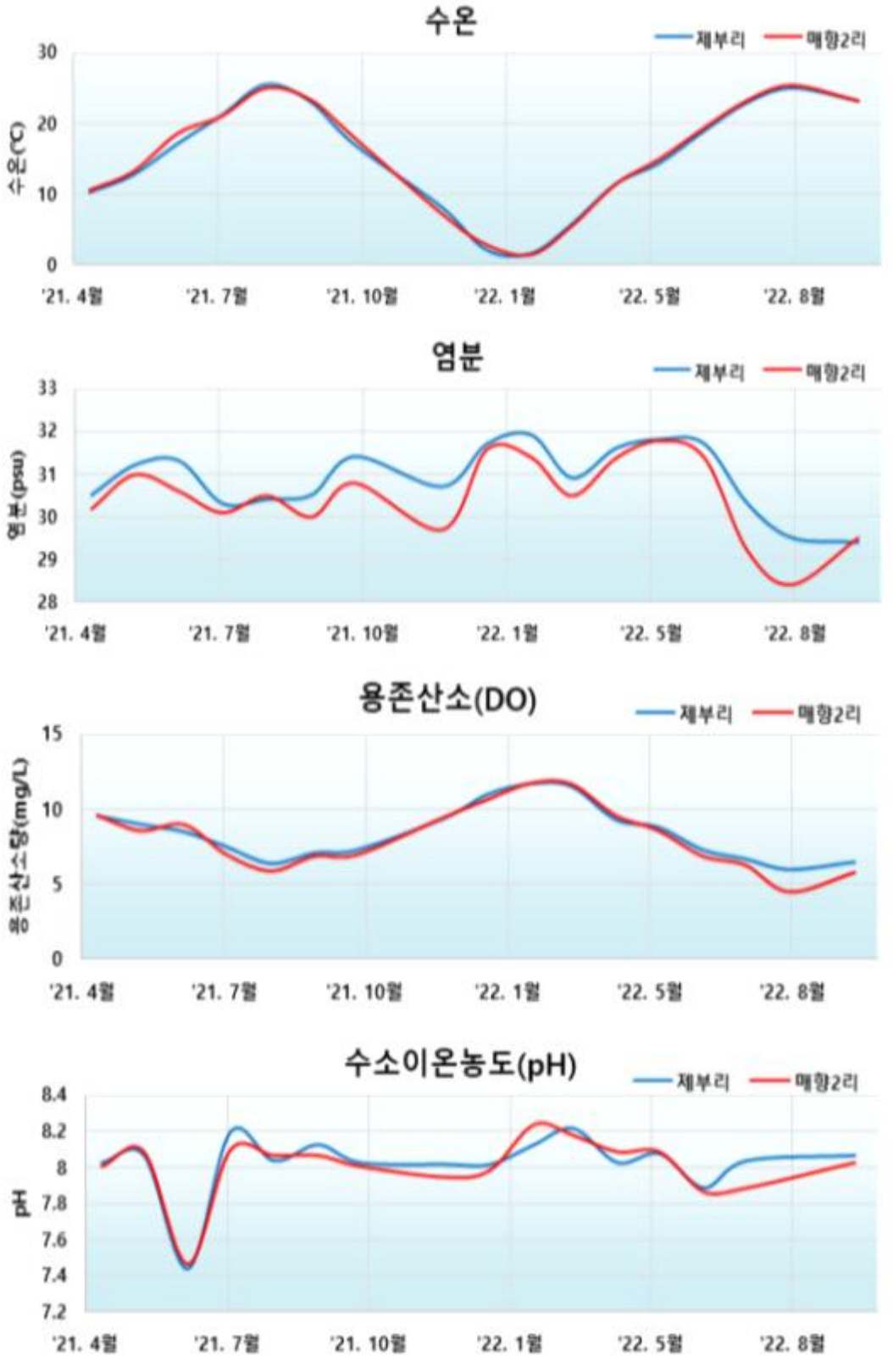


그림 8. 시험어장 내 시기별 저층 해수의 수온, 염분, 용존산소, 수소이온농도 변화

고 찰

경기만은 기후변화 및 간척, 해안개발 사업으로 펄이 퇴적되는 등 갯벌 환경이 크게 변화함에 따라 기존 주 소득원이었던 굴, 바지락 등의 패류 생산량도 크게 변화하고 있다. 새꼬막은 우리나라 서남해안 이외에 중국와 일본 등에 분포하고 성장이 빠르고 수익성이 높아 대중적으로 인기 있는 패류이다(장, 2002). 이에 신 소득원으로 새꼬막을 선정하여 2019~2020년 '새꼬막 생산성 향상시험'을 추진한 결과를 바탕으로 적합어장을 선정하여 대량생산 가능성을 확인하고자 하였다.

새꼬막 성장률은 각장 및 전중 기준 모두 종패 살포 후 3개월간 가장 높았으며 2022년 5~8월 사이에도 추가적인 성장을 보였다. 2022년 각장에 비해 전중은 더 큰 폭으로 성장한 것으로 보아 각장이 일정 크기까지 성장 후에는 각고, 각폭, 육중량이 주로 증가한 것으로 보인다. 경기도에서는 5~10월 사이 새꼬막 성장이 주로 이루어지며, 겨울철에는 매우 낮은 기온 및 수온으로 인해 성장이 거의 없는 것으로 판단된다.

새꼬막 생존율은 2022년 11월 기준 제부리 72%, 매향2리 49%로 제부리에서 높은 생존율을 보였다. 시험어장 두 곳 모두 2021년 9~10월 사이 생존율이 가장 많이 하락했으며, 매향2리의 경우 2022년 1월에 다소 큰 폭으로 추가 하락하였다. 2022년 9~10월에는 생존율 차이가 거의 없는 것으로 보아, 새꼬막 종패 살포 후 당해 급격한 성장 중 여름철 높은 기온에 노출 시 새꼬막 생존에 큰 영향을 주었을 것으로 판단된다. 다만, 실제 어업 현장 기준으로 마을어장 패류 살포 시 생존율 30% 이상만 되어도 충분한 소득원이 되는 것을 미루어볼 때 매향2리의 생존율 49%도 어업인 기준으로는 낮은 수치가 아닐 것으로 보인다.

제부리 퇴적물 입도 조성은 니질(실트+점토) 비율이 높아지는 것처럼 보이긴 하나 전반적으로는 사질 비율이 50% 이상으로 시험어장 선정을 위해 조사한 입도 조성(2021.2월)과 비교하여 변동성이 크게 나타나진 않았다. 매향2리 퇴적물 입도 조성은 2021년 2월과 2022년 1월 사이 니질과 사질의 비율이 큰 폭으로 변동성을 나타냈다. 이에 따라 새꼬막 생존에 영향을 끼쳐 2022년 1월 추가 폐사가 발생하고 제부리 시험어장과 비교하여 생존율 차이가 나타난 것으로 판단된다.

새꼬막의 주 산란기는 7~9월로 성장적수온 18~28℃, 서식적수온 6~28℃, 염분내성범위 12.5~13.8psu, 염분서식범위 20~35psu, 용존산소 4.3~8.6mg/L, pH 7.8~8.3(Shigeru et al., 2000; Shin et al., 2009; 국립수산과학원 해수면 양식장 적지조사 기준, 2016)으로 2022년 1~3월 수온, 2021년 6월 pH 수치를 제외하고 비노출기간 중에는 새꼬막 서식기준에 적합하였다. 수온이 6℃ 이하로 내려간 겨울철(1~3월)과 pH가 7.4 정도로 감소한 시기에도 새꼬막

생존율에는 큰 변화가 없는 것으로 보아, 영향이 미미하거나 없었을 것으로 판단한다.

새꼬막은 무게 기준 kg당 100~110개 내외 정도면 중소 크기로 출하하고 있으며, 크게는 kg당 60~70개까지 판매가 되고 있다. 이러한 현황을 고려해볼 때 이번 연구와 같이 경기도의 적합한 갯벌(마을어장)에서 4월에 종패를 살포할 경우 당해 10~11월(6~7개월 후)부터 출하할 수 있을 것이며 새꼬막 크기, 작업시기, 거래단가 등 실제 어업인의 판단하에 출하를 조절할 수 있을 것이다. 또한, 과밀식만 하지 않는다면 이번 연구 결과와 같이 50% 내외 또는 그 이상의 생존율로 대량생산이 가능할 것으로 여겨지기에, 앞으로 경기도 어업인의 주요 소득원이 될 것으로 기대해본다.

참 고 문 헌

- 국립수산과학원 남동해수산연구소. 2019. 새꼬막 인공종묘 생산기술 개발(사업보고서)
- 국립수산과학원 해수면 양식장 적지조사 기준. 2016.
- 장계남, 2002. 패류양식. 삼광출판사. p366-381.
- 통계청 국가통계포털
- Shigeru, S., Yutaka, A. and Hiroshi, T. (2000) Report ofmarine ecology research institute from Japan, 2:255-256.
- Shin, Y.K., Choi, Y.S., Kim, E.O. and Sohn, S.G. (2009) Variation in physiological energetics of the ark shell Scapharca broughtonii (Bivalvia: Arcidae) from Gamak Bay, South Coast of Korea. Fisheries Aquaculture Science, 12(4): 331-338.

Ⅱ 기후변화 대응 생태환경 연구

1. 경기바다 환경조사

2. 경기갯벌 생태조사

변화의 중심
기회의 경기

경기바다 환경조사

배재용 · 김병권 · 임성률 · 김봉현

서 론

해양 환경은 크게 바닷물이 이루는 해수층과 그 아래에 있는 해저층으로 나눌 수 있다. 큰 강과 인접한 서해 연안에서의 해수층은 여름철 집중호우와 겨울철 연안해역의 낮은 기온에 의해 수온과 염분, 영양염 등의 해양 환경요인의 시공간적 변화가 크다. 이러한 해양 환경의 물리 화학적 변화는 식물성 부유생물이 생산하는 기초생산력에 영향을 주고 더 나아가 해양생태계 전체에 변화를 초래하는 주요 요인으로 작용한다(김 등., 1998; 정 등., 2000). 또한 조석간만의 차가 적은 동해와 달리 서남해, 특히 서해에서는 해저 환경 역시 큰 비중을 차지한다. 이러한 해저 환경을 구성하는 퇴적물은 해당 지역의 물리적 특성을 반영하고, 환경을 이해하는데 가장 기본적이고 중요한 요소이다(김 등., 2019).

경기 바다는 한반도 서해안의 중심부에 위치하며, 얕은 수심과 강력한 계절풍에 의하여 겨울철에는 표층 수온이 급격히 낮아지고 표층과 저층 간 해수 혼합층이 잘 발달한다. 반면, 여름철에는 강한 복사열과 육지의 담수 유입 증가하게 된다. 위에 열거한 요소들은 봄과 가을에 발생하는 식물성 부유생물의 대증식에 영향을 준다(Wafar et al., 1983). 또한 강한 조석 작용과 복잡한 해안구조가 만나 해저지형의 변화를 일으키며, 연안의 준설 및 양식 구조물 설치, 도서 주변의 인공어초 투하 등 다양한 저서 환경 변화와 오염이 발생한다.

이러한 경기 바다의 환경요소들은 경기도 주요 수산물인 해조류(김)와 패류(바지락과 굴) 등 유용 해양생물의 생태에도 큰 영향을 미친다. 대표적으로 해조류는 해수 속 영양염과 수온이, 패류는 서식처인 갯벌의 입도와 먹이생물의 양이 생산량과 직결된 주요한 환경요소이다. 이렇게 경기 바다의 해양 환경은 직접적으로는 오염으로 인한 어장환경 문제와 간접적으로는 어업인의 경제적 소득에 영향을 미치고 있음에도 불구하고 이를 과학적으로 조사하고 평가할 수 있는 연구가 미비하다.

이 연구의 목적은 경기 바다의 해양 환경을 조사하여, 고수온 및 저염분 등의 이상해황 자료를 어민에게 제공하고 장기적인 수질 환경 자료를 확보하는 것이며, 나아가 건강한 경기 바다 환경 보전과 관리를 위해 수질평가지수와 부영양화 정화·복원지수 등의 과학적인 평가 등 정책자료로써 활용하기 위하여 경기 바다의 주요 어업구역을 중심으로 정기적인 해양 수질과 퇴적물에 관한 모니터링 연구를 수행하였다.

재료 및 방법

1. 현장조사

1-1. 조사정점

경기만 연안 양식장 주변 환경에 대한 해양 환경 특성을 파악하기 위해 총 10개소를 선정하였다. 2022년 1월부터 12월까지 경기도 해양수산과 소속의 경기바다호와 화성시 화성바다누리호를 이용하여 매월 1~2회 총 19회 조사를 실시하였다(Fig. 1, Table 1, Table 2, Table 3).

Table 1. Research areas.

지역	상세위치
안산	풍도, 육도, 대부도 남서쪽 연안, 구봉도 북서쪽 연안, 시화방조제 연안
화성	입파도, 국화도, 제부도 남서쪽 연안, 국화도 동쪽 연안, 화성방조제 남서쪽 연안

Fig. 1. Study area with stations of sampling in Gyeonggi bay.

Table 2. Latitude and longitude of the research areas

정점번호	위도(도분초)	경도(도분초)
st.1	37°19'27.76"N	126°37'24.14"E
st.2	37°17'38.05"N	126°32'22.09"E
st.3	37°11'20.53"N	126°31'30.73"E
st.4	37°10'01.04"N	126°33'49.65"E
st.5	37°09'36.59"N	126°36'16.02"E
st.6	37°04'59.01"N	126°40'22.12"E
st.7	37°06'28.15"N	126°21'49.74"E
st.8	37°06'20.45"N	126°26'03.59"E
st.9	37°06'17.88"N	126°31'04.09"E
st.10	37°03'04.84"N	126°36'31.85"E

Table 3. Aquaculture and water depth(Ave., Min, Max, Transparency) around each stations

정점번호	주변 양식 어장 종류	수심(m)			
		평균	최소	최대	투명도
st.1	-	21.0	15.0	25.0	1.6
st.2	해조류(김), 패류(바지락 등 기타패류)	12.3	10.0	15.0	1.9
st.3	-	20.4	12.0	30.0	2.1
st.4	해조류(김)	13.3	10.0	16.0	1.9
st.5	해조류(김, 미역, 다시마)	11.4	8.0	14.0	1.6
st.6	해조류(김), 패류(바지락 등 기타패류)	10.2	7.0	15.0	1.6
st.7	해조류(미역), 패류(전복 등 기타패류), 해삼	35.2	22.0	44.0	2.7
st.8	해조류(미역), 패류(바지락, 가리비, 전복 등 기타패류), 어류(조피볼락, 넙치 등)	11.3	7.0	15.0	2.4
st.9	해조류(미역), 패류(바지락, 키조개 등 기타패류)	15.8	7.0	21.0	2.7
st.10	해조류(김, 미역), 패류(바지락, 가리비 등 기타패류)	14.0	10.0	24.0	2.4

1-2. 현장측정 및 해수 시료 채수, 퇴적물 시료 채취

정점마다 수심에 따라 표층(표층 약 1 m 수심)과 2 m, 3 m, 5 m, 7 m, 10 m, 15 m, 20 m, 30 m, 저층(해저면 약 40 m)에서 다항목 수질측정기(YSI Pro DSS, USA)를 이용하여 수층별 수온, 염분, 용존산소(DO), pH를 측정하였고, 현장에서 지름이 30 ㎝ 하얀색 원형판(Secchi disk)을 이용하여 투명도를 측정하였다.

동일한 정점에서 채수기(Niskin water sampler 5L, USA)를 이용하여 표층과 저층 (각 정점의 최하층)의 해수를 채수하였다. 이후 주사기와 필터(Φ25 ㎜, 0.45 ㎛)를 이용하여 영양염(5항목: 암모니아 질소, 아질산 질소, 질산 질소, 인산 인, 규산 규소)과 총질소, 총인 분석에 사용할 시료를 전처리하고, -80 ℃ 초저온냉장고에 보관하였다가 가능한 한 달 이내에 분석하였다. 또한 동일한 표층과 저층 시료에서 화학적산소요구량 분석을 위한 시료를 전처리하여 실험실로 이동 후 가능한 빠른 시간내에 분석하였다.

동일 정점에서 매년 2, 8월 총 2회 채니기(Van Veen grab sampler))를 이용하여 저층의 해양퇴적물 시료를 채취하였다. 퇴적물 상부 1 ㎝를 걷어낸 이후 채니기의 금속 재질과 접촉하지 않는 부분의 시료 약 50 g을 폴리에틸렌 광구병에 담아 냉동보관 하였다가 가능한 한 달 이내에 분석하였다.

Fig. 2. Measurements and analysis on the ship & lab.

1-3. 현장분석

해양생물공정시험기준(해양생물공정시험기준, 2013) 따라 해수시료 500 mL를 유리섬유 여과지로 여과하는 동안 1 % 탄산마그네슘 용액 수 방울을 첨가하여 여과지에 걸러진 색소가 산성화됨을 방지하였다. 물기가 제거된 여과지는 15 ㎖ 시험관 또는 원심분리관에 잘 접어 넣은 후 알루미늄 호일을 이용해 빛을 차단하고, 냉동보관 후 가능한 빨리 분석하였다(-20 ℃ 이하).

2. 실험실 분석

2-1. 수질 영양염 및 총질소, 총인 분석

냉동된 시료를 실온에 녹인 후 영양염 자동분석기 Quaatro SFA Analyzer(Seal Analytical)를 이용하여 영양염 5종(암모니아 질소, 아질산 질소, 질산 질소, 인산 인, 규산 규소) 및 총질소와 총인을 분석하였다. 펌프튜브를 통해 흡인된 각각 표준물질과 분석시약을 이용하여 검량선을 확인한다. 시료와 분석시약을 화학반응 시킨 후 각 영양염에 고유한 파장에서 반응되는 값을 측정하였다. 총질소와 총인은 추가적으로 가열반응기를 추가하여 열 반응 이후 고유한 파장의 값을 측정하였다.

2-2. 식물플랑크톤 클로로필 농도 분석

현장에서 여과한 여과지를 드라이아이스에 냉동 보관하여 실험실로 운반한 후, 90% 아세톤에 넣어 하루 동안 추출하여 형광광도계(10-AU, USA)를 이용하여 fluorometric method(Parsons et al.,1984)에 따라 측정하였다. 분석 전 Blank 값 및 고체표준물질을 이용한 Low와 High 값을 확인한다.

2-3. 화학적산소요구량 분석

현장에서 채수된 해수 약 10 ㎖을 냉장보관 하여 실험실로 운반후, 해수전용분석기(HS-1000SW)와 전용 해수 COD 키트를 이용하여, 염분을 제거 후 과망간산칼륨법을 이용하여 해양환경공정법에 따라 값을 측정하였다.

Fig. 3. Measurements and analysis in the rab.

2-4. 해양 퇴적물 분석

채취된 해양퇴적물은 입도(입자크기), 강열감량(IL), 화학적산소요구량(COD), 산휘발성 황화물(AVS), 중금속 7종(납, 구리, 아연, 크롬, 카드뮴, 비소, 수은) 등 총 11개 항목을 ㈜ 한국연안환경생태연구소에 분석 의뢰하였다(퇴적물공정시험기준, 2013). 분석된 결과를 바탕으로 연구지역의 부영양화를 나타내는 IL를 해양수산부 고시 「해양오염퇴적물 조사 및 정화·복원 범위 등에 관한 규정 제2018-15호」에 따라 비교하였으며, 유기물 오염을 나타내는 COD, AVS를 해양수산부 고시 「수산생물 서식 어장환경 기준 제2017-109호」에 따라 비교하였다. 중금속의 경우 해수부에서 제시한 해양환경기준(MOF, 2013) 중 해저 퇴적물 미량금속 오염기준인 주의기준(TEL : threshold effects level)과 관리기준(PEL : probable effects level)을 이용하여 판단하였다. 기준에 명시된 원소 중 As, Cd, Hg, Pb은 퇴적물에서 측정된 농도를 직접비교, Cu와 Zn은 Li를 이용해 입도의 영향을 보정하여 국내 환경기준과 비교하여 오염현황을 분석하였다(Table 4).

Table 4. Marine environment standard seabed sediment standard

기준	Cu	Zn	Pb	Cd	As	Hg	Cr
대륙붕표준	25	71	20	0.098	1.5	0.08	-
TEL(주의)	20.6	68.4	44	0.75	14.5	0.11	116
PEL(관리)	64.4	157	119	2.72	75.5	0.62	181

* 주의기준 : 부적적인 생태영향이 일부 발현될 개연성이 있을 것으로 예측되는 농도
  관리기준 : 부정적인 생태영향이 발현될 개연성이 매우 높은 농도

2-5. 해역 평가

2-5-1. 수질평가지수(WQI) 분석

수질평가지수는 해수 중의 부영양화 관련 항목의 평가를 통해 산정하는 대표적인 해역별 수질등급 기준이며, 원인 물질인 영양염(DIN, DIP)과 1차 반응물질 인 클로로필 a와 투명도, 2차 반응물질인 저층산소포화도(%)를 이용해 각각 항목에 대해 점수를 부여한다(Table 5). 이후 총점을 합산하여 해당 해역의 등급을 산정한다. 이러한 등급 산정을 통해 해양생태계의 건강을 파악할 수 있다(MOF, 2003).

Table 5. WQI(Water Quality Index) rating table and evaluation

구분		수질평가 지수값	비고
1등급	(매우좋음)	23 이하	외부의 오염물질이 해양에 거의 유입되지 않는 건강한 바다상태
2등급	(좋음)	24 ~ 33	
3등급	(보통)	34 ~ 46	외부의 영양을 받기 시작하면서 해양생물에 영향을 미치게 되는 상태
4등급	(나쁨)	47 ~ 59	외부에서 영양염이 과하게 유입, 또는 생물량 증가로 인해 해수 중 녹아있는 산소량이 부족해지는 상태
5등급	(매우나쁨)	60이상	

2-5-2. 부영양화 정화지수(CIET) 분석

부영양화 정화지수는 부영양화 물질에 의한 해양퇴적물의 오염정도를 가늠하는 척도로, 감열 감량, 화학적 산소 요구량, 산휘발성 황화물을 이용하여 산출된 지수이다(MOF, 2003). 3개 항목의 합산점수가 6 미만일시 양호, 6 이상인 경우 부영양화 상태를 의미한다(Table 6).

Table 6. CIET(Clean-up Index of Eutrophication) scorecard and evaluation

항 목	단위	기준농도	평가점수	기준농도
IL	%	5	0	5 미만
		15	3	15 미만
		15	6	15 이상
COD	mg/g	13	0	13 미만
		20	1	20 미만
		30	2	30 미만
		40	4	40 미만
		40	6	40 이상
AVS	mg/g	0.6	0	0.6 미만
		1	1	1 미만

		5	2	5 미만
		10	4	10 미만
		10	6	10 이상

2-5-3. 농집지수(I_{geo}) 분석

퇴적물 내 중금속의 인위적인 오염에 대해 평가하기 위해 농집지수(I_{geo} : geoaccumulation index)(Müller, 1696)를 계산하여 금속원소의 오염정도를 파악하였다.

$$I_{geo} = \log_2 \frac{Cn}{Bn \times 1.5}$$

여기서 Cn은 연구지역의 퇴적물 내 금속원소의 농도, Bn은 금속원소의 자연적인 배경농도로 일반적으로 널리 사용되는 지각 중의 금속원소의 평균농도(Taylor,1964, Taylor McLennan, 1995)를 비교대상으로 하였다(Table 4).

조사항목들 간의 상관성은 비모수 통계방법인 스피어맨 랭크 상관계수(Spearman rank correlation coefficient)로 계산하였고, 통계적 유의계수는 $p < 0.05$로 하였다(Mintab, UK).

결과 및 고찰

1. 표·저층 물리환경요인의 변화

1-1. 수온

경기만 어장의 표층 수온은 조사기간 동안 2.3~26.7 ℃로 나타났다. ‘21년도(2.8~25.6 ℃)에 비해 최소값은 0.5 ℃ 감소했고, 최대값은 1.1 ℃ 증가했다. `20년도(4.4~26 ℃)에 비해 최소값은 2.1 ℃ 감소했고, 최대값은 0.6 ℃ 증가했다. `19년도(2.4~27.5 ℃)와 비교시 최소값은 0.1 ℃ 감소했고 최대값은 0.8 ℃ 감소했다. 최근 3년간 연중 표층수온의 최소값은 감소하고 최대값은 증가하는 경향을 보이며, 수온의 양극화가 심해지고 있는 것으로 추정된다.

월별 표층 평균수온은 1월초~3월말에 2.3~5.5 ℃ 범위를 보였고, 4월부터 수온이 증가하여 6월까지 19.8 ℃, 8월말 최대 26.7 ℃까지 증가하였다가 이후 기온감소에 따라 12월말 8.8 ℃로 감소하였다. 저층 수온은 계절풍이 강한 1~2월, 11~12월에는 표층과 저층의 수온차이가 거의 없었으나, 나머지 기간에는 표층과 저층간 수온차이가 작게는 0.01 ℃, 크게는 2.0 ℃이상 차이를 보였다(Fig. 4).

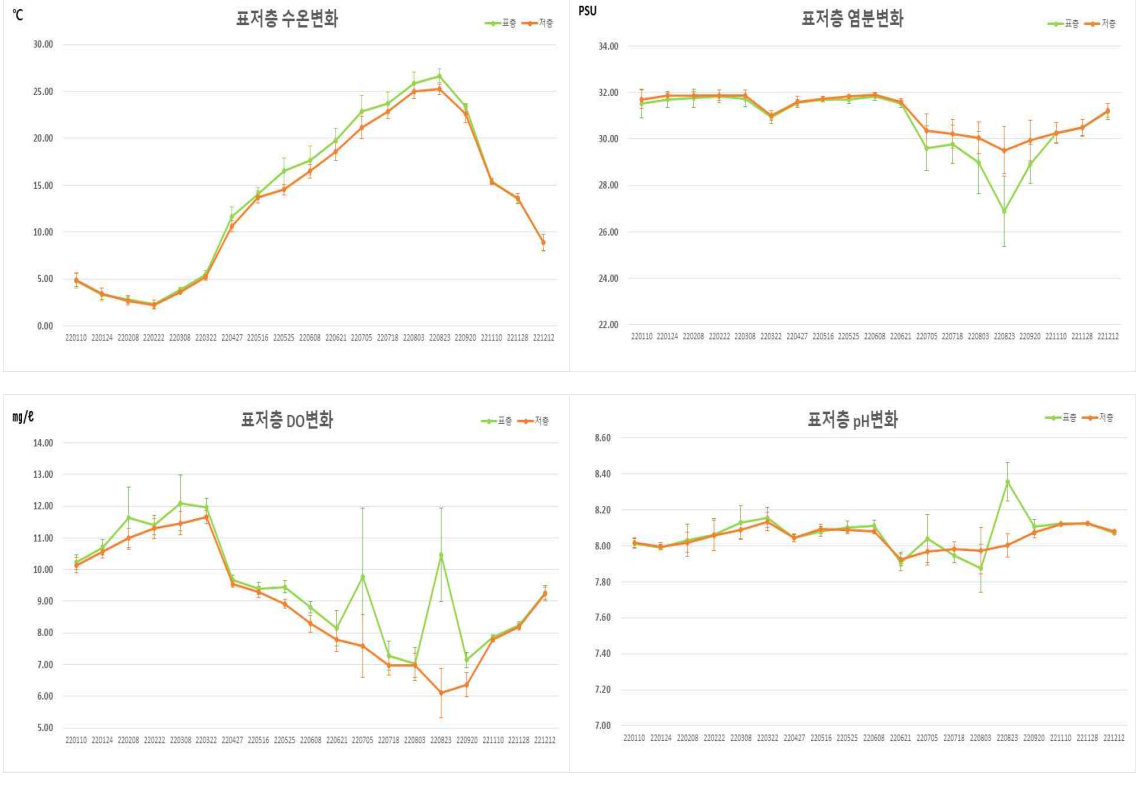


Fig. 4. Monthly variation of surface&bottom average temperature, salinity, DO, pH in Gyeonggi bay.

경기만 어장의 표층 수온의 수평적 변화 양상을 조사하기 위해 공간적 변화를 나타내었다. 1월부터 2월말까지는 만 안쪽인 제부도 남서쪽 연안과 화성방조제 남서쪽(st.5, 6) 및 시화방조제 북쪽 연안(st.1)에서 바깥쪽인 풍도와 육도(st.7, 8)로 갈수록 수온이 높아지는 공간적 분포를 나타냈고, 그 이후인 3월에는 그 경계가 모호해지고 9월까지 만 안쪽에서 바깥쪽으로 갈수록 수온이 낮아지는 공간적 분포를 나타냈다(Fig. 5). 이는 계절에 따라 육상과 해상의 비열 차이로 인해 유입되는 담수의 수온에 변화를 가져오기 때문이다. 경기만은 여름에 해수보다 높은 온도의 담수가 다량 유입되어 만 안쪽의 수온이 증가하고, 풍도 외해측에서 유입되는 저온수의 영향을 받는다. 9~10월을 기점으로 강한 계절풍의 영향으로 냉각된 시화호, 화성호 등 연안에서 유입된 담수로 인해 가을과 겨울에 경기만 안쪽의 수온이 바깥보다 낮은 공간적 분포를 보이는 것으로 나타난다.

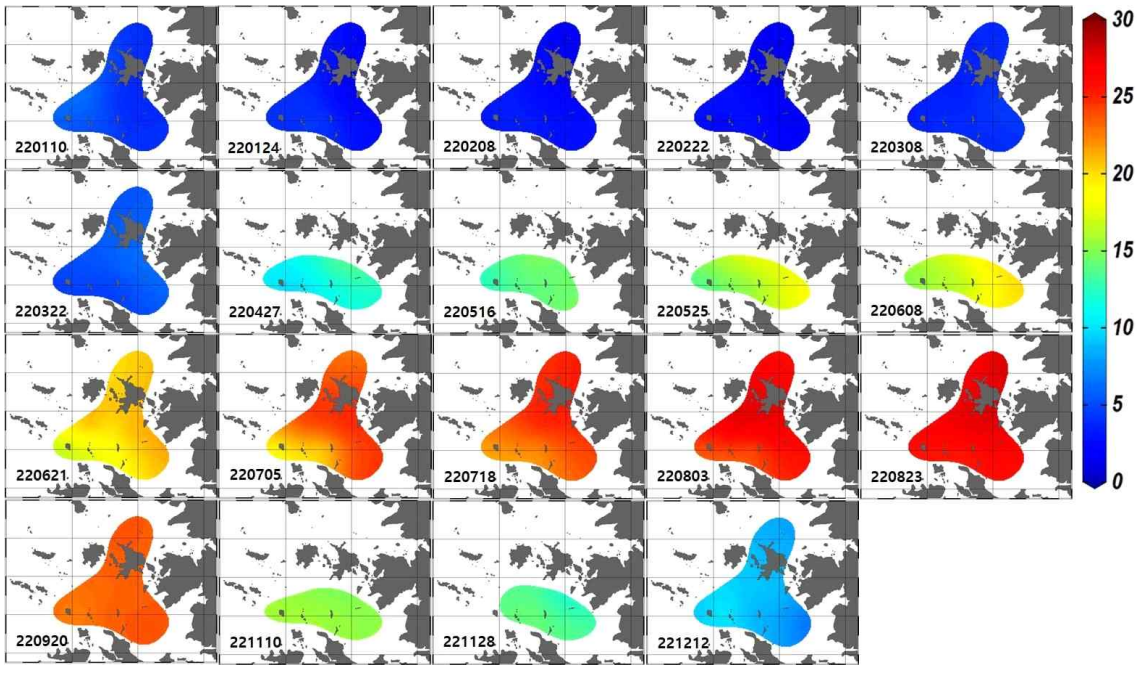


Fig. 5. Temporal and spatial distributions of temperature in the surface water.

1-2. 염분

월별 표층 염분은 연중 28.9~31.8 PSU 안정적이었으나, 7~8월 계절적 요인으로 인한 강수량 증가로 인해, 일부 내만 해역에서 담수량 유입 증가로 조금 염분이 낮아졌으나 (26.9 PSU) '21년도처럼 9월 저염분(18 PSU) 현상이 보이지는 않았다. 표층과 저층의 염분은 대부분 기간에 크게 차이가 없었으나 저층이 표층보다 조금씩 높았다(Fig. 4). 염분은 수온과 음의 상관관계를 가지는 것으로 나타났으나 유의하지는 않았다 (Spearman's rank correlation coefficient, n = 19, r = -0.702, p = 0.001). 또한 공간적으로 담수 유입 해역에서 낮은 염분값을 보였으며, 8월말 화성방조제 연안에서 일시적으로 24.0 PSU 정도의 낮은 염분이 관측되었다(Fig. 6).

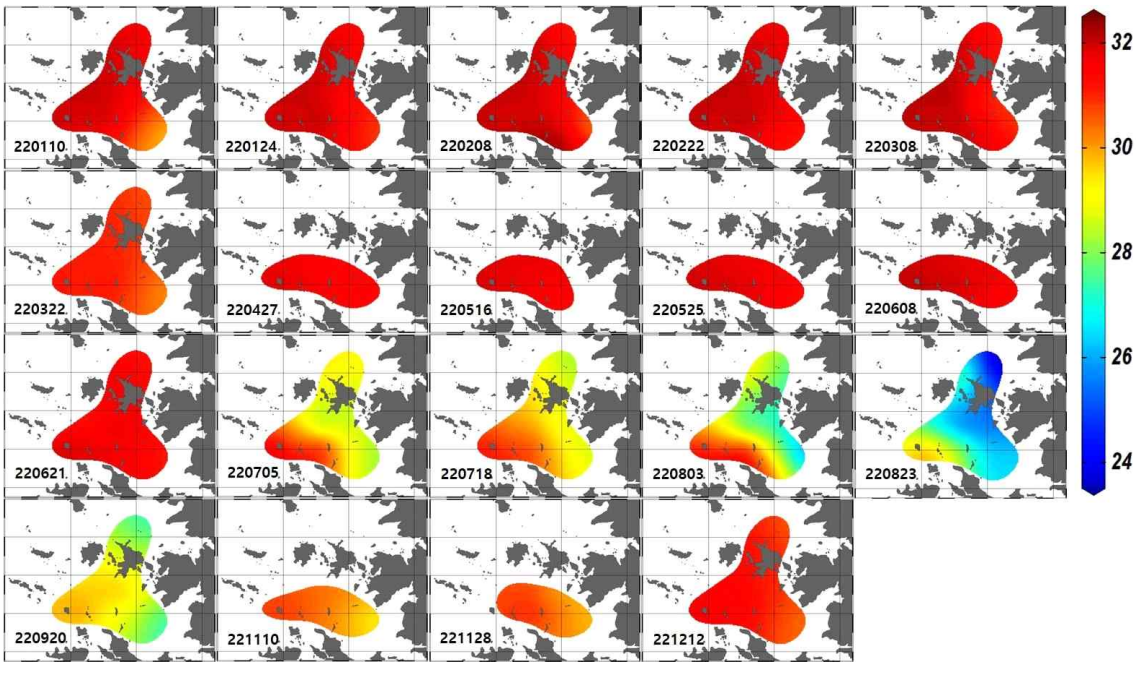


Fig. 6. Temporal and spatial distributions of salinity in the surface water.

1-3. 용존산소(DO)

월별 표층 평균 DO는 7.02~12.1 ㎎/ℓ 범위로 나타났는데, 1~3월에 10.24~12.10 ㎎/ℓ로 가장 높은 값을 나타냈고, 이후 감소하여 소폭 증감을 계속하다 7월초와 8월말에 이상적으로 높은 값(9.76 ~ 10.47 ㎎/ℓ)을 나타냈다. 식물플랑크톤 분석자료와 비교해 보았을 때 7월초와 8월말 나타난 높은 용존산소 농도는 식물성 플랑크톤와 연관성이 있으나 전체 기간에서는 식물플랑크톤의 농도와 유의한 상관관계가 나타나지 않았다.다른 조사 기간에 비해 담수가 유입되는 구봉도 연안, 화성방조제와 국화도 연안에서 매우 높은 클로로필 a 농도(10~20 ㎍/ℓ)가 관측되었다. DO는 조사 전체기간 동안 표층이 저층보다 높은 값을 나타냈으며, 2~3월과 7월초, 8월말에 그 차이가 컸다(Fig 4). 이때 DO는 수온과 매우 유의한 음의 상관관계를 가지는 것으로 나타났다(Spearman's rank correlation coefficient, n = 19, r = -0.695, p = 0.001). 또한, 연구해역의 표층 DO는 모든 계절에서 7 ㎎/ℓ 이상으로 수중생물의 생존 한계농도인 5 ㎎/ℓ (Yoshida, 1973)보다 높게 나타났으나 여름철(8월말) 화성방조제 저층에서 용존산소농도가 5 ㎎/ℓ이하(4.62 ㎎/ℓ)를 나타내 저산소 현상이 관찰되었다.

보통 DO는 수온과 밀접한 환경요인이다. 수온이 낮은 겨울은 표층수에 접촉한 대기에서 산소가 다량 표층해수로 녹아들고 강한 바람에 의해 혼합이 활발해지며 전 수층에서 DO가 높고 수온이 높은 여름은 반대로 DO가 낮은 경향을 보인다. 수온이 높은 여름철에 DO 상승은 식물성 플랑크톤의 이상증식이 원인으로 추정된다.

1-4. pH

표층 평균 pH는 기간 중 7.87~8.36 범위로 조사되었으며, '21년 7.47~8.33, `20년 7.77~8.35, `19년 7.86~8.57 관측값과 비교시 그 범위가 최소값, 최대값 모두 하향되는 추세를 보였는데 올해는 최대값과 최소값이 모두 상향되었다(Fig. 4). 공간적으로는 동일 시기에 수평적 변화는 미비했으며, 표저층 차이도 주된 경향을 찾기 어려웠다. 일부 조사에서는 용존산소와 상관관계가 있는 것처럼 나타났지만 통계분석 결과 유의성은 없었다. 경기만 pH 변화는 질산염, 아질산염, 암모늄 등의 화학적 요소와 경기만에 서식하는 해양생물들의 호흡량과 광합성량 등에 생물학적 요소, 바람 및 해수의 흐름 등과 같은 물리적 요소까지 복합적인 요인이 작용 되었을 것으로 추정된다.

2. 경기바다 평년 및 고수온기 표층수온의 변화

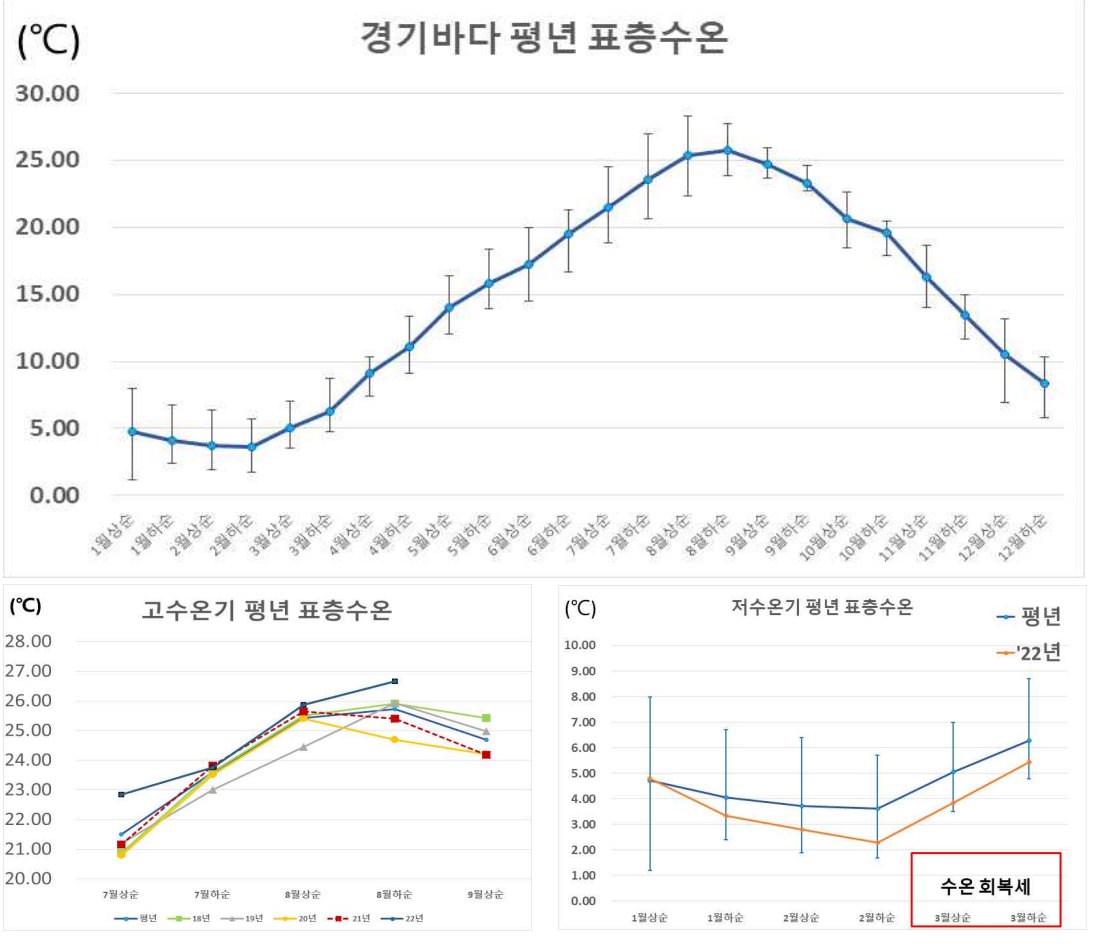


Fig. 7. Changes in surface water temperature during normal and high & low temperatures in Gyeonggi bay.

경기바다의 평년 수온 변화를 파악하기 위하여, 직년 5년의 관측자료를 활용하여, 1년을 24구간(15일 단위)으로 나누어 구분하고 각 구간별 최대, 최소값을 막대로 표시하였다 (Fig. 7, Table 7). 또한 고수온기에는 과거 수온 관측자료를 활용하여 수온상승 값이 유사한 연도와 현재 상황을 비교, 추측하였다(Fig. 7). 이를 통하여 관측되는 수온의 이상유무와 이로 인한 양식생물 피해를 예방하고자 `22년도에는 10회에 걸쳐 어업인 60여명과 관계기관에 조사결과를 SNS를 이용하여 속보로 제공하였다. 특히 '22년 7월초에는 평년에 비해 1.4 ℃가 높은 경향을 보였고 8월 말까지 26.7 ℃로 평년대비 높은 수온이 관측되었다. 반면 겨울철에는 수온 감소 양상은 유사하였으나 2월상순과 하순에 수온 감소가 두드러졌다. 이를 통해 '22년 표층수온은 평년에 비해 고수온기에는 더 크게 증가하고 저수온기에는 더 크게 감소함으로써 수심이 얕은 경기바다가 기온에 많은 영향을 받는 것을 확인할 수 있다.

Table 7. Monthly average annual water temperature and maximum and minimum values

평년표층 평균수온	1월상순	1월하순	2월상순	2월하순	3월상순	3월하순
	4.73	4.05	3.73	3.63	5.05	6.28
최소	1.20	2.40	1.90	1.70	3.50	4.80
최대	8.00	6.70	6.40	5.70	7.00	8.70
평년표층 평균수온	4월상순	4월하순	5월상순	5월하순	6월상순	6월하순
	9.08	11.11	14.06	15.87	17.29	19.52
최소	7.40	9.10	12.00	13.90	14.50	16.70
최대	10.30	13.40	16.40	18.40	20.00	21.30
평년표층 평균수온	7월상순	7월하순	8월상순	8월하순	9월상순	9월하순
	21.50	23.61	25.42	25.74	24.70	23.33
최소	18.90	20.70	22.40	23.90	23.70	22.70
최대	24.50	27.00	28.30	27.80	26.00	24.60
평년표층 평균수온	10월상순	10월하순	11월상순	11월하순	12월상순	12월하순
	20.68	19.59	16.35	13.43	10.54	8.35
최소	18.50	17.90	14.00	11.70	6.90	5.80
최대	22.60	20.50	18.70	15.00	13.20	10.30

3. 월별 표·저층 영양염 및 총질소, 총인 변화

3-1. 암모니아 질소(NH_4-N)

경기만의 표층 암모니아 질소는 동계 조사시 0.955~2.542 uM/L(이하 단위 생략) (평균 1.793), 춘계 1.078~2.494(평균 1.654), 하계 1.122~6.928(평균 4.021), 추계에는 0.349~1.601 (평균 0.884)의 범위를 보였다. 저층 암모니아 질소는 동계 조사시 0.954~2.041(평균 1.563), 춘계 0.869~2.592(평균 1.686), 하계 3.828~7.694(평균 5.481), 추계에는 0.344~0.870 (평균 0.569)의 범위를 보였다. 그리고 계절별 표저층 비교시 동계와 추계에는 저층값이 낮았으며, 하계와 추계에는 표층값이 낮았다.(Fig. 8).

3-2. 아질산 질소(NO_2-N)

경기만의 표층 아질산 질소는 동계 조사시 0.243~0.302 uM/L(이하 단위 생략)(평균 0.277), 춘계 0.048~0.152(평균 0.098), 하계 0.549~0.958(평균 0.670), 추계에는 0.842~6.379(평균 2.482)의 범위를 보였다. 저층 아질산 질소는 동계 조사시 0.194~0.243(평균 0.213), 춘계 0.066~0.146 (평균 0.098), 하계 0.315~1.080(평균 0.588), 추계에는 0.814~5.983(평균 2.371)의 범위를 보였다. 그리고 계절별 표저층 비교시 대부분의 계절에서 표층 아질산 질소가 더 높게 나타났다(Fig. 8).

3-3. 질산 질소(NO_3-N)

경기만의 표층 질산 질소는 동계 조사시 6.231~16.737 uM/L(이하 단위 생략)(평균 12.565), 춘계 0.732~5.165(평균 1.995), 하계 4.455~7.100(평균 5.526), 추계에는 0.842~6.379(평균 6.930)의 범위를 보였다. 저층 질산 질소는 동계 조사시 6.102~15.993(평균 12.245), 춘계 0.899~5.548 (평균 2.212), 하계 2.353~6.425(평균 4.378), 추계에는 6.026~6.829(평균 6.408)의 범위를 보였다. 그리고 계절별 표저층 비교시 춘계를 제외한 계절에서 분석값이 표층 질산 질소가 더 높게 나타났다(Fig. 8).

3-4. 인산 인(PO_4-P)

경기만의 표층 인산 인은 동계 조사시 0.363~1.575 uM/L(이하 단위 생략)(평균 0.835), 춘계 0.095~0.591(평균 0.312), 하계 0.267~0.734(평균 0.555), 추계에는 1.076~1.280(평균 1.219)의 범위를 보였다. 저층 인산 인은 동계 조사시 0.194~1.545(평균 0.853), 춘계 0.135~0.596(평균 0.321), 하계 0.452~0.659(평균 0.570), 추계에는 1.004~1.315(평균 1.214)의 범위를 보였다. 그리고 계절별 표저층 비교시 저층이 조금 높은 경향을 나타냈다.(Fig. 8).

3-5. 규산 규소(SiO_2-Si)

경기만의 표층 규산 규소는 동계 조사시 0.790~18.711 uM/L(이하 단위 생략)(평균 11.425), 춘계 1.219~3.526(평균 3.510), 하계 9.022~13.947(평균 11.458), 추계에는 12.699~14.740(평균 13.826)의 범위를 보였다. 저층 규산 규소는 동계 조사시 0.838~18.697(평균 11.688), 춘계 1.118~6.938(평균 3.300), 하계 6.633~14.259(평균 10.638), 추계에는 12.540~14.180(평균 13.416)의 범위를 보였다. 그리고 계절별 표저층 비교시 춘계와 추계에서 표층이 높은 경향을 나타냈다(Fig. 8).

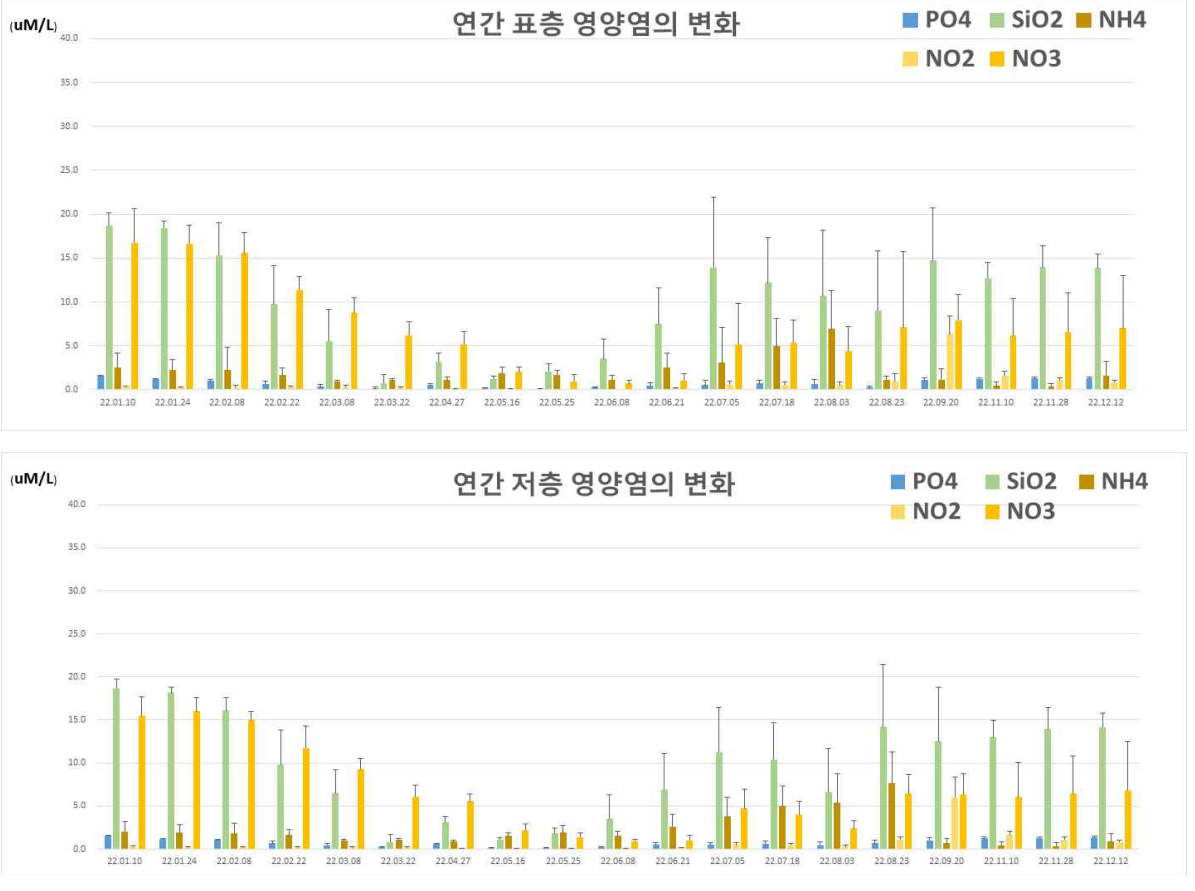


Fig. 8. Monthly variation of surface&bottom average nutrients(PO_4, SiO_2, NH_4, NO_2, NO_3).

3-6. 총질소(T-N)

경기만의 표층 총질소는 동계 조사시 0.315~0.458 mg/L(이하 단위 생략)(평균 0.392), 춘계 0.225~0.297(평균 0.250), 하계 0.362~0.437(평균 0.391), 추계에는 0.333~0.410(평균 0.371)의 범위를 보였다. 저층 총질소는 동계 조사시 0.322~0.444(평균 0.397), 춘계 0.230~0.307(평균 0.276), 하계 0.305~0.451 (평균 0.366), 추계에는 0.328~0.414(평균 0.373)의 범위를 보였다. 그리고 계절별 표저층 비교시 하계에서만 표층 총질소가 더 높게 나타났다(Fig. 9).

3-7. 총인(T-P)

경기만의 표층 총인은 동계 조사시 0.021~0.039 mg/L(이하 단위 생략)(평균 0.030), 춘계 0.011~0.019(평균 0.015), 하계 0.023~0.038(평균 0.029), 추계에는 0.034~0.040(평균 0.037)의 범위를 보였다. 저층 총인은 동계 조사시 0.027~0.042(평균 0.034), 춘계 0.014~0.027(평균 0.019), 하계 0.021~0.039 (평균 0.030), 추계에는 0.027~0.068(평균 0.044)의 범위를 보였다. 그리고 계절별 표저층 비교시 전 계절에서 표층 총인이 미세하게 낮았다(Fig. 9).

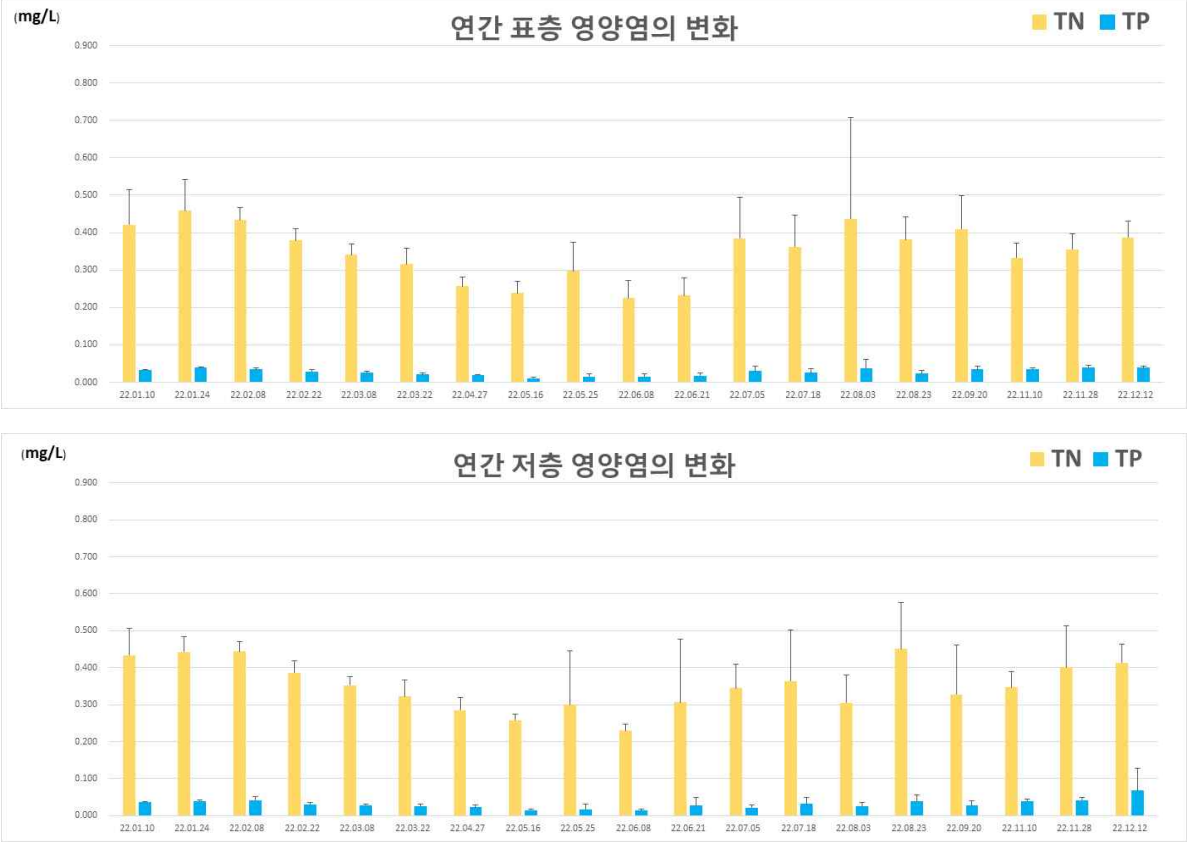


Fig. 9. Monthly variation of surface&bottom average T-N, T-P.

4. 표·저층 총질소, 총인의 수평적·수직적 변화

4-1. 총질소(T-N)

경기만 어장의 표저층 T-N의 수평적 변화 양상에 대해 분석하기 위해 각 정점별 조사된 조사일자별 T-N의 평균과 표준편차로 박스그래프를 만들었다. T-N는 표저층간 차이를 보였으나 유의한 값은 아니였다. 제부도와 시화방조제 입파도, 국화도 연안에서는(st.5, 6, 9, 10) T-N의 값이 표층이 저층보다, 대부도 남서쪽에서는 저층이 표층보다 비교적 높았다(Fig. 10).

4-2. 총인(T-P)

경기만 어장의 표저층 T-P의 수평적 변화 양상에 대해 분석하기 위해 각 정점별 조사된 조사일자별 T-P의 평균과 표준편차로 박스그래프를 만들었다. T-P는 대부분 정점에서 표층이 저층보다 높았다. 하지만 통계적으로 유의한 차이는 없었다. 시화방조제 연안과 제부도 연안, 국화도 연안(st.1, 5, 10)에서 저층 T-P가 표층 T-P보다 확연히 높았다. (Fig. 11).

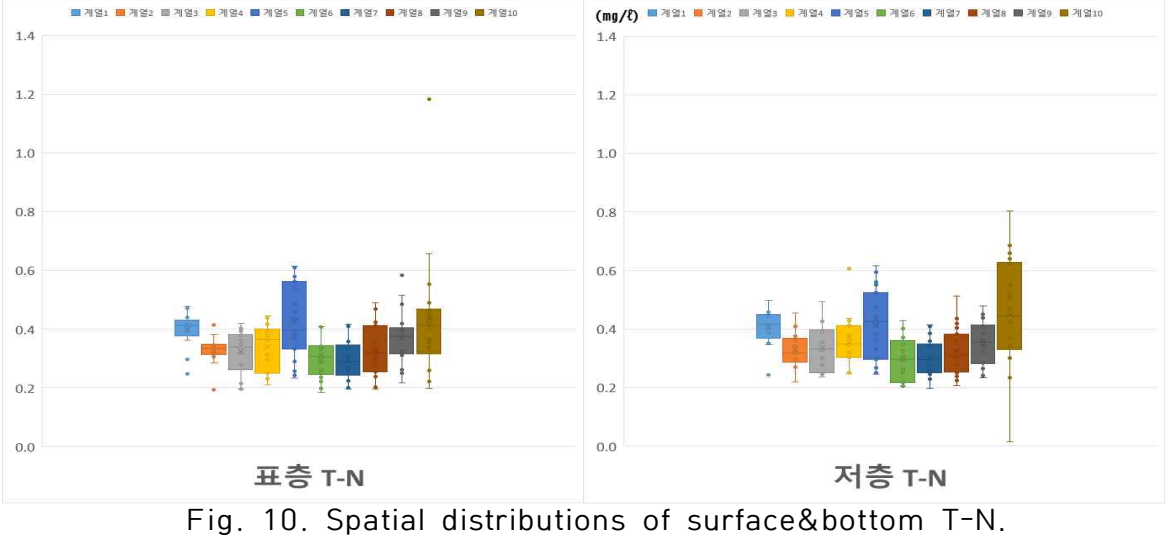


Fig. 10. Spatial distributions of surface&bottom T-N.

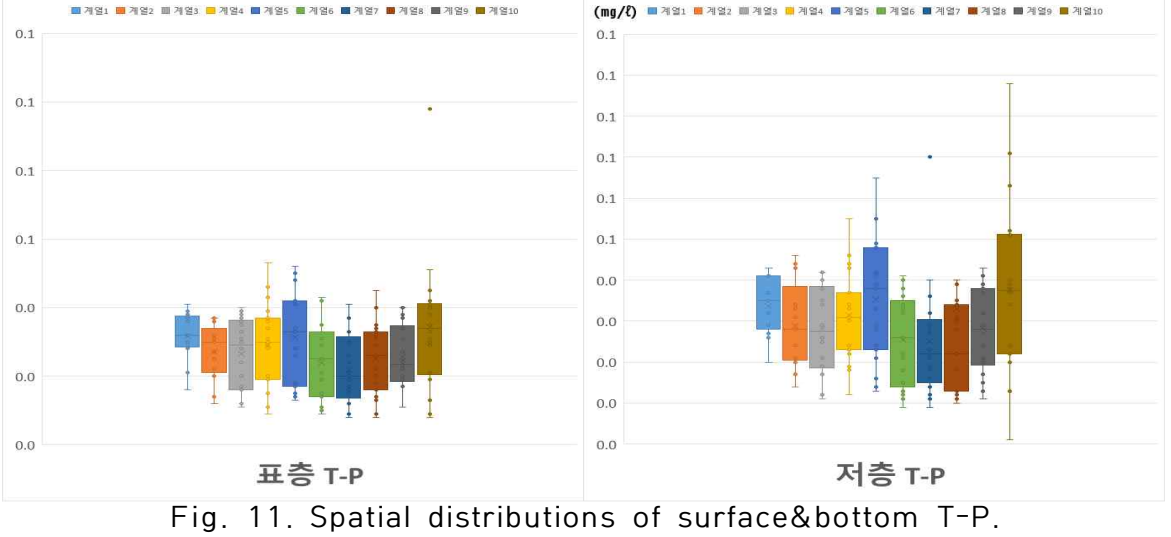


Fig. 11. Spatial distributions of surface&bottom T-P.

5. 서해권역 표·저층 DIN, DIP의 연간 변화

국립수산과학원에서 매년 연 6회(2, 4, 6, 8, 10, 12월)에 조사하는 서해안 연안환경정보지의 자료와 우리 연구소에서 분석한 DIN(용존무기질소)과 DIP(용존무기인)를 비교하였다(Fig. 12). 우리 연구소에서는 기상 및 선박 일정에 의해 10월 분석자료를 확보하지 못했다. 월별로 변화하는 DIN는 2월에서 6월로 갈수록 줄어들다가 6월에 가장 낮은 값을 보이며, 8월부터 다시 증가하는 경향은 수과원의 관측 결과 뿐만 아니라 다른 지자체 해역과 유사한 것으로 나타났다. 다만 인천의 경우 다른 해역과 다르게 8월에 가자 높은 용존무기질소 값을 나타냈다. 경기도 DIP의 경우 2월부터 줄어들다가 6월에 가장 그 값이 낮았으며, 이후 증가하는 추세를 보였다. 경기와 인천, 태안, 군산을 비교하였을 때, 보통 인천에서 가장 높은 DIN과 DIP가 관측되었고, 경기도는 그 다음을, 태안과 군산은 경기도보다 DIN과 DIP이 대부분 낮은 값을 갖는 것으로 관측되었다. 경기도는 김 양식에 필요한 영양염 성분이 타 지방정부에 비해 높은 것으로 판단된다. 국립수산과학원과 우리연구소 DIN 및 DIP 수치가 다른 것은 조사를 한 지점의 위치와 개소수 차이로 보이며, 수치의 차이는 있지만 경향성은 유사한 것으로 나타났다.

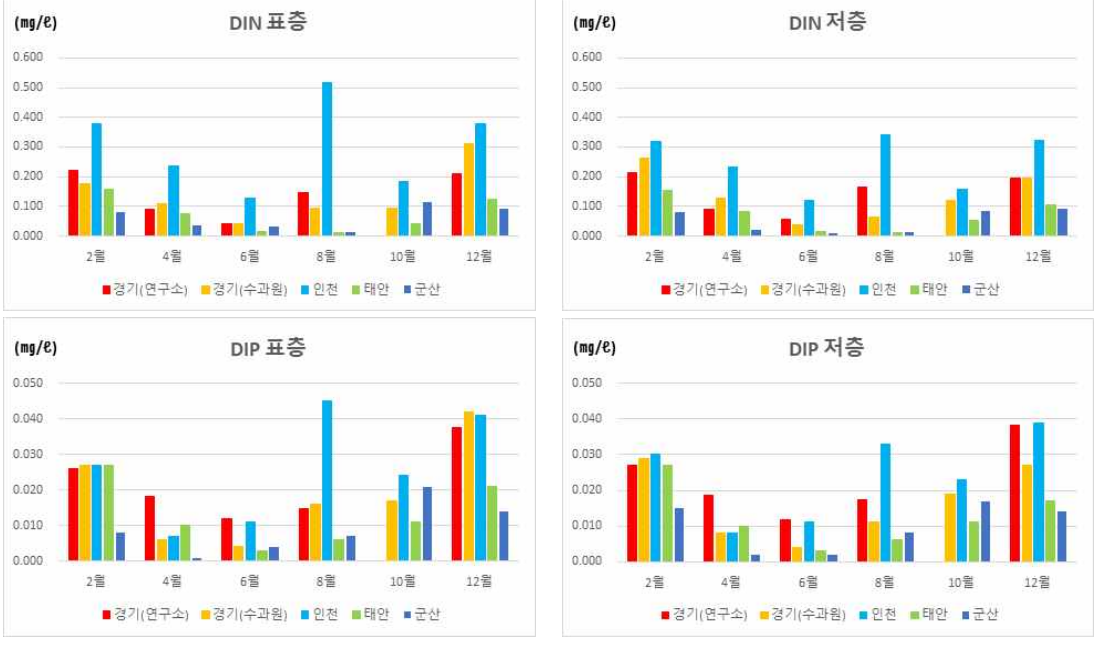


Fig. 12. Variation of surface&bottom average DIN, DIP.

6. 표·저층 클로로필 a(Chl-a) 농도 변화

표층 Chl-a는 1월초 1.261 ug/ℓ(이하 단위 생략)로 낮았다가, 이후 2월초부터 증가하여 3월초 연중 세 번째로 높은 값(18.744)이 나타났다. 이후 일부 담수유입 해역(시화·화성방조제)에서 10 이상의 값을 보였으나 평균적으로 6월말까지는 감소추세를 보이다가 7월초 연중 2번째로 높은 값인 평균 19.202(4.450~45.485)을 보였다. 이후 클로로필은 8월초까지 약 5 정도 급감하였다가, 8월말 30.177 값을 기록하며 연중 최고 값을 기록했다. 특히 위 기간에 시화방조제에서 53.395라는 관측이래 최고값이 나타났다. 이후에는 클로로필 농도가 차츰 줄어드는 경향을 보였다. 저층 Chl-a 또한 표층 값과 유사한 경향을 보였으나, 대게 저층이 표층보다 그 값이 낮았고, 3월말 국화도 저층에서 최고값이 관측되었다(Fig. 13). 일반적으로 식물플랑크톤의 대번무의 영향으로 해양에서 수온과 태양광 증가, 겨울철 비축된 영양염의 영향으로 춘계와 추계에서 Chl-a의 농도가 상대적으로 높은 경향을 보이고, 동계에는 이러한 요인들의 부재로 인해 식물플랑크톤의 광합성이 줄어드는 경향을 보인다. `20년도 결과 역시 위와 유사한 경향이 나타났으나 `21년 경기바다의 조사결과를 보면 동계(1~3월)에 클로로필이 높게 나타나고 하계인 7~8월에 비교적 높은값이 관측되었다. '22년도에는 '21년도와 유사하지만 그 변동폭이 증가했으며, 또한 가을철에는 낮은 투명도(0.5~1m)로 인해 영양염은 상대적으로 풍부했으나 클로로필 값은 낮았다. 따라서 경기바다의 식물플랑크톤 번무는 일반적인 경향을 따르지 않은 것으로 추정된다. 향후 해당 부분의 지속적인 관찰이 필요하다.

표층과 저층 모두에서 시화방조제, 구봉도, 화성방조제, 국화도 연안 등에서 비교적 높은 Chl-a 농도가 관측되었다. 이는 경기만의 구조가 반폐쇄성에 내만으로, 적정수온과 해수유속이 느린 지형적 특성, 주변 육상(방조제)으로부터 유입되는 영양염류 등에 의해 식물성 플랑크톤이 성장할 수 있는 환경에 조성되었기 때문이다(Fig. 14).

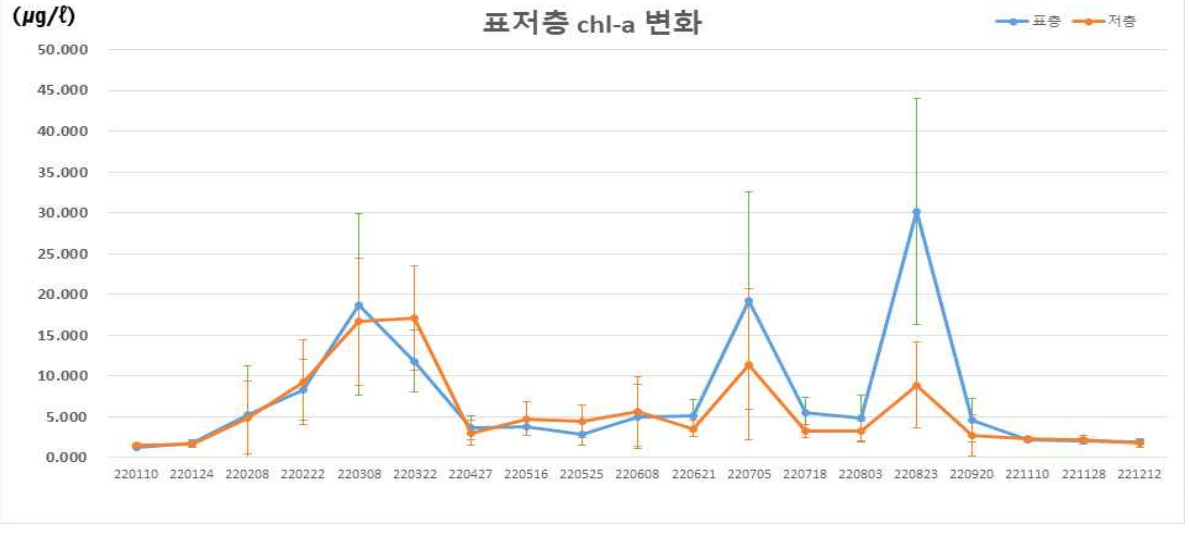


Fig. 13. Chl-a concentrations and differences in surface and bottom.

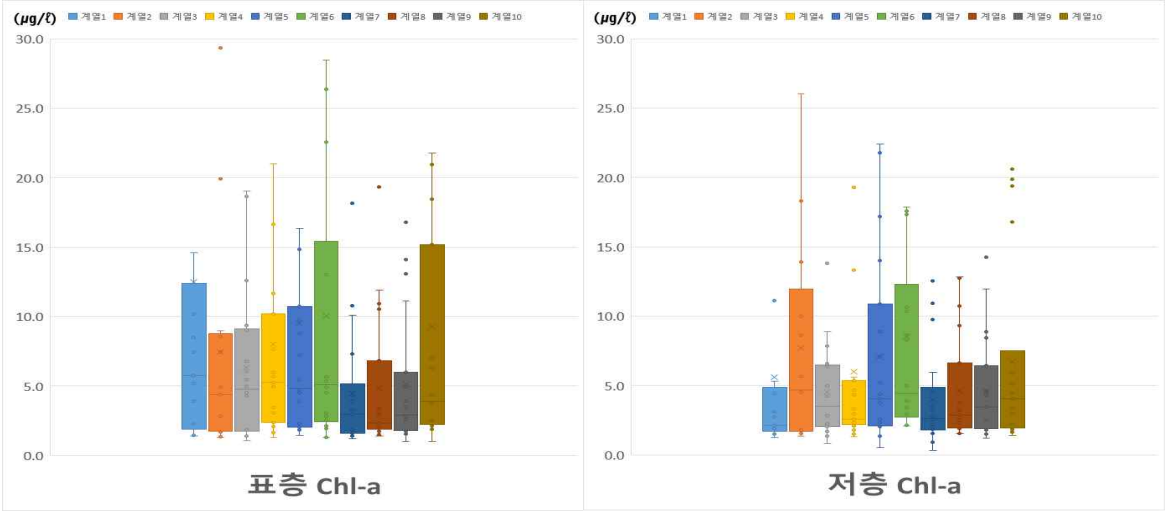


Fig. 14. Spatial distributions of surface&bottom Chl-a concentrations.

7. 표·저층 화학적산소요구량(COD)의 변화

경기바다 화학적산소요구량을 분석한 결과 전체해역에서 COD는 20 ㎎/ℓ(해양수산부 고시 제2017-109 수산생물서식 어장환경기준)를 초과하지 않았다. 다만 '21년도 최고값이 5 ㎎/ℓ 이하였으나, '22년에는 표층은 8.6 ㎎/ℓ, 저층은 12㎎/ℓ가 최고값으로 나타나 전년에 비해서 오염도가 증가하였음을 확인할 수 있었다. 표저층간 유의미한 차이는 없었다(Fig. 15).

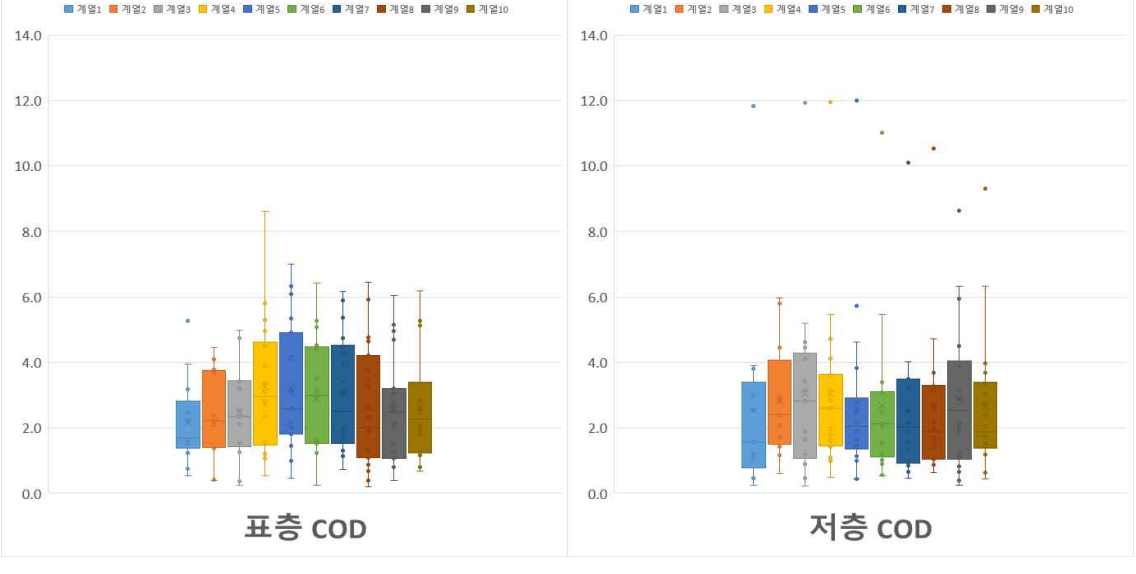


Fig. 15. Spatial distributions of surface&bottom Chl-a.

8. WQI 수질평가지수를 이용한 경기바다 수질평가

경기바다의 수질을 평가하기 위해 WQI를 이용하였다. `22년 1월부터 12월까지 경기바다 10개소에 대한 관측 횟수는 총 175건이었다. 그중 2등급 이상(외부의 오염물질이 해양에 거의 유입되지 않는 건강한 바다상태)은 관측비율 79.4%(139건)로 '21년 78.9%(157건)에 비해 수질 등급은 상승한 것으로 나타났다. 또한 4등급은 5건, 5등급은 1건으로 관측비율 3.4%에 불과했다. 4~5등급이 관측된 기간은 중 6~8월말 시화방조제와 화성방조제, 국화도 연안 등 담수유입이 많은 연안에서 식물성 플랑크톤의 농도가 매우 높았던 것이 주된 원인으로 추정된다(Fig. 16).

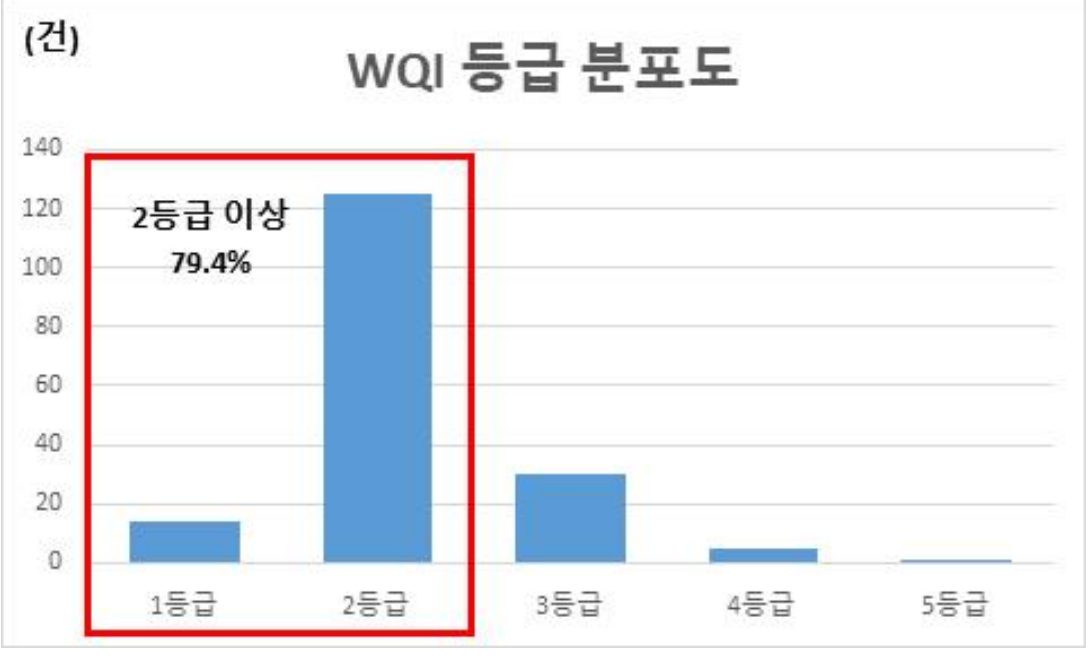


Fig. 16. Spatial distributions of surface&bottom Chl-a.

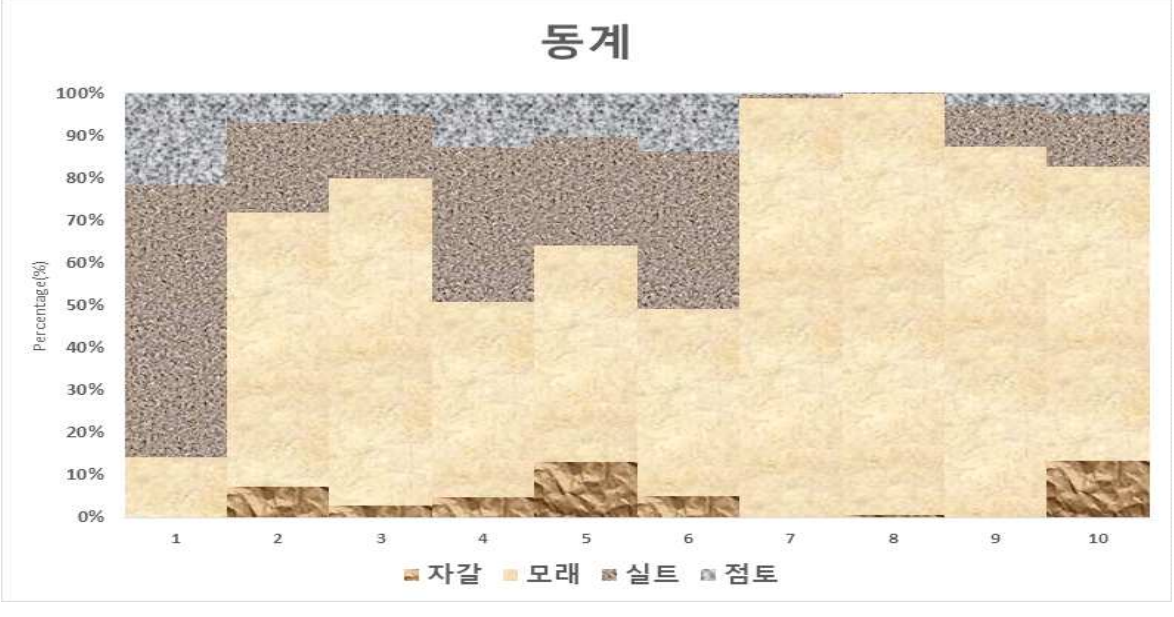
9. 해양퇴적물의 입도 변화

경기만 동계의 입도특성 조사결과, 전 정점의 평균 입도는 0.93~6.32 Φ로 조립사에서부터 중립실트 크기의 범위를 나타냈다. '21년에는 1.54~6.07 Φ로 중립사에서부터 조립실트 크기의 범위를 가진것과 비교시 모래는 굵어지고 실트는 가늘어져 입도범위가 더 넓어졌다. 자갈함량 0~13.3%(평균 4.6%)이고 모래함량 14.3~99.3%(평균 65.4%), 실트함량 0.1~63.9%(평균 22.1%), 점토 함량 0.0~21.8%(평균 7.9%)의 범위를 나타내었다. 퇴적상은 소량의 자갈과 펄, 모래가 혼합된 역니사질((g)mS)과 역사니질((g)sM)이 우세하며, 그 외

모래함량이 90%이상인 풍도(st.7), 육도(st.8)에서 사질(S), 약역사질((g)S)이 나타났다.

경기만 하계의 입도특성은 평균입도 1.62~6.44 Φ로 중립사에서부터 중립실트 크기의 범위를 보이며 '21년 평균 입도(1.57~6.01 Φ) 유사했다. 자갈함량 0~9.4%(평균 2.3%), 모래함량 8.8~99.9%(평균 59.8%), 실트함량 0.1~71.1%(평균 31.2%), 점토 0~20%(평균 6.6%)의 범위를 나타냈었다. 퇴적상은 동계와 유사하였으나 역사니질((g)sM)보다 사니질(sM) 우세하였다.

동계에서 하계로 갈수록 실트의 비율이 증가하였으며(st.1~3, 5~6, 8~10), 자갈, 모래의 비율은 감소하였다. 하지만 대부분 퇴적상은 거의 바뀌지 않았고 모래와 펄(실트+점토)의 비율만 바뀐 정도였다. 다만 입파도 연안에서 모래의 비율이 크게 감소하였다(Fig 17, Fig. 18).



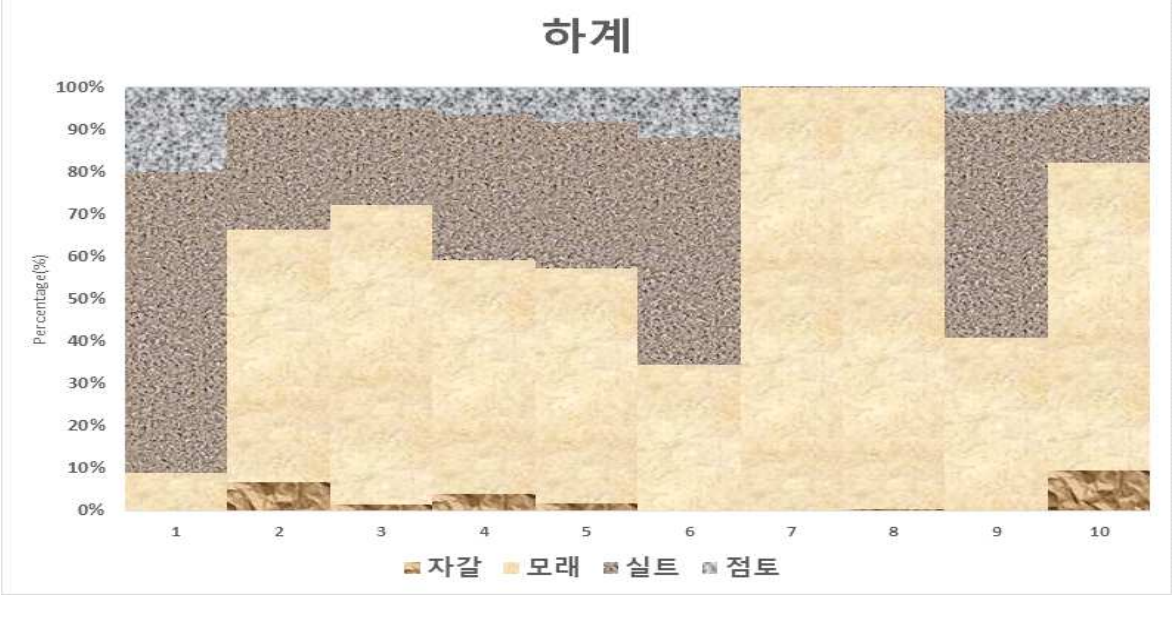
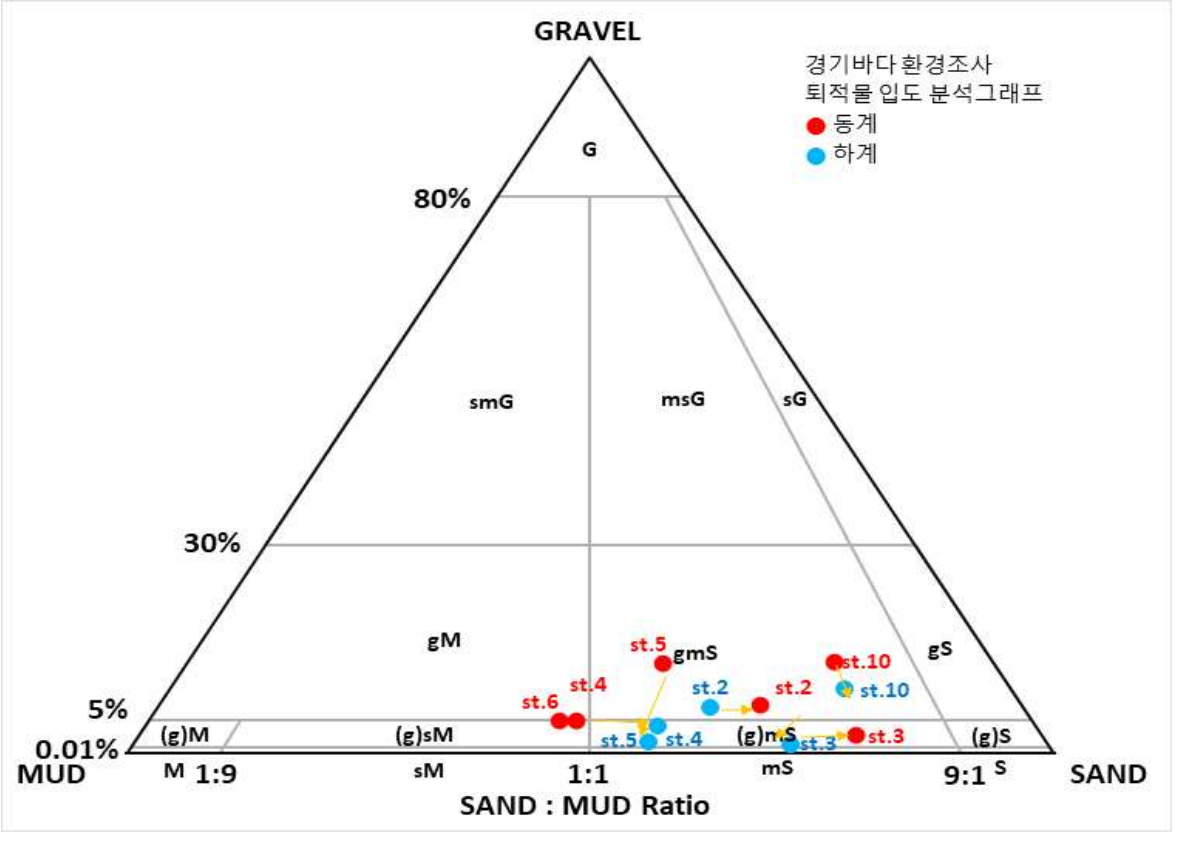


Fig. 17. Variations in the grain material composition of the Gyeonggi-bay in winter-summer.



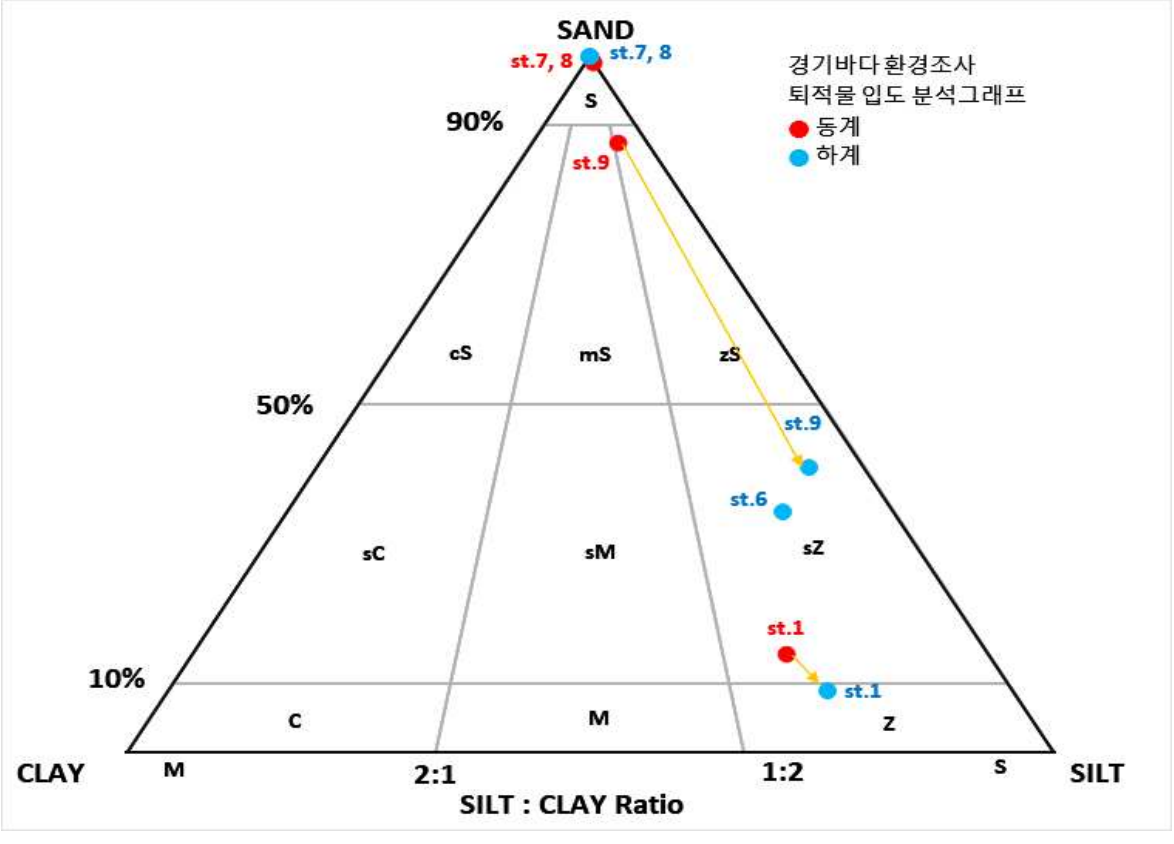


Fig. 18. Variations in the sedimentary type of the Gyeonggi-bay in winter-summer

9. 해양퇴적물의 오염도 현황 및 CIET, I_{geo} Index

동계 IL(강열감량)은 '21년(0.8~8.7%)과 비교시 0.7~6.0%로 유기물에 의한 대부분 해역에서는 오염징후는 감소하였고, 시화방조제 연안에서 '21년(8.7%) 보다 IL 수치가 6.0%로 줄어들었으나 오염기준인 5%는 초과했다. 하계 IL은 1.1~6.5%로 해역 대부분에서 오염징후가 소폭 증가하였으며, 시화방조제와 제부도, 입파도 연안(st.1, 5, 9) 기준농도의 오염기준인 5%를 조금 초과하였다(Fig. 19).

유기물 오염의 간접 지표인 COD(화학적산소요구량)은 동계(0.49~10.62 ㎎/g)와 하계(0.3~12.5 ㎎/g)에서 양식장 적지 기준인 20 ㎎/g 이하의 값이 나왔고, 펄 함량과 양의 상관성을 나타내었다. 비교적 펄의 함량이 높은 시화방조제 및 제부도, 입파도 연안(st.1, 5, 9)에서 COD가 높고 모래 함량이 높은 풍도, 육도 연안(st.7, 8)에서 비교적 낮게 나타났다(Fig. 19).

유기물 오염의 직접 지표인 AVS(산휘발성황화물)은 동계에 대부분 해역에서 불검출~0.061 ㎎/g(평균 0.02 ㎎/g)로 평균적으로는 양식장 적지기준이 0.5 ㎎/g 이하를 나타냈으며, 하계에서도 불검출~0.534 ㎎/g(평균 0.101 ㎎/g)로 평균적으로는 양식장 적지기준이 0.5 ㎎/g 이하를 보이지만, 시화방조제(st.1)서 기준치를 소폭 초과(0.53 ㎎/g)하였다. 이는 전년도와 유사한 경향을

보이며, 육지로부터 담수가 유입되는 해역의 저층에 유기물 오염이 발생한 것으로 보인다(Fig. 19).

위 3가지 항목을 이용하여 CIET(부영양화 정화·복원지수)를 통해 경기바다 해양퇴적물의 오염정도를 종합적으로 분석한 결과 해역 대부분은 총점이 0~3로 양호하였다. 이는 '21년 동계 시화방조제(st.1)의 경우 동계는 부영양화 상태가 1건 확인된 것에 비교하여 경기바다 퇴적물 유기물 오염도가 작년에 비해 완화된 것으로 판단할 수있다(Table 8).

Table 8. Monthly average annual water temperature and maximum and minimum values

지역	정점	평가	총점	지역	정점	평가	총점
동계	1	양호	3	하계	1	양호	3
	2	양호	0		2	양호	0
	3	양호	0		3	양호	0
	4	양호	0		4	양호	3
	5	양호	0		5	양호	3
	6	양호	0		6	양호	0
	7	양호	0		7	양호	0
	8	양호	0		8	양호	0
	9	양호	0		9	양호	3
	10	양호	0		10	양호	0

대부분 연안, 특히나 방조제 인근 해역에서 유기물 오염이 높은 것은 수시로 방류되는 담수의 영향으로 판단되며, 담수 속 유기물의 연간 변동이 심하여 조사의 지속적인 수행으로 경기만의 평균적인 유기물 오염정도를 규명해야 한다(Fig. 19, Table 8).

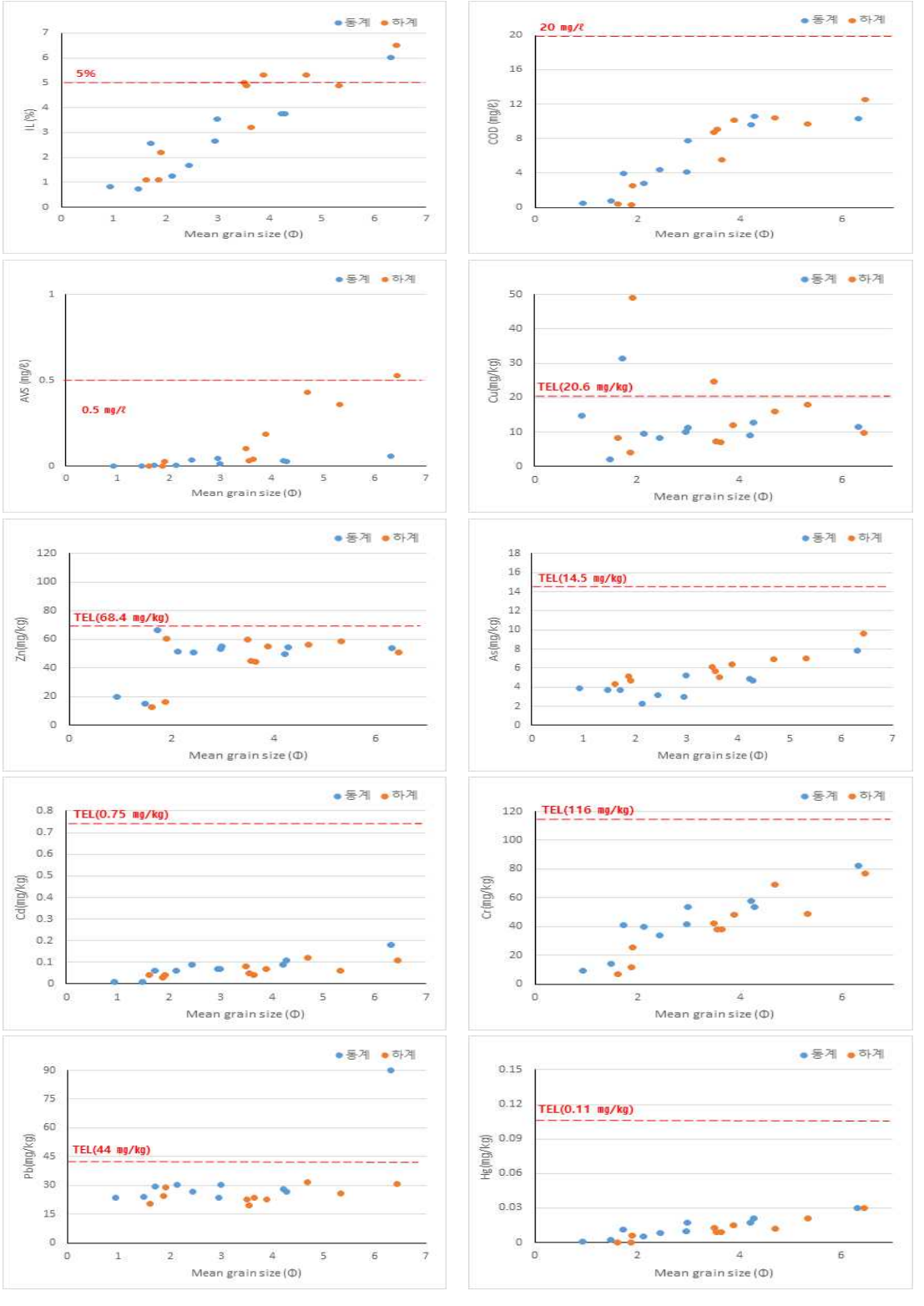


Fig. 20. Comparison of ref. & IL, COD, AVS and trace metals(Cu, Zn, As, Cd, Pb, Hg).

경기만의 중금속 농도는 정점 대부분에서 해양환경기준 중 해저퇴적물 주의기준(TEL) 이하이거나 관리기준 이하의 값을 나타내어 중금속의 영향은 크지 않은 것으로 판단된다. 또한 '21년 제부도 연안 납(PB), 입파도와 국화도 연안 비소(As)가 주의기준을 조금 초과한 것은 '22년 기준치 이하로 줄어들었고, 대신 동계 시화방조제에서 납과 동계 국화도, 하계 대부도 남동쪽, 하계 국화도에서 구리가 기준치를 초과하였다. 구리(Cu)의 경우 지속적인 조사가 요구된다. 또한 구리와 아연, 납을 제외한 대부분 중금속 평균입도와 유의한 양의 상관관계를 보였다(Spearman's rank correlation coefficient, r = 0.710~0.939, p <0.05).

농집지수(I_{geo})를 이용하여 경기만 전체의 중금속 오염에 대한 인위적 요인을 분석한 결과, 비소가 3등급으로 인위적 요인이 많이 개입된 것으로 보이지만 '21년도 3등급 8건과 비교시 오염도가 완화된 것으로 추정된다. 또한 비소의 경우 국내 지각의 평균 농도가 상대적으로 높은 자연적인 현상과 농업활동에 사용된 제초제 등에 의한 오염원에 의한 복합적인 원인이 있는 것으로 추정된다(김 등., 2019).
(Fig 20, Table. 9).

Table 9. Sediment qualities of major tidal flats classified by geoaccumulation index(I_{geo})

I_{geo}	I_{geo} Class	퇴적물의 오염정도 표현	Cu	Zn	As	Cd	Pb	Hg
>5	6	극도로 오염 됨	0	0	0	0	0	0
4-5	5	강하게 / 극도로 오염 됨	0	0	0	0	0	0
3-4	4	강하게 오염 됨	0	0	0	0	0	0
2-3	3	보통 / 강하게 오염 됨	0	0	1	0	0	0
1-2	2	보통 오염 됨	0	0	12	0	1	0
0-1	1	실질적으로 오염되지 않음 / 보통 오염됨	1	0	6	1	1	0
≤0	0	실질적으로 오염되지 않음	19	20	1	19	18	20

참 고 문 헌

- 김성수, 고우진, 조영조, 이필용, 전경암. 1998. 1996년 여름철 남해 표층수의 이상 저염수 현상과 영양염류의 분포 특성. 한국해양학회지「바다」, 3, 165-169.

- 김은영, 류상옥, 최대업, 이재환, 오하늘, 오선관, 고병설, 기영남, 여정원. 2019. 한반도 서·남해 주요 갯벌 퇴적물의 시공간적 변화: 입도, 유기물, 중금속. 한국해양학회지「바다」, 24, 54-63.

- 국립수산과학원. 서해 연안어장 수질환경 정보지. 22년 2, 4, 6, 8, 10, 12월호.

- 이동섭. 1999. 여름과 겨울철 남해의 영양염 분포 특성. 한국해양학회지, 4, 371-382.

- 임동일, 노경찬, 장풍국, 강선미, 정회수, 정래홍, 이원찬. 2007. 한국 서해 경기만 연안역에서 수질환경의 시-공간적 변화 특성과 조절 요인. Ocean and Polar Res., 29, 135-153.

- 임동일, 강미란, 장풍국, 김소영, 정회수, 강양순, 강영실. 2008. 한국 서해 중부연안역의 수질환경 특성. Ocean and Polar Res., 30(4), 379-399.

- 정해진, 박종규, 최현용, 양재삼, 심재형, 신윤근, 이원호, 김형섭, 조경제. 2000. 전남 고흥 해역의 유해성 적조의 발생연구 2: 1997년도 식물플랑크톤의 시공간적 변화. 한국해양학회지「바다」, 5, 27-36.

- 해양수산부, 2013. 해양환경공정시험기준.

- 해양수산부, 2013. “해양환경관리법” 제 8조에 따른 해양환경기준 : 해양수산부고시 제 2013-186호(2013.6.28. 일부 개정).

- 해양생물공정기준. 2013. 해양수산부고시 제2013-320호, 17-26.

- Humborg, C., V. Ittekkot, A. Cociasu, and B.V. Bodungen. 1997. Effect of Danube River dam on Black Sea biogeochemistry and ecosystem structure. Nature, 386, 385-388.

- Müller G. 1969. Index of geoaccumulation in sediments of the Rhine River. Geo Journal, 2: 109-118.

- MOF(Ministry of Ocean and Fisheries). 2013. Marine environmental standard for sediment. Notification No. 2013-186, http:// www.law.go.kr.

- Taylor, S. R. 1964. Abundance of chemical elements in the continental crust: a new table. Geochem Cosmochim Acta, 28: 1273-1285.

- Taylor, S. R., & McLennan, S. M. 1995. The geochemical evolution of the continental crust. Reviews of geophysics, 33(2), 241-265.

- Seung, Y.H., J.H. Chung, and Y.C. Park. 1990. Oceanographic studies related to the tidal front in the mid Yellow Sea off Korea: Physical aspects. J. Oceanol. Soc. Korea, 25, 84-95.

- Parsons, T.R., Maita, Y., Lalli, C.M., 1984. A manual of chemical and biological methods for seawater analysis. Pergamon, Oxford sized algae and natural seston size fractions. Marine Ecology Progress Series 199, 43-53.

- Wafar, M.V.M., P. LeCorre, and J.L. Birren. 1983. Nutrients and primary production in permanently well mixed temperate coastal waters. Estuar. Coast. Shelf Sci., 17, 431-446.

- Yoshida, Y. 1973. Changes in biological production in low trophic levels. p. 92-103. In: Fisheries Seires, 1. Koseisha Koseikaku, Tokyo.

경기갯벌 생태조사

배재용 · 김성민 · 임성률 · 김봉현

서 론

갯벌은 바다와 육지 사이 연안에 위치하고 조석간만의 영향을 받는 독특한 해역으로, 갯벌을 구성하는 기본 요소인 퇴적물은 해당 지역의 물리적 특성을 반영하는데 그 틈 사이에 오염물을 저장하고 이를 정화한다. 또한 갯벌은 다양한 생물의 서식지 역할을 하고 있어서 상호연관성을 가지는 물리, 화학적 그리고 생물학적 요소의 시공간적 변화 양상을 파악하는 것은 해양 환경과 생태계 건강을 해석하고 예측하는데 매우 중요하다(Reise, 1985; 김 등., 2019). 갯벌에 서식하는 저서생물들은 일반적으로 이동성이 적거나 정착, 고착화된 생활패턴을 갖는데, 이러한 생태적 특성은 급진적 또는 만성적인 환경변화에 반응 속도가 늦기 때문에 저서동물 군집의 종 조성과 생체량 등은 저서환경과 생태계의 변화를 평가하는데 주요한 요소이다(Gray, 1981; 최 등., 2003).

경기도 갯벌은 서해 5대 갯벌로써, 우리나라 전체 갯벌 약 5,200 ㎢ 중 169 ㎢을 차지하며, 바지락과 주꾸미 등 유용 해양생물이 26,000 M/T 생산되어 경제적 가치가 높을 뿐만 아니라, 갯지렁이, 소형 갑각류 등 독특하고 다양한 해양생물의 산란과 성장이 이루어지는 해양생태계로써 생태적 가치가 높은 곳이다(서, 2003; 수산정보포털, 2020). 연구해역인 경기 갯벌은 시화방조제와 화성방조제, 평택당진항 등 다양한 경로에서 육상기원의 유기물과 오염물들이 유입되고, 맨손어업 및 마을어업, 레저낚시, 갯벌 체험 등 다양한 일상생활과 밀접한 관련을 맺고 있다. 이러한 이유로 인간활동에 의한 갯벌 환경의 변화와 수산물 생산량의 감소 등이 사회적 문제로 대두되고 있다.

경기도에서는 어민들이 이용하는 갯벌어장의 현황과 변화를 파악하고, 종합적·체계적 보전 및 관리를 위해서 어장으로 이용되는 갯벌의 생태적 자료와 그 바탕이 되는 갯벌의 퇴적환경의 지속적인 조사와 연구 필요하지만, 관련 道 연구기관이 건립된 지 약 4년 정도로 그 연구 기반이 미진한 실정이다.

이 연구에서는 경기도 갯벌의 퇴적환경(입도, 오염물, 중금속) 모니터링을 통해 갯벌의 오염도를 평가하고, 서식하는 해양생물의 현황과 종 다양성 등을 파악하여 생태계의 건강도를 측정하였다. 앞서 분석된 갯벌의 오염도와 생물의 건강도 평가를 통해 경기도 어민들의 어업활동에 필요한 기초자료 확보와 향후 지속적인 어장 관리를 목적으로 정기적인 경기 갯벌 생태조사를 수행하였다.

재료 및 방법

1. 현장조사

1-1. 조사정점

경기도 갯벌어장에 대한 해양환경특성과 생물군집구조를 파악하기 위해 어촌계 10개소(화성4, 안산4, 시흥1, 평택1)를 선정하였다. 조사지점은 각 어촌계장님들과 만나거나 유선상 협의를 통해 조사 정점 및 갯벌의 특성 등에 대해 청취하고, 어촌계 1개소 당 3지점을 선정하였다. 그중 어촌계 2개소 6지점(화성_고온리, 안산_중부흥)에서 갯벌 생물조사를 계절별(2, 5, 8, 11월)로 4건의 조사를 수행하였고, 어촌계 8개소 24지점(화성_백미리, 매향리, 제부리 안산_ 종현, 행낭곡, 흥성리, 시흥_오이도, 평택_권관리)에서 연 1회(5~8월) 갯벌 환경조사를 수행하였다. 조사의 시간적 범위는 2022년 2월부터 11월까지 조석 및 기상 등을 고려하여 실시하였다(Fig. 1, Fig.2, Table 1, Table 2).

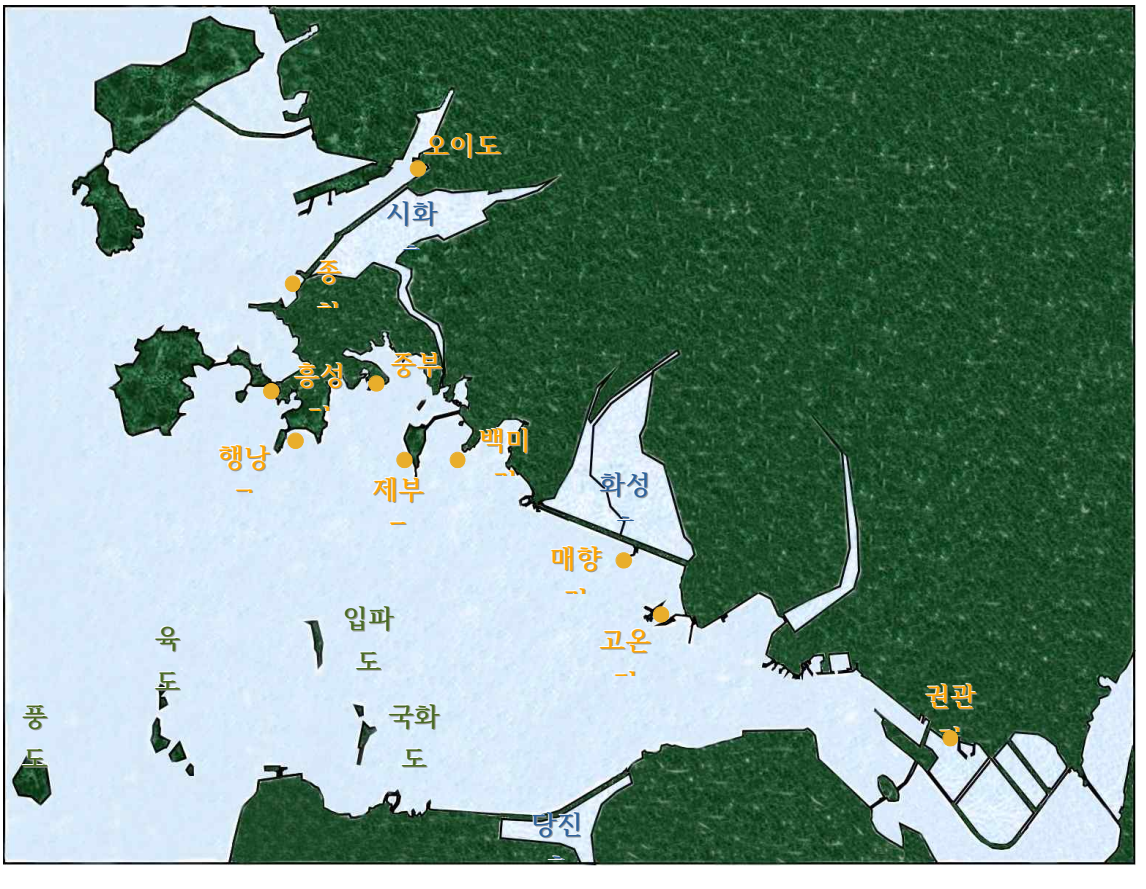


Fig. 1. Study area with stations of sampling in Gyeonggi Tidal mud-flat..

Table 1. Research areas

지역	상세위치
화성	제부도, 백미리, 매향리, 고온리
안산	종현, 흥성리, 행낭곡, 중부흥
시흥	오이도
평택	권관리

Table 2. Latitude and longitude of the research areas

시	어촌계	정점번호	위도(도분초)	경도(도분초)
화성시	제부리	st.1	37°10'24.35"N	126°36'53.01"E
		st.2	37°10'11.17"N	126°36'49.44"E
		st.3	37° 9'57.17"N	126°36'47.31"E
	백미리	st.1	37° 8'39.80"N	126°40'33.90"E
		st.2	37° 8'38.60"N	126°40'10.70"E
		st.3	37° 8'33.30"N	126°39'56.50"E
	매향리	st.1	37° 4'19.63"N	126°43'47.55"E
		st.2	37° 4'21.95"N	126°43'27.27"E
		st.3	37° 4'18.91"N	126°44'0.30"E
	고온리	st.1	37° 2'13.76"N	126°43'44.81"E
		st.2	37° 2'40.30"N	126°43'18.43"E
		st.3	37° 2'40.08"N	126°43'56.55"E
안산시	종현	st.1	37°17'6.47"N	126°32'11.84"E
		st.2	37°16'46.43"N	126°32'37.30"E
		st.3	37°16'17.03"N	126°32'48.86"E
	흥성리	st.1	37°13'51.00"N	126°32'38.05"E
		st.2	37°13'52.02"N	126°32'31.60"E
		st.3	37°13'53.80"N	126°32'24.80"E
	행낭곡	st.1	37°11'35.51"N	126°33'52.31"E
		st.2	37°11'27.60"N	126°33'59.17"E
		st.3	37°11'18.89"N	126°33'32.11"E
	중부흥	st.1	37°12'27.60"N	126°36'16.60"E
		st.2	37°12'25.06"N	126°36'3.29"E
		st.3	37°12'14.60"N	126°35'55.50"E
시흥시	오이도	st.1	37°20'6.94"N	126°41'13.94"E
		st.2	37°20'1.62"N	126°40'55.55"E
		st.3	37°19'58.49"N	126°40'41.85"E
평택시	권관리	st.1	36°54'49.95"N	126°54'21.35"E
		st.2	36°54'50.59"N	126°54'18.84"E
		st.3	36°54'51.34"N	126°54'14.88"E

Fig. 2. Detailed stations of the research areas.

1-2. 현장 갯벌생물 채집 및 퇴적물 시료 채취

각 어촌계마다 지형적 특성 및 갯벌어장 이용도 등을 고려하여, 어촌계 별 3개 지점을 선정한 후 국립해양조사원에서 제공하는 조석예보를 기준으로 사리(대조) 시의 조간대 최상부에서 간조시 갯벌이 드러나는 조간대 최하부까지 조사를 실시하였다(Fig. 2, Fig. 3).

갯벌생물 조사 지역으로 선정된 어촌계 2개소에서는 50 ㎝ × 50 ㎝ 면적의 방형구(대상면적 : 0.25 ㎡)를 이용하여 대형저서동물의 정량조사를 실시하였으며, 각 지점별로 4회씩 깊이 30 ㎝까지 저질을 채취하여, 1㎜ 망 체로 현장에서 생물을 분리한 후, 10% 중성포르말린으로 고정하여 연구소로 운반하였다. 동일한 지점에서 퇴적물 상부 1cm를 걷어낸 이후 시료 약 50g을 폴리에틸렌 광구병에 담아 냉동보관하거나 가능한 빠른 시일 내에(한 달 이내) 분석의뢰 하였다.
갯벌환경 조사는 나머지 어촌계 8개소에서 위와 동일한 방법으로 갯벌 퇴적물 시료를 채취하여, 가능한 빠른 시일 내에 분석의뢰 하였다.

Fig. 3. Research and analysis on the mud flat & lab

2. 갯벌 대형저서동물 분석

2-1. 갯벌 생물 생태지수 및 군집분석

채집된 대형저서동물은 연구소로 가져와 분류군별로 선별한 후 가능한 종 수준까지 동정하였고(백, 1989; 민, 2004; 홍, 2006), 개체수와 생체량을 측정하였다. 대형저서동물의 군집구조를 파악하기 위하여 생태지수(종 다양도, 풍부도, 균등도, 우점도)를 산출하였으며, 전체 우점종은 조사일자별 출현밀도와 빈도, 각 일자별 우점종은 출현밀도를 근거하여 선정하였다(Table. 3)(Lebris, 1988). 집괴분석(Cluster analysis)과 다차원배열법(nMDS : Non-metric multidimensional scaling)은 Primer v6 (PRIMER-E, UK)를 이용하여 조사일자별·지점별 군집구조의 유사성을 파악하기 위해 종의 개체수를 Fourth root로 변화하여 Bray-Curtis 유사도 지수를 구하였고, SIMPROF test를 병행하여 실시하였다. SIMPROF test에 의해 구분된 그룹은 통계적으로 유사한 군집구조를 가지고 있는 것으로 간주하였으며, 구분된 각 군집의 유의성 검증을 위해 one-way ANOSIM(Analysis of similarities)분석을 이용하였다. 또한 상위 10위 우점종과 생물지수(종 수, 개체수, 풍도, 생태지수)와 환경요인과의 상관관계를 파악하기 위하여 상관성은 스피어맨 랭크 상관계수(Spearman rank correlation coefficient)로 계산하였고, 통계적 유의계수는 $p < 0.05$, 0.01, 0.001로 하였다(Mintab, UK).

Table 3. Formula and explanation for each ecological index

우점도 : D. I (Dominant Index)	DI = ni/N×100 **DI : 우점도 지수, N : 총 개체수, ni : 제 i 번째 종의 개체수** 우점도는 환경의 변화가 악화될수록 특정종의 우세를 나타낸다. 어떤 종이 군집에서 가지는 상대적 비율을 산출하여 환경의 변화에 대한 명료한 지표로 활용될 수 있도록 각 조사지점별로 종별 개체수 현존량에 의하여 우점도를 산출하였다(McNaughton, 1968).
다양도 : H' (Diversity Index)	H' = -ΣPi Ln Pi (Pi = ni/N) 군집분석시 가장 많이 쓰이고 있으며, 풍부성을 지닌 종뿐만 아니라 보다 희귀성을 지닌 종까지 가치를 부여하는 방법으로 Margalef의 정보이론에 의하여 유도된 함수(Shannon Weaver, 1963)를 사용하여 도출하였으며, 불확실성의 개념을 기초로 하여 다양도가 높으면 불확실성이 높고 다양도가 낮으면 불확실성이 낮다는 개념을 도입하였다.
균등도 : E' (Evenness Index)	E' = D'/ln (S) **E' : 균등도, D' : 다양도, S : 전체 종 수** 균등도는 각 지수의 최대치에 대한 실제치의 비로서 표현된다. 각 다양도 지수는 군집내 모든 종의 개체수가 동일할 때가 최대가 되므로 결국 균등도 지수는 군집내 종 구성의 정도를 나타내는 것으로 Pielou(1975)의 식을 사용하였다.
풍부도 : RI (Richness Index)	RI = (S-1) / ln (N) **RI : 풍부도, S : 전체 종 수, N : 총 개체 수** 종풍부도는 군집 내에 존재하는 종의 수에 근거한 종의 밀도를 의미한다. 종풍부도를 나타내는 것으로 우선 생각할 수 있는 것은 전체 종의 수(S)이다. 그러나 종의 수는 표본의 크기에 따라 달라질 수 있으므로 다른 군집과의 비교를 하는 것은 불가능하므로, 전체 개체수 n과의 관계를 고려하여 계산하면 표본크기가 증가할 때 개체수도 증가하기 때문에 표본크기에 영향을 받지 않는다. 가장 잘 알려진 풍부도지수로 Margalef와 Menhinick 지수가 있으며, 본 조사 시에는 각 조사지점별로 총 개체 수와 총 종수를 값으로 Margalef(1958)의 지수를 이용하여 산출하였다.

2-2. 갯벌 생물 건강도

연구해역의 건강도를 평가하기 위하여, 대형저서동물의 자료를 기초로 M-AMBI지수와 ISEP지수를 산출하였다.

M-AMBI(Multivariate Azti's Marine Biotic Index)지수는 유기물 등 오염물질에 민감종들의 비율만으로 분석하는 AMBI(Borja et al., 2003)의 한계 및 단점을 보안하기 위하여 만들어진 지수로써 이는 출현종수, H'(종 다양성 지수) 및 AMBI의 값을 판별분석과 요인분석으로 M-AMBI 값을 계산하여 분석한다. 기존의 AMBI에 이용되는 종(개체군)의 생물학적 정보와 수식은 AZTI해양연구소에서 공식적으로 제공하는 software program (http://www.azti.es)을 이용하였다.

ISEP(Inverted SEP)는 Yoo 등(2008)이 SEP (Shannon-Wiener Evenness Proportion)를 변형한 지수로, 타당성 검토 과정을 통해 전국 연안의 다양한 서식처에 적용이 가능한 지수이다(Yoo et al. 2010). 이는 대형저서동물 군집이 나타내는 반응을 기초로 하여 저서생태계의 건강성을 평가하는 것으로 조사결과를 토대로 조사기간별 1~7등급 구분하였으며, 수식은 아래와 같다.

$$\text{ISEP} = \log_{10}\left(\frac{1}{SEP}+1\right)$$

3. 갯벌 퇴적물 분석

3-1. 갯벌 퇴적물 입도 및 유기물 오염, 중금속 분석

채취된 해양퇴적물은 입도(입자크기), 강열감량(IL), 화학적산소요구량(COD), 산휘발성황화물(AVS), 중금속 7종(납, 구리, 아연, 크롬, 카드뮴, 비소, 수은) 등 총 11개 항목을 ㈜ 한국연안환경생태연구소에 분석 의뢰하였다(퇴적물공정시험기준, 2013). 퇴적물의 입도 등급은 Udden-Wentworth 규격 (Lewis, 1984)에 따라 구분하고, 퇴적물의 조직변수는 Folk and Ward (1957)의 그래프 방식으로 계산하여 규격에 따라 분류하였다. 퇴적상(Sediment Types)은 Folk(1974)에 의한 삼각분류법에 의해 분류하였다.

분석된 결과를 바탕으로 연구지역의 부영양화를 나타내는 IL를 해양수산부 고시「해양오염퇴적물 조사 및 정화·복원 범위 등에 관한 규정 제2018-15호」에 따라 비교하였으며, 유기물오염을 나타내는 COD, AVS를 해양수산부 고시 「수산생물 서식 어장환경 기준 제2017-109호」에 따라 비교하였다. 중금속의 경우 해수부에서 제시한 해양환경기준(MOF, 2013) 중 해저퇴적물 미량금속 오염기준인 주의기준(TEL : threshold effects level)과 관리기준(PEL : probable effects level)을 이용하여 판단하였다. 기준에 명시된 원소 중 As, Cd, Hg, Pb은 퇴적물에서 측정된 농도를 직접비교, Cu와 Zn은 Li를 이용해 입도의 영향을 보정하여 국내 환경기준과 비교하여 오염현황을 분석하였다.

3-2. 부영양화 정화지수(CIET) 분석

부영양화 정화지수는 부영양화 물질에 의한 해양퇴적물의 오염정도를 가늠하는 척도로, 감열감량, 화학적 산소 요구량, 산휘발성 황화물을 이용하여 산출된 지수이다(MOF, 2003). 3개 항목의 합산점수가 6 미만일시 양호, 6 이상인 경우 부영양화 상태를 의미한다(Table 4).

Table 4. CIET(Clean-up Index of Eutrophication) scorecard and evaluation

항 목	단위	기준농도	평가점수	기준농도
IL	%	5	0	5 미만
		15	3	15 미만
		15	6	15 이상
COD	mg/g	13	0	13 미만
		20	1	20 미만
		30	2	30 미만
		40	4	40 미만
		40	6	40 이상
AVS	mg/g	0.6	0	0.6 미만
		1	1	1 미만
		5	2	5 미만
		10	4	10 미만
		10	6	10 이상

3-3. 농집지수(I_{geo}) 분석

퇴적물 내 중금속의 인위적인 오염에 대해 평가하기 위해 농집지수(I_{geo} : geoaccumulation index)(Müller, 1696)를 계산하여 금속원소의 오염정도를 파악하였다.

$$I_{geo} = \log_2 \frac{Cn}{Bn \times 1.5}$$

여기서 Cn은 연구지역의 퇴적물 내 금속원소의 농도, Bn은 금속원소의 자연적인 배경농도로 일반적으로 널리 사용되는 지각 중의 금속원소의 평균농도(Taylor,1964, Taylor McLennan, 1995)를 비교대상으로 하였다(Table 5).

조사항목들 간의 상관성은 비모수 통계방법인 스피어맨 랭크 상관계수(Spearman rank correlation coefficient)로 계산하였고, 통계적 유의계수는 $p < 0.05$로 하였다(Mintab, UK).

Table 5. Marine environment standard seabed sediment standard

기준	Cu	Zn	Pb	Cd	As	Hg	Cr
대륙붕표준	25	71	20	0.098	1.5	0.08	-
TEL (주의)	20.6	68.4	44	0.75	14.5	0.11	116
PEL (관리)	64.4	157	119	2.72	75.5	0.62	181

* 주의기준 : 부적적인 생태영향이 일부 발현될 개연성이 있을 것으로 예측되는 농도
관리기준 : 부정적인 생태영향이 발현될 개연성이 매우 높은 농도

결과 및 고찰

1. 퇴적물 입도 변화

경기만 어촌계 10개소 30지점에 대한 입도특성 조사결과, 전 정점의 평균 입도는 0.40~6.40 Φ로 ‘21년 0.01~6.05 Φ 보다 전체적으로 입자가 굵어졌다. 극조립사에서부터 중립실트 크기의 범위를 가지며 자갈함량 0~42.1%(평균 8.0%)이고 모래함량 11.2~87.6%(평균 44.5%), 실트함량 7.3~68.8%(평균 38.7%), 점토 함량 1.6~19.6%(평균 8.8%)의 범위를 나타내었다. 퇴적상은 30개 지점 중 9지점이 사니질(sM)로 가장 많았고, 약역사니질((g)sM)과 니사역질(msG)이 각각 5지점, 역니사질(gmS)과 니사질(mS) 각각 4지점을 차지했으며 약역니사질((g)mS)가 3지점으로 나타났다. (Fig. 4, Fig. 5, Table. 6).

권관리와 흥성리에서 계절별 입도분석 결과, 권관리에서는 동계와 춘계에 비해 자갈의 비율이 증가하였고, 모래와 펄은 계절에 따른 특정 양상을 보이지 않았다. 흥성리3에서는 자갈의 비율이 감소하였고, 흥성리2에서는 펄(실트)이 증가하는 경향을 보였다(Fig 6).

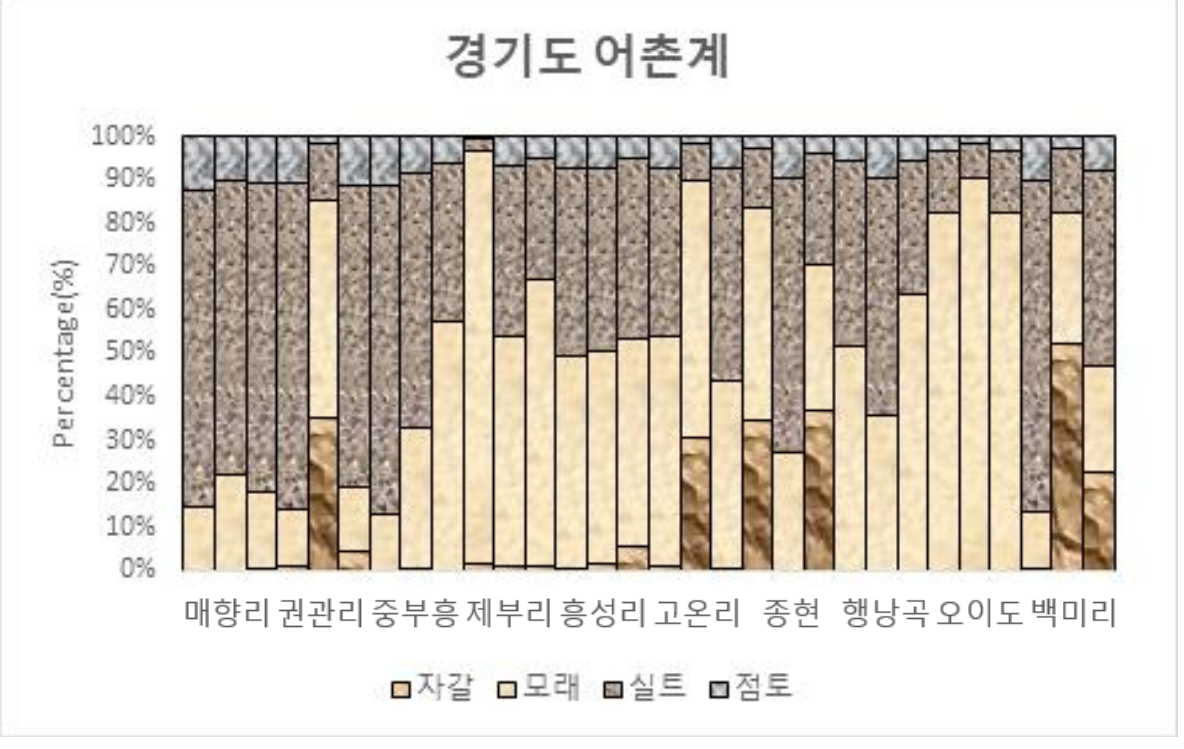


Fig. 4. Variations in the grain material composition of the Gyeonggi-mud flats.

Table 6. Variations in the sedimentary type of the Gyeonggi-mud flats

지역	정점	평균입도	분급도	자갈	모래	실트	점토	펄	퇴적상
		Φ		%				실트+점토	
매향리	1	6	2.06	0	21.6	61.8	16.7	78.4	sM
	2	5.9	2.14	0	21.6	61.1	17.3	78.4	sM
	3	5.7	2.36	1.8	22.4	61.1	14.7	75.8	(g)sM
권관리	1	5.8	2.6	0.2	22.2	58.6	19	77.6	(g)sM
	2	2.6	3.5	12.9	56.6	23.4	7.1	30.5	gmS
	3	6.4	2.2	0.4	11.2	68.8	19.6	88.4	(g)sM
중부흥	1	4.69	1.68	0	31.8	61.7	6.5	68.2	sM
	2	4.65	1.73	0	40.7	52.1	7.2	59.3	sM
	3	4.03	1.62	0	61.1	33.5	5.3	38.9	mS
제부리	1	4.4	24.9	1	50.6	39.4	9	48.4	(g)mS
	2	5.7	2.29	0.5	25	58.8	15.6	74.5	(g)sM
	3	1.3	2.16	13.6	76.6	7.3	2.4	9.8	gmS
흥성리	1	3.9	1.5	2.3	58.1	35.2	4.4	39.6	(g)mS
	2	4.4	1.56	0.6	53.5	39.8	6.2	46	(g)mS
	3	0.4	2.78	41.1	45	11.4	2.5	13.9	msG
고온리	1	3.29	3.15	8.92	54.72	28.38	7.97	36.36	gmS
	2	0.49	2.62	36.4	50.7	10	2.9	12.9	msG
	3	5.43	2.2	0	31.1	55.4	13.5	68.9	sM
종현	1	0.6	2.68	42.1	43.5	11.3	3	14.3	msG
	2	5.49	2.23	0	31.7	53.2	15.1	68.3	sM
	3	4.16	2.73	8.9	49.3	33.3	8.4	41.7	gmS
행낭곡	1	4.84	1.8	0	35.9	55.6	8.5	64.1	sM
	2	5.15	2.02	0	32.7	56.1	11.2	67.3	sM
	3	5.43	2.02	0	31.8	54.7	13.5	68.2	sM
오이도	1	3.6	0.51	0	87.6	10.8	1.6	12.4	mS
	2	3.6	0.77	0	83.5	13.8	2.7	16.5	mS
	3	3.6	0.91	0	82.9	14	3	17.1	mS
백미리	1	5.14	2.28	1.7	26.5	60.7	11.1	71.8	(g)sM
	2	0.45	2.34	30.4	58.5	8.6	2.6	11.1	msG
	3	1.71	3.34	37	36.3	21.5	5.3	26.7	msG

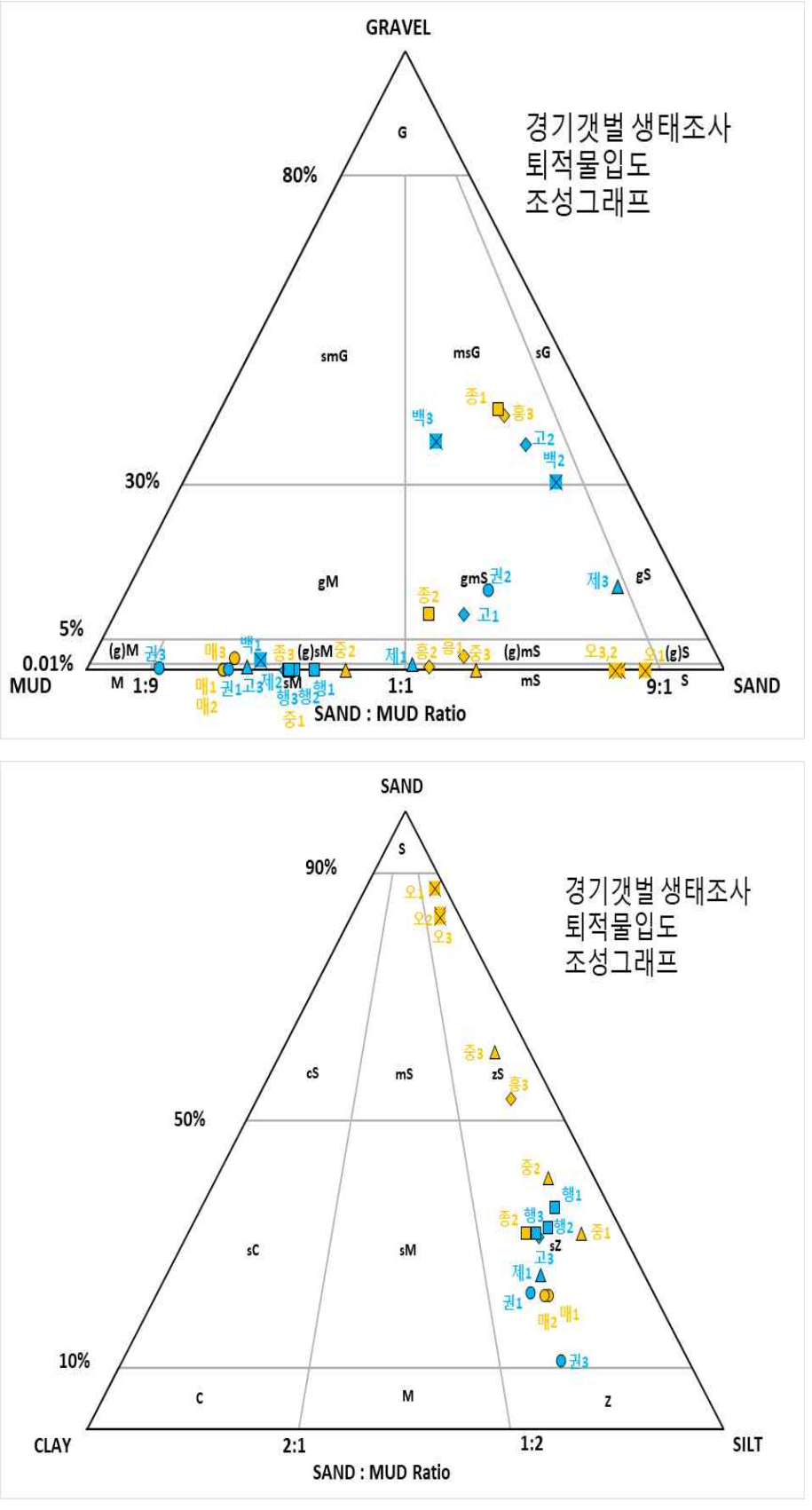
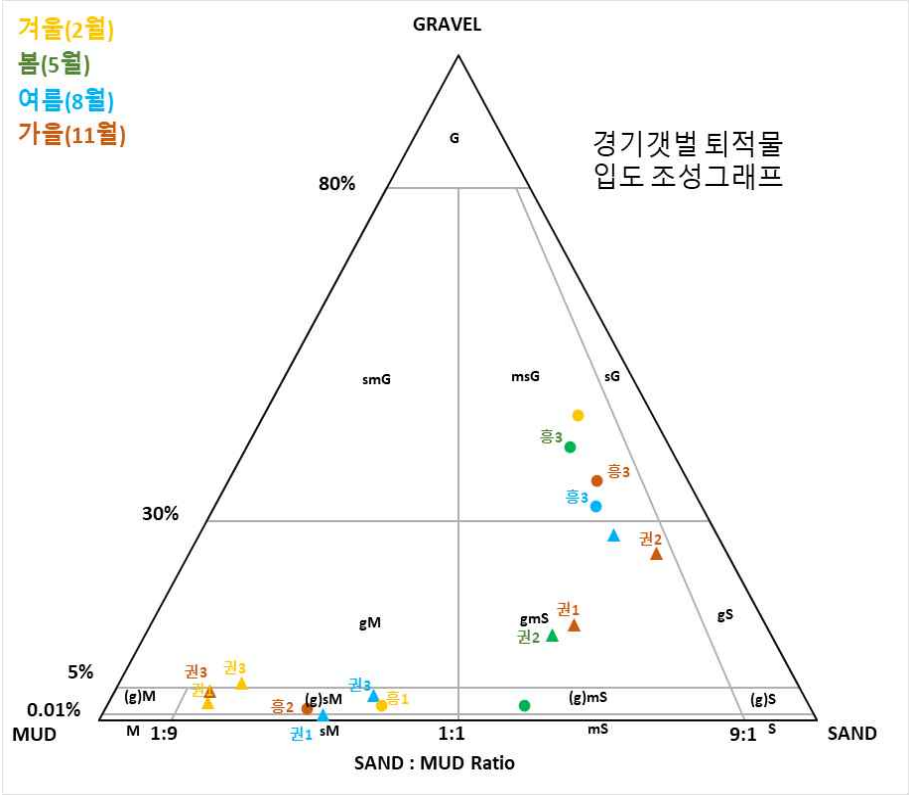


Fig. 5. Variations in the sedimentary type of the Gyeonggi-mud flats.



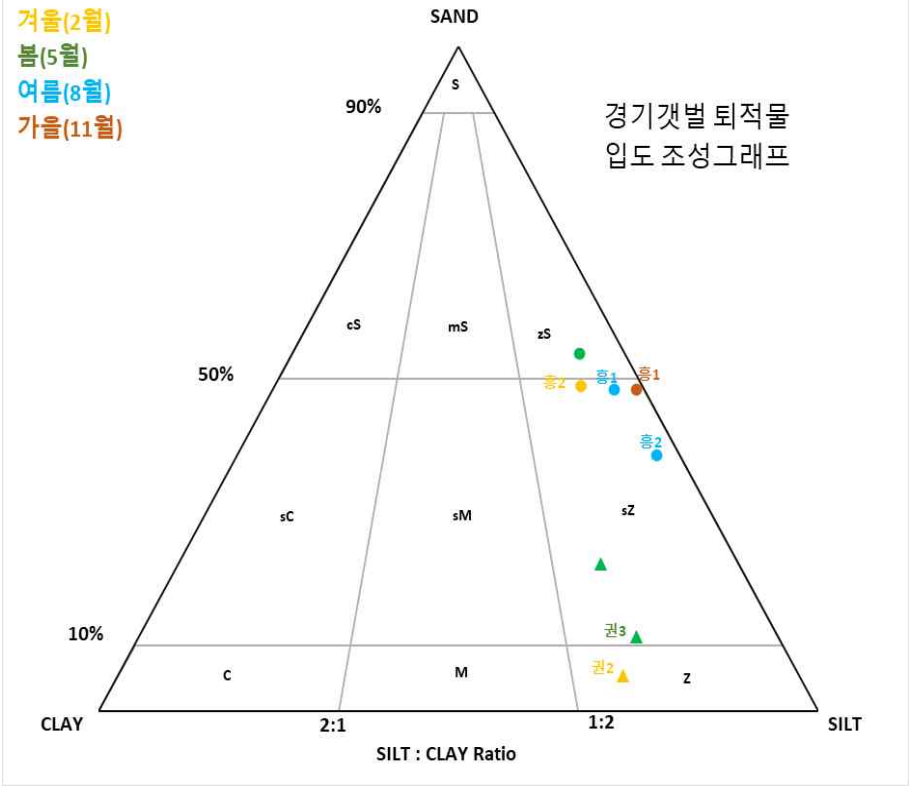


Fig. 6. Variations in the sedimentary type of the 권관리&흥성리 in four season.

2. 생물군집 특성

경기만 어촌계 권관리와 흥성리에서 출현한 대형저서동물은 총 59종, 2,172개체(/㎡)였다. 분류군별 출현 종 수는 환형동물의 다모류 25종, 갑각류의 게와 새우류, 소형 갑각류 등이 17종, 연체동물문의 이매패류와 복족류가 12종, 어류 1종, 의충동물 1종, 편형동물 1종, 유형동물 1종, 성구동물 1종 순으로 출현하였다. 조사 시 마다 평균 7종, 91개체가 출현하였다. 평균적으로 흥성리에서 출현 종 수와 개체수, 생체량, 종 풍부도가 권관리에 비해 높고, 종 다양성은 흥성리에서 높게 나타났다. 생체량은 하계 흥성리 3 에서 가장 높았고, 동계 권관리 1에서 가장 낮았다. 정점간 차이는 동계와 하계 흥성리 1 에서 출현 종이 낮게 나타났으며, 춘계 흥성리 1 에서 출현 종이 가장 높았다. 종 다양도 측면에서 봤을 때는 춘계 흥성리 1에서 가장 다양도지수가 높았다(Table 7).

Table 7. Species number, abundance, biomass and ecological indices of macrobenthic animals at each station of the Gyeonggi-mud flats(Season_Area_station)

	출현 종 수	개체수 (ind/㎡)	생체량 (gWWt/㎡)	풍부도	다양도	균등도
동_권관_1	3	32	12.534	0.400	1.406	0.887
동_권관_2	3	24	22.877	0.436	1.585	1.000
동_권관_3	3	20	36.272	0.463	1.371	0.865
춘_권관_1	4	58	122.058	0.512	1.075	0.537
춘_권관_2	8	48	96.507	1.253	2.496	0.832
춘_권관_3	13	154	56.793	1.651	2.142	0.579
하_권관_1	5	80	58.035	0.633	1.671	0.720
하_권관_2	9	160	199.776	1.093	2.606	0.822
하_권관_3	5	36	36.881	0.774	2.059	0.887
추_권관_1	3	184	93.298	0.266	0.497	0.313
추_권관_2	6	66	211.097	0.827	1.980	0.766
추_권관_3	9	36	128.757	1.547	2.822	0.890
동_흥성_1	2	8	59.299	0.333	1.000	1.000
동_흥성_2	4	48	83.253	0.537	1.730	0.865
동_흥성_3	6	74	257.689	0.805	1.641	0.635
춘_흥성_1	16	90	56.929	2.311	3.455	0.864
춘_흥성_2	6	52	143.594	0.877	1.879	0.727
춘_흥성_3	10	154	455.597	1.239	2.438	0.734
하_흥성_1	8	82	212.378	1.101	1.919	0.640
하_흥성_2	2	26	53.654	0.213	0.391	0.391
하_흥성_3	9	396	1,631.751	0.927	0.783	0.247
추_흥성_1	9	40	110.420	1.503	2.809	0.886
추_흥성_2	8	36	130.045	1.354	2.550	0.850
추_흥성_3	9	268	1,088.311	0.992	1.063	0.335

3. 계절별 생태지수 변화 및 경기갯벌 우점종 상위 10종

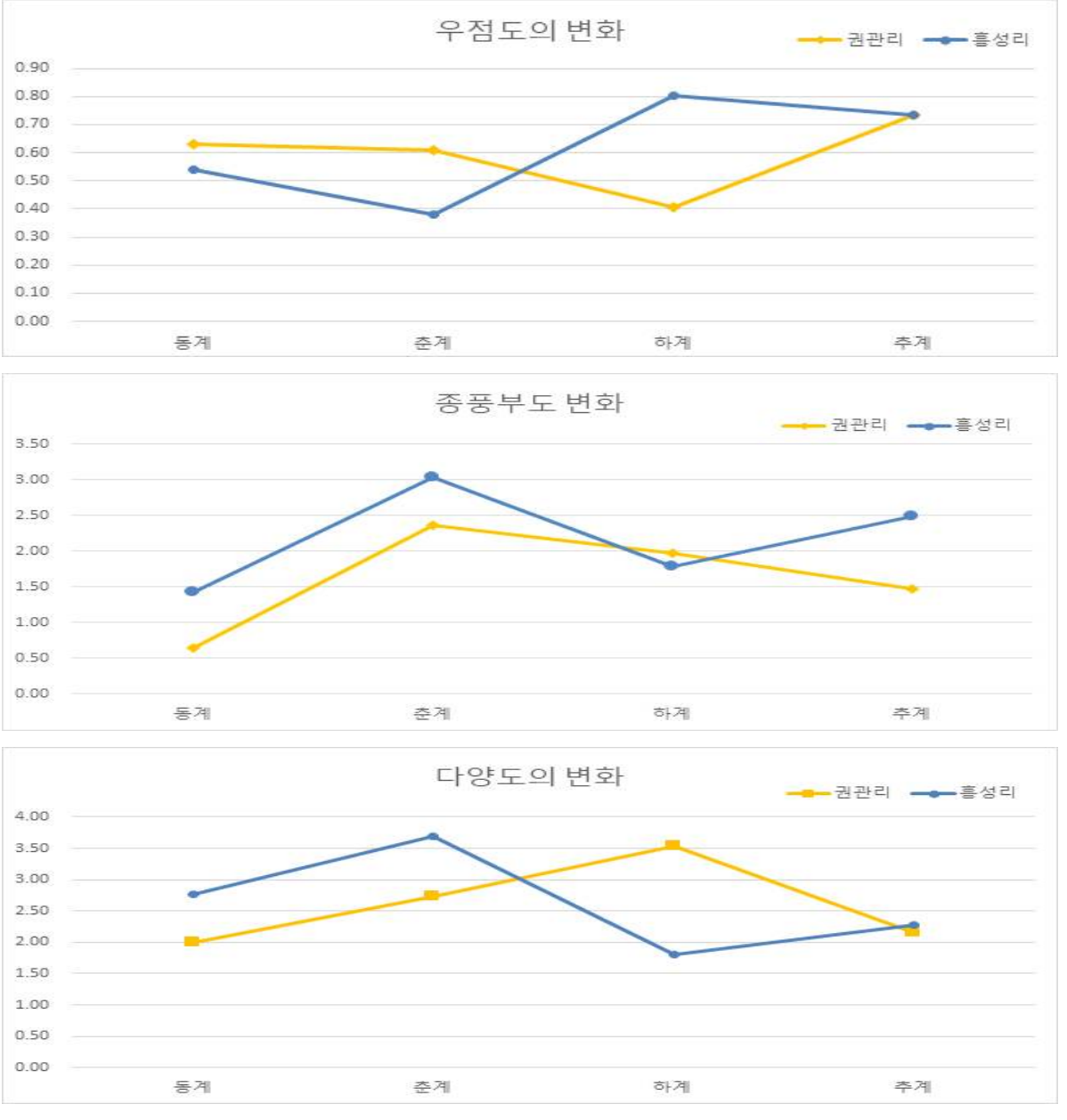
계절별 출현한 저서동물의 개체수 자료에 근거하여 우점도지수, 다양도지수, 균등도지수 및 종 풍부도지수를 산출한 결과, 권관리의 우점도지수는 0.41~0.73의 범위로 추계에서 가장 높은 것으로 조사되었으며, 흥성리의 우점도지수는 0.38~0.80의 범위로 하계에서 가장 높게 나타났다. 다양도지수는 권관리에서 1.99~3.54의 범위로 하계에 높게 나타났고, 흥성리는 1.81~3.69로 권관리보다 높았으며, 하계에 높게 나타났다. 권관리에서 균등도지수가 높게 나타난 계절은 동계와 하계로 0.86을 나타냈고, 흥성리에서는 동계에 0.80으로 가장 높은 균등도지수를 나타냈고, 하계에 0.44으로 가장 낮았다. 종 풍부도는 두 지역 모두 춘계에 높았으며 권관리는 0.64~2.37, 흥성리는 1.42~3.05의 범위를 보였다 (Fig. 8, Table 7).

연구지역에서 출연한 대형저서동물의 개체수와 출현빈도를 기초로 Lebris Index를 이용하여 상위 10위까지의 우점종을 선정하였다. 분류군별로 다모류가 6종으로 가장 많았고, 갑각류와 패류가 각각 2종으로 상위에 위치하고 있었다. 이들을 최우선순위별로 나열하면,

1. 바지락(*Ruditapes philippinarum*), 2. 두토막눈썹참갯지렁이(*Perinereis linea*),
3. 칠게(*Macrophthalmus japonicus*), 4. 버들갯지렁이과(Capitellidae spp.),
5. 괴물유령갯지렁이(*Loimia medusa*), 6. 붉은집참갯지렁이(*Simplisetia erythraeensis*),
7. 댕가리(*Batillaria cumingii*), 8. 풀게(*Hemigrapsus penicillatus*),
9. 참미갑갯지렁이(*Glycera decipiens*), 10. 고리버들갯지렁이(*Heteromastus filiformis*)

순이었다. 이들이 차지하는 밀도는 1,702개체로 전체의 78%를 점유하였다. 이 중 바지락과 두토막눈썹참갯지렁이, 칠게는 각각 758, 390, 142개체가 출연하여 높은 점유율을 보였다 (Fig. 7).

Fig. 7. Dominance of the top 10 species in density by LeBris Index.



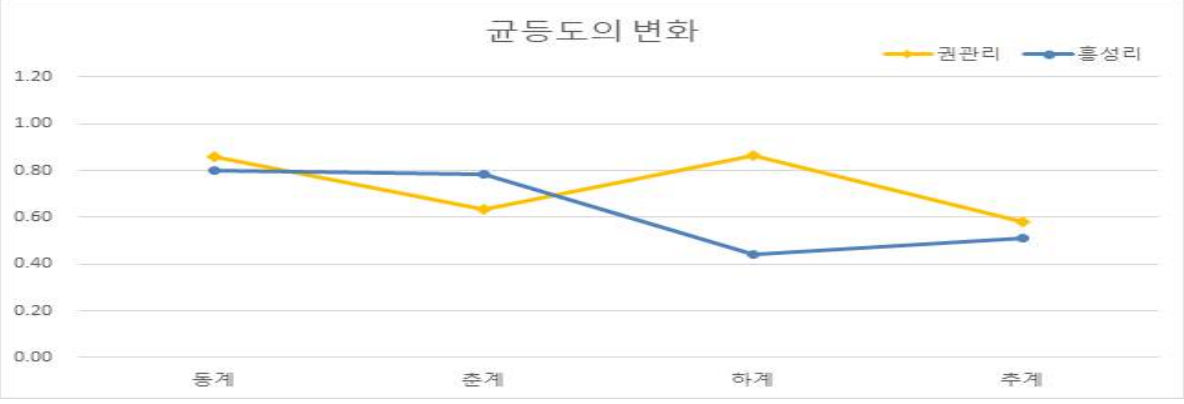


Fig. 8. Seasonally variation of biotic index.

5. 군집분석

모든 조사정점을 대상으로 Bray-Curtis의 유사도 지수를 이용하여 집괴분석 한 결과 통계적으로 유의한 수준(SIMPROF test, $p<0.05$)을 기준으로 총 4개의 그룹으로 구분되었다. 유사도 15% 수준에서 A, B, C, D로 구분되었고, 이를 nMDS 배열법으로 나타내어 비교하였다(Fig. 9). 이는 ANOSIN test 결과에서도 유의한 차이가 있었다($p<0.05$). 또한, 각 그룹을 구별짓는 상위 3개의 우점종들을 구한 SIMPER 분석 결과, 군집간의 차이는 주요 우점종들의 개체수 차이에 의해 구분되었고, 바지락, 쏙, 가시닻해삼, 풀게 등이 각각 크게 기여하고 있었다(Table 8).

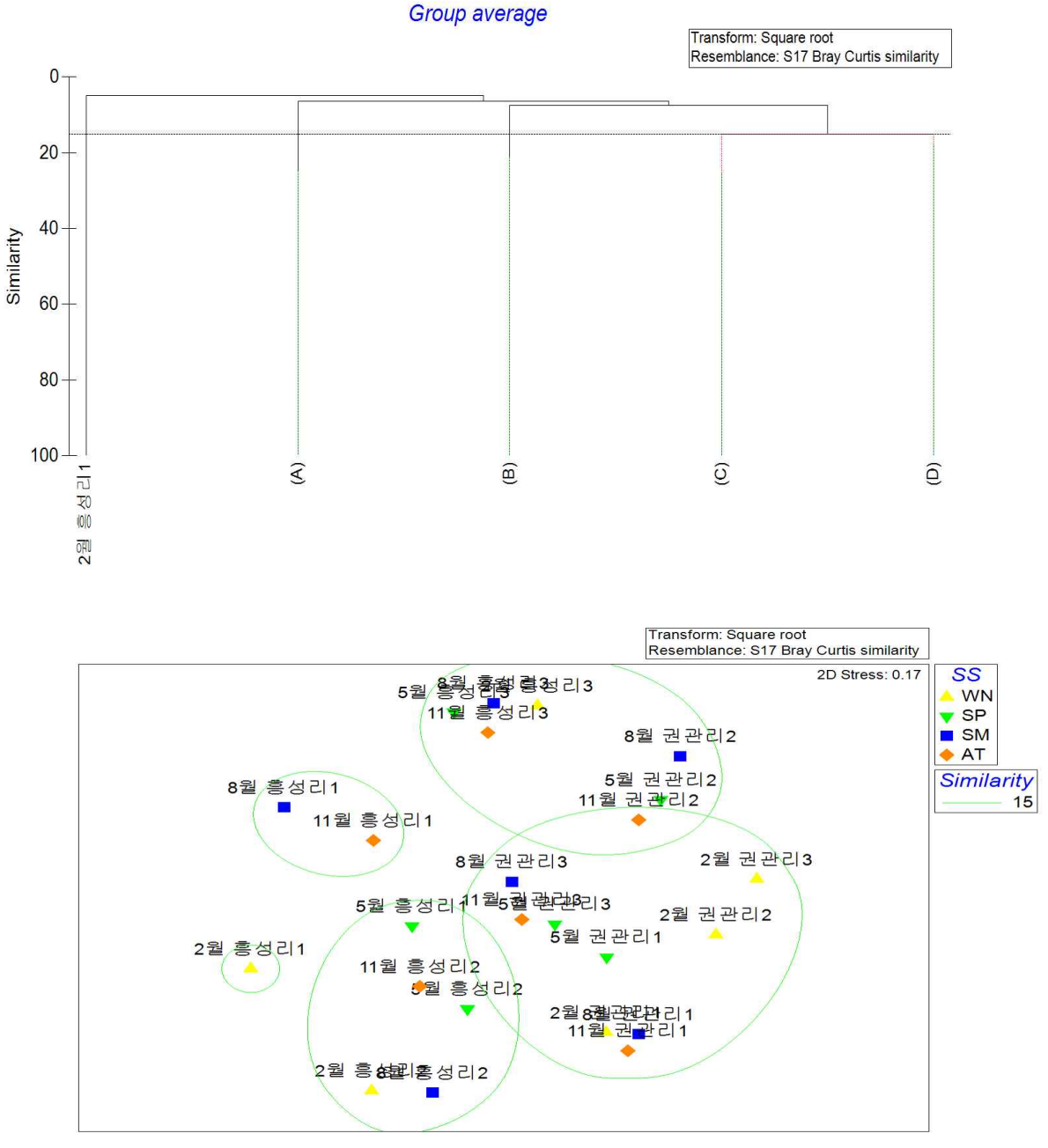


Fig. 9. Cluster analysis and nMDS of 권관리&흥성리 stations.

Table 8. The list of higher contributing species between group by SIMPER analysis

	Group A	Group B	Group C	Group D
Group A	가무락조개 댕가리 분홍접시조개			
Group B	바지락 댕가리 붉은집참갯지렁이	바지락 붉은집참갯지렁이 괴물유령갯지렁이		
Group C	댕가리 칠게 풀게	바지락 칠게 붉은집참갯지렁이	칠게	
Group D	댕가리 두토막눈썹참갯지렁이 풀게	바지락 두토막눈썹참갯지렁이 붉은집참갯지렁이	칠게 두토막눈썹참갯지렁이 사자머리참갯지렁이속	두토막눈썹참갯지렁이 괴물유령갯지렁이 칠게

6. 건강도 평가

저서생물군집의 건강도를 평가하기 위해서는 AMBI, BHI, BPI, M-AMBI, ISEP 등 다양한 건강도 지수들이 존재한다. 이 연구에서는 최근 국외에서 사용 빈도가 높은 M-AMBI(유기물 민감도 및 종 다양성 등 기반)와 해양환경공단에서 '갯벌생태계 조사연보'에 사용 중인 ISEP(생체량 및 개체수 다양성 기반)를 이용하여 '22년 조사한 갯벌의 건강도를 평가하였다(Table 9). M-AMBI 결과 권관리 동계 1, 2, 3과 추계 1을 제외한 모든 계절(20건)에서 '양호(Modelrate)' 이상으로 평가되었다. ISEP 분석 결과 총 24건 중 15건이 '보통' 이상으로 평가되었고, '나쁨'은 권관리 춘계와 하계에서 주로 나타났다. 이 연구에서는 두 가지 지수를 이용해 조사 갯벌 생물의 건강도를 평가하였는데 두 가지 지수의 결과가 일치하지 않는 경향을 보이기도 했다. 예를 들어 동계 권관리 1은 M-AMBI 결과는 나쁘지만 ISEP 등급은 매우좋음인 1등급으로 나왔으며, 하계 권관리 3은 M-AMBI는 나쁨이지만 ISEP는 좋음으로 평가되기도 하였다. 이러한 차이는 두 지수가 평가에 기반을 두는 요소의 차이에서 발생한 것으로 생각된다. M-AMBI는 AMBI에 기초한 지수로 종의 생태학적 정보로 종을 분류하여 평가하던 기존의 방식에서 종 다양성과 출현 종 수 등을 혼합하여 결과를 산출한다. ISEP 역시 종 다양성에 기초하여 평가되지만 개체수와 생체량을 기반으로 다양도 지수(H`)를 이용할 뿐만 아니라, M-AMBI(5등급)보다 7등급으로 더 세분되어있다. 따라서 같은 해역에서 하나의 기준과 방법만으로 저서 건강성을 평가하는 것은 정확한 평가로는 옳지 못하며, 공공기관인 해양환경공단에서 사용 중인 ISEP를 주된 평가 방법으로 하되, 보조적으로는 M-AMBI나 BPI 등 여러 평가 지수를 보조적으로 활용하는 것이 더 나은 연구방향으로 생각된다.

Table 9. Degree of M-AMBI and ISEP at each station in 권관리&흥성리 (H, high; G, good; M; moderately; P, poor; B, bad status)

조사일시	지역	정점	M-AMBI	등급	ISEP	등급
20220215	권관리	1	0.356	P	0.721	H(1)
20220215	권관리	2	0.366	P	0.541	G(3)
20220215	권관리	3	0.277	P	0.931	H(1)
20220216	흥성리	1	0.407	M	1.246	H(1)
20220216	흥성리	2	0.557	G	1.299	H(1)
20220216	흥성리	3	0.478	M	0.834	G(2)
20220503	권관리	1	0.391	M	0.358	P(5)
20220503	권관리	2	0.625	G	0.355	P(5)
20220503	권관리	3	0.646	G	0.394	P(5)
20220519	흥성리	1	0.925	H	0.463	G(3)
20220519	흥성리	2	0.630	G	0.445	M(4)
20220519	흥성리	3	0.648	G	0.699	G(2)
20220816	권관리	1	0.477	M	0.321	P(5)
20220816	권관리	2	0.575	G	0.336	P(5)
20220816	권관리	3	0.583	G	0.327	P(6)
20220829	흥성리	1	0.599	G	0.317	P(5)
20220829	흥성리	2	0.408	M	1.603	H(1)
20220829	흥성리	3	0.448	M	0.594	G(3)
20221107	권관리	1	0.293	P	0.286	P(6)
20221107	권관리	2	0.548	G	0.416	M(4)
20221107	권관리	3	0.705	G	0.407	M(4)
20221108	흥성리	1	0.743	G	0.409	M(4)
20221108	흥성리	2	0.688	G	0.352	P(5)
20221108	흥성리	3	0.481	M	0.823	G(2)

7. 환경과 생물, 우점종간의 상관관계

환경과 생물간의 상관관계에 대하여 이해하기 위해 각 요인들의 상관계수와 유의성을 계산하였다(Table 10). 상관관계를 구하기 위한 환경요인들은 평균입도와 퇴적상(자갈, 모래, 실트, 점토), 유기물 오염정도를 나타내는 COD, AVS, IL 등을 이용하였고, 종수와 개체수 그리고 생태지수, 우점종 상위 10종에 대해 추가하여 분석하였다. 상관관계 분석결과, 유기물 오염도의 척도인 IL, COD와 AVS는 펄(점토+실트)와 유의한 양의 상관관계를 보였다. 일반적으로 유기물 오염은 실트, 점토와 양, 모래와 음의 상관관계를 보이면서 자갈을 제외하고 모래처럼 입자가 큰 퇴적상에서는 상대적으로 유기물 오염이 적은 것으로 나타났다. 권관리와 흥성리의 경우, 종수와 개체수의 경우 입도, 퇴적물 구성, 오염도와는 특별한 상관관계를 나타내지 않았다. 최고우점종인 바지락은 자갈과 양의 상관관계를, 차우점종인 두토막눈썹참갯지렁이는 실트+점토, 유기물 오염도 관련 항목과 양의 상관관계를

보였으며, 괴물유령갯지렁이도 유기물 오염도 항목과 양의 상관관계를 보였다. 또한 오염지표종으로 알려진 고리버들갯지렁이 역시 오염도 항목과 양의 상관관계를 보이며, 대나무갯지렁이과가 많이 출현하는 곳에서 그 수가 많이 나타났다. 반면, 댕가리나 참미갑갯지렁이는 환경이나 다른 생물과 뚜렷한 연관성을 보이지 않았다. 일반적으로 연성기질에 서식하는 대형저서동물의 출현종과 종 수, 군집구조는 서식처인 퇴적물의 퇴적상과 오염정도에 큰 영향을 받는다(Demestre et al., 2000). 퇴적물이 가지는 고유한 특성은 해당 갯벌에 서식하는 대형저서동물의 먹이섭취나 행동양식에 직접적으로 영향을 미치기 때문에(Levinton, 1995; 정, 1997), 대형저서동물의 군집구조를 이해하기 위해서는 퇴적물의 환경을 반드시 분석하여 그 인과관계를 밝혀야 한다.

Table 10. Spearman rank correlation coefficients between the environmental variables, biotic indices and dominant species. ■ p<0.05 ■ p<0.01 ■ p<0.001

	평균입도	자갈	모래	실트	점토	COD	AVS	IL	종수	개체수	H'
자갈	0.060										
모래	-0.044	0.352									
실트	0.980	0.110	-0.130								
점토	0.966	0.170	0.124	0.952							
COD	0.765	0.213	-0.066	0.796	0.795						
AVS	0.638	0.415	0.134	0.658	0.693	0.820					
IL	0.778	0.245	-0.134	0.845	0.831	0.858	0.722				
종수	0.018	0.309	0.376	0.071	0.131	-0.238	-0.014	0.089			
개체수	0.006	0.335	0.459	0.031	0.125	-0.156	0.164	0.160	0.778		
H'	0.352	0.390	0.556	0.385	0.509	0.245	0.365	0.414	0.783	0.582	
RI	0.102	0.307	0.468	0.133	0.248	-0.133	0.016	0.172	0.943	0.693	0.860
	평균입도	자갈	모래	실트	점토	COD	AVS	IL	종수	개체수	H'
J'	0.808	0.373	0.262	0.794	0.833	0.717	0.684	0.588	0.048	-0.072	0.521
RP	-0.309	0.604	0.283	-0.239	-0.160	-0.234	-0.041	0.040	0.532	0.588	0.329
PL	0.658	-0.149	-0.291	0.697	0.634	0.529	0.415	0.693	0.040	0.204	0.135
MJ	0.359	-0.154	0.359	0.300	0.366	0.025	0.108	0.072	0.261	0.247	0.362
CT	0.043	-0.080	-0.106	0.078	0.012	-0.230	-0.326	0.125	0.434	0.324	0.205
LM	0.324	0.215	0.003	0.396	0.404	0.682	0.467	0.605	-0.041	-0.208	0.338
SE	-0.341	0.625	0.145	-0.281	-0.270	-0.226	0.182	-0.149	0.304	0.445	0.050
BC	-0.121	-0.201	-0.054	-0.143	-0.148	-0.130	-0.063	-0.234	-0.053	0.009	-0.088
HP	-0.253	0.100	0.155	-0.251	-0.270	-0.176	-0.187	-0.145	0.086	0.207	0.029
GD	-0.031	0.305	0.260	0.018	0.130	-0.056	0.097	0.305	0.517	0.519	0.500
HF	0.614	0.354	0.092	0.670	0.679	0.768	0.641	0.677	0.121	-0.042	0.512

	RI	J'	RP	PL	MJ	CT	LM	SE	BC	HP	GD
J'	0.163										
RP	0.518	-0.145									
PL	0.032	0.285	-0.175								
MJ	0.262	0.276	-0.253	0.299							
CT	0.399	-0.159	0.321	0.134	0.141						
LM	0.084	0.471	0.076	0.051	-0.318	0.012					
SE	0.159	-0.122	0.728	-0.227	-0.246	-0.128	-0.187				
BC	0.023	-0.142	-0.153	-0.158	-0.180	-0.094	-0.137	-0.089			
HP	0.023	-0.173	0.250	-0.201	-0.223	0.444	0.135	0.041	-0.048		
GD	0.598	-0.045	0.584	0.013	0.018	0.183	0.070	0.286	-0.160	-0.117	
HF	0.239	0.717	-0.098	0.381	0.125	-0.184	0.625	-0.175	-0.128	-0.159	0.065

* RP, *Ruditapes philippinarum*; PL, *Perinereis linea*; MJ, *Macrophthalmus japonicus*, CT, Capitellidae spp. LM, *Loimia medusa*, SE, *Simplisetia erythraeensis*, BC, *Batillaria cumingii*., HP, *Hemigrapsus penicillatus*; GD, *Glycera decipiens*, HF, *Heteromastus filiformis*

8. 퇴적물 및 중금속 오염도

경기 어촌계 갯벌의 IL(강열감량)은 1.2~6.7%로 유기물에 의한 오염징후는 크지 않았으나, 화성 매향리 1~2번, 평택 권관리 1~3번 정점에서 기준농도의 비오염기준인 5% 이상을 조금 초과하였다(Fig 10). 유기물 오염의 간접 지표인 COD(화학적산소요구량)은 0.6~9.7 ㎎/g 수준으로, 어촌계 전체 갯벌에서 양식장 적지기준인 20 ㎎/g 이하의 값이 나왔다. 유기물 오염의 직접 지표인 AVS(산휘발성황화물)은 불검출~0.668 ㎎/g(평균 0.06 ㎎/g)로 평균적으로는 양식장 적지기준이 0.5 ㎎/g 이하를 보이지만, 화성시의 매향리 1번에서 그 기준을 조금 초과하는 값(0.668 ㎎/g)이 나타났다. 작년도에 비해 초과 지점이 3개소에서 1개소로 대폭 줄어들었다. (Fig 10, Table 10).

대부분 연안, 특히나 방조제 인근 해역에서 유기물 오염이 높은 것은 수시로 방류되는 담수의 영향으로 판단되며, 담수 속 유기물의 연간 변동이 심하여 조사의 지속적인 수행으로 경기만의 평균적인 유기물 오염정도를 규명해야 한다. 따라서 위 3가지 항목을 이용하여 CIET(부영양화 정화·복원지수)를 통해 경기갯벌 마을어장 갯벌 퇴적물의 오염정도를 종합적으로 분석한 결과 대부분의 어장은 총점이 0~1로 양호하였으나, 평택 권관리 1번에서는 4점을 기록했다. 원래 CIET에서는 총점 6을 기준으로 부영양과 양호 두 가지로 평가되지만, 이 시험연구사업에서는 오염도에 대한 기준을 세분화 하기위해 총점이 4 이상일때 '주의' 기준을 추가하였다(Table 11).

경기갯벌의 중금속 농도는 대부분의 정점에서 해양환경기준 중 해저퇴적물 주의기준(TEL) 이하이거나 관리기준 이하의 값을 나타내어 중금속의 영향은 미미하였다(As, Cu, Cd, Cr, Hg, Pb 기준치 이하). 다만 권관리, 백미리 등 3개소에서 아연(Zn)이 주의기준(TEL)을

조금 초과하여 지속적인 조사가 요구된다. 또한 비소(As)의 경우 '21년 30개소 중 13개소에서 주의기준을 초과하였지만 '22년에는 모두 기준이 이하로 오염도가 완화되었다(Fig 10).

농집지수(I_{geo})를 이용하여 경기갯벌의 중금속 오염에 대한 인위적 요인을 분석한 결과, 비소가 4등급으로 인위적 요인이 많이 개입된 것으로 보인지만 이것 또한 '21년에 9건에서 '22년 0건으로 대폭 감소하였다. `20년 결과와 비교했을 때 4등급 이상이 3개소, '21년 9개소로 증가하였다가 '22년 다시 0개소로 감소한 것으로 보아 일시적으로 오염에 노출된 것으로 판단되지만 지속적인 관측 필요성이 요구된다. 비소의 경우 국내 지각의 평균 농도가 상대적으로 높은 자연적인 현상과 농업활동에 사용된 제초제 등에 의한 오염원에 의한 복합적인 원인이 있는 것으로 추정된다(김 등., 2019)(Fig 10, Table. 12).

Table 11. Monthly average annual water temperature and maximum and minimum values

지역	정점	평가	총점	지역	정점	평가	총점
매향리	1	양호	2	고온리	1	양호	0
	2	양호	2		2	양호	2
	3	양호	0		3	양호	2
권관리	1	양호	0	종현	1	양호	0
	2	양호	0		2	양호	0
	3	주의	4		3	양호	0
중부흥	1	양호	0	행낭곡	1	양호	0
	2	양호	0		2	양호	0
	3	양호	0		3	양호	0
제부리	1	양호	0	오이도	1	양호	0
	2	양호	0		2	양호	0
	3	양호	0		3	양호	0
흥성리	1	양호	0	백미리	1	양호	0
	2	양호	0		2	양호	0
	3	양호	0		3	양호	0

Table 12. Sediment qualities of major tidal flats classified by geoaccumulation index(I_{geo})

I_{geo}	I_{geo} Class	퇴적물의 오염정도 표현	Cu	Zn	As	Cd	Pb	Hg
>5	6	극도로 오염 됨	0	0	0	0	0	0
4-5	5	강하게 / 극도로 오염 됨	0	0	0	0	0	0
3-4	4	강하게 오염 됨	0	0	3	0	0	0
2-3	3	보통 / 강하게 오염 됨	0	0	18	0	0	0
1-2	2	보통 오염 됨	0	0	7	4	0	0
0-1	1	실질적으로 오염되지 않음 / 보통 오염됨	0	2	1	12	3	0
≤0	0	실질적으로 오염되지 않음	30	28	1	14	27	30



Fig. 10. Comparison of ref. & IL, COD, AVS and trace metals(Cu, Zn, As, Cd, Pb, Hg).

참 고 문 헌

- 국립수산진흥원. 2001. 한국새우류도감. 한글그라픽스, 188pp.
- 김은영, 류상옥, 최대업, 이재환, 오하늘, 오선관, 고병설, 김영남, 여정원. 2019. 한반도 서·남해 주요 갯벌 퇴적물의 시공간적 변화: 입도, 유기물, 중금속. 한국해양학회지 「바다」, 24, 54-63.
- 서인수. 2003. 인천 갯벌 저서동물의 군집 구조와 먹이망. 인하대학교 이학박사학위 논문. p. 273.
- 정래홍. 1997. 연안해역 개발에 따른 해양 저서생태계의 장기변동 연구. 인하대학교 이학박사 학위청구논문. p. 306.
- 최진우, 현상민, 장만, 2003. 저서동물에 의한 여르멀 광양만의 저서환경 상태파악. 환경생물학회지, 21: 103-113.
- 해양수산부, 2013. “해양환경관리법” 제 8조에 따른 해양환경기준 : 해양수산부고시 제 2013-186호(2013.6.28. 일부 개정).
- 해양생물공정기준. 2013. 해양수산부고시 제2013-320호, 17-26.
- 홍성윤. 2006. 한국해양무척추동물도감. 아카데미서적, 479pp.
- Borja, A., I. Muxika and J. Franco, 2003. The application of a marine biotic index to different impact sources affecting soft-bottom benthic communities along European coasts. Mar. Pollut. Bull., 46: 835−845.
- Demestre, M., P. Sanchez and M. J. Kaiser. 2000. The behavioral response of benthic scavengers to otter-trawling disturbance in the Mediterranean. In Effects of Fishing on Nontarget Species and Habitats (ed. Kaiser, M. J. and S. J. de Groot), Oxford: Blackwell Science. 121-129.

- Gray, J. S. 1981. The Ecology of Marine Sediment. Cambridg Univ. Press, London, 185pp.
- Levinton, J. S. 1995. Marine Biology-Function, Biodiversity, Ecology-Oxford University Press Inc. New York. p. 420.
- LeBris H. 1988. Fonctionnement des ecosystems benthiques cotiers au contact d'estuaires: la rade de lorient et la baie de Vilaine. These doc. Univ. Bretagne Occidental, Brest, France, 311.
- Margalef, R. 1958. Diversidad de especies en las comunidades naturales. Publnes Inst. Biol. Apl. Barcelona. 9:5-27.
- McNaughton, S. J., 1968. Relationship among functional properties of California grassland. Nature, 216:168 ~ 169.
- Pielou, E. C. 1975. Ecological Diversity. John Wiley and Sons, New York. p. 165.
- Reise, K. 1985. Tidal Flat Ecology-an Experimental Approach to Species Interaction. Springer-Verlag Berlin Heidelberg. p. 191.
- Shannon, C. E. and W. Weaver. 1963. The mathematical theory of communication. University of Illinois press, Urbana, pp. 1 ~ 117.
- Taylor, S.R., 1964. Abundance of chemical elements in the continental curst: A new table. Geochem Cosmochim Acta, 28: 1273-1285.
- Taylor, S.R. and S.M. McLennan, 1995. The geochemical evolution of the continental crust. Reviews of Geophys, 33: 241-265.
- Yoo, J.W., Y.W. Lee, J.L. Ruesink, C.G. Lee, C.S. Kim, M.R. Park, K.T. Yoon, I.S. Hwang, J.H. Maeng, R. Rosenberg and J.S. Hong, 2010. Environmental quality of Korean coasts as determined by modified Shannon-Wiener evenness proportion. Environ. Monit. Assess., 170: 141—157.

Ⅲ 기후변화 대응 친환경양식 기술개발 보급

1. 수산중심 아쿠아포닉스 기술개발 시험

2. 유용미생물 생산보급 연구

변화의 중심
기회의 경기

수산중심 아쿠아포닉스 기술개발 시험

이동훈 · 한정조 · 김봉현

(부제) Coupled aquaponics (CAS) 및 Decoupled aquaponics (DAS) 생산 방식에 따른 비단잉어 및 엽채류의 성장 비교

Abstract

Aquaponics is an fusion production practice which combines aquaculture, the raising of fish, and hydroponics, a soil-less crop production method, to create a system that symbiotically produces both. Many of today's coupled aquaponic systems (CAS) circulate water and nutrients from fish to plants and vice versa, but It is not always guaranteed that the fish preferences are completely aligned with the optimum requirements of the plants. This solution, which is referred to as decoupled aquaponic systems (DAS) would better secure optimal environmental conditions for both the plant and fish production units. The study examined the growth difference of leafy vegetables and Fancy carp between CAS and DAS method applying hybrid biofloc technology-aquaponics (HBFT-AP) water quality management for 14 weeks. Eight cultivars of european lettuce (fairly, decarte, gauguin, ezabel, ovired, volare, xaroma and skelton) were employed in the two experiment (EXP1 and EXP2) for 7-14 weeks. After planting leafy vegetables in two system, leafy vegetable productivity was compared at the end of growth period (25 days). Productivity (CAS vs DAS) was somewhat higher (total leaf weight; CAS 28,293 g vs DAS 26,087 g) in CAS for EXP1 period, but in EXP2, the total leafy weight was higher in DAS (71,247 g) than in CAS (67,749 g). Also, weight gain (%) value of fish was higher in fish group of DAS (33.09) than CAS (23.40) due to the higher feed supply in fish tank of DAS.

Ⅰ. 서 론

순환여과식 어류 양식(recirculating aquaculture system, RAS)과 수경재배(hydroponics)는 가용 수자원을 더 잘 사용하기 위해 1950년대 건조 지역에서부터 출현하였으나, 이러한 시스템에서 발생하는 오염물의 처리는 문제가 있어 아쿠아포닉스가 출현하는 계기가 되었다(Joyce et al., 2019).

아쿠아포닉스(aquaponics)는 수산양식과 농업의 수경재배가 결합된 복합재배 시스템으로, 수산양식 생물의 성장과 생존을 위해 공급된 먹이(사료)가 종속 및 독립영양미생물(hetero- and autotrophic microorganisms)에 의해 각종 무기물과 질산염으로 분해 및 생성된 것을 식물이 성장 영양소로 흡수하면서 양어수질의 안정화와 식물성장을 이루어지게 하여 사육수의 교환없이 지속적으로 농.수산물을 생산할 수 있는 친환경 생산방법이다(FAO, 2014).

전통적인 수경재배 시스템인 CAS (coupled aquaponic system)는 영양이 풍부한 물을 물고기에서 식물로 또는 그 반대로 보내는 단일 순환과정으로 이루어지며, 식물과 어류의 성장에 필요한 다양한 영양소 및 환경 사항에 대해 이상적인 재배 조건에 대한 절충안을 제시하나, 생산물의 개별 생산시스템에 비해 효율성과 생산성을 감소시킨다고 보고되고 있다(Goddek et al., 2019).

최근에는 각 생물 시스템의 분리를 허용하여 시스템별 용수를 더욱 잘 운용하도록 장치의 공정 과정을 늘림과 동시에 오염물에서 영양분을 더 잘 재활용할 수 있는 방법이 제시되고 있으며, 이러한 아쿠아포닉 시스템이 DAS (decoupled aquaponic system) 이다(Goddek et al., 2019). DAS는 어류에서 생산되어진 고형물 및 입자성 오염물을 식물재배지로 보내기 전 별도 장치에 모은 후, 슬러지에 포함된 영양소를 식물이 잘 활용하도록 기계적 또는 화학적 처리를 하여 식물재배지로 용수를 보내게 된다. CAS와 가장 큰 차이점은 식물재배지의 용수는 식물재배지 내에서 자체 순환을 하는 대신 어류 사육지로 순환되지 않는다는 것이다.

DAS의 수산생물 및 식물에서 병원체 또는 기타 환경적 요인에 의해 생산성에 문제가 발생할 경우 각 시스템의 구성 요소를 분리하여 구성 요소별 전반적인 제어 및 효율성을 극대화할 수 있고, 더불어 수산생물과 식물의 환경 및 생리적 요구 사항 간의 한계를 극복할 수 있다.

관상어에 대한 수요는 2000년대 중반부터 지속적으로 증가되고 있으며, 관상어 관련 상품 산업화를 위한 연구도 병행되고 있다(Lee and Lee, 2008). 이 중 비단잉어는 체색이 다양하여 대중적으로 관심이 높은 어종으로, 수온 및 pH 등 수질변화에 내성이 강하여 다른 관상어에 비해 양성하기가 용이한 것으로 보고되고 있다(Kim et al., 2006; Lee et al.,

2010; Kim and Lee, 2014; Kim and Lee, 2015). 또한 Lee (2021)은 비단잉어를 대상으로 아쿠아포닉스 생산 연구를 진행하여 비단잉어도 충분히 아쿠아포닉스의 대상 어종이 될 수 있음을 보고하였다.

현재 아쿠아포닉스 연구분야에서 생산성이 수경재배에 비해 떨어지지 않는 이유는 식물성장 촉진 미생물(PGPM, plant growth promoting microorganism)의 역할로 설명되고 있으며(Yep and Zheng, 2019), 특히 아쿠아포닉스내 유용미생물은 엽채류의 황백화 현상에 깊게 관여하는 Fe 등 부족한 미량원소의 활용성을 개선시키는 것으로 보고되고 있어 주기적으로 미생물 첨가가 추천되고 있다(Zou et al., 2016; Bartelme et al., 2018).

현재까지 국내 아쿠아포닉스의 대다수 연구는 CAS 시스템에 기반하여 연구를 진행중이나(Lee et al., 2019a; Lee et al., 2019b; Lee et al., 2020; Lee and Kim, 2021., Lee 2021; Lee 2022), DAS 시스템에 연구는 전무한 실정이다.

따라서 본 연구의 목적은 비단잉어를 이용한 아쿠아포닉스 생산에서 유용미생물의 사용과 더불어 시스템(CAS vs DAS)간 차이가 어류 및 엽채류 생산성에 어떠한 영향을 미치는지에 대하여 조사하여 향후 국내 DAS 시스템 연구에 대한 기초자료를 제공하고자 하였다.

Ⅱ. 재료 및 방법

1. 실험사료 준비 및 분석

실험에 사용된 사료는 사조동아원㈜ 당진사료공장(충청남도 당진시)에서 직경 6 mm 내외 부상 EP (extruded pellet) 사료로 제작된 것으로, Lee et al. (2021)의 실험 결과에 보고된 MKP3 (monobasic potassium phosphate 3% in diet)가 포함된 사료로 일반 성분[수분(moisture), 조단백질(crude protein), 조지방(crude lipid), 조회분(crude ash), 조섬유(crude fiber)] Ca, P 및 광물질 성분은 Table 1와 같다.

2. 시스템 구성 및 운영

CAS 시스템의 구성도는 Fig. 1과 같다. BFT 양식시설과 수경재배 시설이 결합한 아쿠아포닉스 실험구(hybrid biofloc technology-aquaponics, HBFT-AP)로 어류 원형수조(ø 4.5 m × H 0.7 m) 1개, 섬프수조(L 2 .0 m × W 1.0 m × H 0.9 m) 1개, 2층 구조의 식물베드지(L 2.9 m × W 0.6 m × H 0.1 m) 20개, 680 L바이오헬릭스 여과기(Isan M Tech. Ltd., Korea) 1개, 원형수조와 식물베드지의 물 순환을 위한 펌프(1.5 HP) 1개, 어류 수조의 BFT 유지를 위한 벤츄리 에어 공급 시스템 순환펌프(1.0 HP) 1개, 식물베드지 하단에 빛 공급을 위한 형광등 40개로 구성되었다. 식물재배 포터는 배드지 당 45개로 총 900개의

재배지로 구성되었으며, 식물에 공급되는 용수의 주수 배관은 지름 25 mm, 배수 배관은 지름 40 mm을 사용하였고, 최종 집수되어 어류 사육 수조로 유입되는 배관은 지름100 mm를 사용하였다.

<Table 1>. Chemical composition of the experimental diet[1]

Composition	MKP[2] 3%
Moisture (%)	6.24
Crude protein (%)	45.56
Crude lipid (%)	7.21
Crude ash (%)	10.64
Crude fiber (%)	1.98
Ca (%)	2.38
P (%)	2.24
Mg (ppm)	2,125.6
Fe (ppm)	462.3
Cu (ppm)	15.4
Mn (ppm)	39.2
Zn (ppm)	98.3
K (ppm)	15,548.7

[1]Values are means of 2 determinations. [2]MKP, monobasic potassium phosphate.

Fig. 1. Water flow in CAS (coupled aquaponic system) (A) Goddek et al. (2016), (B) compartments and water flow of the experimental design, fish tank (ϕ 4.5 m) → sump tank (2 × 1 m) → pump (1.5 HP) → biohelixfilter (680 L) → vegetable bed (2.9 × 0.6 × 0.1 m, No. 20) → fish tank.

CAS와 비교 실험에 사용한 DAS 시스템의 구성도는 Fig. 2에 나타내었다. 어류 사육지 및 식물재배지 구성은 CAS와 같으나 어류에서 발생되는 슬러지는 드럼스크린(망목 : 5㎛, 배출량 : 200-300 L / 1일)과 청소 펌프를 통해 슬러지 모음 장소인 정화조(0.9 × 1.1 × 1.5 m, Seungwon, Co., Jungeup, Korea)로 모였다.

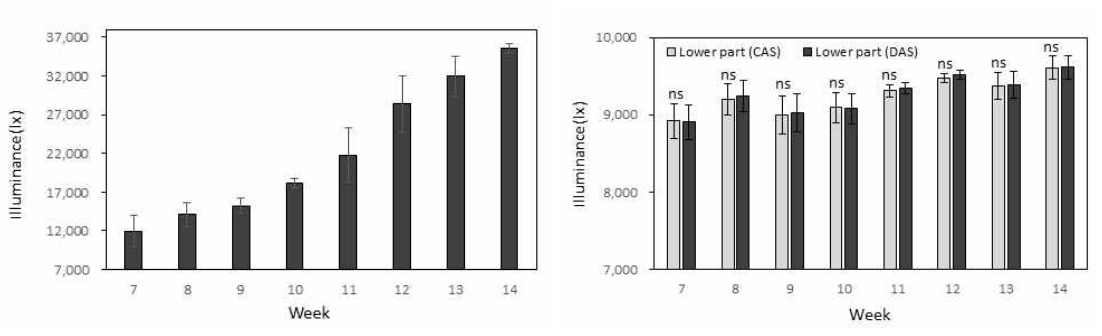
Fig. 2. Water flow in DAS (decoupled aquaponic system) (A) Goddek et al. (2016), (B) compartments and water flow of the experimental design, aquacultre [fish tank (∮ 4.5 m) → sump tank (2 × 1 m) → pump (1.5 HP) → drum screen (water passing through) → biofilter (400 L) → fish tank (∮ 4.5 m)], hydroponics [drum screen (drain water) → septic tank (0.9 × 1.1 × 1.5 m) → vegetable sump tank (0.5 × 0.8 × 1.1 m) → vegetable bed (2.9 × 0.6 × 0.1 m, No. 20) → vegetable sump tank (0.5 × 0.8 × 1.1 m).

3. 실험어 배치 및 사료공급

실험에 사용된 황금 비단잉어는 경기도해양수산자원연구소에서 사육 관리한 품종으로 어체중 500-1,000 g (평균 어체중 880 g)의 범위를 갖는 개체 240마리를 CAS 및 DAS 시스템에 120마리씩 배치하였다. 사료공급은 수질관리의 안정화 유도를 위해 어체중 당 1.0%로 제한하여 1일 2회 공급하여 14주간 진행되었고, DAS 실험구는 CAS에 비해 30 % 정도 사료 공급량을 높여 사육관리 되었다.

4. 엽채류 생산

엽채류 생산 실험은 어류를 입식하여 6주간의 적응 기간을 거친 후, 7-14주에 걸쳐 2회 생산실험을 진행하였다. 엽채류 생산 실험1(EXP1)은 유럽산 상추류(*Lactuca sativa*) 페어리(fairly lettuce), 데카르트(decarte lettuce), 고갱(gauguin lettuce), 이자벨(ezabel lettuce), 오비레드(ovired lettuce) 5품종을 사용하였고, 실험2(EXP2)는 볼라레(volare lettuce), 데카르트(decarte lettuce), 샤로마(Xaroma lettuce), 이자벨(ezabel lettuce), 스켈톤(skelton lettuce) 5품종이 이용되었다. 엽채류는 품종당 180개체가 입식되었고, 상단(태양광) 및 하단(형광등)의 광량 차이(Fig. 3)로 엽채류는 각 품종별 상·하단을 교차하여 광량 차이에 의한 생산성 오차를 배제토록 배치하였다. 입식 후 25일 시점에 성장 측정이 이루어졌다.



(A) (B)

Fig. 3. Illumination (lux) of the upper part of the plant bed area by sunlight (A) and the lower part of the plant bed area by sunlight and fluorescent light (B)

5. 시료측정

본 실험에서 EXP1 및 EXP2의 엽채류 측정은 엽채류 입식 후 25일 시점에 각 실험구(CAS vs DAS) 엽채류의 뿌리, 줄기 부분을 제거한 후, 가식부인 잎을 수확한 다음 전체 무게를 측정하여 성장도를 조사하였다. 비단잉어의 어체중 측정은 EXP2 실험의 엽채류 최종 측정 후, 각 실험구별 총어체 중량을 측정하였다.

6. 수질관리

현재 실험에서 사용한 어류 사육 수질관리는 Lee et al. (2019a,b; 2020)가 보고한 방법을 참고하여 진행하였으나, 기존의 방식과 달리 CO_2(탄산가스) 투입 과정은 없었다. 물만들기 초기 미생물은 시판용 유용미생물 제품인 BFT-ST (EgeeTech, Ltd., USA) 11.4 L을 사용하였으며, 어류 입식 후 6주 기간 동안 Emerenciano et al. (2017)의 방법에 준하여 사료 공급에 따른 수중의 TAN 발생 농도에 맞추어 유기탄소원인 정제 포도당을 계산한 후, C:N(6:1)비를 맞추어 사육수조에 공급하였다.

엽채류 입식 시점인 7주부터 모든 실험구는 엽채류의 성장을 감안하여 pH를 6.0~6.3 부근에 맞추어 관리되었다. CAS 실험구는 지속적인 pH 감소에 따라 격일로 KOH (Samchun Ltd., Pyeongtaek, Korea) 35 g 및 Ca(OH)2 (Samchun Ltd., Pyeongtaek, Korea) 20 g을 섬프수조에 투입하였다. DAS 실험구의 어류 사육수조에는 KOH 20 g 및 Ca(OH)2 10 g을 투입하였으며, 식물재배지에는 KOH 5 g 및 $Ca(OH)_2$ 2 g을 투입하였다. DAS 실험구의 EXP1 실험에서 식물재배지 내 초기 영양분 부족에 따라 화학 복합비료 (nitrogen 21 %, phosphorous 17 %, potassium 17 %) 슈퍼21(NAMHAE CHEMICAL Co., Yeosu, Korea)을 1일 50 g 용량으로 정화조에 투입하였고, EXP2 실험에서는 양평군

농업기술센터에서 제공받은 블루길 (*Lepomis macrochirus*) 및 베스(*Micropterus salmoides*) 발효 액상 비료를 1일 150 mL을 정화조에 투입하였으며, 액상비료의 화학성분은 Table 2와 같다.

Table 2. Chemical composition of liquid fertilizer manufactured by fermenting bluegill (*Lepomis macrochirus*) and bass (*Micropterus salmoides*)[1]

Composition	Concentration (ppm)
NO_3-N	5,600
Cl	2,050
S	1,260
HCO_3^-	110
P	150
NH_4^+	5,200
K	3,860
Na	380
Ca	1,200
Mg	410
Fe	13.3
Mn	0.7
Zn	1.0
Cu	0.2

[1]Values are means of 2 determinations.

7. 수질분석

수질 측정은 1주 6회 진행하였으며, 수온(℃), 용존산소(DO, mg/L), pH, 전기전도도(electrical conductivity, EC; μs/cm), 탁도(Turbidity; NTU), TAN (NH_3+NH_4^+) (mg/L), NO_2-N (mg/L), NO_3-N (mg/L) 및 PO_4-P (mg/L)를 측정하였다. 수온, DO, pH, EC 및 탁도는 수질측정기인 YSI PRODSS (YSI Inc., Yellow spring, Ohio, USA)를 이용하여 측정하였다. TAN (mg/L), NO_2-N (mg/L), NO_3-N (mg/L) 및 PO_4-P (mg/L)은 분석시약(NitraVerⓡX Reagent Set 2605345-KR, Low Range Ammonia Reagent Set 2604545-KR, NitriVerⓡ3 Reagent Set 2608345-KR, PhosVerⓡ3 Phosphater Reagent, HACH Ltd., Loveland, CO, USA)과 다목적 수질측정기인 DR6000 (HACH Ltd., Loveland, Co, USA)을 이용하여 비색법으로 측정하였다. EXP1 및 EXP2 실험 종료 시점의 K (mg/L), Ca (mg/L), Mg (mg/L), Na (mg/L), Fe (mg/L), Zn (mg/L), Mn (mg/L) 및 Cu (mg/L) 분석은 유도결합플라즈마 분광광도계(ICP-OES Optima 8300, Perkin Elmer Co., Waltham, MA, USA)를 이용하였으며, Cl (mg/L) 및 SO_4 (mg/L)는 이온크로마토그래피(930 Comact IC Flex, Metrohm Co., Herisau, Switzerland)를 이용하여 분석하였다.

8. 통계처리

EXP1 및 EXP2 실험 종료 시 측정된 다량원소 6종(K, Ca, Mg, Na, Cl, SO4)과 미량원소 4종(Fe, Zn, Mn, Cu) 수질분석 자료는 SPSS Version 10 (SPSS, 1999) 프로그램의 일원분산분석(one-way ANOVA)을 이용하여 분석하였으며, 통계분석의 유의수준은 5% ($P<0.05$)에서 결정되었다.

Ⅲ. 결과 및 고찰

실험구(CAS구, DAS구)별 14주간 사육된 비단잉어의 성장 결과는 Table 3와 같다. DAS 실험구의 경우 드럼스크린과 슬러지 청소 펌프 설치를 감안하여 CAS 실험구 보다 사료 공급량을 일일 30 % 초과 공급하였다. 증체율(weight gain, WG) 및 일간성장률(specific growth rate, SGR)은 DAS 실험구가 높은 값을 보였으나, 사료효율(feed efficiency, FE)은 CAS 및 DAS 실험구가 유사한 값을 보였고, 생존율(Survival rate)은 2 실험구 모두 폐사 개체가 출현하지 않아 동일하였다. 본 실험의 경우 사료의 허실을 방지하기 위해 만복공급이 아닌 제한공급 방식으로 이루어진 결과에 따라 사료효율에서는 유사한 값을 나타내었고, DAS 실험구가 CAS 실험구에 비해 공급량이 많은 관계로 증체량이 증가한 것으로 사료된다.

현재 실험의 수질분석 결과는 Table 3, 4, 5와 같다. 본 실험에서 수행된 수질관리 방법과 이전 HBFT-AP (hybrid biofloc technology aquaponics) 수질 운영의 차이점은 초기 BFT 운영에 있어 탄산가스를 병행 사용하지 않았다는 점과 유기탄소를 장기간 사용한 부분이다.

Table 3. Growth performance of fancy carp (Cyprinus carpio var. koi) reared in two experimental groups (CAS and DAS) for 14 weeks.

Growth performance	Culture method	
	CAS	DAS
Initial fish No.	120	120
Final fish No.	120	120
Initial total weight of total fish (g)	107,400	105,600
Final total weight of total fish (g)	132,530	140,540
Feed intake(g, DM)	37,890	53,130
WG (%)[1]	23.40	33.09
FE (%)[2]	66.32	65.76
SGR (%)[3]	0.21	0.29
Survival rate (%)[4]	100	100

[1]Weight gain (%) = [final weight (g) - initial weight (g)] × 100/initial weight (g).
[2]Feed efficiency (%) = wet weight gain (g) / dry feed intake × 100.
[3]Specific growth rate (%) = (Ln final weight (g) - Ln initial weight (g)) / experimental days×100.
[4]Survival rate (%) = final fish number / initial fish number × 100.
CAS, coupled aquaponic system; DAS, decoupled aquaponic system

14주간 진행된 CAS 및 DAS 아쿠아포닉 시스템 내 어류 사육 수조의 수질분석 결과에서 이전의 결과(Lee et al., 2019a; Lee et al., 2019b; Lee et al., 2020; Lee and Kim, 2021., Lee 2021; Lee 2022)와 비교 시 가장 큰 특징은 아질산 농도 감소 기간이 3주 이상 길어졌다는 것이다. 이는 초기 질산화 세균의 번식과 관련이 있는데, 질산화세균은 종속영양세균과 달리 성장과 번식을 위해 무기탄소를 사용하며 수중 내 알칼리도 제한보다는 무기탄소 함량이 낮을 시 번식에 부정적 영향을 미친다고 하였다(Guisasola et al., 2007). CAS 실험구가 DAS 실험구에 비해 아질산 농도가 낮게 나타난 것은 CAS 실험구의 여과기 용량이 DAS 시스템에 비해 크다(CAS 680 L vs DAS 400 L)는 점과 CAS는 단일 순환방식에 따라 식물재배지 내 식물 뿌리 또한 질산화세균의 번식 공간으로 활용되었기 때문이라 사료된다. Kaxozi et al.(2021)은 단일순환 아쿠아포닉스에서 수중 내 질소화합물의 감소에 대한 식물 뿌리의 중요성을 언급했다. 본 실험에서 DAS 실험구 내 어류로부터 유래된 슬러지를 기계 장치를 통해 제거했음에도 CAS 실험구에 비해 아질산 농도가 높아진 결과를 나타내어 이를 해결하기 위해서는 여과기 용량을 높여 질산화 미생물의 번식 공간을 확대해 줄 필요가 있을 것으로 사료된다. 그러나 유기탄소가 중단된 6주 후부터 TAN (total ammonia) 감소에 있어서는 DAS 실험구가 효율적인 것으로 나타났는데, 이는 암모니아 발생은 종속영양 세균의 유기물 분해 과정과 어류의 아가미로부터 발생되지만 DAS 실험구의 경우 기계 장치로부터 어류 사육조 내 슬러지를 빠르게 제거하여 TAN 농도를 CAS에 비해 지속적으로 낮게 유지한 것으로 사료된다(Table 4, 5).

Table 4. Change of water quality (DO, pH, Temperature, EC, Turbidity, TAN, NO_2-N, NO_3-N and PO_4-P) in CAS for 1-14 weeks[1].

Culture method		Week	DO (mg/L)	pH	Temperature (℃)	EC (μs/cm)	Turbidity (NTU)	TAN (mg/L)	NO_2-N (mg/L)	NO_3-N (mg/L)	PO_4-P (mg/L)
		initial	10.21	7.59	24.2	129.6	0.4	0.30	0.059	2.28	0.75
	Fish	1	9.23±0.24	7.64±0.07	24.1±0.3	141.0±5.9	3.97±1.27	1.12±0.52	0.024±0.004	0.94±0.08	0.39±0.04
		2	8.84±0.31	7.62±0.04	24.4±0.2	172.7±9.6	4.58±0.98	0.84±0.34	0.039±0.009	0.87±0.23	0.64±0.27
		3	8.69±0.18	7.24±0.31	24.3±0.2	207.8±11.3	2.47±0.53	2.87±0.76	0.153±0.045	2.42±0.96	1.12±0.34
		4	8.34±0.19	6.72±0.54	24.1±0.2	249.1±12.5	1.42±0.41	0.56±0.27	0.872±0.342	5.68±1.97	2.16±0.48
		5	8.45±0.21	6.26±0.38	23.7±0.6	317.4±14.7	1.03±0.15	1.87±0.29	0.348±0.115	9.45±2.42	4.21±1.13
		6	8.51±0.16	6.07±0.31	23.8±1.2	367.8±13.7	0.81±0.12	2.15±0.14	0.145±0.087	14.53±3.89	8.01±2.67
CAS	Fish+Vegetable EXP1	7	8.49±0.12	6.05±0.09	23.8±0.8	399.6±10.2	0.63±0.09	2.87±0.32	0.084±0.016	21.47±3.72	10.94±1.41
		8	8.48±0.10	6.01±0.04	23.1±0.7	431.2±11.7	0.71±0.04	2.96±0.09	0.058±0.012	30.75±4.13	15.48±2.44
		9	8.31±0.25	6.07±0.07	23.5±0.5	459.3±10.9	0.84±0.06	3.12±0.07	0.065±0.005	39.41±3.84	17.32±1.32
		10	8.40±0.16	6.04±0.03	24.1±0.6	487.2±11.2	1.14±0.27	3.17±0.03	0.061±0.003	44.63±3.21	19.14±0.98
	Fish+VegetableEXP2	11	8.40±0.16	6.07±0.04	24.3±0.2	523.4±23.6	2.02±0.43	3.24±0.11	0.063±0.001	47.82±2.12	21.25±1.02
		12	8.38±0.05	6.11±0.05	24.4±0.5	587.6±27.4	3.14±0.62	3.19±0.07	0.078±0.012	53.62±4.58	22.14±0.51
		13	8.41±0.06	6.06±0.03	25.1±0.7	657.2±30.3	3.84±0.37	3.29±0.05	0.071±0.004	61.24±3.41	23.08±0.26
		14	8.42±0.03	6.02±0.04	25.3±0.3	712.3±24.5	4.04±0.25	3.31±0.03	0.057±0.015	66.32±2.56	22.57±0.32

[1]Values represent the means±SD of the values for 1 weeks: CAS, coupled aquaponic system; DO, dissolved oxygen; EC, electrical conductivity; TAN, total ammonia.

Table 5. Change of water quality (DO, pH, Temperature, EC, Turbidity, TAN, NO_2-N, NO_3-N and PO_4-P) in fish tank of DAS for 1-14 weeks[1].

Culture method	Week	DO (mg/L)	pH	Temperature (℃)	EC (μs/cm)	Turbidity (NTU)	TAN (mg/L)	NO_2-N (mg/L)	NO_3-N (mg/L)	PO_4-P (mg/L)
DAS (Fish tank)	initial	10.18	7.60	25.1	129.7	0.4	0.28	0.056	2.30	0.78
	1	9.27±0.22	7.71±0.07	25.2±0.1	138.4±4.2	2.14±0.84	1.08±0.32	0.037±0.006	1.45±0.21	0.62±0.03
	2	8.83±0.26	7.84±0.05	25.0±0.1	152.2±5.1	2.08±0.09	1.11±0.16	0.041±0.002	0.97±0.34	0.67±0.02
	3	8.78±0.21	7.61±0.12	24.7±0.2	173.8±8.4	2.47±0.53	1.77±0.38	0.348±0.101	2.12±0.65	0.89±0.09
	4	8.27±0.34	7.37±0.23	24.8.±0.1	197.6±8.2	1.42±0.32	1.48±0.27	3.412±0.845	4.87±1.46	1.84±0.37
	5	8.41±0.19	7.12±0.17	25.1±0.1	229.4±10.1	1.35±0.09	1.12±0.21	3.121±0.076	7.21±2.11	2.11±0.12
	6	8.47±0.08	6.85±0.25	24.6±0.3	251.3±9.9	1.41±0.05	1.25±0.13	1.587±0.672	10.54±2.24	4.16±1.35
	7	8.37±0.07	6.54±0.21	24.8±0.2	287.4±11.5	1.16±0.21	1.41±0.19	0.852±0.341	15.68±2.19	5.21±0.52
	8	8.41±0.05	6.27±0.18	24.8±0.1	315.2±9.4	1.08±0.03	1.35±0.08	0.345±0.097	21.63±3.21	7.57±1.08
	9	8.42±0.03	6.31±0.05	24.7±0.2	344.8±10.9	1.21±0.09	1.62±0.25	0.154±0.012	24.38±1.57	9.65±1.14
	10	8.39±0.06	6.28±0.06	24.9±0.1	384.5±10.7	1.34±0.08	1.51±0.07	0.198±0.029	27.64±1.36	10.84±0.67
	11	8.37±0.02	6.14±0.08	25.1±0.1	418.4±9.4	1.66±0.21	2.01±0.38	0.202±0.058	29.37±1.58	11.65±0.21
	12	8.41±0.03	6.21±0.05	24.8±0.2	442.3±11.3	1.79±0.14	1.87±014	0.169±0.065	31.28±2.14	12.84±0.57
	13	8.29±0.08	6.23±0.02	25.2±0.1	485.6±18.7	1.82±0.05	1.92±0.05	0.194±0.031	35.62±2.52	14.32±0.72
	14	8.35±0.04	6.26±0.03	25.0±0.1	518.9±15.5	1.74±0.04	2.05±0.12	0.211±0.048	41.32±3.14	15.25±0.48

[1]Values represent the means±SD of the values for 1 weeks: DAS, decoupled aquaponic system; DO, dissolved oxygen; EC, electrical conductivity; TAN, total ammonia.

Table 6. Change of water quality (DO, pH, Temperature, EC, Turbidity, TAN, NO_2-N, NO_3-N and PO_4-P) in plant bed of DAS for 1-14 weeks[1].

Culture method		Week	DO (mg/L)	pH	Temperature (℃)	EC (μs/cm)	Turbidity (NTU)	TAN (mg/L)	NO_2-N (mg/L)	NO_3-N (mg/L)	PO_4-P (mg/L)
DAS (Plant bed)		initial	10.17	7.62	20.1	129.5	0.4	0.26	0.057	2.27	0.75
	Sludge recycling	1	7.21±0.34	7.82±0.04	20.4±0.2	132.4±2.2	0.52±0.04	2.45±0.87	0.049±0.011	2.18±0.13	0.71±0.02
		2	6.87±0.41	7.86±0.03	19.8±0.4	138.6±2.1	0.71±0.05	3.23±0.56	0.069±0.009	2.28±0.09	0.69±0.01
		3	7.36±0.32	7.82±0.03	20.1±0.1	145.7±3.1	0.72±0.02	4.12±0.62	0.587±0.137	2.98±0.33	0.92±0.11
		4	7.27±0.11	7.67±0.12	20.2±0.1	151.6±4.3	0.69±0.03	2.12±0.86	1.156±0.326	3.16±0.21	1.12±0.09
		5	7.28±0.09	7.54±0.14	20.1±0.2	169.7±8.5	0.63±0.05	1.34±0.48	0.974±0.028	6.08±1.87	1.54±0.21
		6	7.41±0.13	7.26±0.25	18.5±1.2	184.8±9.6	0.66±0.03	1.14±0.17	0.321±0.142	8.41±1.24	1.98±0.37
	Sludge recycling EXP1[2]	7	7.39±0.04	7.12±0.07	17.8±2.5	231.8±14.5	0.64±0.02	3.45±1.23	0.097±0.056	15.12±2.08	4.21±1.26
		8	7.28±0.05	6.41±0.32	19.3±0.8	267.6±12.4	0.65±0.01	3.12±0.23	0.072±0.008	19.43±3.35	7.34±2.05
		9	7.40±0.10	6.18±0.13	18.7±1.3	299.3±13.7	0.74±0.06	3.28±0.12	0.084±0.007	25.48±3.29	9.27±1.08
		10	7.34±0.04	6.09±0.08	19.2±0.8	342.8±19.8	0.73±0.03	2.42±0.47	0.075±0.008	28.74±2.67	11.25±0.76
	Sludge recycling EXP2[3]	11	7.47±0.05	6.02±0.14	18.9±0.3	415.2±21.3	0.84±0.12	1.88±0.31	0.063±0.005	34.52±3.21	13.25±1.85
		12	7.39±0.07	6.14±0.06	19.5±0.4	497.6±34.2	1.14±0.24	1.95±0.09	0.082±0.011	41.43±2.97	16.32±2.14
		13	7.31±0.03	6.05±0.08	21.2±0.8	579.6±41.3	1.31±0.13	2.11±0.07	0.075±0.004	48.39±4.54	18.65±2.36
		14	7.33±0.01	6.03±0.02	20.7±0.3	687.4±45.8	1.42±0.06	2.09±0.05	0.079±0.003	56.23±6.21	20.24±2.28

[1]Values represent the means±SD of the values for 1 week: DAS, decoupled aquaponic system; DO, dissolved oxygen; EC, electrical conductivity; TAN, total ammonia.

[2]EXP1 results represent the water quality values supplemented with 50 g of commercial composite fertilizer (nitrogen 21 %, phosphorous 17 %, potassium 17 %) per day in addition to sludge generated from fish.

[3]EXP2 results represent the water quality values supplemented with 150 ml of liquid fertilizer manufactured by fermenting bluegill (*Lepomis macrochirus*) and bass (*Micropterus salmoides*) per day in addition to sludge generated from fish.

식물 입식(7주) 후 DAS 실험구의 식물재배지 내 NO3-N (mg/L) 농도를 살펴보면 1주간 평균이 15.12±2.08의 값을 보여 CAS 실험구의 21.47±3.72의 값에 비해 낮음을 알 수 있다. DAS 실험구의 식물재배지 내 영양염은 어류 수조에서 발생된 슬러지를 정화조로 수집 후 정화조 내에서 무기물화 및 질산화과정을 거쳐 유입되나 어류 사육수조 내에서 발생되는 무기영양염의 허실로 CAS에 비해 낮게 나타난 것으로 사료된다. 이를 보완하기 위해 DAS 시스템의 경우 부족 영양염에 대해 일부 보충하게 되는데(Goddek et al., 2016), 본 실험에서는 시중에서 흔히 구할 수 있는 농업용 복합비료와 국내 내수면 유해 어종인 블루길, 베스의 발효 액상비료를 EXP1와 EXP2 기간 동안 정화조에 투입하였다(<Table 5>). EXP1와 EXP2 실험 종료 시(10주, 14주) CAS 실험구는 EC (μs/cm) 487.2±11.2 및 712.3±24.5, NO_3-N (mg/L) 44.63±3.21 및 66.32±2.56, PO_4-P (mg/L) 19.14±0.98 및 22.57±0.32의 값을 보였고(Table 4), DAS 실험구는 EC (μs/cm) 342.8±19.8 및 687.4±45.8, NO_3-N (mg/L) 28.74±2.67 및 56.23±6.21, PO_4-P (mg/L) 4.21±1.26 및 20.24±2.28의 값을 나타내었다(Table 6).

EXP1와 EXP2 실험 종료 시(10주, 14주) K를 포함한 6종류의 다량원소와 Fe를 포함한 4종류의 미량원소 분석 결과는 Fig. 5, 6와 같다.

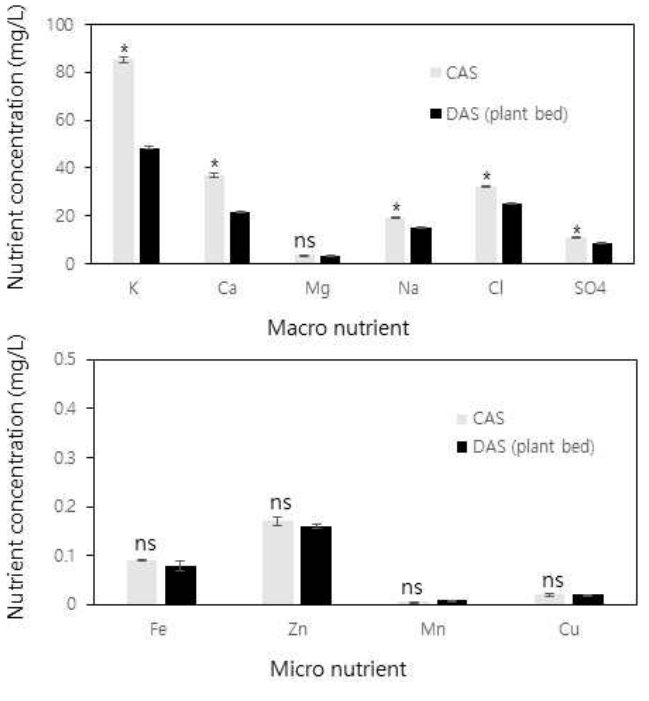


Fig. 5. Macro and micro nutrient concentrations in two experimental groups (CAS and DAS) at the end of EXP1 (7-10 weeks). Values (means ± SD for two replicates of experimental groups) with * letters are significantly different (P<0.05). ns, not significant (P>0.05).

K와 Ca의 경우 CAS 및 DAS 실험구 사육수의 pH 유지를 위해 지속적으로 투입된 KOH 및 $Ca(OH)_2$의 영향으로 EXP1 기간(7-10주)에 비해 EXP2 기간(11-14주)에 높은 농도 값을 나타내었다. 또한 CAS 실험구가 DAS 실험구에 비해 EXP1 및 EXP2 실험에서 유의하게 높은 K (EXP1 CAS 85.3±1.2 mg/L, DAS 48.5±0.5 mg/L, EXP2 CAS 148.4±1.2 mg/L, DAS 78.5±0.8 mg/L)와 Ca (EXP1 CAS 37.2±0.8 mg/L, DAS 21.8±0.3 mg/L, EXP2 CAS 40.2±0.6 mg/L, DAS 25.4±0.1 mg/L) 값을 나타내었다($P<0.05$).

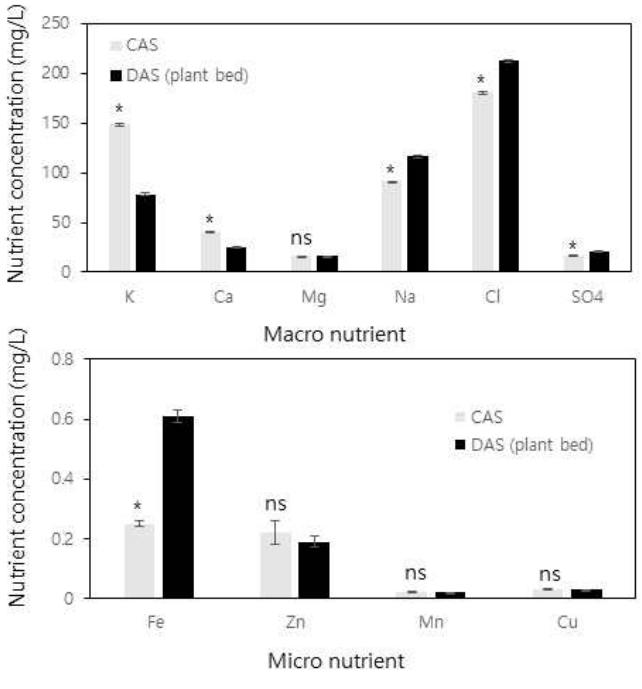


Fig. 6. Macro and micro nutrient concentrations in two experimental groups (CAS and DAS) at the end of EXP2 (11-14 weeks). Values (means ± SD for two replicates of experimental groups) with * letters are significantly different ($P<0.05$). ns, not significant ($P>0.05$).

EXP1에서 Mg를 제외한 다량원소 5종은 CAS 실험구에서 DAS 실험구에 비해 높은 농도를 나타내었으나($P<0.05$), EXP2에서는 반대로 Na, Cl, SO4 농도가 DAS 실험구에서 유의적으로 높은 값을 보였다($P<0.05$). 미량원소의 경우 EXP1 실험에서 4종류 미량원소는 모두 유의한 차이를 나타내지 못했으나($P>0.05$), EXP2 실험에서 Fe는 DAS 실험구(0.61±0.02 mg/L)가 CAS 실험구(0.25±0.01 mg/L)에 비해 유의하게 높은 값을 보였으며($P<0.05$), 나머지 3종류는 유의한 차이를 나타내지 못했다($P>0.05$). 이러한 경향은 EXP2 실험기간 동안 DAS 실험구의 정화조 내 투입한 베스 및 블루길 발효 액상비료의 높은 Na, Cl 및 Fe 농도(Table 2)에 기인한 것으로 사료된다.

EXP1 및 EXP2의 엽채류 생산실험의 결과는 Table 7와 같다. EXP1의 초기 엽채류의

개체별(품종별 10개체 샘플) 뿌리, 줄기를 제외한 엽중량은 Fairly 0.87±0.31 g, Decarte 0.35±0.11 g, Gauguin 0.42±0.13 g, Ezabel 1.21±0.24 g, Ovired 0.57±0.15 g로 조사되었고, 25일간 성장 후 실험구별 전체 엽중량은 CAS 실험구 28,293 g, DAS 실험구 26,807 g로 나타났다(Table 7).

Table 7. Growth for eight cultivar of european lettuce (*Lactuca sativa*) cultivated in CAS and DAS for EXP1 (7-10 weeks) and EXP2 (11-14 weeks).

Experiment period	Total leaf weight (g)	
EXP1 (7-10 weeks)	CAS	DAS
Fairly (No. 180) (*Lactuca sativa*)	7,965	7,232
Decarte (No. 180) (*Lactuca sativa*)	5,309	5,169
Gauguin (No. 180) (*Lactuca sativa*)	5,109	5,053
Ezabel (No. 180) (*Lactuca sativa*)	4,743	4,608
Ovired (No. 180) (*Lactuca sativa*)	5,167	4,746
Sum (No. 900)	28,293	26,807
EXP2 (11-14 weeks)	CAS	DAS
Volare (No. 180) (*Lactuca sativa*)	16,385	17,718
Decarte (No. 180) (*Lactuca sativa*)	12,932	13,013
Xaroma (No. 180) (*Lactuca sativa*)	12,749	13,768
Ezabel (No. 180) (*Lactuca sativa*)	12,998	13,115
Skelton (No. 180) (*Lactuca sativa*)	12,686	13,632
Sum (No. 900)	67,749	71,247

CAS, coupled aquaponics system; DAS, decoupled aquaponic system

CAS 실험구가 DAS 실험구에 비해 전체 엽중량이 높은 것은 엽채류 입식 초기 DAS 실험구의 식물재배지 수질 환경 중 EC, NO_3-N, PO_4-P 농도가 CAS 실험구의 농도보다 낮아기 때문으로 사료된다(Table 4, 6).

EC는 pH와 함께 아쿠아포닉스 현장에서 수질특성을 파악할 수 있는 중요한 요소로

물에 용해된 이온의 양이라 말할 수 있어 식물 영양분 요구량 파악 중요한 측정 지표이다 (Hager et al., 2021). 아쿠아포닉스에서 추천되는 EC 농도는 300-600 μs/cm으로 보고되어 있으나(Rakocy et al., 2006), DAS 실험구의 경우 입식 초기 1주간 EC 농도는 231.8±14.5 μs/cm 값을 보여 입식 시점이 빨랐음을 알 수 있고 이에 따라 초기 성장이 더뎌 실험 종료 4주에서 CAS 실험구에 비해 성장이 늦어진 것이다 (<able 7).

EXP2의 초기 엽채류의 개체별(품종별 10개체 샘플) 뿌리, 줄기를 제외한 엽중량은 Volare 1.21±0.27 g, Decarte 0.41±0.09 g, Xaroma 0.74±0.25 g, Ezabel 1.12±0.15 g, Skelton 0.86±0.22 g로 조사되었고, 25일간 성장 후 실험구별 전체 엽중량은 CAS 실험구 67,749 g, DAS 실험구 71,247 g로 나타났다(Table 7). EXP1와 달리 DAS 실험구가 CAS 실험구에 비해 전체 엽중량 생산이 높게 나타났는데, 이는 실험 기간이 경과함에 따라 DAS 실험구의 식물재배지 수질 환경은 EXP1와 달리 아쿠아포닉스 운영에 적합하게 변화되었으며, 더불어 미량원소 중 Fe의 농도가 CAS에 유의하게 높게 나타났기 때문이다 ($P<0.05$). Thorarinsdottir (2015)은 아쿠아포닉 시스템 내에서 Fe는 엽록체와 전자전달 사슬에 이용되는 미량원소로 광합성에 있어 매우 중요한 제한요소로 작용하며 Fe 부족 시 잎과 식물 전반에 황색으로 변하며 결국 괴사하게 되므로 인위적인 첨가가 필요하다 하였다. CAS 실험구에 비해 DAS 실험구의 높은 Fe 농도는 엽채류 성장에 큰 영향을 미쳤을 것으로 고려할 수 있다.

또한 엽채류 근권부(root) 수온의 범위에서 CAS 실험구는 25℃ 내외, DAS 실험구는 20℃ 내외로 DAS 실험구의 엽채류 근권부 온도가 5℃ 정도 낮았다. Suzuki and Sakamoto (2015)는 적상추 (red leaf lettuce)로 수경재배 시 20-25℃ 수온 범위에서는 성장 차이가 없음을 보고하였으며, 이러한 결과를 바탕으로 본 실험의 결과와 비교 시 수온에 의한 영향은 큰 작용을 하지 않았을 것으로 유추된다. Lee et al.(2019b)는 아쿠아포닉스에서 엽채류의 성장과 용수 내 영양염 관계에서 절대량 보다 영양소 상호관계가 중요함을 보고하였다. 특히 K와 Ca는 길항작용을 하는 영양소로 용수 내 적정비(3:1) 유지는 중요하다. EXP1와 EXP2 실험기간 동안 CAS 및 DAS 실험구 모두 K와 Ca의 비는 유사하게 유지되어 CAS 실험구가 DAS 실험구에 비해 높은 K 및 Ca 농도를 유지하였음에도 엽채류 성장 차이에 긍정적 영향은 없었을 것으로 사료된다.

EXP1과 EXP2 사이의 엽채류 생산성의 가장 큰 차이는 조도에 의한 원인으로 설명할 수 있으며, 엽채류 성장에 광량 및 광질은 중요한 요소로 보고되고 있다(Lu 2021). Fig. 3, 4에서 엽채류 입식 후 실험 기간별 조도(lux)는 동절기(12-3월) 실험 기간 동안 7-10주간은 흐린 날씨, 비 및 눈의 지속으로 맑은 날이 적었고, 또한 광주기 역시 짧았으나 시간이 경과함에 따라 11-14주 기간에는 맑은 날씨와 광주기가 길어져 조도량도 증가하여 엽채류 성장이 EXP1 기간에 비해 EXP2 기간에 2~3배 증가된 것으로 사료된다.

현재 정부에서는 블루길, 베스 퇴치사업을 실시하고 있으며, 이러한 유해자원을 활용하기 위해 반려동물 사료 및 어묵 생산화 등 여러 방안을 고려하고 있다. 본 연구에서도 불루길, 베스를 발효시킨 액상 비료는 현재 밭농사 및 원예에 사용하고 있어 DAS 시스템에 적용 시 어떠한 영향을 미치는지 살펴보았다.

Na는 상추류(lettuce)에 대해 배지 내 100 mg/L를 초과하지 않는 것이 일반적으로, 이러한 이유는 배지 내 높은 Na는 엽채류에 빠르게 흡수되어 K 의 흡수를 방해하기 때문이며, 특히 순환식 시스템에서 K는 작물의 최적 성장을 위해 고려되는 아주 중요한 요소이다(Lee et al., 2019b). Cl은 식물 체내 건조함량(0.2–2.0% dw)이 상당히 높지만 식물에 쉽게 흡수되며 식물체 내에서 매우 유동적이고, 광합성 과정과 기공 개방 조절에 관여하며, 용수 내 Cl 농도의 감소보다 과량으로 존재 시 식물 수축을 유발하여 성장을 감소시킨다(Maucieri et al., 2019). 본 EXP2 실험에서 DAS 식물재배지 내 Fe 증가는 긍정적 요인으로 작용했으나 Na와 Cl 농도도 동시 증가하여 블루길, 베스의 발효 액상 비료의 지속적인 사용은 부적당한 것으로 고려될 수 있으며(Fig. 6), 추후 연구가 필요한 사항으로 사료된다.

현재 국내 아쿠아포닉스 산업은 농업 중심으로 수산물에 의한 생산성이 매우 적고, 대다수 엽채류 생산에 의존하고 있다. 이러한 이유는 어류와 엽채류의 생산환경이 달라 어종이 국내 온수성 어종인 잉어류, 메기 등에 한정되고 뱀장어, 연어, 송어 등 고부가가치 어종 도입이 제한되기 때문이다. 본 연구에서 개별 환경 적용이 가능한 DAS 시스템 도입 연구는 국내 수산 중심의 아쿠아포닉스 산업화를 위한 field test 규모의 첫 시도로, 향후 DAS 시스템 발전을 위한 기초자료 제공에 의의가 있다고 할 수 있다.

참 고 문 헌

Bartelme RP, Oyserman BO, Blom JE, Sepulveda-Villet, OJ and Newton RJ(2018). Stripping away the soil: plant growth promoting microbiology opportunities in aquaponics. Front. Microbiol. 9, 1-7. https://doi.org/10.3389/fmicb.2018.00008.

Emerenciano MGC, Martínez-Córdova LR, Martínez-Porchas M and Miranda-Baeza A(2017). Biofoc technology(BFT) : A tool for water quality management in aquaculture. INTECH, 91-109. http://dx.doi.org/10.5772/66416.

FAO(2014). Food and Agriculture Organization. Small-scale aquaponic food production integrated fish and plant farming. FAO Fisheries and aquaculture technical paper 589, 1-19.

Goddek S, Espinal CA, Delaide B, Jijakli MH, Schmautz Z, Wuertz S and Keesman KJ(2016). Navigating towards decoupled aquaponic systems: A system dynamics design approach. Water 8(7), 1-29. https://doi.org/10.3390/w8070303.

Goddek S, Joyce A, Wuertz S, Körner O, Bläser I, Reuter M and Keesman KZ(2019). Chapter 8 Decoupled aquaponics systems. In: Aquaponics food production systems. Goddek S, Joyce A, Kotzen B and Burnell GM. eds. Springer Nature Switzerland AG, Cham, Switzerland, 201-229. https://doi.org/10.1007/978-3-030-15943-6_8.

Guisasola A, Petzet S, Baeza JA, Carrera J and Lafunente J(2027). Inorganic carbon limitations on nitrification: Experimental assessment and modelling. Water Research 41(2), 277-286. https://doi.org/10.1016/j.watres.2006.10.030.

Hager J, Bright LA, Dusci J and Tidwell J(2021). Aquaaponics production manual: A practical handbook for growers. Kentucky state university, Land grant program, 1-60. Retrieved from https://www.researchgate.net/publication/355972997 on Dec 15, 2021.

Joyce A, Goddek S, Kotzen B and Wuertz S(2019). Chapter 2 Aquaponics: closing the cycle on limited water, land and nutrient resources. In: Aquaponics food production systems. Goddek S, Joyce A, Kotzen B and Burnell GM. eds. Springer Nature Switzerland AG, Cham, Switzerland, 19-34. https://doi.org/10.1007/978-3-030-15943-6_8.

Kaxozi N, Abraham B, Kaiser H and Wilhelmi B(2021). The complex microbiome in aquaponics: significance of the bacterial ecosystem. Annals of Microbiology 71(1), 1-13. https://doi.org/10.1186/s13213-020-01613-5.

Kim SR, Lee CR. and Lee SM(2006). Effects of dietary supplementation of Paprika and Spirulina on pigmentation of swiri Coreoleuciscus splendidus. J Aquacult 19, 261-266.
Kim YO and Lee SM(2014). Effect of dietary carotenoids source on growth and skin color of red- and white-colored fancy carp Cyprinus carpio var. koi. Kor J Fish Aquat Sci 47(6), 790-795. http://dx.doi.org/10.5657/KFAS.2014.0790.

Kim YO and Lee SM(2015). Influence of spirulina level in diet on skin color of red- and white-colored fancy carp Cyprinus carpio var. koi. Journal of Fishiers and Marine Sciences Education 27(2), 414-421. http://dx.doi.org/10.13000/JFMSE.2015.27.2.414.

Maucieri C, Nicoletto C, Os EV, Anseeuw D, Havermaet RV and Junge R(2019). Chapter 4 hydroponic technologies. In: Aquaponics food production systems. Goddek S, Joyce A, Kotzen B and Burnell GM. eds. Springer Nature Switzerland AG, Cham, Switzerland, 77~110. https://doi.org/10.1007/978-3-030-15943-6_4.

Lee CR and Lee SM.(2008). Effect of dietary supplementation of pigment sources on pigmentation of the round tailed paradise fish Macropodus chinensis and pale chub Zacco platypus. J Aquacult 21, 213-217.

Lee CR, Pham MA. and Lee SM.(2010). Effects of dietary paprika and lipid levels on growth and skin pigmentation of pale chub (Zaccoplatypus). Asian-Aust. J Anim Sci 23, 724-732. https://doi.org/10.5713/ajas.2010.90462.

Lee DH, Kim JY, Lim SR, Kim DY, Kim JM, Shin SJ and Kim JD(2019a). Effect of dietary monobasic potassium phosphate levels on water quality and the growth of far eastern catfish Silurus asotus and four leafy vegetables in a hybrid biofloc technology aquaponic system. Korean J Fish Aquat Sci 52, 159-172. https://doi.org/10.5657/KFAS.2019.0159.

Lee DH, Kim JY, Lim SR, Kim DY, Kim KB, Kim JM and Kim JD(2019b). Comparative study on growth and yield of far eastern catfish Silurus asotus and leafy vegetables grown in hybrid BFT-aquaponics, semi-RAS and hydroponics. Korean J Fish Aquat Sci 52, 482-495. https://doi.org/10.5657/KFAS.2019.0482.

Lee DH, Kim JY, Lim SR, Kim KB, Kim JM, Hariati AM and Kim JD(2020). Effects of crude protein levels in diets containing MKP on water quality and the grwth of Japanese eels Anguilla japonica and leafy vegetables in a hybrid BFT-aquaponic system. Korean J Fish Aquat Sci 53, 606-619. https://doi.org/10.5657/KFAS.2020.0606.

Lee DH and Kim JD(2021). Comparative study on growth of leafy vegetables grown in a hybrid BFT-aquaponics using Janpanese eel, Anguilla japonica and hydroponics. Fish Aquat Sci 24(7), 260-275. https://doi.org/10.47853/FAS.2021.e26.

Lee DH(2021). Comparative study on growth of leafy vegetables grown in a hybrid BFT-aquaponics using yellow koi fish, Cyprinus carpio and hydroponics. JFMSE 33(5), 1027-1037. https://doi.org/10.13000/JFMSE.2021.10.33.5.1027.

Lee DH(2022). Water quality change and growth of siberian sturgeon (Acipenser baerii), basil (Ocimum basilicum) and 4 types of leafy vegetables through the application of auto- and heterotrophic microorganisms in the HBFT aquaponic system. JFMSE 34(1), 133-148. https://doi.org/10.13000/JFMSE.2022.2.34.1.133.

Lu N(2021). Light enviroment and plant growth in plant factories. IOP Conf Ser, Earth Environ Sci 686, 1-9. https://dx.doi.org/10.1088/1755-1315/686/1/012002.

Rakocy JE, Masser MP and Losordo TM(2006). Recirculating aquaculture tank production systems: aquaponics-integrating fish and plant culture. SRAC pbulication No. 454, Retrieved from https://www.researchgate.net/publication/284496499 on May 18, 2016.

Suzuki T and Sakamoto M(2015). Effect of root-zone temperature on grwoth and quality of hydroponically grown red leaf lettuce (Lactuca sativa L. cv. Red wave). American Journal of Plant Sciences 6, 2350-2360. https://dx.doi.org/10.4236/ajps.2015.614238.

Thorarinsdottir RI(2015). Aquaponics guidelines. Haskolaprent, Reykjavik, Iceland, 33-39. https://doi/10.13140/RG.2.1.4975.6880.

Yep B and Zheng Y(2019). EAquaponic trends and challenges-A review. Journal of Cleaner Production 228, 1586-1599. https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2019.04.290.

Zou Y, Hu Z, Zhang J, Xie H, Liang S, Wang J and Yan R(2016.) Attempts to improve nitrogen utilization efficiency of aquaponics through nitrifies addition and filler gradation. Environ. Sci Pollut Res 23, 6671-6679. https://doi.org/10.1007/s11356-015-5898-0.

유용미생물 생산·보급 연구

김장철

서 론

최근 수질오염과 환경오염에 따른 기상 이변으로 어획량이 많이 감소하고 있다. 이에 대한 방안으로 수산양식이 증가하고 있는 추세이며 유수식, 순환여과식 등 새로운 방법의 개발로 기업 규모의 양식업으로 발전하고 있다. 양식이 이루어지는 장소는 일반적으로 물 공급이 유리한 지역에 위치하여 양식되었으나, 지방시장과 수요자들이 신선한 어종을 원하고 지역적으로 인기 있는 어종을 공급하기 위하여 물 공급에 제한받지 않는 어종의 생산 및 기술적인 관심을 갖게 되었다. 하지만 수산양식은 좁은 면적의 사육조에 많은 어류를 사육하고자 하므로 어류 활동에 따른 대사 배설물, 미 섭취한 먹이 축적 등이 문제가 되고 있다. 이러한 물질들은 여러 가지 부유물질과 고형물을 형성하여 아질산성 질소, 질산성 질소 등 여러 가지 물질이 생성된다. 이러한 현상들에 의해 조류가 증폭되고 과부화 현상에 의한 환경적인 문제점들이 많이 발생되는데 특히 암모니아는 강한 독성을 가지고 있어 폐사율에 직접 관여하는 것으로 알려져 있다. 따라서 이러한 문제점을 해결하기 위하여 물리, 화학, 생물학적 방법 중에서 친환경적으로 안전성을 가지는 미생물을 이용하여 분해하는 방법이 많이 이용되고 있다.

Effective Microorganisms (EM)이란 유용미생물군으로, 1982년 오키나와 류큐대학 농학부의 Higa 박사에 의해 개발된 복합미생물 배양액이다. EM은 5과 10속 80여종의 미생물을 탱크에서 배양한 액상으로 통기혐기성 미생물과 호기성미생물이 공존, 공생하면서 상승효과를 발휘하도록 배양한 것이다. 유용미생물군은 주로 광합성 세균, 젖산균 및 효모가 구성하고 있다(Herias et al., 1999; Higa, 1993). EM을 사용하면 이들 미생물들 간의 복잡한 공존공영 관계가 만들어 내는 발효생성물인 항산화 물질들이 여러 가지의 효과를 나타내게 된다. EM 안의 유용미생물들이 부패가 진행 중이거나 부패가 예상되는 환경에 투입되면 항산화효소나 항산화물질, 아미노산, 비타민, 유기산 등을 생성함으로써 발효 환경이 조성되고 따라서 산화된 조건에서 활동하는 유해미생물을 억제하고 유익한 미생물의 증식을 강화하며, 동시에 유해 물질의 독성을 제거한다(Herias et al., 1999; Higa, 2001). 최근 EM은 농업에 사용될 뿐만 아니라 수질 환경 정화, 악취제거 등 수산양식에 효능이 입증되어 사용량이 점차 증가하는 추세이다.

따라서 최근 관내 양식어가의 원자재 값 및 사료 가격상승으로 안정적인 생산기반 확보가 필요한 시점에 연구소에서 유용미생물을 자체 생산·보급하여 양식어가의 안정적 생산 도모와 현장 애로사항을 해결하고자 본 연구를 시행하였다.

재료 및 방법

1. 미생물 배양

미생물을 배양하기 위하여 배양기 내 지하수(500L)와 고초균 배지(10kg) 그리고 소포제(100㎖)를 장입한 후 95℃에서 60분간 살균을 진행하였다. 이후 배양온도(34℃)로 냉각 후 종균을 투입하였으며, 종균은 BFT 양식 및 순환여과식에 사용되는 *Bacillus subtilis*를 접종하였고, 약 24시간 배양하였다

2. 미생물 보급

양식장 수질관리 등 양식어가의 현장 애로사항 해결을 위하여 유기물 분해와 수질환경 개선에 효과가 탁월한 수산용 미생물(*Bacillus subtilis*)을 자체 생산하여 무상보급 하였다. 각 시(군)에 관내 양식어가를 대상으로 희망 수요를 조사하였으며, 선정 결과 12개 시·군 73어가에 24,360ℓ를 보급하기로 계획하였다(그림 2).

3. 미생물 보급종 확대 예비실험

차년도 미생물 보급종 확대를 위하여 효모균·유산균의 배양조건을 확인하고자 하였다. 유산균은 배양기 내 지하수(250L)와 유산균 배지(5kg) 그리고 소포제(25㎖)를 장입한 후 95℃에서 60분간 살균을 진행하였다. 이후 배양온도(30℃)로 냉각 후 종균을 투입하였으며, 종균은 *Lactobaciluus plantarum*을 접종하였다. 약 20시간 배양하였고 도말평편법 계측결과 평균 3.8×10^{8} cfu/㎖가 나왔다.(그림5) 효모균은 배양기 내 지하수(250L)와 효모균 배지(5kg) 그리고 소포제(25㎖)를 장입한 후 95℃에서 60분간 살균을 진행하였다. 이후 배양온도(30℃)로 냉각 후 종균을 투입하였으며, 종균은 *Saccharomyces cerevisiae*을 접종하였다. 약 20시간 배양하였고 도말평편법 계측결과 2.9×10^{8} cfu/㎖가 나왔다.(그림1)

그림 1. 보급종 확대에 따른 예비실험 결과

결 과

약 20시간의 배양과정을 통해 얻은 미생물을 12개 시·군 73어가, 24,360ℓ를 보급하였으며 각 시·군별 보급내역은 다음과 같다(표 1). 또한 유용미생물 생산보급 사업에 대한 효과를 분석하기 위하여 설문조사를 실시한 결과 유용미생물 생산보급 사업이 소득증대에 기여한다고 생각한 답변이 주를 이뤄 본 사업에 대한 어민들의 만족도는 높은 것으로 확인되었으며, 세부결과는 다음과 같다.(그림 2)

표 1. 무상보급 결과

시 · 군	어가수(개소)	보급량(ℓ)
고양	3	720
안산	1	800
화성	10	3,660
남양주	3	940
평택	15	8,040
김포	15	3,800
이천	2	200
안성	10	2,060
포천	1	240
여주	3	360
양평	6	2,820
연천	4	720
합계	**73**	**24,360**

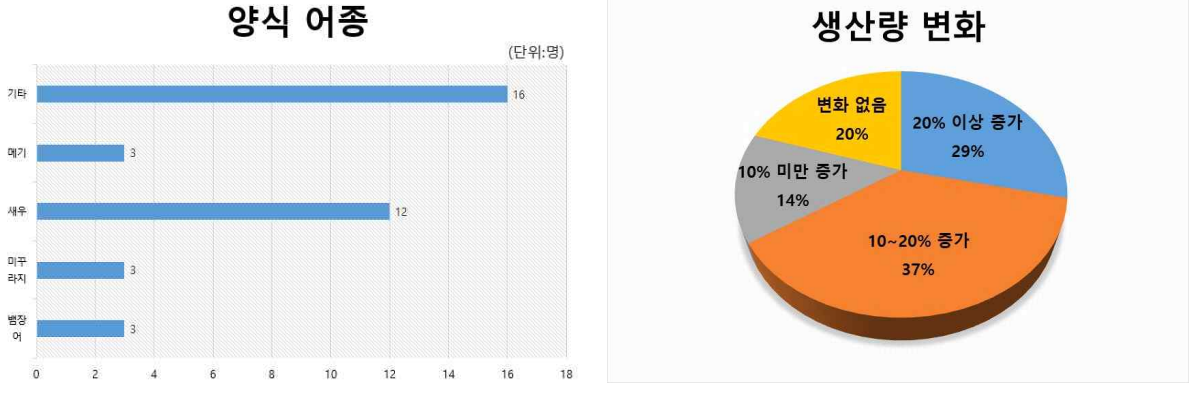
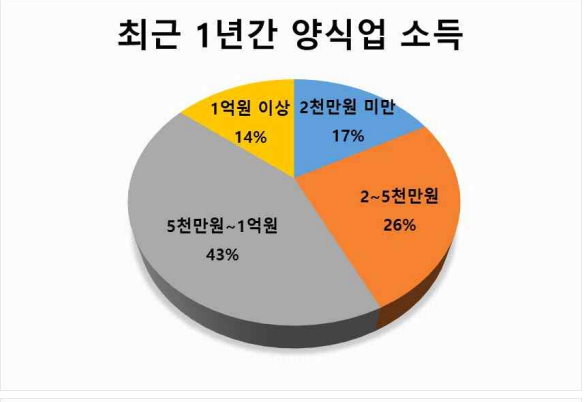
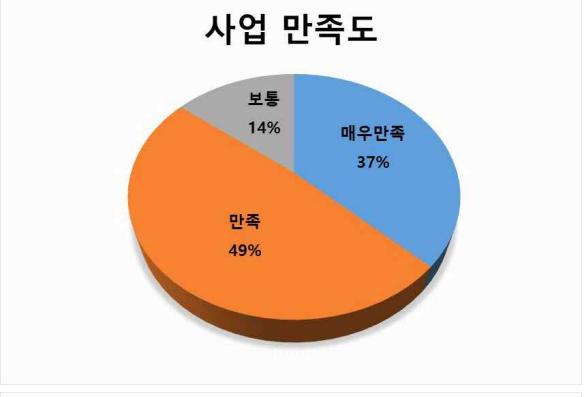
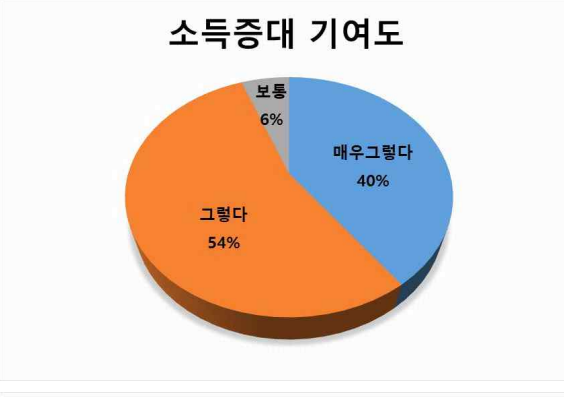


그림2. 설문조사 결과


최근 1년간 양식업 소득
1억원 이상
14%
2천만원 미만
17%
2~5천만원
26%
5천만원~1억원
43%


사업 이해도
잘 모른다
14%
잘 알고 있다
49%
알고 있다
37%


사업 만족도
보통
14%
매우만족
37%
만족
49%


소득증대 기여도
보통
6%
매우그렇다
40%
그렇다
54%


'23년 사업 신청 여부
미신청
3%
신청
94%
모르겠다
3%


보급 희망 균종
모르겠다
6%
복합균
17%
광합성균
8%
고초균
63%
효모균
6%


희망 보급량
모르겠다
6%
100L 미만
3%
100~250L
17%
1,000L 이상
34%
250~500L
26%
500~1,000L
14%

참 고 자 료

- Herias, M. V, C. Hessle, E. Telemo, T. Midtvedt, L. A. Hanson, and A. E. Wold. 1999. Immnomodulatory effects of *Lactobacillus plantarum* colonizing the intestine of gnobiotic rats. Clin. EXP. Immunol. 116: 283-290

- Higa, T. 1993. An earth saving revolution: A means to resolve our world's problem through Effective Microorganisms (EM), pp. 335 sunmark publishing Iinc., Tokyo, Japan.

- Higa, T. 2001. Effective microorganisms in the context of Kyusei nature farming: a technology for the future. In: Senanayake, Y.D.A., Sangakkara, U.R.(Eds.), Sixth international conference on Kyusei nature farming. pp. 40-43. Pretoria, South Africa

Ⅳ 종 보존 및 복원 기술개발보급

1. 버들치 인공종자 생산 연구

2. 미유기 인공종자 생산 연구

변화의 중심
기회의 경기

버들치 인공종자 생산 연구

김달영 · 송명화 · 권혁신 · 한정조 · 김봉현

서 론

버들치(*Rhynchocypris oxycephalus*)는 잉어목(Cypriniformes) 잉어과(Cyprinidae)에 속하는 민물고기로 몸길이 8~15cm이며 최대 20cm 가까이 자란다. 몸은 유선형이며 체고가 낮고 약간 옆으로 납작하다. 입수염이 없고, 꼬리지느러미가 약하게 파여 있으며, 몸은 작은 둥근비늘로 덮여 있다. 몸 빛깔은 지저분한 황갈색 바탕에 등 쪽은 암갈색, 배 쪽은 연한 색이다. 몸 한가운데는 윤곽이 뚜렷하지 않고 폭이 넓은 암갈색 세로띠가 있으며 앞쪽은 연하나 뒤쪽은 진하다. 이 세로띠는 일반적으로 버들개보다 연하다.

산간 계류의 찬물이나 강의 상류에 흔하게 살면서 수서곤충이나 갑각류, 실지렁이, 부착조류를 먹고 산다. 난은 구형으로 난막은 두껍고 접착성이 아주 크다. 산란기는 5~6월이다. 버들개와 비슷하나 비늘은 버들개에 비해 크고, 꼬리지느러미는 얕게 갈라진다. 세계적으로 아무르 유역에서 남쪽으로 양쯔강 유역에 이르는 태평양 측의 아시아 담수역에 비교적 넓게 분포한다. 우리나라는 서, 남해로 유입되는 하천의 상, 중류와 남부 동해안에 있는 하천에 분포한다(국립생물자원관, 2022).

국내 버들치에 관한 연구 자료는 버들치, 초기 생식소 발달 성분화에 관한 조직학적 연구(박, 1998), 한국산 버들치속 어류 두종의 난막구조(곽, 2007), 한국산 버들치의 지리적 형태변이 연구(권, 1981), 버들치 등근육에서 젖산탈수소 효소에 대한 온도의 영향(정, 1998) 등이 있고, 버들치 인공종자 생산에 관한 연구는 최근 지자체연구소(충북, 경북) 중심으로 시험연구를 시작하는 단계이다.

이에 경기도해양수산자원연구소에서도 하천 생태계에서 점차 사라져가는 버들치 인공종자생산 시험연구를 통한 종 보존 및 자원회복을 도모하고자 시험연구를 실시하게 되었으며, 금년에는 버들치 인공종자 생산을 위한 기초생산 연구를 수행하였다.

재료 및 방법

1. 시험어

시험어는 2021년 미유기 포획시 혼획되어 계속해서 배합사료를 공급하여 육성한 버들치로 주로 가평천과 흑천에 서식하는 개체들을 무작위로 선별하여 크기 8~10cm 총 200마리의 버들치 어미를 인공종자 생산 시험에 사용하였다.

2. 버들치 인공종자 생산 시험

선별한 버들치는 마취제 ms-222로 마취 후 Ovaprim 호르몬을 1cc 주사기를 이용하여 kg당 0.5mg의 농도로 선별한 모든 개체의 등근육에 주사하였으며, 호르몬 주사가 완료된 버들치는 배가부푼 개체는 암컷, 배가 부풀지 않은 개체는 수컷으로 간주하여 각각의 산란유도 사육지(사각수조 0.8×1m) 2개 수조에 암컷과 수컷을 따로 수용하여 채란 시까지 관리하였으며 이때 수온은18.0~19.0℃를 유지하였다. 호르몬 주사 후 20시간 후부터 암컷의 복부를 압박하여 채란 하였고 수컷의 복부도 압박하여 생식돌기를 따라 흘러나오는 정액을 수집하여 인공 수정하였다.

인공채란으로 확보된 수정란은 세란 후 병부화기에 수용하여 부화 시까지 관리하였으며 수온은 18.0~19.0℃ 내외로 유지하였다. 수정란은 수생균 오염을 방지하기 위해 수정 1일 후부터 부화 전까지 수산용 포르말린을 1000ppm/15분 농도로 매일 1회 처리하였다.

3. 버들치 자원조성 및 방류개체 유전자 분석

‘22년 생산한 버들치 치어 5천마리는 가평군 가평천 3개지점에 방류하였다. 방류지점의 선정은 적지선정을 위해 수질환경 및 서식어종 조사를 병행하여 선정하였다.(그림0). 또한 방류한 버들치 치어의 자연수계정착 확인 및 방류 효과 조사를 위해 방류개체중 100개체의 유전자 분석을 실시하였으며, 분석방법은 아래와 같다.

가. 게놈DNA 추출

1) 버들치 시료들의 가슴지느러미를 멸균 가위와 핀셋을 이용하여 적절한 크기로 잘라 1.5 ml 튜브에 넣는다.
2) AccuPrep® Genomic DNA Extraction Kit (바이오니아, 대전, 대한민국)의 사용자 설명서에 따라 게놈DNA를 추출한다.

3) 분광광도계(spectrophotometer) (DS-11, DeNovix Inc., Wilmington, DE USA)를 이용하여 추출된 게놈 DNA의 흡광도(A260/280)를 측정하여 그 농도와 순도를 확인한다.

4) TE 용액을 이용하여 게놈DNA 농도를 20 ng/μl로 희석하여 사용한다.

5) 사용 전까지 게놈DNA를 -20℃에서 보관한다.

나. PCR 증폭반응과 정제

버들치 시료들의 미토콘드리아 CO1 유전자 영역을 증폭하기 위해 AquaAmp™ Fish BOL Freshwater Kit (아쿠아진텍, 대한민국)의 사용자 설명서에 따라 아래와 같이 PCR 반응액을 만들었다.

Reagent	Amount	Cocktail (×100)
AquaAmp™ PCR Premix	20 μl	2,000 μl
Genomic DNA (20 ng/μl)	1 μl	100 μl
Sterile water	4 μl	400 μl
Total	25 μl	2,500 μl



그림 1.담수어류 미토콘드리아 CO1 유전자 영역 PCR 증폭전략 개념도.

PCR 증폭장치 ProFlex PCR System (Thermo Fisher Scientific, 미국)을 이용하여 아래와 같은 조건으로 PCR 증폭반응을 수행하였다. 그 결과 생성된 PCR 증폭산물은 AccuPrep® PCR Purification Kit (바이오니아, 대한민국)의 사용자 설명서를 참조하여 정제하였다.

Step	Temperature	Time	No. cycles
Initial denaturation	98℃	2 min	1
Denaturation	98℃	10 s	35
Annealing	55℃	15 s	
Elongation	68℃	90 s	
Final elongation	68℃	5 min	1
Storage	8℃	∞	1

다. DNA 염기서열 해독과 편집

정제된 PCR 증폭산물은 BigDye™ Terminator v3.1 Cycle Sequencing Kit (Thermo Fisher Scientific)과 DNA Analyzer 3730xl (Thermo Fisher Scientific)의 사용자 설명서에 따라 DNA 염기서열을 해독하였다. 이때 순방향과 역방향 프라이머와 결합된 어댑터를 cycle sequencing을 위한 프라이머로 사용하였다.

생성된 원본데이터는 BioEdit 7.2.5 (http://www.mbio.ncsu.edu/bioedit/ bioedit.html) (Biological Sequence Alignment Editor) (Hall 1999)를 이용하여 오류를 수정하고 불필요한 부분을 적절히 잘라낸 후, 콘티그(contig)를 완성하였다. 편집된 DNA 염기서열을 미국 국립생물정보센터(National Center for Biotechnology Information, NCBI)의 BLAST 검색 (http://blast.ncbi.nlm.nih.gov/)을 이용하여 GenBank 데이터베이스와 비교하였다.

라. 분자계통수 작성

편집이 완료된 DNA 염기서열을 미국 국립생물정보센터(National Center for Biotechnology Information, NCBI)의 BLAST 검색(http://blast.ncbi.nlm.nih.gov/)을 통해 GenBank 데이터베이스와 비교하였다. 또한, 해당종의 속(family)에 속하는 모든 종들의 DNA 염기서열 정보를 내려받았다. BioEdit 7.2.5의 Clustal W를 사용하여 이들을 정렬하고 DNA 염기서열 매트릭스를 작성하였다.

정렬된 DNA 염기서열 매트릭스를 대상으로 MEGA 7 (http://www.megasoftware.net/) (Kumar et al. 2006)을 이용하여 계통수를 작성하였다. 분석에 사용된 알고리즘은 근린접합법(Neighbor-Joining method)이었으며, 분석모델은 Kimura 2-parameter이었다. 부트스트래핑(bootstrapping)은 총 1,000회를 수행하여 각 분지의 지지도를 구하였다. 외그룹(outgroup)은 해당종이 속하는 속(genus)과 가장 가까운 속의 대표종을 사용한다.

결과 및 고찰

1. 서식지 환경 조사 및 시험어 확보

버들치 서식지 조사 및 채집은 경기도 관내인 가평과 양평 상류 계곡에서 4개 지점 총 4회 통발을 이용하여 실시하였다. 조사기간(2022.6.2.~ 7.27)동안 수온은 14.3 ~ 18.6℃, 용존산소는 9.52~11.34㎎/ℓ의 범위를 나타내었다.

2. 버들치 인공종자 생산

5월 9일 10시경 호르몬(Ovaprim)을 주사한 버들치 시험어는 24시간 후인 5월 10일 10시경 암컷의 복부를 압박하여 채란 하였고 수컷의 복부도 압박하여 생식돌기를 따라 흘러나오는 정액을 수집하여 인공 수정하였다. 인공종자 생산에 이용한 버들치는 약 200마리로 수컷은 5g 내외, 암컷은 10~25g 이였다. 채란한 버들치 알의 전체무게는 181.5g이였으며, 개수로 환산하면(1g당 250개) 46,250개의 수정란을 확보하였다. 버들치의 알은 점착성을 가진 점착란으로 부착력을 제거한 후 부화 시까지 병부화기에 수용하여 관리하였다. 이때 수온은 18.0~19.0℃ 내외로 유지하였고, 수정란의 수생균 오염을 방지하기 위해 수정 1일 후부터 부화 전까지 수산용 포르말린을 1000ppm/15분 농도로 매일 1회 처리하였다.

버들치 수정란은 수온 18.0~19.0℃내외에서 인공수정 5일 후인 5월15일에 부화하였으며, 5월18일경 난황을 완전히 흡수한 것을 확인하고 초기사료로 알테미아를 공급하였고 성장함에 실지렁이, 배합사료 순으로 공급하였다(표 1).

표 1. 성장단계 별 먹이 공급

수온(19℃전후)	수정란 ~ 부화 (난황흡수)	알테미아	실지렁이	배합사료
일(누적)	3	10	22	40일 이후
체장 (cm)	0.28~0.31	0.8~1.0	1.6~2.1	2.0cm이상

6월 7일경 1.3cm 전후로 성장한 버들치 치어는 종복원연구동 지름 6m의 수조 1개소로 이동수용하여 관리하였다. 버들치 치어의 성장도를 측정하기 위해 치어 15일령부터 65일령까지 측정당일 버들치 20마리를 10% 포르말린에 고정하여 측정하였으며, 그림 3에 나타내었다. 버들치 치어는 6월27일 평균크기 2.3,cm, 7월1일 평균크기 2.9,cm로 성장하여 7월20일 4.cm 전후로 성장하였다(그림 4, 5).

그림 4. 버들치 치어 성장사진

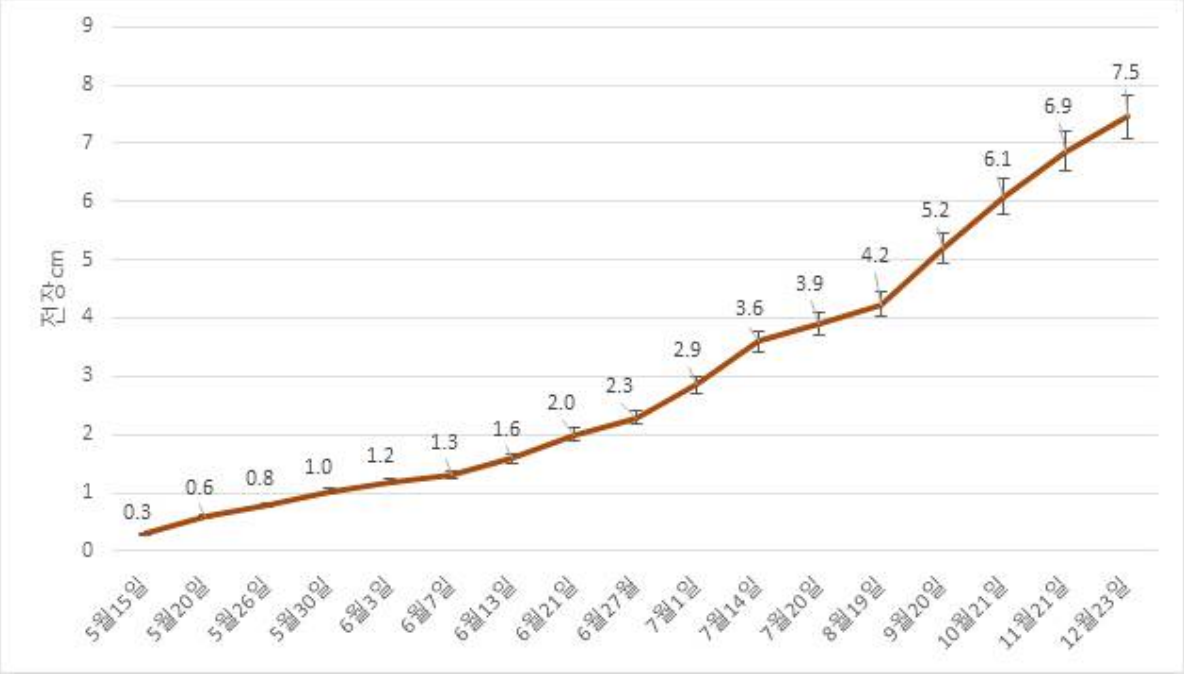


그림 5. 2022년 버들치 치어 성장그래프 (5월15일~12월23일)

3. 버들치 시험방류 및 방류개체 유전자분석

5월 9일 생산한 버들치 치어는 7월20일 평균크기 4cm전후로 성장하여 국립수산과학원 방류 협의 후 가평천 상류 일원 3개 지점 5천마리를 방류하였다(그림 6).



또한 '22년 방류한 버들치 치어의 방류 효과조사를 위한 유전자 분석을 하였으며, 결과는 아래와 같다.

가. 게놈 DNA 추출

버들치 시료들을 대상으로 게놈DNA를 추출하고 분광광도계를 이용하여 그 농도와 순도를 확인하였다.

표 2. 버들치 시료들에서 추출한 게놈DNA의 농도와 순도 (계속)

Sample no.	Sample name	Con. (ng/μl)	$A_{260/280}$
1	Rox-001	154.8	2.03
2	Rox-002	405.6	1.95
3	Rox-003	162.7	2.03
4	Rox-004	214.1	2.03
5	Rox-005	265.4	1.99
6	Rox-006	242.6	2.01
7	Rox-007	390.7	1.96
8	Rox-008	224.5	1.99
9	Rox-009	904.3	1.90
10	Rox-010	529.1	1.89
11	Rox-011	169.7	2.03
12	Rox-012	215.7	1.99
13	Rox-013	139.2	2.08
14	Rox-014	318.5	1.91
15	Rox-015	836.9	1.91
16	Rox-016	238.1	2.04
17	Rox-017	383.3	1.95
18	Rox-018	371.1	2.04
19	Rox-019	150.0	2.07
20	Rox-020	461.1	1.95
21	Rox-021	506.6	2.01
22	Rox-022	293.1	2.00
23	Rox-023	134.7	2.09
24	Rox-024	151.9	2.08
25	Rox-025	141.9	2.03

표 3. 버들치 시료들에서 추출한 게놈DNA의 농도와 순도 (계속)

Sample no.	Sample name	Con. (ng/μl)	$A_{260/280}$
26	Rox-026	166.1	2.08
27	Rox-027	122.8	2.08
28	Rox-028	136.0	2.07
29	Rox-029	143.6	2.07
30	Rox-030	159.9	2.07
31	Rox-031	155.7	2.07
32	Rox-032	188.1	2.09
33	Rox-033	155.3	2.09
34	Rox-034	180.9	2.08
35	Rox-035	207.1	2.09
36	Rox-036	219.4	2.08
37	Rox-037	267.7	2.02
38	Rox-038	175.4	2.06
39	Rox-039	172.6	2.04
40	Rox-040	376.0	1.94
41	Rox-041	214.7	2.08
42	Rox-042	161.5	2.08
43	Rox-043	443.7	2.04
44	Rox-044	150.7	2.11
45	Rox-045	235.8	2.11
46	Rox-046	171.3	2.11
47	Rox-047	179.3	2.09
48	Rox-048	225.0	2.11
49	Rox-049	169.2	2.09
50	Rox-050	259.0	2.09

표 4. 버들치 시료들에서 추출한 게놈DNA의 농도와 순도 (계속)

Sample no.	Sample name	Con. (ng/μl)	$A_{260/280}$
51	Rox-051	182.7	2.07
52	Rox-052	101.6	2.06
53	Rox-053	189.8	2.08
54	Rox-054	131.4	2.09
55	Rox-055	138.0	2.07
56	Rox-056	138.1	2.08
57	Rox-057	120.2	2.08
58	Rox-058	161.9	2.05
59	Rox-059	167.0	2.09
60	Rox-060	184.0	2.03
61	Rox-061	200.2	2.09
62	Rox-062	95.0	2.07
63	Rox-063	184.0	2.06
64	Rox-064	184.4	2.04
65	Rox-065	482.8	1.95
66	Rox-066	147.7	2.08
67	Rox-067	191.7	2.03
68	Rox-068	179.4	2.06
69	Rox-069	197.8	2.04
70	Rox-070	147.7	2.00
71	Rox-071	158.3	2.09
72	Rox-072	180.8	2.04
73	Rox-073	188.1	2.08
74	Rox-074	265.6	2.07
75	Rox-075	191.1	2.03

표 5. 버들치 시료들에서 추출한 게놈DNA의 농도와 순도 (계속)

Sample no.	Sample name	Con. (ng/μl)	$A_{260/280}$
76	Rox-076	175.6	2.09
77	Rox-077	246.3	2.08
78	Rox-078	164.6	2.08
79	Rox-079	178.3	2.06
80	Rox-080	157.4	2.09
81	Rox-081	230.9	2.09
82	Rox-082	101.4	2.10
83	Rox-083	160.0	2.10
84	Rox-084	122.4	2.11
85	Rox-085	109.5	2.07
86	Rox-086	300.6	1.94
87	Rox-087	109.8	2.06
88	Rox-088	190.3	2.07
89	Rox-089	174.7	2.04
90	Rox-090	183.4	2.05
91	Rox-091	159.0	2.07
92	Rox-092	193.6	1.96
93	Rox-093	435.0	1.94
94	Rox-094	156.1	2.07
95	Rox-095	96.1	2.09
96	Rox-096	210.8	2.07
97	Rox-097	146.0	2.07
98	Rox-098	134.7	2.06
99	Rox-099	180.7	2.09
100	Rox-100	211.3	2.08

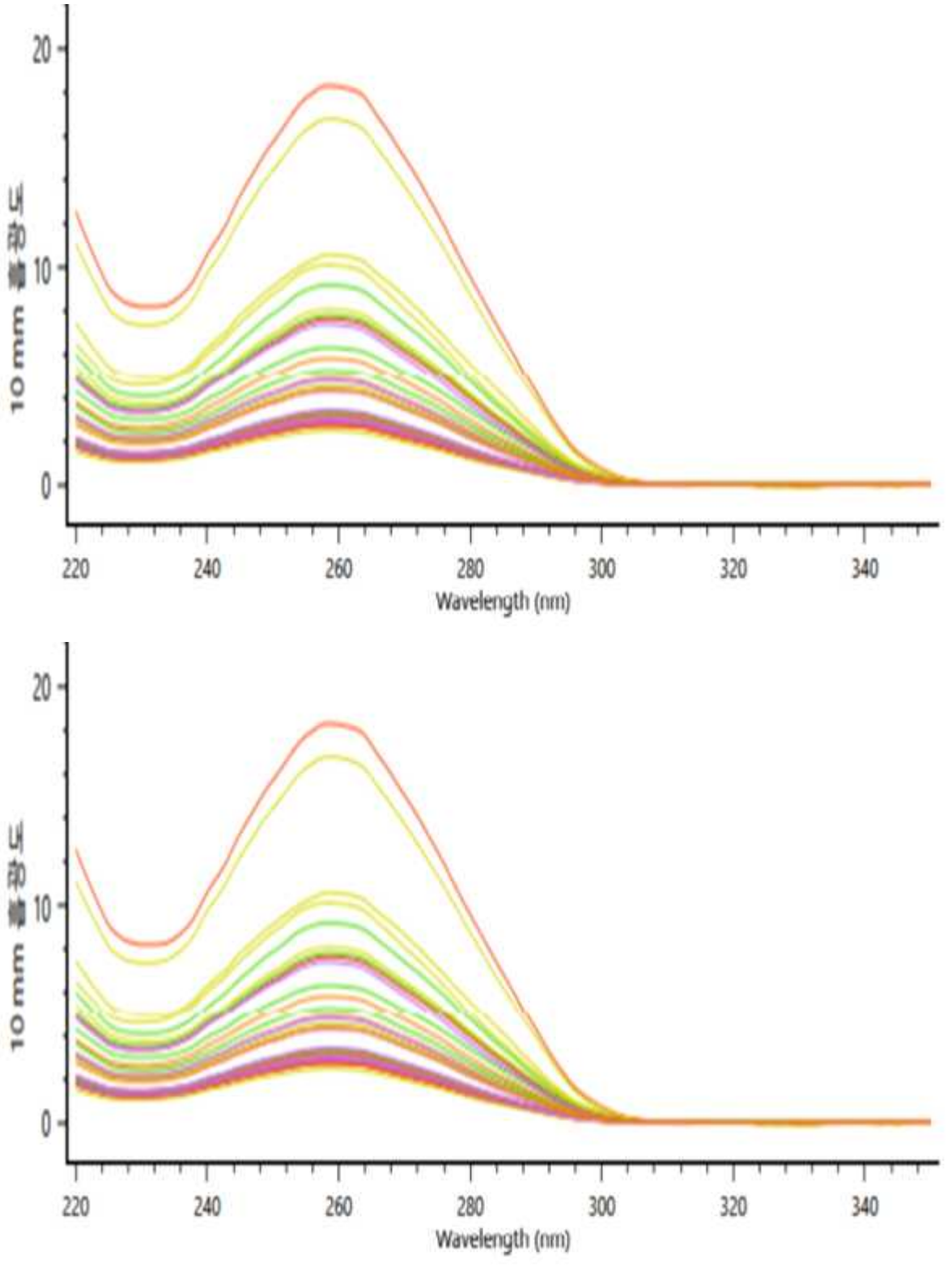


그림 7. 버들치 시료들에서 추출한 게놈DNA 농도와 순도를 보여주는 흡광도 그래프.

나. PCR 증폭반응

버들치 시료들을 대상으로 미토콘드리아 CO1 유전자 영역의 PCR 증폭반응을 수행하였다. 모든 시료에서 예상되는 크기의 PCR 증폭산물이 성공적으로 확인되었다.

그림 8. 버들치 미토콘드리아 CO1 유전자 영역의 PCR 증폭반응 전기영동 아가로즈겔 사진(계속)

그림 9. 버들치 미토콘드리아 CO1 유전자 영역의 PCR 증폭반응 전기영동 아가로즈겔 사진(계속)

그림 10. 버들치 미토콘드리아 CO1 유전자 영역의 PCR 증폭반응 전기영동 아가로즈겔 사진(계속)

다. DNA 염기서열 해독

버들치 시료들에서 미토콘드리아 CO1 유전자 영역의 DNA 염기서열이 모두 성공적으로 해독되었다.

>Rox-001
GTGGCAATTACACGCTGATTCTTTTCTACAAATCACAAAGACATTGGCACCCTTTATCTTGTATTTGGTGCCTGAGCCGGAATAGTGGGAAC
CGCTTTAAGCCTTCTCATTCGGGCTGAATTAAGTCAACCTGGGTCACTTCTAGGTGACGATCAAATTTATAACGTTATTGTTACTGCCCACG
CCTTCGTAATAATTTTCTTTATAGTAATACCAATTCTTATTGGAGGATTTGGAAACTGACTGGTGCCGTTAATGATCGGGGCACCTGACATG
GCATTTCCTCGAATAAACAACATGAGCTTCTGATTATTACCCCCATCATTCCTACTTTTACTAGCTTCTTCTGGTGTTGAGGCTGGGGCCGG
GACAGGATGAACAGTGTATCCGCCACTTGCAGGCAACCTCGCCCACGCAGGAGCATCCGTAGACCTAACAATTTTCTCGCTACATCTAGCAG
GCGTATCATCTATTTTAGGGGCAGTAAACTTTATTACTACAATTATTAATATGAAGCCCCCAGCTATCTCTCAGTATCAAACACCCTTATTT
GTATGATCCGTACTCGTGACAGCCGTCCTTCTCCTCCTGTCATTACCAGTTTTAGCTGCCGGAATTACAATACTTCTCACGGATCGTAATTT
AAATACTACATTCTTTGACCCAGCAGGTGGGGGAGACCCAATCTTATATCAACACTTATTCTGATTCTTTGGCCACCCAGAGGTCTATATTC
TTATTTTACCCGGCTTCGGTATTATTTCACACGTTGTAGCCTACTATTCCGGCAAAAAAGAACCATTCGGCTATATAGGAATAGTATGAGCT
ATGATGGCCATTGGCCTCCTTGGGTTTATTGTCTGAGCCCATCATATATTTACTGTCGGAATAGACGTAGACACCCGTGCCTATTTTACATC
CGCCACAATAATTATTGCCATTCCAACCGGCGTTAAGGTATTTAGCTGACTTGCCACACTTCATGGAGGCTCAATTAAATGAGAAACTCCAA
TACTATGGGCTCTAGGCTTTATCTTTCTTTTTACGGTCGGAGGACTAACAGGGATCGTTTTAGCTAATTCATCACTTGATATTGTGCTTCAT
GACACATATTACGTCGTTGCCCACTTCCACTATGTATTATCAATGGGCGCTGTATTTGCCATTATGGCAGCCTTCGTTCACTGATTCCCATT
ATTTTCGGGCTATACCTTAAATGATACTTGAACAAAAATTCATTTTGGGGTAATATTTATTGGTGTTAACCTTACATTCTTCCCTCAACATT
TCCTTGGCCTAGCGGGCATGCCACGTCGATACTCTGATTACCCCGACGCCTACACTCTATGAAATACAGTGTCATCTATTGGATCACTTATT
TCATTAGTGGCAGTAATTATGTTCCTATTTATTCTCTGGGAAGCCTTTGCTGCCAAACGAGAAGTATCCTCAGTAGAATTAACTACAACAAA
TGTAGAATGACTCCACGGCTGCCCTCCCCCATATCACACATTTGAGGAACCAGCATTTGTCCAAGTTCAATCAAACTAA

>Rox-002
GTGGCAATTACACGCTGATTCTTTTCTACAAATCACAAAGACATTGGCACCCTTTATCTTGTATTTGGTGCCTGAGCCGGAATAGTGGGAAC
CGCTTTAAGCCTTCTCATTCGGGCTGAATTAAGTCAACCTGGGTCACTTCTAGGTGACGATCAAATTTATAACGTCATTGTTACTGCCCACG
CCTTCGTAATAATTTTCTTTATAGTAATACCAATTCTTATTGGAGGATTTGGAAACTGACTGGTACCATTAATGATCGGGGCACCTGACATA
GCATTTCCTCGAATAAACAACATGAGCTTCTGATTATTGCCCCCATCATTCCTACTTTTACTAGCTTCTTCTGGTGTTGAGGCTGGAGCCGG
GACAGGGTGAACAGTATACCCGCCACTTGCAGGCAACCTCGCCCACGCAGGAGCATCCGTAGACCTAACAATTTTCTCGCTACATCTAGCAG
GCGTATCATCTATTTTAGGGGCAGTAAACTTTATTACTACAATTATTAATATAAAACCCCCAGCTATCTCACAATATCAAACACCCCTATTT
GTGTGATCCGTACTCGTGACAGCCGTCCTTCTCCTCCTGTCATTACCAGTTTTAGCTGCCGGAATTACAATGCTTCTCACGGACCGTAATTT
AAATACTACATTCTTTGACCCAGCAGGTGGAGGAGACCCAATCTTATACCAACACTTATTCTGATTCTTTGGCCACCCAGAAGTCTATATTC
TCATCTTACCTGGCTTCGGTATTATTTCACACGTTGTAGCTTACTATTCCGGCAAAAAAGAACCATTCGGCTATATAGGAATAGTATGAGCT
ATGATGGCCATTGGTCTTCTTGGGTTCATTGTCTGAGCCCATCATATGTTCACTGTCGGAATAGACGTAGACACCCGTGCCTATTTCACATC
CGCCACAATAATTATTGCCATTCCAACCGGCGTTAAGGTATTTAGCTGACTTGCCACACTTCATGGGGGATCAATTAAATGAGAAACTCCAA
TACTATGAGCTCTAGGTTTTATCTTTCTTTTTACGGTCGGAGGGCTAACAGGGATCGTTTTAGCTAATTCATCACTTGATATTGTGCTTCAT
GACACATACTACGTTGTTGCCCACTTCCATTATGTATTATCAATGGGTGCTGTATTTGCCATTATGGCAGCCTTCGTTCACTGATTCCCACT
ATTTTCGGGCTACACCTTAAATGATACCTGAACAAAAATTCATTTTGGGGTAATATTTATTGGTGTTAACCTTACATTCTTCCCTCAACATT
TCCTTGGTCTAGCGGGCATGCCACGTCGATACTCTGACTACCCCGACGCCTACACCCTGTGAAATACAGTATCGTCTATTGGATCACTTATT
TCATTAGTAGCAGTAATTATATTCCTATTTATTCTCTGGGAAGCCTTTGCTGCCAAACGAGAAGTATCCTCAGTAGAATTAACTACAACAAA
TGTAGAATGACTCCACGGCTGCCCTCCCCCATATCACACATTTGAGGAACCAGCATTTGTTCAAGTTCAATCAAACTAA
>Rox-003
GTGGCAATTACACGCTGATTCTTTTCTACAAATCACAAAGACATTGGCACCCTTTATCTTGTATTTGGTGCCTGAGCCGGAATAGTGGGAAC
CGCTTTAAGCCTTCTCATTCGGGCTGAATTAAGTCAACCTGGGTCACTTCTAGGTGACGATCAAATTTATAACGTCATTGTTACTGCCCACG
CCTTCGTAATAATTTTCTTTATAGTAATACCAATTCTTATTGGAGGATTTGGAAACTGACTGGTACCATTAATGATCGGGGCACCTGACATA
GCATTTCCTCGAATAAACAACATGAGCTTCTGATTATTACCCCCGTCATTCCTACTTTTACTAGCTTCTTCTGGTGTTGAGGCTGGAGCCGG
GACAGGATGAACAGTGTACCCGCCACTTGCAGGCAACCTCGCCCACGCAGGCGCATCCGTAGACCTAACAATTTTCTCGCTACATCTAGCAG
GCGTATCATCTATTTTAGGGGCAGTAAACTTTATTACTACAATTATTAATATAAAACCCCCAGCTATCTCTCAATATCAAACACCCCTATTT
GTGTGATCCGTACTCGTGACAGCCGTCCTTCTCCTCCTGTCATTACCAGTTTTAGCTGCCGGAATTACAATGCTTCTCACGGACCGTAATTT
AAATACTACATTCTTTGACCCGGCAGGTGGAGGAGACCCAATCTTATACCAACACTTATTCTGATTCTTTGGCCACCCAGAAGTCTATATTC
TCATTTTACCTGGCTTCGGTATTATTTCACACGTTGTAGCTTACTATTCCGGCAAAAAAGAGCCATTCGGCTATATAGGAATAGTATGAGCT
ATGATGGCCATTGGTCTTCTTGGGTTCATTGTCTGAGCCCATCATATATTCACTGTCGGAATAGACGTAGACACCCGTGCCTATTTCACATC
CGCCACAATAATTATTGCCATTCCAACCGGCGTTAAGGTATTTAGCTGACTTGCCACGCTTCACGGGGGATCAATTAAATGAGAAACTCCAA
TGCTATGAGCTCTAGGTTTTATTTTCTTTTTACGGTCGGGGGACTAACAGGGATCGTTTTAGCTAATTCATCACTTGATATTGTGCTTCAT
GACACATACTACGTTGTTGCCCACTTCCATTATGTATTATCAATGGGTGCTGTATTTGCCATTATGGCAGCCTTCGTTCACTGATTCCCACT
ATTTTCGGGCTACACCTTAAATGATACCTGAACAAAAATTCATTTCGGGGTAATATTTATTGGTGTTAACCTTACGTTCTTCCCTCAACATT
TCCTTGGCTTAGCGGGCATGCCACGTCGATACTCTGACTACCCCGACGCCTACACCCTATGAAATACAGTATCATCTATTGGATCACTTATT
TCATTAGTAGCAGTAATTATATTCCTATTTATTCTCTGGGAAGCCTTTGCTGCCAAACGAGAAGTATCCTCAGTAGAACTAACTACAACAAA
TGTAGAATGACTCCACGGCTGCCCTCCCCCATATCACACATTTGAGGAACCAGCATTTGTTCAAGTTCAATCAAACTAA
>Rox-004
GTGGCAATTACACGCTGATTCTTTTCTACAAATCACAAAGACATTGGCACCCTTTATCTTGTATTTGGTGCCTGAGCCGGAATAGTGGGAAC
CGCTTTAAGCCTTCTCATTCGGGCTGAATTAAGTCAACCTGGGTCACTTCTAGGTGACGATCAAATTTATAACGTTATTGTTACTGCCCACG
CCTTCGTAATAATTTTCTTTATAGTAATGCCAATTCTTATTGGAGGATTTGGAAACTGACTGGTGCCGTTAATGATCGGGGCACCTGACATA
GCATTTCCTCGAATAAACAACATGAGCTTCTGATTATTACCCCCATCATTCCTACTTTTACTAGCTTCTTCTGGTGTTGAGGCTGGAGCCGG
GACAGGATGAACAGTGTATCCGCCACTTGCAGGCAACCTCGCCCACGCAGGAGCATCCGTAGACCTAACAATTTTCTCGCTACATCTAGCAG
GCGTATCATCTATTTTAGGGGCAGTAAACTTTATTACTACAATTATTAATATGAAGCCCCCAGCTATTTCTCAGTATCAAACACCCTTATTT
GTATGATCCGTACTCGTGACAGCCGTCCTTCTCCTCCTGTCACTACCAGTCTTAGCTGCCGGAATTACAATACTTCTCACGGATCGTAATTT
AAATACTACATTCTTTGACCCAGCAGGTGGGGGAGACCCAATCTTATATCAACACTTATTCTGATTCTTTGGCCACCCAGAAGTCTATATTC
TCATTTTACCCGGCTTCGGTATTATTTCACACGTTGTAGCCTACTATTCCGGCAAAAAAGAACCATTCGGCTATATAGGAATAGTATGAGCT
ATGATGGCCATTGGCCTCCTTGGGTTTATTGTCTGAGCCCATCATATATTCACTGTCGGAATAGACGTAGACACCCGTGCCTATTTCACATC
CGCCACAATAATTATTGCCATTCCAACCGGCGTTAAAGTATTTAGCTGACTTGCCACACTTCATGGGGGCTCAATTAAATGAGAAACTCCAA
TACTATGAGCTCTAGGCTTTATCTTTCTTTTTACAGTCGGAGGACTAACAGGGATCGTTTTAGCTAATTCATCACTTGATATTGTGCTTCAT
GACACATATTACGTCGTTGCCCACTTCCACTATGTATTATCAATGGGCGCTGTATTTGCCATTATGGCAGCCTTTGTTCACTGATTCCCACT
ATTTTCAGGCTATACCTTAAATGATACTTGAACAAAAATTCATTTTGGGGTAATATTTATTGGTGTTAACCTTACATTCTTCCCTCAACATT
TCCTTGGCCTAGCGGGCATGCCACGTCGATACTCTGATTACCCCGACGCCTACACTCTATGAAATACAGTGTCATCTATTGGATCACTTATT
TCATTAGTGGCAGTAATTATGTTCCTATTTATTCTCTGGGAAGCCTTTGCCGCCAAACGAGAAGTATCCTCAGTAGAATTAACTACAACAAA
TGTAGAATGACTCCACGGCTGCCCTCCCCCATATCACACATTTGAGGAACCAGCATTTGTCCAAGTTCAATCAAACTAA

>Rox-005
GTGGCAATTACACGCTGATTCTTTTCTACAAATCACAAAGACATTGGCACCCTTTATCTTGTATTTGGTGCCTGAGCCGGAATAGTGGGAAC
CGCTTTAAGCCTCCTCATTCGGGCTGAATTAAGTCAACCTGGATCACTTCTAGGTGACGATCAAATTTATAACGTCATTGTTACTGCCCACG
CCTTCGTAATAATTTTCTTTATAGTAATACCAATTCTTATTGGAGGATTTGGAAACTGACTGGTACCATTAATGATCGGGGCACCTGACATA
GCATTTCCTCGAATAAACAACATGAGCTTCTGATTATTACCCCCATCATTCCTACTTTTACTAGCTTCTTCTGGTGTTGAGGCTGGAGCCGG
GACAGGATGAACAGTGTACCCGCCACTTGCAGGCAACCTCGCCCACGCAGGCGCATCCGTAGACCTAACAATTTTCTCGCTACATCTAGCAG
GCGTATCATCTATTTTAGGGGCAGTAAACTTTATTACTACAATTATTAATATAAAACCCCCAGCTATCTCTCAATATCAAACACCCCTATTT
GTGTGATCCGTACTCGTGACAGCCGTCCTTCTCCTCCTGTCATTACCAGTTTTAGCTGCCGGAATTACAATGCTTCTCACGGACCGTAATTT
AAATACCACATTCTTTGACCCGGCAGGTGGAGGAGACCCAATCTTATACCAACACTTATTCTGATTCTTTGGCCACCCAGAAGTCTATATTC
TCATTTTACCTGGCTTCGGTATTATTTCACACGTTGTAGCTTACTATTCCGGCAAAAAAGAGCCATTCGGCTATATAGGAATAGTATGAGCT
ATGATGGCCATTGGTCTTCTTGGGTTCATTGTCTGAGCCCATCATATATTCACTGTCGGAATAGACGTAGACACCCGTGCCTATTTCACATC
CGCCACAATAATTATTGCCATTCCAACCGGCGTTAAGGTATTTAGCTGACTTGCCACGCTTCACGGGGGATCAATTAAATGAGAAACTCCAA
TGCTATGAGCTCTAGGTTTTATTTTTCTTTTTACGGTCGGAGGACTAACAGGGATCGTTTTAGCTAATTCATCACTTGATATTGTGCTTCAT
GACACATACTACGTTGTTGCCCACTTCCATTATGTATTATCAATGGGTGCTGTATTTGCCATTATGGCAGCCTTCGTTCACTGATTCCCACT
ATTTTCGGGCTACACCTTAAATGATACCTGAACAAAAATTCATTTCGGGGTAATATTTATTGGTGTTAACCTTACGTTCTTCCCTCAACATT
TCCTTGGCTTAGCGGGCATGCCACGTCGATACTCTGACTACCCCGACGCCTACACCCTATGAAATACAGTATCATCTATTGGATCACTTATT
TCATTAGTAGCAGTAATTATATTCCTATTTATTCTCTGGGAAGCCTTTGCTGCCAAACGAGAAGTATCCTCAGTAGAACTAACTACAACAAA
TGTAGAATGACTCCACGGCTGCCCTCCCCCATATCACACATTTGAGGAACCAGCATTTGTTCAAGTTCAATCAAACTAA
>Rox-006
GTGGCAATTACACGCTGATTCTTTTCTACAAATCACAAAGACATTGGCACCCTTTATCTTGTATTTGGTGCCTGAGCCGGAATAGTGGGAAC
CGCTTTAAGCCTTCTCATTCGGGCTGAATTAAGTCAACCTGGATCACTTCTAGGTGACGATCAAATTTATAACGTCATTGTTACTGCCCACG
CCTTCGTAATAATTTTCTTTATAGTAATACCAATTCTTATTGGAGGATTTGGAAACTGACTGGTACCATTAATGATCGGGGCACCTGACATA
GCATTTCCTCGAATAAACAACATGAGCTTCTGATTATTACCCCCATCATTCCTACTTTTACTAGCTTCTTCTGGTGTTGAGGCTGGAGCCGG
GACAGGATGAACAGTGTACCCGCCACTTGCAGGCAACCTCGCCCACGCAGGCGCATCCGTAGACCTAACAATTTTCTCGCTACATCTAGCAG
GCGTATCATCTATTTTAGGGGCAGTAAACTTTATTACTACAATTATTAATATAAAACCCCCAGCTATCTCTCAATATCAAACACCCCTATTT
GTGTGATCCGTACTCGTGACAGCCGTCCTTCTCCTCCTGTCATTACCAGTTTTAGCTGCCGGAATTACAATGCTTCTCACGGACCGTAATTT
AAATACCACATTCTTTGACCCGGCAGGTGGAGGAGACCCAATCTTATACCAACACTTATTCTGATTCTTTGGCCACCCAGAAGTCTATATTC
TCATTTTACCTGGCTTCGGTATTATTTCACACGTTGTAGCTTACTATTCCGGCAAAAAAGAGCCATTCGGCTATATAGGAATAGTATGAGCT
ATGATGGCCATTGGTCTTCTTGGGTTCATTGTCTGAGCCCATCATATATTCACTGTCGGAATAGACGTAGACACCCGTGCCTATTTCACATC
CGCCACAATAATTATTGCCATTCCAACCGGCGTTAAGGTATTTAGCTGACTTGCCACGCTTCACGGGGGATCAATTAAATGAGAAACTCCAA
TGCTATGAGCTCTAGGTTTTATTTTTCTTTTTACGGTCGGAGGACTAACAGGGATCGTTTTAGCTAATTCATCACTTGATATTGTGCTTCAT
GACACATACTACGTTGTTGCCCACTTCCATTATGTATTATCAATGGGTGCTGTATTTGCCATTATGGCAGCCTTCGTTCACTGATTCCCACT
ATTTTCGGGCTACACCTTAAATGATACCTGAACAAAAATTCATTTCGGGGTAATATTTATTGGTGTTAACCTTACGTTCTTCCCTCAACATT
TCCTTGGCTTAGCGGGCATGCCACGTCGATACTCTGACTACCCCGACGCCTACACCCTATGAAATACAGTATCATCTATTGGATCACTTATT
TCATTAGTAGCAGTAATTATATTCCTATTTATTCTCTGGGAAGCCTTTGCTGCCAAACGAGAAGTATCCTCAGTAGAACTAACTACAACAAA
TGTAGAATGACTCCACGGCTGCCCTCCCCCATATCACACATTTGAGGAACCAGCATTTGTTCAAGTTCAATCAAACTAA
>Rox-007
GTGGCAATTACACGCTGATTCTTTTCTACAAATCACAAAGACATTGGCACCCTTTATCTTGTATTTGGTGCCTGAGCCGGAATAGTGGGAAC
CGCTTTAAGCCTTCTCATTCGGGCTGAATTAAGTCAACCTGGGTCACTTCTAGGTGACGATCAAATTTATAACGTTATTGTTACTGCCCACG
CCTTCGTAATAATTTTCTTTATAGTAATACCAATTCTTATTGGAGGATTTGGAAACTGACTGGTGCCGTTAATGATCGGGGCACCTGACATG
GCATTTCCTCGAATAAACAACATGAGCTTCTGATTATTACCCCCATCATTCCTACTTTTACTAGCTTCTTCTGGTGTTGAGGCTGGGGCCGG
GACAGGATGAACAGTGTATCCGCCACTTGCAGGCAACCTCGCCCACGCAGGAGCATCCGTAGACCTAACAATTTTCTCGCTACATCTAGCAG
GCGTATCATCTATTTTAGGGGCAGTAAACTTTATTACTACAATTATTAATATGAAGCCCCCAGCTATCTCTCAGTATCAAACACCCTTATTT
GTATGATCCGTACTCGTGACAGCCGTCCTTCTCCTCCTGTCATTACCAGTTTTAGCTGCCGGAATTACAATACTTCTCACGGATCGTAATTT
AAATACTACATTCTTTGACCCAGCAGGTGGGGGAGACCCAATCTTATATCAACACTTATTCTGATTCTTTGGCCACCCAGAGGTCTATATTC
TTATTTTACCCGGCTTCGGTATTATTTCACACGTTGTAGCCTACTATTCCGGCAAAAAAGAACCATTCGGCTATATAGGAATAGTATGAGCT
ATGATGGCCATTGGCCTCCTTGGGTTTATTGTCTGAGCCCATCATATATTTACTGTCGGAATAGACGTAGACACCCGTGCCTATTTTACATC
CGCCACAATAATTATTGCCATTCCAACCGGCGTTAAGGTATTTAGCTGACTTGCCACACTTCATGGAGGCTCAATTAAATGAGAAACTCCAA
TACTATGAGCTCTAGGCTTTATCTTTCTTTTTACGGTCGGAGGACTAACAGGGATCGTTTTAGCTAATTCATCACTTGATATTGTGCTTCAT
GACACATATTACGTCGTTGCCCACTTCCACTATGTATTATCAATGGGCGCTGTATTTGCCATTATGGCAGCCTTCGTTCACTGATTCCCATT
ATTTTCGGGCTATACCTTAAATGATACTTGAACAAAAATTCATTTTGGGGTAATATTTATTGGTGTTAACCTTACATTCTTCCCTCAACATT
TCCTTGGCCTAGCGGGCATGCCACGTCGATACTCTGATTACCCCGACGCCTACACTCTATGAAATACAGTGTCATCTATTGGATCACTTATT
TCATTAGTGGCAGTAATTATGTTCCTATTTATTCTCTGGGAAGCCTTTGCTGCCAAACGAGAAGTATCCTCAGTAGAATTAACTACAACAAA
TGTAGAATGACTCCACGGCTGCCCTCCCCCATATCACACATTTGAGGAACCAGCATTTGTCCAAGTTCAATCAAACTAA

>Rox-008
GTGGCAATTACACGCTGATTCTTTTCTACAAATCACAAAGACATTGGCACCCTTTATCTTGTATTTGGTGCCTGAGCCGGAATAGTGGGAAC
CGCTTTAAGCCTTCTCATTCGGGCTGAATTAAGTCAACCTGGGTCACTTCTAGGTGACGATCAAATTTATAACGTCATTGTCACTGCCCACG
CCTTCGTAATAATTTTCTTTATAGTAATACCAATTCTTATTGGAGGATTTGGAAACTGACTAGTACCATTAATGATCGGGGCACCTGACATA
GCATTTCCTCGAATAAACAACATGAGCTTCTGATTATTACCCCCATCATTCCTACTTTTACTAGCTTCTTCTGGTGTTGAGGCTGGAGCCGG
GACAGGGTGAACAGTATACCCGCCACTTGCAGGCAACCTCGCCCACGCAGGAGCATCCGTAGACCTAACAATTTTCTCGCTACATCTAGCAG
GCGTATCATCTATTTTAGGGGCAGTAAACTTTATTACTACAATTATTAATATAAAACCCCCAGCTATCTCACAATATCAAACACCCCTATTT
GTGTGATCCGTACTCGTGACAGCCGTCCTTCTCCTCCTGTCATTACCAGTTTTAGCTGCCGGAATTACAATGCTTCTCACGGACCGTAATTT
AAATACTACATTCTTTGACCCAGCAGGTGGAGGAGACCCAATCTTATACCAACACTTATTCTGATTCTTTGGCCACCCAGAAGTCTATATTC
TCATCTTACCTGGCTTCGGTATTATTTCACACGTTGTAGCTTACTATTCCGGCAAAAAAGAACCATTCGGCTATATAGGAATAGTATGAGCT
ATGATGGCCATTGGTCTTCTTGGGTTCATTGTCTGAGCCCATCATATGTTCACTGTCGGAATAGACGTAGACACCCGTGCCTATTTCACATC
CGCCACAATAATTATTGCCATTCCAACCGGCGTTAAGGTATTTAGCTGACTTGCCACACTTCATGGGGGATCAATTAAATGAGAAACTCCAA
TACTATGAGCTCTAGGTTTTATCTTTCTTTTTACGGTCGGAGGGCTAACAGGGATCGTTTTAGCTAATTCATCACTTGATATTGTGCTTCAT
GACACATACTACGTTGTTGCCCACTTCCATTATGTATTATCAATGGGTGCTGTATTTGCCATTATGGCAGCCTTCGTTCACTGATTCCCACT
ATTTTCGGGCTACACCTTAAATGATACCTGAACAAAAATTCATTTTGGGGTAATATTTATTGGTGTTAACCTTACATTCTTCCCTCAACATT
TCCTTGGTCTAGCGGGCATGCCACGTCGATACTCTGACTACCCCGACGCCTACACCCTGTGAAATACAGTATCGTCTATTGGATCACTTATT
TCATTAGTAGCAGTAATTATATTCCTATTTATTCTCTGGGAAGCCTTTGCTGCCAAACGAGAAGTATCCTCAGTAGAATTAACTACAACAAA
TGTAGAATGACTCCACGGCTGCCCTCCCCCATATCACACATTTGAGGAACCAGCATTTGTTCAAGTTCAATCAAACTAA
>Rox-009
GTGGCAATTACACGCTGATTCTTTTCTACAAATCACAAAGACATTGGCACCCTTTATCTTGTATTTGGTGCCTGAGCCGGAATAGTGGGAAC
CGCTTTAAGCCTTCTCATTCGGGCTGAATTAAGTCAACCTGGGTCACTTCTAGGTGACGATCAAATTTATAACGTCATTGTTACTGCCCACG
CCTTCGTAATAATTTTCTTTATAGTAATACCAATTCTTATTGGAGGATTTGGAAACTGACTGGTACCATTAATGATCGGGGCACCTGACATA
GCATTTCCTCGAATAAACAACATGAGCTTCTGATTATTGCCCCCATCATTCCTACTTTTACTAGCTTCTTCTGGTGTTGAGGCTGGAGCCGG
GACAGGGTGAACAGTATACCCGCCACTTGCAGGCAACCTCGCCCACGCAGGAGCATCCGTAGACCTAACAATTTTCTCGCTACATCTAGCAG
GCGTATCATCTATTTTAGGGGCAGTAAACTTTATTACTACAATTATTAATATAAAACCCCCAGCTATCTCACAATATCAAACACCCCTATTT
GTGTGATCCGTACTCGTGACAGCCGTCCTTCTCCTCCTGTCATTACCAGTTTTAGCTGCCGGAATTACAATGCTTCTCACGGACCGTAATTT
AAATACTACATTCTTTGACCCAGCAGGTGGAGGAGACCCAATCTTATACCAACACTTATTCTGATTCTTTGGCCACCCAGAAGTCTATATTC
TCATCTTACCTGGCTTCGGTATTATTTCACACGTTGTAGCTTACTATTCCGGCAAAAAAGAACCATTCGGCTATATAGGAATAGTATGAGCT
ATGATGGCCATTGGTCTTCTTGGGTTCATTGTCTGAGCCCATCATATGTTCACTGTCGGAATAGACGTAGACACCCGTGCCTATTTCACATC
CGCCACAATAATTATTGCCATTCCAACCGGCGTTAAGGTATTTAGCTGACTTGCCACACTTCATGGGGGATCAATTAAATGAGAAACTCCAA
TACTATGAGCTCTAGGTTTTATCTTTCTTTTTACGGTCGGAGGGCTAACAGGGATCGTTTTAGCTAATTCATCACTTGATATTGTGCTTCAT
GACACATACTACGTTGTTGCCCACTTCCATTATGTATTATCAATGGGTGCTGTATTTGCCATTATGGCAGCCTTCGTTCACTGATTCCCACT
ATTTTCGGGCTACACCTTAAATGATACCTGAACAAAAATTCATTTTGGGGTAATATTTATTGGTGTTAACCTTACATTCTTCCCTCAACATT
TCCTTGGTCTAGCGGGCATGCCACGTCGATACTCTGACTACCCCGACGCCTACACCCTGTGAAATACAGTATCGTCTATTGGATCACTTATT
TCATTAGTAGCAGTAATTATATTCCTATTTATTCTCTGGGAAGCCTTTGCTGCCAAACGAGAAGTATCCTCAGTAGAATTAACTACAACAAA
TGTAGAATGACTCCACGGCTGCCCTCCCCCATATCACACATTTGAGGAACCAGCATTTGTTCAAGTTCAATCAAACTAA
>Rox-010
GTGGCAATTACACGCTGATTCTTTTCTACAAATCACAAAGACATTGGCACCCTTTATCTTGTATTTGGTGCCTGAGCCGGAATAGTGGGAAC
CGCTTTAAGCCTTCTCATTCGGGCTGAATTAAGTCAACCTGGGTCACTTCTAGGTGACGATCAAATTTATAACGTCATTGTTACTGCCCACG
CCTTCGTAATAATTTTCTTTATAGTAATACCAATTCTTATTGGAGGATTTGGAAACTGACTGGTACCATTAATGATCGGGGCACCTGACATA
GCATTTCCTCGAATAAACAACATGAGCTTCTGATTATTACCCCCGTCATTCCTACTTTTACTAGCTTCTTCTGGTGTTGAGGCTGGAGCCGG
GACAGGATGAACAGTGTACCCGCCACTTGCAGGCAACCTCGCCCACGCAGGCGCATCCGTAGACCTAACAATTTTCTCGCTACATCTAGCAG
GCGTATCATCTATTTTAGGGGCAGTAAACTTTATTACTACAATTATTAATATAAAACCCCCAGCTATCTCTCAATATCAAACACCCCTATTT
GTGTGATCCGTACTCGTGACAGCCGTCCTTCTCCTCCTGTCATTACCAGTTTTAGCTGCCGGAATTACAATGCTTCTCACGGACCGTAATTT
AAATACTACATTCTTTGACCCGGCAGGTGGAGGAGACCCAATCTTATACCAACACTTATTCTGATTCTTTGGCCACCCAGAAGTCTATATTC
TCATTTTACCTGGCTTCGGTATTATTTCACACGTTGTAGCTTACTATTCCGGCAAAAAAGAGCCATTCGGCTATATAGGAATAGTATGAGCT
ATGATGGCCATTGGTCTTCTTGGGTTCATTGTCTGAGCCCATCATATATTCACTGTCGGAATAGACGTAGACACCCGTGCCTATTTCACATC
CGCCACAATAATTATTGCCATTCCAACCGGCGTTAAGGTATTTAGCTGACTTGCCACGCTTCACGGGGGATCAATTAAATGAGAAACTCCAA
TGCTATGAGCTCTAGGTTTTATTTTTCTTTTTACGGTCGGGGGACTAACAGGGATCGTTTTAGCTAATTCATCACTTGATATTGTGCTTCAT
GACACATACTACGTTGTTGCCCACTTCCATTATGTATTATCAATGGGTGCTGTATTTGCCATTATGGCAGCCTTCGTTCACTGATTCCCACT
ATTTTCGGGCTACACCTTAAATGATACCTGAACAAAAATTCATTTCGGGGTAATATTTATTGGTGTTAACCTTACGTTCTTCCCTCAACATT
TCCTTGGCTTAGCGGGCATGCCACGTCGATACTCTGACTACCCCGACGCCTACACCCTATGAAATACAGTATCATCTATTGGATCACTTATT
TCATTAGTAGCAGTAATTATATTCCTATTTATTCTCTGGGAAGCCTTTGCTGCCAAACGAGAAGTATCCTCAGTAGAACTAACTACAACAAA
TGTAGAATGACTCCACGGCTGCCCTCCCCCATATCACACATTTGAGGAACCAGCATTTGTTCAAGTTCAATCAAACTAA

버들치 미토콘드리아 CO1 유전자 영역의 DNA 염기서열 Rox-011 ~ Rox-100는 본 보고서에는 기재하지 않았고 연구소와 아쿠아진텍(주) DB에 등록되어있어‘23년에는 ’22년에 방류된 버들치 개체 포획하여 자연수계에 잘 정착하여 생존하였는지에 대한 확인이 가능할 것으로 사료된다.

라. 분자계통수 작성

NCBI의 GenBank 데이터베이스에 등록된 Phoxinus속과 Rhynchocypris속에 속하는 종들의 미토콘드리아 CO1 유전자 영역의 DNA 염기서열과 경기도 수역에서 채집된 버들치 표본들의 DNA 염기서열, 이번 연구에서 새롭되 해독되었던 버들치 시료들의 DNA 염기서열을 바탕으로 근린접합 분자계통수를 작성하였다.

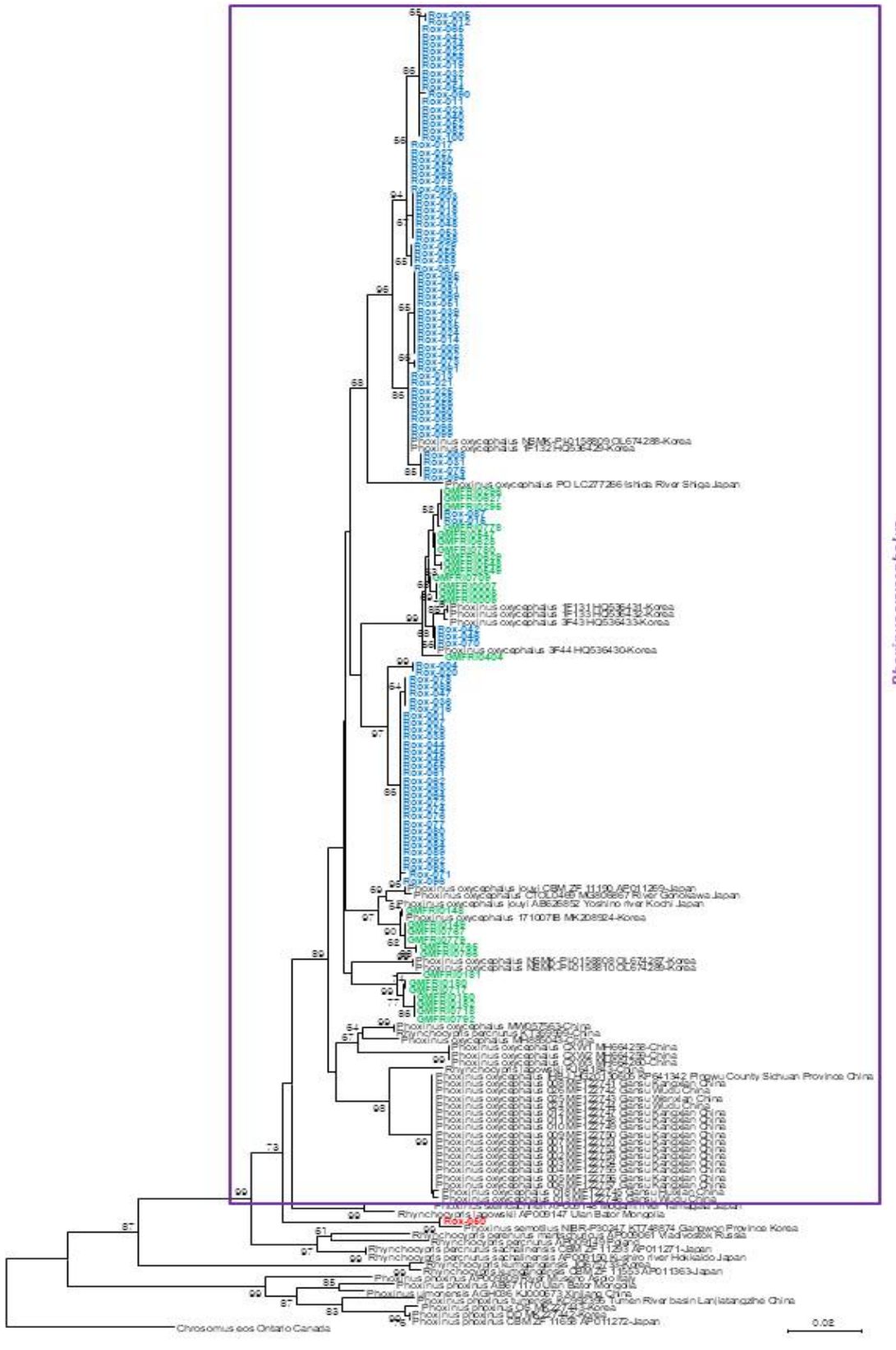


그림 11. 버들치 미토콘드리아 CO1 유전자 영역에 근거하여 작성된 근린접합 분자계통수

참 고 문 헌

- 최기철, 전상린, 김익수, 손영목. 2002. 원색한국담수어도감. 향문사, 서울. p138~139.
- 곽진영, 2007. 한국산 버들치속 어류 도종의 난막구조. 전북대학교 석사논문.
- 권오현, 1981. 한국산 버들치의 지리적 형태변이에 대하여. 건국대학교 석사논문.
- 정준형, 1988. 버들치 등근육에서 젖산탈수소 효소에 대한 온도의 영향. 전남대학교 박사논문.
- 박재민, 2021. 버들치 양식연구. 2021년도 시험연구사업보고서. 경상북도 토속어류관 상어산업화센터.
- 국립생물자원관,“버들치”, www.nibr.go.kr, 2022.
- 박인석, 김정혜, 방인철, 김동수, 1998. 버들치, *Rhynchocypris oxycephalus* 초기 생식소 발달과 성분화에 관한 조직학적 연구. Dev Reprod. Vol. 2, No. 1, 69~74

미유기 인공종자 생산 연구

김달영 · 송명화 · 권혁신 · 한정조 · 김봉현

서 론

분류학적으로 미유기(*Silurus microdoraslis*)는 메기목(Siluriform) 메기과(Siluridae)에 속하는 담수어로 몸의 형태는 메기와 비슷하나 크기가 작다. 한국 고유종이며 국외 반출 승인 대상 생물자원으로 한국의 멸종위기 야생동식물 적색자료집의 관심 대상 종에 속해 있다. 메기와 매우 비슷하나 등지느러미의 기조수가 적고 길이도 짧으며 미병부의 높이가 높아서 구분된다. 전국적으로 분포하며 물이 맑고 바닥에 자갈이 있는 하천의 중.상류에서 많이 서식하며 물고기나 수서곤충을 먹고 산다(최 등, 2002).

몸길이는 20~25cm 정도로 메기에 비하여 날씬하고 길며 위턱이 아래턱보다 짧고 눈은 머리의 양쪽 중앙부보다 앞에 있고 전비공 앞과 아래턱에는 각각 한 쌍의 수염이 있다. 몸은 짙은 푸른색을 띤 갈색이고 비늘이 없으며 등지느러미 기조수 3개, 뒷지느러미 기조수 67~73개, 척추골수 54~56개, 새파수는 7~9개이다(국립생물자원관, 2013).

국내 미유기에 관한 연구 자료는 미유기 골격에 대한 기초연구(이와 김, 1987), 미유기의 초기생활사 연구(이 등, 2001), 미유기 양식연구(김, 2012) 등이 있으나 아직 부족한 실정이다. 한편, 미유기의 유전정보는 국립생물자원관에 3건, NCBI 및 BOLD에 2건으로 총 5건의 염기서열 분석자료가 있다. 국립생물자원관은 유전자 마커로 RAG2, Cytb, CO1을 이용하였고 NCBI 및 BOLD에서는 16S와 CO1을 이용하였다. 미유기는 전국적으로 분포하는 종이라 경기도 지역 내 메기과 어종 채집 시 비교 분석이 가능할 것으로 생각된다.

미유기는 서식 지역이 깨끗하고 맑은 수역에서 서식하는 어류로 담수어 특유의 해감내가 적어 매운탕 요리 중에서 최고로 뽑히기도 한다. 또한 현재 미개발된 어종인 관계로 향후 지역 특화 품종으로 자리매김이 가능할 어종으로 사료된다.

경기도해양수산자원연구소는 하천 생태계에서 점차 사라져 가는 한반도고유종 미유기 인공종자생산 시험연구를 통한 종 보존 및 자원회복을 도모하고자 2015년부터 시험연구를 실시하고 있으며, 금년에는 미유기 대량생산 체계 구축을 위해 당년생 치어 1천마리를 방류하지 않고 어미로 육성하여 알의 양이 적은(50~200개/개체) 미유기를 대량생산할 수 있는 체계를 마련하였다.

재료 및 방법

1. 시험어

시험어는 2020년부터 확보한 미유기 어미를 배합사료를 공급하여 인위적으로 성숙시켰고 인공종자 생산에 사용한 시험어는 총 25마리(암컷 23, 수컷 2)였다. 또한 경기도보호종인 미유기 어미 개체 추가확보를 위해「경기도 자연환경보전 조례」에 따라 경기도 환경정책과에 신고하여 미유기 포획 허가를 받아 6월말경 가평천 일대에서 미유기를 포획하였고'23년부터 어미로 활용할 수 있을 것으로 판단된다.

2. 미유기 인공종자 생산 시험

2020년부터 확보된 미유기 중에서 복부가 팽만하고 부드러운 암컷 23마리와 수컷 2마리를 선별한 후 1cc 주사기를 이용하여 황체형성호르몬방출유도체(LHRH-a, Luteinizing hormone releasing hormone analog)를 암컷과 수컷 등근육에 주사하였다. 호르몬 처리 농도는 암·수 모두 어체중 1kg당 10㎍로 처리하였으며 호르몬 주사 후 산란 유도 사육지(사각수조 0.8×1m) 1개 수조에 암컷과 수컷을 함께 수용하여 인공채란 시까지 수온 18.0~19.0℃를 유지하였다. 수용 후 20~24시간 후 암컷의 복부를 압박하여 채란하고 수컷은 복부를 절개하여 정소 적출 후 분쇄하여 인공 수정하였다. 미유기의 알은 부착력이 없는 분리침성란으로 알의 크기는 약 2mm 내외였다.

인공채란으로 확보된 수정란은 세란 후 병부화기에 수용하여 부화 시까지 관리하였으며 하천수와 지하수를 혼합하여 유수식으로 공급하였고 수온은 18.0~19.0℃ 내외로 유지하였다. 수정란의 수생균 오염을 방지하기 위해 수정 1일 후부터 부화 전까지 수산용 포르말린을 1000ppm/15분 농도로 매일 1회 처리하였다.

결과 및 고찰

1. 서식지 환경 조사 및 시험어 확보

미유기의 서식지 조사 및 채집은「경기도 자연환경보전 조례」에 따라 경기도 환경정책과의 포획 허가 받은 2022년 6월13일 ~6월19일 기간동안 가평군 명지산 일원 계곡에서 가평군 어업인의 협조를 받아 3회 실시하였다(그림. 1). 주간보다 야간에 활동이 많아 통발을 이용하여 채집하였다. 미유기 채집기간 수온은 15.3 ~ 15.6℃, 용존산소는 9.52~10.34㎎/ℓ의

범위를 나타내었다. 미유기 포획 결과, 총 200마리 미유기를 확보하였다. 금년에 포획한 미유기는 산란시기가 다소 경과하여 인공종자 생산 어미로 사용하지 않았고 배합사료 길들이기 후 2023년 어미로 활용하기 할 수 있을것으로 판단된다.

2. 미유기 인공종자 생산

미유기 시험어는 2020년부터 배합사료를 공급하여 계속해서 연구소 치어생산동에서 관리하는 미유기 어미 집단으로부터 육안으로 봤을 때 복부가 팽만한 암컷을 5월 8일에 10마리 선별하였고, 다음날인 5월9일에 LHRH-a(황체형성호르몬방출유도체) 호르몬을 시험어 kg당 10㎍ 주입될수 있게 계산하여 1cc 주사기를 이용하여 시험어 등근육에 주사한 후 온도조절기를 이용하여 18℃로 조절된 별도의 수조에 수용하였다. 수컷은 외관상 구분이 어려워 미병부가 암컷에 비해 길쭉하고 배가 암컷처럼 볼록하지 않은 개체 3마리를 선별하였다.

호르몬 주사 후 20~24시간 후부터 암컷의 배를 압박하여 알이 나오는 것을 확인 후 인공수정을 실시하였다. 인공수정은 마취한 암컷의 배를 압박하여 채란하고 수컷은 정소를 적출하여 마쇄후 인공수정하였다. 인공수정 결과는 표 1에 나타내었다.

표 1. 인공종자생산 암컷

순번	길이(cm)	무게(g)	
	전체 알무게		68g
1	17.2	25.3	
2	17.9	28.0	
3	24.0	50.2	
4	17.2	23.4	
5	23.1	47.8	
6	18.5	32.6	
7	17.8	23.2	
8	22.7	47.5	
9	17.2	24.1	
10	18.3	29.6	

인공종자 생산결과 총 68g의 수정란(약 3,000개 추정)을 확보하여 병부화기 수용후 부화 시까지 19℃에 관리하였고 부화까지는 7일 소요되었다. 부화개체는 약 2,000마리로 부화율은 66%내외로 나타났다. 부화된 자어는 3일간 난황을 흡수한 후 외부로부터 먹이를 찾기 시작하였다. 초기 먹이는 알테미아(3일)를 공급 후 실지렁이(20일)를 충분히 공급하여 배합사료 먹이붙임이 용이한 전장 3cm까지 양성하였고 이 후에는 배합사료를 공급하였다(표 2).

표 2. 성장단계 별 먹이 공급

수온(19℃전후)	수정란 ~ 부화 (난황흡수)	알테미아	실지렁이	배합사료
일(누적)	3	3	20	30일 이후
체장 (cm)	0.25~0.6	1.2~1.5	1.5~3.0	3.0cm이상

5월 17일 부화한 미유기 치어는 6월10일까지 평균크기 3cm전후로 정상적으로 성장하였으나, 6월7일경부터 미유기 치어가 폐사하기 시작하여 6월9일경까지 약 1,000마리의 미유기 치어가 집단 폐사하였다. 소금, OTC(oxytetracycline)로 약욕하였고, 갑작스러운 폐사발생으로 명확한 원인은 규명하지 못하였으나, 실지렁이를 공급하면서 질병이 발생한 것으로 추측된다. 차년도 미유기 인공종자 생산부터는 실지렁이를 공급하지 않고 배합사료만을 공급하는 것이 실지렁이를 공급하는것보다 안전하게 치어를 사육할수 있을것으로 판단된다.

미유기 치어 집단폐사로 인하여 2022년에는 미유기 치어 자원조성을 실시하지 못하였고, 생존한 나머지 1,000마리의 미유기 치어를 육성하여‘23년 미유기 종복원 연구의 시험어 또는 어미로 활용할 계획이다.

참 고 문 헌

- 국립생물자원관. 2013. 한반도 고유종. ENDEMIC SPECIES OF KOREA. 척추동물 VERTERBRATES. 도서출판 두현. p134~135.

- 김이오, 2012. 미유기 양식연구. 2012년도 연구사업보고서. 충청북도내수면연구소. 73~80.

- 이완옥, 김대희, 윤길하. 2001. 중부지역 내수면 자원보전연구. 토종 담수어 보존연구. 국립수산과학원. 내수면사업보고서. p60~71.

- 최기철, 전상린, 김익수, 손영목. 2002. 원색한국담수어도감. 향문사, 서울. p138~139.

- Lee, C. L. and I. C. Kim. 1987. A osteological studdy of silurus microdorsallis. Korean journal of Limnology. 20(3) : p129~137.

Ⅴ 내수면 생태환경 조사

1. 도내 주요하천 민물고기 서식현황 조사

2. 한강하구 서식어종 생태조사

변화의 중심
기회의 경기

도내 주요하천 민물고기 서식현황 조사

김달영 · 송명화 · 양유미 · 한정조 · 김봉현

서 론

경기도의 주요 강.하천에 서식하는 민물고기현황에 대한 연구는 1985년 경기도 교육위원회에서 발행한 '경기도의 자연'(최기철 편저)을 시작으로, 이후 국립내수면생태연구소(現 국립수산과학원 중앙내수면연구소)를 중심으로 남한강, 북한강, 팔당호 등 일부 대단위 수면에 한정되어 이루어졌고, 양평.홍천, 용문산 일대의 담수어류(이.김, 1998)와 가평천의 어류상과 군집구조(남, 1997), 경기도 양평 흑천의 어류상(한, 2007), 경기북부 지역의 주요하천(신천, 포천천, 문산천, 임진강, 공릉천) 및 유입 지천을 대상으로 조사한 경기북부 주요하천 생태계 조사(경기개발연구원, 2005) 등이 있으나 경기도를 흐르는 국가 및 지방 하천이 총 517개소인 점을 감안하면 그 조사가 극히 미비하다 하겠다.

이에 우리 연구소에서는 2005년부터 경기도내 주요하천에 대한 민물고기 서식 현황 조사를 실시하게 되었다. 본 조사는 남.북한강, 임진강, 한탄강 등 대단위 수면에 직.간접적 영향을 미치는 주요하천의 민물고기 서식현황을 조사하고, 하천별 기초 수질조사 11개 항목(수온, 용존산소, pH 등)을 병행 실시하고 있다. 조사 대상으로는 도내 주요하천 28개소(흑천, 안성천, 공릉천 등)와 호소 2개소(남양호와 청평호) 포함해 총 30개소를 선정하여 시행되었으나 2019년부터는 1차 하천을 제외한 18개 주요하천 및 호소(남양호, 청평호) 2개소를 대상으로 5개 권역(한강, 임진강, 북한강, 남한강, 안성천)으로 구분하여 수계 권역별 어류의 분포와 개체의 증감 및 변화 추이를 모니터링 하였으며, 2022년부터는 하천 조사지점의 하천수를 채수하여 환경DNA(eDNA)를 추출하고 차세대 염기서열분석법을 이용하여 개체수가 적어 채집이 어려운 멸종위기종, 야행성 어류, 특별히 개체수가 적은 담수어류상의 DNA 메타바코딩 분석을 수행하였다.

앞으로도 지속적으로 도내 주요하천에 서식하는 민물고기의 서식분포 및 종다양성을 조사를 통해 파악하여 내수면 어족자원 관리 및 수산정책 수립을 위한 기초자료를 마련하고, 정립된 자료를 토대로 내수면 어족자원의 효율적 관리하고 어족자원 보호와 균형잡힌 생태계가 될 수 있도록 노력할 것이다.

재료 및 방법

2022년에 하천 4개소(경안천, 안양천, 진위천, 탄천)을 대상으로 민물고기 서식현황 및 수질조사를 병행하여 실시하였다. 조사시기는 상반기인 4월과 하반기인 9월에 각각 조사를 수행하였다. 각 조사지점은 수량이 풍부하고 접근성이 용이한 장소를 선정하였고, 대부분의 어류가 서식가능한 장소를 상류, 중류, 하류 3개 지점으로 구분하여 수질조사 및 서식어류 조사를 실시하였다.

1. 수질조사

서식환경에 대한 기초 항목인 수온, 용존산소, pH 등은 다항목수질측정기 YSI ProDSS (YSI Inc., USA)으로 현장에서 측정하였고, 현장 측정이 어려운 항목인 BOD, COD, SS, TN, TP, TOC는 각 지점별로 채수하여 수질측정 공인기관에 의뢰하여 분석하였다.

2. 서식어류 조사

조사방법은 내수면 수산자원 및 환경조사 매뉴얼(국립수산과학원, 2015)에 따랐으며, 투망(14m×16mm, 20절) 1개, 족대(밑면 1m, 높이 0.9m, 망목내경 10mm(31절)) 2개를 이용하였고, 투망은 최대 10회를 기준으로 조사지점의 상황에 따라 유동적으로 횟수를 조절하였으며, 족대는 2인이 30분간 채집하였다. 채집된 어류는 현장에서 출현종을 동정하고 개체수를 산출한 후 방류하였으며, 현장에서 동정이 어려운 개체는 10% 포르말린으로 고정하여 연구소로 이동하여 동정하였다. 동정에는 김(1997), 최 등(2002)을 이용하였으며 채집한 어류의 분류체계는“국립생물자원관 국가생물종 목록(척추동물)”기준 및 Nelson(2006)을 따랐다.

3. 담수어류상 DNA 메타바코딩 분석

조사지점의 하천수에 포함된 담수어류상을 DNA 메타바코딩으로 분석하기 위해 하천별 서식어류 조사 시 멸균채수 2L 병 2개씩 4L의 하천수를 채수하여 유전자 분석기관에 의뢰하여 분석하였다.

표 1. 경기도 하천의 환경수 시료의 정보

번호	샘플명	정점
1	KDY01	GAR01-1
2	KDY02	GAR01-2
3	KDY03	GAR01-3
4	KDY04	GCB01-1
5	KDY05	AYB01-2
6	KDY06	JWR01-1
7	KDY07	JWR01-2
8	KDY08	JWR01-3
9	KDY09	CSB01-3
10	KDY10	TCR01-1
11	KDY11	TCR01-2
12	KDY12	TCR01-3
13	KDY13	GAR02-1
14	KDY14	GAR02-2
15	KDY15	GAR02-3
16	KDY16	AYR02-1
17	KDY17	AYR02-2
18	KDY18	AYR02-3
19	KDY19	JWR02-1
20	KDY20	JWR02-2
21	KDY21	JWR02-3
22	KDY22	TCR02-1
23	KDY23	TCR02-2
24	KDY24	TCR02-3

나. 환경DNA 추출

환경수 시료를 대상으로 아래와 같은 절차에 따라 환경DNA를 추출하였다.

1) 환경수 시료 4 L를 실온에서 완전히 녹인다.
2) 여과기 세트에 나이트로셀룰로스 막여과지(Whatman™ Mixed Cellulose Ester Circle WME Range)(공극 0.45 μm, 직경 47 mm) (Cytiva, Loughborough, UK)을 장착하고 환경수 시료 1~4 L를 농축한다.
3) 멸균 핀셋을 이용하여 나이트로셀룰로스 막여과지를 3회 접고 2 mL 튜브에 담은 후 사용 전까지 -70℃에서 보관한다.

4) 스테인리스 직경 2.4 mm와 5.0 mm 금속구슬(Metal Beads Bulk, OMNI International, Kennesaw GA, USA) 2~3개를 넣는다.
5) DNeasy® Blood & Tissue Kits (Qiagen, Hilden, Germany)에 포함된 Proteinase K 20 µl와 PBS 180 µl를 넣는다.
6) Buffer AL 200 µl를 넣고 볼텍서를 이용하여 강하게 섞는다.
7) 균질기(Bead Ruptor 12, OMNI International, Kennesaw, GA, USA)을 이용하여 60초 간격으로 8회 반복하여 막여과지를 잘게 절단하고 60°C에서 8시간 이상 반응시킨다.
8) 에탄올 200 µl를 넣고 볼텍서를 이용하여 강하게 섞은 후 13,000 rpm에서 1분 동안 원심한다.
9) 모든 상등액을 DNeasy Mini spin column에 옮기고 8,000 rpm에서 1분 동안 원심한다.
10) 튜브에 DNeasy Mini spin column을 꽂고 Buffer AW1 500µl를 넣은 후 8,000 rpm에서 1분 동안 원심한다.
11) 통과액을 모두 버리고 Buffer AW2 500 µl를 넣은 후 13,000 rpm에서 3분 동안 원심한다.
12) 새로운 튜브에 DNeasy Mini spin column을 꽂고 Buffer AE 50 µl를 넣는다.
13) 실온에서 1분 동안 반응시키고 8,000 rpm에서 1분 동안 원심한다.
14) 사용 전까지 환경DNA를 -20°C에서 보관한다.

다. 1차 PCR 증폭반응

추출된 환경DNA를 대상으로 1차 PCR 증폭반응을 수행하기 위해 교정기능(proof-reading)이 우수한 AccuPower® Pfu PCR Master Mix (바이오니아, 대전, 대한민국)를 이용하여 아래와 같이 PCR 반응액을 만들었다. 이때 해양환경 시료별 PCR 증폭반응을 3회 반복으로 수행한 후 함께 섞어 사용하였다. 이때 교정기능(proof-reading)이 우수한 AccuPower® Pfu PCR Master Mix (바이오니아)를 중합효소(polymerase)를 사용하였다. 이때 AquaAmp® Fish META Universal PCR II Kit (아쿠아진텍㈜, 부산, 대한민국)를 사용하여 어류 미토콘드리아 16S rRNA 유전자 영역을 분석하였다.

Reagent	Amount	Cocktail (×72)
2× *Pfu* PCR Master Mix	10 µl	720 µl
Total DNA (20 ng/µl)	1 µl	72 µl
Forward primer (5 pmol)	1 µl	72 µl
Reverse primer (5 pmol)	1 µl	72 µl
PCR-grade water	7 µl	504 µl
Total	20 µl	1,440 µl

ProFlex PCR System (Life Technologies Corporation, Carlsbad, CA, USA)을 이용하여 다음과 같은 조건으로 PCR 증폭을 수행하였다. 이때 PCR 증폭횟수는 생산된 PCR 증폭산물의 양에 따라 최소 25회에서 최대 35회로 조절하였다. 생산된 PCR 증폭산물은 시료별로 모두 함께 합치고 섞은 후 AccuPrep® Gel Purification Kit (바이오니아)의 사용자 설명서에 따라 정제하였다.

Step	Temperature	Time	No. cycles
Initial denaturation	94˚C	5 min	1
Denaturation	94˚C	1 min	
Annealing	56˚C	1 min	25-35
Elongation	72˚C	30 s	
Final elongation	72˚C	5 min	1

라. 2차 PCR 증폭반응(NGS 라이브러리 제작)

생산된 PCR 증폭산물을 대상으로 16S Metagenomic Sequencing Library Preparation Part # 15044223 Rev. B의 사용자 설명서를 참조하고 Herculase II Fusion DNA Polymerase와 Nextera XT Index Kit V2 (illumina, San Diego, CA, USA)를 사용하여 Index를 붙이는 2차 PCR 증폭반응을 수행하여 DNA 메타바코딩 분석용 NGS 라이브러리를 제작하였다.

구축된 NGS 라이브러리는 Quant-iT™ PicoGreen™ dsDNA Assay Kit (Molecular Probes Inc., Eugene, OR, USA)를 사용하여 염색하였고, 형광 Microplate Reader (Synergy™ H1, BioTek® Instruments, Winooski, VT, USA)를 사용하여 제작된 NGS 라이브러리의 농도를 측정하였다. 또한, 자동전기영동장치(Qsep100 Bio-Fragment Analyzer, BiOptic Inc., New Taipei City, Taiwan)를 사용하여 제작된 NGS 라이브러리의 크기 분포를 확인하는 QC (Quality Control) 테스트를 수행하였다.

마. NGS 원본데이터 생산

iSeq® Platform (illumina)을 이용한 NGS 분석을 수행하였다. 이때 생산된 데이터의 양과 질은 150~350 bp 이내, 시료당 100,000 reads 이상, Q30 70% 이상이 되도록 하였다.

그림 1. 차세대염기서열분석법(Next Generation Sequencing, NGS)을 이용하여 DNA 메타바코딩 분석을 수행하는 과정[자료: Marcelino and Verbruggen (2016)에서 변형하여 사용]

바. 생물정보학적 분석

아래와 같은 절차에 NGS 분석을 통해 생산된 원본데이터의 생물정보학적 분석을 수행하였다.

1) iSeq® Platform (illumina)으로 생산된 원본데이터의 paired-end sequencing을 수행한다.
2) MID와 PCR 프라이머들과 어댑터의 올리고서열을 제거한다.
3) DNA 염기서열의 길이가 100 bp 이하이거나 350 bp 이상인 reads를 모두 제거한다.
4) 생선된 reads의 집단화(clustering)를 수행하여 ASV를 생성하고, 저품질 reads, 불명확한 reads, chimeras로 확인되는 ASV를 모두 제거한다.
5) 1개 read만을 가지는 ASV (singleton)를 모두 제거하는 “1차 필터링”을 수행한다.
6) 국제 유전정보 데이터베이스인 미국 국립생물정보센터(National Center for Biotechnology Information, NCBI) (www.ncbi.nlm.nih.gov)의 GenBank 데이터베이스를 활용하여 각 ASV의 분류학적 위치를 최상위 분류군인 역(domain)을 비롯하여 문(phylum)에서 최하위 분류군인 종(species) 수준까지 결정한다. 이때 query coverage 50% 이하와 유사도 70% 이하인 ASV는 모두 “unassigned”(분류학적 위치 불명, 환경DNA 기원)로 처리한다. 또한, “environmental DNA”, “uncultured eukaryote” 등으로 검색되어 그 분류학적 위치가 확정되지 않은 ASV는 재검색을 통해 그 분류학적 위치를 명확히 한다.

7) 진핵생물 미토콘드리아 16S rRNA 영역 이외의 세균역(Domain Bacteria), 고세균역(Domain Archaea), 진핵생물역(Domain Eukarya), 세포소기관(엽록체 등) 또는 “no hit”로 동정되는 모든 ASV를 제거하는 “2차 필터링”을 수행한다. 이때 유사도 99% 이상을 보이는 ASV는 별표 2개(**)로 구분하여 표시하고 유사도 97~99%를 보이는 ASV는 별표 1개(*)로 구분하여 표시한다.

8) 최종적으로 생산된 ASV 테이블을 바탕으로 시료별 종다양성, 균등도 등의 alpha diversity 분석과 PCoA, UPGMA Tree 등의 delta diversity 분석을 수행한다.

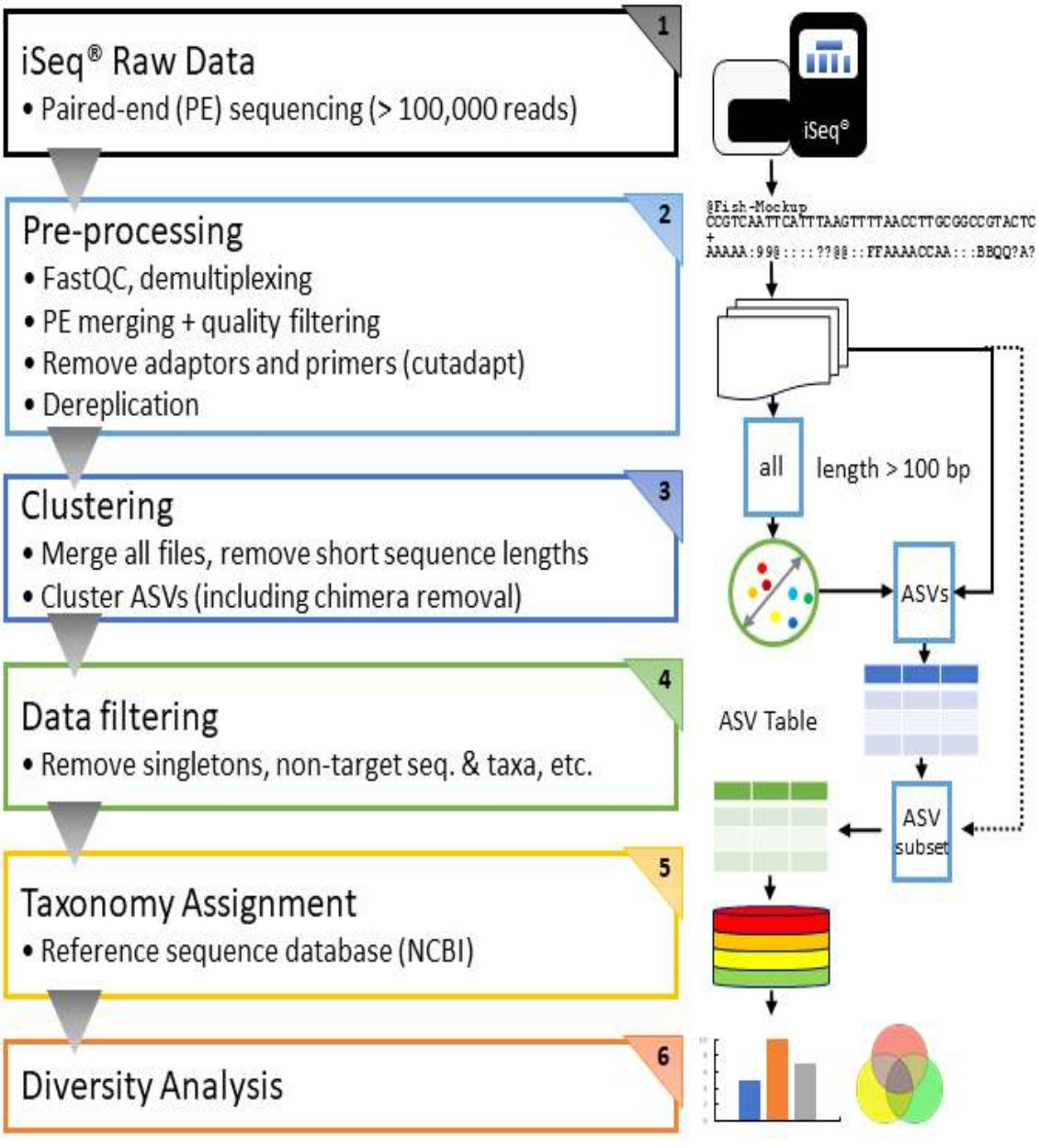


그림 2. 담수어류상의 DNA 메타바코딩 분석을 위한 NGS 원본데이터의 생물정보학적 분석과정.

결과 및 고찰

본 조사에서 확인된 서식 어류는 총 3목 9과 35종이 분포하고 있는 것으로 확인되었다. 하천별 종다양성은 경안천 28종, 안양천 16종, 진위천 16종, 탄천 14종 순으로 한강 수계인 경안천의 종다양성이 가장 높은 것으로 나타났으며, 반면 종다양성이 가장 낮은 하천은 용인 마북동에서 발원하여 성남을 지나 한강으로 흘러 들어가는 탄천인 것으로 조사되었으며 서식어류 조사결과 요약은 표 2에 나타내었다. 채집된 어류 중 잉어목(Cypriniformes) 3과 25종으로 가장 많았으며, 농어목(Perciformes) 4과 8종, 메기목(Siluriformes) 2과 2종 순으로 출현하였다.

1. 수질조사

조사하천의 상류, 중류, 하류 3개 지점별 수질조사 결과는 경안천 표 3-1, 안양천 표 4-1, 진위천 표 5-1, 탄천 표 6-1에 각각 나타내었다.

2. 서식어류조사

경안천 등 4개 하천에서 채집된 어류는 3목 9과 35종으로 이중 한반도 고유종은 9종으로 각시붕어(Rhodeus uyekii), 줄납자루(A. yamatsutae), 중고기(*Sarcocheilichthys nigripinnis morii*), 왜매치(*Abbottina springeri*), 돌마자(*Microphysogobio yaluensis*), 긴몰개(*Squalidus gracilis majimae*), 몰개(*Squalidus japonicus coreanus*), 참종개(*Iksookimia koreensis*), 얼록동사리(*Odontobutis interrupta*)가 확인 되었고, 외래종은 떡붕어(*Carassius cuvieri*), 이스라엘잉어(*Cyprinus carpio nudus*), 배스(*Micropterus salmoides*) 등 3종이 서식하는 것으로 확인되었다(표 2).

표 2. 하천별 조사결과 요약 (표 3~8 및 사진 1~6, 하천별 상세결과 참조)

총 32종	경안천	안양천	진위천	탄천
출현종	3목 10과 28종	3목 6과 16종	2목 4과 16종	3목 6과 14종
우점종	1. 피라미 2. 붕어 3. 밀어	1. 피라미 2. 잉어 3. 붕어	1. 피라미 2. 몰개 3. 붕어	1. 피라미 2. 돌고기 3. 잉어
고유종 (9종)	줄납자루 중고기 긴몰개 돌마자 왜매치 참종개 얼록동사리	얼록동사리	각시붕어 몰개 돌마자 왜매치 얼록동사리	
	7종	1종	5종	
일반종 (23종)	잉어 붕어 피라미 버들매치 돌고기 납지리 참마자 모래무지 누치 줄몰개 참붕어 강준치 미꾸리 메기 민물검정망둑 밀어 꾹저구 가물치	잉어 붕어 피라미 돌고기 모래무지 버들치 줄몰개 누치 참붕어 치리 강준치 민물검정망둑 꾹저구	잉어 붕어 피라미 납지리 모래무지 줄몰개 참붕어 치리 밀어 갈문망둑	잉어 붕어 피라미 돌고기 모래무지 누치 줄몰개 강준치 미꾸라지 메기 대농갱이 밀어
	18종	13종	10종	12종
외래종 (3종)	떡붕어 향어 배스	떡붕어 배스	배스	떡붕어 배스
	3종	2종	1종	2종

표 3. 경안천 조사어종 및 개체수 (3목 10과 28종)

국 명	학 명	조사지점 상류 '15	상류 `22	중류 '15	중류 `22	하류 '15	하류 `22	합계 '15	합계 `22	비 고
계		210	71	259	64	382	70	851	205	
잉어 목 Cypriniformes										
잉어 과 Cyprinidae										
잉어	*Cyprinus carpio*		2	3	3	7	3	10	8	
붕어	*Carassius auratus*		15	22	7	14	8	36	30	
떡붕어	*Carassius cuvieri*			2	1		1	2	2	외
이스라엘잉어	*Cyprinus carpio nudus*		4						4	외(신규)
피라미	*Zacco platypus*	60	15	93	17	110	27	263	59	
끄리	*Opsariichthys bidens*					3		3		미확인
버들매치	*Abbottinarivularis*					3	3	3	3	
돌고기	*Pungtungia herzi*		5	6	5	40		46	10	
쉬리	*Coreoleuciscus splendidus*			5		15		20		고(미확인)
각시붕어	*Rhodeus uyekii*					10		10		고(미확인)
납자루	*Acheilognathus lanceolatus*					20		20		미확인
납지리	*Acheilognathus rhombeus*					17		17	4	
줄납자루	*Acheilognathus yamatsutae*				3				3	고(신규)
중고기	*Sarcocheilichthys nigrpinnis morii*				4				4	고(신규)
참마자	*Hemibarbus longirostris*	16	8	8		8		32	8	
모래무지	*Pseudogobio esocinus*		5	34	3	24		58	8	
버들치	*Phynchocypris oxycephalus*	30		7		20		57		미확인
누치	*Hemibarbus labeo*			20	2	22	4	42	6	
줄몰개	*Gnathopogon strigatus*				2	7		7	2	
긴몰개	*Squalidus gracilis majimae*	25	2					25	2	고(신규)
몰개	*Squalidus japonicus coreanus*	19		15		11		45		고(미확인)
돌마자	*Microphysogobio yaluensis*	5		20	8	20		45	8	고
왜매치	*Abbottina springeri*		2						2	고(신규)
참붕어	*Pseudorasbora parva*	27	2	7		4		38	2	
강준치	*Erythroculter erythropterus*						2		2	신규
종개 과 Balitoridae										
참종개	*Iksookimia koreensis*	13	2					13	2	고
미꾸리 과 Cobitidae										
미꾸리	*Misgurnus anguillicaudatus*		1		1				2	신규
메기 목 Siluriformes										
메기 과 Siluridae										
메기	*Silurus asotus*	2	4					2	4	
농어 목 Perciformes										
꺽지 과 Centropomidae										
쏘가리	*siniperca scherzeri*					3		3		미확인
동사리 과 Odontobutidae										
얼록동사리	*Odontobutis interrupta*	4	2		2	2		6	4	고
망둑어 과 Gobiidae										
민물검정망둑	*Tridentiger brevispinis*						8		8	신규
밀어	*Rhinogobius brunneus*	9		4	5	4	10	17	15	
꾹저구	*Chaenogobius urotaenia*						2		2	신규
가물치 과 Channidae										
가물치	*Channa argus*				1				1	신규
검정우럭 과 Centrarchidae										
배스	*Micropterus salmoides*		2	12		18	2	30	4	외

※ **고** : 한반도 고유종, **외** : 외래종

※ **신규** : '22년도에 새로 확인된 종(10종), **미확인** : '15년도에 확인되었으나 '22년도에 확인되지 않은 종(6종)

▶ **조사결과 :** ’15년 3목 7과 28종 (고7) ⇒ ’22년 3목 10과 28종 (고7)

▶ **조사년도 및 횟수 :** 2015년 (2회 : 5. 15 / 9. 15), 2022년 (2회 : 4.27. / 9.27.)

▶ **조사장소 :** 3개 지점

- 상류 : 용인시 처인구 김량장동 기선교(위성좌표 위도 37°13’20.56“, 경도 127°13’25.54“)
- 중류 : 광주시 오포읍 추자리 오포대교(위성좌표 위도 37°22’12.88“, 경도 127°14’23.03“)
- 하류 : 광주시 초월읍 서하리 서하교(위성좌표 위도 37°26’24.01“, 경도 127°18’41.86“)

표 3-1. 경안천 수질환경 조사 결과

조사항목	상 류		중 류		하 류	
	상반기	하반기	상반기	하반기	상반기	하반기
채수시간	10:30	13:00	13:30	15:00	14:00	12:00
수온(℃)	20.7	23.2	22.4	23.1	19.2	23.2
DO(㎎/L)	10.5	7.81	11.02	10.59	10.08	10.45
pH	7.29	9.78	7.12	8.05	7.21	8.1
Salinity(‰)	0.15	0.13	0.18	0.18	0.17	0.18
전기전도도 (㎲/㎝)	290	268	368	375	321	356
BOD(㎎/L)	1.8	0.8	3.4	1.2	2.9	1.0
COD(㎎/L)	8.2	1.8	7.1	2.4	4.3	2.7
T-N(㎎/L)	2.2	2.7	2.6	3.5	3.3	3.2
T-P(㎎/L)	0.109	0.047	1.177	0.051	0.106	0.036
TOC(㎎/L)	3.3	2.1	6.5	7.0	7.1	4.1
SS(㎎/L)	10.6	15.5	60.5	36.0	61.3	34.0

경안천 조사 결과 3목 10과 28종의 어류가 서식하고 있는 것으로 조사되었다. 한반도 고유종은 줄납자루, 중고기, 긴몰개, 왜매치, 얼록동사리가 출현하였으며,‘15년 채집되었던 한반도고유종 쉬리, 각시붕어, 몰개는 이번조 사에서 확인되지 않았다. 일반종 끄리, 버들치, 쏘가리는 이번 조사에서 확인되지 않았고, 강준치, 미꾸리, 민물검정망둑, 밀어, 꾹저구, 가물치, 미꾸라지가 하류 조사지점에서 신규로 확인되었다. 외래어종은 배스, 이스라엘잉어(향어)가 상류 조사지점에서 신규로 확인되었다. 경안천의 우점종은 피라미, 붕어, 밀어 순으로 조사되었다(표 3).

사진 1. 경안천 어류 및 조사관련 사진

표 4. 안양천 어종 및 개체수 (3목 6과 16종)

국 명	학 명	조사지점 상류 '15	상류 `22	중류 '15	중류 `22	하류 '15	하류 `22	합계 '15	합계 `22	비고
계		16	24	201	72	149	35	366	131	
잉어 목 Cypriniformes										
잉어 과 Cyprinidae										
잉어	*Cyprinus carpio*		4	17		32	18	49	22	
붕어	*Carassius auratus*			30	17	25	2	55	19	
떡붕어	*Carassius cuvieri*			3	2	2		5	2	외
피라미	*Zacco platypus*		9	42	24		8	42	41	
돌고기	*Pungtungia herzi*			15	8			15	8	
모래무지	*Pseudogobio esocinus*		2	47	5			47	7	
버들치	*Phynchocypris oxycephalus*	12	5					12	5	
줄몰개	*Gnathopogon strigatus*		2		3				5	신규
누치	*Hemibarbus labeo*			8	2	1		9	2	
참붕어	*Pseudorasbora parva*			36	5	2		38	5	
치리	*Hemiculter eigenmanni*			3			3	3	3	
강준치	*Erythroculter erythropterus*				1				1	신규
미꾸리 과 Cobitidae										
미꾸라지	*Misgurnus mizolepis*					2		2		미확인
농어 목 Perciformes										
동사리 과 Odontobutidae										
얼록동사리	*Odontobutis interrupta*	4	2					4	2	고
망둑어 과 Gobiidae										
민물검정망둑	*Tridentiger brevispinis*						3		3	신규
꾹저구	*Chaenogobius urotaenia*						1		1	신규
동갈치 목 Beloniformes										
송사리 과 Adrianichthyoidae										
대륙송사리	*Orizias sinensis*					85		85		미확인
검정우럭 과 Centrarchidae										
배스	*Micropterus salmoides*				5				5	외(신규)

※ **고** : 한반도 고유종, **외** : 외래종

※ **신규** : '22년도에 새로 출현한 종(5종) , **미확인** : '15년도에 출현했으나 '22년도에 출현하지 않은 종(2종)

▶ **조사결과** : '15년 4목 4과 13종 (고1) ⇒ '22년 3목 6과 16종 (고1)

▶ **조사년도 및 횟수** : 2015년 (2회 : 5. 18 / 9. 14), 2022년 (2회 : 4. 25~26 / 9. 19~20)

▶ **조사장소** : 3개 지점

- 상류 : 의왕시 고천동 고천교 (위성좌표 위도 37°20'46.21", 경도 126°58'26.66")
- 중류 : 안양시 만안구 안양대교(위성좌표 위도 37°24'31.72", 경도 126°54'44.15")
- 하류 : 광명시 철산동 철산대교(위성좌표 위도 37°28'28.95", 경도 126°52'38.94")

표 4-1. 안양천 수질환경 조사 결과

조사항목	상 류		중 류		하 류	
	상반기	하반기	상반기	하반기	상반기	하반기
채수시간	11:00	14:00	14:00	16:00	11:00	14:00
수온(℃)	19.0	24.6	22.2	27.9	20.5	26.1
DO(㎎/L)	10.74	8.41	10.24	9.28	6.89	7.89
pH	7.42	7.73	7.12	8.47	6.97	7.37
Salinity(‰)	0.25	0.18	0.22	0.19	0.32	0.25
전기전도도 (㎲/cm)	452	364	581	418	608	550
BOD(㎎/L)	1.3	1.2	1.7	0.9	1.7	1.1
COD(㎎/L)	3.1	2.2	7.6	2.6	14.3	3.9
T-N(㎎/L)	3.4	2.2	6.7	2.6	11.2	6.3
T-P(㎎/L)	0.052	0.048	0.113	0.048	0.238	0.103
TOC(㎎/L)	5.5	4.1	9.1	3.0	10.8	5.8
SS(㎎/L)	63.5	38.0	90.0	21.5	132.3	20.5

안양천 조사 결과 3목 6과 16종의 어류가 서식하고 있는 것으로 조사되었다. 한반도 고유종은 얼록동사리 1종만이 출현하였으며, 일반종 미꾸라지, 대륙송사리는 이번 조사에서 확인되지 않았고, 줄몰개, 강준치, 민물검정망둑, 꾹저구가 하류 조사지점에서 신규로 출현하였는데,‘15년도 조사시 보다 하류조사지점의 수심이 낮아져 하천 바닦에 주로 서식하는 망둑어류가 추가로 채집된 것으로 판단된다. 외래어종은 떡붕어와 배스가 출현하였으며, 안양천의 우점종은 피라미, 잉어, 붕어 순으로 조사되었다(표 4).

사진 2. 안양천 어류 및 조사관련 사진

표 5. 진위천 어종 및 개체수 (2목 4과 16종)

국 명	학 명	조사지점 상류 '15	상류 `22	중류 '15	중류 `22	하류 '15	하류 `22	합계 '15	합계 `22	비고
계		47	43	126	139	68	67	241	249	
잉어 목 Cypriniformes										
잉어 과 Cyprinidae										
잉어	*Cyprinus carpio*				3	23	2	23	5	
붕어	*Carassius auratus*	4	3	4	10	6	15	14	28	
피라미	*Zacco platypus*	13	32	56	41			69	73	
돌고기	*Pungtungia herzi*			1				1		미확인
떡납줄갱이	*Rhodeus notatus*			4				4		미확인
각시붕어	*Rhodeus uyekii*				2				2	고(신규)
납지리	*Acheilognathus rhombeus*						7		7	신규
모래무지	*Pseudogobio esocinus*				12				12	신규
버들치	*Phynchocypris oxycephalus*	17						17		미확인
줄몰개	*Gnathopogon strigatus*				8				8	신규
몰개	*Squalidus japonicus coreanus*			23	17	39	37	62	54	고
돌마자	*Microphysogobio yaluensis*			3	26			3	26	고
왜매치	*Abbottina springeri*				15				15	고(신규)
참붕어	*Pseudorasbora parva*		2				2		4	신규
치리	*Hemiculter eigenmanni*		2	6				6	2	
메기 목 Siluriformes										
동자개 과 Bagridae										
동자개	*Pseudobagrus fulvidraco*			1				1		미확인
농어 목 Perciformes										
동사리 과 Odontobutidae										
얼록동사리	*Odontobutis interrupta*	1	4	3	2			4	6	고
망둑어 과 Gobiidae										
밀어	*Rhinogobius brunneus*	12			3			12	3	
갈문망둑							1		1	신규
검정우럭 과 Centrarchidae										
배스	*Micropterus salmoides*			11			3	11	3	외
블루길	*Lepomis macrochirus*			14				14		외(미확인)

※ 고 : 한반도 고유종, 외 : 외래종

※ **신규** : '22년도에 새로 확인된 종(6종), **미확인** : '15년도에 확인되었으나 '15년도에 확인되지 않은 종(5종)

▶ **조사결과** : '15년 3목 5과 14종 (고3) ⇒ '22년 2목 4과 16종 (고5)

▶ **조사년도 및 횟수** : 2015년 (2회 : 5. 22 / 9. 17~18), 2022년 (2회 : 5. 3. / 9. 27.)

▶ **조사장소** : 3개 지점

- 상류 : 안성시 양성면 미산리 제1노곡교(위성좌표 위도 37°06'20.80", 경도 127°14'03.72")
- 중류 : 평택시 진위면 봉남리(위성좌표 위도 37°05'46.63", 경도 127°05'18.37")
- 하류 : 평택시 서탄면 서탄대교(위성좌표 위도 37°25'33.72", 경도 126°59'56.71")

표 5-1. 진위천 수질환경 조사 결과

조사항목	상 류		중 류		하 류	
	상반기	하반기	상반기	하반기	상반기	하반기
채수시간	10:30	11:00	11:30	14:00	13:30	15:00
수온(℃)	20.3	20.2	18.2	24.1	21.5	22.9
DO(㎎/L)	10.24	9.89	11.21	13.58	9.41	9.53
pH	7.03	7.30	7.34	7.69	6.99	7.61
Salinity(‰)	0.13	0.14	0.43	0.19	0.43	0.41
전기전도도 (㎲/cm)	254	274	752	385	823	792
BOD(㎎/L)	1.6	0.9	1.2	0.9	1.8	1.3
COD(㎎/L)	3.9	2.2	7.2	2.9	9.0	2.8
T-N(㎎/L)	1.2	1.2	4.2	3.0	6.9	4.6
T-P(㎎/L)	0.098	0.028	0.055	0.034	0.308	0.083
TOC(㎎/L)	7.1	2.6	9.4	2.6	10.7	8.3
SS(㎎/L)	61.3	78.5	54.0	24.0	98.0	50.5

진위천 조사 결과 2목 4과 16종의 어류가 서식하고 있는 것으로 조사되었다. 한반도 고유종은 각시붕어, 몰개, 돌마자, 왜매치, 얼록동사리가 출현하였으며, 일반종 돌고기, 버들치, 떡납줄갱이, 동자개는 이번 조사에서 확인되지 않았고, 납지리, 모래무지, 줄몰개, 참붕어, 갈문망둑이 신규로 출현하였다. 외래어종은 배스가 확인되었으며, ‘15년 출현하였던 블루길은 이번 조사에서는 출현하지 않았다. 진위천의 우점종은 피라미, 몰개, 붕어 순으로 조사되었다(표 5).

사진 3. 진위천 어류 및 조사관련 사진

표 6. 탄천 어종 및 개체수 (3목 6과 14종)

국 명	학 명	조사지점						합 계		비 고
		상 류		중 류		하 류				
		'18	`22	'18	`22	'18	`22	'18	`22	
계		124	50	150	72	79	63	353	185	
	잉어 목 Cypriniformes									
	잉어 과 Cyprinidae									
잉어	*Cyprinus carpio*	25	2	7	8		5	32	15	
붕어	*Carassius auratus*		3			9	7	9	10	
떡붕어	*Carassius cuvieri*	2	1	1	1			3	2	
피라미	*Zacco platypus*	92	33	130	42	60	30	282	105	
돌고기	*Pungtungia herzi*				6		15		21	신규
납자루	*Acheilognathus lanceolata intermedia*					1		1		미확인
모래무지	*Pseudogobio esocinus*	5		3	3	2		10	3	
누치	*Hemibarbus labeo*			3		4	2	7	2	
줄몰개	*Gnathopogon strigatus*		4						4	신규
강준치	*Erythroculter erythropterus*				8				8	신규
	미꾸리 과 Cobitidae									
미꾸라지	*Misgurnus mizolepis*		2			1		1	2	
	메기 목 Siluriformes									
	메기 과 siluridae									
메 기	*Silurus asotus*		1	1				1	1	
	동자개과 bagridae									
대농갱이	*Pseudobagrus emarginatus*				2				2	신규
	농어 목 Perciformes									
	동사리 과 Odontobutidae									
얼록동사리	*Odontobutis interrupta*			3		2		5		고(미확인)
	망둑어 과 Gobiidae									
밀 어	*Rhinogobius brunneus*		4				3		7	미확인
	검정우럭 과 Centrarchidae									
배스	*Micropterus salmoides*			1	2		1	1	3	외
블루길	*Lepomis macrochirus*			1				1		외(미확인)

※ 고 : 한반도 고유종, 외 : 외래종

※ **신규** : '22년도에 새로 확인된 종(4종), **미확인** : '18년도에 확인되었으나 '22년도에 확인되지 않은 종(4종)

▶ **조사결과** : '18년 3목 5과 12종 (고1) ⇒ '22년 3목 6과 14종 (고1)

▶ **조사년도 및 횟수** : `18년 (2회 : 5월 / 9월), `22년 (2회 : 4. 29. / 9. 21.)

- 상류 : 용인시 기흥구 마북동 (37°17'39.60"N 127°06'41.52"E)

- 중류 : 성남시 수정구 사송교 (37°24'34.92"N 127°07'21.76"E)
- 하류 : 성남시 수정구 복정동 (37°25'50.55"N 127°07'02.33"E)

표 6-1. 탄천 수질환경 조사 결과

조사항목	상 류		중 류		하 류	
	상반기	하반기	상반기	하반기	상반기	하반기
채수시간	14:00	11:00	11:00	14:00	13:30	15:00
수온(℃)	21.0	23.6	19.5	22.8	20.6	23.3
DO(㎎/L)	8.19	8.64	8.40	9.66	8.94	9.29
pH	7.32	7.42	7.51	8.19	7.64	7.57
Salinity(‰)	0.22	0.22	0.10	0.22	0.22	0.23
전기전도도 (㎲/cm)	437	451	195	430	254	467
BOD(㎎/L)	1.0	0.8	0.5	1.3	3.2	1.2
COD(㎎/L)	8.0	3.3	4.1	4.1	5.3	2.2
T-N(㎎/L)	5.6	4.5	3.7	2.9	1.6	1.2
T-P(㎎/L)	0.066	0.056	0.015	0.031	0.192	0.028
TOC(㎎/L)	6.8	4.8	0.6	2.3	8.0	2.6
SS(㎎/L)	43.0	38.5	0.2	21.0	132.7	78.5

탄천 조사 결과 3목 6과 14종의 어류가 서식하고 있는 것으로 조사되었다. 한반도고유종은 ‘15년 채집되었던 얼록동사리가 확인되지 않았다. 일반종 납자루, 밀어는 이번 조사에서 확인되지 않았고 돌고기, 줄몰개, 강준치, 대농갱이 밀어가 하류 조사 지점에서 신규로 확인되었다. 외래어종은 배스가 확인되었으며, ‘15년 출현하였던 블루길은 이번 조사에서는 출현하지 않았다. 탄천의 우점종은 피라미, 돌고기, 잉어 순으로 조사되었다(표 6).

사진 4. 탄천 어류 및 조사관련 사진

3. 담수어류상 DNA 메타바코딩 분석

가. PCR 증폭반응

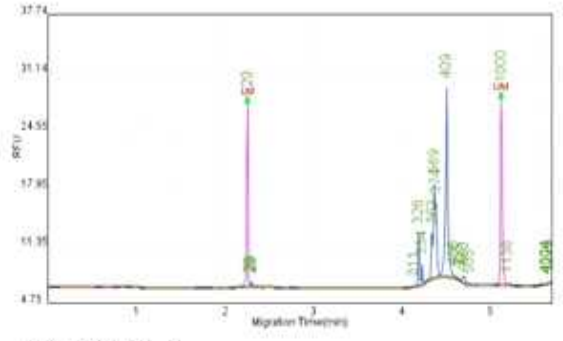
우리나라 경기도 하천의 환경수 시료 24개에서 추출된 환경DNA를 주형DNA로 이용하여 시료별 3회씩 어류 미토콘드리아 16S rRNA 유전자 영역의 1차 PCR 증폭반응을 수행하였으며, 생산된 PCR 증폭산물(시료별 3회씩)을 시료별로 모두 합쳤다. 이를 대상으로 2차 PCR 증폭반응을 통해 시료별 NGS 라이브러리를 제작하였으며 이들에 대한 QC 테스트를 수행하였다.

그림 3. 어류 미토콘드리아 16S rRNA 유전자 영역의 PCR 증폭반응을 아가로즈겔 전기영동 이미지

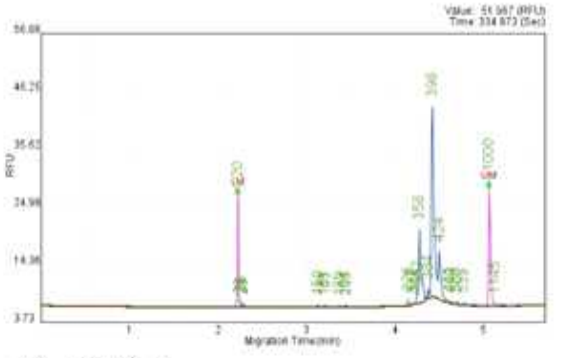
표 7. 어류 미토콘드리아 16S rDNA 영역의 2차 PCR 증폭반응을 통해 제작된 NGS 라이브러리 정보와 QC 테스트 결과

No.	Specimen	Library type	Conc. (ng/μl)	Conc. (nM)	Size (bp)
1	GAR01-1	Metagenome amplicon	15.0	73.4	409
2	GAR01-2	Metagenome amplicon	24.0	117.2	396
3	GAR01-3	Metagenome amplicon	30.5	149.1	407
4	GCB01-1	Metagenome amplicon	18.1	88.3	408
5	AYB01-2	Metagenome amplicon	32.2	157.4	407
6	JWR01-1	Metagenome amplicon	49.3	241.1	391
7	JWR01-2	Metagenome amplicon	26.5	129.4	401
8	JWR01-3	Metagenome amplicon	10.3	50.1	412
9	CSB01-3	Metagenome amplicon	32.1	157.0	404
10	TCR01-1	Metagenome amplicon	5.6	27.2	402
11	TCR01-2	Metagenome amplicon	16.4	80.2	402
12	TCR01-3	Metagenome amplicon	19.1	93.2	409
13	GAR02-1	Metagenome amplicon	34.6	169.1	392
14	GAR02-2	Metagenome amplicon	5.1	25.2	432
15	GAR02-3	Metagenome amplicon	11.8	57.7	402
16	AYR02-1	Metagenome amplicon	38.7	189.2	393
17	AYR02-2	Metagenome amplicon	3.1	15.3	429
18	AYR02-3	Metagenome amplicon	10.9	53.4	427
19	JWR02-1	Metagenome amplicon	6.7	33.0	429
20	JWR02-2	Metagenome amplicon	14.7	71.8	402
21	JWR02-3	Metagenome amplicon	5.7	27.6	431
22	TCR02-1	Metagenome amplicon	23.5	114.7	406
23	TCR02-2	Metagenome amplicon	40.5	198.0	401
24	TCR02-3	Metagenome amplicon	11.4	55.6	430

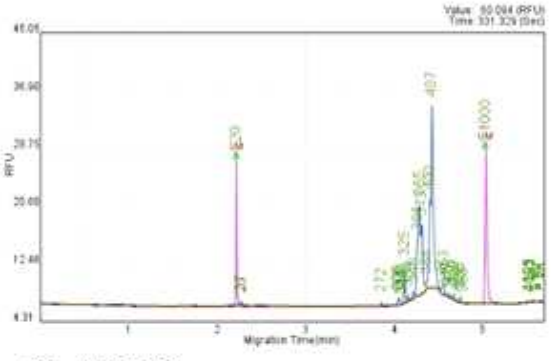
01. GAR01-1



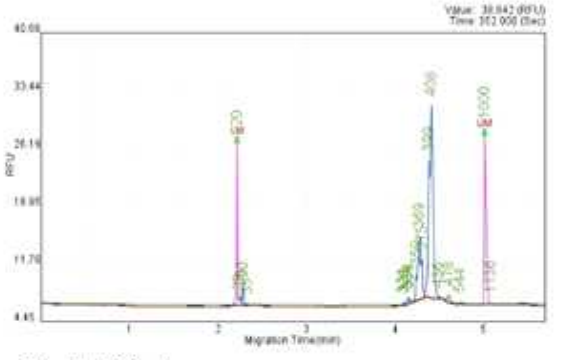
02. GAR01-2



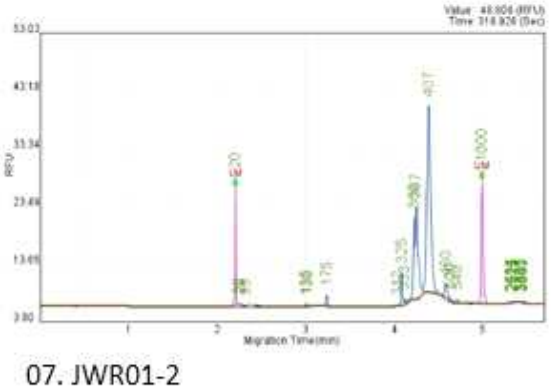
03. GAR01-3



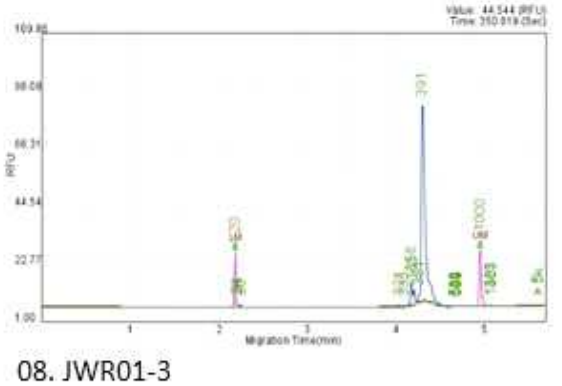
04. GCB01-1



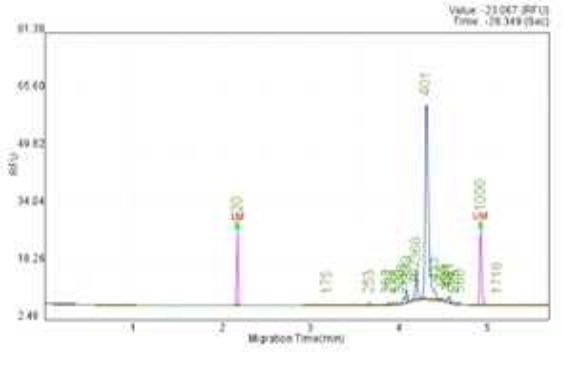
05. AYB01-2



06. JWR01-1



07. JWR01-2



08. JWR01-3

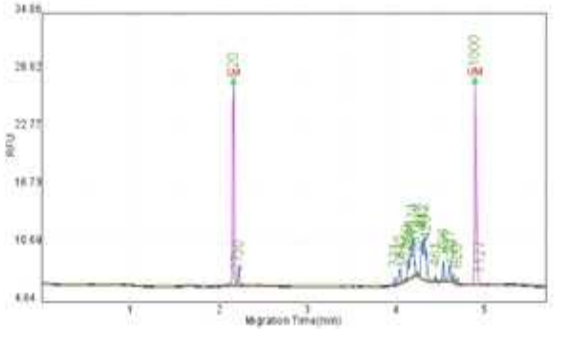
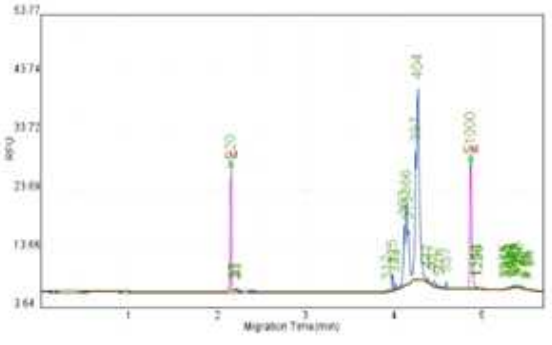
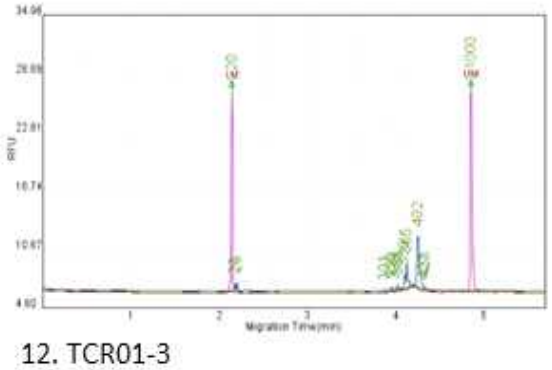


그림 4. 어류 미토콘드리아 16S rDNA 영역의 제작된 NGS 라이브러리의 QC 테스트 그래프(계속)

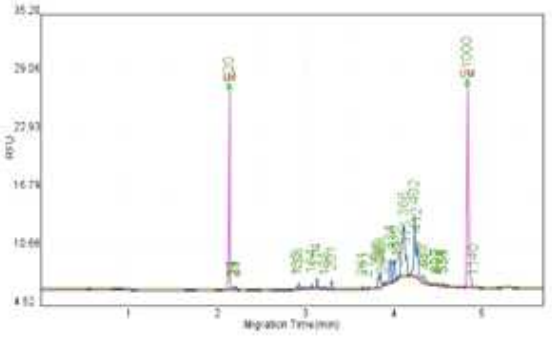
09. CSB01-3



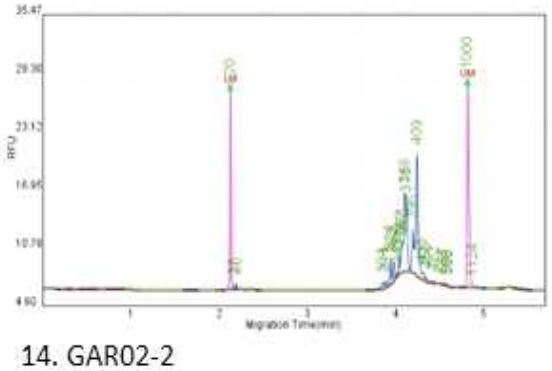
10. TCR01-1



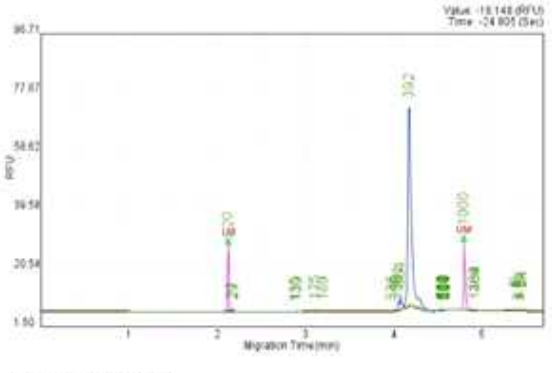
11. TCR01-2



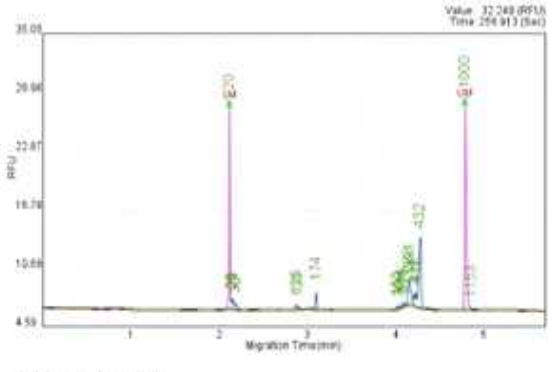
12. TCR01-3



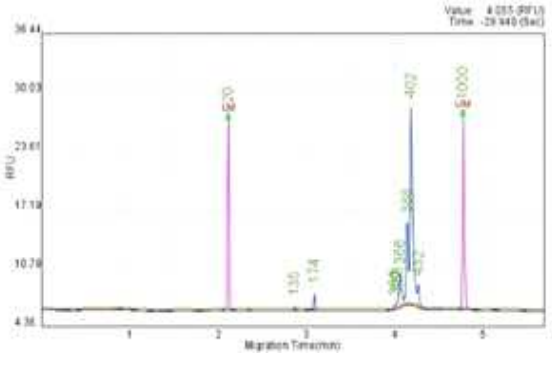
13. GAR02-1



14. GAR02-2



15. GAR02-3



16. AYR02-1

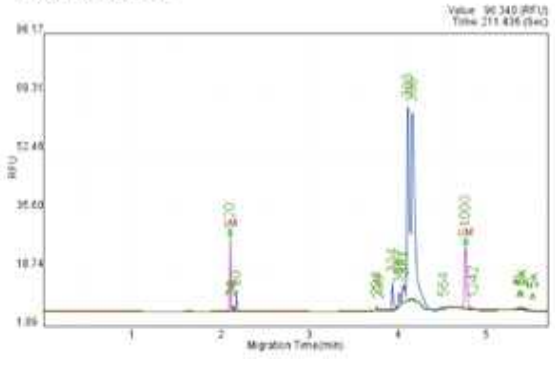


그림 5. 어류 미토콘드리아 16S rDNA 영역의 제작된 NGS 라이브러리의 QC 테스트 그래프(계속)

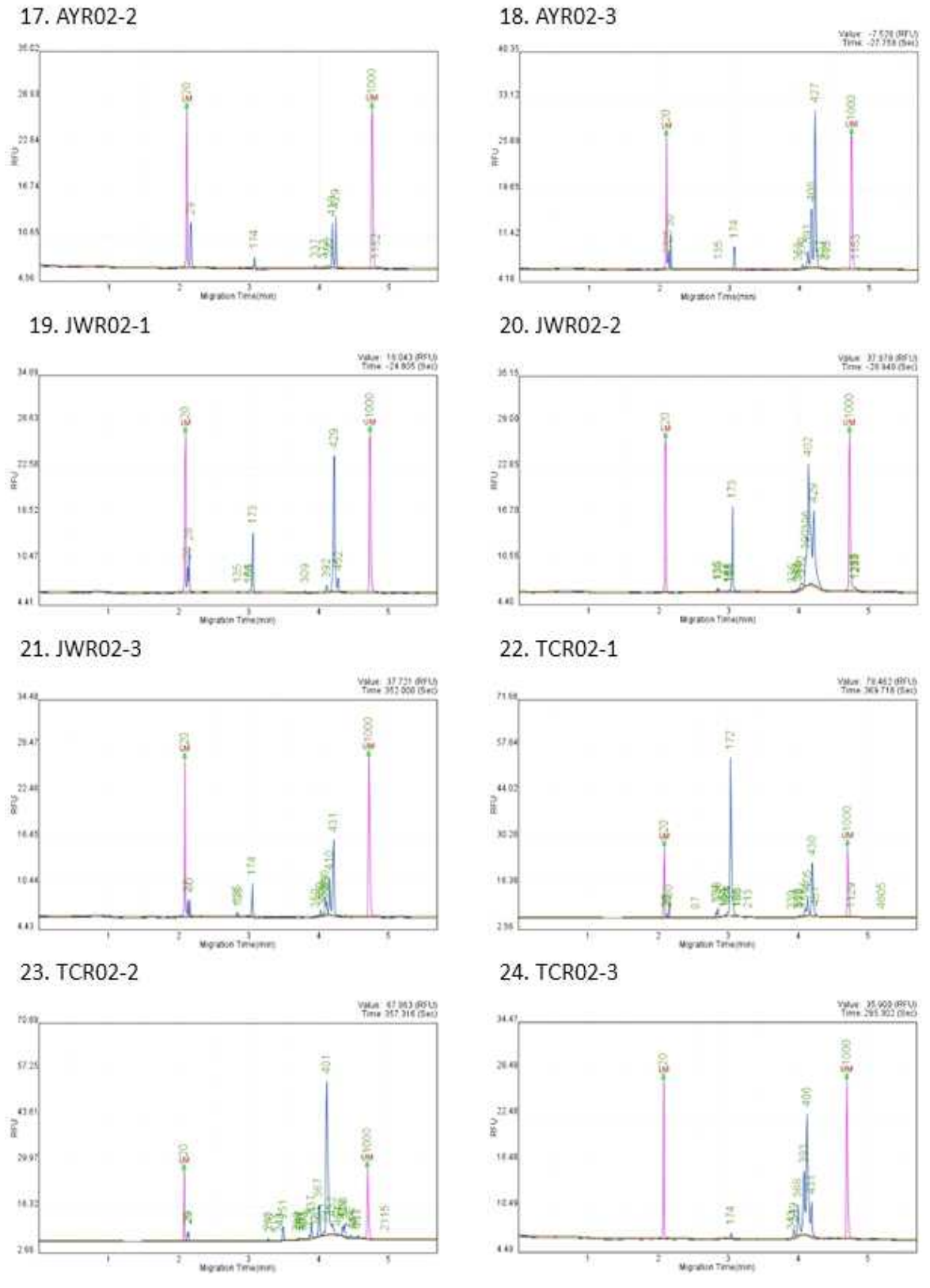


그림 6. 어류 미토콘드리아 16S rDNA 영역의 제작된 NGS 라이브러리의 QC 테스트 그래프(계속)

나. NGS 원본데이터 생산

우리나라 하천과 호수 환경수 시료의 어류 미토콘드리아 16S rDNA 영역에서 제작된 NGS 라이브러리를 사용하여 NGS 분석을 수행하였다. 이를 통해 생산된 원본데이터(raw data)의 total bases (bp), total reads 수, N 비율(%), GC 비율(%), Q20 비율(%), Q30 비율(%)의 정보는 아래와 같았다.

표 8. 어류 미토콘드리아 16S rDNA 영역의 NGS 분석을 수행하여 생산된 원본데이터 정보

No.	Specimen	Total bases (bp)	No. reads	GC (%)	AT (%)	Q20 (%)	Q30 (%)
1	GAR01-1	7,069,903	47,178	46.71	53.29	95.47	91.08
2	GAR01-2	13,869,880	94,276	46.68	53.32	94.36	89.29
3	GAR01-3	9,107,341	60,708	46.80	53.20	93.79	88.55
4	GCB01-1	13,861,681	92,546	46.63	53.37	94.07	88.63
5	AYB01-2	11,099,180	81,950	45.47	54.53	89.98	84.34
6	JWR01-1	17,878,730	118,902	46.90	53.10	95.58	90.90
7	JWR01-2	15,850,437	108,106	45.27	54.73	94.74	89.81
8	JWR01-3	5,360,385	35,848	46.52	53.48	92.96	87.22
9	CSB01-3	10,783,273	71,978	47.34	52.66	94.05	89.03
10	TCR01-1	7,903,544	52,704	44.63	55.37	93.11	86.72
11	TCR01-2	11,062,477	96,342	43.79	56.21	83.85	77.11
12	TCR01-3	7,426,165	49,538	46.22	53.78	93.31	87.41
13	GAR02-1	20,511,735	141,190	47.41	52.59	94.44	89.38
14	GAR02-2	12,710,637	120,342	43.58	56.42	81.60	75.95
15	GAR02-3	11,541,283	89,298	45.73	54.27	90.58	85.59
16	AYR02-1	15,169,790	101,004	46.37	53.63	95.00	89.48
17	AYR02-2	14,651,706	133,980	45.38	54.62	83.78	78.75
18	AYR02-3	14,609,793	120,710	46.06	53.94	87.62	82.18
19	JWR02-1	16,043,134	185,398	38.53	61.47	72.41	67.25
20	JWR02-2	14,832,633	157,510	40.62	59.38	77.05	72.24
21	JWR02-3	13,431,396	148,046	40.78	59.22	74.96	70.15
22	TCR02-1	21,804,242	367,856	30.34	69.66	48.77	44.84
23	TCR02-2	14,898,627	104,910	42.88	57.12	93.45	87.68
24	TCR02-3	11,517,647	93,456	45.90	54.10	87.42	81.82

* Total bases: The total number of bases in reads identified

* No. reads: The total number of sequence reads
* N (%): The N percentage in sequence reads
* GC (%): The GC percentage in sequence reads
* Q20 (%): The percentage of bases in which the phred score is above 20
* Q30 (%): The percentage of bases in which the phred score is above 30

다. 생물다양성 분석

1) 희박성 분석

최종적으로 선택된 척삭동물문(Chordata)의 ASV 테이블을 바탕으로 총 reads 수와 ASV 수의 상관관계를 희박성 분석(rarefraction curve)을 통해 파악하였다.

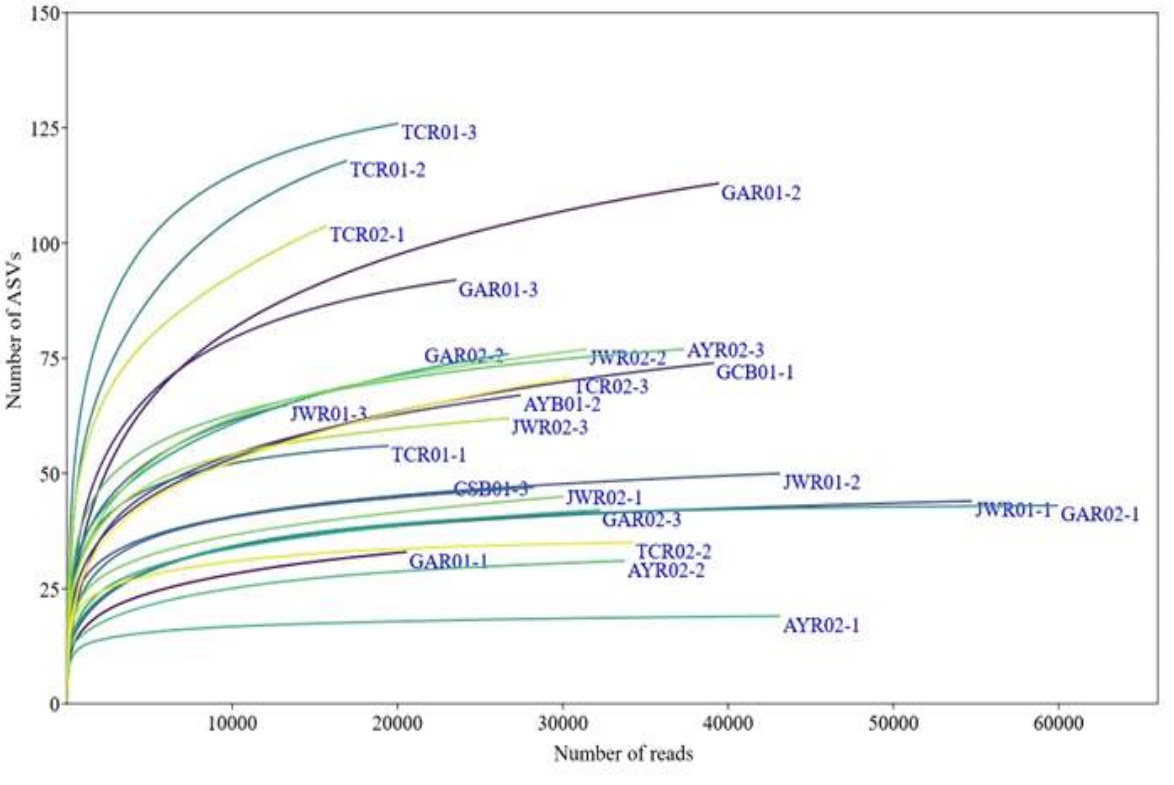


그림 7. 어류 미토콘드리아 16S rDNA 영역의 NGS 분석을 통해 생산된 조기어강(Actinopteri)의 총 reads 수와 ASV 수의 상관관계를 보여주는 희박성 분석(rarefraction curve) 그래프.

2) 표본내 분류학적 다양성(Alpha diversity)

우리나라 하천과 호수 환경수 시료의 어류 미토콘드리아 16S rDNA 영역의 메타바코딩을 통해 생산된 ASV 테이블을 바탕으로 척삭동물문(Chordata)의 최종 ASV 수, Chao1, Shannon (H), Simpson (1-D) 지수 등의 표본내 분류학적 다양성을 계산하였다.

표 9. 어류 미토콘드리아 16S rDNA 영역의 메타바코딩을 통해 척삭동물문(Chordata)의 ASV 테이블을 바탕으로 계산된 최종 ASV 수, Chao1, Shannon (H), Simpson (1-D) 지수

No	Specimen	No. ASVs	Shannon (H)	Simpson (1-D)
1	GAR01-1	33	1.198	0.528
2	GAR01-2	113	1.844	0.731
3	GAR01-3	92	1.793	0.685
4	GCB01-1	74	1.973	0.739
5	AYB01-2	67	1.110	0.478
6	JWR01-1	44	1.849	0.796
7	JWR01-2	50	1.660	0.655
8	JWR01-3	65	2.524	0.868
9	CSB01-3	47	1.382	0.602
10	TCR01-1	56	2.301	0.835
11	TCR01-2	118	2.631	0.867
12	TCR01-3	126	2.760	0.844
13	GAR02-1	43	1.852	0.796
14	GAR02-2	76	2.798	0.909
15	GAR02-3	42	1.326	0.538
16	AYR02-1	19	1.412	0.680
17	AYR02-2	31	1.806	0.788
18	AYR02-3	77	2.466	0.821
19	JWR02-1	45	1.899	0.728
20	JWR02-2	77	2.117	0.762
21	JWR02-3	62	2.707	0.912
22	TCR02-1	104	2.846	0.891
23	TCR02-2	35	1.616	0.659
24	TCR02-3	71	2.080	0.826

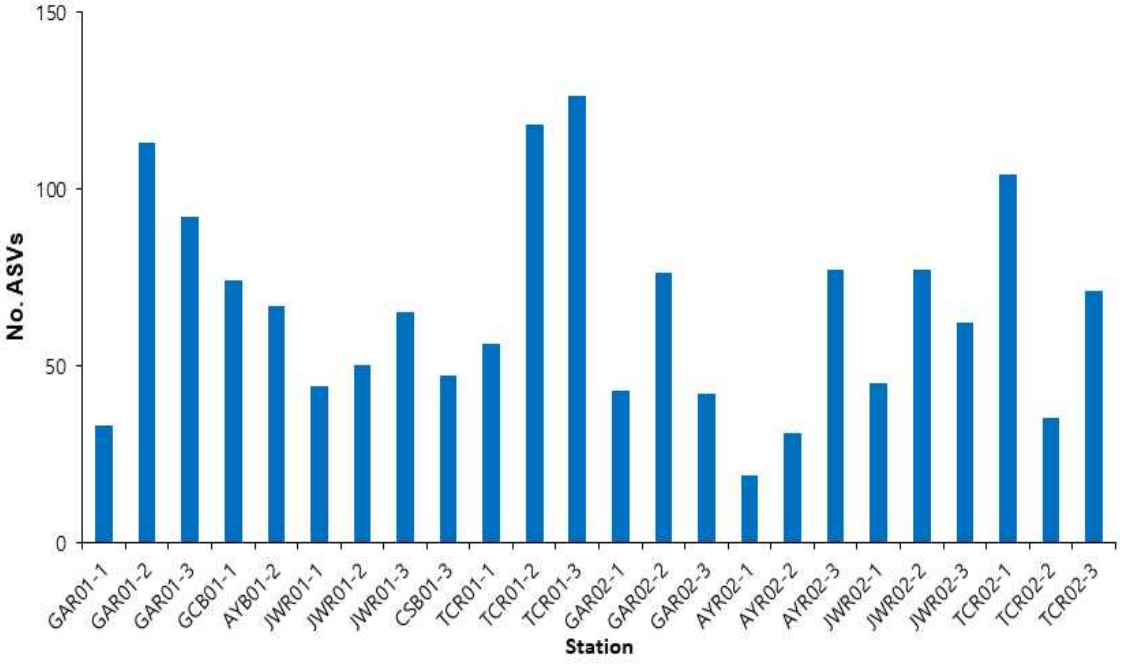


그림 8. 어류 미토콘드리아 16S rDNA 영역의 메타바코딩 분석을 통해 계산된 척삭동물문(Chordata)의 최종 ASV 수.

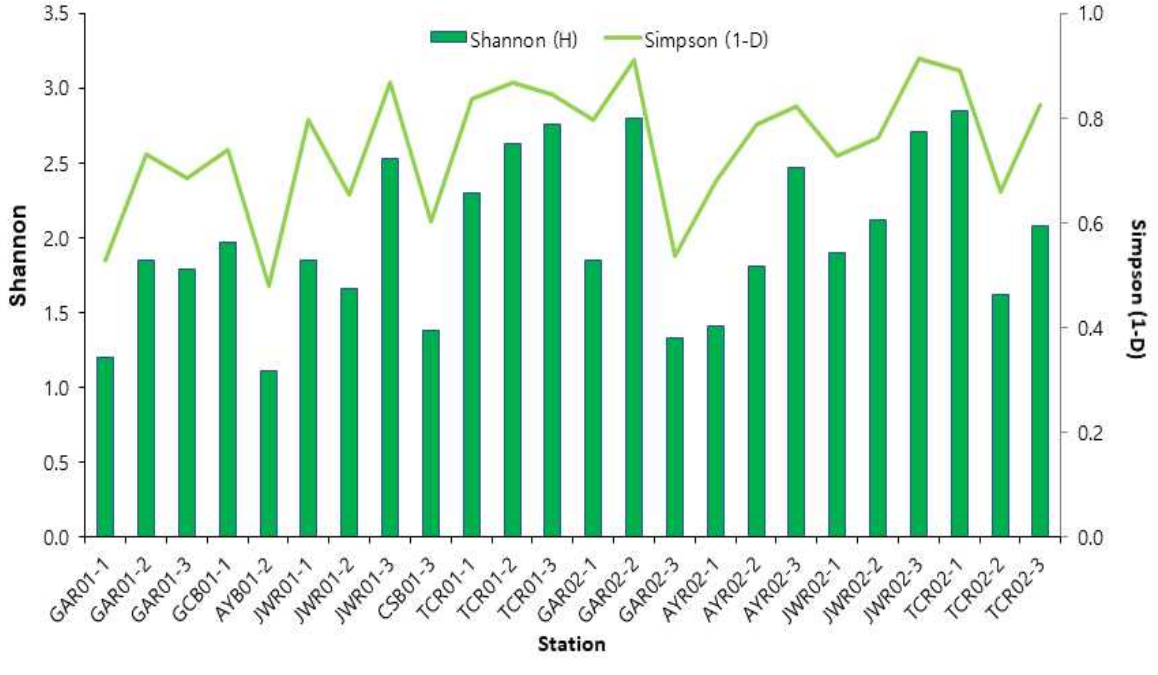


그림 9. 어류 미토콘드리아 16S rDNA 영역의 메타바코딩 분석을 통해 계산된 척삭동물문(Chordata)의 최종 Shannon (H)과 Simpson (1-D) 지수.

3) 시료간 상관관계 분석

우리나라 하천과 호수 환경수 시료의 어류 미토콘드리아 16S rDNA 영역의 메타바코딩 통해 생산된 척삭동물문(Chordata)의 ASV 테이블을 바탕으로 PCoA, NMDS, UPGMA 등의 표본간 분류학적 다양성을 계산하였다.

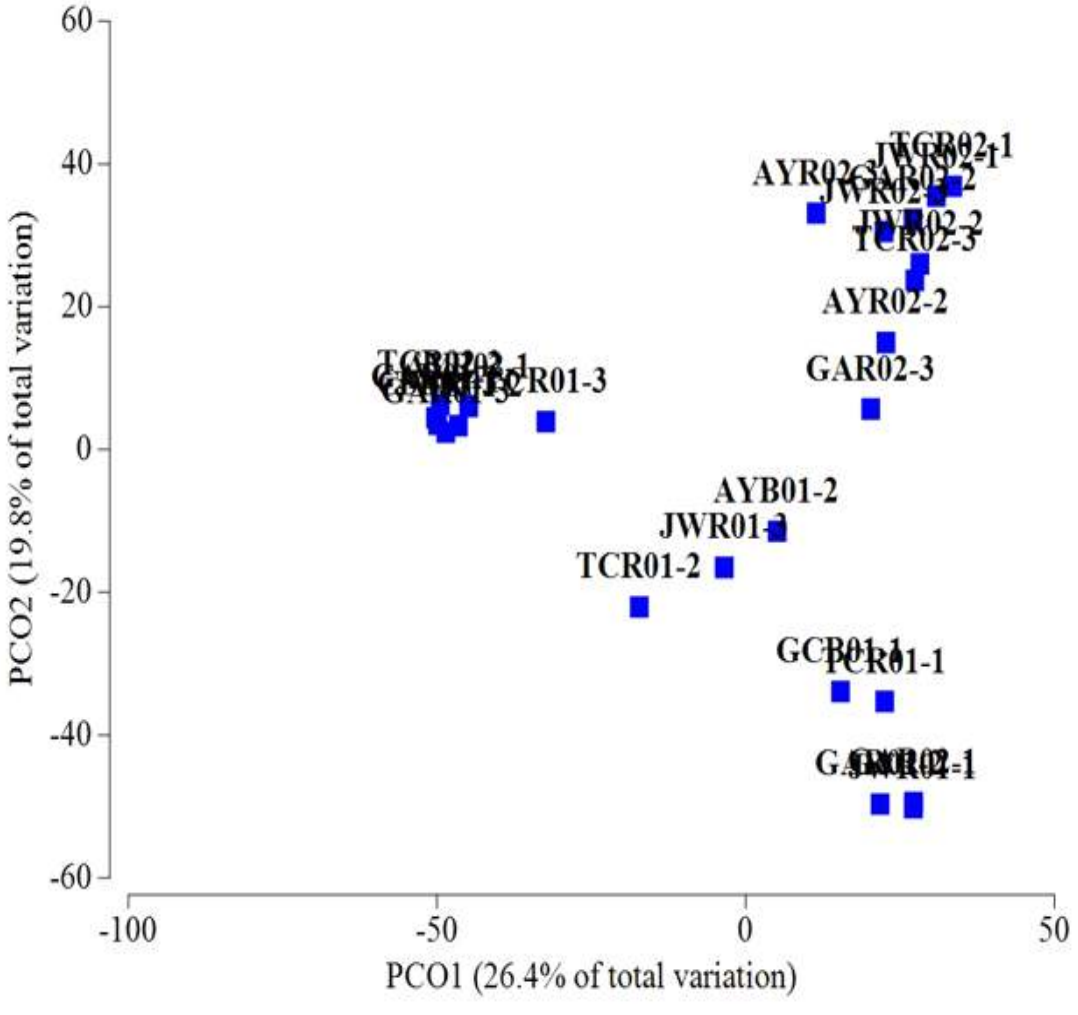


그림 10. 어류 미토콘드리아 16S rDNA 영역의 메타바코딩 척삭동물문(Chordata)의 PCoA 분석결과

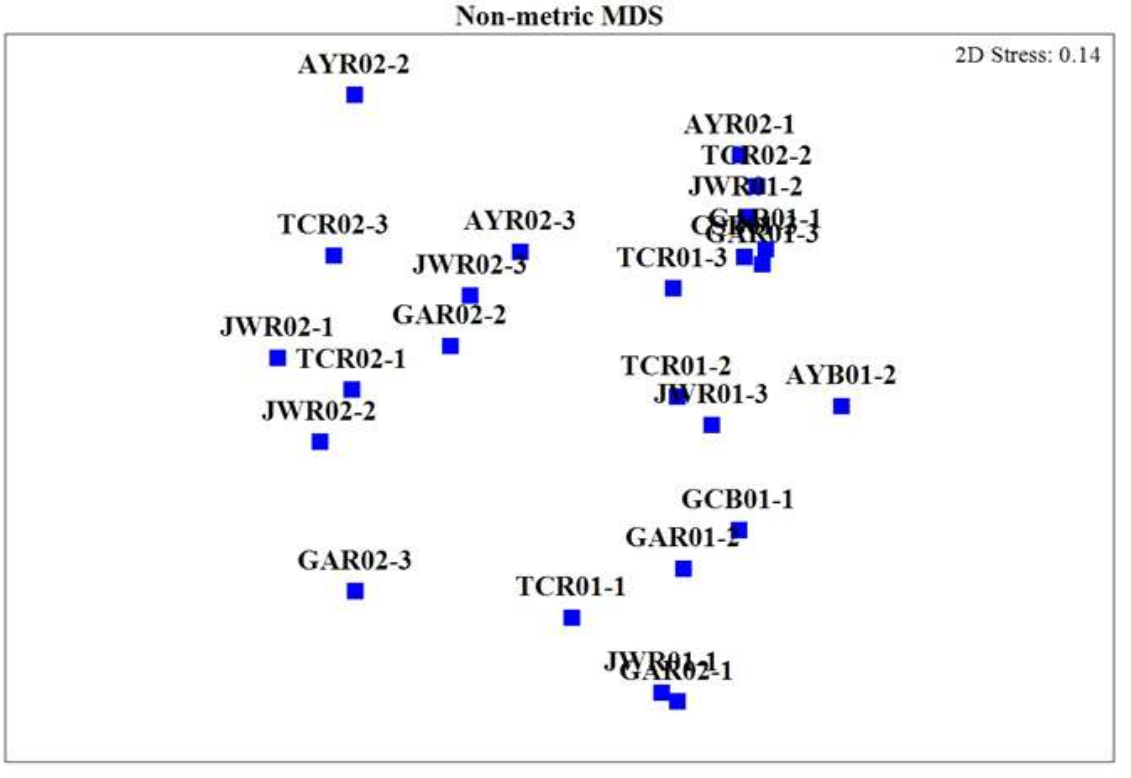


그림 11. 어류 미토콘드리아 16S rDNA 영역의 메타바코딩 분석을 바탕으로 Bray-Curtis distance를 사용하여 생산된 척삭동물문(Chordata)의 non-matric MDS 분석결과.

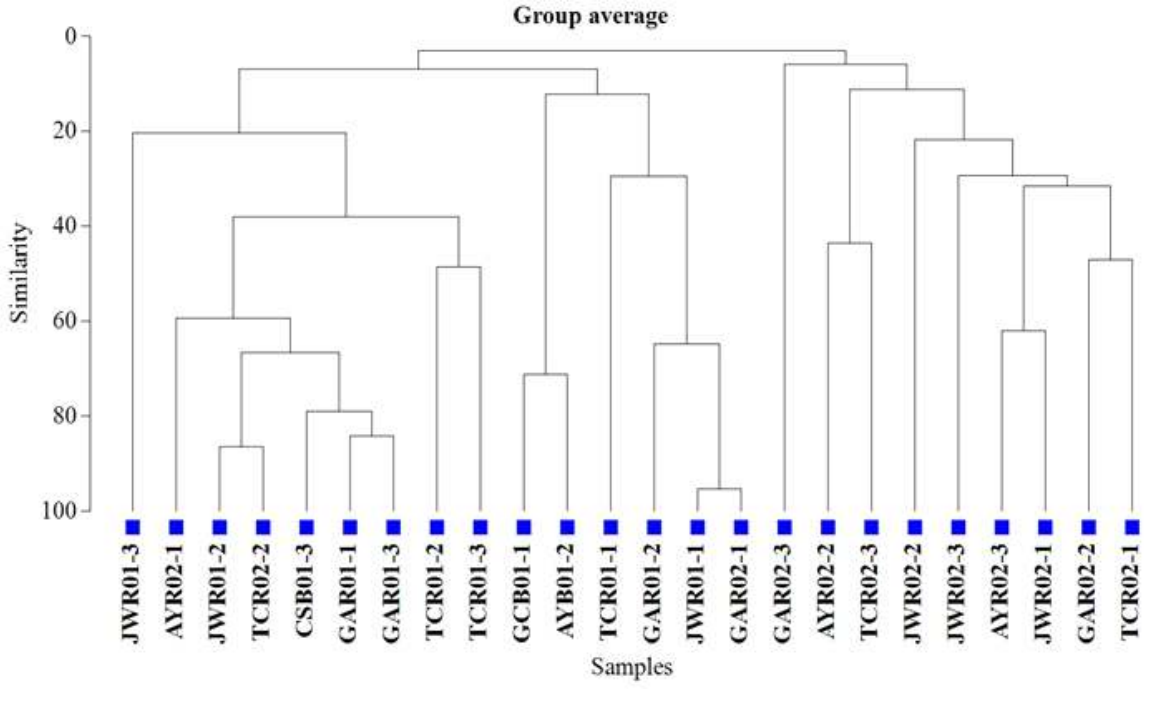


그림 12. 어류 미토콘드리아 16S rDNA 영역의 메타바코딩 분석을 바탕으로 생산된 척삭동물문(Chordata)의 UPGMA 분석결과.

라. 분류군별 구성비와 출현수

1) 문(Phylum) 수준의 출현수와 구성비

우리나라 환경수 시료의 어류 미토콘드리아 16S rDNA 영역의 DNA 메타바코딩 분석을 통해 최종적으로 확보된 reads 수와 ASV 수를 바탕으로 상위분류군 문(phylum) 수준에서 전체 구성비와 시료별 출현수를 분석하였다.

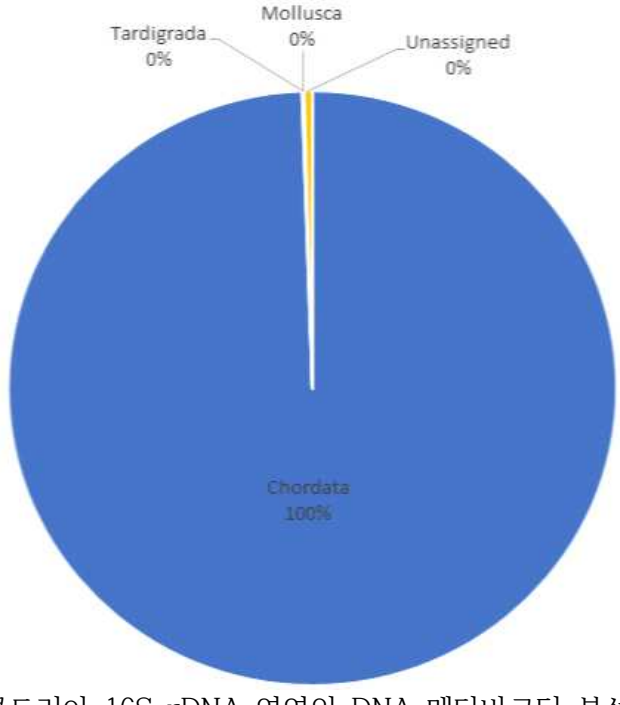


그림 13. 어류 미토콘드리아 16S rDNA 영역의 DNA 메타바코딩 분석을 통해 최종적으로 확보된 ASV의 reads 수를 바탕으로 산출된 문(phylum) 수준에서 전체 구성비.

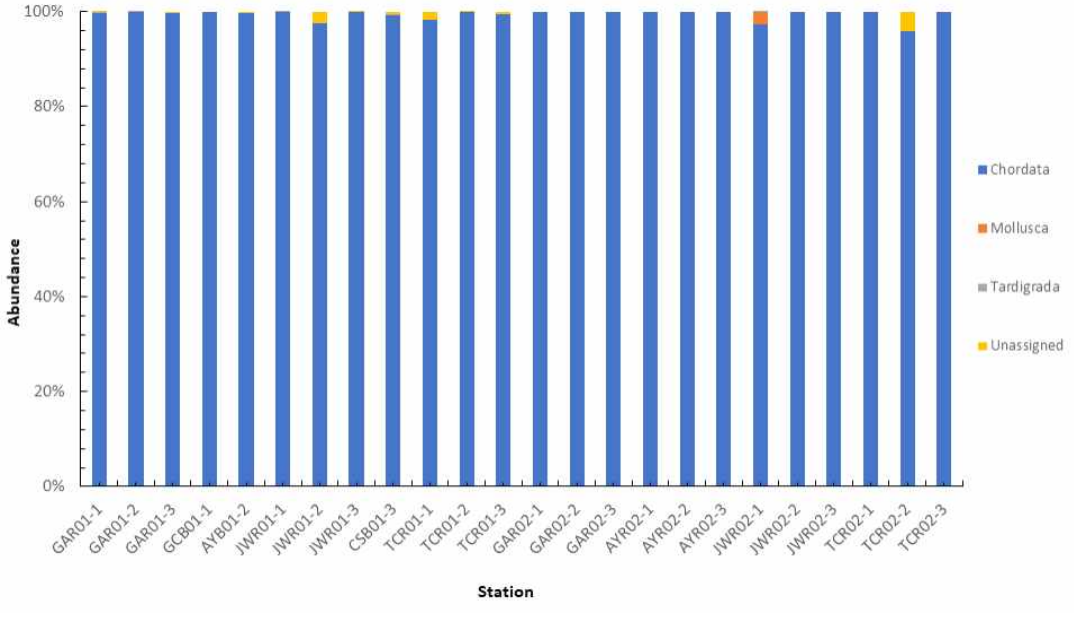


그림 14. 어류 미토콘드리아 16S rDNA 영역의 DNA 메타바코딩 분석을 통해 최종적으로 확보된 ASV의 reads 수를 바탕으로 산출된 문(phylum) 수준에서 시료별 출현수.

2) 강(Class) 수준의 출현수와 구성비

우리나라 환경수 시료의 어류 미토콘드리아 16S rDNA 영역의 DNA 메타바코딩 분석을 통해 최종적으로 확보된 reads 수와 ASV 수를 바탕으로 척삭동물문(Chordata)의 하위분류군 강(class) 수준에서 전체 구성비와 시료별 출현수를 분석하였다.

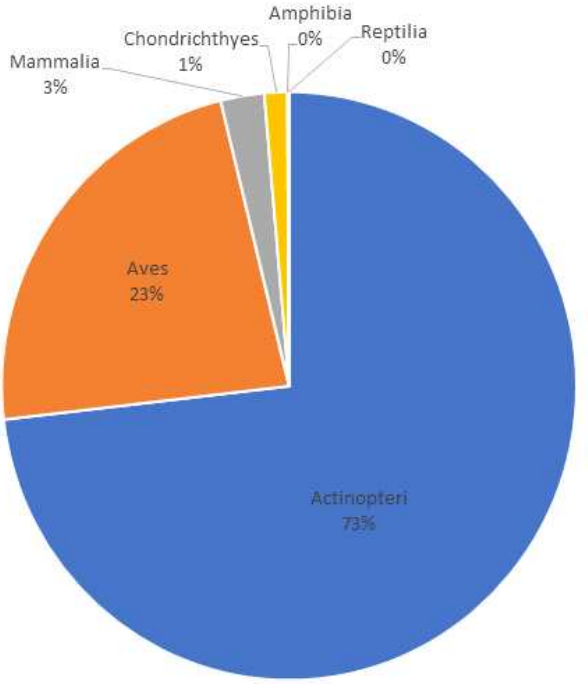


그림 15. 어류 미토콘드리아 16S rDNA 영역의 DNA 메타바코딩 분석을 통해 최종적으로 확보된 ASV의 reads 수를 바탕으로 산출된 척삭동물문(Chordata)의 하위분류군 강(class) 수준에서 전체 구성비.

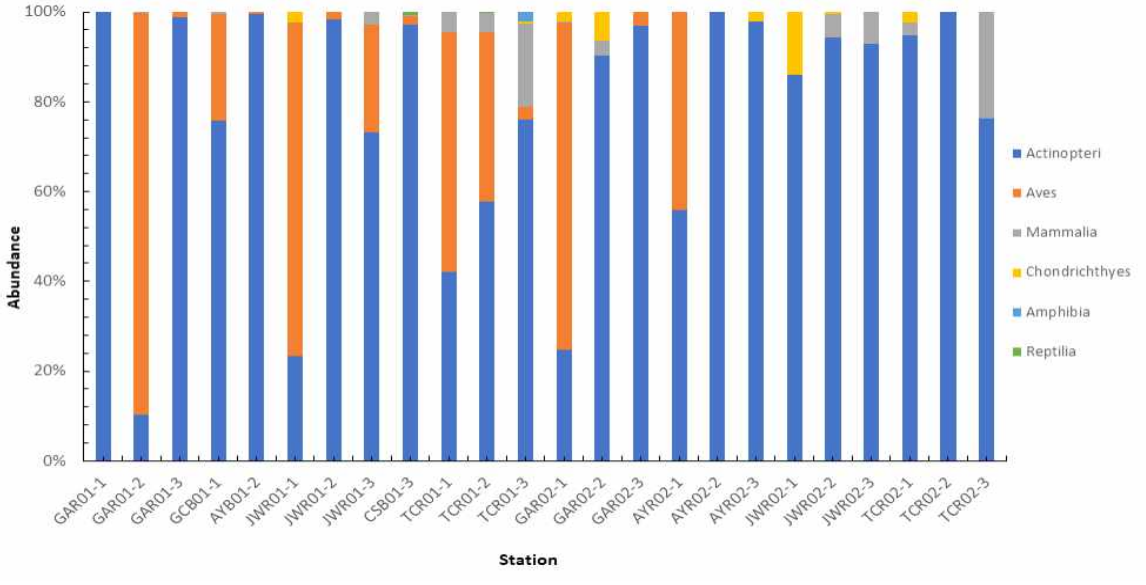


그림 16. 우리나라 환경수 시료의 어류 미토콘드리아 16S rDNA 영역의 DNA 메타바코딩 분석을 통해 최종적으로 확보된 ASV의 reads 수를 바탕으로 산출된 척삭동물문(Chordata)의 하위분류군 강(class) 수준에서 시료별 출현수.

3) 목(Order) 수준의 출현수와 구성비

우리나라 환경수 시료의 어류 미토콘드리아 16S rDNA 영역의 DNA 메타바코딩 분석을 통해 최종적으로 확보된 reads 수와 ASV 수를 바탕으로 조기어강(Actinopteri)과 연골어강(Chondrichthyes)의 하위분류군 목(order) 수준에서 전체 구성비와 시료별 출현수를 분석하였다.

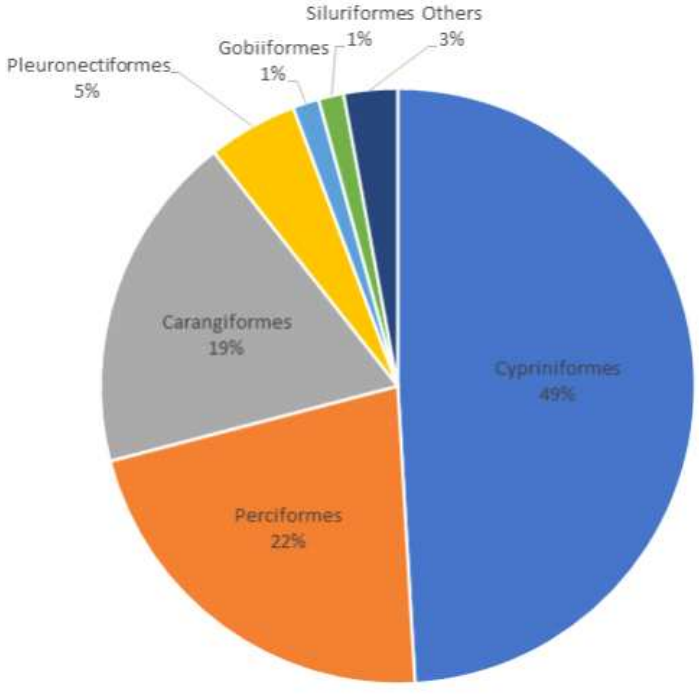


그림 17. 어류 미토콘드리아 16S rDNA 영역의 DNA 메타바코딩 분석을 통해 최종적으로 확보된 ASV의 reads 수를 바탕으로 산출된 조기어강(Actinopteri)과 연골어강(Chondrichthyes)의 하위분류군 목(order) 수준에서 전체 구성비.

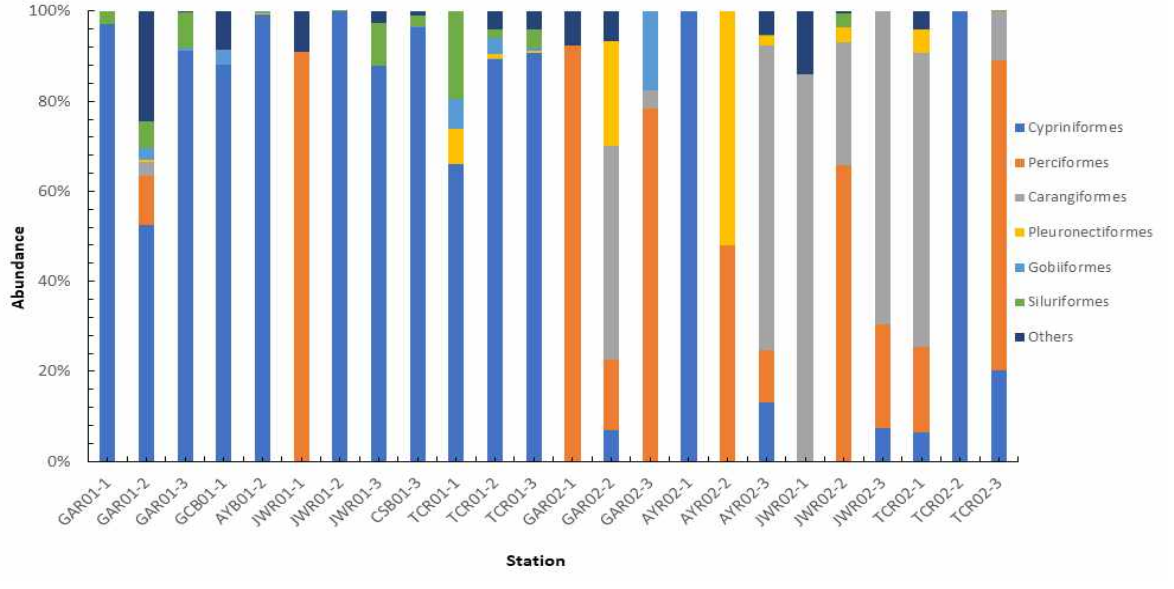


그림 18. 어류 미토콘드리아 16S rDNA 영역의 DNA 메타바코딩 분석을 통해 최종적으로 확보된 ASV의 reads 수를 바탕으로 산출된 조기어강(Actinopteri)과 연골어강(Chondrichthyes)의 하위분류군 목(order) 수준에서 시료별 출현수.

4) 종(Species) 수준의 출현수와 구성비

우리나라 환경수 시료의 어류 미토콘드리아 16S rDNA 영역의 DNA 메타바코딩 분석을 통해 최종적으로 확보된 reads 수와 ASV 수를 바탕으로 조기어강(Actinopteri)과 연골어강(Chondrichthyes)의 하위분류군 종(species) 수준에서 전체 구성비와 시료별 출현수를 분석하였다.

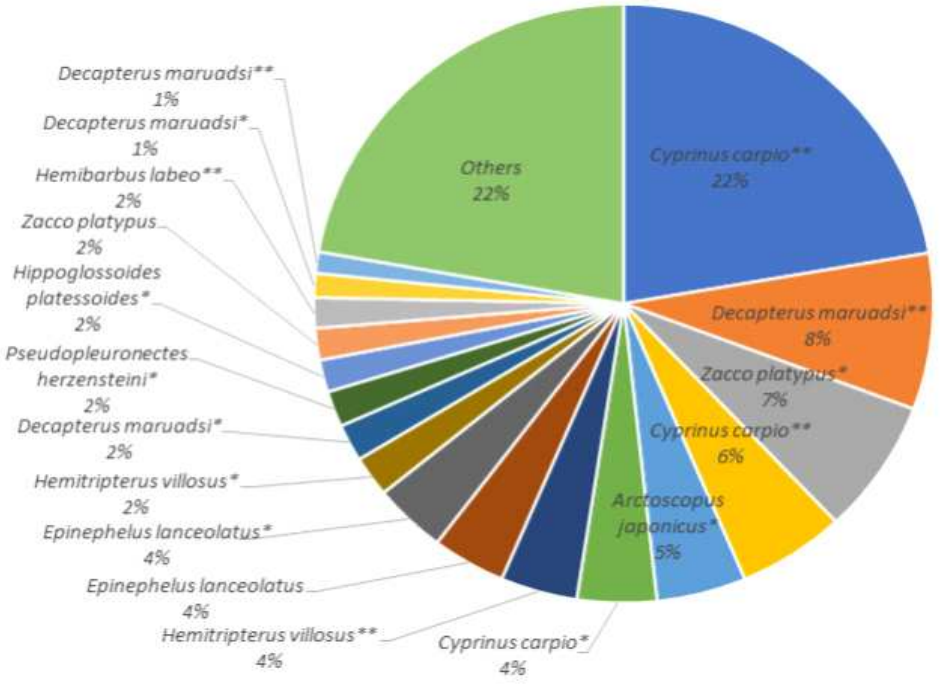


그림 19. 어류 미토콘드리아 16S rDNA 영역의 DNA 메타바코딩 분석을 통해 최종적으로 확보된 ASV의 reads 수를 바탕으로 산출된 조기어강(Actinopteri)과 연골어강(Chondrichthyes)의 하위분류군 종(species) 수준에서 전체 구성비.

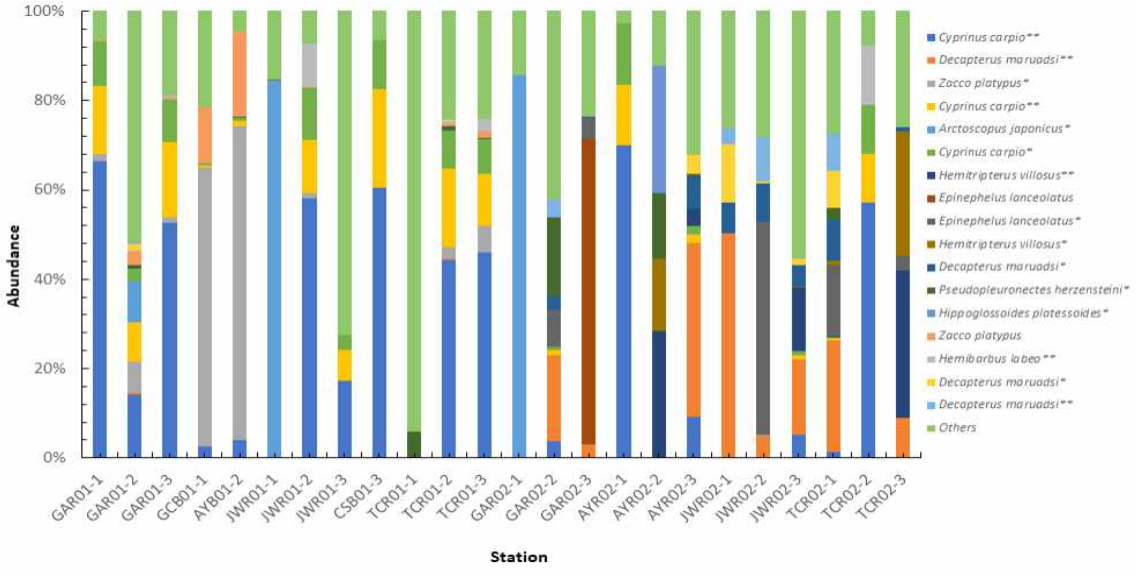


그림 20. 우리나라 환경수 시료의 어류 미토콘드리아 16S rDNA 영역의 DNA 메타바코딩 분석을 통해 최종적으로 확보된 ASV의 reads 수를 바탕으로 산출된 조기어강(Actinopteri)과 연골어강(Chondrichthyes)의 하위분류군 종(species) 수준에서 시료별 출현수.

참 고 문 헌

- Nelson, J. S. 2006. Fishes of the World. 4th Edition. John Wiley & Sons, Hoboken, 601pp.
- 국립수산과학원. 2015. 내수면 수산자원 및 환경조사 매뉴얼. 국립수산과학원 중앙내수면연구소
- 경기개발연구원. 2005. 경기북부 주요 하천 생태계 조사. 경기개발연구원, 101pp.
- 김익수. 1997. 한국동식물도감. 제 37권 동물편(담수어류). 교육부, pp. 133~520.
- 최기철, 전상린, 김익수, 손영목. 2002. 원색 한국담수어도감. 향문사, 278pp.
- Asahida, T., Kobayashi, T., Saitoh, K. and Nakayama, I. 1996. Tissue preservation and total DNA extraction form fish stored at ambient temperature using buffers containing high concentration of urea. Fish. Sci. 62(5):727-730.
- Cradic, K.W., Wells, J.E., Allen, L., Kruckeberg, K.E., Singh, R.J. and Grebe, S.K. 2004. Substitution of 3′-phosphate cap with a carbon-based blocker reduces the possibility of fluorescence resonance energy transfer probe failure in real-time PCR assays. Clin. Chem. 50(6):1080-1082.
- Groendahl, S., Kahlert, M., and Fink, P. 2017. The best of both worlds: A combined approach for analyzing microalgal diversity via metabarcoding and morphology-based methods. PloS ONE 12(2):e0172808.
- Hebert, P.D., Cywinska, A. and Ball, S.L. 2003. Biological identifications through DNA barcodes. Proc. R. Soc. London B: Biol. Sci. 270(1512):313-321.
- Marcelino, V.R. and Verbruggen, H. 2016. Multi-marker metabarcoding of coral skeletons reveals a rich microbiome and diverse evolutionary origins of endolithic algae. Sci. Rep. 6:31508.

▸ Miya, M., Sato, Y., Fukunaga, T., Sado, T., Poulsen, J.Y., Sato, K., Minamoto, T., Yamamoto, S., Yamanaka, H., Araki, H., Kondoh, M. and Iwasaki, W., 2015. MiFish, a set of universal PCR primers for metabarcoding environmental DNA from fishes: detection of more than 230 subtropical marine species. R. Soc. Open Sci. 2, 150088.

▸ Vestheim, H. and Jarman, S.N. 2008. Blocking primers to enhance PCR amplification of rare sequences in mixed samples - a case study on prey DNA in Antarctic krill stomachs. Front. Zool. 2008:5. doi:10.1186/1742-9994-5-12.

한강하구 서식어종 생태조사

김달영 · 송명화 · 양유미 · 한정조 · 김봉현

서 론

한강하구는 민물과 바닷물이 만나는 기수역으로 국내 4대강 중 유일하게 하구둑이 설치되지 않은 국내 유일의 대하천 하구로 임진강과 합류하는 접경지역이 민간인 통제구역으로 지정되어 있다. 따라서 예로부터 보존해온 하구의 원형을 그대로 유지하고 있어 자연성과 원시성이 매우 뛰어난 곳이다. 한국과 북한의 접경지역인 한강하구는 한강과 임진강이 서해로 빠져나가는 출구로서 과거 한반도 중부지역 주운의 핵심 역할을 담당했었다. 그러나 한강하구는 한국전쟁이후 남북한의 군사적 대치 상황으로 인해 지난 60여 년간 정상적인 이용과 활용이 불가능하였다. 또한 본 조사 구간인 파주, 김포 일대는 아직 민간인의 출입이 엄격히 통제되는 철책선 내의 지역이다(환경부, 2009).

한강 상류에서 흘러 내려온 담수와 조수 간만에 따라 서해로부터 드나드는 염수가 만나 내륙의 담수 수역이나 연안의 해수 수역에서는 찾아볼 수 없는 독특한 생태계 형성하고 있어 이의 보존과 정밀조사 및 연구가 지속적으로 필요한 요충지역이라고 할 수 있다.

한강 하구역에 대한 생태계의 조사는 주로 행주대교 위쪽, 즉 행정구역상 서울 수계에 해당하는 수역에서만 서울시 주관으로 단편적인 조사가 수행되어 왔다(서울시, 1988, 1990, 1994, 1998, 2002). 실질적인 한강하구인 행주대교와 신곡수중보의 하류 수역에 대한 어류상의 조사는 환경부와 국립환경과학원에서 실시한 '2004년 하구역생태계정밀조사' 가 있었으나 당시 서울시 밤섬에서 시작하여 경기도 김포시 월곶면 조강리 개화천 하류수역까지 광범위한 조사지역을 7개 지점으로 설정하여 조사가 이루어졌기 때문에 한강하구의 생태계에 관한 조사는 매우 미비한 실정이다.

따라서 본 연구에서는 임진강(파주)과 한강(김포)지역에서 3개의 지점을 선정하여 한강하구역을 대상으로 어류의 종류상 및 서식양상을 밝히고자 하였다. 특히 그간 한강하구역은 우리나라가 처해있는 군사적 특수성으로 인해 생물상에 관한 연구가 거의 이루어지지 못한 지역이며, 최근에는 극심한 수도권 도시개발의 영향권에 속해 있는 지역이기에 이번 조사를 통해 현 시점에서의 한강 하구역 어류상을 살펴보고 앞으로 있을 연구에 기초 자료를 제공하고자 한다.

재료 및 방법

본 조사는 임진강(파주)과 한강(김포 전류리)을 구분하여 조사를 수행하였으며, 상반기(6월), 하반기(10월)에 조석시기를 고려하여 조사를 수행하였다. 조사 대상지역은 그림 1과 같이 선정하였으며, 각 어촌계에서 어업활동을 수행하는 장소를 조사 지점으로 선정하였다(그림 1).



그림 1. 한강하구 조사지역

조사 인원은 총 2~3명이 각 어촌계를 관할하는 군부대의 사전 허가를 취득 후 각 어촌계장의 동행하에 어선을 이용하여 현지에서 사용하는 삼각망, 자망 등을 이용하여 조사를 수행하였다.

조사 시 환경요인을 분석하기 위해 수질항목 중 수온, 염분, 용존산소 등 11개 항목을 측정하였으며, 채집된 어류는 출현한 종 동정 및 개체수를 산출하고 현장에서 재방류하였다. 종 동정이 어려운 종은 10% 포르말린으로 고정하여 연구소로 이송하여 동정하였으며. 채집한 어류의 종 동정은 김(1988) 및 최 등(2002)을 따랐고, 분류체계 및 학명은 Nelson(1994)을 따랐다.

또한 수산물안전성검사를 병행하기 위하여 채집된 개체를 각 어촌계장의 동의하에 냉동 보관 후 실험실로 이동하여 분석하였다.

결 과

한강하구 일대 어류 조사 결과, 총 9목 12과 25종의 어류가 채집되었으며, 잉어목(Cypriniformes) 1과 9종으로 가장 많았고, 농어목(Perciformes)이 3과 6종, 메기목(Siluriformes) 2과 3종, 숭어목(Mugiliformes) 1과 2종, 뱀장어목(Anguilliformes), 청어목(Clupeiformes), 복어목(Tetraodontiformes), 쏨뱅이목(Scorpaeniformes)이 각각 1과 1종 출현하였다. 그 외 절지동물문(Arthropoda)의 참게(Eriocheir sinensis)가 1종 출현하였다.

조사 수역은 깊은 펄로 수변부에 접근하기 매우 어렵고 조수에 따라 물이 차는 곳이 다르기 때문에 향후 조사 시기에 따라 어종과 개체수의 변화, 수질환경의 변화가 예상된다. 그러나 출현한 개체는 우리나라 서해로 흐르는 큰 강에서 나타나는 일반적인 어류상의 특징을 보였다(표 2).

수질 환경요인으로는 기초환경의 경우 일반적인 결과를 보였으나, 탁도, 전기전도도, 부유물질 등 그 외 항목이 조사 시기에 따라 큰 변화를 보이는 것으로 확인되었는데 이는 조석에 의한 수심의 변화 및 유량의 변화에 따라 수질 환경이 변화한 것으로 판단되기 때문에 장기적인 모니터링을 통해 대상 지역의 수질 변화 요인 등을 파악해야 할 것으로 판단된다(표 1).

표 1. 한강하구 수질환경 조사 결과

조사항목	파주(내포리)		김포(전류리)	
	상반기	하반기	상반기	하반기
일 자	6/22	10/13	6/23	10/14
수온(℃)	29.5	16.2	26.8	17.8
DO(㎎/L)	13.94	9.68	8.9	8.3
pH	9.30	8.01	8.11	7.66
Salinity(psu)	0.22	0.08	0.98	0.73
전기전도도(㎲/cm)	512	142.7	1541	1252
BOD(㎎/L)	2.0	0.5	0.6	0.6
COD(㎎/L)	5.3	2.2	2.9	5.7
T-N(㎎/L)	1.7	2.0	4.2	3.5
T-P(㎎/L)	0.080	0.026	0.095	0.057
TOC(㎎/L)	5.4	2.2	4.4	3.7
SS(㎎/L)	5.5	12.5	114.7	121.0

표 2. 2022년 한강하구 출현 종 목록

종 목록		상반기		하반기	
		파주	김포	파주	김포
Chordata	척삭동물문				
Anguilliformes	뱀장어목				
Anguillidae	뱀장어과				
Anguilla japonica	뱀장어			*	
Siluriformes	메기목				
Bagridae	동자개과				
Leiocassis nitidus	밀자개		*	*	**
Pseudobagrus fulvidraco	동자개			*	
Siluridae	메기과				
Silurus asotus	메기	*			
Cypriniformes	잉어목				
Cyprinidae	잉어과				
Carassius carassius	붕어			*	
Carassius cuvieri	떡붕어		*		
Cyprinus carpio	잉어		*		
Erythroculter erythropterus	강준치		*	**	
Hemibarbus labeo	누치	*	***	*	**
Hemiculter leucisculus	살치	*	*	*	**
Opsarichthys uncirostris amurensis	끄리	*		**	
Saurogobio dabryi	두우쟁이	*		*	
	모래무지	**		*	
Clupeiformes	청어목				
Engraulidae	멸치과				
Coilia nasus	웅어	*	**	*	*
Perciformes	농어목				
Gobiidae	망둑어과				
Odontamblyopus rubicundus	개소갱		**		
Synechogobius hasta	풀망둑				**
Tridentiger obscurus	검정망둑	*	**		*
Tridentiger trigonocephalus	두줄망둑	*			*
Moronidae	농어과				
Lateolabrax maculatus	점농어	*	*	*	**
Callionymidae	돛양태과				
Repomucenus olidus	강주걱양태				
Mugiliformes	숭어목				
Mugilidae	숭어과				
Liza haematocheila	가숭어	*	**	**	
Mugil cephalus	숭어	**		**	*
Scorpaeniformes	쏨뱅이목				
Cottodae	둑중개과				
Trachidermus fasciatus	꺽정이	**		**	
Tetraodontiformes	복어목				
Tetraodontidae	참복과				
Takifugu obscurus	황복	**	**		
Arthropoda	절지동물문				
Decapoda	십각목				
Varunidae	참게과				
Eriocheir sinensis	참게		*	**	
*1-5개체, **6-15개체, ***16-30개체 ****〉 30					

사진 1. 한강하구 조사 사진

참 고 문 헌

- Nelson, J. S. 2006. Fishes of the World. 4th Edition. John Wiley & Sons, Hoboken, 601pp.
- 김익수. 1997. 한국동식물도감. 제 37권 동물편(담수어류). 교육부, pp. 133~520.
- 최기철, 전상린, 김익수, 손영목. 2002. 원색 한국담수어도감. 향문사, 278pp.
- 환경부. 2009. 한강하구 습지보호지역 모니터링 결과보고서

Ⅵ 수산생물 위해요소 모니터링

1. 염분농도별 흰다리새우의 질병 감염력 비교 연구

2. 경기연안 미세플라스틱 오염 모니터링

3. 경기바다 방사능 오염 모니터링 연구

변화의 중심
기회의 경기

염분농도별 흰다리새우의 질병 감염력 비교연구

- 도내 흰다리새우 질병 모니터링 및 사육 염분농도 조사 -

조기택 · 조혜인 · 이효진 · 김광범 · 김봉현

서 론

흰다리새우(*Litopenaeus vannamei*)는 주요 양식품종의 하나이며, 국내 뿐만 아니라 전세계적으로 양식되고 있다. 국내 흰다리새우 양식생산량은 2018년까지 약 5천톤 가량 생산되었으며, 2019년 7,542톤, 2020년 8,124톤을 생산하여 꾸준히 증가하는 추세다(출처 : 수산정보포털). 하지만 여전히 흰다리새우 양식장에서 흰반점바이러스병(White Spot Syndrome Virus disease, WSSVD)과 같은 질병으로 인해 해마다 대량폐사가 발생하고 있다.

이러한 흰다리새우 양식의 문제점을 해결하기 위해, 최근 저염분에서 흰다리새우를 양식하는 방법에 대한 관심도가 증대되고 있다. 흰다리새우는 광염성 품종으로 1~30‰에서 생존이 가능하며, 일반적으로 해안 근처에서 30‰의 해수를 사용하여 양식되어진다. 흰다리새우를 염분이 낮은 환경과 일반 해수에서 사육한 결과를 비교하여, Na^{+}, Ca^{2+}와 같은 이온의 역할이 염분 변화에 비해 더 주요한 것으로 확인되었다(Valenzuela-Madrigal et al., 2017). 또한, 저염분에 사육한 흰다리새우는 혈장 삼투압이 가장 큰 영향을 미치는 것으로 확인되었으며(Jeon et al., 2021), 저염분 사육시 probiotics의 첨가가 생존율을 올려줄 수 있다는 연구 결과도 보고된 바 있다(Bae et al., 2020). 이러한 문제들에도 불구하고, 눈에 띄는 경제적 수익 창출이 보장되어 전세계적으로 내륙에서의 흰다리새우 양식이 각광을 받고있다(Davis et al., 2002; Jaffer et al., 2020). 국내에서도 내륙에서 흰다리새우를 양식하는 빈도가 늘어나고 있는 실정이며(Jeon et al., 2021), 염분이 포함된 지하수를 사용하거나 담수를 이용해 저염분에 순치시키는 방법을 사용하고 있다.

최근 전세계적으로 흰다리새우와 얼룩새우에 *Enterocytozoon hepatopenaei*(EHP)의 감염으로 인한 HPM 발생이 보고되고 있다. EHP는 미포자충문의 한 종류로서, Small subunit ribosomal RNA(SSU rRNA)를 암호화하고 있는 유전자에 특이적으로 제작된 primer로 검출이 가능하다(Tangprasittipap et al., 2013). HPM은 다른 질병과 달리 대량폐사를 일으키지 않기

때문에, 주요 증상으로 두드러진 성장저하가 나타나기 전에는 감염을 알아차리기 힘든 어려움이 있다. 국내에서도 이미 EHP의 감염이 보고된 사례가 보고되고 있어, 해당 질병에 대한 모니터링이 더욱 필요한 실정이다.

비만도(Condition factor, CF)는 양식 수산생물의 건강상태를 볼 수 있는 지표중 하나로, 흰다리새우를 포함한 다양한 어종에 대해 쓰이고 있다(Khademzadeh et al., 2017; Prajapati and Ujjania, 2021). CF는 영양상태의 변화를 추정할 수 있으며, 양식장에서 사료 흡수율과 같은 사육상태와 건강상태를 평가하는데 도움을 준다(Prajapati and Ujjania, 2022) 또한 polyethylene lined pond에서 양식된 흰다리새우의 CF는 0.5~1.0의 범위에 속하며, 이는 건강한 정도를 나타낸다고 평가하였다(Prajapati and Ujjania, 2022).

따라서 본 연구에서는 도내 흰다리새우 양식을 현장 방문하여, 입식량 등 양식현황과 사육 염분농도에 대해 조사하였다. 또한, 출하 예정인 흰다리새우를 시료채취하여 질병 모니터링을 실시하고, 체장 및 체중 자료로 비만도를 산정하여 상대적인 건강정도를 파악하고자 하였다.

재료 및 방법

1. 대상양식장 선정 및 시료채취

도내에 소재하는 흰다리새우 양식장 28개소를 대상양식장으로 선정하였다. 도내 흰다리새우의 양식현황을 파악하기 위해, 2022년 흰다리새우 생산을 위한 종자 입식량을 조사하였다. 흰다리새우 시료는 양식장마다 5마리씩 시료를 채취하였고, 평균적인 출하용 크기인 평균 40g 정도의 개체를 사용하였다. 시료는 살아있는 상태의 개체를 채취하였고, 4℃로 유지하며 연구소로 이송하였다. 개체는 체장(㎝)과 체중(g)을 측정하였고, 간췌장을 마쇄하여 분석시료로 사용하였다.

흰다리새우 양식장의 사육 염분농도를 조사하기 위해, 현장에서 HQ40d(Hach, USA)를 사용하여 염분농도(‰)를 측정하였다. 결과값은 3번 반복측정하여 나온 값의 평균으로 나타내었다.

2. 핵산(DNA) 분리

흰다리새우의 병원체 여부를 확인하기 위하여, DNeasy Blood&Tissue mini kit (QIAGEN, Germany)로 Total DNA를 분리하였다. 방법은 다음과 같다. 조직을 소량의 3차 증류수가 첨가된 원심관에 모아 마쇄하였다. 마쇄한 시료 50㎕에 ALT buffer와 proteinase K를 첨가한 후, 56℃에서 10분 이상 가열하여 조직을 녹인다. 여기에 AL buffer를 넣고 잘 섞은 후,

Ethanol을 첨가하여 DNA를 침전시킨다. 이 시료를 Spin column에 넣고 12,000rpm으로 1분간 원심분리하여 통과시킨 후, AW1과 AW2 buffer를 차례대로 column에 통과시켜 세척단계를 거친다. 마지막으로 동일한 속도로 2분간 원심분리하여 잔여 buffer를 제거하고 AE buffer에 녹여내어 이를 Total DNA 시료로 사용한다. 시료는 분석전까지 -80℃에 보관하였다.

3. 세균 배양

흰다리새우의 세균성 질병의 감염 여부를 확인하기 위하여, 흰다리새우 시료의 간췌장에서 세균배양을 실시하였다. 간췌장을 무균적으로 절단한 다음, 절단면을 고체 배양배지 표면에 도말하였다. 사용한 배지는 *Vibrio* spp. 선택배지인 TCBS 배지(BB, USA)를 사용하였다. 배양이 확인된 단일 colony는 TSB 배지에서 증균하여 실험에 사용하였다. 모든 균주는 균주액과 glycerol을 20% 첨가하여 -80℃에서 보관한 다음, 분석전에 배양배지에 활성화시켜 사용하였다.

4. PCR

흰다리새우의 기생충성 질병 중 하나인 HPM의 진단을 위해 conventional PCR을 수행하였고, 방법은 다음과 같다. 10X PCR buffer 2㎕, 200μM의 각각의 dNTP, 1μM의 Sense primer와 antisense primer(Table 2), Taq DNA polymerase (Taq DNA polymerase, Cosmo, Korea) 및 template 1㎕를 첨가한 후 distilled water로 최종액의 volume이 20㎕가 되도록 했다. PCR 혼합물은 MasterCycler Nexus gradient (Eppendorf, Germany)를 사용하여, 94℃에서 3분간 pre-denaturation 시킨 후, 94℃에서 30초 denaturation, 55℃에서 30초 annealing, 72℃에서 30초 extension의 반응을 30 cycle 수행한 후 72℃에서 7분간 post-extension 시켰다. PCR 후 증폭 산물은 전기영동하여 결과를 확인하였다.

5. Sequencing

PCR에서 검출된 증폭산물의 염기서열 정보를 확인하기 위하여 Sequencing을 실시하였다. 분석은 Applied Biosystems 3500 series(Thermo Fisher, USA) 장비를 사용하여 실시하였고, 방법은 다음과 같다.

증폭산물은 primer 등 dimer를 제거하기 위해, ExoSAP(Thermo Fisher, USA) 5㎕와 PCR product 2㎕를 혼합하여 37℃에서 15분간, 80℃에서 15분간 반응시켰다. 증폭이

끝난 후에는 BigDye Terminator Sequencing kit(Thermo Fisher, USA)로 Sequencing PCR을 수행하였다. BigDye Therminator reagent 4㎕, sense or antisense primer 1㎕, D·W 1㎕, template 4㎕를 혼합하여 96℃에서 1분간 반응시킨 후, 96℃에서 10초, 50℃에서 5초, 60℃에서 4분간 25번 반복적으로 반응시켰다. Sequencing PCR이 완료된 tube에 BigDye XTerminator kit(Thermo Fisher, USA)의 SAM solution 45㎕, BigDye XTerminator 10㎕를 넣어 혼합하였다. 2,000rpm에서 30분간 강하게 혼합시키고, 1,000×g에서 2분간 원심분리한 다음, 장비에 넣고 염기서열 분석을 실시하였다. 염기서열 정보는 BioEdit program(Version 7.0.5.3)을 사용하여 Alignment를 실시하였다.

6. 통계학적 분석

모든 통계분석은 SPSS Ver. 20(SPSS Inc., USA) 통계 프로그램을 사용하였으며, one-way ANOVA test를 실시하였다. 유의성은 Duncan의 방법으로 다중검정을 실시하여 확인하였다($P<0.05$).

Table 2. PCR Primers for detection of *Enterocytozoon hepatopenaei*(EHP)

Target gene	Primer	Oligonucleotide sequence (5'→3')	Amplicon (bp)	Reference
SSU rRNA	ENF779	CAGCAGGCGCGAAAATTGTCCA	779	Tangprasittipap et al., 2013
	ENR779	AAGAGATATTGTATTGCGCTTGCTG		
	ENF176	CAACGCGGGAAAACTTACCA	176	
	ENR176	ACCTGTTATTGCCTTCTCCCTCC		
SWP (Spore wall protein)	SWP_1F	TTGCAGAGTGTTGTTAAGGGTTT	514	Jaroenlak et al., 2016
	SWP_1R	CACGATGTGTCTTTGCAATTTTC		
	SWP_2F	TTGGCGGCACAATTCTCAAACA	148	
	SWP_2R	GCTGTTTGTCTCCAACTGTATTTGA		

결과 및 고찰

1. 도내 흰다리새우 양식장 현황조사

본 연구에서의 대상으로 선정한 흰다리새우 양식장 28개소에 대하여, 종자의 입식 현황과 사육수 염분농도(‰)를 조사하였다. 흰다리새우 양식장은 평택에 가장 소재하고 있었으며(화성 10, 안산 3, 평택 12, 김포 3), 2022년 종자 입식량은 평균 993천마리(150~6,000)로 확인되었다(Table 3). 사육수 염분농도는 14.54‰(2.59~34.40)으로 나타났으며, 일반적으로 흰다리새우가 양식되는 염분농도인 30‰보다 약 1/2배 낮음을 알 수 있었다.

2. 기생충성 질병 모니터링

최근 전세계적으로 흰다리새우(*Litopenaeus vannamei*)와 얼룩새우(*Penaeus monodon*)에서 간췌장 미포자충병(HPM, Hepatopancreatic microsporidiosis)의 감염으로 인한 피해가 보고되고 있다(Chaijarasphong et al., 2021). 국내에서도 흰다리새우 양식장에서 HPM이 보고된 바 있어(KIm et al., 2022) , 해당 병원체에 대한 관리가 시급한 실정이다. HPM은 미포자충문에 속하는 세포내 기생성 원충병인 EHP(*Enterocytozoon hepatopenaei*)가 원인체로 알려져 있으며, 특별한 임상증상과 폐사는 없으나 뚜렷한 성장둔화를 일으켜 양식 생산량에 피해를 준다(Chaijarasphong et al., 2021). 따라서 본 연구에서는 대상양식장에서 사육중인 흰다리새우에 EHP의 감염여부를 확인하고자 하였다. 그 결과, 2개소에서 4건이 검출되었으며, 유병률(prevelance)은 40%로 확인되었다(Table 3). 검출된 PCR product에 대해 sequencing을 실시하였고, 확인된 유전자 염기서열을 reference로 사용된 염기서열(KF362130)을 기준으로 나열하여 비교분석하였다(Fig. 1). 그 결과, 많은 부위의 nucleotide가 KF362130과 다름을 확인하였고, NCBI에서 BLAST하여 *Hepatospora eriocheir*와의 상동성이 98.27%로 가장 유사하였다(data not shown). *Hepatospora eriocheir*는 유럽에서 채집된 Chinese mitten crabs(*Eriocheir sinensis*)에서 감염이 확인되었다고 보고된 바 있다(Stentiford et al., 2011). 또한, EHP의 염기서열과 약 85%의 상동성을 나타냈으며, *Paranucleospora, Desmozoon* 등 다양한 미포자충문과도 80~85% 정도의 상동성을 확인하였다(data not shown). 반면, 국내 흰다리새우에서 검출된 EHP의 SSU rRNA 염기서열은 아시아에서 유래한 EHP와 99% 이상의 유사하였으며, 남미의 분리주와도 97.8%의 상동성이 확인되었다(Kim et al., 2022). 본 연구에서 분리된 EHP의 상동성 결과는 다른 결과들에 비해 상대적으로 낮으므로, HPM을 유발하는 EHP와는 다른 종인 것으로 판단된다. 또한, 본 연구에서의 PCR은 대부분의 미포자충이 보유한 SSU tRNA 유전자를 대상으로 하였으므로, 단순 PCR을 통한 정성분석에서는 위양성의 결과가 나온 것으로 여겨진다. 따라서 도내 흰다리새우 양식은 HPM을 유발하는 EHP에 대해 안전하며, 향후에도 지속적인 모니터링으로 질병관리를 추진할 계획이다.

Table 3. The Results of aquaculture sites for whiteleg shrimp in Gyeonggi Province

No.	Sampling site		Location[a]	Salinity[b] (‰)	The amount of shrimp seed (thousand individual)	Detection of pathogens[c]	
						EHP	*Vibrio* spp.
1	Hwaseong (10)	GGSA-HS1	Inland(P)	7.78	150	-	+ (1)
2		GGSA-HS2	Inland(P)	7.80	300	-	+ (1)
3		GGSA-HS3	Inland(P)	7.15	150	-	+ (1)
4		GGSA-HS4	Coast(P)	8.06	500	-	+ (2)
5		GGSA-HS5	Coast(P)	15.78	3,000	-	-
6		GGSA-HS6	Coast(P)	ND	1,000	-	ND
7		GGSA-HS7	Coast(P)	ND	1,000	-	ND
8		GGSA-HS8	Coast(P)	ND	7,000	-	ND
9		GGSA-HS9	Coast(P)	15.90	1,000	-	-
10		GGSA-HS10	Inland(T)	34.40	600	-	-
11	Ansan (3)	GGSA-AS1	Coast(P)	15.97	500	+ (2)	+ (1)
12		GGSA-AS2	Coast(P)	22.80	420	+ (2)	+ (1)
13		GGSA-AS3	Inland(T)	28.30	6,000	-	+ (2)
14	Pyeongtaek (12)	GGSA-PT1	Inland(P)	25.90	300	-	-
15		GGSA-PT2	Inland(P)	18.49	350	-	-
16		GGSA-PT3	Inland(P)	18.50	350	-	-
17		GGSA-PT4	Inland(P)	2.59	400	-	-
18		GGSA-PT5	Inland(P)	4.35	1,000	-	-
19		GGSA-PT6	Coast(P)	12.84	50	-	+ (1)
20		GGSA-PT7	Inland(P)	28.90	600	-	-
21		GGSA-PT8	Inland(P)	7.06	120	-	+ (1)
22		GGSA-PT9	Inland(P)	5.33	200	-	-
23		GGSA-PT10	Inland(P)	11.66	300	-	+ (1)
24		GGSA-PT11	Inland(P)	20.45	600	-	+ (1)
25		GGSA-PT12	Inland(P)	11.29	400	-	-
26	Gimpo (3)	GGSA-GP1	Coast(P)	5.79	600	-	-
27		GGSA-GP2	Coast(P)	18.61	400	-	+ (2)
28		GGSA-GP3	Coast(P)	7.88	510	-	-

[a] : P, aquaculture pond; T, aquaculture tank

[b] : ND, Not determined

[c] : The value in parentheses is the number of pathogen detected. +, Positive; -, Negative

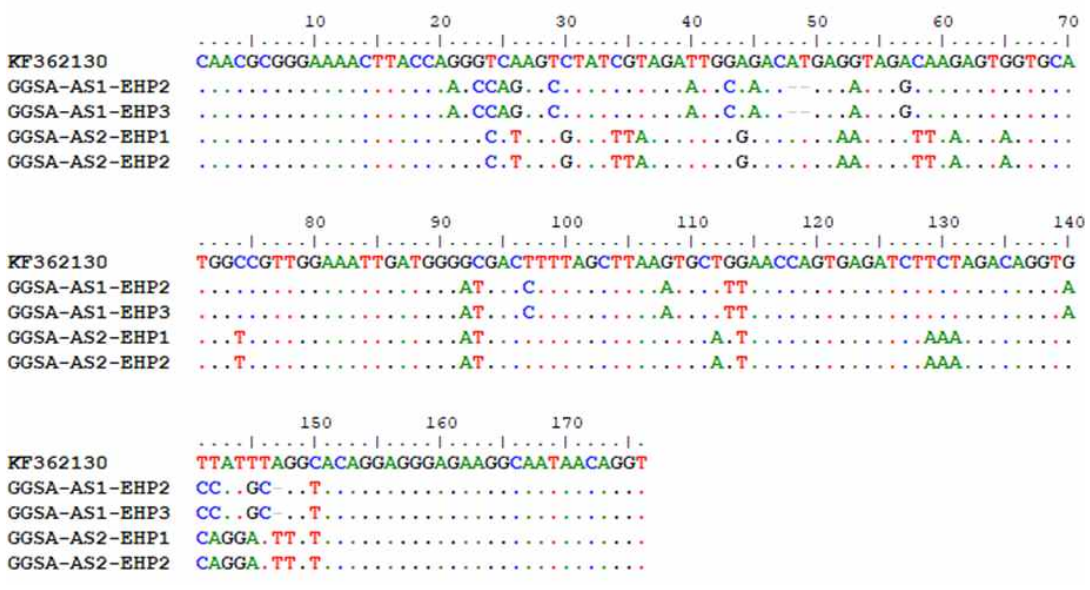


Fig. 1. Alignment database of sequence of EHP detected from whiteleg shrimp in this study. KF362130, reference sequence from NCBI website.

2. *Vibrio* spp. 모니터링

Vibrio spp.는 자연 해수에 존재하며, 흰다리새우를 포함한 양식생물에 세균성 질병을 일으킨다. 특히 *Vibrio parahaemolyticus*와 같이 대량폐사를 유발시킴으로써(Han et al., 2015), 양식 수산생물에서는 매우 중요한 병원체라고 할 수 있다. 따라서 본 연구에서는 도내에서 채집한 흰다리새우 시료를 대상으로 *Vibrio* spp.의 감염 여부를 조사하였다. 그 결과, 총 15개의 *Vibrio* spp.가 분리되었으며, *Photobacterium damselae*가 33.3%로 가장 많이 확인되었다(Table 4). 또한 어병세균으로 잘 알려진 *V. harveyi*도 검출되었으나, 모든 흰다리새우 시료에서는 어병세균에 의한 임상증상은 확인되지 않았다(data not shown).

3. 염분농도에 따른 흰다리새우 비만도 분석

흰다리새우는 체장(Body length)와 체중(Body weight)로 건강상태를 확인하기 위한 비만도(Condition factor)를 측정할 수 있으며(Khademzadeh et al., 2017; Prajapati and Ujjania, 2021), 측정산식은 아래와 같다.

$$\text{Condition factor(CF)} = W / L^3 \times 10^5$$

- W : Body weight (g)
- L : Body Length (mm)

본 연구에서는 양식장마다 5마리씩의 흰다리새우를 시료채취하였고, 모든 시료는 체중과 체장을 측정하였다. 측정자료를 토대로 CF를 측정한 결과, 0.597-0.831의 범위를 확인하였다. 이러한 결과는

흰다리새우에 대한 CF를 측정한 다른 연구결과와도 유사하였으므로(Valenzuela-Madrigal et al., 2017), 도내에서 양식되는 흰다리새우는 대체로 건강한 정도로 판단된다.

사육수의 염분농도에 따른 CF 차이를 확인하기 위하여, 염분농도가 가장 높은 3개소(H1-3)와 가장 낮은 3개소(L1-3)의 자료를 비교하였다. 그 결과, 염분농도가 20‰ 이상인 3개소의 CF가 5‰ 이하인 3개소의 CF에 비해 유의성있게 높은 것을 확인하였다(Fig. 2). 또한, 그룹내에서도 유의성 있는 차이가 확인되었으나, 염분농도의 순서와는 연관관계가 없었다. Valenzuela-Madrigal et al.(2017)의 연구결과에 따르면, 낮은 염분농도에서 *Litopenaeus vannamei*의 생존율에서는 해수에서 유의성 있게 높았으나, CF는 통계적인 차이를 확인하지 못하였다, 따라서, 새우류의 양식에서는 필수이온(Na^+, K^+, Mg^{2+}, Ca^{2+})의 비율이 더 중요한 역할을 한다는 것을 알 수 있다(Valenzuela-Madrigal et al., 2017). 본 연구에서는 염분농도 이외에 필수적인 이온들의 농도까지는 조사하지 않았으며, 확인된 CF의 차이 또한 매우 크다고 볼 수 없었다. 따라서 저염분 흰다리새우 양식이 성장에 불리하다고 판단하기에는 무리가 있으며, 본 연구에서 비만도 지표를 적용하여 통계적으로 흰다리새우의 성장과 건강도를 유추하였다는 데 의의가 있다.

Table 3. The morphometrics result of shrimp aquaculture sites in Gyeonggi Province

Sampling site	Average value of individual shrimp		Condition factor
	Length(cm)	Weight(g)	
GGSA-HS1	16.94	37.76	0.777
GGSA-HS2	16.76	38.20	0.812
GGSA-HS3	18.26	38.35	0.630
GGSA-HS4	17.34	33.18	0.636
GGSA-HS5	17.13	41.76	0.831
GGSA-HS9	17.56	41.26	0.762
GGSA-AS1	17.29	33.84	0.654
GGSA-AS2	17.84	36.81	0.649
GGSA-AS3	14.20	21.05	0.735
GGSA-PT1	20.08	55.26	0.683
GGSA-PT2	18.92	42.15	0.622
GGSA-PT3	18.84	44.06	0.659
GGSA-PT4	16.88	27.41	0.570
GGSA-PT5	16.86	30.71	0.641
GGSA-PT6	19.21	52.17	0.736
GGSA-PT7	17.71	40.09	0.722
GGSA-PT8	16.33	26.01	0.597
GGSA-PT9	16.83	30.49	0.640
GGSA-PT10	14.90	24.36	0.736
GGSA-PT11	17.79	43.44	0.772
GGSA-GP1	14.40	22.21	0.744
GGSA-GP2	16.69	36.18	0.778
GGSA-GP3	19.48	60.79	0.823

* : ND, Not determined

Table 4. Identificaton of *Vibrio* spp. isolated from whiteleg shrimp in this study

Isolate	Identification from sequencing
GGSA-HS3-V1	*Photobacterium damselae*
GGSA-HS4-V1	*Photobacterium damselae*
GGSA-HS4-V2	*Photobacterium damselae*
GGSA-PT6-V1	*Vibrio harveyi*
GGSA-AS1-V1	*Vibrio rotiferianus*
GGSA-AS2-V1	
GGSA-PT8-V2	*Vibrio alginolyticus*
GGSA-PT10-V1	*Vibrio owensii*
GGSA-PT11-V1	*Vibrio communis*
GGSA-HS1-V1	*Vibrio owensii*
GGSA-HS2-V1	*Vibrio owensii*
GGSA-GP2-V1	*Photobacterium damselae*
GGSA-GP2-V2	*Photobacterium damselae*
GGSA-AS3-V1	*Vibrio rotiferianus*
GGSA-AS3-V2	*Vibrio parahaemolyticus*

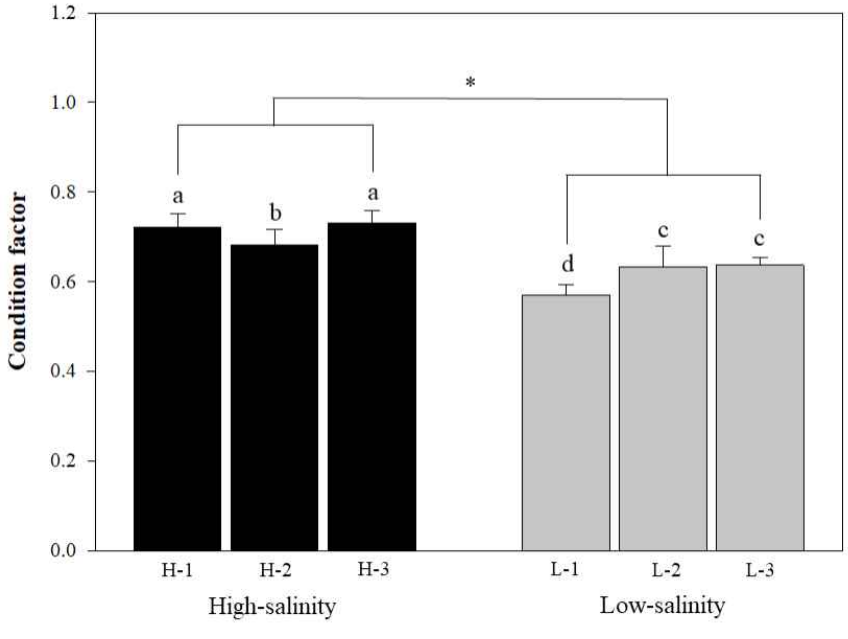


Fig. 2. Comparison of condition factor(CF) between high(black bar) and low(gray bar) salinity group. Each group was used CF value from three sites in order of highest and lowest salinity(high, over 20‰; low, less than 5‰). The asterisk means that two group are significantly different($p<0.05$). The letter above the bars mean that each CF values are significantly different($p<0.05$).

참 고 문 헌

- Jeon, Y.H., Lee, J.M., Kim, S. K., & Kim, S.K. 2021. Effect of Acclimation Methods on Physiological Status of Pacific White Shrimp *Litopenaeus vannamei* Bred in Low Salinity Biofloc. Korean Journal of Fisheries and Aquatic Sciences, 54(5), 761-768. https://doi.org/10.5657/KFAS.2021.0761

- Bae, J. S., Lee, C. W., Yang, C. Y., Jeong, E. H., Kim, E.-J., & Park, K. H. 2020. Effect of low salinity probiotics on the growth and non-specific immunity of whiteleg shrimp *Litopenaeus vannamei* cultured under low salinity conditions. Journal of Fish Pathology, 33(2), 145-151. https://doi.org/10.7847/JFP.2020.33.2.145

- Kim, JH, Lee C, Jeon HJ, Kim BK, Lee NK, Choi SK, Han JE. 20022. First report on *Enterocytozoon hepatopenaei* (EHP) infection in Pacific white shrimp (*Penaeus vannamei*) cultured in Korea. Aquaculture, 547, 737525. https://doi.org/10.1016/j.aquaculture.2021.737525.

- Tangprasittipap, A., Srisala, J., Chouwdee, S., Somboon, M., Chuchird, N., Limsuwan, C., Srisuvan, T., Flegel, T.W. & Sritunyalucksana, K.. 2013. The microsporidian *Enterocytozoon hepatopenaei* is not the cause of white feces syndrome in whiteleg shrimp *Penaeus (Litopenaeus) vannamei*. *BMC Vet Res* 9, 139. https://doi.org/10.1186/1746-6148-9-139

- Jaroenlak, P., Sanguanrut, P., Williams, B. A. P., Stentiford, G. D., Flegel, T. W., Sritunyalucksana, K., Itsathitphaisarn, O.. 2016. A Nested PCR Assay to Avoid False Positive Detection of the Microsporidian *Enterocytozoon hepatopenaei* (EHP) in Environmental Samples in Shrimp Farms. PLOS ONE 2016 Vol. 11 Issue 11 Pages e0166320. https://doi.org/10.1371/journal.pone.0166320

- Chaijarasphong, T., Munkongwongsiri, N., Stentiford, G. D., Aldama-Cano, D. J., Thansa, K., Flegel, T. W., Sritunyalucksana, K., Itsathitphaisarn, O.. 2021. The shrimp microsporidian *Enterocytozoon hepatopenaei* (EHP): Biology, pathology, diagnostics and control. Journal of Invertebrate Pathology, Volume 186, 107458, https://doi.org/10.1016/j.jip.2020.107458.

- Kim, J. H., Lee, C., Jeon, H. J., Kim, B. K., Lee, N.-k., Choi, S.-K., & Han, J. E. 2022. First report on *Enterocytozoon hepatopenaei* (EHP) infection in Pacific white shrimp (*Penaeus vannamei*) cultured in Korea. Aquaculture, 547. https://doi.org/10.1016/j.aquaculture.2021.737525

- Ricker WE. 1979. Growth rates and models. In: Hoar WS, DJ Randall & JR Brett (eds). Bioenergetics and growth. Fish Physiology 7: 677-743. Academic Press, New York.

- Chow S & PA Sandifer. 1991. Differences in growth, morphometric traits, and male sexual maturity among Pacific white shrimp, *Penaeus vannamei*, from different commercial hatcheries. Aquaculture 92: 165-179.

- Khademzadeh, O., & Haghi, M. 2017. Length-weight relationship and condition factor of white leg shrimp Litopenaeus vannamei (Boone, 1931) in culture systems of Choebdeh, West-South of Iran. International Journal of Fisheries and Aquatic Studies, 5, 298-301.

- Prajapati, S. D., & Ujjania, N. C. 2021. Study on length weight relationship and condition factor of whiteleg shrimp *Litopenaeus vannamei* (Boone, 1931) cultured in earthen pond, Khambhat (Gujarat). International Journal of Fauna and Biological Studies, 8(1), 67-70. https://doi.org/10.22271/23940522.2021.v8.i1b.792

- Valenzuela-Madrigal, I. E., Valenzuela-Quiñónez, W., Esparza-Leal, H. M., Rodríguez-Quiroz, G., & Aragón-Noriega, E. A. 2017. Effects of ionic composition on growth and survival of white shrimp *Litopenaeus vannamei* culture at low-salinity well water. Revista de biología marina y oceanografía, 52(1), 103-112. https://doi.org/10.4067/s0718-19572017000100008

- Han, J.E., Tang, K.F.J, Tran, L.H. & Lightner, D.V. 2015. Photorhabdusinsect related (Pir) toxin-like genes in a plasmid of *Vibrio parahaemolyticus*, the causative agent of acute hepatopancreatic necrosis disease (AHPND) of shrimp. Dis. Aquat. Org., 113, 33-40. https://doi.org/10.3354/dao02830

- Prajapati, S. D. & Ujjania, N. C.. 2022. Length-weight relationship and condition factor of Pacific whiteleg shrimp (*Litopenaeus vannamei*, Boone, 1931) cultured in polyethylene lined pond. International Journal of Fauna and Biological Studies, 9(4), 15-18. https://doi.org/10.22271/23940522.2022.v9.i4a.914

- Davis, D. A., Saoud, I. P., McGraw, W. J., & Rouse, D. B. 2002. Considerations for *Litopenaeus vannamei* reared in inland low salinity waters. Avances en nutrición acuícola.

- Jaffer, Y. D., Saraswathy, R., Ishfaq, M., Antony, J., Bundela, D. S., & Sharma, P. C. 2020. Effect of low salinity on the growth and survival of juvenile pacific white shrimp, *Penaeus vannamei*: A revival. Aquaculture, 515. https://doi.org/10.1016/j.aquaculture.2019.734561

경기연안 미세플라스틱 오염 모니터링

최지성 · 안태영 · 설강수 · 서성문 · 김광범 · 김봉현

서 론

플라스틱은 열이나 압력으로 성형할 수 있는 유기 고분자 화합물로 열경화성 플라스틱과 열가소성 플라스틱으로 나뉜다. 생활 속에서 주로 사용되는 종류는 열가소성 플라스틱으로 폴리에틸렌(Polyethylene, PE), 폴리프로필렌(Polypropylene, PP), 폴리스티렌(Polystyrene, PS) 폴리염화비닐(Polyvinyl chloride, PVC) 등이 있다. 플라스틱은 가공이 쉽고 가벼우며 값이 싸기 때문에 주로 포장을 위한 다양한 형태로 사용되고 있으며, 자동차, 의료, 건축 자재 등 여러 분야에서도 광범위하게 활용하고 있다.

플라스틱 장점에 따른 다양한 활용으로 세계 플라스틱 생산은 1964년 1,500만 톤에서 2014년 3억 1,100만 톤으로 지난 50년 동안 급증하였으며, 향후 20년 동안 다시 2배 늘어날 것으로 예상하고 있다(WEF, 2016). 이렇게 플라스틱 생산량이 증가함에 따라 플라스틱 폐기물도 증가하고 있다. 미국 캘리포니아대학교 산타바버라캠퍼스(UCSB) 연구진(2017)에 따르면 1950년대 초 세계에서 플라스틱을 생산한 이래 2015년까지 총 83억 톤을 생산하여 63억 톤의 플라스틱 폐기물이 발생하였고 폐기물 중 9%는 재활용, 12%는 소각, 79%는 매립지 또는 자연에 축적되었다고 보고하였다(Cohen, 2017). 자연에 무방비하게 버려지는 플라스틱 중 일부는 해양으로 유입되고 있다. Jambeck et al.(2015)의 보고에 따르면, 2010년 기준 해안을 가진 192개 국가에서 발생한 플라스틱 쓰레기는 275백만 톤으로 이 중 최소 4.8백만 톤에서 최대 12.7백만 톤이 해양으로 유입된 것으로 추정하였다. 또한, 다른 대륙에 비해 중국, 인도네시아 등 아시아에서 해양으로 유입되는 플라스틱 쓰레기가 많은 것으로 분석하였다. 국내에서는 2012년 600만 톤에서 2016년 710만 톤으로 플라스틱 폐기물 발생량이 5년간 연평균 7.2% 증가하고 있으며 플라스틱 폐기물 재활용량은 2012년 326만 톤에서 2016년 431만 톤으로 5년간 연평균 3.1% 증가하고 있는 실정이다(김 외, 2018).

미국해양대기관리처(National Oceanic and Atmospheric Administration, NOAA)에서는 플라스틱 중 미세플라스틱 기준 크기를 5mm 미만으로 정의하고 있다. 미세플라스틱은 발생 경위에 따라 1차 미세플라스틱과 2차 미세플라스틱으로 구분되어진다. 1차 미세플

라스틱은 사람이 목적에 따라 사용하기 위해 인위적으로 작게 만들어지는 마이크로비즈로써 세안제, 화장품, 섬유유연제, 연마제 등에 사용되어 왔다. 2차 미세플라스틱은 플라스틱 폐기과정에서 발생하거나 자연에 유입된 플라스틱이 풍화에 의해 작게 분해되어 발생한 것을 말한다. 특히, 풍화작용 중 플라스틱 분해에 영향을 미치는 가장 큰 요인은 자외선이라고 보고되었다(Andrady, 2011). 그렇기 때문에 버려져 해양에 유입되는 플라스틱은 강한 자외선에 의해 시간에 지남에 따라 점점 작게 분해되어 미세플라스틱 발생 가능성이 높을 것이다.

해양환경에서 미세플라스틱은 미세조류(플랑크톤)에 섭취되고 먹이사슬에 의해 더 높은 단계의 생물에 축적될 수 있다. 실제로 미세플라스틱은 미세조류, 무척추동물, 갑각류, 어류, 해양 포유동물 등 해양생물의 소화기관 등에 발견되거나 실험을 통해 확인되어진다(Cole et al., 2013; Lusher et al., 2015; Pegado et al., 2018). 해양생물에 축적된 미세플라스틱은 음식을 통해 최종적으로 인간에게 축적될 수 있고 세포독성, 대사 장애, 면역 방해, 발암 등 심각한 위험을 초래할 수 있다(Rahman et al., 2021).

본 연구의 목적은 경기연안의 미세플라스틱 모니터링을 통해 플라스틱 오염의 심각성을 확인하여 향후 경기도의 쓰레기 저감 또는 청소 관련 사업에 대한 기초자료로 활용하고 미세플라스틱 관련 국가 정책에 신속히 대응하는 것이다.

재료 및 방법

1. 해양표층수 내 부유 미세플라스틱 시료채취

미세플라스틱 모니터링을 위한 조사정점은 그림 1과 같으며 해당 정점에 대한 위경도는 표 1에 나타내었다. 미세플라스틱 시료채취는 2021년 2월 부터 4, 8, 11월 까지 총 4회 진행하였고, 미세플라스틱의 종류와 수량 등 기기분석은 2022년에 수행하였다. 각 시기마다 날씨, 선박 운행 등의 상황에 따라 2~3일 동안 5개 정점을 나눠서 진행하였다. 미세플라스틱 시료채취를 위한 전반적인 과정은 한국해양과학기술원(KIOST)의 지침서를 참조하였다(송 외, 2017). 해양표층에 부유하는 미세플라스틱 시료를 채취하기 위해 만타트롤네트(이하 '네트')를 이용하였다. 네트 규격은 네트입구 400×284mm(수면에 접하는 면적 400×200mm), 네트날개 500×300mm, 망 길이 2,000mm, 여과도 330μm로 미세플라스틱 330μm 이상을 채집하고자 하였다. 네트입구에는 역동작방지용 유량계(Hydro-Bios, Germany)를 달아 시료채취 시 측정된 유량계 수치를 토대로 네트에 들어온 물량을 계산하였다. 시료채취를 위한 선박은 경기바다호(129톤, 46km/h)를 이용하였다. 다만, 경기바다호의 경우 조사선이 아니기 때문에 한국해양과학기술원에서 제시하는 선박 속도인 1~2노트(knot)를 일정하게 맞출 수 없어 차선책으로 선박 엔진의 가동 및 정지를 반복하며 평균 2~3노트가 되도록 속도를 조절하였다.

표 1. 미세플라스틱 시료채취 조사정점 위경도

조사정점	위도(도분초)	경도(도분초)	비고
①	37°19'27.76"N	126°37'24.14"E	시화방조제 부근
②	37°17'38.05"N	126°32'22.09"E	구봉도 부근
③	37°06'28.15"N	126°21'49.74"E	풍도 부근
④	37°06'17.88"N	126°31'04.09"E	입파도 부근
⑤	37°04'59.01"N	126°40'22.12"E	화성방조제 부근

우선 선박 앞부분(선수)을 가급적 조류의 방향과 마주보게 하고 선미에서 네트를 내린 뒤 선박 엔진을 가동하였다. 엔진 가동 시 선박 프로펠러에 의한 물살로 부유 미세플라스틱이 침강하여 시료채취에 영향을 줄 수 있으므로 네트를 100m 가량(로프 길이) 멀리 떨어뜨려 그러한 영향을 줄였다(그림 1). 그리고 시료채취 당일 조류의 상황에 따라 선박 엔진의 가동 및 정지를 반복하며 평균 2~3노트가 되도록 속도를 유지하였다. 선박으로 네트를 약 7분간 끈 뒤 선박의 엔진을 정지시키고 약 3분간 사람이 직접 네트 로프를 당겨 끌어 올렸다. 선박에 올린 네트는 소화전을 이용하여 네트망 외측에 물을 강하게 분사하면서 네트망 내측에 붙은 미세플라스틱이 네트 끝 채집통에 들어가도록 유도하였다. 채집통에 모인 시료는 1L 갈색병에 옮겨 담았고, 미세플라스틱을 최대한 회수하기 위해 증류수로 채집통 벽면을 세척하여 동일한 갈색병에 옮기는 작업을 3회 이상 반복하였다(그림 2). 최종 시료는 전처리 전까지 4℃ 냉장 상태로 보관하였다.

2. 미세플라스틱 시료 전처리

채취한 시료는 1차적으로 300μm, 1mm 스테인리스 스틸 체(Stainless steel sieve)에 걸러 크기별로 분류하였다(그림 3). 1mm 체에서 모든 유기물은 체 위에서 증류수를 사용하여 유기물에 붙어 있을 수 있는 미세플라스틱을 떨어뜨린 후 육안 및 질감을 통해 플라스틱이 아닌 것으로 판단되는 것은 제거하고 플라스틱으로 판단되는 것은 따로 모아두었다(그림 4). 300μm 체 위의 시료는 증류수를 사용하여 1L 투명 시약병에 옮기고 90℃로 설정된 건조기(WFO-1001SD, EYELA, Japan)에서 수분을 제거하였다. 시료채취 및 전처리 모든 과정에서 증류수는 3차 증류수를 사용하였다.

건조된 시료에서 플라스틱 이외의 유기물을 분해하는 방법은 여러 논문에서 다양하게 제시되었다. 미국해양대기관리처와 한국해양과학기술원에서는 이산화철 수용액과 과산화수소를 사용한 방법을 제시하고 있으나 실험 시 끓어 넘침에 주의가 요망된다. 그 외에 과산화수소, 염산, 황산 등을 사용하여 유기물을 분해하는 연구가 알려져 있다(채 외,

2014; 이와 김, 2017). 이번 연구에서는 분해시간이 오래 걸리지만 비교적 간단하고 안전한 과산화수소만 사용하는 방법을 이용하였다. 우선 건조된 시료에 30% 과산화수소 용액을 넣어 암소에서 2~3주간 방치하며 플라스틱 외의 유기물이 분해되도록 유도하였다. 3주 후에도 유기물 일부가 남아 있으면 300μm 체에 걸러 한 번 더 똑같은 전처리 과정을 거쳤다. 육안으로 유기물이 충분히 제거됐다고 판단한 시료는 47mm Anodisc 필터를 사용하여 필터링 후 스테인리스 스틸 페트리디쉬에 담아 데시케이터에서 상온으로 건조하고 분석 전까지 보관하였다.

3. 미세플라스틱 분석

미국해양대기관리처의 미세플라스틱 크기에 대한 정의와 시료채취에 사용한 네트 여과도를 고려하여 장축을 기준으로 330μm~5mm 크기의 시료만 미세플라스틱 분석을 진행하였다. 전처리 된 시료는 푸리에변환 적외선분광기(LUMOS Ⅱ, Bruker, Germany)를 이용하여 미세플라스틱 종류 및 수량을 분석하였다. 미세플라스틱 분석 방법에는 시료에 모듈을 직접 접촉시켜 분석하는 ATR(Attenuated Total Reflection, 감쇠 전반사) 방식을 사용하고 측정된 데이터(peak)는 장비 제조사에서 제공하는 소프트웨어를 활용하여 플라스틱 종류별 기준 데이터(library)와 70% 이상 유사한 경우에만 플라스틱으로 인정하였다(그림 6). 측정된 미세플라스틱 수량은 시료채취 시 유량계를 통해 확인한 유량을 고려하여 n/m^3 단위로 환산하여 나타내었다.

결과 및 고찰

'21년 경기연안 총 5개 정점에서 분기별로 표층수 부유 미세플라스틱을 시료채취하였으며, '22년에 기기분석을 완료한 결과는 표 2와 같다.

경기연안의 연 평균 미세플라스틱 농도는 해수 1톤(㎥) 당 최소 0.15에서 최대 3.85개로 전체 평균 1.40개가 관찰되었다.

표 2. 경기연안 해수 내 미세플라스틱 평균 농도(n/㎥) 모니터링 결과

구 분	st. 1	st. 2	st. 3	st. 4	st. 5
2021. 2월	0.8	1.59	1.7	0.62	2.77
2021. 4월	2.79	2.1	2.18	1.76	3.85
2021. 8월	0.28	0.55	0.25	0.24	0.41
2021. 11월	0.56	0.94	1.86	2.83	0.15
평 균	1.11	1.30	1.50	1.36	1.80

※ st. 1 : 시화방조제, st. 2 : 안산 구봉도, st. 3 : 안산 풍도, st. 4 : 화성 입파도, st. 5 : 화성방조제

'21년 모니터링에 따른 정점별, 분기별 미세플라스틱 평균 농도를 그림 7로 나타내었다. 미세플라스틱 농도가 가장 높은 정점은 화성방조제 부근(st. 5)으로 연간 평균 m^3당 1.8개로 나타났다. 반대로 가장 낮은 지역은 시화방조제(st. 1) 부근이었다.

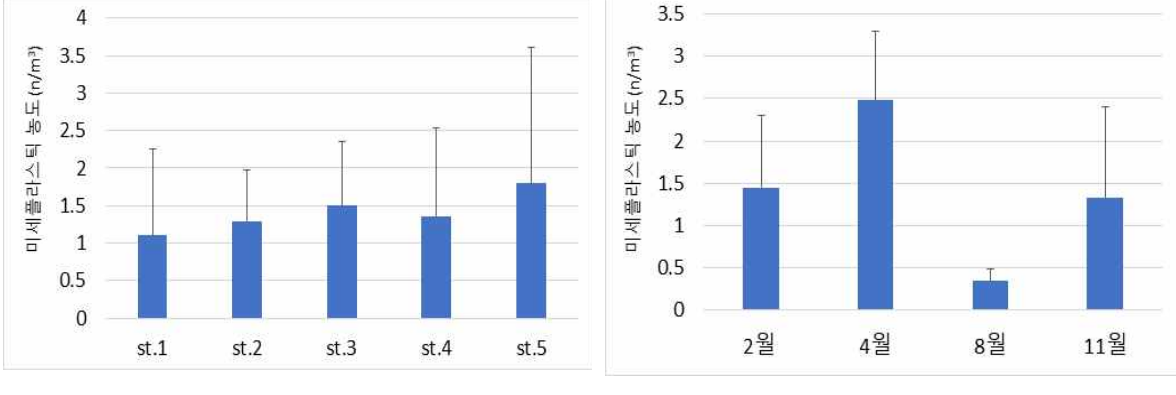


그림 7. 경기연안 지점별, 분기별 해수 내 미세플라스틱 평균 농도(n/㎥)

분기별 미세플라스틱 농도는 4월에 가장 높게 나타났으며(2.48/m^3), 8월에 m^3당 0.3개로 가장 낮은 값을 보였다.

해수 표층의 정점별 농도가 높고 낮은 이유에 대해서는 이번 시험에서 논하기 어려우며, 동일 지점에서 연차적인 모니터링 데이터가 수집되어야 정확히 분석할 수 있을 것으로 판단된다.

분기별 농도 변화도 마찬가지로 미세플라스틱 시료채취 당시 바람, 강우, 조류 등의 환경적인 영향을 많이 받기 때문에 장기적으로 시기 별 모니터링 데이터 축적이 필요하다.

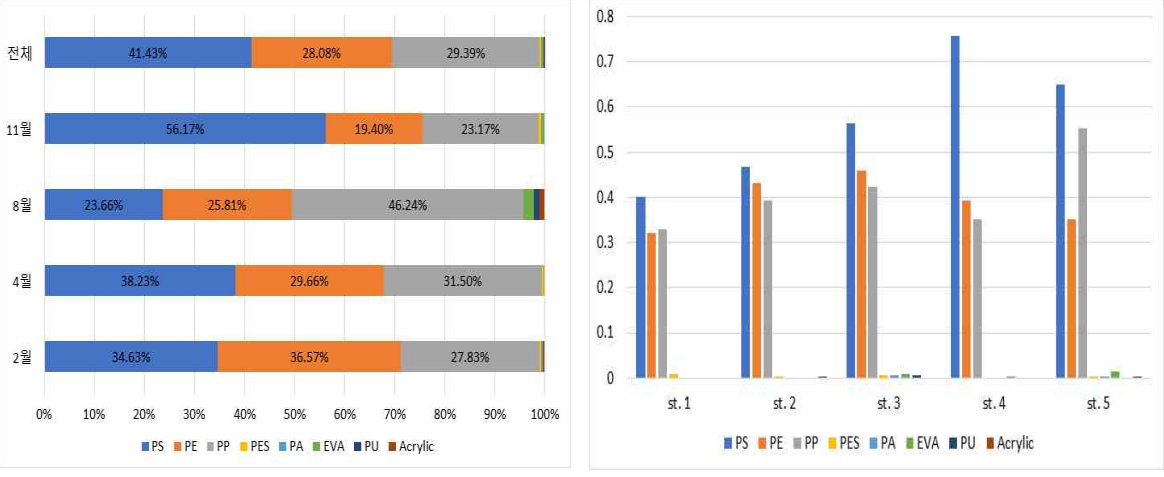


그림 8. 경기연안 월별 미세플라스틱 종류와 분포비율(%)과 정점별 미세플라스틱 분포현황(n/㎥)

경기연안에서 검출된 5mm미만의 미세플라스틱은 총 8종으로 각각 PS(polystyrene), PE(polyethylene), PP(polypropylene), PES(polyester), PA(polyamides), EVA(Ethylene Vinyl Acetate), PU(polyurethane), Acrylic이었다(그림 8).

가장 많이 검출된 미세플라스틱은 스티로폼 소재인 PS로 전체 대비 41.43%가 검출되었다. 그 다음은 배달음식 용기로 가장 흔하게 쓰이고 내열성이 강한 PP가 29.39%로 관찰되었으며, 비닐봉지와 종이컵 내부 코팅 재료인 PE가 28.08%로 높게 나타났다.

'21년에 관찰된 총 8종의 미세플라스틱 중 PS, PP, PE 세 종류가 98.9%로 경기연안 표층해수에서 발견되는 미세플라스틱의 대부분을 차지하고 있었다.

정점별로 구분해서 살펴보면 모든 정점에서 발견된 미세플라스틱 중 PS가 가장 높은 농도로 검출 되었으며, 특히 st. 4에서 m^3 당 0.76개로 가장 높은 농도를 보였고, st 1.에서 가장 낮은 농도로 관찰되었다.

PS의 경우 대부분 부표 재료로 사용되는 발포 폴리스티렌(EPS)으로 추정되는데, 500㎛ 이상 크기에서는 대부분 육안 또는 현미경 상에서 쉽게 판단할 수 있었으나 그 이하 크기에서는 변색, 변질로 인해 판단하기 쉽진 않았고 IR 스펙트럼에서도 library와 높은 매칭률은 보이진 않았다.

시기별 정점별 모두에서 PS가 가장 많이 검출되었는데 육상기원 보다는 면허 양식장이나 어업용 그물에 흔히 사용되는 스티로폼 부표가 주 원인인 것으로 추정된다.

파도나 바람 그리고 어선 등의 의한 물리적인 마찰과 햇빛으로 인한 부식 등에 의해 계속해서 수많은 미세한 PS 조각들이 떨어져나가 해수 표층에 표류하게 될 것이다. 따라서 현장 모니터링 시 PS가 다른 종류의 미세플라스틱 보다 해수 표층 전용 채집망인

만타트롤 네트에 더 용이하게 채집된 것으로 판단된다.

또한, PS가 가장 적게 채집된 st 1.의 경우 인천신항을 마주보고 있는 시화방조제 부근으로 이 지역은 항로나 항만구역 및 조력발전 등으로 인해 면허양식장 허가나 어업행위 등이 제한되는 지역이다.

현재 미세플라스틱에 대한 조사방법, 조사 크기 및 위해성에 대한 법적 기준이 없는 실정이다. 따라서 이번 경기연안 부유 미세플라스틱 시험 모니터링의 경우 한국해양과학기술원 지침 등을 참고하여 조사를 수행하였다.

이번 결과가 경기바다에 대한 미세플라스틱 오염 수치를 대표할 수는 없다. 또한 육지오염원의 경우 건기와 우기에 따라 해양으로 유입되는 양이 달라지기 때문에 조사시기에 따라 미세플라스틱 농도도 큰 차이를 보일 수 있다. 미세플라스틱 조사에 대한 국내 공식적인 기준이 마련되면 이번 조사 경험을 바탕으로 신속히 대처할 수 있을 것으로 기대한다.

참 고 문 헌

- 김형욱, 엄남일, 박윤수, 이영기, 김기헌, 2018. 폐플라스틱류 수집 및 재활용 현황과 정책 방향. 한국폐기물자원순환학회지. 35:471-480.

- 송영경, 어소은, 권오윤, 홍상희, 심원준, 2017. 해양 미세플라스틱의 환경위해성 연구: 부유 미세플라스틱 시료채취 및 분석 지침. 한국해양과학기술원. 발간등록번호 11-B552904-000006-01.

- 이혜성, 김용진, 2017. 다양한 매체에서 미세플라스틱의 정량·정성법에 관한 고찰. 대한폐기물관리학회지. 34:537-545.

- 채두현, 김인성, 송영경, 김성우, 김승규, 2014. 해수에 잔류하는 미세플라스틱의 정성정량 분석법 확립. 한국해양학회지. 19:88-98.

- Andrady A.L, 2011. Microplastics in the marine environment. Marine Pollution Bulletin. 62:1596-1605. DOI: 10.1016/j.marpolbul.2011.05.030.

▸ Cohen J, 2017. A plastic planet. The Current(Santa Barnara). https://www.news.ucsb.edu/2017/018137/plastic-planet.

▸ Cole M, Lindeque P, Fileman E, Halsband C, Goodhead R, Moger J, Galloway T.S, 2013. Microplastic ingestion by zooplankton. Environment Science Technology. 47:6646-6655. DOI: 10.1021/es400663f.

▸ Jambeck J.R, Geyer R, Wilcox C, Siegler T.R, Perryman M, Andrady A, Narayan M, Law K.L, 2015. Plastic waste inputs from land into ocean. Science. 347:768-771. DOI: 10.1126/science.1260352.

▸ Lusher A.L, Milian G.H, O'Brie J, Berrow S, O'Connor I, Officer R, 2015. Microplastic and macroplastic ingestion by a deep diving, oceanic cetacean: The True's beaked whale Mesoplodon mirus. Environmental Pollution. 199:185-191. DOI: 10.1016/j.envpol.2015.01.023.

▸ Pegado T.S.S, Schmid K, Winemiller K.O, Chelazzi D, Cincinelli A, Dei L, Giarrizzo T, 2018. First evidence of microplastic ingestion by fishes from the Amazon River estuary. Marine Pollution Bulletin. 133:814-821. DOI: 10.1016/j.marpolbul.2018.06.035.

▸ Rahman A, Sarkar A, Yadav O.P, Achari G, Slobodnik J, 2021. Potential human health risks due to environmental exposure to nano- and microplastics and knowledge gaps: A scoping review. Science of the Total Environment. 757:143872. DOI: 10.1016/j.scitotenv.2020.143872.

▸ World Economic Forum(WEF), 2016. The new plastics economy: Rethinking the future of plastics.

경기바다 방사능 오염 모니터링 연구

설강수 · 방지수 · 김광범 · 서성문 · 김봉현

서 론

방사선은 1895년 독일 물리학자 빌헬름 뢴트겐에 의해 최초 발견된 이후 의료, 군사, 원자력 발전 등 우리 일상생활 속에서 유용하게 이용되고 있다. 특히 원자력 에너지는 화석연료에 비해 경제적이고 발전 효율이 뛰어나 국내를 포함한 일본, 중국, 미국, 러시아 등 여러 국가에서 원자력 발전소를 건설하여 사용하고 있다(조 외 2010). 하지만 높은 에너지 효율을 보이는 원자력은 방사성 폐기물처리 문제나 안전사고 문제와 같은 치명적인 단점을 가지고 있으며 그 단점을 극명하게 나타내는 대표적인 예가 2011년 일본 후쿠시마 원자력 발전소 폭발 사고이다. 일본 후쿠시마 원자력 발전소 사고는 지진과 쓰나미로 인한 냉각수 공급 중단으로 발전소가 폭발하여 많은 양의 인공방사성핵종이 방출된 사고다(Bolsunovsky et al., 2011). 사고 이후, 연료봉 안전을 위해 사용된 냉각수와 지하수로 인해 발생한 방사능 오염수는 폐기 방법이 없어 임시방편으로 탱크에 보관되었다. 방사능 오염수는 임시탱크 저장용량 한계까지 끊임없이 발생하여 일본은 보관 중인 오염수를 2023년부터 순차적으로 해양 방류하기로 결정했다.

우리나라 인근 해역에 대한 방사능 감시는 구소련의 방사선 폐기물 투기사건을 계기로 1994년부터 현재까지 한국원자력안전기술원에서 실시하고 있다. 2011년 일본 원전 사고 이후 한국원자력안전기술은 방사능 조사주기와 범위를 확대하여 방사능 모니터링을 강화했지만 조사정점은 남해와 동해로 치우쳐 있다. 하지만 서해도 남해와 동해와 같이 방사능 모니터링을 강화할 몇 가지 필요성이 있다. 그 첫 번째로 일본 원전 오염수의 감시 목적이다. 2023년부터 일본 후쿠시마에서 방류하기로 예정된 방사능 오염수는 북태평양을 순환하여 쿠로시오 해류의 지류를 따라 우리나라 해역에 일부 도달한다. 우리나라 연안에 도달한 방사능 오염수는 기후 환경과 해류의 복잡한 상호작용으로 동해와 서해 모두 유입된다(Nitani 1972). 따라서 우리나라 해역에 일본 원전 오염수의 유입이 있는지 명확하게 파악하기 위해서 동해·서해·남해 모두 방사능 모니터링이 강화되어야 한다. 두 번째는 중국의 원자력 발전소 증가이다. 원전안전운영정보시스템(https://opis.kins.re.kr/)에 의하면 중국은 2022년 12월 기준으로 55대의 원자력발전소를 운영하고 18대의 원자력 발전소를 추가 건설하고 있다. 중국 내 원자력 발전소는 대부분 중국 동부해안에 위치하기 때문에

원자력 발전소 사고가 발생하거나 방사능 오염수가 방출될 경우 서해를 공유하고 있는 우리나라가 직접적인 피해를 볼 수 있다. 특히 서해는 육지로부터 둘러쌓인 지형이기 때문에 방사능 피해는 다른 해역보다 더 클 것으로 판단된다. 서해는 남해와 동해만큼 방사능으로부터 취약할 수 있는 해역임을 인지하고 이에 대비해야 한다.

본 연구는 2023년에 방류 예정된 일본 후쿠시마 원전 오염수와 중국 원전에 대한 방사능 감시체계를 강화하고자 경기해역의 방사능 모니터링을 추진하였다. 분석은 장비가 갖춰진 2022년 하반기부터 실시하였으며, 원전사고 시 환경 중에 방출되는 주요 핵종인 감마핵종 3종(^{131}I, ^{134}Cs, ^{137}Cs)에 대해 분석하여 그 결과를 본 연구에 수록하였다.

재료 및 방법

1. 방사능 분석용 해수 시료채취

해수 방사능 측정을 위한 시료 채취 정점은 방사능의 유입 경로 확인을 위해'경기바다 환경조사'정점 중 연안 가장 내측과 외측인 화성 방조제와 풍도 인근 해역을 선정하였다. 조사정점에 대한 세부사항은 그림 1 및 표 1과 같다. 해수 방사능 시료채취는 2022년 6월부터 12월까지 매월 1회 실시하여 총 6회 채취하였다. 해수 시료는 수중펌프를 이용하여 해수 표층을 채취하였으며, 정점별로 80L을 채취하였다. 해수 시료 채취 시 채취용 플라스틱 용기 벽에 방사성 물질이 흡착되는 것을 방지하기 위해 해수 1L당 질산 1mL를 혼합하였다. 채취한 해수 80L 중 60L는 ^{134}Cs, ^{137}Cs 분석 시 사용하였으며 5L는 ^{131}I을 분석할 때 사용하였고 남은 15L의 해수는 실험 시 여유분으로 사용하였다. 당일 채취한 해수는 요오드 분석에 사용되는 5L를 제외하고 전부 냉장고에 24시간 이상 보관하였다.

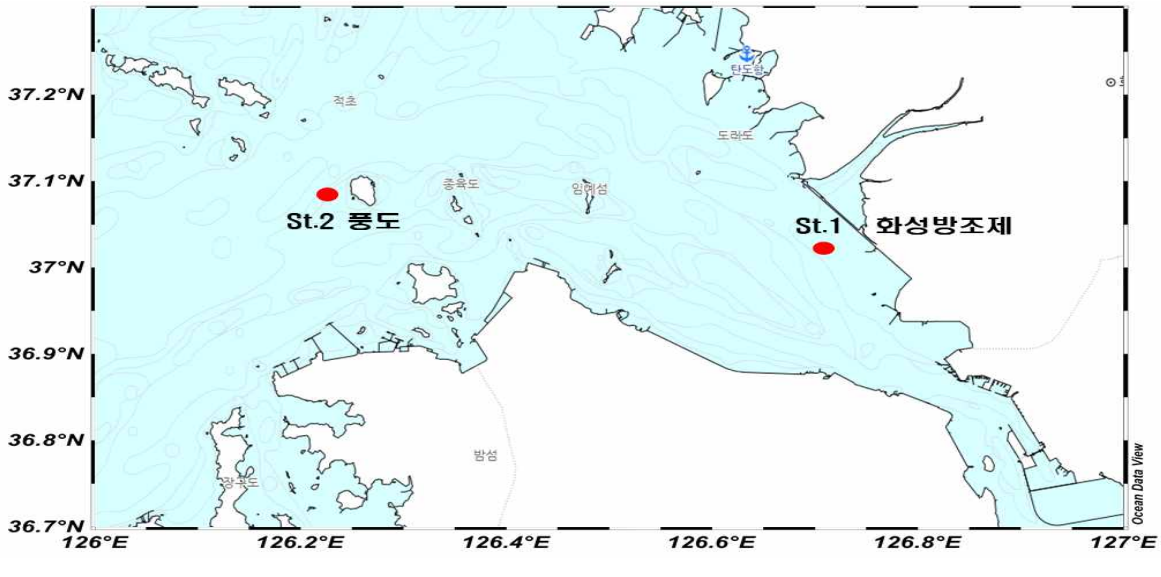


그림 1. 해수 방사능 시료채취 조사정점

표 1. 해수 미세플라스틱 시료채취 조사정점 위경도

조사정점	위도(도분초)	경도(도분초)	비고
1	37°04'59.01"N	126°40'22.12"E	화성방조제 부근
2	37°06'28.15"N	126°21'49.74"E	풍도 부근

2. 해수 방사능 화학 전처리

가. ^{131}I

^{131}I(7일)는 반감기가 다른 인공 방사성 핵종에 비해 짧기 때문에 시료 채취 당일에 전처리를 실시하였다. 해수 5L를 열처리된 강화 유리 비커에 옮겨 담고 핫플레이트를 이용하여 1L까지 증발·농축시킨 후 1L 마리넬리 비커에 옮겨 담아 감마핵종분석기로 계측하였다.

나. ^{134}Cs, ^{137}Cs

^{134}Cs, ^{137}Cs은 전처리 전 실험 회수율을 높이기 위해 분석용 해수를 1~2일 정도 10 ℃ 이하로 냉장보관하였다. 저온 처리된 해수는 해수 내 포함된 부유물을 제거하기 위해 여과지(pore size 1μm)를 이용하여 1차 필터를 하였다. 필터된 해수는 특수 제작된 수조에 60L만큼 계량하여 옮긴 후 염산을 이용하여 pH 2 이하로 조절했다. 산처리 된 해수는 1L당 AMP(Ammonium phosphomolybdate)가 0.5g이 되게 첨가하고 약 1시간 정도 혼합하였다. 혼합된 해수는 24시간 방치하였으며 실험실 내 온도는 25℃가 넘지 않도록 조절하였다. 24시간 방치 후 침강된 AMP를 제외한 상등액은 사이펀을 이용해서 제거하였다. 수조 바닥에 침강된 AMP와 벽에 부착된 AMP를 비커에 회수 후 여과지(pore size 1μm)를 이용하여 2차 필터를 하였다. 필터된 AMP는 사발에 옮겨담아 건조기에 70℃ 온도로 약 2일 정도 건조시켰다. 건조된 AMP는 20mL 마리넬리 비커에 담아 감마핵종분석기로 계측하였다.

3. 장비계측

감마선 측정은 고순도 게르마늄(HPGe, High Purity Germanium) 감마핵종분석기(GEM60P4, ORTEC)를 이용하였다. 분석기는 납 차폐체, 다중파고분석기(MCA, Multi Channel Analyzer), 분석 시스템(Gamma Vision)으로 구성되었으며 검출기의 상대효율은 60%이다. 정확한 계측을 위해 한국표준과학연구원에서 제작한 교정용 표준물질(CRM, Certificate of Reference Material)을 이용하여 에너지 검·교정을 하였다. 교정용 표준

물질은 감마선방출 10개 핵종을 혼합하여 13개의 감마선 피크를 제공한다. 전처리된 시료는 80,000초 동안 계측하여 분석하였으며, 방사성핵종이 검출되지 않는 경우 최소 검출가능농도(MDA)를 표기하고 그 미만(<)이라 표기하였다.

결과 및 고찰

경기바다 표층 해수 방사능 분석 결과 ^{137}Cs만 미량 검출되고 나머지 ^{134}Cs, ^{131}I은 검출되지 않았다(표 2). 불검출된 두 항목의 MDA 값은 ^{131}I는 <7.5 ~ <217.7mBq/L, ^{134}Cs는 <0.29 ~<0.48mBq/L로 나타났다. 경기바다 내에서 검출된 ^{137}Cs의 농도 범위는 <0.43 ~ 1.18mBq/L으로 나타났다. 이 수치는 한국원자력안전기술원에서 2015 ~ 2020년에 조사한 전국 ^{137}Cs 농도의 평년적인 수치(<1.0 ~ 2.7mBq/L)에 해당하여 최근 국내외 원전의 영향보다 과거 핵실험 등에 기인한 잔존물로 추정된다(한국원자력안전기술원, 2020; Shigematsu I., et al, 1987).

표 2. 2022년 경기바다 표층 해수 방사능 분석 결과(mBq/L)

조사시기(월)	^{131}I	^{134}Cs	^{137}Cs
7	<8.39 ~ <12.3	<0.29 ~ <0.33	0.8 ~ 0.15
8	<9.2 ~ <14.0	<0.36 ~ <0.39	<0.43 ~ 0.9
9	<26 ~ <16.9	<0.36 ~ <0.45	0.97 ~ 1.18
10	<15.8 ~ <7.5	<0.34 ~ <0.38	0.92 ~ 1.15
11	<11.2 ~ <217.7	<0.32 ~ <0.43	<0.47 ~ 1.13
12	<82.3 ~ <137.4	<0.45 ~ <0.48	<0.45 ~ <0.61

조사한 자료수가 부족하지만 검출된 ^{137}Cs 농도는 화성방조제 인근보다 풍도 인근에서 더 높게 나타나는 경향이 있다(표 3). 11월을 제외하면 모두 풍도 인근에 서 더 높게 나타나며 평균적인 ^{137}Cs 농도 차이는 0.08mBq/L를 나타낸다. 경기바다와 같이 하구보다 연안에서 ^{137}Cs농도가 높게 나타나는 현상은 중국에서도 나타난다(Wu et al., 2020). 양쯔강 하구와 주변 해역의 ^{137}Cs 조사결과, 양쯔강 하구보다 연안에서 ^{137}Cs 농도가 더 높게 나타났으며 ^{137}Cs농도는 해역 위치뿐만 아니라 수괴에 따라 변동하기도 했다. 중국해

내에서 ^{137}Cs는 저염분보다는 고염분에서 상대적으로 높게 나타나며, 수주에 따라 변동하기도 했다(Zhao et al., 2018). 즉 해수 속 ^{137}Cs는 대기나 육지로부터 유입되어 무질서하게 분포되는 것이 아니라 ^{137}Cs의 원천이 되는 해류의 방향과 세기에 영향받는다.

표 3. 2022년 경기바다 표층 해수의 ^{137}Cs 방사능 농도(mBq/L)

조사시기(월)	화성방조제	풍도
7	0.8±0.15	1.0±0.15
8	<0.43	0.9±0.2
9	0.97±0.23	1.18±0.47
10	0.92±0.18	1.15±0.19
11	1.13±0.21	<0.47
12	<0.45	<0.61

경기바다 해수 방사능 조사는 주변국의 방사능 유출을 감시하기 위한 목적으로 시행되었다. 향후 해수 방사능의 장기적인 자료 수집과 ^{137}Cs 근원이라 추정되는 쿠로시오 해류의 연간 세기 및 방향 변화를 분석한다면 방사능 모니터링뿐만 아니라 서해로 유입되는 방사능의 경로도 일부 추정해 볼 수 있을 것이다.

참 고 문 헌

- 조병옥, 김신종, 김점수, 2010. 한국 원자력발저의 온실가스 저감 기여도 및 경제적 효과 분석. 한국에너지학회지, 19(4), 203~214.

- 한국원자력안전기술원, 2020. 해양환경방사능조사.

- Bolsunovsky A., Dementyev D., 2011. Evidence of the radioactive fallout in the center of Asia(Russia) following the Fukushima Nuclear Accident. J. Environ. Radioact, 102(11), 1062-1064.

- Nitani, H., 1972. Beginning of the Kuroshio. In Stommel, H. and Yoshida, K. (eds.), Kuroshio; Physical aspects of the Japan current. University of Washington Press, Seattle, USA, 129-163.

- Persson C., Henning R., Lars-Erik D., 1987. The Chernobyl accident: A meterological analtsis of how radionuclides reached and were deposited in Sweden. Ambio. 16(1), 20-31.

- Wu, J. W., Xiao X.Y., Sun, J., 2020. Distribution and budget of ^{137}Cs in the China Seas. Sci. Rep. 10, 8795.

- Zhao, L. J. et al, 2018. Spatial and vertical distribution of radiocesium in seawater of the East China Sea. Mar. Pollut. Bull, 128, 361-368

시험연구사업보고서 제 32 호

2023년 월 일 인쇄

2023년 월 일 발행

발행인 : 경기도해양수산자원연구소장 김 봉 현

주 소 : (15651) 경기도 안산시 단원구 개건너길 71(선감동)

전 화 : (031) 8008-8368

편집인 : 수산기술센터장 서성문, 수산물안전팀장 김광범,
갯벌연구팀장 임성률, 내수면연구팀장 한정조

작성자 : 이동훈, 최지성, 조기택, 김달영, 안태영,
김광배, 김병권, 설강수, 배재용, 김성민

인 쇄 : ㈜고려종합인쇄 (031) 771 - 2269