

**황해저층냉수대의 거동과 생태계에 미치는
영향 연구**

The study on the impact of the Yellow Sea cold
water mass to the ecosystem

2010. 12

한국해양연구원

제 출 문

한국해양연구원 원장 귀하

본 보고서를 “황해저층냉수대의 거동과 해양생태계에 미치는 영향 연구” 과제의 연차 보고서로 제출합니다.

2011 년 01 월

총괄연구책임자 : 김 응 서

참여연구원 : 임동일, 주세종, 강정훈, 김영옥,
이석, 조철호, 이흥재, 송규민, 김경옥, 이하웅, 강
돈혁, 정회수, 이선희, 강소라, 김소영, 노연호,
오경희, 심진경, 김혜선, 권오윤, 장풍국, 조대현,
이형빈

보고서 초록

과제관리번호	PE98443	해당단계 연구기간	2010.01.01-2010.12.31	단계 구분	2 / 3
연구사업명	기본사업				
연구과제명	황해 저층냉수대의 거동과 생태계에 미치는 영향 연구				
연구책임자	김용서	해당단계 참여연구원 수	총 : 24 명 내부 : 13 명 외부 : 11 명	해당단계 연구비	정부: 660,000 천원 기업: 천원 계: 660,000 천원
연구기관명 및 소속부서명	한국해양연구원 여수엑스포지원단		참여기업명		
국제공동연구	상대국명 : 중국	상대국연구기관명 : FIO			
위탁연구	연구기관명 :		연구책임자 :		
요약				보고서 면수	139
<p><input type="checkbox"/> 사업목표</p> <ul style="list-style-type: none"> - 황해 냉수대 물리특성의 시공간 변동성과 내부의 해수순환 체계 규명 - 황해 부유생태계의 대표 생물종인 <i>Calanus sinicus</i>와 <i>Euphausia pacifica</i>의 생존과 분포에 있어 황해냉수대의 역할 규명 - 황해 표층 및 박스코아 퇴적물의 외편모조류 시스트 군집의 시공간적 분포 특성 파악 및 원인규명 <p><input type="checkbox"/> 기대효과</p> <ul style="list-style-type: none"> - 한중 국제공동연구를 통해 해양과학자 네트워크 구축 - 황해 생태계의 생산성과 변동성 예측기술 향상으로 해양생물자원 및 수산자원 관리 및 예보에 활용함 - 황해 연구의 국제공동연구를 통한 황해 전문연구인력을 육성함 - 황해 퇴적물 내의 외편모조류 시스트 군집의 시공간적 분포 특성파악을 통한 황해 해양 환경 변화의 이해 - 황해의 외편모조류 시스트 분포 특성을 파악함으로써, 향후 해양환경 지표생물로서 외편모조류 시스트를 이용하기 위한 기초자료 제공 <p><input type="checkbox"/> 사업내용</p> <ul style="list-style-type: none"> - 황해냉수대의 해양물리학적 특성 조사 및 수치모델 개발 - 황해의 계절별 부유생태계의 특성 파악 및 대표종의 생리/생태 연구를 통하여 황해 저층 냉수대의 생태적 중요성 규명 - 황해 퇴적물 외편모조류 시스트 군집의 시공간적 분포 및 변화 특성 파악 					
색인어 (각 5개 이상)	한 글	황해냉수대, 해수순환모델, 부유생태계, 주요종, 황해중앙니질대			
	영 어	YSCWM, <i>Calanus sinicus</i> , <i>Euphausia pacifica</i> , CUYSM, CYSM			

요 약 문

I. 제 목

황해저층냉수대의 거동과 생태계에 미치는 영향 연구

II. 연구개발의 목적 및 필요성

- 황해의 장기적인 해양환경 관리를 위해 저층냉수대의 물리 특성 및 장단기 변동성과 해수순환모형을 통한 해수순환체제의 규명이 필요.
- 황해의 수산자원, 환경변화 등에 중요한 영향을 미치는 황해저층냉수대에 대한 해양과학적 이해도를 높이기 위해, 황해 생태계의 대표 생물종 하나인 난바다 곤쟁이(*Euphausia pacifica*)와 *Calanus sinicus*의 분포와 생존에 영향을 미치는 황해 냉수대의 역할 규명
- 황해저층 냉수대 내의 유용어류 자원의 먹이원인 동물플랑크톤의 수층별 구조 특성 파악을 위한 음향조사 실시, 황해저층 냉수대 내 동물플랑크톤의 계절별 주·야 수직이동 패턴 파악, 음향실험 자료와 환경자료 및 생물 자료와의 비교와 황해 냉수대와의 연관성 연구
- 황해저층냉수대 해역에 분포하는 니질대 퇴적물의 미고생물(외편모조류 시스 트, 유공충) 군집에 대한 시·공간적 변화를 분석함으로써, 황해저층냉수대 해역의 생태학적-고해양학적 특성을 알아보려 함.
- 황해니질대 해역에서 유해성 적조 원인종인 *Alexandrium* 시스트의 분포도를 작성하고, 황해저층냉수대 해역에서 *Alexandrium* 시스트의 주요 집적지를 알아보려 함.
- 황해저층냉수대 해역에서 채집된 코어 퇴적물의 퇴적학적 및 지화학적 특성을 분석함으로써, 과거 황해저층냉수대의 고환경적 특성 및 발달 과정을 밝히려 함.

Ⅲ. 연구개발의 내용 및 범위

연구기간: 2010년 1월 1일~2010년 12월 31일

연구과제의 내용	연구과제의 범위
<ul style="list-style-type: none"> - 황해저층냉수의 계절 변동성 분석 	<ul style="list-style-type: none"> - 조사선을 이용한 정밀 관측 <ul style="list-style-type: none"> . 춘, 하계 정밀 관측 수행 . 전선 및 성층구조의 연변동성 분석 - 장기 시계열 자료 분석 <ul style="list-style-type: none"> . 성층구조와 해류의 계절 변동성 - 황해 해수순환 모델 구축
<ul style="list-style-type: none"> - 선상사육실험을 통한 <i>E. pacifica</i>의 생리실험 - <i>E. pacifica</i>의 시·공간 분포 - 냉수대 형성 vs. 발달 시 <i>E. pacifica</i>의 지방바이오마커분석 및 위내용물 분석 통한 먹이관계 파악 	<ul style="list-style-type: none"> - 춘계/하계 현장조사 시 Open-closing net로 경사 채집(저층-표층)하여 시료 확보 - 춘계조사 시 선상사육실험을 통한 <i>E. pacifica</i>의 알생산량, 부화율 측정 - 생물 음향(bioacoustics) 탐지를 통해 <i>E. pacifica</i>의 수직이동양상 파악 - 채집된 <i>E. pacifica</i>의 위 내용물을 전처리 후 SEM 으로 확인한 후 사진 촬영 - 지방 추출 및 분석: Bligh and Dyer(1959)방법으로 지방 추출 및 TLC-FID를 이용한 지방 class 분리/분석, 극성지방(지방산)과 중성지방(알코올, 스테롤) 성분 분석 (GC, GC-MS)
<ul style="list-style-type: none"> - 황해저층냉수대의 형성 및 발달시 <i>C. sinicus</i>의 분포 특성 	<ul style="list-style-type: none"> - 춘계/하계 선상 현장조사 - 냉수대 형성 (춘계) 및 발달 (하계)시기의 <i>C. sinicus</i>의 주야 수직 이동 변동성 파악 - <i>C. sinicus</i>의 주야 수직 이동 변동성과 주요 환경 요인과의 상관성 파악
<ul style="list-style-type: none"> - 황해저층생태계 구조 파악을 위한 음향산란층 특성 연구 	<ul style="list-style-type: none"> - 황해저층생태계의 음향 자원조사 - 음향산란층의 분포 특성 및 일주이동 속도 측정 - 음향산란 분석 결과와 환경자료 및 동물플랑크톤 자료비교를 통한 상관성 파악

<ul style="list-style-type: none"> - 황해 표층 및 박스코아 퇴적물의 외편모조류 시스트 군집의 시공간적 분포 특성 파악 	<ul style="list-style-type: none"> - 황해중앙니질대 퇴적체의 표층 및 코어(박스, 피스톤) 퇴적물 확보 - 표층 및 코어 퇴적물의 외편모조류 시스트 군집 분석 - 코어 퇴적물 내의 유공충 군집 및 안정동위원소 분석
---	--

IV. 연구개발결과

○ 물리유동 분야

- 황해저층냉수는 겨울철 강한 연직혼합으로 균질한 해수가 다음 여름철 성층면 아래 남아 저온의 특성을 유지하는 과정을 반복한다.
- 황해 중앙부 북쪽해역의 저층에서 최저 수온층이 나타나며, 년중 분포하는 것으로 확인된다.
- 여름철 황해 남부에서 연안과 외해역 사이의 공간 구조특성과 내부 성층면의 단기 변동성을 확인하였다.
- 봄철 황해중앙부에서는 전 층에서 약 10cm/s의 북서향류가 관측되었으며, 표층보다 저층에서 상대적으로 강한 조류가 확인된다.
- 황해해수순환모형은 관측자료를 이용하여 검증단계에 있으며, 과거자료와의 검증결과 유사한 패턴을 보이면서 비교적 잘 모사된다.

○ 생태분야

• *Euphausia pacifica*

- 황해 *Euphausia pacifica*가 저층냉수대를 어떻게 활용하는 지 알아보기 위해, 냉수대의 발달 전(춘계)과 발달 중(하계) 현장조사를 통해 그들의 산란, 시공간 분포, 주야수직이동 및 섭식생태에 대해 알아보았다. 알생산량 실험과 gravid female의 출현으로부터 황해에서 *E. pacifica*의 산란은 식물플랑크톤이 풍부한

층계에 집중되었으며, 유생은 연안 쪽에 주로 출현하는 반면 미성체와 성체는 냉수대가 발달된 황해 중앙해역에 많이 출현하였다. 또한, 층계에는 초기 유생이 우점하였지만 하계에는 후기유생 및 미성체의 출현 비율이 높았다. 또한, 이들의 수직분포 양상을 살펴보면, 수직혼합이 활발하고 전 수층의 수온이 10℃ 이하인 층계에는 표층부터 저층까지 *E. pacifica*의 활발한 주야수직이동이 나타났지만, 강한 성층이 형성되어 표층 수온이 25℃ 이상으로 상승하는 하계에는 고온의 표층을 피해 냉수대가 발달한 하층부에서만 *E. pacifica*의 제한된 주야수직이동이 관찰되었다. 먹이 추적 지방산 마커와 위내용물 분석에 따르면 황해에서 *E. pacifica*는 식물플랑크톤(규조류 우점)이 풍부한 층계에는 규조류를 주요 먹이원으로 섭취하는 반면, 하계에는 미생물 및 원생동물을 포함한 다양한 먹이원을 활용하는 것으로 나타났다.

• *Calanus sinicus*

- 저층냉수대의 형성(층계)과 발달(하계)시 주요 요각류 *Calanus sinicus*의 발달 단계 별 주야 수직분포 패턴을 확인하였다. 층계에 *C. sinicus*의 성체 암컷의 뚜렷한 주야수직이동이 관찰된 반면, 하계에 *C. sinicus*의 미성숙체 V기의 주야수직이동성이 나타났다. 2010년 여름철 *C. sinicus*의 미성숙체 V기가 먹이농도가 상대적으로 낮고, 수온이 평균 25.74℃를 나타낸 수층(10-20m)으로 올라왔다. 층계와 추계에 미성숙체 1, 2, 3, 4기의 최대 개체수는 먹이농도 최대 층에서 항상 나타나 포식자에 대한 도피행동보다 먹이섭식에 비중을 두는 것으로 여겨졌다. 식물플랑크톤 현존량과 엽록소-a 농도는 층계에 비해 하계에 높게 나타났고, 초미세 및 미소식물플랑크톤 그룹이 하계에 우점하였다.
- 황해저층냉수층 유종섬모류 분포 조사결과 저층 연안중으로 알려져 있는 *Tintinnidium primitivum*이 우점적 분포가 확인되었다. *Tintinnidium primitivum*는 정점 A03와 B02를 제외한 BCWL의 나머지 모든 정점에서 관찰되었으며 이와 같은 정점 특이적 분포는 2009년의 조사결과와 일치하였다. 향후 황해저층냉수대에 우점적으로 서식하는 유종섬모류 *Tintinnidium primitivum*의 생태학적 특성을 조사하여 황해저층냉수의 고유생태계에서 이들 개체군의 역할을 파악할 필요가 있다.
- 조사 지역의 봄철 영양염 분포는 식물플랑크톤의 소비에 의해서 조절된다. 엽록소-a의 농도가 높은 정점에서는 영양염 농도가 낮게 관측된다. 특히 상층부 영

양염 농도가 낮았던 A3 지역에서 엽록소-a 농도가 다른 정점들에 비해 높게 나타났다. 이는 A3 정점에서 황해 저층냉수가 형성됨에 따라 수층의 안정도가 강화되었기 때문이다. 수층의 안정화는 대륙붕에서 식물플랑크톤이 빛이 제한되는 수심까지 이동하는 것을 막아주는 역할을 한다. 여름철 영양염 분포는 성층 형성에 의해서 상층부의 영양염은 고갈되는 반면, 황해저층냉수의 영향을 받는 정점들의 성층아래는 영양염 농도가 증가하는 경향을 보였다. E 라인에서 저층 영양염은 연안으로 갈수록 상층부로 이동하는 양상을 보여 물리적인 요인에 의해 연안 쪽으로 갈수록 수층이 용승 하는 것으로 판단된다.

○ 음향분야

- 본 연구는 2010년 춘계(4월)와 하계(8월)에 황해 냉수대 중앙부에서 음향 자원 조사를 실시, 동물플랑크톤의 주, 야 수직이동 및 계절적인 변화를 측정 하였다. 실험은 동물플랑크톤의 군집의 수직운동의 패턴을 알기 위해 상용화된 과학 어군 탐지기를 이용, 음향신호를 수집 및 체적산란강도(S_V) 분석과 net를 이용해 채집한 동물플랑크톤의 정량 및 정성분석 결과를 비교하였다.
- 음향 조사 분석 결과 춘계의 경우 음향산란층의 전형적인 주, 야 수직이동의 패턴을 확인 할 수 있었다. 반면에 하계의 음향조사 분석결과, 춘계와 달리 수온이 높은 야간의 경우 산란층이 표층까지 상승하지 못하고, 수온약층 아래에서 음향 산란층이 확인되었다. 따라서 황해냉수대 내의 음향산란층의 수직운동은 수온에 큰 영향을 받는 것을 음향 조사 기법을 이용하여 확인하였다.

○ 지질분야

- 1, 2차 년도 연구를 통하여 황해중앙 해역의 외편모조류 시스트의 분포 특성과 주요 집적지를 파악함.
- 황해저층냉수대 해역 퇴적물에서 외편모조류 시스트의 산출량이 높게 나타나는 이유는, 수괴의 성층이 약화되는 가을과 겨울에 저층냉수대에 축적되어 있던 많은 양의 영양염이 표층으로 공급됨으로써 다른 해역에 비해 보다 더 나은 식물플랑크톤 성장 환경이 조성되었기 때문인 것으로 해석됨.
- 유공충 각을 이용한 산소 및 탄소 안정동위원소비 값을 분석한 결과, 과거 황해중앙해역이 연안 환경이었을 당시의 연구해역의 염분은 15psu 미만(현재 32~33psu)이었으며, 황해저층냉수가 형성된 이후 저층수의 온도는 평균

약 4°C 내외이었던 것으로 추정됨.

V. 연구개발결과의 활용계획

○ 물리유동 분야

- 기후변동의 영향을 가늠할 수 있는 지시자로서 황해저층냉수대의 역할이 예상되며, 이에 반응하는 생태계의 하위영양단계 변화는 상향조절을 통해 수산자원의 변동 예측이 가능할 것으로 기대됨.
- 황해저층냉수대에서 에너지 흐름을 이해하기 위한 해양생물 먹이망에 대한 결과는 기후변화에 따른 한반도 주변해역의 해양 생태계 변화를 예측하는 모델 연구에 중요한 자료로서 활용 가능함.

○ 생태계 분야

- 황해저층냉수대에서 에너지 흐름을 이해하기 위한 해양생물 먹이망에 대한 결과는 기후변화에 따른 황해 해양환경 변화(냉수대 변동)가 해양 생태계에 미칠 영향 예측을 위한 모델 연구에 중요한 자료로서 활용 가능함.
- 황해 생태계의 생산성과 변동성, 수산자원의 주요 먹이원인 동물플랑크톤의 생태 및 영양 가치를 파악함으로써 해양생물자원의 생태계기반 관리가 가능해짐
- 황해저층냉수대에서 에너지 흐름을 이해하기 위한 해양생물 먹이망에 대한 결과는 기후변화에 따른 한반도 주변해역의 해양 생태계 변화를 예측하는 모델 연구에 중요한 자료로서 활용 가능함.

○ 음향분야

- 황해 냉수대 내의 음향 자원량 조사를 통해 수산자원의 주요 먹이원 인 동물플랑크톤의 시·공간적인 분포량 및 기초적인 양을 파악함으로써 해양생물자원의 생태계기반 관리 가능.
- 음향조사를 통한 동물플랑크톤의 시·공간적인 및 계절적 분포량을 파악함으로써, 기후 변화에 따른 황해 해양환경 변화(냉수대 변동)가 해양 생태계에 미칠 영향 예측을 위한 모델 연구에 중요한 자료로서 활용가능.

○ 지질분야

- 본 연구를 통해 다양한 환경프록시를 이용하여 과거부터 현재까지 진행되어 온 황해 해양환경의 시·공간적 변화 특성을 밝힘으로써, 현재 황해에서 일어나고 있는 환경 현상을 평가/이해하는데 중요한 자료를 제공.

S U M M A R Y

○ Physical system

For a long-term management of Yellow Sea marine environment, understanding concerned on Yellow Sea Bottom Cold Water (YSBCW), distribution and long-term variability of water, and circulation of the current system by model are needed.

- YSBCW, cold water mass in bottom layer in summer, has water property in previous winter when water column is homogeneous.
- The lowest temperature exist in the northern part of the central Yellow Sea all the times of the year.
- General structure of YSBCW including coastal frontal structure is detected during field observation in summer.
- In spring, the northwestern current around 10cm/s is observed at the whole layer of the central Yellow Sea, and Strong tidal current is existed at lower layer.
- Distribution of the YSBCW is relatively simulated well using the Numerical circulation model.

○ Ecosystem

- *Euphausia pacifica*

The Yellow Sea Bottom Cold water Mass (YSBCM: $\leq 10^{\circ}$ C) is a unique physical feature of the Yellow Sea. It forms through winter cooling and mixing and it is persistently observed in the deep central region during summer. *Euphausia pacifica*, known as a key species in the Yellow Sea ecosystem, should use the YSBCM as a refuge to survive through the hot summer ($>20^{\circ}$ C in surface) because their high tolerance temperature limit is 15° C. However, no solid evidence was reported yet to prove it. Therefore, we investigated their horizontal and vertical distribution and

feeding ecology during spring (YSBCM was not formed) and summer (YSBCM was well developed) in 2010. In spring, eggs predominated in all stations, but the early larval stage (nauplii) and gravid females (≥ 2 cm TL) were concentrated in the coastal region with an active diel vertical migration. In summer, the abundance of larvae (calyptopis and furcilia stage) with a few number of eggs increased in the coastal region with a limited diel vertical migration below thermocline. Juveniles and small adults (≈ 1 cm TL) were concentrated in the YSBCM of the central region. According to detailed profiles of the dietary lipid biomarkers and gut content analysis, *E. pacifica* adults mainly fed on diatoms/dinoflagellates during the spring phytoplankton bloom, while they fed on various preys (i.e., protozoa, flagellate cyst, small diatoms, detritus) during the summer. These results suggest that *E. pacifica* may not only utilize the YSBCM as an over-summering site but also switch their food sources to survive through the hot summer.

- *Calanus sinicus*

- Diel vertical distribution of developmental stages of *Calanus sinicus* was investigated during spring and summer of 2010. Adult females of *C. sinicus* showed clear DVM patterns in spring, whereas immature copepods (stage V) replaced the DVM pattern in summer. Immature copepods (stage V) moved upward into the water column (10–20 m) with relatively low chlorophyll-*a* concentrations and water temperature (Ave. 25.74°C) in summer 2010. Maximum abundances of immature copepods (stage I, II, III, IV) appeared at the chlorophyll-*a* maximum layers in spring and summer. The abundance and chlorophyll-*a* concentrations of phytoplankton were higher in summer than those in spring. Especially, pico- and nano-sized phytoplankton dominated phytoplankton community in summer.
- *Tintinnidium primitivum* known as a benthic species was dominantly distributed in Yellow Sea Bottom Cold Water (YSBCW). The species was detected from the most sampling stations except for St. A03 and B02, which

is similar trend with the result of 2009 cruise. Further investigation about the ecological characteristics of *T. primitivum* needs to understand its role in the energy flow within lower trophic level in YSBCW.

- The distribution of nutrients may be controlled by the consumption of phytoplankton during spring in the southern Yellow Sea, indicating that stations showing high chlorophyll-*a* concentrations was also observed to low nutrient concentration in the upper layer. Especially, A3 station showed lowest nutrient and highest chlorophyll-*a*. It may be due to the formation of Yellow Sea Bottom Cold Water (YSCW), which may be strong water stability by the different density between the upper and lower layer and then not limited light for phytoplankton growth. During summer, nutrient at the upper layer showed low concentration by the strong formation of thermocline, which interrupt nutrient supply from the lower layer to the upper layer. Nutrients at the lower layer showed high concentration for the effect of YSBCW. The range of YSBCW expanded at the lower layers of the western parts in E line, southernmost of study area, and then the water mass was upwelling from western stations to eastern stations during summer, as indicated by the variation of thermocline and nutrient concentration at upper layer.

○ Acoustic

In this study, diel vertical migration and its seasonality in acoustic estimates of zooplankton are observed around centre of the YSBCW in April and August 2010. *In situ* measurements were combined scientific echosounder system and net sampling. In order to understand migration patterns of zooplankton patches, we mainly focused on the volume backscattering strength (S_v) data among the acoustic data. In April, diel distribution of the zooplankton patches within the study area showed an apparently vertical migration pattern, Diel migration pattern in summer was differed from that of the spring seasons. The SSL migrated to the below thermocline at night time. These migration patterns might be strong related to vertical temperature structure of the YSBCW.

○ Sediments

To understand palaeoenvironmental and ecological characteristics of the Yellow Sea Bottom Cold Water (YSBCW) mass region, spatial- and temporal variations of microfossil assemblages (dinoflagellate cysts and foraminiferas) and geochemical compositions in sediments from the Central Yellow Sea Mud (CYSM) deposits have been investigated.

- Dinoflagellate cysts in surface sediments of the CYSM are most abundant north of 36°N in the Yellow sea, where *Spiniferites bulloideus* and *Alexandrium* cysts generally dominate. The maximal abundance of dinoflagellate cysts in the CYSM is probably attributed to high primary productivity in surface waters of the YSBCW.
- A distinct accumulation zone of harmful algal bloom-causative species, *Alexandrium* cysts has been found in the CYSM deposits, especially the northeastern sector of the central Yellow Sea.
- Foraminiferal assemblages in core sediments from the CYSM show five-benthic foraminiferal biofacies, indicating palaeoenvironmental changes in the YSBCW area. The stable oxygen and carbon isotope records of benthic foraminifera show that the palaeosalinity of the study area was less than 15‰, and the average temperature of the YSBCW varied between 4 and 4.6 °C.

C O N T E N T S

Summary	i
Contents	xii
Chapter I Outline of the study	1
Section 1 Necessity of the study	3
Section 2 Objectives and contents of the study	5
Chapter II States of technical development in the home and foreign countries	3
Section 1 Trends of study in Korea	15
Section 2 Trends of study in foreign countries	17
Chapter III Results of the study	21
Section 1 Physical system	23
Section 2 Ecosystem krill	49
Section 3 Ecosystem copepod	62
Section 4 Acoustic	82
Section 5 Sediments	94
Chapter IV Achievements of objectives and contributions to the related area	115
Section 1 Achievements of objectives	117
Section 2 Contributions to the related area	121
Chapter V Application plans of the results of the study	125
Chapter VI References	129

목 차

요 약 문	i
목 차	xii
제 1 장 서론	1
제 1 절 연구개발의 필요성	3
제 2 절 연구개발의 목표 및 내용	5
제 2 장 국내외 기술개발 현황	13
제 1 절 국내 연구동향	15
제 2 절 국외 연구동향	17
제 3 장 연구개발수행 내용 및 결과	21
제 1 절 물리 특성 분야	23
제 2 절 생태계 분야-크릴	49
제 3 절 생태계 분야-요각류	62
제 4 절 음향 분야	82
제 5 절 퇴적물 분야	94
제 4 장 목표 달성도 및 대외 기여도	115
제 1 절 목표 달성도	117
제 2 절 대외 기여도	121
제 5 장 연구개발 결과의 활용계획	125
제 6 장 참고문헌	129



제 1 장 서론

제 1 절 연구개발의 필요성

제 2 절 연구개발 목표 및 내용

제 1 장 서론

제 1절 연구개발의 필요성

1. 연구의 경제·사회 기술적 필요성

가. 기술적 측면

- 황해저층냉수(Yellow Sea Bottom Cold Water)(수온<10℃)가 황해 유용어류 자원의 주요 먹이인 요각류 *C. sinicus*와 난바다곤쟁이류 *Euphausia pacifica*의 over-summering site임이 밝혀지면서 황해저층냉수대의 생태계 구조와 기능 및 가치의 해석 필요성이 대두되고 있음.
- 현재까지 우리나라에서는 황해저층냉수대를 기초로 한 해양환경특성 연구가 전무한 상태이며, 황해저층냉수대의 특성이 가장 뚜렷한 하계철의 생태계 수직구조 특성 연구 또한 전무함.

나. 경제·산업적 측면

- 최근 황해는 각종 환경 사고, 지구온난화 등으로 환경오염과 생태계 파괴가 심각한 수준에 도달해 있으며, 해양환경 오염과 수산자원 남획으로 인하여 생물자원이 급격하게 감소하고 있음.
- 2000년대로 접어들면서 황해의 수온은 지속적으로 증가하고 있어, 하계 저층냉수대의 규모 및 특성 변이는 장기적으로 부유생태계 구조에 영향을 미칠 것임. 이는 유용수산자원의 주된 먹이원 중에 하나인 요각류의 하계 서식지의 범위가 축소되는 것을 의미하여, 수산자원의 관리차원에서 황해냉수대의 변화 파악이 필요함.
- 황해 수산자원의 먹이생물인 동물플랑크톤의 분포 및 생산력 및 먹이생물을 부양하는 하위영양단계와 해양환경 특성을 고려하여 저층냉수대의 생태적 가치를 평가하면 주요 수산어종의 생물량 변화 등을 예측할 수 있음.
- 유해성 적조를 일으키는 와편모조류 시스트의 분포특성 연구는 적조로 인해 해양·수산업에 미치는 영향 평가 및 잠재적 손실방지를 위한 간접적 기여 가능

다. 사회·문화적 측면

- UN 해양법이 발효되면서 중국과의 황해 경계 획정이 민감한 외교 문제가 되고 있으며, 황해를 중심으로 경제권이 확대되고 있으므로 황해의 지속가능한 발전을 위해서

는 인근 국가들과의 지역협력체 구축을 통한 긴밀한 관계 유지가 필요함. 따라서 한 중 공동연구를 통해 지속가능한 황해의 자원 개발 및 해양환경 보전을 위하여 상호 협력할 필요성이 있음.

- 64개의 광역해양생태계(Large Marine Ecosystems) 지역 중 하나인 황해는 중요한 어업자원이 부존하나 남획과 해양쓰레기로 몸살을 앓고 있어 지속가능한 이용을 위한 관리가 요구되는 곳임. 이런 문제를 해결하기 위한 필수 요건 중 하나가 사회적인 관심도의 향상인데 미지의 황해저층냉수대의 생태계 특성을 밝힘으로서 대중적 관심도를 끌어올릴 수 있는 계기가 마련될 수 있음.
- 황해는 한국, 중국, 북한 등 3국이 인접해 있어 이들 국가 간의 상호 협력 없이는 황해 전체의 자원 보존 및 관리에 어려움이 있음. 그러므로 황해 주변국들의 공동관심사인 황해 환경보전과 자원의 지속적 관리, 이용을 위해서는 국제 공동연구를 통한 체계적이고 광역적인 황해의 해양과학 조사와 자료의 축적이 절실함.

제 2절 연구개발의 목표 및 내용

1. 연차별 연구개발 세부목표 및 내용

구 분	목 표	내용 및 범위
1차년도 (2009)	- 황해저층냉수의 공간구조 및 변동성 파악	<ul style="list-style-type: none"> - 기존 자료 및 문헌 조사 . 기존 관측 자료 추가 분석 . 기존 연구 성과의 종합 - 조사선을 이용한 정밀 관측 . 냉수대 코어를 포함한 관측선 선정 . 하계 정밀 관측 (한-중 공동) 수행 - 시계열 자료 분석 . 해류, 연직 수온/염분 연직 구조 . 표층수온, 전선분포 - 황해 해수순환 모델 구축 . 해류, 조석, 밀도류 모델
	- 황해 저층냉수대의 생물, 화학적 환경 특성 및 역할 파악	<ul style="list-style-type: none"> - 기존 연구 성과 분석 후 연구관측선 설정 - 연구선을 이용한 현장 정밀 관측 - N-P-Z 관점의 플랑크톤 주요종 선정 및 환경과 주요종 간의 상관성 파악 - 냉수대 해역에서 target species (<i>Calanus sinicus</i>, <i>Euphausia pacifica</i>)의 시공간적 분포 - 요각류 <i>C. sinicus</i>의 하계의 주야 수직 이동 가능성 규명 - Target species의 lipid biomarker 분석을 통한 먹이관계 및 over-summering 기작 파악
	- 황해중양니질퇴적대 퇴적물의 특성 파악 및 퇴적층서 설정	<ul style="list-style-type: none"> - 기존자료 재분석, 기 확보된 코아퇴적물 분석 - 시료채취 - 황해중양니질퇴적대 퇴적물 특성 분석 - 황해중양니질대 퇴적체의 제4기 후기 퇴적층서 설정

2차년도 (2010)	<ul style="list-style-type: none"> - 황해저층냉수의 계절 변동성 분석 	<ul style="list-style-type: none"> - 조사선을 이용한 정밀 관측 <ul style="list-style-type: none"> . 춘, 추계 정밀 관측 수행 . 전선 및 성층구조의 연변동성 분석 - 장기 시계열 자료 분석 <ul style="list-style-type: none"> . 성층구조와 해류의 계절 변동성 . 냉수대의 생성과 소멸과정 - 황해 해수순환 모델 구축 <ul style="list-style-type: none"> . 해류-조석-밀도류-파랑 접합모델 . 냉수대의 계절변동성 모의
	<ul style="list-style-type: none"> - 황해저층냉수대의 형성 및 발달시 <i>E. pacifica</i>와 <i>C. sinicus</i>의 분포 특성 및 생리/생태 변동 연구 	<ul style="list-style-type: none"> - 1차년도 하계 정밀 관측 결과 후 관측선 및 시기 증가여부 결정 - 미소생물먹이망(microbial loop) 구조 파악의 필요성 점검 - 연구선을 이용한 현장 정밀 관측 - 냉수대 형성/발달시 target species (<i>Calanus sinicus</i>, <i>Euphausia pacifica</i>)의 시공간적 분포를 통한 생활사 파악. - 냉수대 형성(춘계) 및 발달(하계)시기의 <i>C. sinicus</i>의 주야 수직 이동 변동성 파악 - <i>C. sinicus</i>의 주야 수직 이동 변동성 과 주요 환경요인과의 상관성 파악 - 선상배양실험을 통한 target species의 key biological parameter 측정 (성장률, 호흡률, 섭식률, 알 생산량, 부화율 등) - 냉수대 형성/발달시기(계절별) 현장채집과 선상실험을 통한 황해 생태계 먹이망에서의 target species의 시기별 역할 (에너지 전달) 및 위치 파악
	<ul style="list-style-type: none"> - 황해저층생태계 구조 파악을 위한 음향산란층 특성 연구 	<ul style="list-style-type: none"> - 황해저층생태계의 시·공간적인 음향 자원 조사 - 음향산란층의 분포 특성 및 일주이동 속도 측정 - 음향산란 분석 결과와 환경자료 및 동물플랑크톤 자료비교

	<ul style="list-style-type: none"> - 황해 퇴적물 내 외편모조류 시스트 군집의 시공간적 분포 특성 파악 	<ul style="list-style-type: none"> - 표층 퇴적물 시료 외편모조류 시스트 군집 분석 - 코어퇴적물의 외편모조류 시스트 군집분석, 연대측정 - 황해중앙니질대의 <i>Alexandrium</i> 시스트 분포 및 주요 집적지 파악 - 황해중앙니질대 코어퇴적물의 미고생물 및 안정동위원소비 분석
3차년도 (2011)	<ul style="list-style-type: none"> - 황해냉수대의 시공간 변동성 규명 	<ul style="list-style-type: none"> - 조사선을 이용한 정밀 관측 <ul style="list-style-type: none"> . 하계 정밀 관측 (한-중 공동) 수행 - 장비계류에 의한 시계열 관측 - 황해 해수순환 모델 구축 <ul style="list-style-type: none"> . 해류-조석-밀도류-파랑 접합모델 . 전선과 경계면에서의 순환구조
	<ul style="list-style-type: none"> - 황해저층냉수대 형성과정에 따른 황해 생태계 기능 및 구조 변화 	<ul style="list-style-type: none"> - 냉수대의 형성(춘계)/발달(하계)시 현상 현장조사 및 배양실험 - 냉수대 형성/발달시기의 <i>E. pacifica</i> 성숙 단계별 시공간적 군집 분포와 섭식생태 및 생존전략 파악 - 주요 환경 인자(수온, 영양염, 식물플랑크톤, 소형동물플랑크톤)와 주요동물플랑크톤 (<i>E. pacifica</i>와 <i>C. sinicus</i>)사이의 상관성 규명
	<ul style="list-style-type: none"> - 황해저층냉수대 형성과정에 따른 황해 생태계 구조 및 기능 변화 연구 	<ul style="list-style-type: none"> - 냉수대의 형성(춘계) 및 발달(하계)시기 현상 현장조사 - 냉수대 형성 및 발달 시기 <i>Calanus sinicus</i>의 시·공간적 분포 특성 파악 - 분포조절 환경 요인(수온, 영양염, 식물플랑크톤)특성과 <i>C. sinicus</i>의 시·공간적 분포 상관성 규명
	<ul style="list-style-type: none"> - 황해저층생태계 구조 파악을 위한 음향산란층의 시, 공간적인 분포 특성 파악 	<ul style="list-style-type: none"> - 음향산란층특성의 조사 및 분포 특성 파악 - 음향산란 분석 결과와 네트 채집을 이용한 동물플랑크톤 자료와 상관성분석 - 수온, 염분 등 환경자료와 음향자료와의 상관성 분석

	<ul style="list-style-type: none"> - 어란의 정밀분포도 작성 	<ul style="list-style-type: none"> - 대량의 어란 표본 분석 - 어란의 분포와 환경과의 상관성 분석
	<ul style="list-style-type: none"> - 황해중앙니질대의 외편모조류 시스트 군집 분석을 통한 황해 해양 생태 환경 변화 이해 	<ul style="list-style-type: none"> - 황해의 주요 환경지표 자료 분석 및 외편모조류 시스트 분포 자료와의 비교분석 - 주요 외편모조류 종의 적조발생 현황 자료 수집 및 분석 - 황해중앙니질대의 코어퇴적물의 외편모조류 시스트 군집 분석

2. 연차별 연구/사업의 내용 및 수행 방법

년 차	연구/사업의 수행내용	구체적인 수행방법 (이론적·실험적 접근방법명 등)
1차년도 (2009년)	<p><물리></p> <ul style="list-style-type: none"> • 황해냉수의 공간구조 및 변동성 파악 	<ul style="list-style-type: none"> - 기존 자료 및 문헌 조사 - 조사선을 이용한 정밀 관측 - 위성부이를 이용한 연속 관측 - 해류, 연직 수온/염분 구조 - 황해 해수순환 모델 구축
	<p><생물></p> <ul style="list-style-type: none"> • 한국 근해 <i>Euphausia pacifica</i>의 지방 바이오마커 분석을 통한 먹이 관계 파악 	<ul style="list-style-type: none"> - 1m conical net로 수직채집(저층-표층)하여 시간별/층별 시료 확보 - 지방 추출 및 분석 : Bligh and Dyer (1959)방법으로 지방 추출 및 TLC-FID를 이용한 지방 class 분리/분석 - 극성지방(지방산)과 중성지방(알코올, 스테롤) 성분 분석 (GC, GC-MS) - 타 해역(동중국해, 동해)의 <i>E. pacifica</i> 시료 확보 및 분석을 통한 해역별 섭식 생태 비교
	<ul style="list-style-type: none"> • 황해 핵심 요각류인 <i>Calanus sinicus</i> 개체군의 시, 공간적 분포 및 환경과의 상관성 파악 	<ul style="list-style-type: none"> - 폐쇄 네트로 동물플랑크톤 시료의 시간별, 층별 채집 - 동시에 동물플랑크톤 분포에 영향 환경요인 (생물 및 환경)의 채집 및 분석

	<ul style="list-style-type: none"> • 요각류 <i>Calanus sinicus</i>의 하계의 주야 수직 이동 가능성 분석 	<ul style="list-style-type: none"> - 동물플랑크톤 주요종 개체군의 발달단계 및 성별 수직이동 양상 분석 - 아치사 수온의 환경과 요각류의 수직이동 간의 관련성 분석 - 주야수직이동에 영향을 끼칠 수 있는 환경요인 구분 분석
	<p><지질></p> <ul style="list-style-type: none"> • 기존자료 재분석 및 기 확보된 코아 분석 	<ul style="list-style-type: none"> - 기존 연구결과 분석 - 미고생물학적 분석 (유공충, 외편모조류 시스트) - 점토광물 분석 - 입도분석 - 퇴적물 연대측정
	<ul style="list-style-type: none"> • 코어시료 채취 	<ul style="list-style-type: none"> - 하계조사 시 박스코아 채취
	<ul style="list-style-type: none"> • CYSM 퇴적체의 제4기 후기 퇴적층서 설정 	<ul style="list-style-type: none"> - 퇴적학적/미고생물학적 분석결과를 이용한 코아 대비
2차년도 (2010년)	<p><물리></p> <ul style="list-style-type: none"> • 황해냉수의 시공간구조 변동성 해석 	<ul style="list-style-type: none"> - 조사선을 이용한 정밀 관측 수행 - 전선 및 성층구조의 연변동성 분석 - 성층구조와 해류의 계절 변동성 - 냉수대의 생성과 소멸과정 - 황해 해수순환 모델 구축 및 냉수대의 계절변동성 모의
	<p><생물></p> <ul style="list-style-type: none"> • 선상사육실험을 통한 <i>E. pacifica</i>의 생리실험 • <i>E. pacifica</i>의 시·공간분포 • 냉수대 형성 vs. 발달 시 <i>E. pacifica</i>의 지방바이오마커분석 및 위내용물 분석 통한 먹이관계 파악 	<ul style="list-style-type: none"> - 춘계/하계 선상 현장조사 - 춘계 선상사육실험을 통한 <i>E. pacifica</i>의 알생산량, 부화율 측정 - 냉수대 형성(춘계) 및 발달(하계)시기 동안 net를 이용한 수직 채집을 통하여 <i>E. pacifica</i> 발달 단계별 시료 확보: 시·공간 분포 파악 - 생물 음향(bioacoustics) 기법 적용과 net 채집을 통해 냉수대해역에서 <i>E. pacifica</i>의 수직이동양상 파악 - 동시에 동물플랑크톤 분포에 영향을 미치는 환경요인(수온, 염분, 엽록소 a, 등) 측정

	<ul style="list-style-type: none"> - 냉수대 형성 vs. 발달 시기 동안 <i>E. pacifica</i>의 지방 바이오마커와 위 내용물 분석을 통한 섭식생태 파악
<ul style="list-style-type: none"> • 황해저층냉수대의 형성 및 발달 시 <i>Calanus sinicus</i>의 분포 특성 및 생리/생태 변동 연구 	<ul style="list-style-type: none"> - 춘계/하계 선상 현장조사 - 냉수대 형성(춘계) 및 발달(하계)시기의 <i>C. sinicus</i>의 주야 수직 이동 변동성 파악 - <i>C. sinicus</i>의 주야 수직 이동 변동성과 주요 환경요인과의 상관성 파악
<p><음향></p> <ul style="list-style-type: none"> • 황해저층생태계 구조 파악을 위한 음향산란층 특성 연구 	<ul style="list-style-type: none"> - 황해저층생태계의 시, 공간적인 음향 자원조사 - 음향산란층의 분포 특성 및 일주이동 속도 측정 - 음향산란 분석 결과와 환경자료 및 동물플랑크톤 자료 비교
<p><지질></p> <ul style="list-style-type: none"> • 표층퇴적물 외편모조류 시스트 분석 	<ul style="list-style-type: none"> - Mudie(1987)의 표준전처리 방식을 이용, 퇴적물 처리 - 현미경 슬라이드 제작, 광학현미경 동정 작업
<ul style="list-style-type: none"> • 박스/피스톤코아 퇴적물 외편모조류 시스트 분석 • 코아 퇴적물 연대측정 	<ul style="list-style-type: none"> - 하계조사 시 박스코아 채집 - Mudie(1987)의 표준전처리 방식을 이용, 퇴적물 처리 - 현미경 슬라이드 제작, 광학현미경 동정 작업 - 1차: 25cm 간격으로 예비분석자료 도출, 2차: 5~10cm 간격으로 고해상도 자료 도출 - 납동위원소를 이용한 연대측정 및 퇴적을 측정
<ul style="list-style-type: none"> • 황해중앙니질대의 외편모조류 시스트 (<i>Alexandrium</i>) 분포 및 주요 집적지 파악 	<ul style="list-style-type: none"> - Mudie(1987)의 표준전처리 방식을 이용, 퇴적물 처리 - 현미경 슬라이드 제작, 광학현미경 동정 작업

3차년도 (2011년)	<p><물리></p> <ul style="list-style-type: none"> • 황해냉수의 공간구조 및 변동성 규명 	<ul style="list-style-type: none"> - 조사선을 이용한 정밀 관측 - 장기 연속 관측 밀도구조와 취송류, 조석 잔차류의 관계 분석 - 해수유동 접합 모델로 전선과 경계면에서의 순환구조 해석
	<p><생물></p> <ul style="list-style-type: none"> • 선상사육실험을 통한 <i>E. pacifica</i>의 생리실험 • 지방바이오마커 분석을 통한 발달단계별 <i>E. pacifica</i>의 먹이관계 및 over-summering 기작 파악 • 냉수대 형성/발달/소멸 시 <i>E. pacifica</i>의 시공간분포를 통한 생활사 파악 및 주야수직이동양상 파악 	<ul style="list-style-type: none"> - 냉수대의 형성/발달/소멸시 선상 현장조사 - 표준화를 위해 제시된 방법으로 선상사육실험 통해 황해 수산자원의 주요 먹이원인 <i>E. pacifica</i>의 난생산량과 부화율을 측정함으로써 황해 <i>E. pacifica</i>의 번식과 생활사 파악함. - 먹이추적자분석(lipid biomarker)을 활용한 <i>E. pacifica</i>의 유생발달단계별 섭식 생태 비교 및 각 단계별 생존전략을 규명함. - 효율적인 <i>E. pacifica</i> 채집을 위한 적절한 채집 도구(네트) 디자인 - 생물음향기법과 네트채집을 병행하여 동물플랑크톤, 특히, <i>E. pacifica</i> 개체군의 동태파악 - 미국 NOAA 산하의 Hatfield Marine Station(Dr. Peterson 그룹)과 북태평양에 서식하는 <i>E. pacifica</i>의 지역별 유전자 계통분류 및 생식관련 유전자 발현 공동연구 수행
	<p><지질></p> <ul style="list-style-type: none"> • 황해의 주요 환경지표 자료 분석 및 외편모조류 시스트 분포 자료와의 비교분석 	
	<ul style="list-style-type: none"> • 주요 외편모조류 종의 적조발생 현황 자료 수집 및 분석 • Bohai만 연안퇴적물 내의 외편모조류 시스트 분석(중국과의 공동연구 가능) • 황해중앙니질대의 피스톤 코아퇴적물 내의 외편모조류 시스트 군집 분석 	



제 2 장 국내외 기술개발 현황

제 1 절 국내연구동향

제 2 절 국외연구동향

제 2 장 국내외 기술개발 현황

제 1 절 국내 연구동향

- ▷ 1983-1985 : 한국해역 종합해양환경도 작성 연구-황해(해양연 기본사업)를 수행함.
 - mapping 위주 주요 항목별 시료 채취함.
- ▷ 1986 : 한국해역 종합해양자원도 작성 연구-황해(해양연 기본사업) 연구를 수행함.
- ▷ 1991-1994 : 황해의 해양 자원 개발 연구(인하대학교-과학기술처사업)를 수행함.
 - 황해의 물리, 화학, 생물 및 지질 해양 환경의 특성을 규명함.
 - 황해의 주요 자원량을 추정하여 자원관리, 환경보전의 방향 제시를 목적으로 황해의 환경도 제작함.
- ▷ 1996-1998 : 황해의 해수순환과 물질플럭스 연구(과학기술부사업)를 수행함.
 - 한-중 정부간 해양과학기술양해각서(1994.10)에 의거 6차에 걸쳐 황해 해양 환경 공동조사를 수행함.
 - 황해를 구성하는 주요수괴들의 분포와 특성을 분석하여 황해냉수의 개략적인 공간 분포와 특성의 계절변동을 제시함. 겨울철 활발한 연직혼합으로 전 층이 균질한 냉수로 채워져 있으나, 봄철 성층 발달하기 시작하여 여름에는 따뜻한 상층과 하층의 냉수가 뚜렷하게 분리되는 특성을 보임. 가을철 상층이 점점 두꺼워지며 저층냉수가 점점 약화되어 겨울철 다시 전 층이 차가운 냉수로 채워지는 과정을 반복함.
 - 황해를 구성하는 주요수괴들의 분포와 특성을 분석하여 황해냉수대의 개략적인 공간 분포와 특성의 계절변동을 제시함.
 - 위성추적부이, 해류계 계류 등의 기술 적용을 통해 황해의 전반적인 해수유동 특성을 관측함. 조석과 기상에 의한 단주기 변동이 해수순환에 크게 영향을 미치며 제주난류의 존재와 변동성을 규명함.
- ▷ 1996-1998 : 황해종합해양관측(과학기술부사업) 연구를 수행함.
 - 환경, 생물 및 지질 분야 주요 항목별 시료를 채취함 (수온 및 염분, 영양염, 식물 및 동물플랑크톤, 자치어, 퇴적물 분포)
 - 황해의 주요 항목에 대한 춘계 중규모 분포 및 환경 요인과의 관련성을 연구함.

- ▷ 2002-2005 : 황해의 해황변동예보 기반기술(해양연) 연구를 수행함.
 - 우리나라 서해연안과 황해남부의 전선역을 통한 해수교환 특성을 연구함.
 - 해양관측부이를 이용한 장기해양관측기술 및 원격탐사 기술을 개선함.
- ▷ 1997 - 현재 : 한국(국립수산 과학원 서해수산 연구소)과 중국 국가 환경 보호 총국(중국 과학원)에서는 매년 한번씩 한-중 황해 환경 공동 연구를 수행하여 양국간의 자료 비교를 하고 있으나 황해저층냉수대에 대한 연구는 수행되지 않았음.
- ▷ 1961 - 현재 : 국립수산과학원에서 황해의 119개 관측점에서 매년 총 6회의 조사를 실시하여 현재까지 해양 기초자료를 축적하고 있으나, 황해저층냉수대에 대한 전문적인 조사는 수행되지 않고 있음.
- ▷ 2005-2009 : 황해광역생태계(YSLME) 연구 프로그램이 진행 중.
 - 한-중 국제 공동 연구 프로그램으로 UNDP에서 지원하며 해양 환경(오염), 해양 생태, 해양생물 다양성, 해역 관리, 수산 등의 분야가 있음.
 - 황해 생태계의 보존과 생물자원 관리를 위한 황해광역생태계(YSLME) 연구 프로그램 일환으로 진행된 한-중 공동 조사에서 2008년 동계와 하계에 황해 전반에 걸쳐 수층 하위 생태계와 저층 생태계에 대한 연구가 수행되었으며, 하계의 조사에서는 저층냉수대의 생태환경 및 지표 생물종을 조사하였음.
- ▷ 2005 : 하계 동중국해 북부해역에 위치한 황해저층냉수대와 식물플랑크톤 군집의 분포특성 연구 결과 발표 [한국해양환경공학회지; 윤 등, 2005]
- ▷ 2006 : 황해에서 난바다곤쟁이류의 시, 공간적 분포와 환경요인과의 상관성 연구 결과를 발표함 [Ocean Science Journal; Yoon et al., 2006]
- ▷ 2007 : 황해에서 요각류 *Calanus sinicus*의 환경 및 자원조절 측면에서의 장기간 변동 연구 발표 [Marine Environmental Research; Kang et al., 2007]
 - 주요 유용수산어류 중 표층성 어류인 멸치(*Engraulis japonicus*)의 자원량을 지탱하는 먹이생물 중 초식성 요각류인 *C. sinicus*의 20년간의 장기간 변동과 물리적 요인 및 식물플랑크톤의 상호관련성에 대한 연구 결과를 발표함.
 - 점진적으로 증가하는 수온과 과도한 어류의 남획이 *C. sinicus*의 의미있는 개체수 증가를 가져옴.
- ▷ 2008 : 춘계 황해 동물플랑크톤 중규모 분포와 환경특성연구 발표 [Ocean Science Journal; Kang and Kim(2008)]
 - 춘계에 우점한 요각류인 *C. sinicus*, *Centropages abdominalis*, *Acartia omorii*과 *Paracalanus parvus* s.l.의 중규모 분포 특성을 결정짓는 환경요인이 저층에 존재하는 황해저층냉수대의 영향을 받음을 보고함.
- ▷ 현재 국내에서는 퇴적물 내의 외편모조류 시스트를 이용한 해양생태환경 연구

가 활발하지 않음.

- 영양염 유입량이 많은 연안 퇴적물 내의 외편모조류 시스트를 이용하여 지난 수십 년 동안 진행된 부영양화 과정을 추적하는 연구가 수행됨 (Kim et al., 2009).
- 또한 적조가 빈번히 발생하는 남해 연안 퇴적물의 조사를 통하여 유해성 적조의 분포 및 확산 특성에 관한 연구가 수행됨 (Shin et al., 2007).
- 황해의 경우, 외편모조류 시스트 연구는 주로 연안을 중심으로 이루어져 왔으며 (e.g. Lee and Matsuoka, 1994; Qi et al, 1996; Matsuoka et al, 1999, Shin et al., 2007), 외양에서의 외편모조류 시스트 분포 연구는 거의 이뤄지지 않음.
- 특히 PSP (Paralytic Shellfish Poisoning) 을 일으키는 원인으로 알려진 *Alexandrium* 외편모조류의 시스트가 황해 중앙역에 집적되어있다고 보고된 바 있으나, 그 기작이나 영향에 대한 연구는 수행되지 못함.
- ▷ 황해에서 난바다곤쟁이류 (*Euphausia pacifica*)에 관한 연구는 종 구성에만 제한되어 있음. Hong (1969)은 *E. pacifica*와 *Pseudeuphausia latifrons*, Suh (1990)은 *P. sinica*의 분포에 대해서만 보고함. 최근에, Yoon et al. (2000)이 환경 인자와 관련하여 *E. pacifica*의 발달 단계에 따른 공간 분포에 대해 조사하였지만, 이 연구 또한 조사기간이 극히 제한되어, 분포에 영향을 미치는 주요인을 결정하는 데에는 미흡함.
- ▷ 음향을 이용한 생물탐지에 대한 연구는 매우 빈약한 수준임. 그러나 해양생태 규명, 수산자원 보호 및 연안 산업시설 보호 등 활용 필요 분야에서 확대되고 있는 상황임

제 2절 국외 연구동향

▷ 중국

- China-GLOBEC (China-Global Ocean Ecosystem Dynamics) program의 일환으로 황해저층냉수대를 중심으로 수산자원의 주요 먹이원인 요각류 *Calanus sinicus*의 분포 및 개체군 동력학 연구 수행. 주요 연구목표 : 하계에 형성되어 있는 황해저층냉수대의 생태학적 역할로서 *C. sinicus*의 계절적 도피처의 가능성을 규명함.
- 중국은 10여 년 전부터 황해저층냉수대와 관련한 연구를 진행하였고, 특히 동물플랑크톤의 생리, 생태학적 연구가 집중적으로 진행되었음. 일부 초소형플랑크톤의 분포에 미치는 저층냉수대의 영향을 연구한 예가 있음.
- 하계에는 크기가 큰 식물플랑크톤 (20 μ m 이상)보다 초미소플랑크톤이 상대적으로 우세하게 출현하며, 그 생물량의 분포는 수직으로는 수온약층 혹은 표층에

서 높게 나타남. 수평적으로는 황해저층냉수대가 존재하는 곳에서 상대적으로 적은 생물량이 나타나 중규모분포 특성에 직접적 영향을 주었다고 보고함.

- 중국과학원 산하 지리연구소에서 발행한 Atlas of Ecological Environment in the Beijing-Tianjin Area (1990, Science Press, Beijing)에는 발해만의 해양환경에 대한 조사결과가 있음. 이 자료는 황해북부의 생태환경 및 저서생물 군집의 분포, 연체동물, 환형동물, 극피동물, 갑각류의 생물량 및 주요 유용 저서생물의 분포 및 회유도가 수록되어 있음. 수록된 생물종은 대하 (*Penaeus orientalis*), 맛조개 (*Siliqua minima*), 거미불가사리 (*Amphioplus japonicus*, *Ophiopholis mirabilis*) 등임.
- 중국과학원 해양연구소에서는 1958-1959년, 1975-1976년 2회에 걸쳐 대규모의 해양저서생물조사를 수행하였음. 이 자료를 토대로 황해에서 갑각류, 연체동물, 다모류의 지리적 분포를 해수 순환과 관련하여 해석하였음. 이 결과는 황해의 생물지리학적 구계를 설정하는 자료로 활용되었음. Liu et al.(1983)은 우리나라와 북한의 서해를 제외한 발해만, 황해북부, 황해남부, 동중국해에 이르는 광범위한 해역에 걸쳐 군집 특성, 우점종, 생물량 등의 지리적 분포를 황해의 해수순환 및 물리화학적 환경 특성과 연관지어 분석하였음.
- 난바다곤쟁이류에 관한 연구는 Chen(1991)이 *Euphausia nana*와 *P. sinica*의 분포에 대해 보고하였고, Lee et al. (1998)은 *E. pacifica*와 *P. sinica*의 분포에 대해 보고하였음.

▷ 미국

- 미국은 중·미 해양 및 수산과학 공동연구 협정에 따라 1980-1981년 동중국해의 퇴적과정에 대한 연구를 수행하였음. 이 조사로 대형저서동물 및 중형저서동물의 생태학적 연구가 아울러 진행되었음.
- 대양 위주의 연구에서 지역해 대상의 연구가 활발해지면서, 80년대 위성추적 부이 관측, 90년대 ADCP 장기관측을 수행함. 수치모델과 연계하여 황해 해수 특성과 해류의 시공간 변동성 연구를 수행함.
- 국제 GEOTRACE 프로그램의 일환으로 황해 및 동중국해와 같은 marginal sea에서의 물질 순환 연구를 적극 수행할 계획을 수립 중. 북태평양 해양과학기구(PICES) 산하 워킹그룹 23(크릴 생물/생태 연구)에서는 북태평양에 광범위하게 서식하는 난바다곤쟁이류(*Euphausia pacifica*)에 대한 서식해역 별 비교 연구 및 이들의 생태계 내에서의 역할에 대한 연구를 현재 추진 중에 있으며, 가장 독특한 생활사를 가지는 것으로 사료되는 황해의 난바다곤쟁이에 대한 생리/생태학적 연구를 중국과 한국 과학자에게 적극 추천하고 있음.
- 우즈홀 연구소(Woods Hole Oceanographic Institution)는 약 1980년대 이

후부터 광범위한 해역에서 *Alexandrium* 종의 분포를 조사해왔으며, 이를 통해 각 해역 별 *Alexandrium*의 분포와 성장을 조절하는 생물·화학·물리적 요인들을 연구

- ECOHAB (The Ecology and Oceanography of Harmful Algal Blooms) 프로그램 운영 아래, *Alexandrium* 종을 비롯한 주요 유독성 적조 원인종의 군집 변화 기작을 규명하고, 해양생태계, 공공 보건 및 경제 활동에 미치는 영향을 평가하는 작업 수행

▷ 독일

- 독일에서 진행 중인 PANGAEA 프로젝트의 일환으로, DINO-ATLAS (Atlas of modern organic-walled dinoflagellate cyst distribution)는 광범위한 해역에서 채집된 현생 해양 퇴적물의 외편모조류 시스트 군집을 조사하고, 각 종에 대한 전 지구적 분포 지도를 그리는 작업 수행. 각 종의 분포 양상을 NOAA에서 제공되는 주요 해양 표층환경요인(온도, 염분, 영양염)과 비교함으로써, 해양 외편모조류 시스트를 해양환경 지시종으로서 이용하기 위한 자료 제공.

▷ 미국-유럽

- 1994년에 시작된 ICES(International Council for the Exploration of the Sea)의 WGHABD(Working Group of Harmful Algal Bloom Dynamics) 프로그램은 지난 수십 년 동안 주요 외편모조류 종의 해양 표층 분포와 저층 퇴적물 집적지를 모니터링하고 있으며, 계절에 따른 생산량 변동과 적조 발생 추이를 분석하는 연구를 수행
- 북미, 유럽의 선진 해양과학 연구기관에서는 해양환경지시자로서의 외편모조류 시스트의 유용성 연구가 오래전부터 진행되어, 현재는 전 세계 외편모조류 시스트 Atlas를 제작, 해양환경변화 연구에 적극 활용하고 있음 (e.g. DINOATLAS).

▷ 일본

- 일본인에 의한 황해의 생물 조사는 일제강점기 조선총독부 시절 수산시험장에서 어업생물을 대상으로 한 수산학적 연구가 대부분임.
- 일본 서해수산연구소에서는 황해 수산자원 조사의 일환으로 수행된 조업 시험에서 트롤, 기선저인망, 대형 드렛지를 이용해 어류와 저서동물을 채집하였음. 조사기간은 1953년 10월부터 1971년 5월까지이며, 19년간 총 1,000여회가 넘는 조사를 하였음. 이 연구결과는 1961년부터 1980년까지 서해수산연구소 연구보고지에 분류군별로 수록되어 있음.
- 지리적인 한계로 직접 관측에 의한 연구는 거의 없으나, 수치모델을 이용한 해

수순환 및 생태계 반응 연구를 주로 수행함.

- 해양탐사 기술에 응용되는 수중음향 분야는 어군탐지기, 수심 관측, 해류 측정, 해저 퇴적층, 수온 분포 측정, 군사적 용도 등 많은 분야에서 활용되고, 원양 및 연근해 생태계 조사와 자원조사에도 많이 응용되고 있음.



제 3 장 연구개발수행 내용 및 결과

제 1 절 물리특성분야

제 2 절 생태계분야 -크릴

제 3 절 생태계분야 -요각류

제 4 절 음향 분야

제 5 절 퇴적물 분야

제 3 장 연구개발수행 내용 및 결과

제 1 절 물리 특성

1. 서론

황해의 해양구조는 기본적으로 황해와 동중국해의 경계면을 통해 황해로 유입하는 동중국해 해수와 황해 상공에 위치한 대기권 기단에 의해 영향을 받는다 (Lie, 1984). 황해의 해수순환 또한 이들의 영향에 의해 좌우되며, 뚜렷한 계절변화를 보인다 (Fig. 1) 겨울철 황해에서는 쿠로시오에서 기원된 고온고염수의 황해난류수가 황해 중심권을 따라 유입되며, 우리나라의 연안과 중국연안을 따라서 연안수가 남하하는 순환을 보인다. 여름철에는 표층에서는 양자강입구에서 제주해협 방향으로 유동하는 저염의 양자강희석수에 의해 영향을 받으며, 저층에서는 황해 중심부에 10°C이하의 냉수대가 존재한다.

황해 내부에서 수온분포는 남에서 북으로 갈수록 수온이 낮아지는 분포특성을 보인다 (Lie et al., 1986; Chu et al., 1997). 여름철에는 태양복사에너지로 인해 표층수온이 증가하면서 황해 전반에 걸쳐 고온수가 분포하며, 겨울철이 여름철보다 남북방향의 수온구배가 크게 나타난다. 물론 지역적으로는 해류와 조류 그리고 기상조건 등에 따라 작은 규모의 변동은 발생할 수 있으나 전체적인 수온의 분포 형태는 크게 변하지 않는다 (Fig. 2a). 염분의 경우도 황해 남부에서 북부로 갈수록 감소하면서 수온과 유사한 분포특성을 보이나 여름철 양자강담수 세력과 강수량에 따라 지역적인 차이를 보인다 (Fig. 2b). 황해의 연직구조는 겨울철 강한 연직 혼합으로 거의 균질한 분포 특성을 보인다. 봄철에는 서서히 태양복사에너지가 증가하면서 표층수온이 상승하고 강수 증가로 표층염분이 저하됨에 따라 상층과 하층의 밀도차가 커지게 된다. 여름철에 형성되는 강한 밀도약층은 상층과 하층 사이에 열교환은 물론 물질교환을 차단시키는 역할을 함으로 상층과 하층의 수온변화도 서로 차이를 보이게 된다. 가을철에는 상층의 수온이 점점 낮아지면서 혼합층이 깊어지고, 겨울철 전 층이 균질화되는 과정이 반복된다. 연안역중 조류가 강한 곳에서는 조석혼합으로 인하여 계절약층이 깨지거나 약해져서 수직혼합이 활발하여 수온이 수직적으로 균질한 분포를 보인다 (Lie, 1989; Seung et al., 1990).

황해를 지배하는 수괴는 일반적으로 고온 ■ 고염의 황해난류수, 저온의 황해저층냉수, 저염 ■ 저온의 한국연안수와 중국연안수 및 고온 ■ 저염의 양자강희석수로 대별되며 이들 사이의 혼합수가 여러 형태로 존재한다.

이 중에서 황해저층냉수는 다른 곳으로부터 유입되어 새롭게 형성된 해수가 아니고 황해 저층에 분포하여 계절적 해수 특성이 다른 수괴와 뚜렷하게 구분되어 하나

의 수괴로서 받아들인다 (과학기술부, 1998a). 즉, 황해저층냉수는 겨울철 형성된 냉수가 다음 여름까지 저층에 남아서 표층 해수에 비하여 상대적으로 수온이 낮기 때문에 냉수로 부르는 것이다. 일반적으로 여름철 황해 중심골을 중심으로 저층에 고립된 형태로 유지되고 있다.

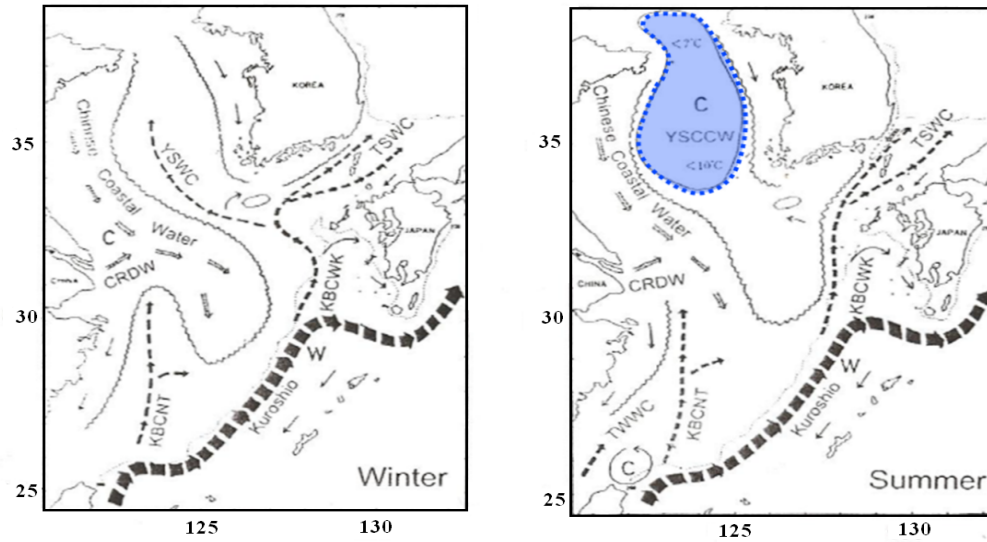


Fig.1. Horizontal circulation patterns near 50m depth (Kondo, 1985).

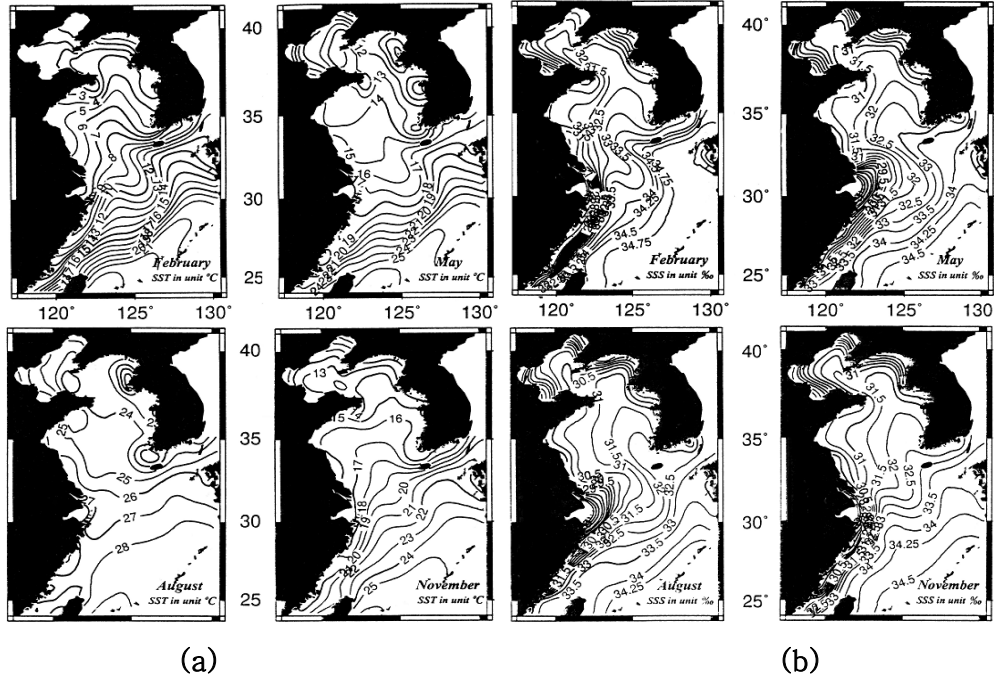


Fig. 2. Monthly mean sea surface temperature (a) and salinity (b) digitized from the oceanographic atlas of the state ocean agency of China (China Ocean Press, 1992).

황해저층냉수는 일반적으로 10℃ 이하의 황해 중앙부 저층에서 나타나는 수괴 (Inoue, 1974; Nakao, 1977; Lie, 1984; Kondo, 1985)를 뜻하지만, 염분의 특성에 따라 다른 의견들이 제시되고 있다. Nakao(1977)는 10℃이하의 수온과 32.0~32.5‰의 염분 특성을 갖는 수괴를 황해저층냉수라 정의하였고, Lie(1984)는 10℃이하 32.0~33.0‰의 범위를 갖는 수괴를 황해저층냉수라 정의하였다. 윤등(1991)은 산둥반도 이남의 전 황해역과 제주 서남방역의 냉수괴를 포함한 해역의 하계 저층냉수($T < 12^{\circ}\text{C}$, $32.0 < S < 33.5\text{‰}$)를 황해저층냉수라 정의하였다.

황해저층냉수의 핵은 일반적으로 3곳에 위치하는 것으로 파악된다 (Fig. 3). 황해 북부에는($122^{\circ} 12' \text{ E}$, $38^{\circ} 14' \text{ N}$; Su and Weng, 1994) 비교적 안정적이고 수온이 가장 낮은($< 6.0^{\circ}\text{C}$) 저온수 핵이 있으며 황해 남부의 골에는 8℃ 이하의 저온수 핵이 폭넓게 분포한다. 한-중 해양공동 조사의 (과학기술부, 1998a) 관측 자료에서는 저층 냉수의 염분의 범위는 대략 32.0~33.5 psu로 나타났다. 중국의 학자들은 또 하나의 저온수 핵이 황해남부의 서쪽에 자주 관측이 되었음을 보고하고 있다. 이는 4~6월에 산둥반도 아래쪽 40 m 이심의 천해역에 나타나는 것으로 7월이 되면 태양복사로 수온이 높아져 저온수 핵은 소멸된다. 황해저층냉수는 안정적으로 존재하지만 분포 범위와 수온 및 염분값은 연변화가 있다 (Weng et al., 1994).

이 연구에서는 춘계와 하계의 현장 관측 자료를 바탕으로 황해 저층 냉수대의 계절별 특성을 살펴보고자 한다. 또한 황해의 해수순환을 모사하기 순환모델을 구축하고 이를 관측 자료와 비교 검토를 실시하고 있다.

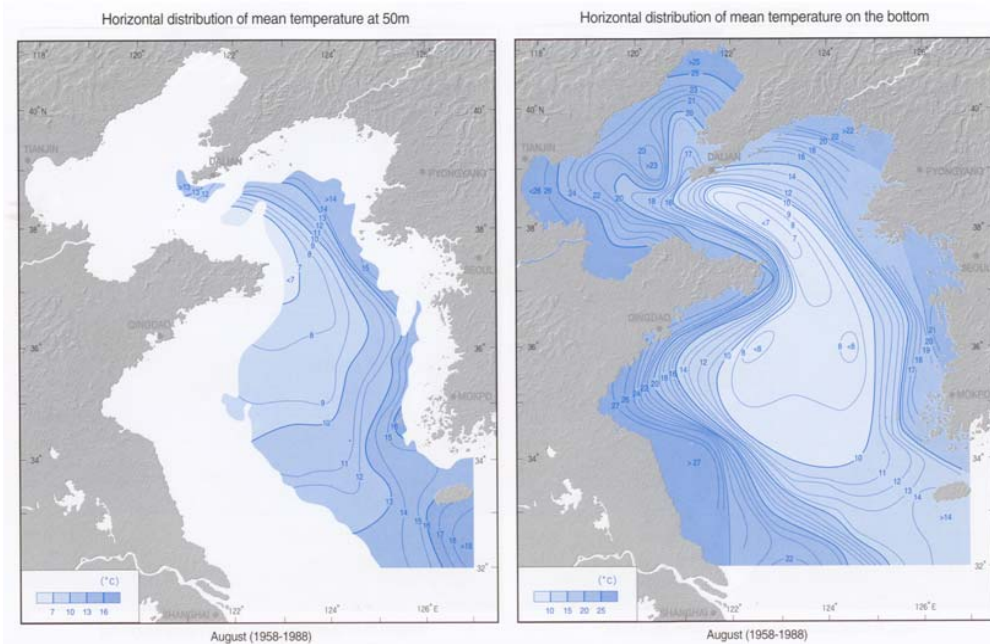


Fig. 3. Horizontal distribution of temperature at 50 meters depth layer (left) and bottom layer (right) in August (China Ocean Press, 1992).

2. 관측 개요

2.1. 춘계

춘계에는 2010년 4월 13일부터 18일까지 수온과 염분, 용존산소, 해류계 (Acoustic Doppler Current Profiles, ADCP) 관측을 실시하였다. 관측 해역과 관측 정점은 Fig. 4와 같으며, 관측 시기와 위치 등 관측 정점에 대한 자세한 내용은 Table 1에 나타내었다. 총 21개 정점에 대해 CTD (SBE 911plus) 관측이 이루어졌다. 또한 시간에 따른 해수 특성을 파악하기 위해 25시간 연속 관측 정점인 정점 D3에서는 약 1시간 간격으로 CTD 관측을 실시하였으며, 일부 시간대인 오전 1시에서 2시, 오후 1시에서 2시 사이에는 10분 간격으로 자료를 수집하였다. 또한, 25시간 관측 정점(D3)에서 해수의 유동 특성을 파악하기 위해 ADCP를 연구선에 장착하여 연속 유속 관측을 실시하였다.

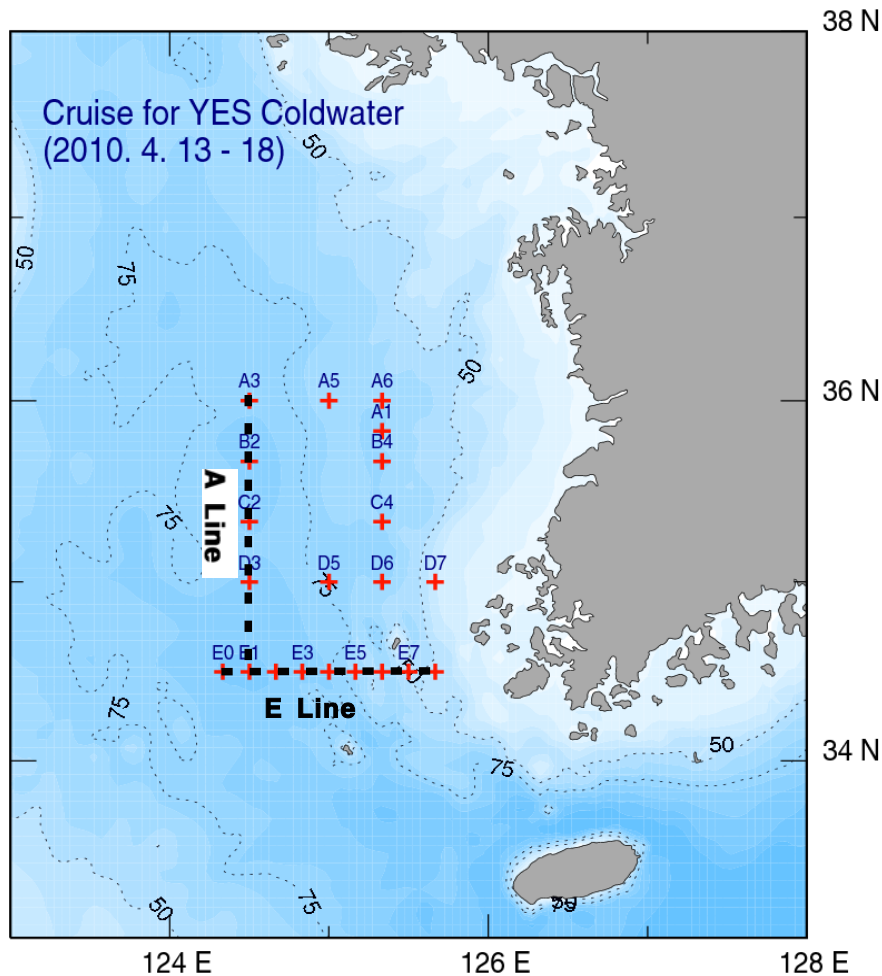


Fig. 4. Study area and CTD casting stations at April, 2010.

Table 1. Information of CTD casting stations in April 2010.

정점	관측날짜	위 치		관측수심 (m)
		위도	경도	
E08	2010/04/15	34° 29.182'N	125° 40.070'E	41
E07	2010/04/15	34° 30.020'N	125° 29.882'E	47
E06	2010/04/15	34° 30.034'N	125° 19.946'E	70
E05	2010/04/15	34° 30.092'N	125° 09.888'E	73
E04	2010/04/15	34° 30.308'N	124° 59.879'E	74
E03	2010/04/15	34° 29.785'N	124° 49.964'E	94
E02	2010/04/15	34° 30.026'N	124° 39.383'E	92
E01	2010/04/15	34° 29.990'N	124° 29.966'E	70
E00	2010/04/15	34° 29.962'N	124° 19.896'E	75
D03	2010/04/15	34° 59.682'N	124° 29.890'E	85
C02	2010/04/17	35° 20.088'N	124° 30.018'E	84
B02	2010/04/17	35° 40.140'N	124° 30.030'E	84
A03	2010/04/17	35° 59.932'N	124° 30.568'E	81
A05	2010/04/17	35° 59.986'N	125° 00.116'E	72
A06	2010/04/17	35° 59.976'N	125° 20.033'E	70
AB1	2010/04/17	35° 49.992'N	125° 20.038'E	72
B04	2010/04/17	35° 40.022'N	125° 20.183'E	72
C04	2010/04/17	35° 20.014'N	125° 20.096'E	73
D05	2010/04/17	34° 59.842'N	125° 00.014'E	84
D06	2010/04/17	34° 59.936'N	125° 20.057'E	67
D07	2010/04/17	35° 00.024'N	125° 39.996'E	27

2.2. 하계

하계에는 2010년 8월 16일부터 21일까지 수온과 염분, 용존산소, 위성추적부이 (Autonomous Drifting Ocean Station, ADOS) 관측을 실시하였다. 관측 해역과 관측 정점은 Fig. 5와 같으며, 관측 시기와 위치 등 관측 정점에 대한 자세한 내용은 Table 2에 나타내었다. 총 21개 정점에 대해 CTD (SBE 911plus) 관측이 이

루어졌으며, 일부 정점을 제외하고는 봄철과 같은 정점에서 관측되었다. 25시간 연속 관측 정점인 정점 D3에서는 약 1시간 간격으로 CTD 관측을 실시하였으며, 일부 시간대인 오전 약 1시 30분에서 2시 30분, 오후 약 1시 30분에서 2시 30분 사이에는 10분 간격으로 자료를 수집하였다. 해류의 거동과 연직 수온의 시공간 분포를 파악하기 위해 위성추적부이인 ADOS를 정점 E1과 D3, B2에 투하하였다. ADOS 부이는 6m 간격으로 총 8개의 수온센서와 12m 간격으로 4개의 압력센서가 장착되어 있다. ADOS 투하 정보는 Table 3과 같다.

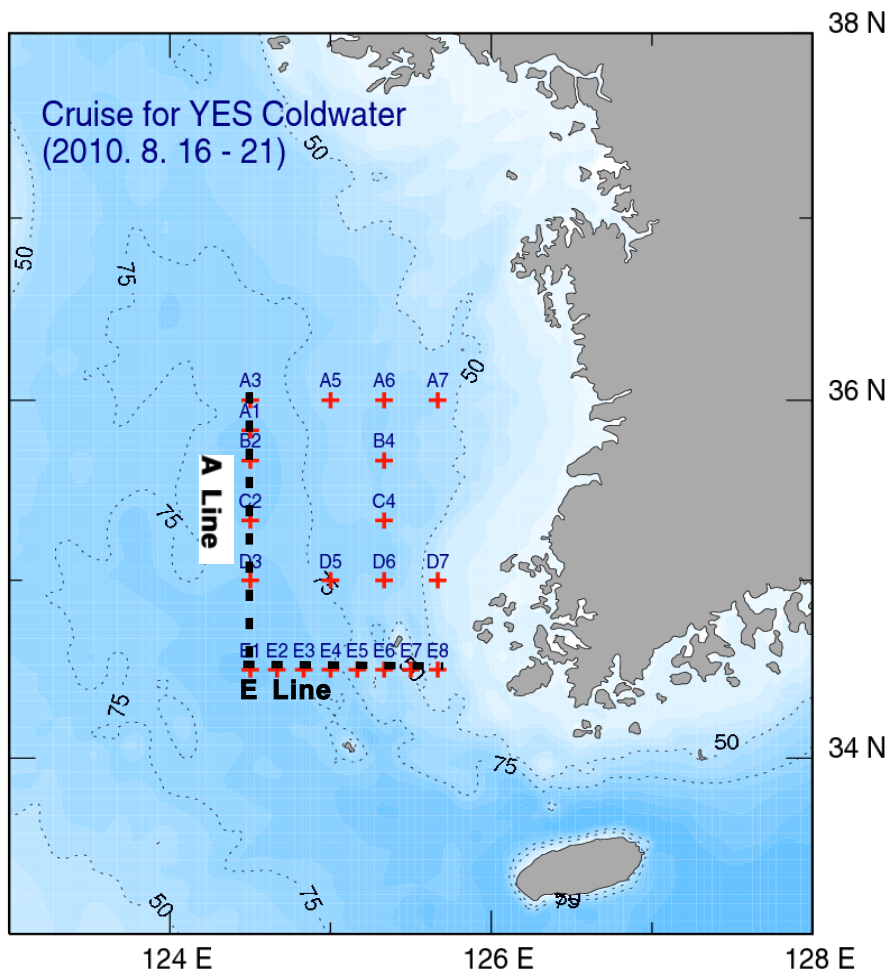


Fig. 5. Study area and CTD casting stations at August, 2010.

Table 2. Information of CTD casting stations in August 2010.

정점	관측날짜	위치		관측수심 (m)
		위도	경도	
E08	2010/08/17	34° 29.888'N	125° 39.925'E	35
E07	2010/08/17	34° 29.917'N	125° 29.904'E	48
E06	2010/08/17	34° 29.959'N	125° 20.014'E	70
E05	2010/08/17	34° 29.995'N	125° 09.967'E	70
E04	2010/08/17	34° 29.892'N	124° 59.888'E	70
E03	2010/08/17	34° 29.972'N	124° 49.950'E	90
E02	2010/08/17	34° 30.240'N	124° 39.024'E	90
E01	2010/08/17	34° 30.055'N	124° 30.049'E	73
D03	2010/08/17	34° 59.904'N	124° 30.019'E	86
C02	2010/08/19	35° 19.843'N	124° 29.994'E	82
B02	2010/08/19	35° 39.869'N	124° 30.077'E	81
AB1	2010/08/19	35° 49.861'N	124° 30.016'E	80
A03	2010/08/19	35° 59.958'N	124° 30.020'E	80
A05	2010/08/19	35° 59.956'N	125° 00.114'E	75
A06	2010/08/19	36° 00.180'N	125° 20.132'E	70
A07	2010/08/19	35° 59.941'N	125° 40.102'E	63
B04	2010/08/19	35° 40.062'N	125° 19.894'E	72
C04	2010/08/20	35° 20.000'N	125° 20.068'E	72
D05	2010/08/20	34° 59.838'N	124° 59.863'E	83
D06	2010/08/20	35° 00.019'N	125° 20.129'E	68
D07	2010/08/20	35° 00.128'N	125° 40.030'E	28

Table 3. Information of ADOS deployment.

ID	Type	Sta. No.	Latitude (°N)	Longitude (°E)	Deploy date
21540	C	E1	34° 31.162'N	124° 30.077'E	2010/08/17
43360	C	D3	35° 00.008'N	124° 29.986'E	2010/08/18
25550	C	B2	35° 40.336'N	124° 30.060'E	2010/08/18

3. 결과

3.1. 해수의 물리적 특성

3.1.1. 수괴 분포

봄철과 여름철 수온과 염분의 상관관계는 Fig. 6에 나타낸 것과 같다. 파란색으로 나타낸 것은 봄철에 관측된 수온과 염분의 상관관계를 나타낸 것이고, 빨간색으로 나타낸 것은 8월에 관측된 것이다. 4월에 관측된 자료는 모두 10°C이하의 수온을 보이고 있으며, 정점 D7를 제외하고는 32.5 psu < S < 33.1 psu의 염분 범위를 나타낸다. 정점 D7에서 염분값은 다른 정점과 독립된 분포특성을 보인다. 이 정점은 연안에 근접한 곳으로 서해연안수의 영향을 받는 것으로 생각된다. 그러나 전체적으로 4월달의 수온과 염분 특성은 표층과 저층이 거의 유사한 겨울철의 특성을 유지하고 있다.

반면, 8월에는 고온저염수에서 저온고염수까지 폭넓은 수온 ■ 염분 분포를 보인다. 여름철에는 태양복사에너지에 의한 표층수의 가열과 주변 연안수와 담수의 유입으로 인해 고온저염의 해수특성이 나타나며, 저층에서는 10°C이하의 황해냉수대 특성이 보인다. 그림에서 10°C이하의 냉수대는 32.5 psu < S < 33.1 psu의 염분 범위를 나타낸다. 이와 같은 냉수대의 범위는 2009년 8월에 관측된 결과와 일치한다.

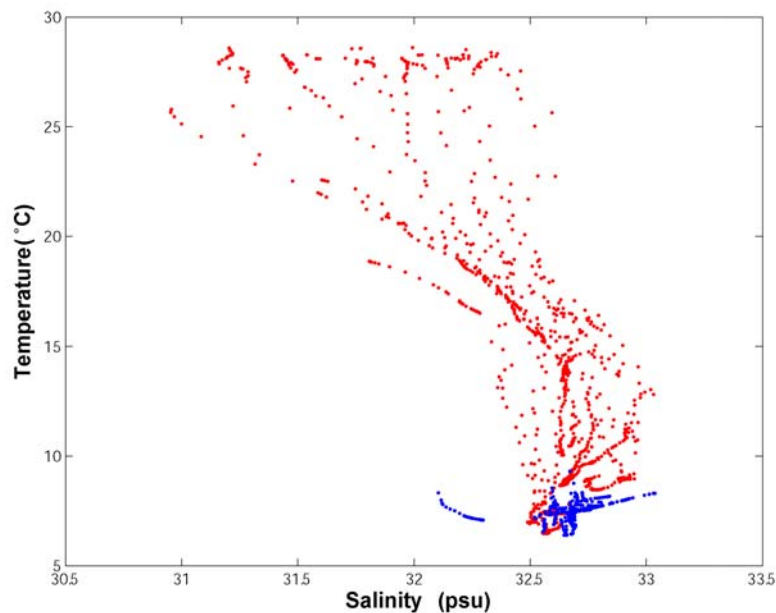


Fig. 6. T-S diagram of all station in April(Fig. 5) and August(Fig. 5).

3.1.2. 수온과 염분의 수평 공간 분포

봄철과 여름철에 관측된 수온과 염분의 표층과 저층 수평분포는 각각 Fig. 7과 Fig. 8에 나타냈다. 봄철에는 황해 관측 영역 전반에 걸쳐 10°C 이하의 수온이 표층과 저층 모두에서 관측되었다 (Fig. 7). 수온의 경우, 표층에서는 약 9°C의 수온이 관측 영역 중심부인 정점 D5에서 나타나면서 주변보다 상대적으로 고온의 해수가 분포하였다. 이와 반대로 저층에서는 황해골 남쪽 해역인 정점 E1~E3 지점에서 상대적으로 고온수가 분포하였다. 그러나 표층과 저층의 차는 모든 정점에서 2°C이하로 표층과 저층이 거의 유사한 수온 분포를 보이고 있다.

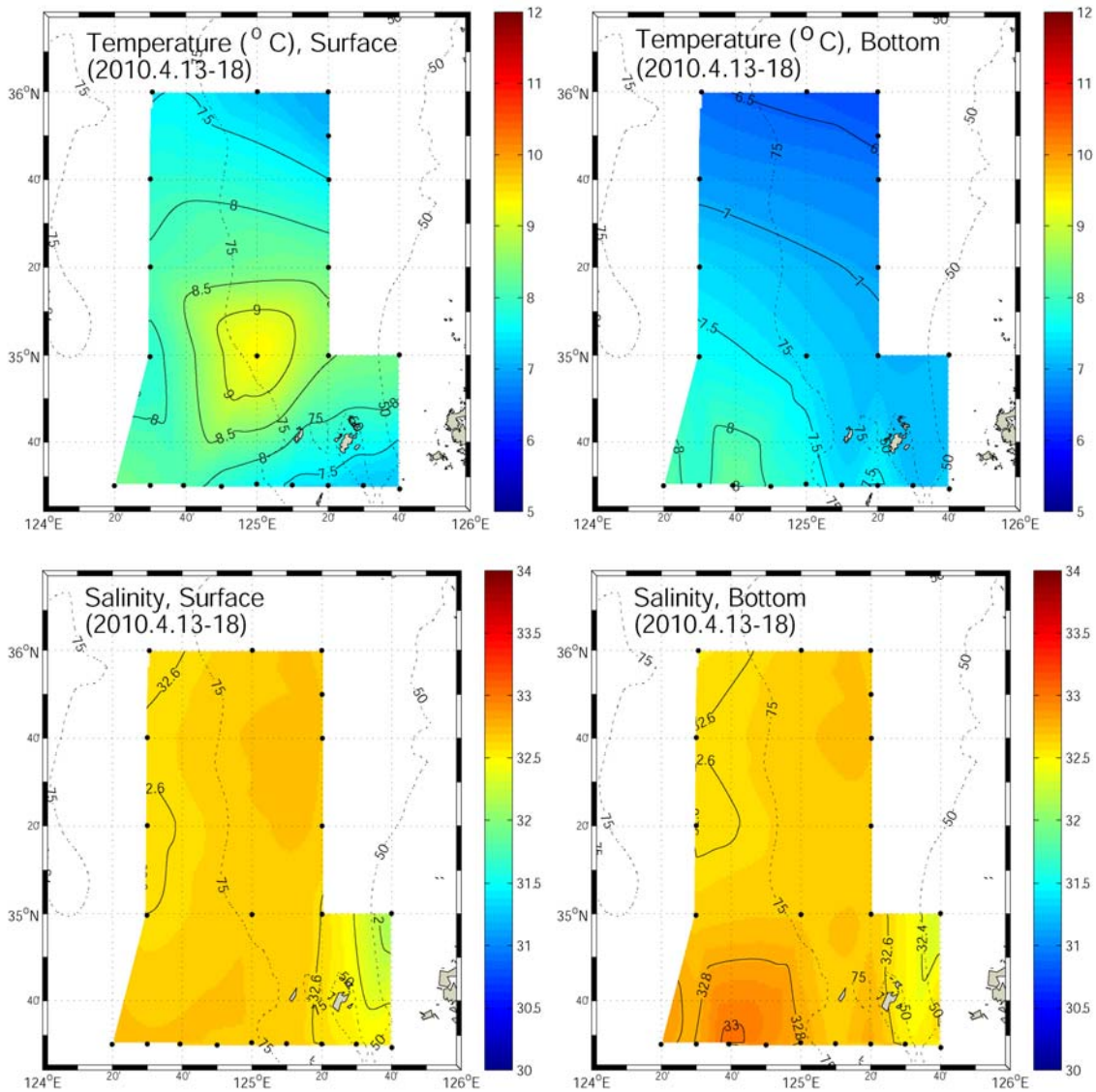


Fig. 7. Horizontal distribution of temperature and salinity at surface and bottom in April, 2010.

염분의 경우, 32.5 psu에서 33 psu 범위의 염분이 관측영역 전반에 걸쳐 분포하고 있다 (Fig. 7). 단 서해연안에 근접한 해역에서 32.1 psu 이하의 염분이 분포하고 있으며, 황해 중심골 남부 해역에서는 주변해보다 상대적으로 고염인 해수가 분포하고 있다. 이 해역은 또한 고온수가 존재하는 곳이다. 즉, 저층에서는 서해연안으로 갈수록 저온저염수가 분포하며, 황해 중앙골 남부해역에서는 고온고염수가 존재한다.

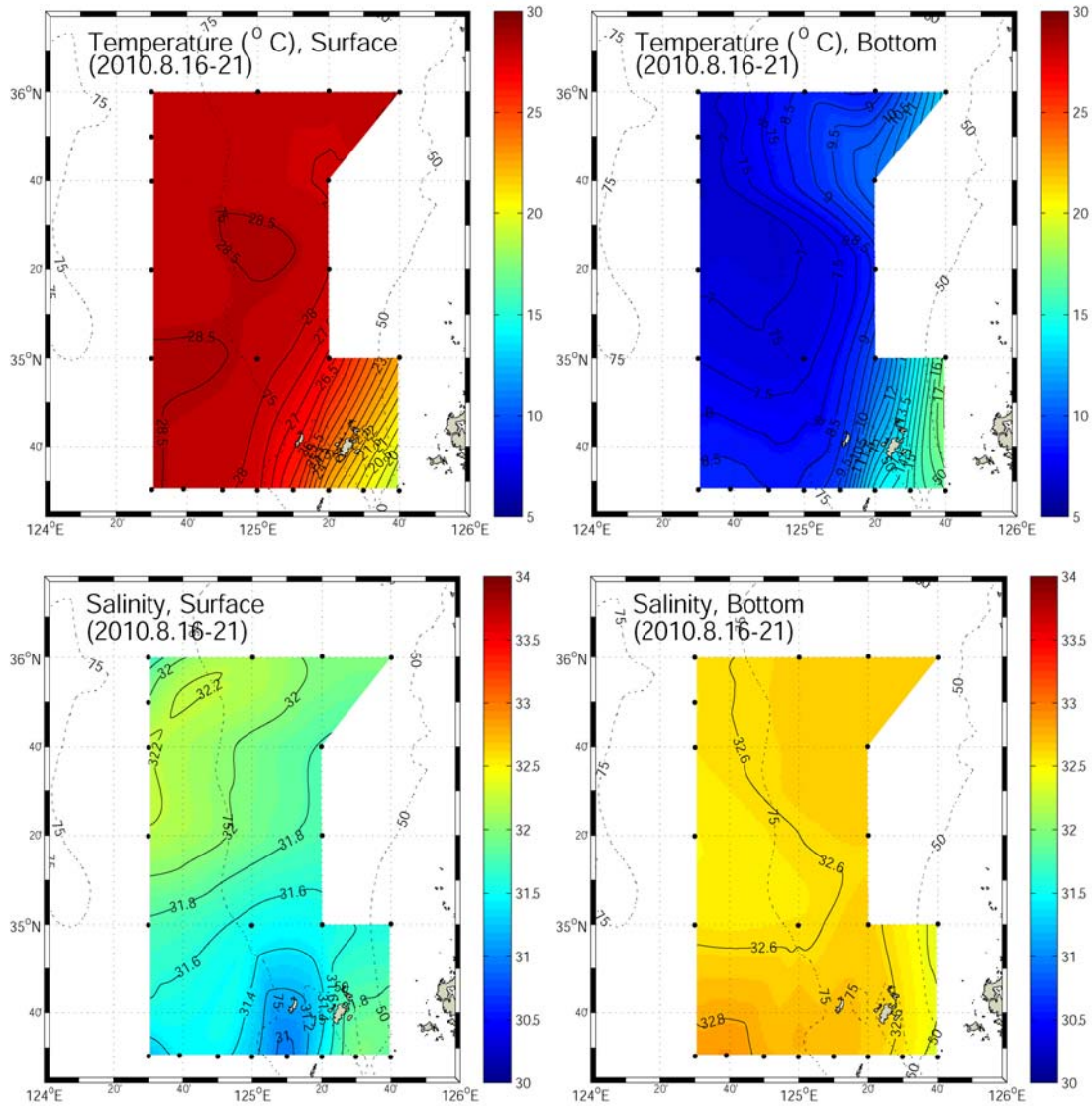


Fig. 8. Horizontal distribution of temperature and salinity at surface and bottom in August, 2010.

저층의 수온분포는 표층과 반대되는 양상을 보인다 (Fig. 8). 황해 중심부에서는 10°C 이하의 저온수가 분포하고 있으며, 서해안으로 갈수록 수온이 증가하고 있다. 염분의 경우, 약 32.5에서 33 psu의 염분이 관측해역 전반에 분포하고 있으며, 서

해안안으로 갈수록 저염수가 분포하고 있다. 황해 중심골 남부해역에서는 상대적으로 고염인 해수가 분포하고 있으며, 이는 봄철 저층에서 나타나는 고염수의 분포해역과 유사하다.

이와 같은 현상은 2009년 여름철에 관측된 황해중심부 해역에서의 관측결과와 크게 다르지 않다. 즉, 여름철 표층에서는 저층보다 고온저염인 해수가 존재하며, 황해중심부 해역이 연안역보다 상대적으로 고온저염이다. 저층에서는 연안역이 황해중심부보다 고온저염인 해수가 분포하며, 황해중심부에서는 황해저층냉수가 존재한다.

3.1.3. 수온과 염분의 연직 공간 분포

봄철과 여름철 황해의 연직 공간분포는 황해남부 해역과 중앙부 해역의 관측정선 자료로 분석하였다. Figure 4에서 황해남부 해역의 정선 E는 정점 E0에서 E8까지이며, 황해 중앙부 해역의 정선 A는 정점 A3, B2, C2, E1를 나타낸다. 여름철에도 봄철과 같은 지점에 대해 분석이 이루어졌는데, Figure 5에서 황해남부 해역의 정선 E는 정점 E1에서 E8까지이며, 황해 중앙부 해역의 정선 A는 정점 A3, B2, C2, E1를 나타낸다.

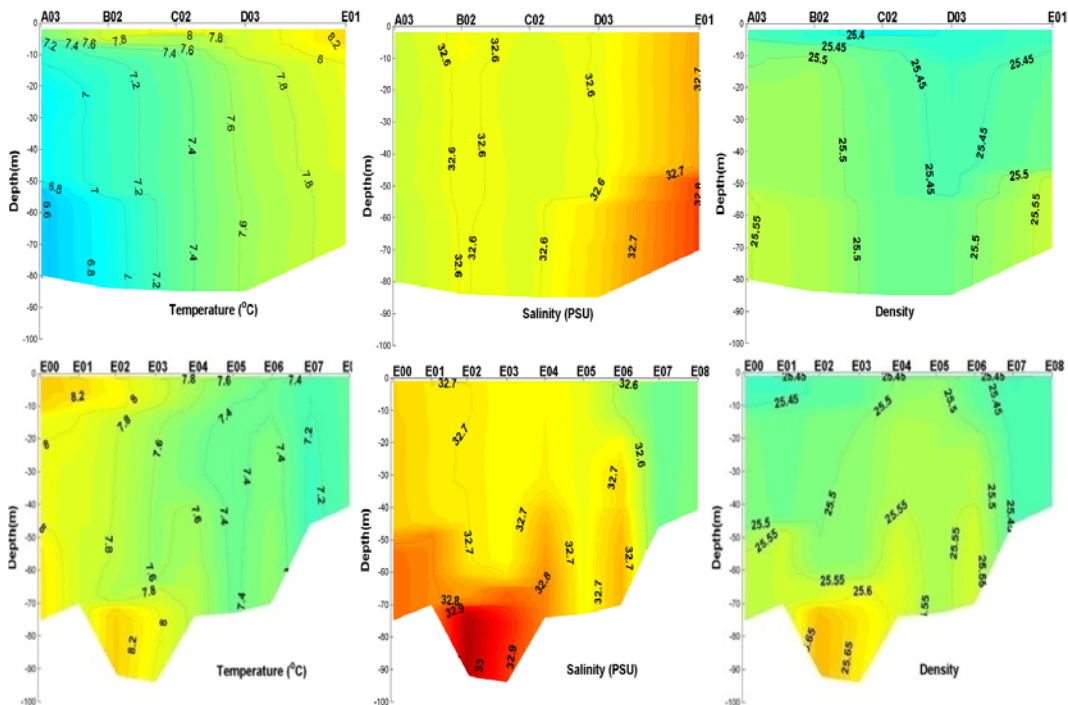


Fig. 9. Vertical structure of temperature, salinity and density along Line A and E in April, 2010.

Figure 9는 봄철에 관측된 정선 A와 정선 E에 대한 수온, 염분, 밀도의 연직 분포를 나타낸 것이다. 표층에 약한 혼합층이 형성되어 있으며, 전반적으로 표층과 저층은 거의 균일한 수온구조를 보이고 있다. 그러나 황해중앙부 해역에서는 저층에서 약 6.6℃의 최저 수온이 나타나며, 황해 북쪽해역에서 남쪽으로 유입되는 구조를 보이고 있다. 전반적으로 북쪽해역에서 남쪽해역으로 향할수록 고온수가 존재하고 있다. 염분의 경우는, 남쪽 해역에서 상대적으로 고염수가 존재하고 있으며, 특히 표층보다는 저층에서 북쪽으로 유입되는 고염수의 구조가 나타나고 있다.

황해남부 해역의 수온과 염분 구조는 황해중앙부 해역보다 조금 복잡한 구조를 보이고 있다. 표층과 저층의 연직 차는 그다지 크지 않으나, 정점 E2에서 E4의 저층에서 상대적으로 고온고염수가 분포하고 있다. 이 해역은 주변보다 수심이 깊은 골을 형성하고 있으며 황해 중심골로 연결되는 곳이다. 수온의 경우 황해 중앙부에서 서해 연안으로 향할수록 저온수가 분포하고 있으며, 중앙골에 위치한 정점 E0에서 최고수온이 나타난다. 염분의 경우, 저층에서 표층보다 고염인 해수가 존재하고 있으며, 서해 연안으로 갈수록 저염수가 분포하고 있다.

Figure 10은 여름철에 관측된 정선 A와 정선 E에 대한 수온, 염분, 밀도의 연직 분포를 나타낸 것이다. 황해중심부 해역에서는 수심 20m~30m 사이에 강한 수온약층이 형성되어 있다. 수온약층을 경계로 표층은 고온의 균질한 해수가 분포하고 있으며, 저층에서는 10℃이하의 저온수가 존재하고 있다. 황해 중심부의 북쪽해역에서는 저층에서 최저수온인 7℃이하의 냉수대가 수심 40m 이하에 존재하고 있다. 이 해역은 봄철에 최저 수온이 나타났던 곳과 동일한 정점이다. 즉, 이 해역에서는 연중 7℃ 이하의 냉수대가 존재하고 있음을 알 수 있다. 염분의 경우, 표층에서는 북쪽해역과 남쪽해역에서 각각 저염수가 분포하고 있으며, 남쪽 해역의 해수가 더 저염의 특성을 보이고 있다. 저층에서는 북쪽해역보다 남쪽해역에서 상대적으로 고염인 해수가 존재하고 있으며, 북쪽으로 유입되는 양상을 보인다. 이는 봄철에 나타난 최고 염분값의 특성과 크게 다르지 않다.

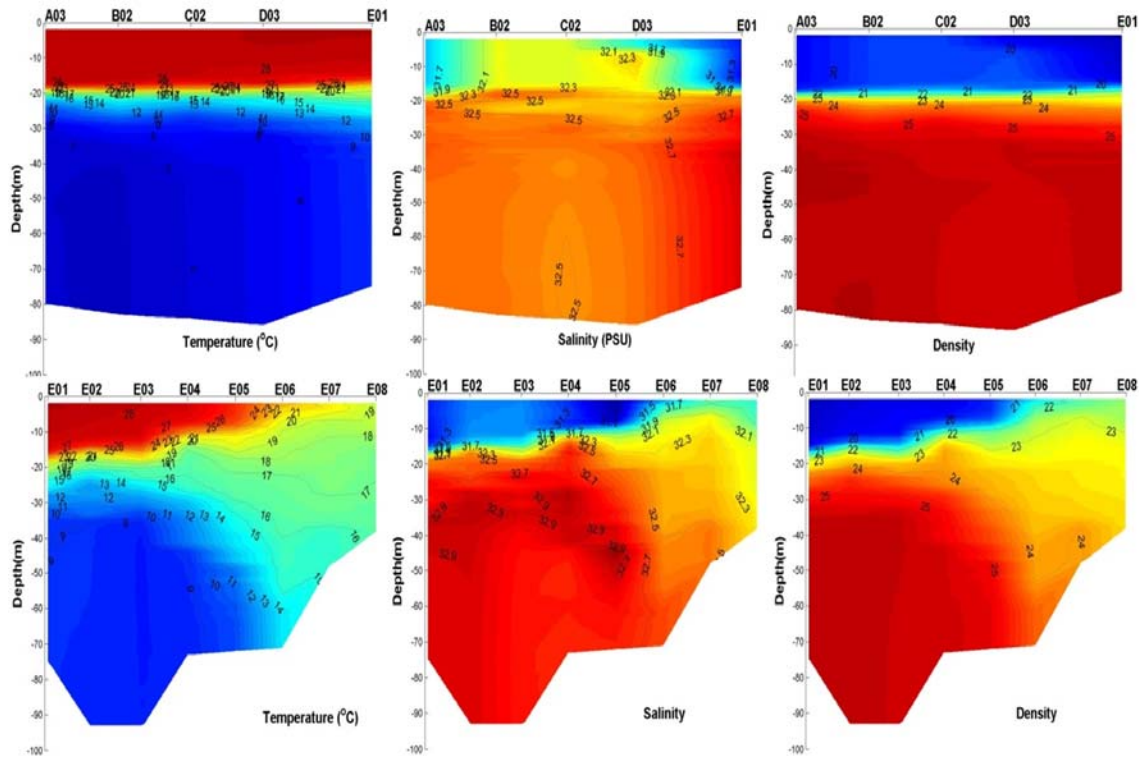


Fig. 10. Vertical structure of temperature, salinity and density along Line A and E in August, 2010

황해남부 해역에서는 황해중심부 해역과 달리 수온약층이 강하게 형성되어 있지 않다. 정점 E1에서 E3까지는 약하지만 수심 20m~30m 사이에서 약층이 형성되고 있지만 서해연안 방향의 정점으로 갈수록 약층의 붕괴가 이루어지고 있다. 표층의 수온 분포 또한 정점 E5 해역까지는 28°C의 고염수가 존재하고 있지만 연안쪽으로 갈수록 저온수가 분포하고 있다. 저층에서는 10°C 이하의 냉수대가 정점 E1~E5 사이에서만 나타나고 있다. 최저 수온층은 수심이 깊은 E2와 E3정점 저층에서 나타나고 있다. 염분의 경우는 수온과 반대되는 분포 특징을 보이고 있다. 표층에서는 저염수가 분포하고 있으며, 저층에서는 고염수가 존재하고 있다. 수온과 염분 모두 연안역에서는 발산되는 분포 구조를 보이고 있으며, 이는 대흑산도 부근에 존재하는 조석전선의 영향과도 밀접한 관계가 있는 것으로 판단된다.

정선 A와 E 모두 2009년 8월 관측 결과보다 성층이 상승하였다. 다시 말해 2009년 8월에는 약 30m 수심에서 강한 성층이 나타났지만, 2010년에는 수심 약 20m에서 성층이 강하게 존재하고 있다. 관측 정점은 거의 비슷하지만 관측시기의 해양환경과 관측일시가 정확히 일치하지 않지만, 전반적으로 2010년 8월이 2009년보다 표층 수온이 높게 나타나고 있으며, 성층도 강화되고 있음을 보인다. 그러나 여름철 저층에서 나타나는 저층냉수는 큰 분포변화를 보이고 있지 않다.

성층의 강도를 알아보기 위해 봄철과 여름철 Potential energy anomaly를 다음 식과 같이 계산하였으며, 그 분포는 Fig. 11과 같다.

$$P = \frac{1}{H} \int_{-H}^0 (\rho - \bar{\rho})gz dz$$

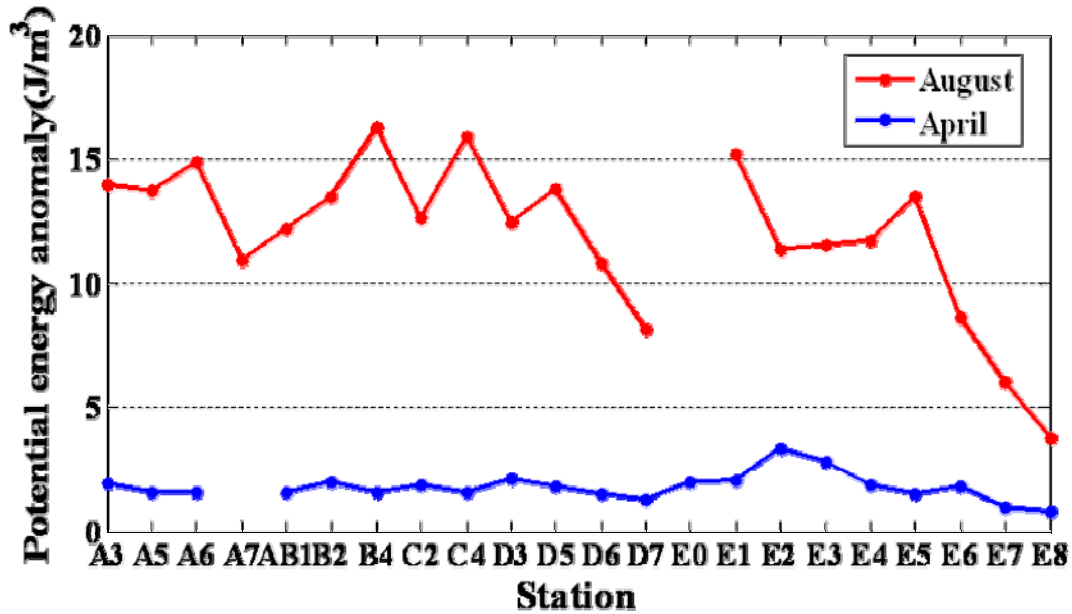


Fig. 11. Distribution of the Potential energy anomaly in April and August.

4월에는 전 정점에서 성층이 약하게 나타나고 있으며 큰 변화가 없다. 반면 여름철에는 성층 현상이 두드러지게 나타나고 있으며, 정점별로 뚜렷한 특징을 보이고 있다. 전반적으로 10~17 J/m³ 사이의 수치를 보이지만, 연안에 위치한 정점 D7, E6, E7, e8이 8 J/m³ 이하로 상대적으로 낮은 수치를 보이면서 이 해역에서는 성층이 약함을 시사하고 있다.

3.1.4. 수온과 염분의 연직 구조의 시간변화

시간에 따른 해수물성의 특징을 살펴보기 위해 정점 D3에서 CTD를 이용하여 연속관측을 실시하였다. 25시간 동안 대략 1시간에서 1시간 30분 간격으로 수온과 염분을 측정하였다. Figure 12는 봄철에 관측된 수심에 따른 수온과 염분분포를 나타낸 것이고, Fig. 13은 여름철에 관측된 것이다. 관측 정점은 동일하다.

봄철 수온과 염분은 전층이 거의 균일한 분포를 보인다. 수온은 7.6°C~9.6°C내의 분포 범위를 보이며, 염분은 32.6~32.7 psu 범위내에서 분포하고 있다 (Fig. 12). 그러나 전체적으로 매우 균일한 분포를 이루는 것처럼 보이지만, 각각의 프로파일의 특성을 살펴보면 시간에 따른 변화가 큼을 알 수 있다. Figure 12에서 작

은 박스로 나타낸 그림은 수온과 염분 각 프로파일을 확대해서 나타낸 것이다. 수온의 경우, 태양복사에너지의 영향을 강하게 받는 정오부터 일몰 전까지는 복사열에 의해 표층이 가열되는 특징이 뚜렷하게 나타나면서 수온변화 폭이 커지는 반면, 일몰과 일출 전 후에는 혼합층과 약층, 심층의 3층 해수구조가 뚜렷하게 나타나고 있다. 염분의 경우, 거의 모든 시간대에서 수심 50m 부근에서 상층과 저층의 구조의 변화가 일어나고 있다. 정오 시간대에는 표층에서 약하지만 약층이 형성되고 있다. 이런 변화는 일주기, 조석주기 등 단주기 변동성과 일변화가 혼재되어 나타나는 특징으로 보인다.

여름철 수온 분포는 수심 15m에서 30m 부근까지 강한 성층이 형성되고 있다. 시간에 따라 수심 10m 정도 상승과 하강을 보인다. 성층아래의 수온은 거의 균일한 분포를 이룬다. 이에 반해, 염분 분포는 수층전체에 걸쳐 시간에 따른 변동성이 나타나고 있다. 특히, 수온약층 수심에서 변동성이 크게 나타나고 있다. 이는 이 정점 주변에 염분전선이 발달해 있으며 조류에 의한 수평이류가 염분구조의 변화를 유발했음을 암시한다.

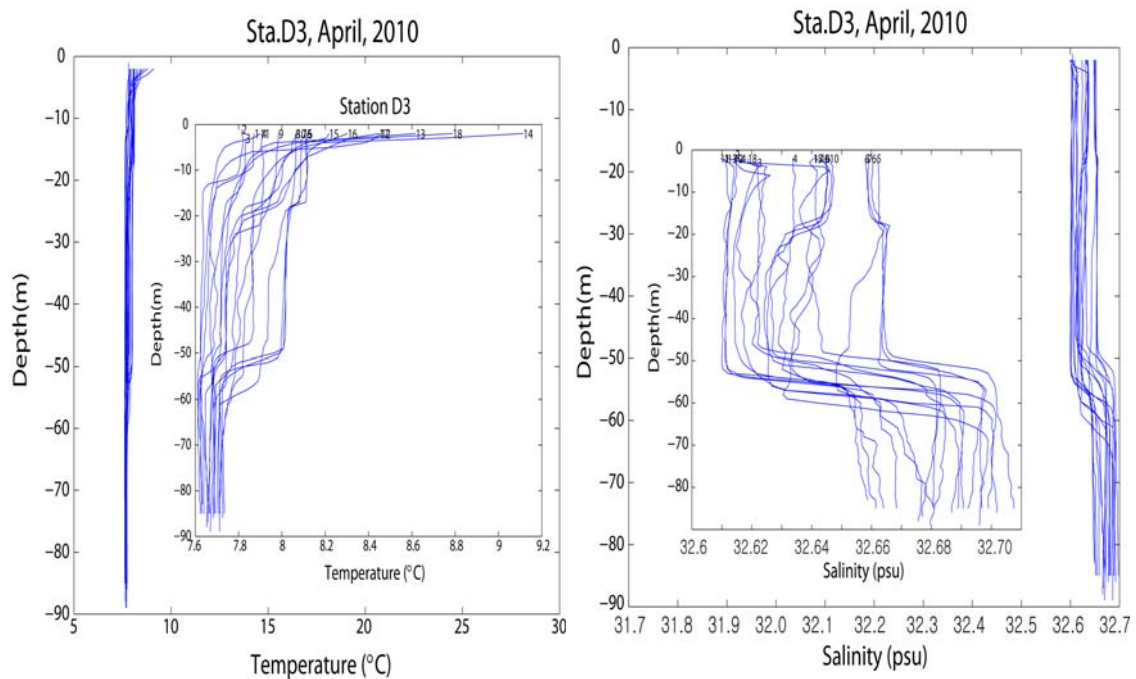


Fig. 12. Vertical profiles of temperature and salinity in 1 hours interval at station D03, in April.

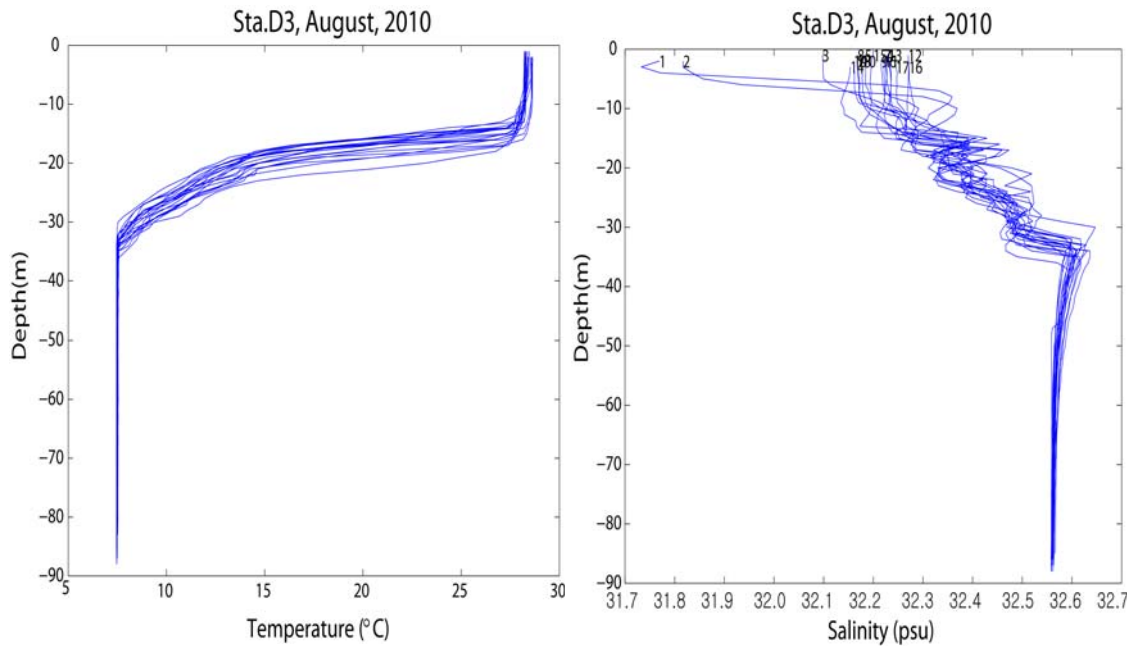


Fig. 13. Vertical profiles of temperature and salinity in 1 hours interval at station D03, in August.

3.2. 해수 유동 특성

연구 해역의 해수 구조를 살펴보기 위해 해류계(ADCP)와 표층뜯개(ADOS)를 이용하여 해류관측을 실시하였다. 해류계(ADCP) 관측은 4월에 정점 D3에서 25시간 연속 관측을 실시하였고(Fig. 14), 표층뜯개(ADOS)는 8월달에 황해중심부 해역인 정점 E1, D3, B2에서 투하되었다(Fig. 15).

Figure 14는 4월에 정점 D3에서 ADCP를 이용해서 25시간 연속 관측된 해류의 평균값과 조석성분 중 K1, M2, M4에 대한 특성을 나타낸 것이다. 오른쪽에서 왼쪽으로 갈수록 표층에서 저층까지의 해류특성을 나타낸다. 분석 결과, 전 층에서 약 10cm/s의 북서향류가 관측되었으며, 전층이 거의 일정한 흐름구조를 보인다. 조화 분해 후 각 조석성분의 특성을 살펴본 결과, K1 분조의 조류가 가장 강하게 나타났으며, 표층보다 저층에서 상대적으로 강한 조류가 나타났다. K1 분조의 주축은 표층에서는 남북방향의 구조를 보였지만, 저층으로 갈수록 북서-남동방향의 구조를 나타낸다. M2 와 M4 분조 특성 또한 표층보다는 저층에서 크게 나타나면서, 저층에 강한 조류가 있음을 시사하고 있다.

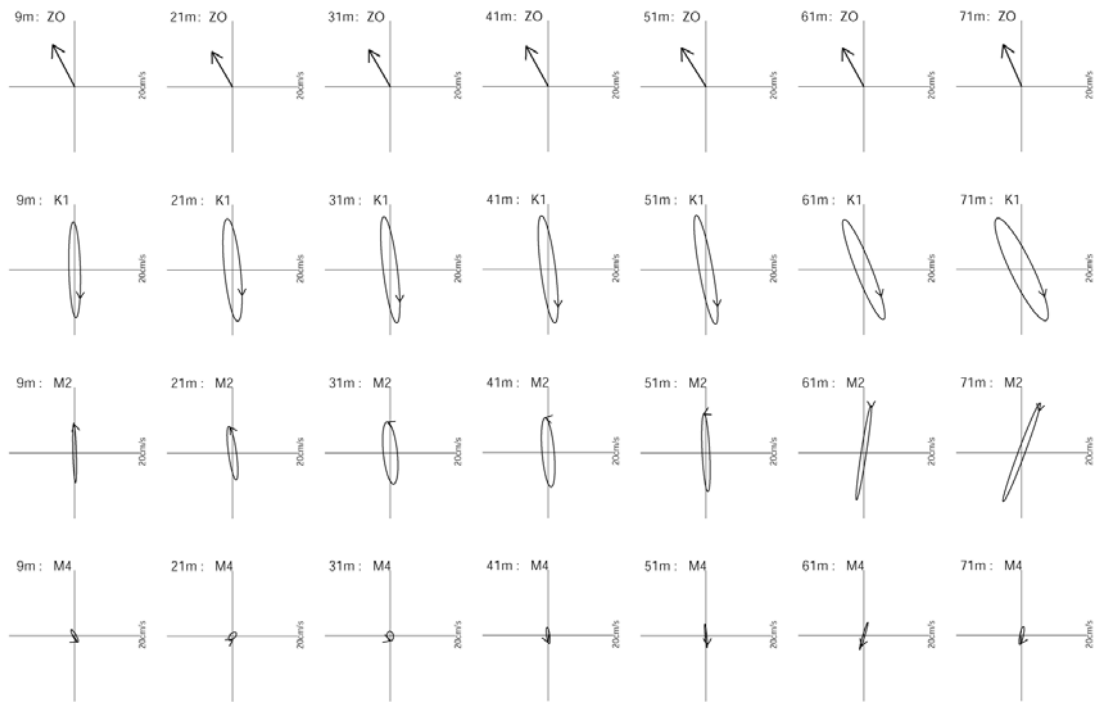


Fig. 14. Mean current at station D3 by ADCP and Tidal ellipse of K1, M2, M4 tide components.

표층 뜰개인 ADOS를 이용하여 해류를 관측한 결과는 Fig. 14에 나타내었다. 위에서 언급했듯이 2010년 8월에는 황해중심부 해역의 정점 E1과 D3, C2에 총 3대의 뜰개를 투하하였다. ADOS 뜰개는 단지 표층 뜰개이며 뜰개 아래에서 일정 수심까지 수온과 압력 센서가 부착되어 있을 뿐 외력에 대한 저항을 주는 그 어떤 장치도 없기 때문에 특성상 뜰개의 거동이 곧 해류의 거동이라고 직접적으로 말하기는 어렵다. 다시 말해, 바람이나 표층의 해양환경에 크게 좌우된다고 할 수 있다. 그럼에도 불구하고 ADOS 표층 뜰개는 시공간적인 해수특성과 어느 정도 해류의 거동을 유추할 수 있다는 점에서 꽤 효율적인 장비이다.

이 중 가장 북쪽에 투하된 ID_25550 뜰개(정점 C2에 투하)는 8월 18일부터 9월 12일까지 약 한달 동안 활동한 후 신호가 중단되었다. 투하 직후 뜰개는 북쪽으로 북상하는 패턴을 보였다. 황해중앙에 투하된 ID_43360 뜰개(정점 D3에 투하)는 8월 18일부터 11월 4일까지 약 75일간 활동하였다. 투하후 뜰개는 북상하다가 반시계방향으로 방향을 전환하여 남하하는 구조를 보인다. 전반적으로 ID_43360 뜰개는 남서향 방향으로 거동하였다. 이와 같은 거동은 과거 자료와 전혀 다른 특징을 보이는데, 2009년 여름철에 같은 지점에서 투하된 뜰개는 투하 직후 남하하다가 반시계방향으로 방향을 전환하여 서해안을 따라 북상하면서 황해 중앙부로 거동하는 특징을 보였다. 이렇게 황해의 해류 거동은 매우 불규칙하게 일어나기 때문에 특정한 순환 패턴을 정의하기가 어렵다.

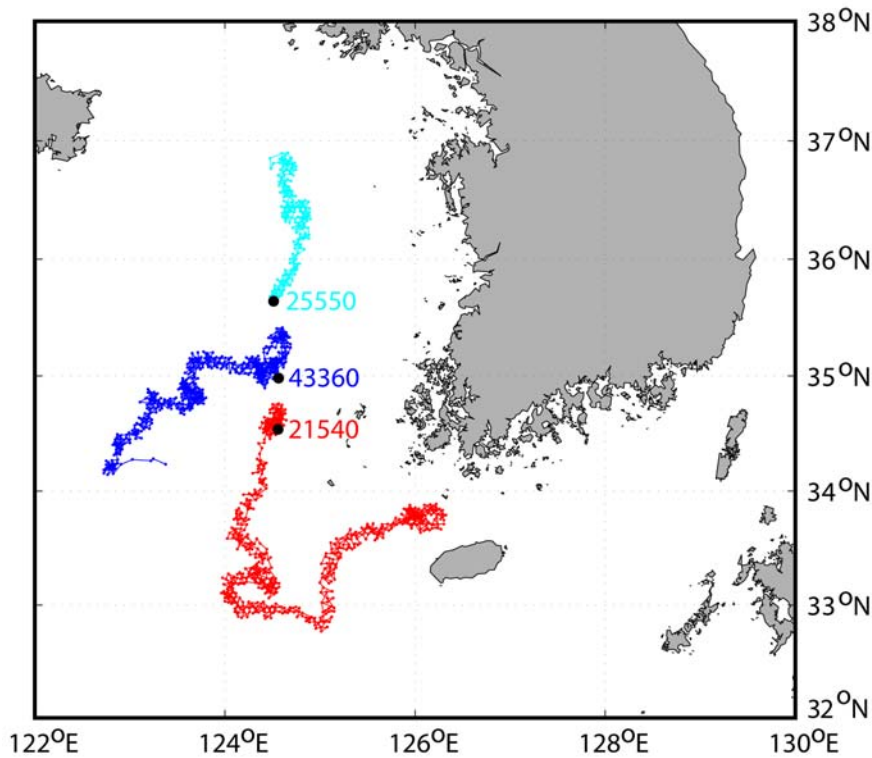


Fig. 15. Trajectories of 3 ADOS drifters deployed in August 2010.

황해남부 해역에 투하된 ID_21540 뜰개(정점 E1에 투하)는 8월 17일부터 현재 까지 약 6개월 동안 활동하고 있다. 투하 초기에 이 뜰개는 투하 정점에서 약 10일 정도 반경 20km 이내에 머물다가 동중국해 방향으로 남하하기 시작하였다. 남쪽 방향으로 거동하던 뜰개는 동경 124° E, 북위 33° N 지점 부근에서 동쪽으로 방향을 전환하여 활동하였다. 이 뜰개는 다시 제주도 서부 해역인 동경 125° E, 북위 33° N 부근 해역에서 북쪽으로 방향을 전환해서 거동하다가 동경 125° E, 북위 33.5° N 부근 해역에서 북동쪽으로 방향을 전환해서 제주도를 서에서 동으로 선회하면서 제주해협을 향하였다. 현재 이 뜰개는 제주도 성산포앞 해역에서 신호를 보내고 있다.

동중국해 방향의 저층냉수대의 분포를 살펴보기 위해 뜰개 ID_21540의 수온구조를 살펴보았다 (Fig. 16). Figure 15는 8월 18일부터 10월 30일까지의 연직 수온분포를 나타낸 것이다. 관측기간 중 자료가 소실된 부분이 있어 일부 자료는 내삽법을 이용하여 복원 후 사용하였다. 이 뜰개가 활동하던 시기인 9월초에 소형 태풍인 KOMPASU(9월 1일~2일)와 MALOU(9월 6일~7일)가 황해와 동중국해를 거쳐서 지나갔기 때문에 일부 시기에는 태풍에 의한 해수 변동이 나타나기도 한다. 또한 태풍이 있던 시기에 자료 손실이 더 많이 나타났다.

전반적으로 수심 15m에서 30m사이에 수온약층이 형성되어 있으며, 시간에 따른

변화를 보이고 있다. 표층수온은 8월에는 약 28℃의 고온을 보이다가 시간이 지남에 따라 낮아지고 있다. 초기 투하 위치인 황해남부 해역에서는 수온약층아래에서 10℃ 이하의 냉수대가 존재하고 있다. 이 냉수대는 10월 초까지 그 특성이 나타나고 있으며, 동경 124° E, 북위 33° N 부근해역까지 분포하고 있다.

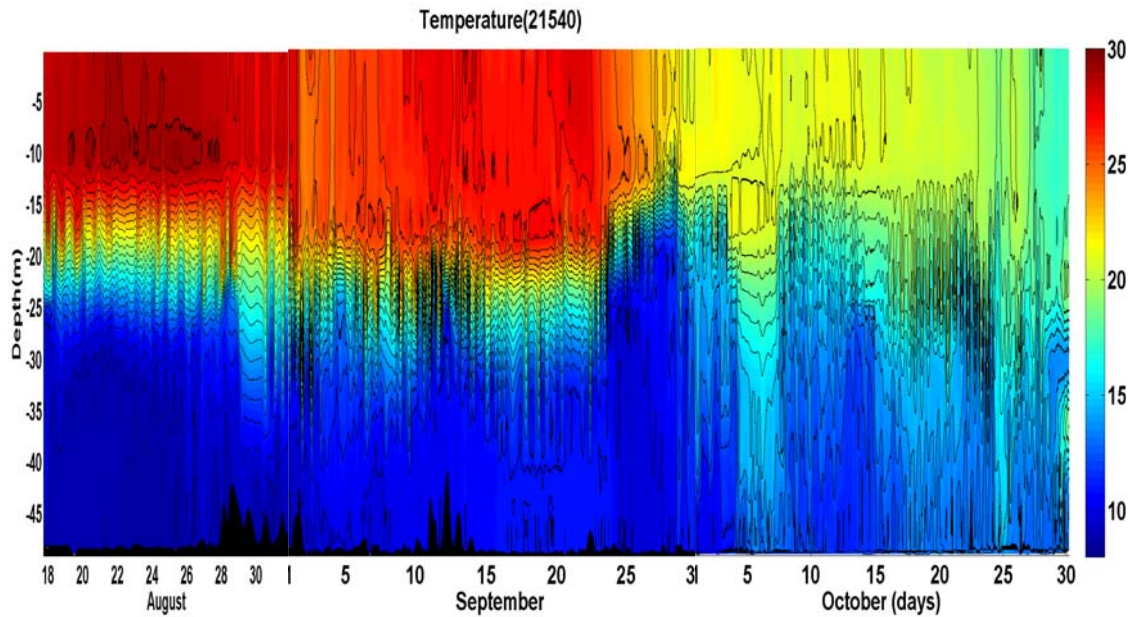


Fig. 16. Vertical distribution of the temperature obtained by ADOS difter, ID_21540.

3.3. 수치모델

3.3.1. 수치실험의 개요

황해의 해수순환과 해수물성 특징을 규명하기 위해 실지형 황해순환모형을 구축하고 있다. 여기서는 모델 검증에 위해 2009년 8월 관측된 해수물성자료와 비교 검토하였다. 이 황해순환모형은 2010년 봄 및 여름기간까지 연속적으로 수행하여 2010년 관측자료와의 비교도 수행할 예정이다.

3.3.2. 방법

실지형 황해순환모형은 포르투갈의 리스본기술대학과 Instituto Superior Técnico (IST)의 MARETEC (해양환경기술연구센터)에서 개발한 MOHID 모델을 이용하였다 (Fig. 17). MOHID 모델은 정수역학적인 가정과 부시네스크 근사를 사용하였고, 공간차분은 유한체적법을 이용, 수평격자 체계는 직교좌표계, 수직격자체계는 여러

종류의 체계를 이용가능하며 자유롭게 조합도 가능하다. 또한 시간차분은 반음해 ADI (Alternating Direction Implicit) 기법을 이용하여 계산시간을 단축할 수 있는 장점이 있다. 코리올리의 힘, 조석 포텐셜, baroclinic 압력 기울기, 기상외력, 수평 이류, 확산항은 양해법으로 계산되고, barotropic 압력기울기, 바닥마찰, 수직 이류, 확산항은 음해법으로 계산된다.

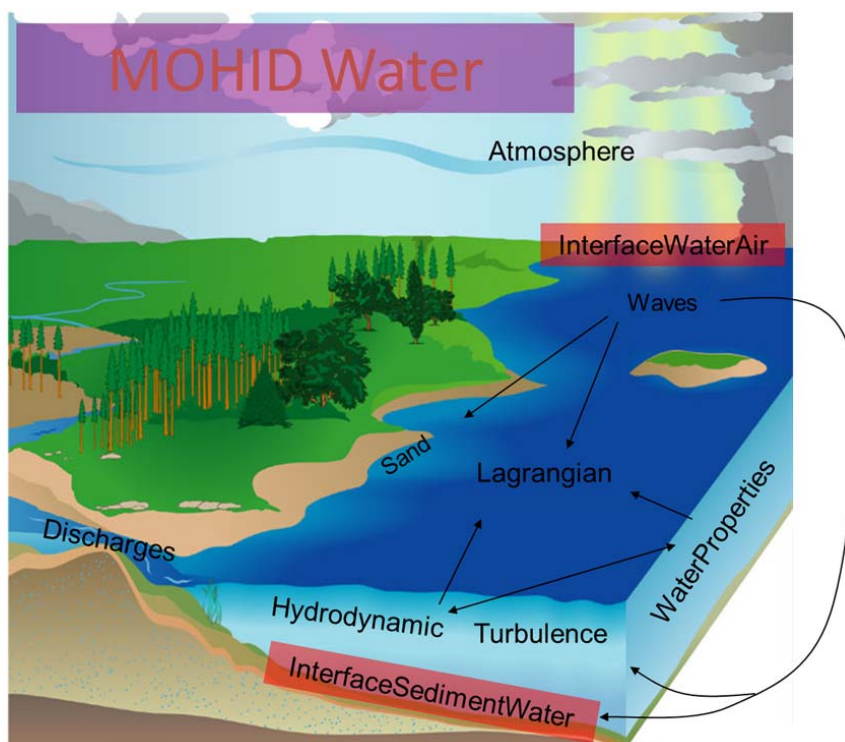


Fig. 17. Schematic Diagram of MOHID Water.

총 3개의 동지형 격자로 구성되어 있으며 (Fig. 18), 올해는 첫 번째 영역과 두 번째 영역을 계산하여 관측자료와 비교하였다. 첫 번째 영역 (YS1)은 5km의 수평 격자 해상도를 가지며, 2차원 순압 조석모델로 조석경계조건은 FES2004의 16개 분조값을 입력하였다. 두 번째 영역 (YS2)은 3차원 경압 광역순환모델로 3km의 수평격자 해상도를 가지며, 수직격자체계는 표층(0~20m)는 10개의 sigma층으로, 저층(20m~)는 지수 분포를 가지는 Z층으로 구성되었다. 세 번째 영역 (WS3)도 3차원 경압 광역순환모델로 1km의 수평격자 해상도를 가지며, 수직격자체계는 두 번째 영역 (YS2)와 동일하고 구성하였다.

3차원 경압 광역순환모델의 계산을 위한 초기 및 경계조건은 약 1/12도 해상도를 가진 HYCOM의 NCODA 자료동화 모델 자료 (Expt_09.8)을 1주일 간격으로 사용하였고, 기상입력은 NCEP자료를 초기 및 경계조건으로 하여 중규모 기상모형인 WRF 모델의 결과값을 매시간간격으로 사용하였다. 2009년 7월 1일부터 21일

까지 Spin-up (Cold start)을 수행하고, 7월 21일부터 8월 12일의 계산을 Hot start하여 2009년 8월 관측자료와 비교하였다 (Fig. 19).

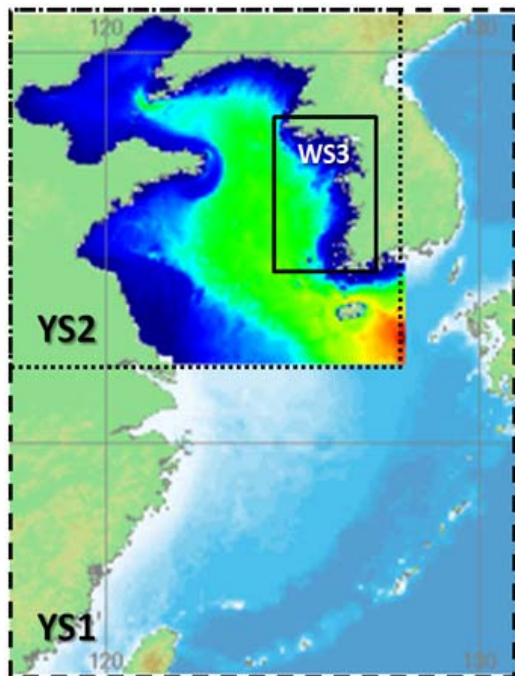


Fig. 18. Computational domains for the Yellow Sea Circulation Model

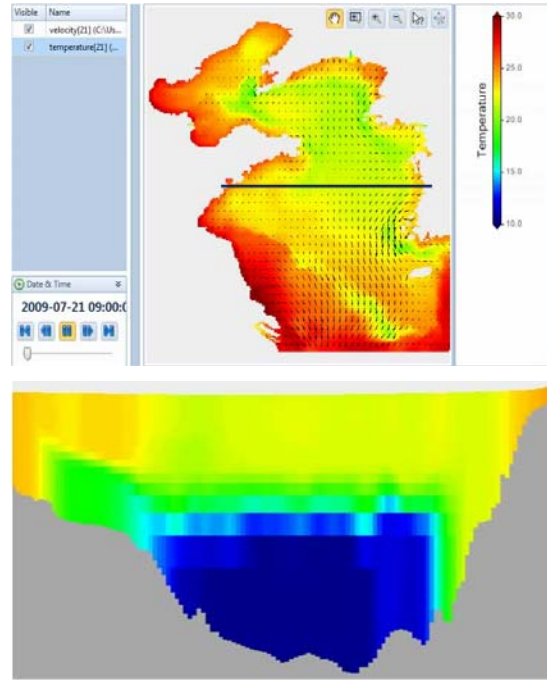


Fig. 19. Computed sea surface temperature (up) and vertical-cut temperature (down)

3.3.3. 실지형 황해순환 모델의 결과 검증

수심 50m 저층에서 계산된 수온의 수평분포는 Fig. 20에 관측된 저층 수온과 함께 제시 되었다. 동경 124.5° E를 따르는 관측지점 (Line A)은 저층냉수대의 골을 따라 분포되어 있으며, 북위 34.5° N를 따르는 Line E는 냉수대의 남측경계와 비슷한 위치이다.

연직적인 분포를 비교해 보기위해 동경 124.5° E를 따르는 수직면분포를 관측기간의 중간인 8월 7일의 계산결과와 비교하였다.(Fig. 21) 황해중심을 남북으로 가로지르는 Line A에서는 수심 10~30m의 강한 성층이 나타난다. 성층 아래 40m 수심 이하에서는 10°C이하의 냉수대가 나타난다. 혼합층의 두께, 분포 및 저층냉수대의 존재 등은 비교적 잘 묘사하고 있으나, 남측인 위도 34.5° N 부근의 저층온도가 관측치보다 높게 계산되었다. 염분 또한 구조를 비교적 잘 묘사하고 있으나 남측의 저층의 경우 고염분수가 계산되었다. Fig. 22의 북위 34.5° N를 따르는 수직면분포로 비교해 보더라도, 저층의 경우 계산치가 관측치보다 고온, 고염분의 패턴을 보여주는데, 이는 Line E가 냉수대의 경계와 가깝기 때문에 흑산도 부근의 고

온고염수괴의 영향을 받은 것으로 생각된다. 또한 서쪽이 동쪽보다 강한 성층을 보이는데, 이는 연안에서 조류에 의한 연직 혼합 효과에 의한 것으로 판단된다.

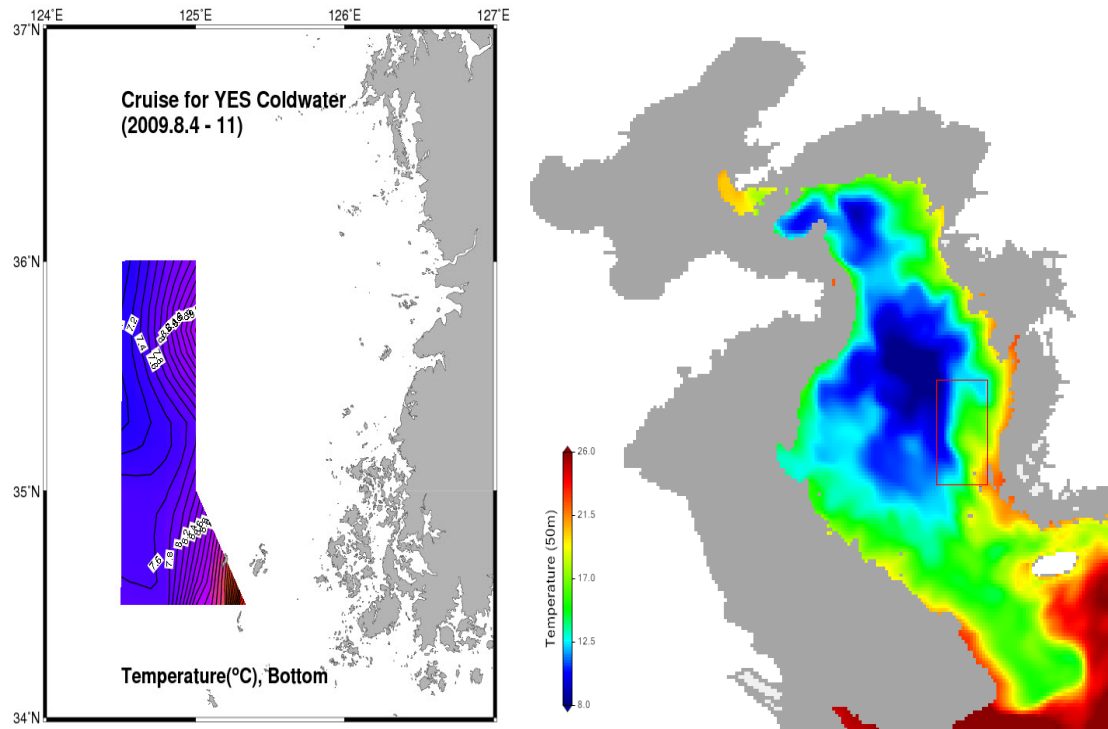


Fig. 20. Observed (left) bottom temperature and computed (right) bottom (50m) temperature.

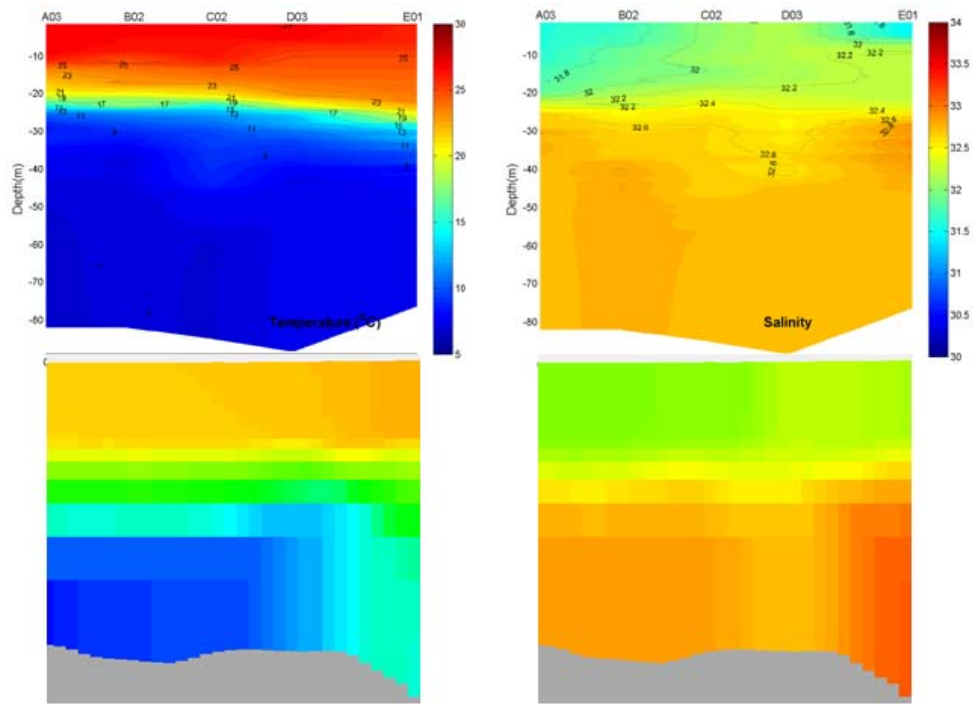


Fig. 21. Vertical structure of observed (up) and computed (down) temperature and salinity along Line A.

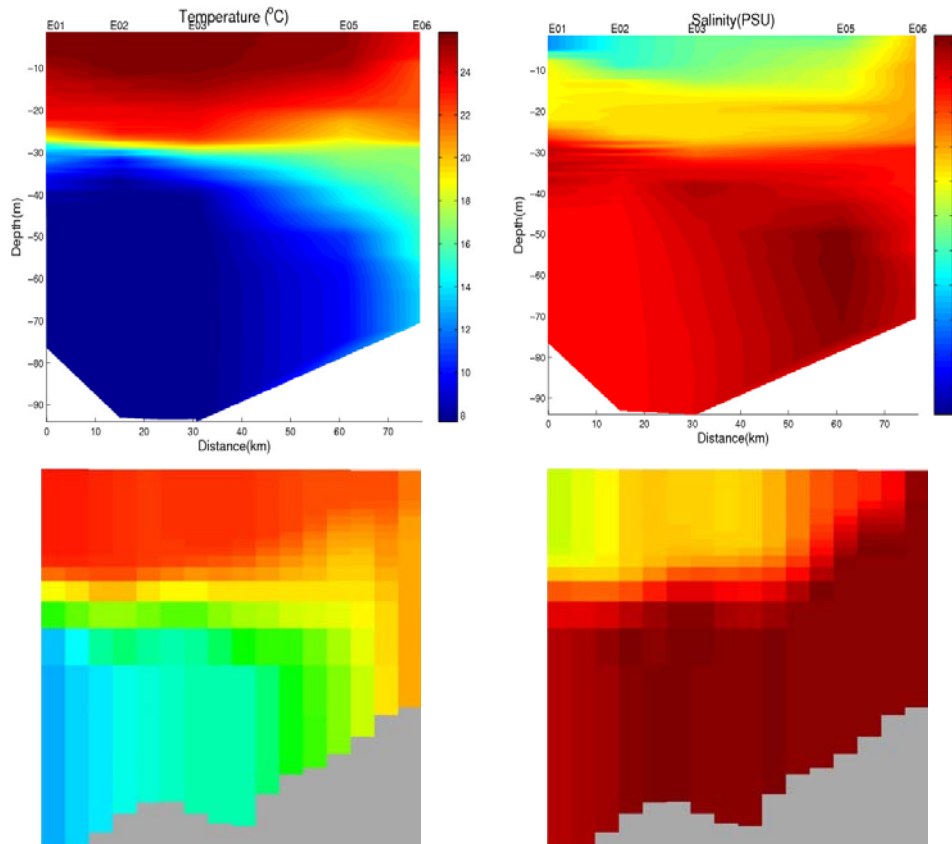


Fig. 22. Vertical structure of observed (up) and computed (down) temperature and salinity along Line E.

Figure 23에서는 각 관측점에서의 수온의 수직분포를 해당 계산시간의 계산결과와 비교하였다. 각 관측점에서의 수직분포는 일반적인 황해의 여름철 연안역의 수온구조를 보여주고 있는데, 황해 중앙부 방면(B02, A03)에서는 고온의 표층 혼합층과 10℃ 이하의 황해 냉수가 성층을 이루고 있으며, 연안쪽(B03)에서는 조석혼합에 의해 약화된 성층구조를 보인다.

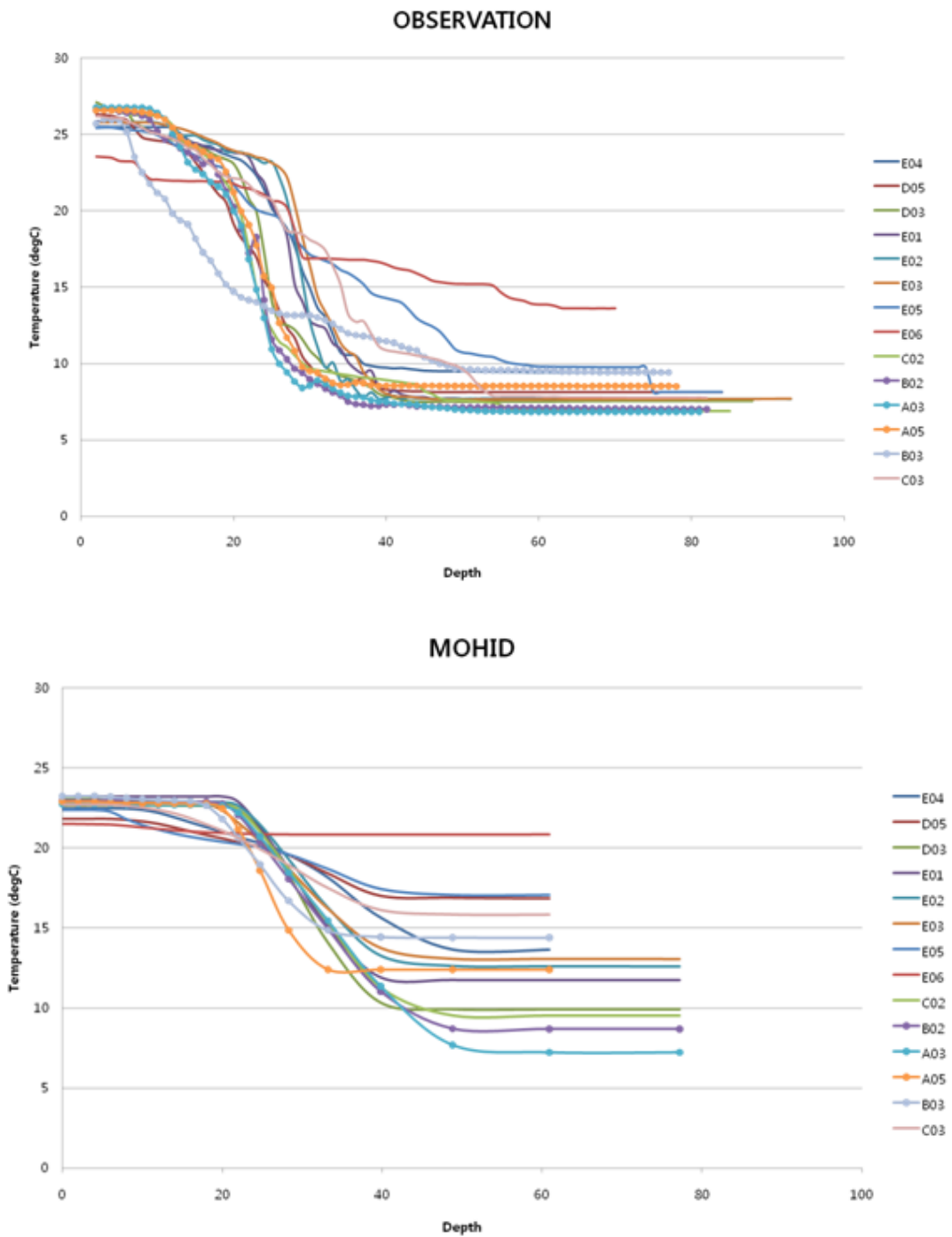


Fig. 23 Vertical distribution of the observed (up) and computed (down) temperature at each observation points.

4. 결론

황해저층냉수대의 변동성을 파악하기 위해 이 연구에서는 춘계(4월)와 하계(8월)에 걸쳐 정밀 현장 관측을 수행했으며, 이를 바탕으로 해수순환모형을 구축하고 있다. 관측은 CTD (SBE 911plus) 와 ADCP(Acoustic Doppler Current Profiles), ADOS(Autonomous Drifting Ocean Station) 등을 이용하여 이루어졌으며, 해수물성 자료와 해류 자료를 획득하였다.

봄철 황해해수는 여름철과 달리 표층과 저층의 변화가 적은 겨울철 연직혼합 특징을 유지하고 있다. 특히, 정점 D5에서는 상대적으로 높은 수온 특성이 나타나지만 전반적으로 10°C이하, 32.6~32.8 psu의 냉수대가 해수 전 층에 걸쳐 균질하게 분포한다. 단, 서해 연안 일부 해역에서는 황해 중심부보다 낮은 염분 분포를 보이며, 황해 남부 일부 해역(정선 E)에서는 저층에서 주변보다 고온고염인 해수가 불규칙적으로 나타난다. 이와 같은 특징은 황해 남부 해역에 존재하는 조석전선의 영향인 것으로 고려되어 진다 (Lie, 1989). 황해 북부해역의 저층에서는 최저 수온층이 존재하며, 북부해역에서 남부해역으로 냉수대가 유입되는 형태를 보인다.

반면, 여름철 표층에서는 고온저염인 해수가, 저층에서는 저온고염의 해수가 나타난다. 표층해수는 황해 중심부로 갈수록 높은 수온을 나타내며, 저층에서는 10°C 이하의 냉수대가 넓은 해역에 걸쳐 분포한다. 최저 수온층은 황해 북부해역에서 정점 A3과 B2사이에서 나타나고 있다. 이는 봄철에 정점 A3 저층에서 나타났던 것보다 조금 남쪽에 위치하고 있다. 황해 중심부에서는 수심 20m에서 강한 성층이 존재한다. 황해 남부해역에서는 흑산도 주변해를 중심으로 외해에는 고온저염수가, 연안역에는 저온고염수가 뚜렷한 경계를 보이고 있으며, 외해에서 형성된 강한 성층이 연안역에서는 약하게 존재하고 있다. 이는 조류에 의한 연직 혼합이 일어나고 있음을 시사한다.

2009년 8월에 관측된 해수물성자료와 함께 해수의 연변동성을 살펴보았다. 관측 시기가 다르기는 하지만, 분석 결과 전반적으로 2010년 8월이 2009년보다 표층 수온이 높게 나타나고 있으며, 성층도 강하게 나타났다. 2009년 8월에는 약 30m 수심에서 강한 성층이 나타났지만, 2010년에서 수심 20m 지점에서 성층이 강하게 존재하고 있다. 그러나 여름철 저층냉수는 큰 분포변화를 보이고 있지 않다.

여름철 보다 봄철에 시간에 따른 해수특성의 변동성이 크게 나타난다. 태양복사열이 강한 정오부터 일몰 전까지는 복사열에 의해 표층이 가열되는 특징을 나타내며, 일몰과 일출 전후에는 혼합층과 약층, 심층의 3층 해수구조가 뚜렷하게 나타난다. 이는 일주기, 조석주기 등 단주기 변동성과 일변화가 혼재되는 특징으로 판단된다. 여름철 연직구조에서는 봄철에 나타나는 3층 해수구조는 뚜렷하게 나타나지 않지만 시간에 따른 변동성을 보인다. 수온에 비해 염분구조는 수층 전체에 걸쳐 변화를 보이는데, 이는 이 정점 주변에 염분전선이 발달해 있으며 조류에 의한 수평이류가 염분구조의 변화를 유발했음을 암시한다.

2009년 여름철에 황해 중심부에서는 반시계방향의 순환 구조가 ADOS 부이를 통해 나타났다. 그러나 2010년 여름철에 투하된 뜰개에서는 2009년의 흐름과 일치하는 구조가 나타나지 않았다. 이는 황해의 해수순환이 시공간적으로 변동성이 큼을 암시한다. 황해의 해수순환모형이 구축이 되면 좀 더 구체적인 해수순환 패턴을 확인할 수 있을 것이다.

황해 남부해역에 투하된 뜰개는 동중국해 방향으로 남하하다가 제주도를 서에서 동으로 선회하는 순환구조를 보인다. 이는 제주도를 선회하는 제주난류수의 경로와 일치한다. 즉, 동중국해 방면으로 남하하던 뜰개는 동중국해에서 제주도 서부해역으로 북상하는 흐름에 의해 북상하면서 제주난류수의 경로를 따르는 것으로 판단된다. 봄철 황해중앙부 해역에서는 전 층에서 약 10cm/s의 북서향류가 관측되었으며, 표층보다 저층에서 상대적으로 강한 조류가 관측되었다.

현재 구축된 해수순환모형은 관측자료와 검증단계에 있으며, 관측자료의 자료동화 과정을 통해 보완할 예정이다. 2009년 자료를 이용한 검증 결과는 비교적 관측결과와 유사한 패턴을 보이고 있다. 특히 황해 중앙부의 구조는 비교적 잘 묘사되고 있다. 그러나 연안역과 조류 등에 의한 영향을 받는 해역에서는 모델 계산치가 관측치보다 고온고염의 패턴을 보인다. 이는 차후 자료보완을 통해 수정될 것이다.

제 2 절 생태계 분야-크릴

1. 서론

황해는 세계 어획량의 약 5%(연간 3백 만톤)를 차지할 정도로 생산성이 매우 높을 뿐만 아니라 반폐쇄성 해역으로 인간 활동(매립, 오염, 남획, 양식 등)에 의해 크게 영향을 받고 있다(FAO, 2009). 최근에 와서는 한반도의 국지적인 기상변화에도 큰 역할을 하고 있는 것으로 여겨지고 있다. 황해의 수괴는 크게 표층 혼합수, 연안수, 그리고 저층냉수대로 대표된다. 그 중 저층냉수대는 여름철 수심 30-40m 아래에 있는 수온 10°C 이하의 거대한 해수 덩어리로서 그 형성/소멸과정은 봄부터 복사열에 의해 표층수온이 급속히 상승함에 따라 표층과 저층간의 온도차가 커지며 이로 인해 수층간의 혼합이 잘 일어나지 않게 되고 저온의 수괴는 저층에 고립되어 여름동안 적어도 4개월 이상 저층에 존재하게 된다. 다만 가을부터 기온하강으로 표층수의 수온이 내려가며 강한 바람에 의해 수층이 혼합되면서 저층냉수대는 소멸하는 것으로 알려져 있다. 냉수대의 분포와 거동은 황해의 기후변화, 지형 특성에 직접 영향을 받으며, 황해의 생태계 및 수질 환경을 지배하는 중요한 인자로 알려져 있다. 예를 들면 황해에 서식하고 있는 대표적인 동물플랑크톤 중 냉수종으로 알려져 있는 *Calanus sinicus*와 *E. pacifica*는 수온이 매우 높고 먹이가 부족한 하계동안 생존을 위해 황해저층냉수를 피난처로 활용하는 것으로 최근 알려지고 있다(Wang et al. 2003, Pu et al. 2004). 하지만 아직까지 저층냉수대의 기본적인 특성이나 분포 그리고 생태학적인 역할에 대한 체계적인 연구가 부족한 실정이다. 그러므로 본 연구에서는 황해 생태계에서 동물플랑크톤 중 가장 높은 생체량을 차지하고 있으며, 수산자원의 주요 먹이원이며 기초생산자(식물플랑크톤)와 상위포식자간을 연결하는 매개체로써 중요한 역할을 담당하고 있는 난바다 곤쟁이류 중, *Euphausia pacifica*의 생존전략과 생활사를 살펴보고 이에 대한 냉수대의 역할을 규명하고자 한다. 따라서, 본 연구에서는 냉수대가 형성되기 전인 봄철과 냉수대가 잘 발달된 여름에 현장 채집과 음향탐사를 통해 냉수대 존재유무에 따른 *E. pacifica*의 발달단계 별 시·공간적인 분포양상을 비교하고 더불어 이들의 체지방함량 그리고 지방산 먹이 추적자와 위 내용물 분석을 통해 이들의 생리 및 섭식생태를 냉수대 존재 유무에 따라 비교, 분석 하였다.

2. 재료 및 방법

가. 시료채집과 준비(Sample collection and preparation)

난바다곤쟁이 *E. pacifica* 의 발달 단계별 공간분포를 살피기 위해 춘계(4월 16-17일)에는 10개 정점에서, 하계(8월17-20일)에는 14개 정점에서 원추형 네트(망구 1m, 망목 333um)를 사용하여 수직채집(저층-표층)하였으며, 채집된 시료는 5% 중성 포르말린으로 고정하였다. 단, 하계에는 수심(<50m)이 얇거나 전 수층의 수온이 10℃ 이하로 내려가지 않는 연안정점(E07, E05, A07, D06, D07)을 제외하고는 수온약층(약 30-40m 수층)을 기준으로 저층(<10℃)과 상층(>10℃)으로 나누어 시료를 채집하였다. 네트를 이용한 시료 채집은 동경 125도(A05, D05)를 기준으로 황해 중심해역(D03, C02, B02, A03)과 비교적 연안에 근접한 연안역(A06, B04, C04, D06)에서 이루어 졌다(Fig.1). 그리고 *E. pacifica*의 알 생산량(egg production)과 부화율은 정점 D03에서 봉고 네트(망구 60cm, 망목 333um)로 채집, 활동적이고 건강한 개체만을 선별한 사육 실험을 통하여 측정되었다. 하지만 짧은 조사 기간과 인위적 환경조건에서의 스트레스로 인하여 대부분의 선상사육실험은 실패하였다. 선상사육실험에 사용되지 않은 나머지 개체들은 체지방과 지방 먹이 추적자 조성 분석을 위해 즉시 냉동된 후 분석 전까지 초저온 냉동고(-40℃)에 보관되었다. 추가적으로 *E. pacifica* 무리의 수직 분포 및 이동 경향을 파악하기 위해 정점 D03에서는 음파탐지기를 이용하여 25시간동안 수층의 음파산란층의 수직이동양상을 관측하였다(음향탐사에 대한 자세한 방법과 자료처리과정은 본 보고서의 음향연구분야 참조). 이와 동시에 이들 음파산란층의 플랑크톤 종조성을 파악하기 위해 춘계에는 4회(야간-일출-주간-일몰), 하계에는 7회(3-6시간 간격)에 걸쳐 1m 원추형 네트(망구 1m, 망목 333um)로 음파산란층부터 표층까지 수직 채집하였다.

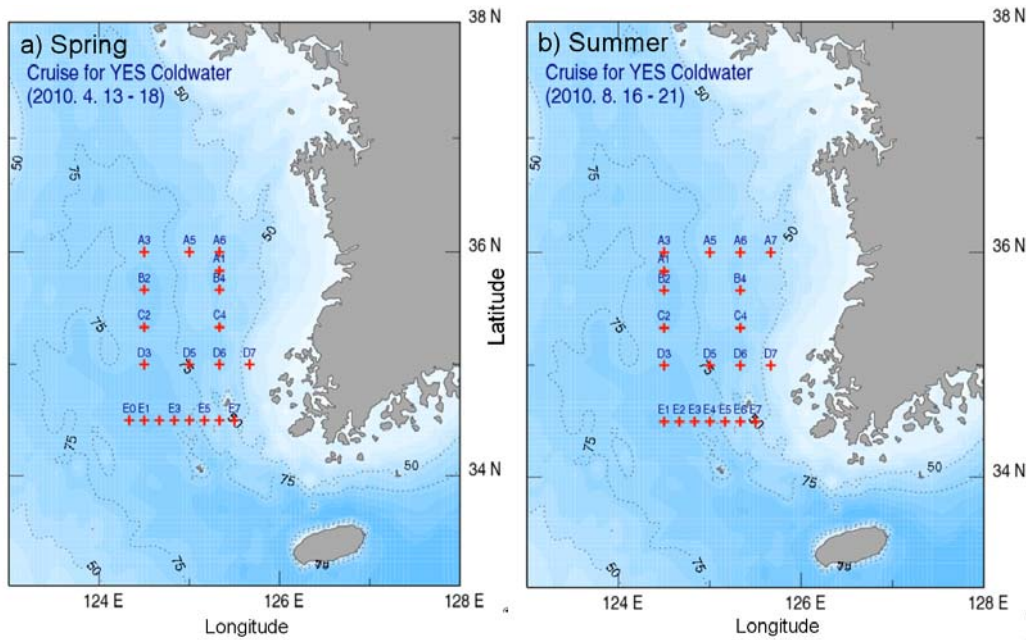


Fig. 1. The map of the study area with sampling stations during a) spring and b) summer 2010.

나. 알 생산량 측정

알 생산 실험은 알 생산율(egg production rate)을 산출하는 것이 아니라 개체당 brood sizes를 측정하는 것으로서 보라색 난소를 가진 건강한 암컷을 선별하여 사육실험을 진행한다. 실험 시작 전, 현장해수의 수온과 염분을 확인한 후, 1L 용기에 200 μ m 여과해수 1L를 채운다. 보라색 난소를 가진 건강한 암컷 개체들을 스폰을 사용하여 각 사육실험용기마다 1개체씩을 옮겨 담은 후 뚜껑을 닫고 용기안을 재확인한다. 각 용기에 정점, 수온, 염분, 실험시작시간, 등을 기재한 후 현장해수와 동일한 온도로 설정한 배양기에 넣는다. 배양주기는 약 48시간 정도 지속하고, 알 생산 확인을 위해 12시간마다 용기를 확인하며, 이때를 제외하고는 항상 암상태를 유지한다. 배양용기 안에 알이 확인되면, 용기를 흔들면서 120 μ m sieve에 알을 걸러내어, 60ml vial 또는 gridded petri-dish에 옮겨 현미경을 통하여 계수한다. 만약, 알을 걸러내는 과정에서 암컷이 sieve안으로 나올 경우, 즉시 여과해수로 몇 번 헹군 후 다시 용기에 넣어준다. 더 추가적인 실험(embryo development, 부화율 등)을 하지 않을 경우 알을 버린다. 실험 종료 시에는 산란한 모든 개체의 체장을 측정하고, 실험 중 탈피한 개체들은 탈피의 꼬리마디를 측정하여 기록한다. 그리고 배양용기에 남아 있는 알도 걸러내어 계수하여 모두 합산하여 총 알 생산량을 산정한다.

다. 지방 추출 및 분석

지방 분석을 위한 모든 유리 용기는 혼합 유기용매 [Dichloromethane: Methanol ($\text{CH}_2\text{Cl}_2:\text{MeOH}$)=1:1]로 2-3번 헹군 후, 준비된 *E. pacifica* 시료를 용기에 넣고 혼합 유기용매 ($\text{CH}_2\text{Cl}_2:\text{MeOH}$ =1:1)를 첨가하여 10-15분간 bath sonification하여 시료로부터 지방을 추출하였다. 그 다음 증류수를 첨가하여 용매의 최종비율이 $\text{CH}_2\text{Cl}_2:\text{MeOH}:\text{H}_2\text{O}$ =1:1:0.8이 되도록 한 후, 잘 흔들어 혼합하고, 혼합액이 두 층으로 분리되면 지방을 포함한 아래층을 제거하여 새로운 시험관으로 옮겼다. 그리고 다시 제거한 만큼의 혼합 유기용매 ($\text{CH}_2\text{Cl}_2:\text{MeOH}$ =4:1)를 추가한 후 아래층을 제거하여 옮겼다. 이 과정을 2-3번 반복하여 추출된 지방을 완전히 분리하였다 (Bligh and Dyer, 1959). 이렇게 추출된 지방추출액의 유기용매는 질소가스로 완전히 제거한 후, 혼합유기용매 ($\text{CH}_2\text{Cl}_2:\text{MeOH}$ =2:1)에 다시 용해시켜 지방 class와 지방산 분석에 사용하였다.

주요 지방 class는 Iatroscan Mark-V TLC-FID (Thin-Layer Chromatography with Flame-Ionization Detector; IATRON LABORATORIES, INC.)로 정량, 정성 분석되었다 (Ju et al., 1997). 추출된 지방 중 1.5-2 μl 을 chromarod (Mitsubishi Kagaku Iatron)에 떨어뜨린 후, 혼합 유기용매 ($\text{CH}_2\text{Cl}_2:\text{MeOH}$ =1:1)로 농축(focusing)하여 비극성 유기용매 (Hexane:Diethyl ether:Formic acid=85:15:0.2)로 지방 class를 분리, 분석하였다. 총 지방 함량은 정량화된 지방 class 합으로부터 산출되었다.

라. 지방산 분석

지방산을 포함한 극성지방 성분 분석을 위해 앞서 추출된 지방의 일정량을 뽑아서 새로운 시험관에 옮겨 0.5N KOH/MeOH를 넣고, 30분간 70°C로 가열한 후, 3회에 걸쳐 혼합 유기용매 (Hexane:Diethyl ether=9:1)로 중성지방을 분리, 추출하였다. 중성지방이 추출되고 남은 용액에 염산을 첨가하여 KOH를 침전시킨 후, 혼합 유기용매 (Hexane:Diethyl ether=9:1)를 이용하여 지방산을 추출하며, 이렇게 추출된 지방산은 BF_3 (Boron trifluoride methanol solution)/MeOH로 에스테르화시켜 지방산 메틸에스테르 (fatty acid methyl ester)로 유도하여 GC-FID로 분리 분석되었다. 지방산 중 불포화 지방산의 double bond 위치는 GC-MS를 이용하여 확인하였다.

마. 위내용물 분석

준·하계에 정점 D03에서 채집하여 포르말린으로 고정된 시료 중 해부현미경을 이

용하여 위충만도 100%인 성체만을 분류하여 위장을 절제한 후 분리, 개복하였다. 개복한 위장을 세절하여, 에탄올 40%-50%-60%-70%-80%-90%-95%-100%-100% 순서로 각 5 분씩 처리하여 탈수한다. 탈수한 후, 100% 에탄올에 보관 중인 시료를 GF/F 필터로 여과하여 고정시킨다. 필터에 고정된 시료를 2시간 동안 동결건조(freeze dry) 시킨 후, 시료가 고정된 필터를 실온에서 핀셋을 이용하여 시료대(SEM stub)에 부착한다. carbon coating unit (Hitachi E-1045)를 사용하여 gold coating을 시행한다. Hitachi S-4300 주사전자현미경(Scanning Electronic Microscope; SEM)으로 위 내용물을 분석하고 특정 내용물은 사진을 찍어 동정하였다.

3. 결과 및 고찰

가. 알 생산량(egg production)

춘계 현장조사 시 정점 D03에서 채집된 *E. pacifica*의 gravid female(보라색 난소를 가진 암컷) 20개체를 선별하여 선상 사육 실험을 통해 알 생산량을 측정하였다. 실험에 사용된 해수는 현장에서 채수된 해수를 여과해서 사용하였으며, 배양기는 암조건 하에서 온도는 현장 수온과 같은 7-8℃로 유지되었다. 배양된 20개체 중, 오직 2개체만이 산란하였고, 나머지 개체들은 48시간이 지난 후에도 활발한 움직임을 보였으나 산란하지는 않았다. 산란한 개체들의 Brood size는 103과 136 eggs/females로 나타났으며, 암컷의 체장(total length)는 각각 19.2mm와 17.0mm 였다. 아래 Fig. 1에서는 여러 해역에 분포하는 *E. pacifica*의 체장과 brood size와의 관계를 나타낸 것이다. 북동태평양(Oregon and California coast)에서 채집된 *E. pacifica*는 체장이 15-24mm인 암컷들이 최대 700 eggs/females 까지 산란하였으며(Gomez-Gutierrez et al., 2006), 일본 Toyama bay에서는 체장이 17-28mm 인 암컷이 12-296 eggs/females의 산란 범위를 보여(Iguchi and Ikeda, 1994) 비록 관측한 시료의 수가 매우 부족하지만, 황해 *E. pacifica*의 알 생산량도 타 해역 과 유사한 것으로 추정할 수 있다.

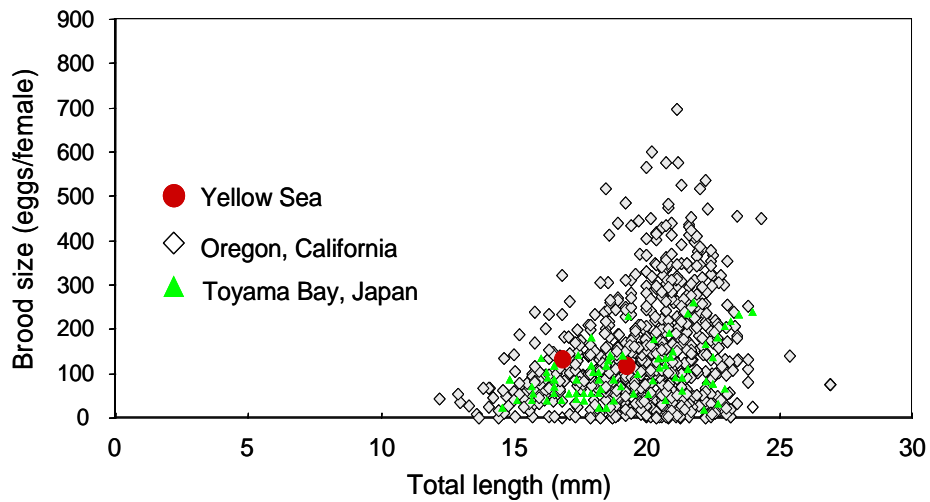


Fig. 2. Relationship between brood size (the number of eggs/female) and total length (mm) of females *E. pacifica* in various region.

나. 발달단계 별 공간분포

황해에서 *E. pacifica*의 출현량은 춘계에 83(정점 D05) - 905(정점 A06) 개체/m³, 하계에 1(정점 A06) - 22(정점 D07) 개체/m³의 범위를 보이며, 하계에는 출현량이 현저하게 감소하였다. 춘계에는 모든 조사 정점에서 알이 가장 우점하였으며, 그 다음으로 nauplii가 우점하였다. Calytopis 이후 단계의 유생은 출현하지 않았으며, 오직 연안 정점(D06과 D07)에서 극소수의 calytopis 유생과 성체(특히, gravid female)의 출현이 관찰되었다. 이에 반해 하계에는 연안정점(A07, D06과 D07)에서 극히 제한된 알이 출현하였으며, 춘계와 비교하여 출현량은 현저하게 감소하지만 calytopis와 furcilia 유생, 미성체(juvenile)와 성체의 출현이 두드러지게 나타났다. 특히, 미성체와 작은 크기(약 1cm TL)의 성체의 출현은 냉수대가 잘 발달한 중앙해역에 집중되어 있었다(Fig. 3).

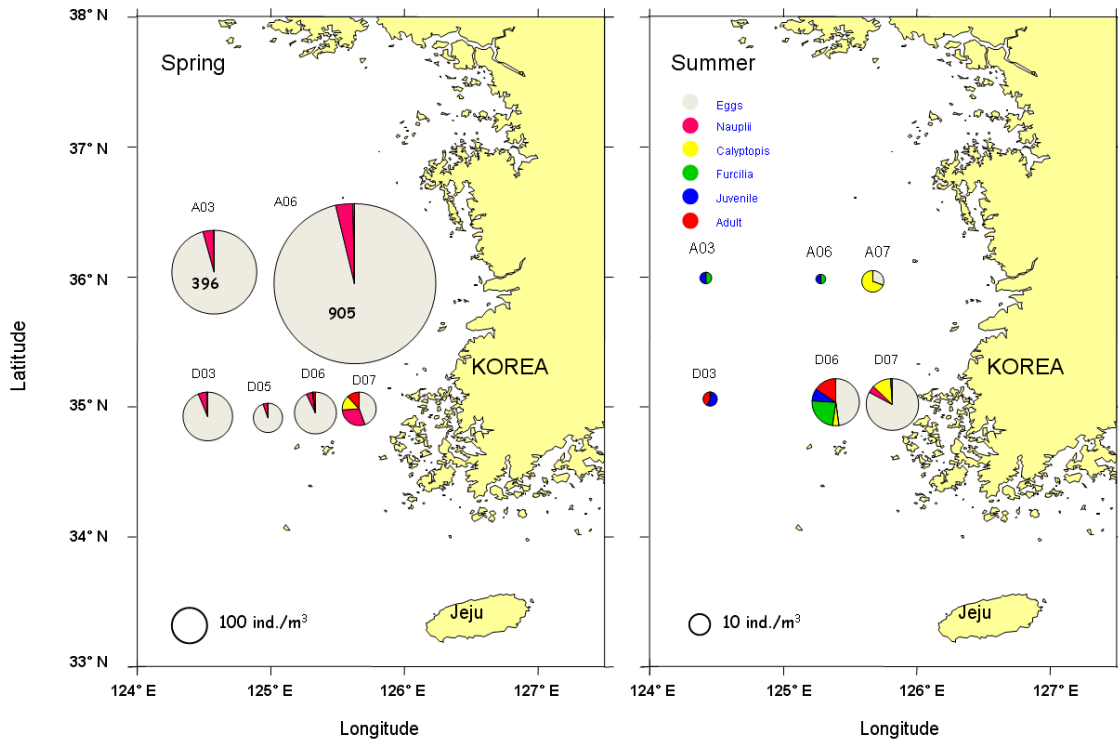


Fig. 3. Abundance (ind./m³) of *Euphausia pacifica* with the relative composition of major life stages from selected sampling stations during spring and summer, 2010.

다. 주야수직이동

춘하계에 정점 D03에서 25시간 정선관측 동안 생물음향(bioacoustics) 기법으로 음향산란층(sound scattering layer; SSL)의 시·공간분포를 파악하고, 네트 채집을 통하여 음향산란층의 동물플랑크톤 종구성 분석을 통해 *E. pacifica*의 수직이동양상을 파악하였다. 동물플랑크톤의 음향신호는 200kHz 주파수를 사용하였다. 춘계 조사 시 수온은 전 수층에서 8℃ 전후로 수괴가 원활히 수직적으로 혼합되고 있었으며, 엽록소-*a* 농도를 지시하는 수층의 형광강도는 표층에서 최고치를 나타냈다. 음향산란층은 표층에서 저층까지 뚜렷한 주야수직이동 양상을 보였으며 음향신호 또한 강하게 나타났다. 일출과 일몰 시간 음향산란층의 하강·상승 속도는 각각 0.87과 0.74m/min로 하강속도가 상승속도에 비해 약 1.14배 빠른 것으로 관측되었다. 정점 D03에서 *E. pacifica*의 발달 단계별 구성은 전체 조사정점에서의 분포와 마찬가지로, 알과 유생(nauplii)이 대부분을 차지하고 있었으며 소수의 성체만이 출현하였다(Fig. 4). 이렇게 크기가 큰 성체가 네트시료에서 거의 발견되지 않은 것은 채집에 사용된 네트(1m 원추형 네트)가 큰 무리를 지으며 공간적으로 매우 불균형적으로 분포하는 큰 성체의 채집에 부적절했거나, 큰 성체의 대부분이 채집

시 네트가 접근하지 않는 해저바닥 가까이에 밀집하여 있었을 가능성 등이 제기 될 수 있다. 반면, 하계에는 수심 25-30m에서 강한 수온약층이 형성되었으며, 수온약층 바로 아래 수심 30-35m에서 SCM층이 형성되어 있었다. 수온약층을 중심으로 상층부의 수온은 28℃까지 상승하였고, 하층부는 10℃ 이하로 상층부와 큰 수온차를 보였다. 200kHz 주파수를 사용하여 음향신호를 수신한 결과, 야간에는 수온약층을 중심으로 두 개의 음향산란층(수온약층 상층부와 하층부)이 형성되었고, 주간에는 바닥 부근을 중심으로 하나의 음향산란층 만이 형성되었다. 야간에 수온약층의 상층부는 신호가 매우 강하게 나타났지만, 하층부는 신호가 약하지만 주야수직 이동하는 음향산란층이 관찰되었다. 하층부에서 형성된 음향 산란층의 일출과 일몰 시간동안 하강·상승속도는 각각 0.44와 0.49m/min으로 나타나 춘계보다 다소 느리게 나타났다. 개폐네트(open-closing net)를 사용하여 채집된 음향 산란층의 동물플랑크톤 종조성 분석결과에 따르면 강한 생물음향신호를 보인 수온약층의 상층부에는 치어와 화살벌레류 그리고 소형 동물플랑크톤이 우점하였으나, 하층부의 음향산란층에서는 미성체와 성체 *E. pacifica*를 포함한 다수의 요각류가 우점하여 출현하였다. 특이하게도 하층부의 음향 산란층은 수온약층 아래 수층(< 10℃)에서만 제한적인 주야수직이동을 하고 있는 것으로 관찰되었다(Fig. 4).

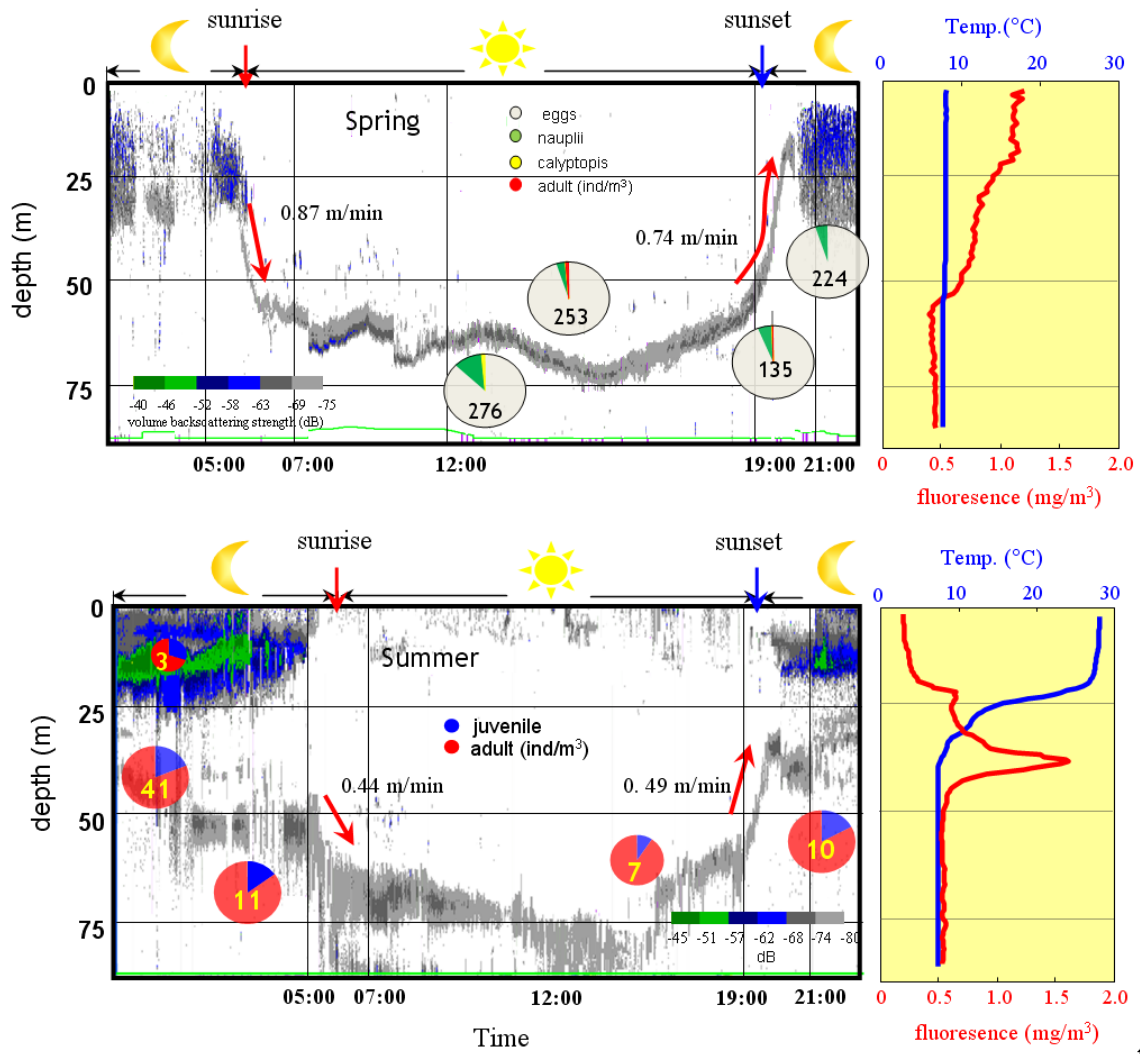


Fig. 4. Twenty five hour vertical profiles of sound scattering layers presented with the relative abundance of different life stage of *E. pacifica* collected every 3–5 hour intervals using the zooplankton net at station D03 during spring and summer.

라. 체지방 함량 및 지방 class 구성

춘계와 하계에 정점 D03에서 채집된 *E. pacifica*의 체지방 함량은 춘계의 경우 건중량의 $7.38 \pm 1.48\%$ (n=8), 하계의 경우 건중량의 $5.37 \pm 1.68\%$ (n=3)로서 춘계에 약간 높게 나타났다(Fig. 5). 북태평양의 타 해역(북동태평양과 일본 오야시오 해역)에 서식하는 *E. pacifica*(각각 건중량의 5-20%와 5-12%)와도 유사한 지방함유량을 나타냈다(Ju et al., 2009; Kusumoto et al., 2004). TLC-FID (Iatroscan MK-5)를 이용하여 분리, 분석한 지방 class 성분 구성을 살펴보면, 춘·하계동안 황해의 *E. pacifica*의 체지방은 주로 인지질(phospholipids), 콜레스테롤(cholesterol), 자유지방산(free fatty acid), 트리아실글리세롤(triacylglycerol)로 구성되어 있었으며, 그 중 세포막 구성의 주요성분인 인지질이 총지방의 50% 이상으로 가장 풍부한 것으로 나타났다. 저장지방 중 트리아실글리세롤(triacylglycerols)이 우점하게 나타났지만 춘·하계사이에 뚜렷한 차이가 나타나지는 않았다(Fig. 5).

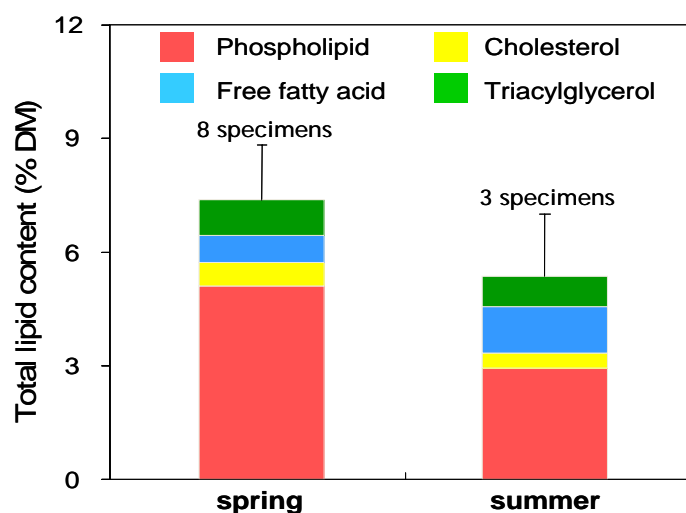


Fig. 5. Total lipid content and lipid class composition in *E. pacifica* adults sampled at station D03 during the spring and summer, 2010.

마. 지방산 구성 분포 및 함량

춘·하계 동안 채집된 *E. pacifica*는 탄소 원자수가 14~24개의 다양한 지방산을 함유하고 있으며, 그 중 포화지방산인 C16:0과 C14:0, 단일불포화지방산 C16:1(n=7), C18:1(n=9)과 C18:1(n=7), 다불포화지방산 C20:5(n=3), C22:6(n=3)이 우점하여 나타났다. 대체로 *E. pacifica*의 지방산 구성은 춘·하계사이에 큰 차이를 보이지 않았지만, 소수의 지방산 구성비는 계절에 따라 차이를 보였다. 단일불포화지방산 중, 주로 식물플랑크톤(규조류와 와편모조류)에서 기원하는 것으로 알려진 지방산 C20:5(n=3) (Sargent et al. 1989; Falk-Petersen et al.

2000)과 C22:6(n-3) (Graeve et al. 1994; Falk-Petersen et al. 2000)는 춘계에 비해 하계에는 그 함량이 상대적으로 감소하였지만, 미생물 또는 원생동물기원으로 알려진 branched & odd-chain 지방산들은 춘계에 비해 하계에 상대적인 구성비가 약 1.8배 증가하여 나타냈다(Fig. 6). 각 지방산을 포화도에 따라 그룹화하여 살펴본 결과에서도 춘계에 비하여 하계에 식물플랑크톤 기원의 다불포화 지방산의 상대적 구성비는 줄어든 반면, 미생물 기원의 branched & odd-chain 지방산은 상대적으로 증가되는 것으로 나타났다(Fig. 7). 이러한 결과는 실제로 식물플랑크톤 대번식이 발생하는 춘계동안 *E. pacifica*가 식물플랑크톤(규조류 또는 와편모조류)을 주요 먹이원으로 활용하는 반면, 식물플랑크톤의 생체량이 낮은 하계에는 수층에 있는 가용한 먹이원을 다양하게 섭취하는 것으로 여겨진다. 특히 하계에는 microbial loop를 통해 주로 에너지를 얻는 것으로 추정할 수 있다. 이러한 계절별 또는 냉수대 유무에 따른 먹이원의 변동양상은 위 내용물 분석에서도 확인되었다(Fig. 8).

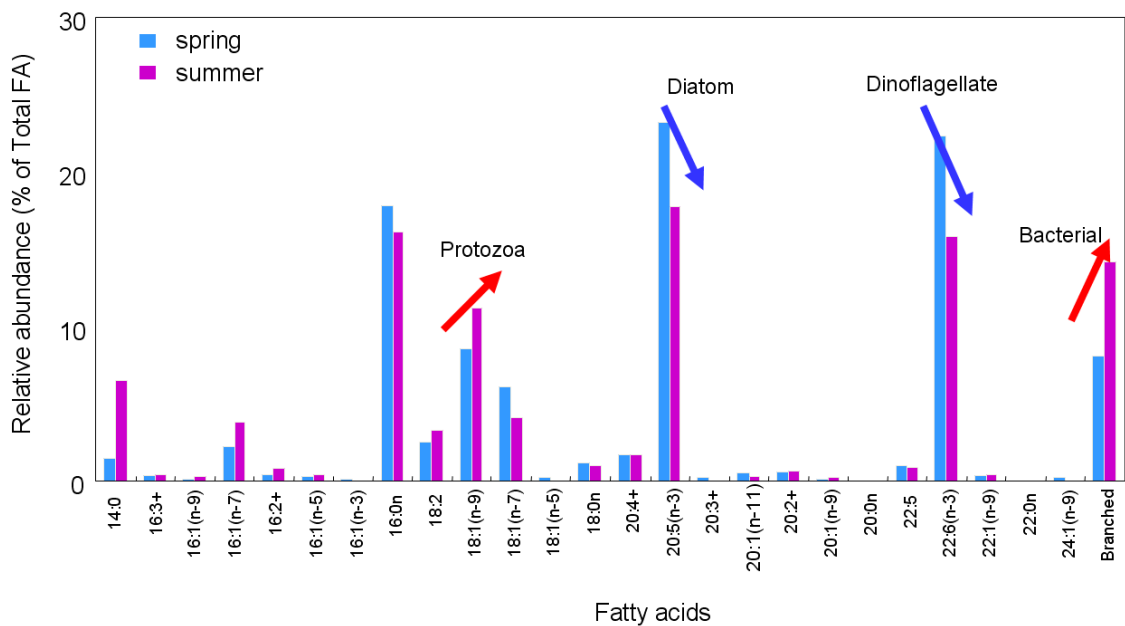


Fig. 6. The relative abundance (%) of fatty acids in *Euphausia pacifica* adults in the Yellow Sea during spring and summer, 2010.

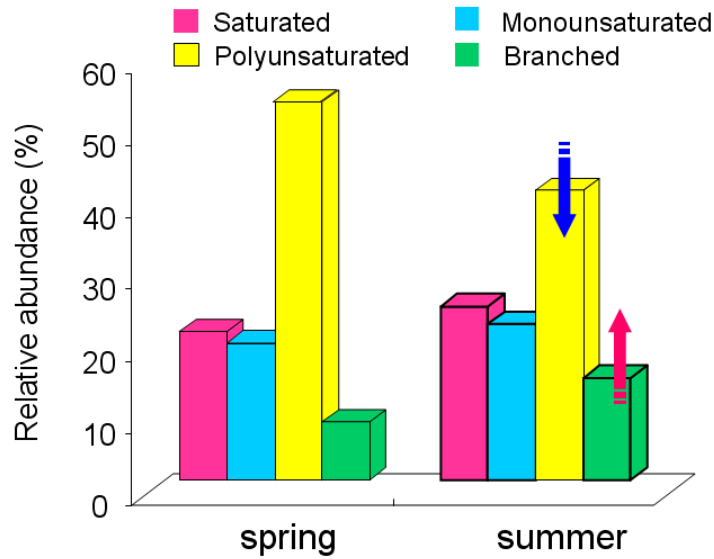


Fig. 7. The relative abundance (%) of grouped fatty acids in *Euphausia pacifica* adults in the Yellow Sea during the spring and summer, 2010.

바. 위 내용물

지방산 분석 결과와 비교하여 실제 서식 환경에서 *E. pacifica*가 주로 채집 당시 어떠한 먹이를 섭식하였는지를 살펴보기 위해, 냉수대의 대표정점 D03에서 춘·하계 동안 각각 13개체와 14개체의 위 내용물을 주사전자현미경 (Scanning Electronic Microscope; SEM)을 이용하여 분석하였다. 식물플랑크톤 대번식이 일어난 춘계 동안 *E. pacifica*의 위 내용물의 대부분은 중심목 규조류 (centric diatoms)로 이루어져 있었으며, 소수의 유기쇄설물 (detritus) 및 외편모조류 (dinoflagellates)가 함께 발견되었다. 반면, 수심 25-30m에 강한 수온약층이 형성되는 하계에는 춘계에 비해 우상목 규조류 (pennate diatoms), 외편모조류, 원생동물 (protozoa) 및 유기쇄설물 등의 다양한 종류의 먹이가 발견되었다 (Fig. 8). 이러한 위 내용물 분석결과에 따르면 냉수대가 형성되기 전 (춘계)과 잘 발달된 기간 (하계) 동안, 황해에서 *E. pacifica*는 춘계에는 수층에 대번성이 일어난 규조류를 많이 섭식한 반면, 식물플랑크톤이 매우 부족한 하계에는 원생동물을 비롯한 다양한 종류의 먹이를 섭식하는 것으로 추정할 수 있다. 실제, 북동 일본 연안에서 *E. pacifica*는 식물플랑크톤 대발생이 일어나는 시기에는 초식성향을 강하게 갖지만, 그 외 계절에는 소형동물플랑크톤이나 유기쇄설물을 섭식하는 것으로 보고되어 (Nakagawa et al. 2001, 2004) 본 연구 결과를 잘 뒷받침 해주고 있다.

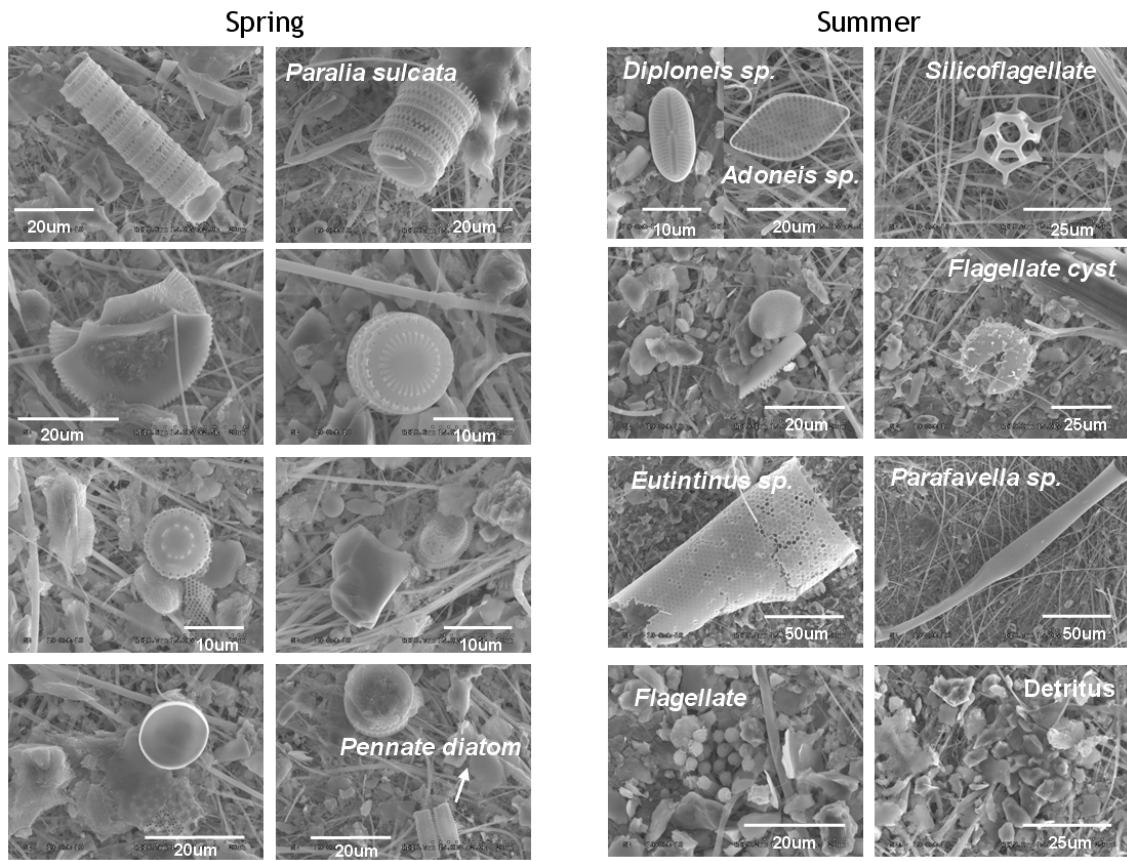


Fig. 8. Selected SEM photography of identified prey items in gut from *E. pacifica* adults sampled at station D03 during the spring and summer, 2010.

제 3 절 생태계 분야-요각류

1. 서론

가장 높은 수온을 나타내는 표층에 대비되어 황해 저층냉수 특성이 가장 뚜렷해지는 하계에 저층냉수대에 관련하여 수행된 플랑크톤 생태학 연구 중, 동물플랑크톤에 관련한 연구가 활발히 수행되었다 (Wang et al., 2003; ¹Pu et al., 2004). 대표적 결과로 여름철 동물플랑크톤이 표층보다는 저층에 높은 개체수로 출현한다는 것이며, 실제로 요각류 *Calanus sinicus*의 수직적 분포 특징이 잘 반영하고 있다 (Liu et al., 2003; Wang et al., 2003; Pu et al., 2004; Zhang et al., 2005; Zhang et al., 2007). 주요 어류자원의 주 먹이원의 하나인 요각류 *C. sinicus*가 저층냉수가 분포하는 주변에 분포하는 이유로 수온선호범위를 벗어난 표층을 피하여 상대적으로 호조건인 저층냉수대로 이동하여 여름철(7월과 8월) 기간을 지낸다는 것이다. 이러한 현상들은 주로 중국 측이 주관이 되어 황해남부해역이나 중국 측 황해중북부 해역에 국한되어 연구되었다. 이 외에도 저층냉수와 관련한 하계의 동물플랑크톤 분포 및 생리학적 연구가 수행되었다 (²Pu et al., 2004; Li et al., 2004).

2007년도 환경부 주관으로 수행된 “황해 환경오염 특성평가 및 감시체계 개발” 연구(동경124도, 북위 35도)에서 표층수온이 *C. sinicus*의 선호수온범위를 상회할 것으로 예상되는 여름철(8월)에 *C. sinicus*가 수온과 상관없이 정상적인 수직이동성을 보였고, 표층에서 야간에 주간보다 높게 나타나 기존 연구결과와 상이하였다. 이 시기의 수온결과가 획득되지 못하여 이에 관련한 명확한 증거의 획득이 요구되는 상황이다.

따라서 본 연구에서는 2007년도에 채집된 정점 부근에서 기준가설을 검증하기 위하여 24시간동안 3시간 간격으로 수직 층별 채집을 통해 *C. sinicus* 개체군의 시, 공간적 분포를 확인하고, 환경 및 먹이조건을 동시에 조사하여 상관성을 분석하고자 하였다. 또한 요각류 *C. sinicus*의 하계의 주야 수직 이동 가능성에 대한 단서를 얻고자 하였고, 참고를 위해 춘계에도 주야수직이동성을 조사하였다.

동시에 저층냉수를 지표 할 수 있는 부유생물을 찾아내고자 저차단계 중 원생동물을 선택하여 조사하였다. Tintinnid 섬모충은 수괴의 지표성이 우수한 생물군으로 효과적으로 YSBCW 모니터링을 위해 이 분류군의 종 특이적 분포를 토대로 지표생물로서의 활용가능성을 타진하고자 하였다. 황해저층냉수가 형성되는 지역에서의 영양염 및 엽록소-a의 분포 특성 및 분포를 조절하는 요인을 파악하기위해서 2010년 봄철과 여름철 두 시기에 조사가 이루어졌다. 일반적으로 해양생태계의 일차생산자로서 중요한 위치를 가지고 있는 식물플랑크톤이 성장하기위해서 많은 영양분이 필요하지만, 이 중에서 영양염은 다른 영양분과는 달리 해양에서 쉽게 고갈되는 특성을 지니고 있다. 이러한 특성 때문에 연안 환경에서 영양염은 식물플랑크톤의 조성 및 일차생산력의 시공간적인 분포에 영향을 미치는 주요한 화학인자로 해양 생태계를 파악하는데 있어서 중요한 정보를 제공한다 (Howarth 1988; Wu and Chou 2003). 영양염은 해양 환경의 특성에 따라 각각의 영양염 공급원이 다르기 때문에 영양염의 시공간적인 분포 특성뿐만 아니라 영양염

제한이나 비가 해양 환경에 따라 다르게 관측된다. 해양에서 영양염 공급은 외부에서 유입되는 수체에 의한 공급, 연안수 유입 및 수체 내의 생물적인 작용에 의한 유기물 분해에 따른 재 광물화가 수체 내의 영양염을 공급하는 주요 경로이다. 영양염이 소비되는 경로는 주로 식물플랑크톤의 성장에 따른 감소이다. 따라서 영양염 분포의 조절요인을 파악하기 위해서는 수체의 특성 및 식물플랑크톤의 성장 요인을 조절하는 요소를 파악하는 것이 중요하다.

2. 재료 및 방법

가. *Calanus sinicus*의 수직이동 및 환경요인

요각류 *C. sinicus*의 주야수직이동 분석을 위한 채집은 조사선 이어도 호를 이용하여 황해의 중심부에 위치한 정점 (DO3: 35° 00.016'N, 124° 30.029'E, depth: 92m)에서 수행되었다. 채집에 사용된 층별채집네트의 체원은 지름 60cm, 망목크기 200 μ m이며, 5개의 다른 수심(0-10m, 10-20m, 20-40m, 40-60m, 60-80m)을 수직으로 층별 채집하였다. 채집 후 버킷에 존재하는 시료를 1리터 용량의 폴리에틸렌 병에 옮긴 후 중성 처리한 포르말린으로 최종농도가 5%가 되도록 고정하였다. 중형동물플랑크톤 그룹은 해부현미경 (ZEISS model Stemi-2000C)하에서 동정되었으며, 요각류는 Chihara and Murano (1997)를 근거로 종 수준까지 분석하였다. 네트를 통과한 해수의 여과 부피는 네트입구에 고정된 유량계 (Hydro-Bios Model 438-115)의 값으로 환산되었다. 동물플랑크톤 채집과 동시에 수온 및 염분 수직 단면도를 CTD (SBE 911plus CTD) meter를 이용하여 얻었다. 엽록소와 식물플랑크톤 현존량 값을 얻기 위해 8개의 개별수심 (0, 5, 10, 20, 30, 50, 75, and 87m)에서 채수기 (General Oceanics)를 이용하여 채수하였다. 그리고 수면 하 엽록소 최대층 (subsurface chlorophyll maximum depth)에서 추가적으로 한번 더 채수하였다. 총 엽록소-a 농도의 측정을 위해 해수 1 l를 GF/F필터 (47mm, Whatman)에 여과한 후 90% 아세톤에 담가 냉장상태로 24시간 용출한 후 형광측정기 (Turner Designs 10-AU)로 분석하였다 (Parsons et al., 1984). 미소식물플랑크톤 (nano-sized phytoplankton)의 엽록소-a의 농도분석을 위해 해수 1 l를 20 μ m의 mesh에 거른 후 GF/F filter로 다시 여과하였다. 초미세 식물플랑크톤 (picoplankton)의 엽록소-a 농도분석을 위해 3 μ m의 막 여과지 (47mm, Millipore)로 해수 1 l를 여과한 후, GF/F filter에 거른 후 즉시 냉동보관 하였다. 분석은 총 엽록소-a 농도분석과정과 동일하게 하였다. 식물플랑크톤 현존량 분석을 위해 500ml의 해수를 1%의 루골용액으로 고정한 후 실험실로 운반하여 침전법으로 상등액을 제거하여 농축된 시료를 균일하게 섞은 다음, 1ml의 시료를 Sedgewick-Rafter counting chamber로 옮겨 광학현미경 (Zeiss, Axiovert 135M)의 $\times 100-200$ 배율에서 계수하였다. 식물플랑크톤 정성분석은 광학현미경 $\times 400-1000$ 배 하에서 동정 및 검경하였으며, 시료의 동정은 Cupp (1943), Hendey (1964), Simonsen (1974), Dodge (1982), Round et al.

(1990), Hasle and Syvertsen (1996) 등의 참고문헌을 이용하였다. 영양염 분석은 각 수심마다 채수한 시료를 GF/F filter를 이용하여 필터 한 후 여과해수 약 50ml 정도를 플라스틱 vial에 담아 즉시 냉동 후, 실험실로 운반하였으며, 암모니아 분석을 위한 여과해수 시료에는 20 μ l의 HgCl₂를 넣었다. 영양염류는 Parsons et al. (1984) 방법을 이용하여 자동 영양염류 분석기인 FIA (Flow Injection Analyzer, Quickchem 8000, LACHAT Co.)로 분석하였다.

나. 원생동물

선정된 7개 정점 (A03, A05, B02, B04, C02, C04, D03)의 Subsurface chlorophyll maximum layer(SCML)와 benthic cold water layer(BCWL) 두 수층에서 채집한 해수를 여과 농축한 후, 루골용액으로 고정하여 정량 및 정성 시료로 사용하였다.

다. 영양염류

여름철 황해저층냉수대가 해양생태계에 어떠한 영향을 미치는지에 대한 연구에서 조사 지역의 영양염의 공간적 분포 특성을 파악하기 위해 연안 4개 정점, 그리고 황해 중앙부 4개 정점 및 조석 전선이 형성되어 용승 가능성이 있는 8개 정점을 중심으로 샘플링이 이루어졌으며, 샘플링 수심은 대략 10m 간격으로 수행되었다. 영양염 시료 채취는 현장에서 Watman GF/F 여과지로 거른 다음 시료의 일정량을 채취하여 50ml의 플라스틱 vial에 넣어 냉동 보관하였다. 영양염류는 발색법 (Parsons et al. 1984)으로 시료를 발색시켜 발색 강도를 측정하였다. 발색된 강도는 자동 영양염 분석기인 FIA (Flow Injection Analyzer, Quickchem 8000, LACHAT Co.)로 분석하였으며, 분석원리는 다음과 같다. 규산염은 일차적으로 산성의 몰리브덴산 암모늄 (Ammonium molybdate solution)을 가하여 노란색의 몰리브덴산 규산화합물을 만든 후 이차적으로 옥살산 (Oxalic acid solution)과 스테이노우스 클로라이드 환원시약 (Stannous chloride reducing solution)에 의해서 발색된 시료를 820nm 필터로 측정하였다. 인산염은 산성의 몰리브덴산과 안티 모니가 첨가된 시약 (Molybdate color reagent)으로 일차적으로 반응 시킨 후 아스코르빈산 (Ascorbic acid)으로 환원 시켜 나타난 푸른색의 용액을 880nm 필터로 측정하였다. 아질산염이 산성용액 중에서 일차적으로 슬퍼니아미드 (Sulfanilamide)와 반응하여 디아조늄 이온을 형성한 후 이차적으로 염화나플틸에틸렌 디아민 용액 (C₁₂H₁₄N₂·2HCl)과 반응시켜 분홍색 용액으로 만들어 520nm 필터로 측정하였다. 질산염은 금속구리를 입힌 카드뮴으로 채운 칼럼을 통과 시켜 정량적으로 아질산염으로 환원하여 아질산염의 방법대로 반응 시킨 다음 520nm 필터로 측정하였다.

전체 엽록소 (total chlorophyll-a)는 채수된 해수시료의 일정 양을 유리 섬유 여과지 (GF/F filter, 직경 47mm, Whatman, pore size 0.7 μ m)로 여과하였다. 여과지는 15ml

원심분리용 튜브에 넣고 호일로 감싸 빛을 차단시킨 후 냉동 상태로 운반하였다. 분석 전에는 냉동보관을 하고 분석 시 90% 아세톤 (Acetone) 10ml을 넣은 후 교반 시킨 다음 빛을 차단시킨 냉장고에서 12 시간 이상 용출 시켰다. 용출 과정에서 최소한 한번은 교반 시킨 다음 다시 냉장 보관하였다. 추출된 용액 중에 섞여 있는 입자를 제거하기 위해 1000 g에서 5분 동안 원심분리 시킨 후 상등액 만을 취하여 형광광도계 (Turner Designs 10-AU Fluorometer)로 측정하였다 (Parsons et al, 1984). 측정된 엽록소-a의 값은 CTD에 장착된 fluorescence 값과 비교하였으며, 두 관계가 유의한 양의 상관성 ($r^2 = 0.7332$, $p < 0.01$)을 보여 엽록소-a의 값은 fluorescence에서 측정된 값을 이용하였다 (Fig. 1).

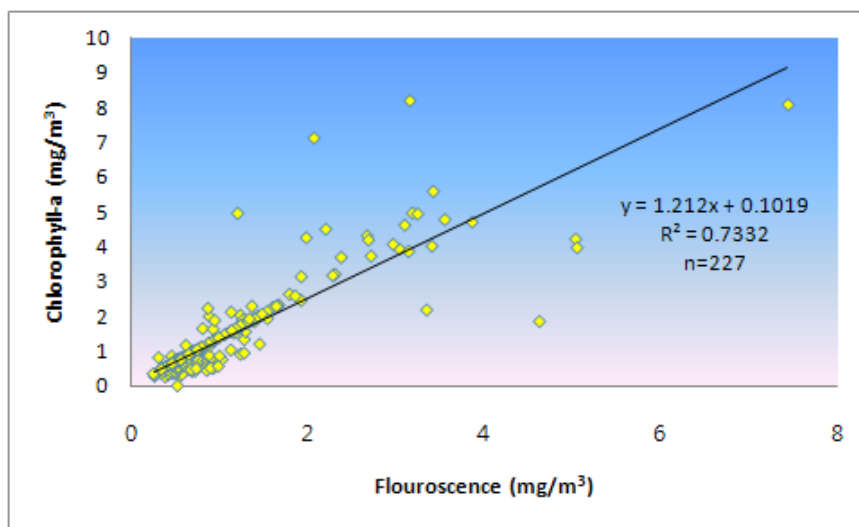


Fig. 1. Relationship between fluorescence using CTD and chlorophyll-a concentration extracted in acetone.

3. 결과

가. *Calanus sinicus*의 수직이동 및 환경요인

본 연구의 목적은 냉수대 형성과정과 발달시기에 해당하는 봄철과 여름철에 요각류인 *Calanus sinicus*의 개체군의 수직분포 변화를 확인하고, 이 변화가 환경요인특성과 어떤 연관성을 갖는지 확인하는데 있다. 궁극적으로 냉수대 특성이 잘 나타나는 하계의 *C. sinicus*개체군이 아치사 수준의 표층수온을 벗어나 저층냉수대에서만 여름철을 지낸다는 기존가설을 보완 확인하고자 하였다. 본 조사결과는 냉수대 형성 및 발달과정에 해당하는 봄철과 여름철에 수행된 결과이며, 3시간 간격으로 채집하였고, 일출과 일몰시간 주변에 한 번의 채집을 추가하였다. 채집시간은 각 조사시기의 자정(4월 15일, 8월 17일)을 기준으로 시작하였고, 각 채집 시 5개 층(0-10m, 10-20m, 20-40m, 40-60m, 60-80m)에서 채집하였다. 분석은 *C. sinicus*의 성체(수컷과 암컷)와 미성숙체 (1기, 2

기, 3기, 4기, 5기)로 구분하여 발달단계별 개체수를 분석하였다.

(1) 냉수대 형성기 (춘계)

2010년 4월 15일과 16일에 걸쳐 정점 DO3 (35° 00.016'N, 124° 30.029'E, depth: 92m)에서 총 10 번의 층별채집을 수행하였다 (Fig. 2). 성체암컷의 경우 야간에 표층으로 이동하는 경향과 주간에는 하향하는 뚜렷한 이동주기를 나타냈다 (Fig. 3). 표층과 저층간의 수온은 대략 7-8°C의 범위 이내였고, 표층에서의 먹이농도(엽록소 농도)가 저층보다 높은 양상을 보였다. 반면 수컷은 개체수 측면에서 주기를 보일 만큼의 충분한 개체수를 나타내지 않았고, 뚜렷한 수직이동성도 관찰되지 않았다 (Fig. 4). 미성숙체의 경우 1기, 3기 및 4기의 경우 뚜렷한 주야 수직이동성은 나타나지 않았고, 최대개체수가 10-20m 수심에서 모든 채집시간동안 머물러 있었다 (Figs. 5 and 6). 미성숙체 2기의 경우 성체암컷처럼 완벽한 주야 수직이동성은 보이지 않았으나, 자정부터 새벽 4시 30분까지는 10-20m 수층에 있었고, 새벽 6시부터 저녁 9시까지 20-40m 수층에 머물러 있어 미성숙체 1, 3, 4기와 구분되었다. 10-20m 수심(미성숙체 1, 3, 4기)과 20-40m에서 주로 높은 개체수(미성숙체 2기)를 나타낸 경우는 포식자 회피보다 성장을 위한 먹이섭식에 더 큰 의미를 갖고 분포하고 있음을 시사하였다. 그러나 미성숙체 5기는 뚜렷한 주야수직이동성을 나타내지 않았다 (Fig. 6).

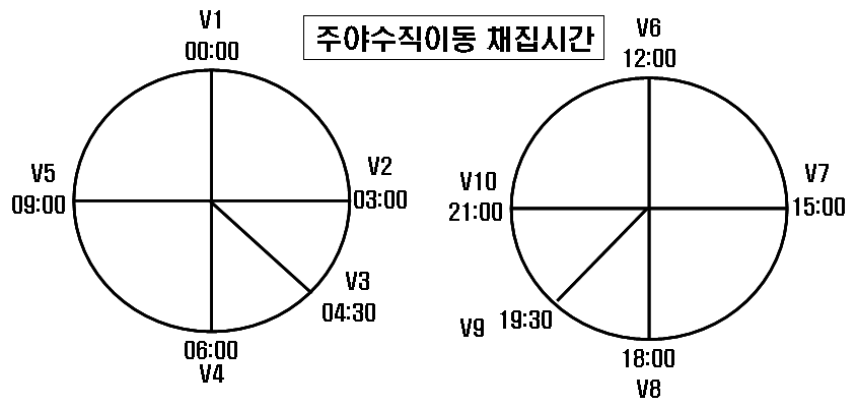


Fig. 2. Sampling time for 3 hour interval collection of *Calnaus sinicus* in the Yellow Sea in spring.

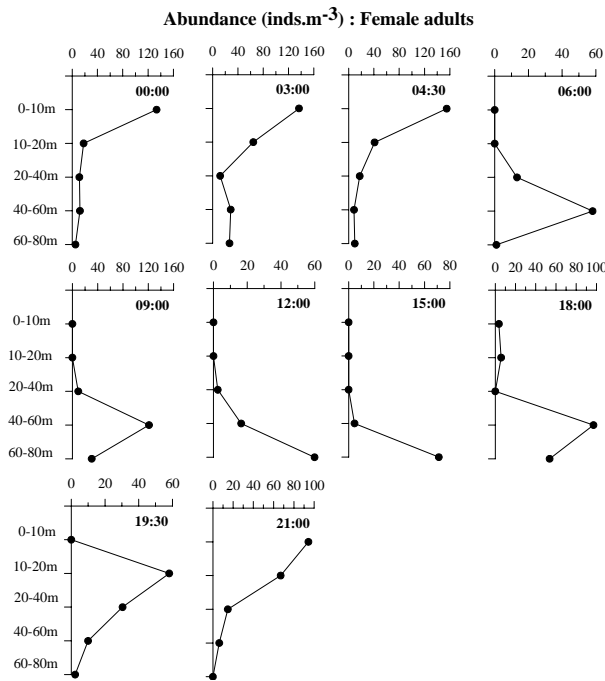


Fig. 3. Variation in the vertical distribution of adult *Calanus sinicus* in the Yellow Sea in spring. (Adult females)

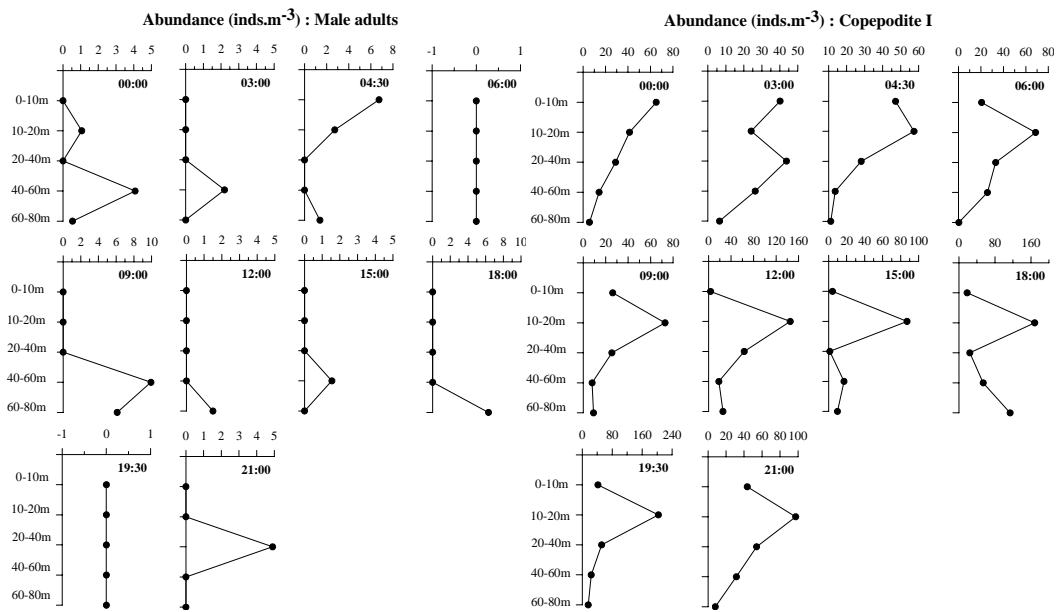


Fig. 4. Variation in the vertical distribution of adult *Calanus sinicus* in the Yellow Sea in spring. (Adult males and copepodite I)

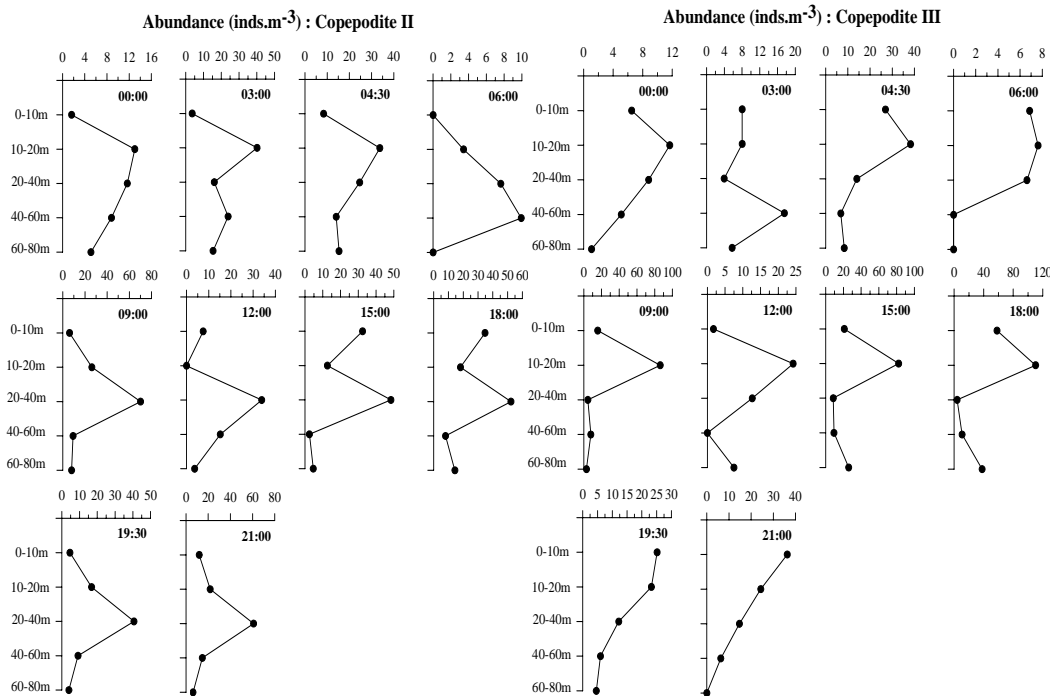


Fig. 5. Variation in the vertical distribution of *Calanus sinicus* according to the developmental stage in the Yellow Sea in spring. (Copepodites II and III)

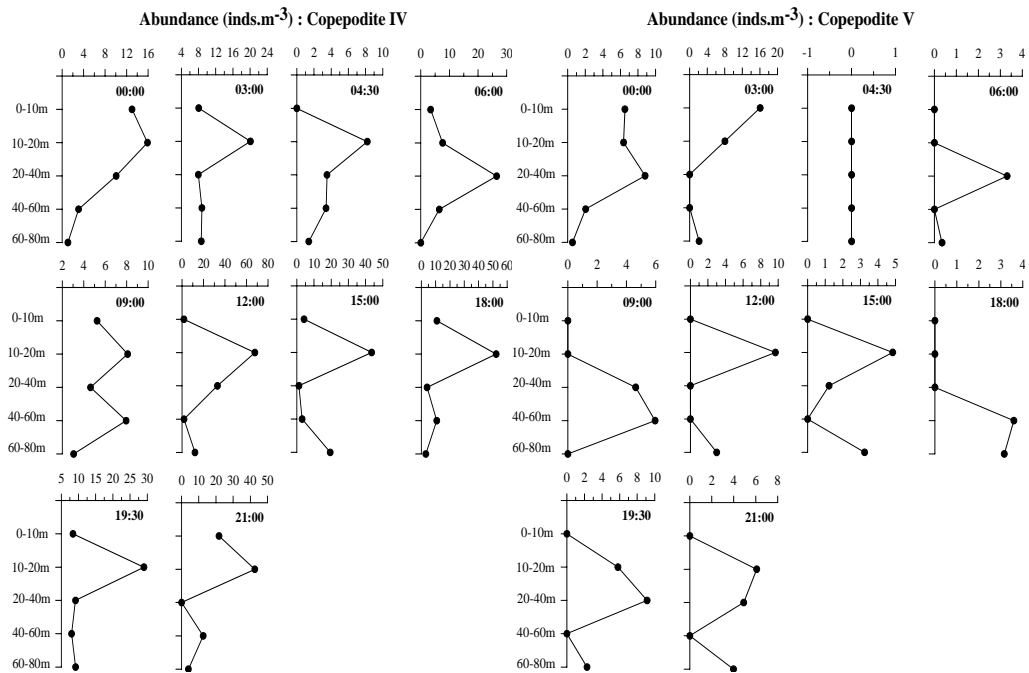


Fig. 6. Variation in the vertical distribution of *Calanus sinicus* according to the developmental stage in the Yellow Sea in spring. (Copepodites IV and V)

(2) 냉수대 발달기 (하계)

2010년 8월 17일과 18일에 걸쳐 정점 DO3 (35° 00.016'N, 124° 30.029'E, depth: 92m)에서 총 11 번의 층별채집을 수행하였다 (Fig. 7). 성체암컷의 경우 자정에서 낮 12시까지 하향이동하는 경향을 나타냈으나, 그 이후에 상향이동하는 경향은 뚜렷하지 않았다 (Fig. 8). 표면혼합층의 수온범위는 평균 28.31℃로 표층에서의 먹이농도 (엽록소 농도)가 낮고 수심 30m에서 엽록소 농도 최대값을 나타냈다. 수컷은 개체수 측면에서 주기를 보일 만큼의 충분한 개체수를 나타내지 않았고, 뚜렷한 수직이동성도 관찰되지 않았다 (Fig. 8). 미성숙체의 경우 1기, 2기 및 3기의 경우 뚜렷한 주야 수직이동성은 나타나지 않았고, 최대개체수가 20-40m 수심에서 모든 채집시간동안 머물러 있었다 (Figs. 9 and 10). 미성숙체 4기 또한 20-40m 수심에서 높은 개체수를 나타내, 포식자 회피보다 성장을 위한 먹이섭식에 더 큰 의미를 갖고 분포하고 있음을 시사하였다. 미성숙체 5기의 경우 뚜렷하지는 않으나, 낮에는 저층으로 이동하여 머물러 있고, 밤에는 표층으로 이동하는 경향을 보였다. 표층역인 0-10m 까지는 상승하지 않았고, 10-20m 범위까지 상승하였는데, 이때 수온은 평균 25.74℃였다. 이는 뚜렷한 주야수직이동성을 보이지 않은 춘계 미성숙체 5기의 양상과 반대였다 (Fig. 11).

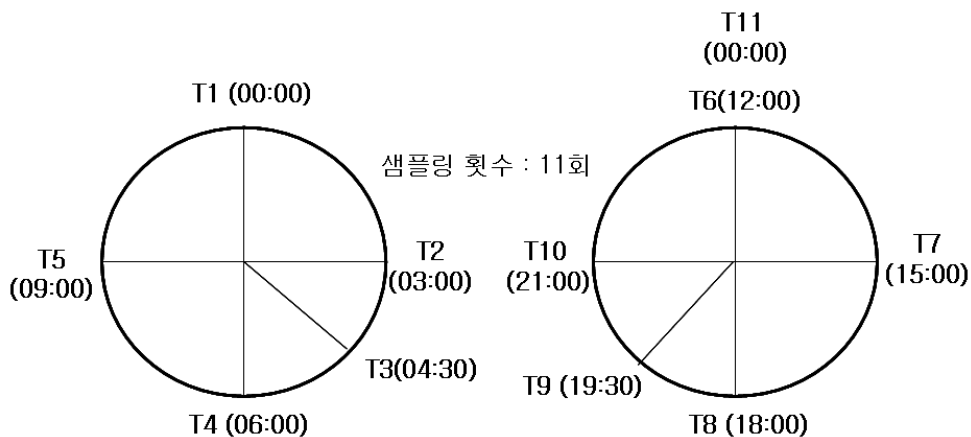


Fig. 7. Sampling time for 3 hour interval collection of *Calnaus sinicus* in the Yellow Sea in summer.

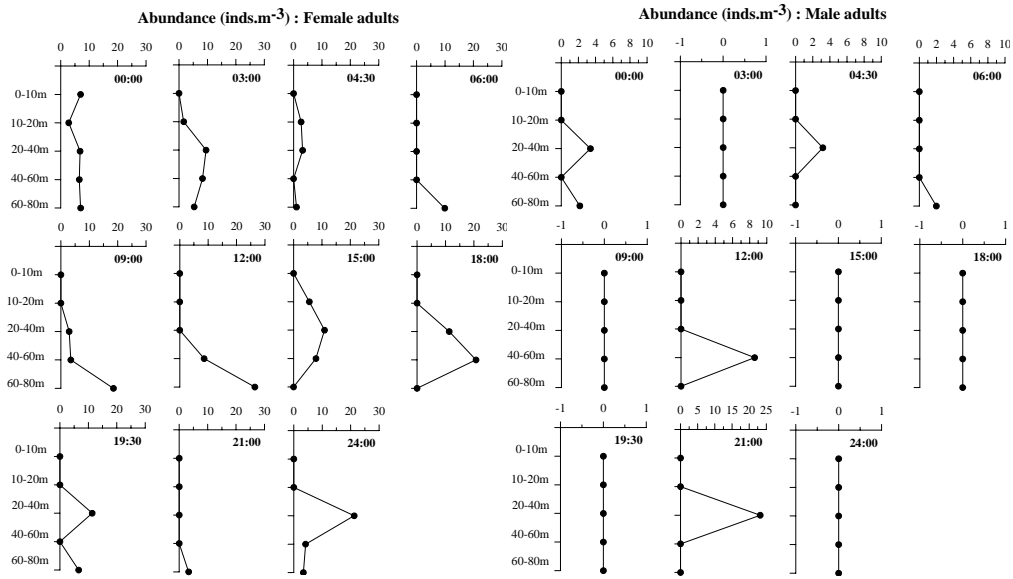


Fig. 8. Variation in the vertical distribution of adult *Calanus sinicus* in the Yellow Sea in summer. (Adult females and males)

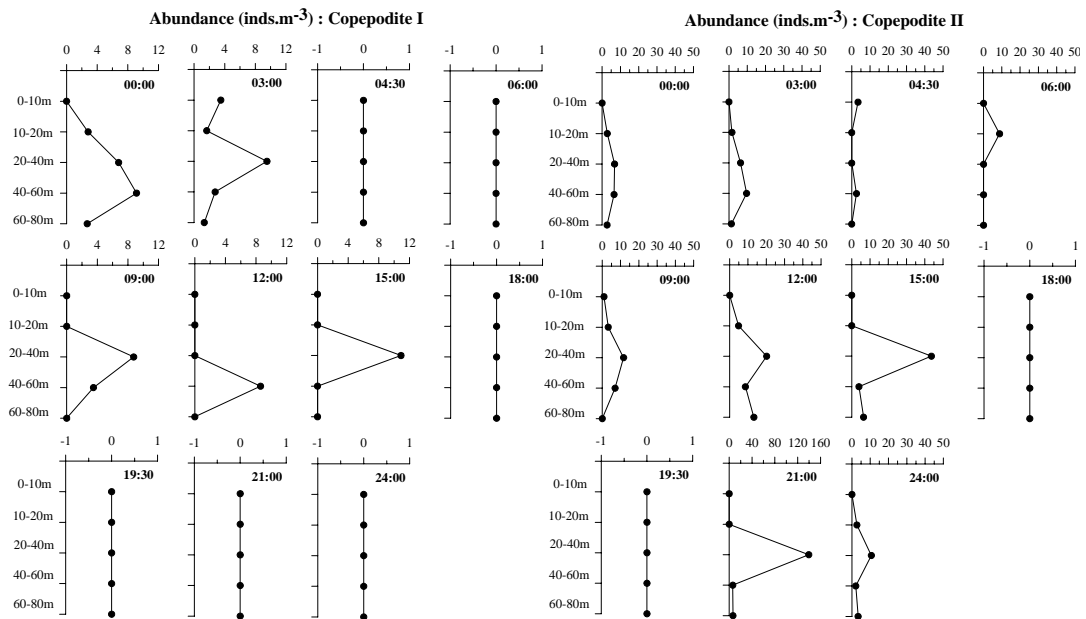


Fig. 9. Variation in the vertical distribution of adult *Calanus sinicus* in the Yellow Sea in summer. (Copepodites I and II)

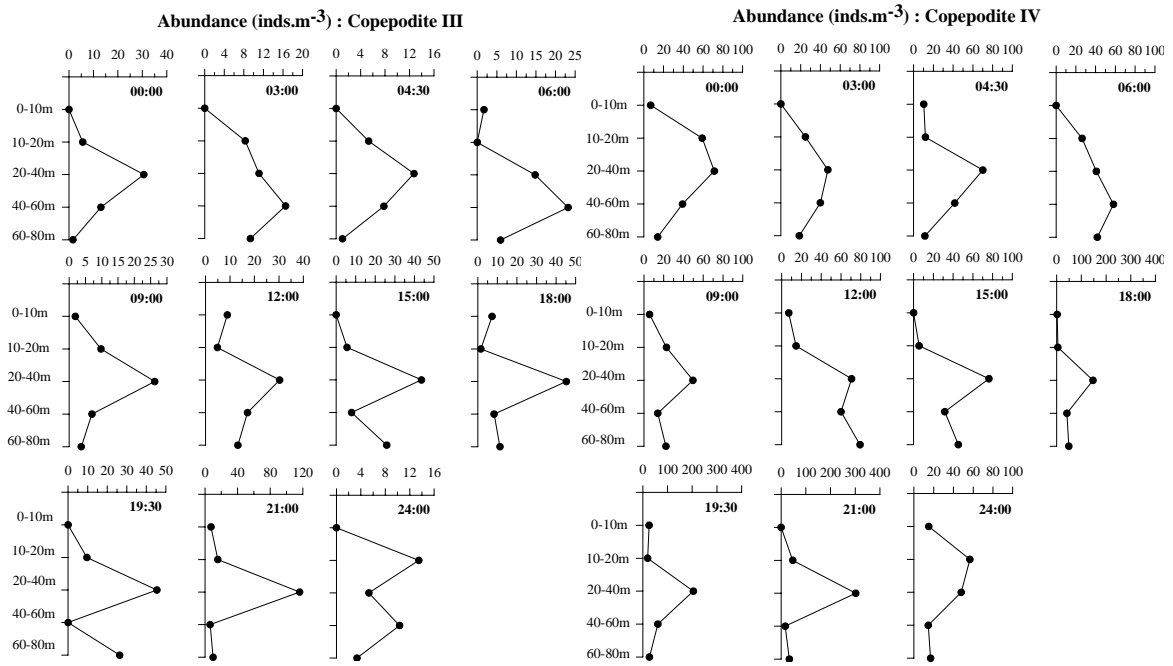


Fig. 10. Variation in the vertical distribution of adult *Calanus sinicus* in the Yellow Sea in summer. (Copepodites III and IV)

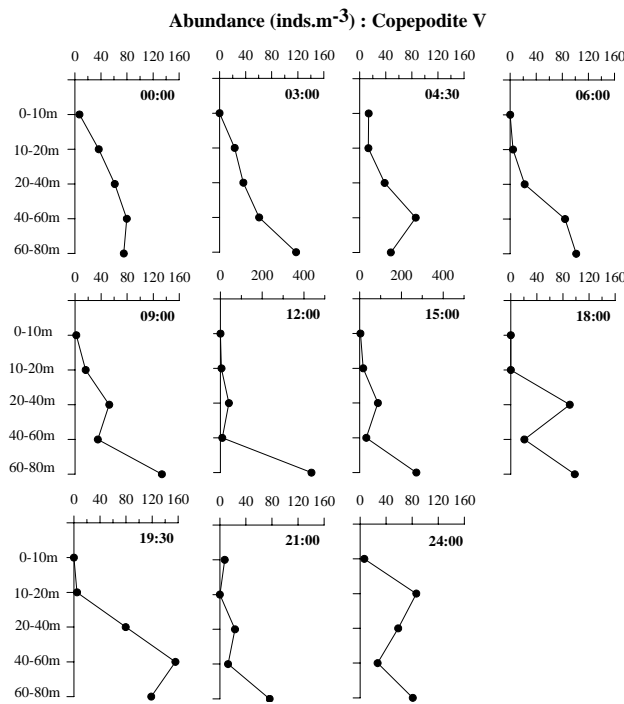


Fig. 11. Variation in the vertical distribution of adult *Calanus sinicus* in the Yellow Sea in summer. (Copepodite V)

(3) 요각류의 주야수직이동과 먹이 및 환경요인

춘계에 채집된 *Calanus sinicus*의 성체 암컷은 야간에 표층으로 이동하고, 주간에는 저층으로 이동하는 분명한 주야수직이동을 나타냈다. 이때 수온의 범위는 7.81–8.23°C, 염분의 범위는 32.60–32.65 psu였다. 포식회피에 의한 성체 암컷의 야간 표층이동은 상대적으로 풍부한 먹이농도(0.54–0.70 $\mu\text{g L}^{-1}$)와 일치하였고, 기존에 보고된 야간 표층이동 후 섭식주기활동과 잘 일치하였다. 미성숙체 1, 2, 3, 4기의 최대 개체수는 먹이농도가 최대를 나타낸 10–20m 수심에서 나타났고, 포식자의 회피보다 성장을 위한 섭식에 집중된 것으로 판단된다.

하계에 채집된 *C. sinicus*의 개체군은 봄철과 상이하였고, 2009년 하계에 나타난 양상과도 다소 차이가 있었다. 수온의 범위는 28.18–28.44°C, 염분의 범위는 32.06–32.23 psu였고, 엽록소 농도는 0.21–2.36 $\mu\text{g L}^{-1}$ 범위를 나타냈고, 표면 하 엽록소 최대층(30m)에서 가장 높았다. 발달단계 별 개체수를 보면, 봄철 성체 암컷이 평균 151 inds. m^{-3} 을 나타낸 반면, 여름철 성체암컷은 평균 22 inds. m^{-3} 에 불과했다. 평균 수컷은 4–5 inds. m^{-3} 의 범위로 계절 간 차이가 없었다. 2009년 여름철에 출현한 성체 암컷의 개체수는 0–20m 범위에서 10–60 inds. m^{-3} 범위를 나타낸 것에 비하면 2010년도의 개체수는 매우 적었다. 2009년도 표면혼합층(0–10m)의 평균수온이 26.10°C였던 반면, 2010년도의 경우 28.31°C를 나타내 약 2.2°C 높았다. 2010년에 발달 단계 별 개체수를 보면, 미성숙체 4기와 5기의 개체수가 각각 206, 272 inds. m^{-3} 로 높았다. 이는 춘계에 미성숙체 1기가 207 inds. m^{-3} , 성체 암컷이 151 inds. m^{-3} 를 나타낸 것과 차이가 있었다. 엽록소 최대층에서 미성숙체 1, 2, 3, 4기의 최대 개체수가 관측되었고, 대부분의 시간동안 동일한 양상을 보여 포식과 관련된 수직이동보다, 먹이섭식활동에 더 큰 의미를 두는 것으로 판단된다.

(4) 환경요인과 식물플랑크톤 군집

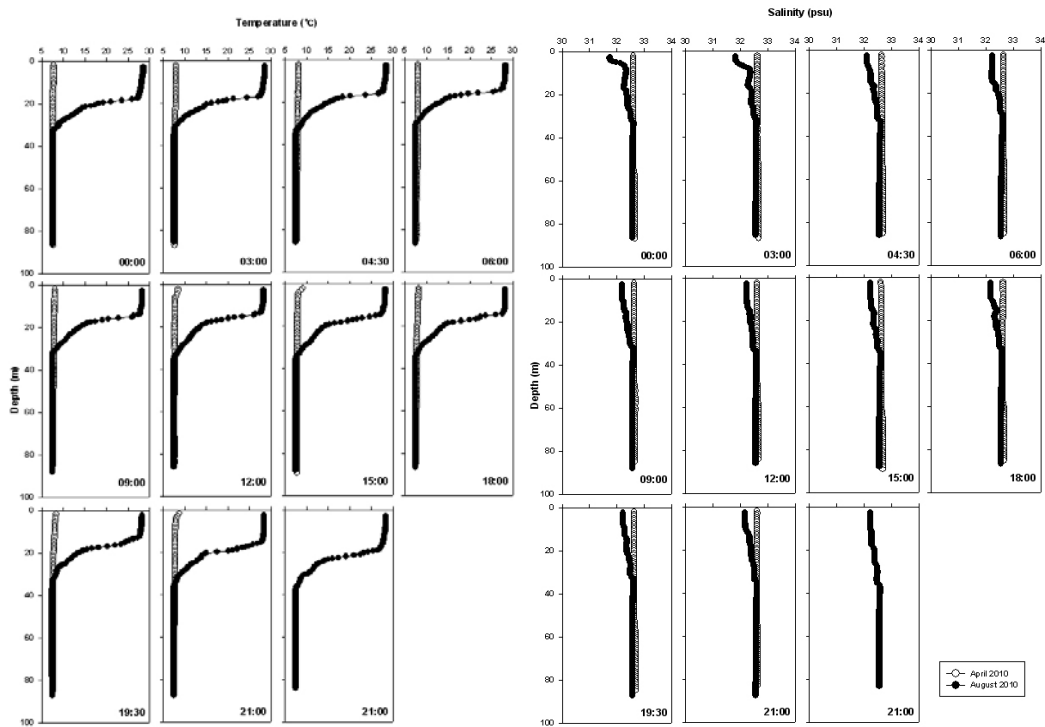


Fig. 12. Vertical profiles of water temperature and salinity in the Yellow Sea in spring and summer.

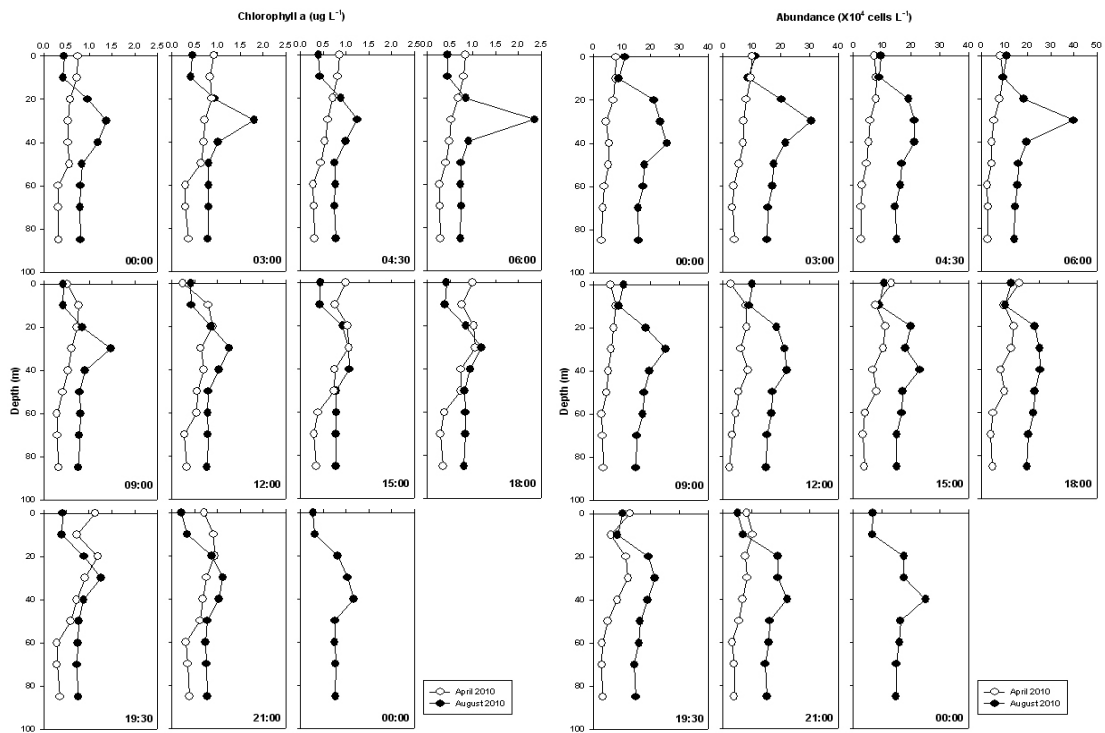


Fig. 13. Vertical profiles of chlorophyll-*a* concentration and phytoplankton abundance in the Yellow Sea in spring and summer.

춘계 표층수온은 00:00분에 7.8°C로 가장 낮았으며, 이후 서서히 증가하다 15:00분에 8.7°C로 가장 높은 수온을 보였다 (Fig. 12). 하계 표층수온은 19:30분에 28.2°C로 가장 낮았으며, 00:00분에 28.5°C로 가장 높은 수온을 보였다. 그러나 그 차는 약 0.3°C로 시간에 따른 변화는 그리 크지 않았다. 수온의 수직 분포는 춘계에 표층에서 저층까지 약 0.2 - 1.3°C의 차이를 보인 것과 비교하여, 하계에는 표층에서 저층의 차이는 수온약층의 형성으로 인하여 약 20°C이상의 뚜렷한 차이를 보였다. 수심 40m 이하의 저층 수온은 춘계에 7.6 - 7.8°C로 하계 수온보다 약 0.1 - 0.3°C 높았다. 춘계 표층 염분은 각 시간대 별로 32.60 (00:00, 15:00) - 32.65 psu (04:30)의 범위를 보여 그 변화폭이 0.05로 거의 일정하였다 (Fig. 12). 하계에는 표층에서 평균 32.12 psu로 춘계보다 시간적 변화폭 (31.74 - 32.22 psu)은 더 크게 나타났다. 염분의 수직분포는 춘계에 표층 (평균 32.62 psu)보다 저층 (평균 32.67 psu)에서 높은 농도를 보였고, 표층에서 50m 수심까지의 농도변화는 거의 나타나지 않았다. 하계에는 표층 (평균 0-20m)에서 평균 32.26 psu로 저층보다 낮았고, 수심 40m 이하에서는 춘계와 차이를 보이지 않고 일정한 염분농도를 보였다. 총 엽록소 a의 춘계 표층농도는 0.24 - 1.14 $\mu\text{g L}^{-1}$ 의 농도로 평균 0.72 $\mu\text{g L}^{-1}$ 를 보였다. 시간에 따른 표층 농도 변화는 낮 시간 (09:00, 12:00, 15:00분)에 평균 0.34 $\mu\text{g L}^{-1}$ 로 밤 시간의 평균 0.89 $\mu\text{g L}^{-1}$ 보다 낮았다 (Fig. 13). 엽록소 a의 수직분포 변화양상은 00:00부터 06:00까지 표층에서 저층으로 점점 낮아지는 경향을 보여고, 그 후로 표층의 엽록소 a의 농도는 낮아졌으나, 수심 10 - 30m에서 높은 농도를 보이거나 수심이 높아질수록 낮아졌다. 하계에는 표층에서 평균 0.56 $\mu\text{g L}^{-1}$ 로 가장 낮았으며, 엽록소 최대층인 수심 20 - 40m에서 평균 1.09 $\mu\text{g L}^{-1}$ 로 약 2배의 농도차이를 보였다. 춘계에는 표층에서 높은 엽록소 농도를 보인 반면, 하계에는 그보다 깊은 수심에서 엽록소 최대층이 형성되는 것을 알 수 있다. 춘계와 하계에 크기별 엽록소 a의 시간별 변화는 총 엽록소 a의 변화와 유사하였다. 춘계의 초 미소식물플랑크톤 엽록소 a는 0.2 $\mu\text{g L}^{-1}$ 이하의 농도를 보였고 시간별, 수층별 큰 변화양상은 나타나지 않았다. 춘계에 미소, 초 미소식물플랑크톤이 차지하는 비율은 총 엽록소 a의 약 평균 50% 차지하였고 하계에는 그 비율이 증가하여 약 평균 60% 이상을 차지하였다. 그러나 2009년 하계 (평균 71%)보다는 낮은 비율을 보였다. 식물플랑크톤 현존량은 봄철에 표층에서 평균 8×10^4 cell L^{-1} 로 하계 평균 12×10^4 cell L^{-1} 보다 낮았다 (Fig. 13). 춘계와 하계에 식물플랑크톤 현존량의 수직적 분포는 춘계에는 표층에서 높은 현존량을 보인 반면, 하계에는 그 보다 중층인 30-40m 수심에서 높은 현존량을 보여 엽록소 a의 변화 양상과 유사하였다.

다. 황해저층냉수대의 원생동물의 분포특성

2010년 8월 SCML 시료의 분석결과 A03와 B04에서만 유충섬모류 (*Coxiella* sp., *Stenosemella* sp.) 출현이 확인 개체수도 30 cells L^{-1} 이하의 매우 낮은 수준이었으며 2009년과 같은 냉수 지표종 *Acanthostomella norvegica*의 출현은 보이지 않았다. 수온

이 6.5–10.5 °C의 범위를 보인 BCWL의 시료는 저층 연안종으로 알려져 있는 *Tintinnidium primitivum*이 우점적 분포를 나타냈다 (Fig. 14).



Fig. 14. Lorical shape and soft body inside lorica of *Tintinnidium primitivum*.

*Tintinnidium primitivum*는 정점 A03와 B02를 제외한 BCWL의 나머지 모든 정점에서 관찰되었으며 이와 같은 정점 특이적 분포는 2009년의 조사결과와 일치하였다. 2010년 정점 D03에서 상대적으로 가장 높은 개체를 보였으며 모든 정점에서 2010년에 월등히 높은 개체수를 기록하고 있었다 (Fig. 15). 향후 황해저층냉수대에 우점적으로 서식하는 유충섬모류 *Tintinnidium primitivum*의 생태학적 특성을 조사하여 황해저층냉수의 고유생태계에서 이들 개체군의 역할을 파악할 필요가 있다.

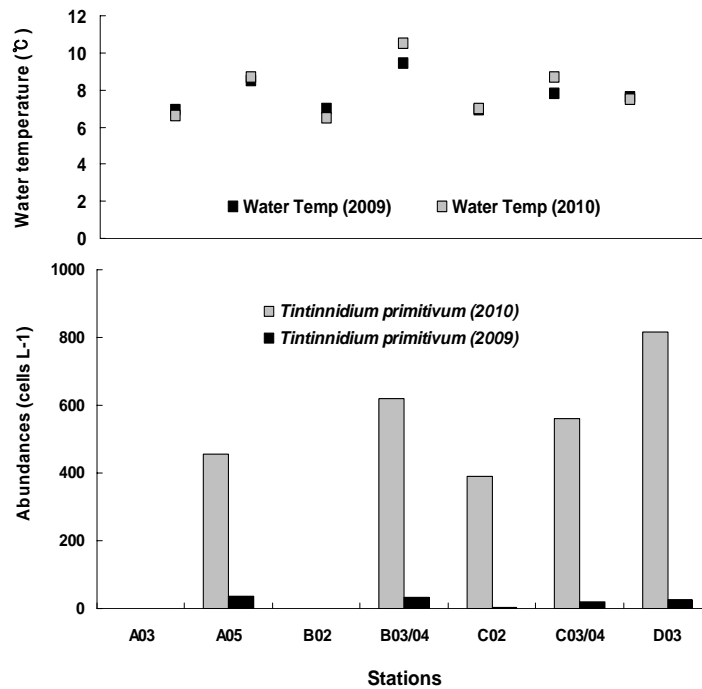


Fig. 15. Comparisons of water temperatures and *Tintinnidium primitivum* abundances in 2009 and 2010 surveys.

라. 황해저층냉수대의 영양염 분포

(1) 황해 중앙부에서의 영양염 변화 및 엽록소-a의 분포 특성

봄철 황해 중앙부 정점 (A3, B2, C2, D3)에서 규산염은 $1.64 \sim 10.38 \mu\text{M}$ (평균 $5.94 \mu\text{M} \pm 2.73$), 인산염은 $0.07 \sim 0.47 \mu\text{M}$ ($0.25 \mu\text{M} \pm 0.12$), 질산염(질산염+아질산염)은 $0.34 \sim 6.90 \mu\text{M}$ ($3.49 \mu\text{M} \pm 1.92$)의 값의 범위를 보였다. 엽록소-a 농도는 $0.42 \sim 8.84$ ($1.84 \text{ mg m}^{-3} \pm 1.41$)의 값의 범위를 보였다 (Fig. 16). 영양염 간에는 유사한 분포 양상을 보였으며, 황해 중앙부의 위쪽에 위치한 정점 (A3, B2)은 50 ~ 60m 부근에서 영양염 농도가 증가하는 반면, 아래 정점 (C2와 D3)에서는 20 ~ 30m 부근에서 영양염 농도가 증가한다. 특히 A3와 B2는 저층부에서 또 다른 성층이 존재하였다. 엽록소-a 값을 보면, A3 정점에서 10 ~ 20m 사이에서 높은 값을 보이며, A3과 B2에서 50m까지 2 mg m^{-3} 이상의 높은 값을 보인다. 반면에 C2에서는 10m 부근, D3에서는 다른 정점에 비해 낮은 값을 보인다. 이러한 양상을 영양염 분포와 비교해보면, 식물플랑크톤의 소비에 의해서 영양염의 공간적인 분포가 결정된 것을 알 수 있다. A3과 B2는 황해저층냉수에 의해서 또 다른 성층이 저층부에 형성됨으로서 C2와 D3보다 더 수층이 안정된 것으로 파악된다. 식물플랑크톤의 성장에 중요한 영향을 미치는 요인 중에 수층 혼합이 중요한 역할을 한다 (Bouman 2010). 이는 수층 혼합으로 인해 빛이 제한되는 수심 아래로 식물플랑크톤을 이동시키기 때문에 빛에 의한 제한으로 이들이 성장하지 못하기 때문이다.

여름철 규산염은 $0.13 \sim 11.71 \mu\text{M}$ (평균 $6.00 \mu\text{M} \pm 4.22$), 인산염은 $0.001 \sim 0.77 \mu\text{M}$ ($0.38 \mu\text{M} \pm 0.31$), 질산염은 $0.10 \sim 11.31 \mu\text{M}$ ($5.13 \mu\text{M} \pm 4.54$)의 값의 범위를 보였다. 엽록소-a 농도는 $0.30 \sim 2.51 \text{ mg m}^{-3}$ ($0.69 \text{ mg m}^{-3} \pm 0.36$)의 값의 범위를 보였다 (Fig. 17). 여름철은 봄철과 달리 20 ~ 30m 부근에서 강한 성층이 형성되어 영양염 농도는 상층부에 낮은 농도로 존재한다. 이는 봄철 식물플랑크톤의 대발생 이후 고갈된 영양염이 강한 성층 형성으로 인해 중층 이하의 풍부한 영양염이 상층부로 공급되지 못하면서 나타나는 현상으로 판단된다. A3과 B2의 저층의 영양염 농도가 C2와 D3보다 높게 나타났다. 엽록소-a 농도는 성층이 형성되는 20 ~ 40m 부근에서 SCM 층이 형성되었으며, 황해 중앙부 위쪽에 위치한 A3 정점의 농도가 봄철과 마찬가지로 가장 높은 농도를 나타내었다.

전반적으로 황해 중심부에서 저층 냉수대가 강하게 형성되는 A3과 B2 정점의 상층부와 SCM 층에서 낮은 영양염 농도 및 높은 엽록소-a 농도를 보였으며, 성층 이하에서는 높은 영양염 농도를 보여 황해 저층 냉수가 영양염 분포 및 특성을 조절하는 주요인자인 것으로 생각되며, 이는 황해 저층냉수에 의해 형성된 성층이 수체의 안정성을 강화시켜 식물플랑크톤에 의한 영양염 소비를 촉진하는 것으로 판단된다.

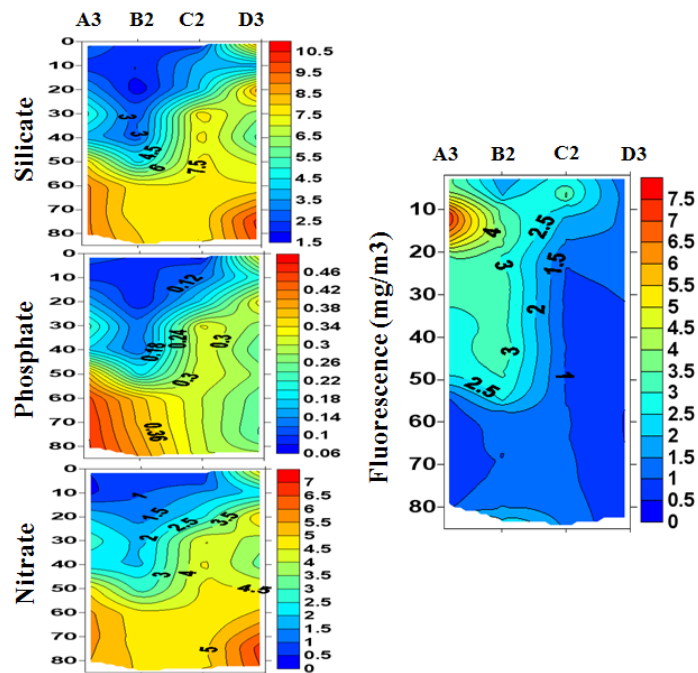


Fig. 16. The vertical distribution of silicate, phosphate and nitrate+nitrite (nitrate), and fluorescence at the central parts of the study area during spring.

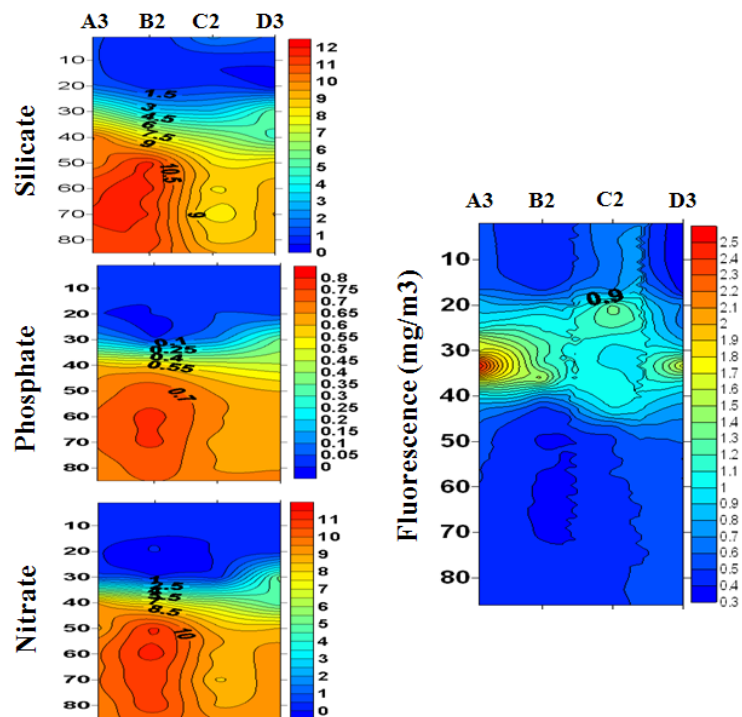


Fig. 17. The vertical distribution of silicate, phosphate and nitrate+nitrite (nitrate), and fluorescence at the central parts of the study area during summer.

(2) 황해 동부에서의 영양염 변화 및 엽록소-a의 분포 특성

봄철 황해 동부 정점 (A6, B4, C4, D6)에서 규산염은 $4.88 \sim 13.39 \mu\text{M}$ (평균 $11.57 \mu\text{M} \pm 1.71$), 인산염은 $0.17 \sim 0.65 \mu\text{M}$ ($0.51 \mu\text{M} \pm 0.10$), 질산염은 $0.51 \sim 7.86 \mu\text{M}$ ($5.97 \mu\text{M} \pm 1.53$)의 값의 범위를 보였다. 엽록소-a 농도는 $0.31 \sim 10.66$ ($1.15 \text{ mg m}^{-3} \pm 1.06$)의 값의 범위를 보였다 (Fig. 18). 황해 동부 정점은 중앙부와 달리 저층부에서 또 다른 성층이 형성되지 않고 10m 부근에서 약한 성층이 형성된다. 또한 중앙부와 달리 영양염 분포가 수층별로 큰 차이를 나타내고 있지 않다. 이는 10m 부근까지의 엽록소-a의 농도도 상대적으로 낮다. 하지만 가장 아래에 위치한 D6 정점은 10m 부근에서 아주 높은 농도를 나타내었다. 이 지역은 표층부에서의 높은 수온 상승으로 인해 10m 부근에서 다른 정점에 비해 강한 성층이 형성되어 수층이 안정화되면서 식물플랑크톤이 증가한 것으로 판단되며, 이로 인해 영양염 농도도 가장 낮게 나타난 것으로 생각된다.

이 지역에서의 여름철 규산염은 $1.43 \sim 10.87 \mu\text{M}$ (평균 $7.54 \mu\text{M} \pm 3.08$), 인산염은 $0.01 \sim 0.58 \mu\text{M}$ ($0.26 \mu\text{M} \pm 0.21$), 질산염은 $0.10 \sim 7.85 \mu\text{M}$ ($3.41 \mu\text{M} \pm 3.06$)의 값의 범위를 보였다. 엽록소-a 농도는 $0.33 \sim 2.38 \text{ mg m}^{-3}$ ($0.69 \text{ mg m}^{-3} \pm 0.36$)의 값의 범위를 보였다 (Fig. 19). 여름철은 봄철과 달리 강한 성층이 형성되어 표층부와 성층이하의 영양염 분포가 확연한 차이를 보인다. 하지만 성층 이하의 영양염 분포를 보면, 황해 중앙부와는 달리 오히려 아래쪽인 C4와 D6에서 위쪽에 위치한 정점 A6과 B4 보다 높은 값을 보였으며, 규산염 농도는 D6에서 20m까지 높은 농도를 나타냈다. SCM 층은 20m와 40m 부근에서 형성된다.

황해 동부는 황해 중앙부와 마찬가지로 성층 형성이 영양염 분포 및 엽록소-a 농도에 중요한 역할을 한다. 하지만 황해 중앙부는 황해 저층냉수에 의한 성층 형성이지만 황해 동부는 표층 수온 상승에 의한 성층의 형성이므로 수층의 안정화 요인이 두 지역이 다른 것으로 판단된다.

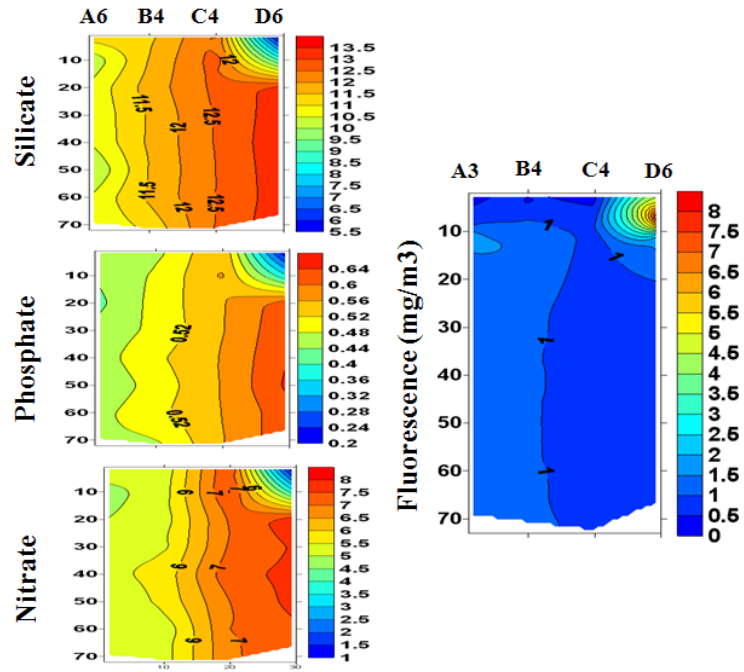


Fig. 18. The vertical distribution of silicate, phosphate and nitrate+nitrite (nitrate), and fluorescence at the eastern parts of the study area during spring.

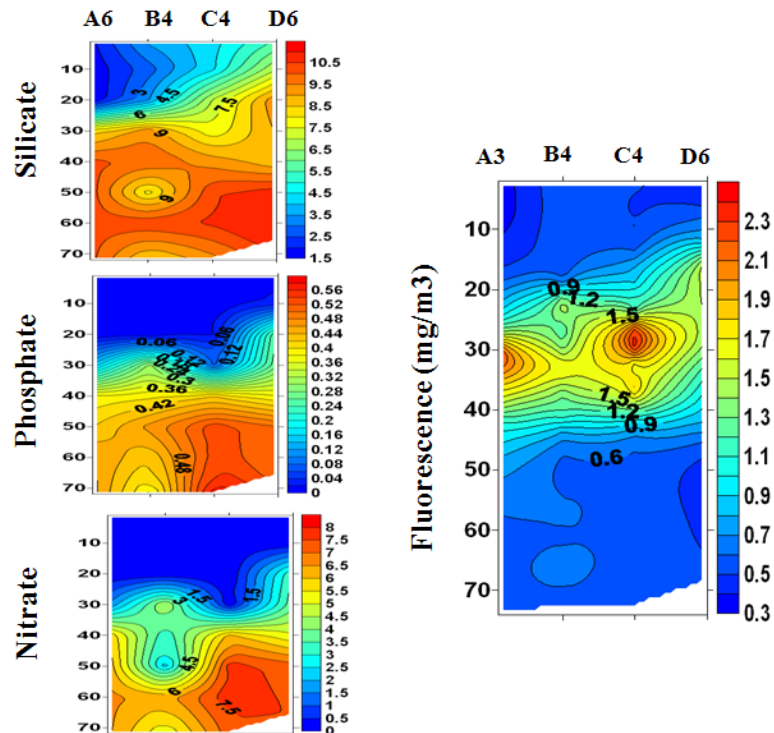


Fig. 19. The vertical distribution of silicate, phosphate and nitrate+nitrite (nitrate), and fluorescence at the eastern parts of the study area during summer.

(3) 황해 E 라인에서의 영양염 변화 및 엽록소-a의 분포 특성

조사 지역의 최남단에 위치한 E 라인 (E1 ~ E8)에서의 붐철 규산염 농도는 7.27 ~ 13.31 μM (평균 11.98 $\mu\text{M} \pm 1.31$), 인산염은 0.22 ~ 0.78 μM ($0.51 \mu\text{M} \pm 0.12$), 질산염은 4.47 ~ 7.87 μM ($6.74 \mu\text{M} \pm 0.76$)의 값의 범위를 보였다. 엽록소-a 농도는 0.28 ~ 1.01 mg m^{-3} ($0.60 \text{mg m}^{-3} \pm 0.16$)의 값의 범위를 보였다 (Fig. 20). 영양염 평균 농도를 보면, 황해 동부 지역과 유사한 값의 범위를 보이지만, 엽록소-a의 평균 농도는 동부지역보다 낮은 평균값을 보인다. 서쪽 지역이 연안 지역보다 높은 영양염 농도를 보인다. 그리고 E5와 E6 정점은 주변의 영양염 농도보다 높은 값을 보이며 수층에 따른 차이도 나타나지 않는다. 이는 E5 이후에 연안으로 갈수록 수층이 혼합되는 것으로 판단된다. E5와 E6에서의 수층 혼합은 수온 전선에 의한 것인지 혹은 인근에 있는 섬의 영향 때문에 수층 혼합이 발생하는 지에 대한 고찰은 좀 더 연구할 필요가 있지만, 이러한 수층 혼합으로 인해 전 수층에서 영양염 농도가 높게 나타나고, 수심이 깊어 식물플랑크톤에 의한 소모도 다른 정점들 보다 덜 한 것으로 판단된다. E7과 E8은 수심이 40m 내외이기 때문에 붐철에 충분히 혼합될 수 있는 것으로 판단되며, 수심이 낮아 다른 정점들보다 식물플랑크톤이 빛의 제한을 받지 않기 때문에 엽록소-a 농도가 다른 정점에 비해 높은 것으로 생각된다. 하지만 황해 중부와 동부 지역의 정점들에 비해서 엽록소-a의 농도가 낮다.

여름철 규산염 농도는 규산염은 1.43 ~ 14.00 μM (평균 8.92 $\mu\text{M} \pm 3.21$), 인산염은 0.001 ~ 0.77 μM ($0.34 \mu\text{M} \pm 0.24$), 질산염은 0.10 ~ 11.15 μM ($4.90 \mu\text{M} \pm 3.79$)의 농도 범위를 보였다. 엽록소-a 농도는 0.25 ~ 1.66 mg m^{-3} ($0.69 \text{mg m}^{-3} \pm 0.28$)의 값의 범위를 보였다 (Fig. 21). 여름철 표층에서 40m 부근의 영양염 분포는 서쪽지역 정점에서 동쪽지역으로 갈수록 증가하는 반면, 40m 이하 수층에서는 감소하는 경향을 보인다. 서쪽 지역의 저층 영양염이 연안지역으로 갈수록 영양염을 공급해주는 양상을 보인다. 그리고 서쪽 지역에 40m 부근에서 영양염 농도가 높게 나타난다. 이러한 양상은 수온의 분포와 상당히 일치한다. 이는 붐철에는 저층 냉수의 영향이 황해의 남단으로 내려오지 못하지만, 여름철에는 그 세력이 강해져서 황해의 남단까지 내려오기 때문이다. 영양염이 연안으로 공급되어지는 모습은 붐철에 E5와 E6 사이에서 나타났지만 여름철은 이러한 현상이 연안지역까지 확장된 것으로 보인다. SCM 층도 서쪽에서 연안으로 갈수록 수심이 낮아지는 경향을 보인다. 붐철과 여름철 E 라인에서의 영양염 분포는 저층 냉수의 세력 확장에 따라 계절별 변화 양상을 보이는 것으로 판단되며, 저층에서의 높은 영양염이 동쪽으로 이동할수록 상층부로 공급되는 경향을 보였다.

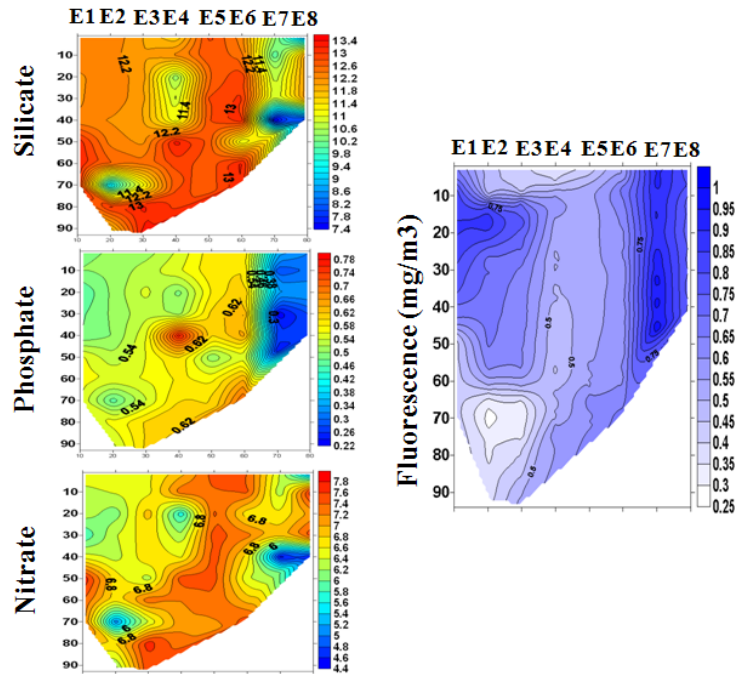


Fig. 20. The vertical distribution of silicate, phosphate and nitrate+nitrite (nitrate), and fluorescence at the E line located to the southernmost of the study area during spring.

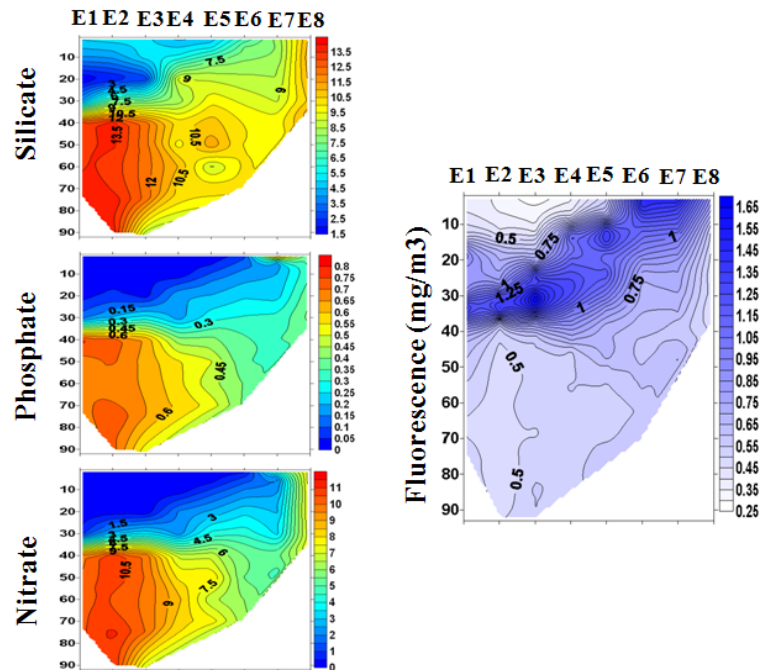


Fig. 21. The vertical distribution of silicate, phosphate and nitrate+nitrite (nitrate), and fluorescence at the E line located to the southernmost of the study area during summer.

제 4 절 음향 분야

1. 서론

해양의 음향 산란층(sound scattering layer, SSL) 또는 심해 산란층(deep scattering layer, DSL)의 존재는 1940년대 처음으로 발견된 이후 전 세계 많은 해역에서 관측 되고 있다(Lee *et al.*, 1999; Medwin & Clay, 1999). SSL은 여러 종류의 동물플랑크톤과 일부 소형 어류(nekton)등으로 구성되어 있으며, 이들은 특정 해역의 해양환경에 따라 다양한 분포 특성을 보여주고 있다. SSL을 구성하는 중요 동물 플랑크톤 분포 특성의 파악은 해양생물학 측면에서 생태계의 이해뿐만 아니라, 어류의 먹이에도 중요한 구성 요소 이므로 수산자원 연구 분야에도 고려해야 할 중요 연구 사항이다.

기존의 동물플랑크톤 채집 방법으로는 전체적인 현상 규명이 힘들었던 SSL의 존재 및 특성 파악은 다양한 수중음향 장비의 개발로 가능해졌다.

황해냉수대는 황해 중앙부에 생성된 10°C 이하의 수온과 상대적인 고염(>32 psu)의 수괴이다. 황해 저층 냉수대에 의한 황해 해양환경의 시변동성은 SSL를 비롯한 식물 플랑크톤, 어류 등 모든 해양생물의 분포에 직접적인 영향을 준다.

우리나라에서의 SSL에 대한 연구는 동해와 동중국해에서 연구가 실시되었고, 황해에 대해서는 거의 연구가 되지 않고 있으며, 대부분의 SSL의 존재 파악 및 수직이동 특성의 연구의 주목적을 두었다(Lee *et al.*, 1990; Aoki and Inagaki, 1992; Chou *et al.*, 1999). 이런 현상 파악만의 연구는 수산음향과 네트 채집이라는 방법론의 차이와 두 자료의 연관성 부족으로 발생했으나 최근에는 직·간접적인 두 방법 모두를 사용함으로써 상호 보완하는 방향으로 연구가 진행 중이다(Kang *et al.*, 2003). 수중음향 및 해양생태계에서 중요한 요소이지만 연구가 부족한 현실이고, 특히 황해 중부해역의 SSL 조사 자료는 전무하다.

본 연구는 생물 음향 기법을 이용하여 황해 내의 SSL 층의 수직 분포 특성을 파악으로, 봄과 여름의 2회의 실험을 실시하여 주야 및 계절적인 수직운동 패턴을 분석하였다. 또한 계절별 SSL의 일주이동속도도 파악하고, 음향조사 결과를 환경 및 동물플랑크톤 생물 결과와 비교, 분석하여 대표 동물 플랑크톤의 분포 특성과 환경과의 상관성을 규명 하였다.

2. 재료 및 방법

가. 황해 저층 냉수대 해역 조사 실시

황해 저층 냉수대 해역 음향조사는 2010년 4월과 8월 2회에 걸쳐 음향실험을

실시하였다. 춘계와 하계 음향 조사 시 1 개 정점(D03)에서 24 시간 연속 관측 하였고, 위도와 경도 변화에 따른 춘계는 10 개 정점, 하계는 13 정점에서 약 30 분 간 정점관측을 통해 음향신호를 획득하였다(Fig. 1).



Fig. 1. Map of the study area.

현장 조사에 사용된 음향 장비는 어군 및 동물플랑크톤 탐지 시 사용되는 과학어군탐지장비로 입력변수 제어 및 음향 자료 송, 수신을 유, 무선으로 할 수 있는 통합시스템이다. 음향실험에 사용한 주파수는 춘계실험(4월)은 38 kHz와 200 kHz를 사용하였고, 하계실험(8월)은 미소 산란체 파악을 위해 200 kHz와 420 kHz를 주파수를 이용하여 음향신호를 획득하였다(Fig. 2(a)). 음향조사방법은 선박이 정선한 후, 조사선 측면에서 음향센서를 해수면 1 m에 예인체를 설치하여 황해냉수대 내의 생물음향신호를 획득하였다(Fig. 2(b)). 음향신호는 1초에 1 ping 씩 송, 수신하였고, pulse length는 0.5 ms로 실험을 실시함. 실험 동시에 DGPS를 연동하여 위치정보를 실시간으로 저장하였다. 실험에 사용한 음향센서의 자세한 음향 시스템 파라미터는 Table 1 에 정리하였다.



Split-beam transducer/sound unit/towing body
(BioSonics Inc., Seattle, USA)

(a)

(b)

Fig. 2. Hydroacoustic survey system

Table 1. Acoustic system parameter

System parameters			
Parameter	38 kHz	200 kHz	420 kHz
Source level (dB/ μ Pa)	217.8	221.5	221.5
Pulse width (ms)	0.5	0.5	0.5
Beam width (degree)	10.4	6.6	6
Ping rate (ping/s)	1	1	1
Absorption coefficient (dB/m)	0.006	0.076	0.096
Sound velocity (m/s)	1526.1	1526.1	1526.1
Collection range (m)	200	200	200

음향실험과 비교할 해양환경 관측자료는 환경자료와 생물자료가 있다. 환경자료는 모든 정점에서 CTD를 이용, 수온, 염분, 형광성 등의 변화를 측정하였고, 생물자료는 수심센서(time depth recorder, TDR)를 설치한 봉고네트를 이용한 사선채집과 closing & open net를 이용한 수심별 수직채집을 실시하여 동물플랑크톤의 정량 및 정성분석을 하여 음향 결과와 비교, 분석하였다(Fig.3).

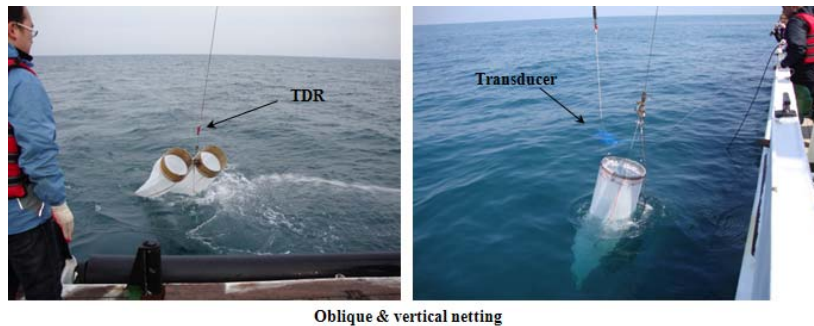


Fig. 3. Biological survey system.

나. 황해 저층 냉수대 해역 음향 조사 신호 분석

황해냉수대 내에 수신한 음향신호는 virtual echogram 기법을 이용하여 post processing 자료 처리를 실시하였다(Fig. 4). 음향신호분석은 수산음향 신호 분석 시 사용되는 일반적인 post processing 방법을 이용하였다(Biosonics, 2005). 수신한 음향신호를 표층 위의 신호와 바닥아래 신호 그리고 노이즈 신호를 제거한 후, 압축하여 분석하였다. Fig 5(a)는 황해냉수대에서 수신한 echogram으로 표층과 해저면 신호, 버블이나 CTD casting에 의한 노이즈를 제거한 후 분석하였다.(Fig 5(b)). 음향신호 분석 시 Threshold level은 춘계와 하계 각각 -75 dB와

-80 dB로 설정하였다.

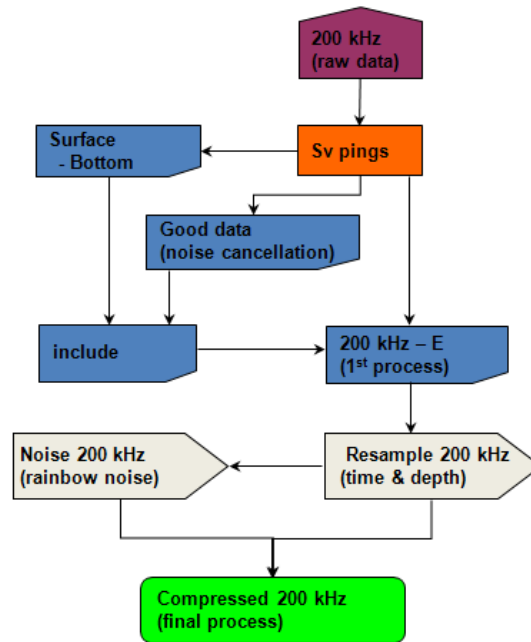


Fig. 4. Acoustic data post processing method.

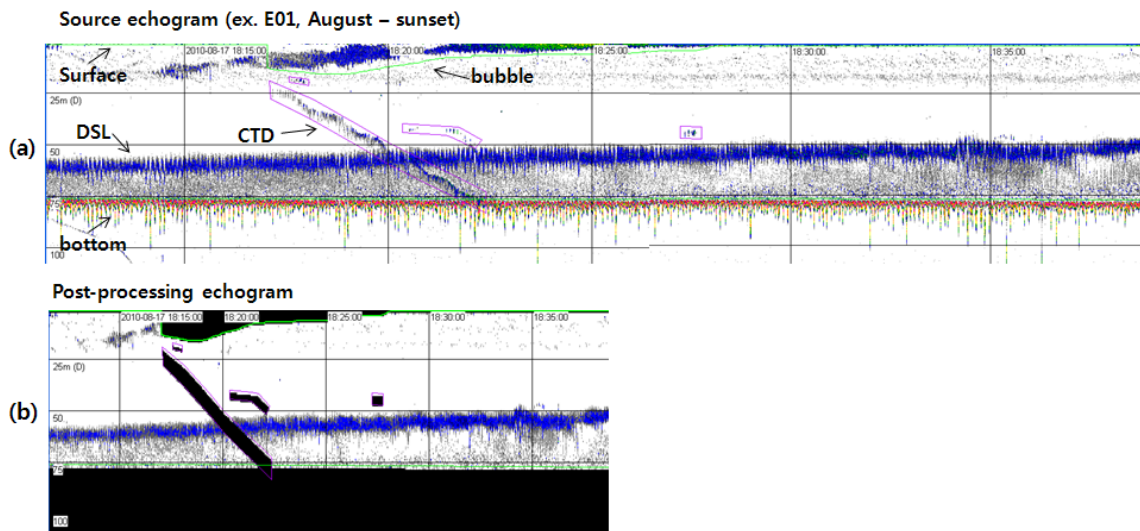


Fig. 5. Acoustic data post-processing using virtual echogram
 (a) Source echogram (b) post processing echogram.

3. 결과 및 고찰

가. 음향 실험 결과 및 고찰

본 연구는 황해 냉수대 해역에서 동물플랑크톤의 주야 및 계절의 변화에 따른 주야 동물플랑크톤의 수직이동 패턴을 음향을 이용하여 측정하였다. 음향 결과는 200 kHz 주파수를 이용하여, SSL를 측정된 결과만은 분석하였다.

Fig. 6은 춘계시기에 측정된 D04 정점의 200 kHz에 대한 낮과 밤의 음향 echogram의 예이다.

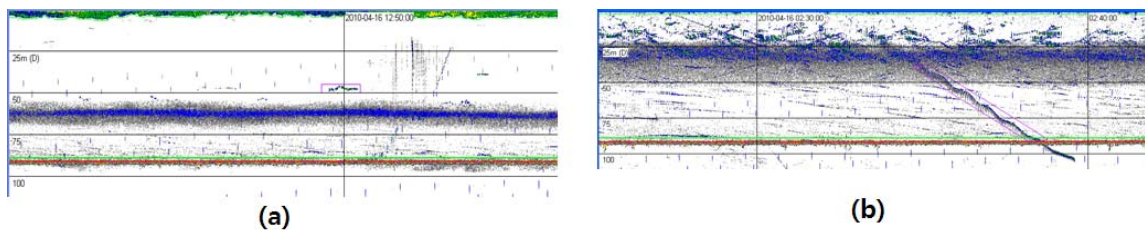


Fig. 6. Example of sound scattering layer in the Yellow Sea Bottom Cold Water (a)day,(b)night.

일출시간의 음향산란층은 수심 50~70 m 사이에 분포 하며, 특정 수심대의 동물 플랑크톤 층 형성을 확인 할 수 있다. 반면에 일몰시간의 음향산란층은 표층~35 m 사이 분포하며, 상층부에서 일출시간 때와 달리 넓게 분산된 형태로 동물플랑크톤 층이 존재하며, 음향산란강도로 확인 시 동물플랑크톤 외에 어류 치어, nekton 등과 혼재 되어 분포한다. 음향실험 결과를 통해서 황해냉수대에서의 전형적인 동물 플랑크톤의 주야 수직 이동 및 분포를 확인 할 수 있다.

(1) 춘계 음향조사(2010년 4월) 결과

황해냉수대에서 2010년 4월, 200 kHz 과학어군탐지장비를 이용하여 송·수신하고, post processing을 통해 분석한 춘계음향조사 결과를 각각의 station의 위도와 경도에 따라 비교, 분석하였다.

같은 경도상의 서쪽 line에 경우 24시간 정점을 제외한 음향조사가 일출시간에 이후에 실시되었다. 일출시간 측정된 음향산란층은 표층~30 m 범위에서 넓게 펼쳐진 상태로 음향산란층이 확인되었다. 위도의 변화에 음향산란층의 강도차이를 확인 하였으나, 특이성을 확인 할 수는 없었다. 이 시기의 수온은 10℃이내로 전층이 거의 동일한 분포였다.

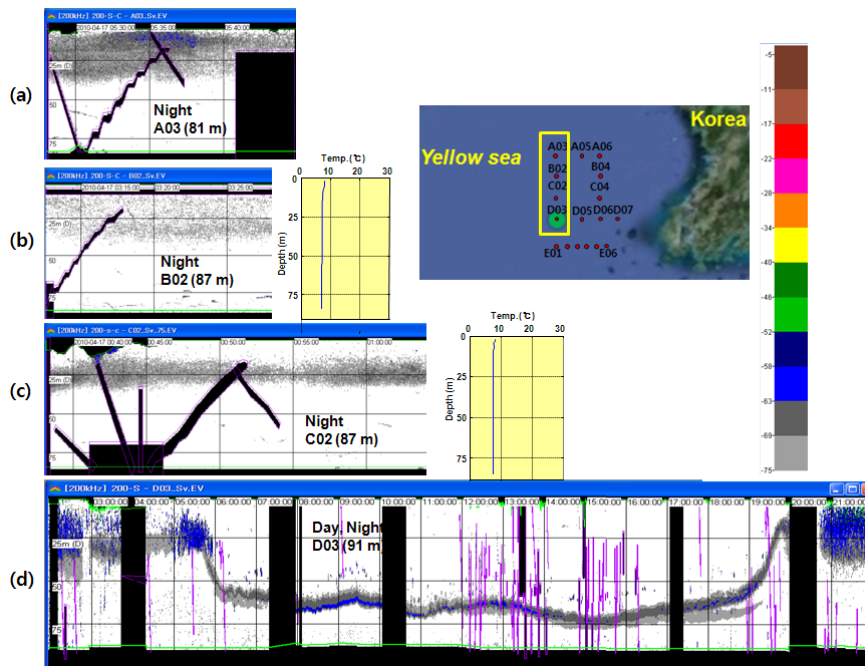


Fig. 7. Sound scattering layer(North-South, West line) at April.

같은 위도 상의 북쪽 line의 경우, 낮과 밤 그리고 일출시에 실험이 실시되었다. 음향산란층이 일출시에는 해저면 근처에 존재하였고, 일몰 이후에는 표층에서 확인되는 전형적인 음향산란 패턴을 음향결과를 통해 확인하였다. 일출시에 측정된 A05 지역 정점은 중층에서 음향산란층이 확인 되었다. 이 결과 또한 동물플랑크톤의 주야 수직이동을 확인 시켜 준다.

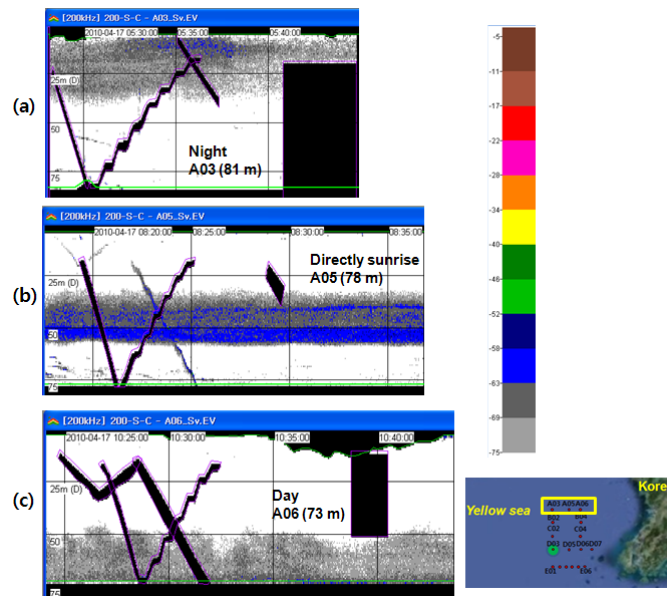


Fig. 8. Sound scattering layer(East-West, North line) at April.

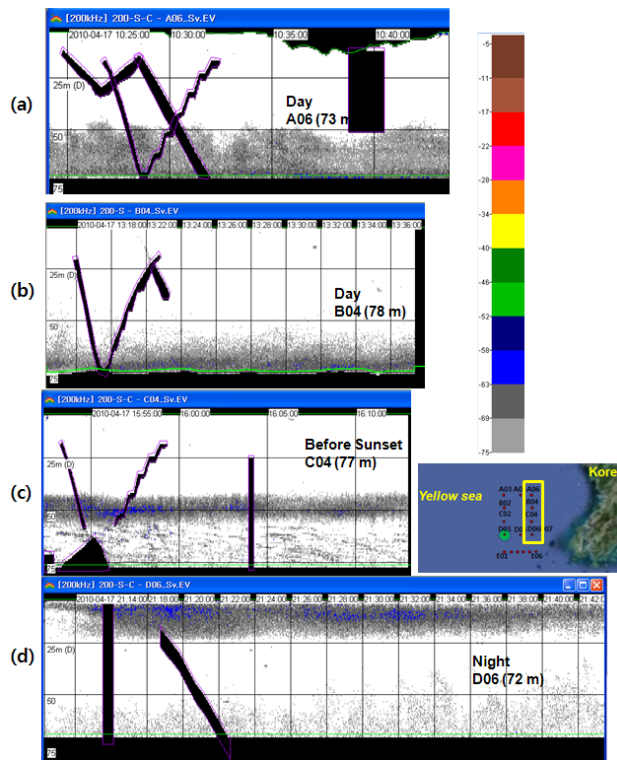


Fig. 9. Sound scattering layer(North-South, East line) at April.

춘계시기의 같은 경도의 동쪽라인 또한 낮과 밤 그리고 일몰시간의 다양한 시간에 음향조사가 실시되었고, 그 결과 또한 일출시에 해저면 근처, 일몰시에 표층에서 음향산란층이 존재하는 전형적인 동물플랑크톤의 주·야 수직이동을 확인하였다.

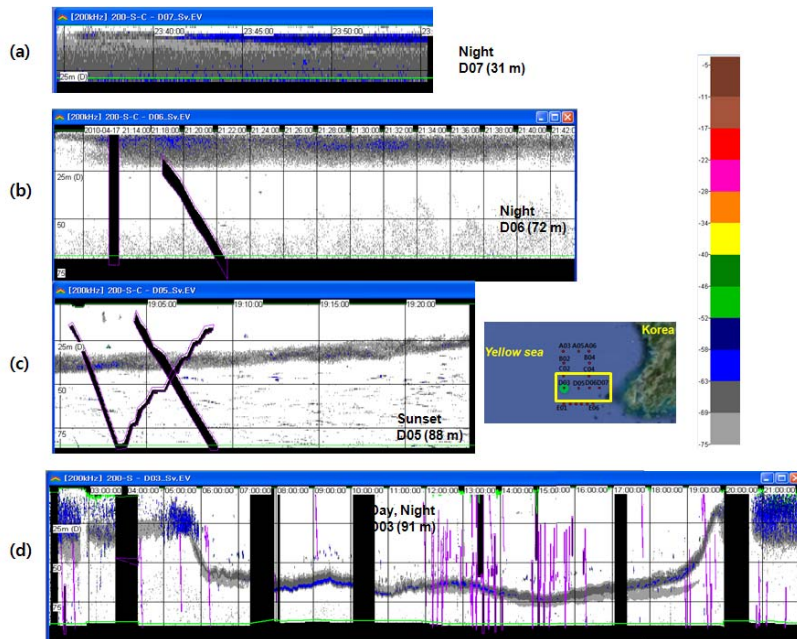


Fig. 10. Sound scattering layer(East-West, South line) at April.

D07 정점은 황해연안 지역의 음향산란 결과로 전층에 어류와 동물플랑크톤의 혼재되어 있는 상태의 음향산란층의 산란강도를 확인 할 수 있었고, D05 정점의 경우 일몰시간에 음향실험이 실시되어, echogram를 통해 산란층의 상승이 확인된다 (Fig. 10). 춘계시기의 황해냉수대 내의 음향산란층은 전층의 수온이 거의 동일하고, 전층에서 주·야 수직이동을 하는 전형적인 이동패턴을 확인됐다.

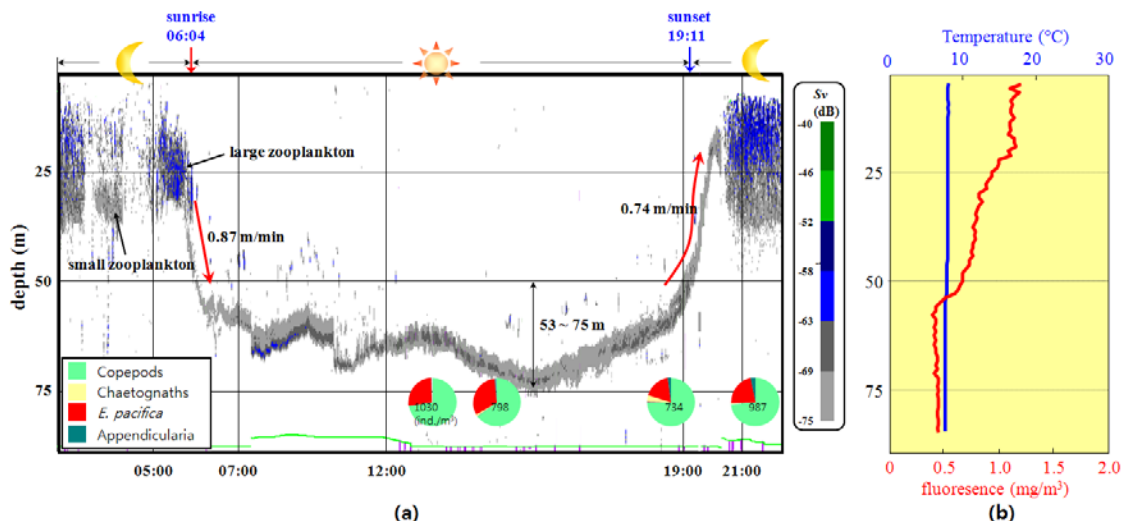


Fig. 11. (a)Acoustical observations of upward and downward migration and (b)Temperature and fluorescence (April 15-16, 2010).

Fig. 11은 춘계 음향실험(4월)시 D03 정점에서 24시간동안 측정한 음향산란층 결과이다. 음향실험결과 분석 시 수심 전층(0~80m)에서 전형적인 동물플랑크톤의 주야이동을 확인되었고, 음향산란강도의 레벨 상에 Fish 와 Nekton의 신호는 확인 되지 않았다. 일몰시간시 수심 35 m 이상에서 큰 사이즈(*E.pacifica*)와 작은 사이즈(copepoda)의 동물 플랑크톤이 혼재하여 넓게 펼쳐져 나타났고, 일출시간시 수심 60~75m 지점에 좁은 범위의 음향신호가 측정되었다. 또한 일몰시간과 달리 좁은 범위 내에 동물 플랑크톤이 분포하는 특성을 확인 할 수 있다. 이때의 음향산란층 하강 속도와 하강속도는 각각 0.87 m/min과 0.74 m/min로 확인 되었다.

(2) 하계 음향조사(2010년 8월) 결과

황해냉수대에서 200 kHz의 춘계시기와 동일한 상용과학어군탐지장비를 이용하여, 2010년 8월 하계음향조사를 실시하였다. 하계음향조사 결과는 춘계 음향 조사 결과와 차이가 확인됐다. 같은 경도의 서쪽 라인의 경우, 일출시간에는 해저면 부근에 음향산란층이 확인되었다(Fig. 12(a)). 반면에 일몰시간의 경우 춘계시기와 달리 음향산란층이 수심 25 m 를 기준으로 두 개로 분리되는 현상을 확인 할 수 있었다(Fig. 12(c),(d)). 이 분리된 수심은 하계에 생성된 수온약층의 수심과 동일하였다. 분리된 두 개의 산란층을 비교 시 상층부의 음향산란층이 하부의 음향산란층

에 비해서 산란강도가 강한 것을 확인 할 수 있었다. 음향강도는 상층 산란층은 어류와 치어, 하층은 동물플랑크톤의 산란강도로 측정 되었다. 하계 조사 시에도 일몰 시간의 경우 음향산란층이 상승하는 패턴도 확인 하였다(Fig. 12(e)).

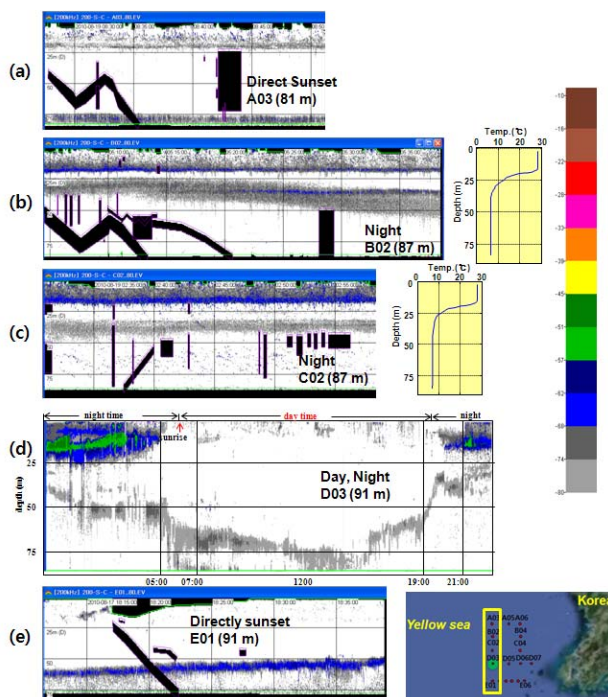


Fig. 12. Sound scattering layer(North-South, West line) at August.

동일한 위도의 북쪽 라인의 정점의 경우에는 음향조사가 모두 일출시간에 이루어졌다. 분석 결과 춘계시기의 결과와 동일하게 해저면 근처에 음향산란층이 좁게 분포하는 것을 확인하였다.

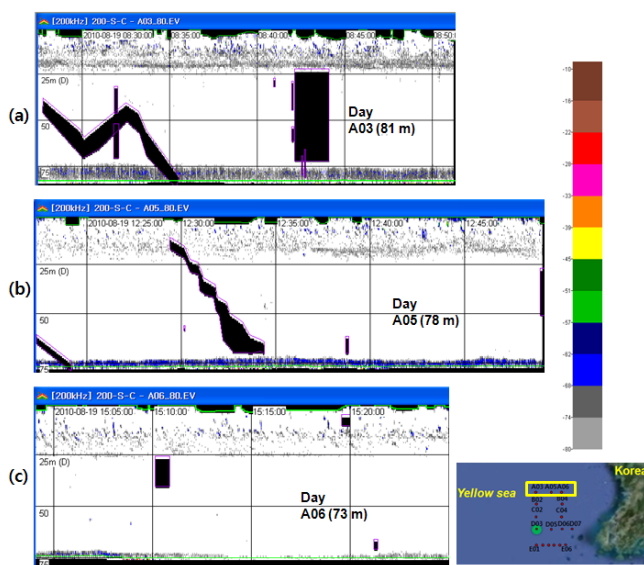


Fig. 13. Sound scattering layer(East-West, North line) at August.

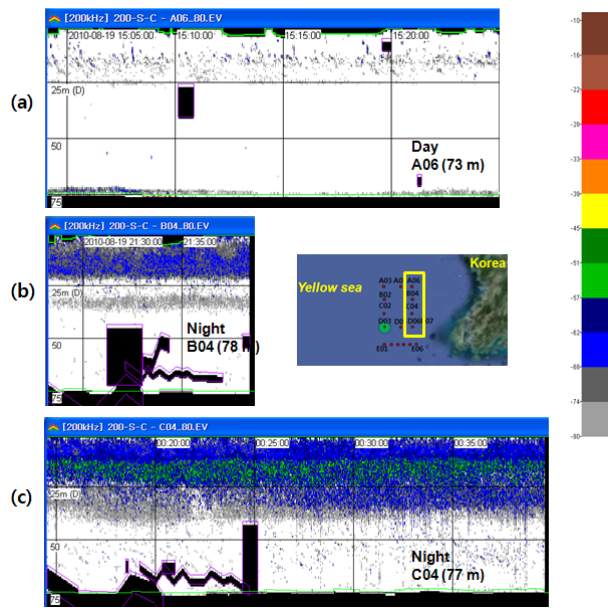


Fig. 14. Sound scattering layer(North–South, East line) at August.

동일한 경도의 서쪽라인의 경우 위도의 변화에 큰 차이가 확인 되었다. 고위도의 A06 정점의 경우 일출시간에 실험이 실시되었고, 음향산란층은 해저면 근처에 좁은 산란층을 보이며, 약 산란층 및 신호가 확인 되었다. 반면에 B04와 C04는 일몰 시간에 음향조사가 실시되어 표층부터 30m 까지 강한 산란층이 넓게 분포 되었다. B04의 경우에는 수온약층을 기준으로 두 개의 산란층이 확인 되었고, C04의 음향 신호는 Fish와 Nekton의 음향신호도 확인 되었다.

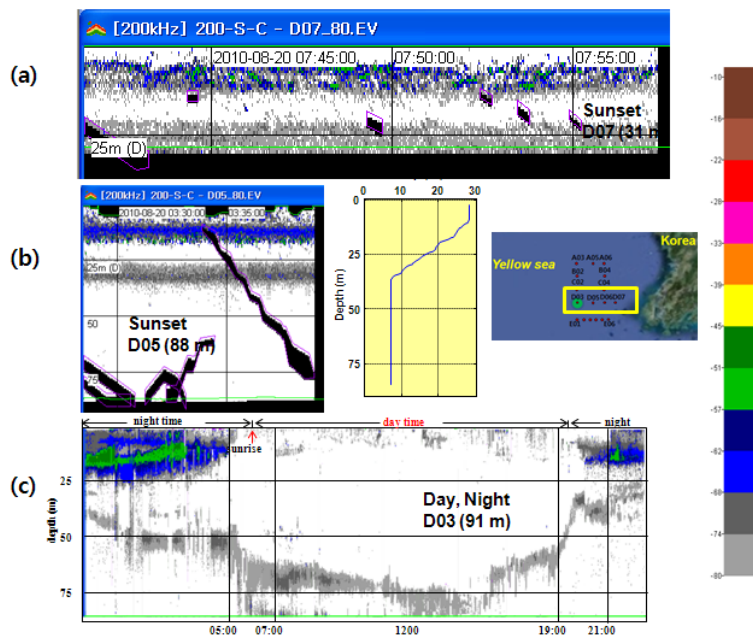


Fig. 15. Sound scattering layer(East–West, South line) at August.

D07 정점은 내륙에 가까운 정점으로 다수의 Fish와 Nekton의 음향신호를 확인할 수 있었고, D05 정점의 경우에는 일출시간의 음향조사로 두 개의 음향산란층으로 분리된 것을 확인할 수 있다. 하계음향 조사 시 황해냉수대의 음향산란층은 일출시간에는 해저면에 좁게 존재하고, 일몰 시기에는 수온약층을 기준으로 분리된 두 개의 음향산란층이 확인 되었다. 분리된 음향산란층을 확인 시 상층 산란층이 하층 산란층에 비해서 산란강도가 높게 측정 되었고, 상층부는 어류와 nekton의 음향신호가 측정되는데 비해 하층부는 동물플랑크톤에 의한 음향세기만이 측정 되었다.

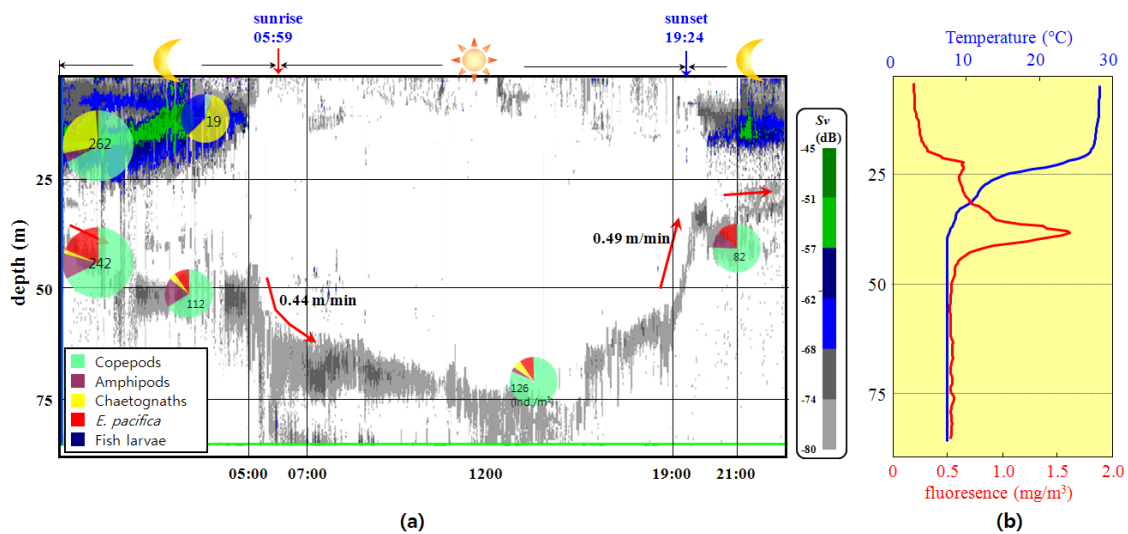


Fig. 16. Acoustical observations of upward and downward migration and (b) Temperature and fluorescence (August 17 - 18, 2010).

하계시기에 춘계시기와 동일한 D03 정점에서 24시간 음향조사를 실시하였고, 동물플랑크톤의 주야 이동 패턴을 확인하였다. 하지만 춘계실험과 달리 실험 수심 전층이 아닌 25~80m 범위 내에서 동물플랑크톤의 주야 이동을 확인되었다. 일몰시간시 표층~25m 범위에서는 소형어류와작은 사이즈의 동물플랑크톤(copepoda, chaetognath, other zooplankton)의 음향신호가 측정 되었고, 수심 25~60 m 범위에서 작은 동물 플랑크톤과 juvenile *E.pacifica*의 음향신호가 혼재되어 측정되었다. 수신 25m를 기준으로 둘로 음향신호가 분리되어 음향산란층이 측정 되었고, 이 수심은 수온약층의 수심과 동일하였다. 일출시간의 경우 수심 60~75 m에서 작은 동물 플랑크톤과 juvenile *E.pacifica*의 음향신호의 강도가 확인 되었다. 음향산란층 하강 속도와 상승속도는 각각 0.44 와 0.49 m/min로 춘계에 비해서 이동속도가 느렸고, 이동 거리 또한 짧았다.

나. 음향 실험 결과 정리

- 황해 저층 냉수 해역에서 계절별 동물플랑크톤의 주야 수직이동패턴을 음향학적 방법으로 확인.

- 계절 별 수온 변화에 따른 수직이동 범위의 차이를 보임. 춘계실험 시 전 수층의 수온이 큰 차이가 없고, 모든 수층에서 동물플랑크톤의 수직이동 확인. 반면에 하계 실험 시 수심 25 m 지점에 수온약층 형성. 일몰 이후 수온약층을 기준으로 위, 아래의 두 개의 음향산란층이 존재함.

- 하계 실험시 일몰시 수온약층 위로 fish/nekton 이나 소형 동물플랑크톤이 존재하고, 수온약층 아래에선 수온에 민감한 *E.pacifica* 종이 상승하지 못하는 것으로 사료됨, 생물자료와 비교 시에도 *E.pacifica* 종의 경우 수심 25 m~해저면의 범위에서만 수직이동 함(Fig. 17).

- 춘계실험과 하계실험 음향 신호 분석 시 Threshold level을 각각 -75 dB, -80 dB로 정함, 여름철에 비해 봄철에 전체적인 동물플랑크톤의 음향강도가 높게 측정됨. 봄철 동물플랑크톤이 여름철 동물플랑크톤에 비해 크기가 크게 측정됨.

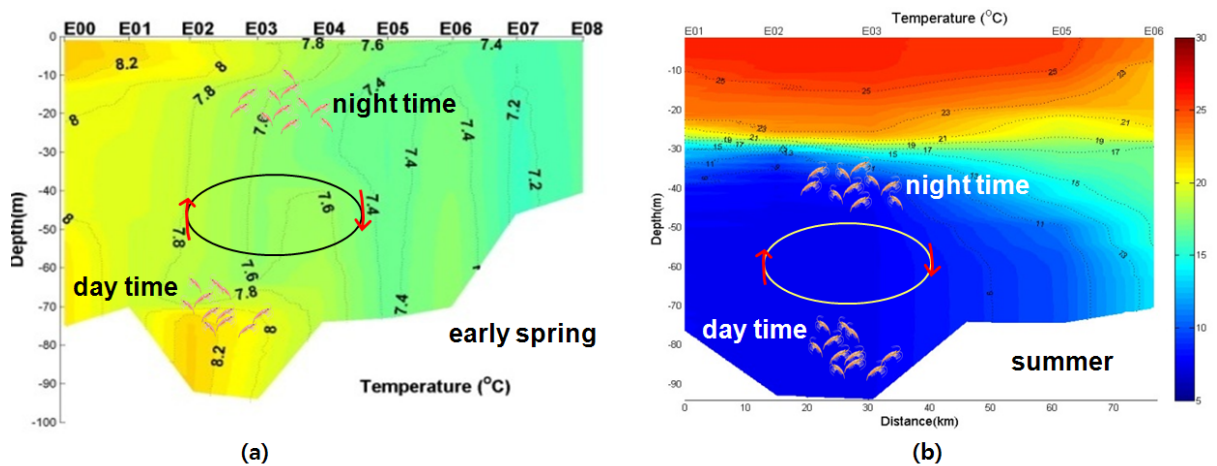


Fig. 17. Suggest diel pattern from *E.pacifica* in the Yellow Sea Bottom Cold Water.

제 5 절 퇴적물 분야

1. 서론

황해는 지난 신생대 제4기 동안의 급격한 고환경 변화, 그리고 주변대륙으로부터 배출되는 많은 양의 담수와 관련하여, 북서태평양의 대륙주변부해 가운데 가장 많이 연구된 해역 중 하나이다. 특히 오늘날에는 높은 생물생산량을 가진 중요한 어업 활동의 장으로서, 최근 십년 동안 인간활동 및 산업화로 인해 연안으로부터 유입되는 오염물질(무기질소, 중금속, 유기 오염 물질 등)의 양이 급격하게 증가함에 따라 발생하는 심각한 환경오염 문제와 관련하여 주목을 받고 있다(Ma et al., 2001; Wu et al., 2001). 따라서 황해 해양환경의 보전과 개선을 위해서는, 과거부터 진행되어 온 황해 해양환경 변화의 과정을 충분히 이해하고, 이를 바탕으로 지금 황해에서 일어나고 있는 환경 현상을 제대로 파악하는 것이 반드시 필요하다. 이와 관련하여, 해양 퇴적물은 과거에서 현재까지의 해양 표층은 물론, 수주에서 일어나는 다양한 생물/화학/지질학적 작용에 대한 정보가 기록되어 있으므로, 황해 저층에 쌓인 퇴적물을 연구함으로써 황해 해양환경 변화의 역사와 현재의 상태를 밝히는데 중요한 정보를 제공할 수 있다.

아시아 대륙과 한반도 사이의 대륙붕에 위치하고 있는 황해의 해저면은 남동쪽으로 갈수록 점점 깊어지며, 남동-북서 방향의 얇은 해구(황해골)를 형성하고 있다(Fig. 1). 여름철에는 이러한 황해골을 중심으로 저층에 차가운 수괴(황해냉수대)가 고립된 형태로 관찰되는데, 이는 겨울철에 형성된 냉수가 다음 여름까지 저층에 남아서 표층 해수에 비하여 상대적으로 낮은 수온을 갖게 되어 일어나는 현상이다.

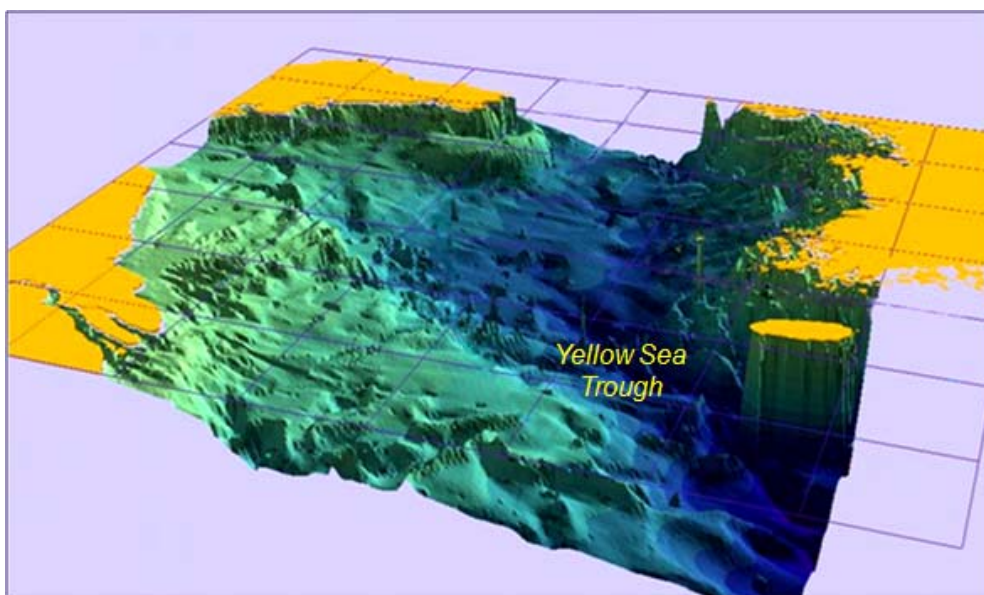


Figure 1. 황해대륙붕의 지형도

황해저층냉수대가 위치한 중앙부에는 커다란 니질퇴적층(황해중앙니질대, Central Yellow Sea Mud, CYSM)이 발달해 있다(Fig. 2). 황해중앙니질대 퇴적층은 황해난류와 황해한류가 만나 와류가 형성되면서 발생하는 “upwelling/downwelling” processes에 의해 주변 대륙으로부터 세립한 니질 퇴적물이 이동하여 황해의 중앙 해저에 퇴적되어 형성된 것으로 해석된다(Shi et al., 2003). 따라서 황해중앙니질대 퇴적 메커니즘을 고려할 때, 황해저층냉수대 및 황해중앙니질대 퇴적물의 형성과 발달은 황해의 물리적 해양환경(특히 해류순환과 조석 시스템)과 밀접한 상관관계를 가지고 있는 것으로 추정된다. 한편, 이전에 수행된 연구에 따르면, 이러한 황해중앙니질대 퇴적물에서의 외편모조류 시스트 산출량이 매우 높다고 보고되었다(Cho and Matsuoka, 2001). 외편모조류 시스트는 해양 퇴적물에 존재하는 미고생물 군집의 주요 구성원으로, 현재와 과거의 수질 환경 변화와 특성을 이해하는데 중요한 정보를 제공한다. 예를 들어, 유영세포 단계에서는 동정하기 어려운 중, 해양에서 드물게 존재하는 중, 단기간 동안 수중에 존재하기 때문에 해수시료에서는 잘 발견되지 않는 중 등을 퇴적물 속의 시스트를 조사함으로써 밝혀낼 수 있다(Nehring, 1997). 최근에는 외편모조류 시스트 군집의 변화를 분석함으로써, 부영양화나 기후변화 등의 환경변화를 유추하는 연구가 활발하게 진행 중이다. 그럼에도 불구하고 황해의 경우, 외편모조류 시스트 연구는 주로 연안환경에 국한되어 있으며(e.g. Qi et al, 1996; Matsuoka, 1999, Shin et al., 2007), 외양에서의 외편모조류 시스트 분포 연구는 매우 미흡하다(Kim et al., 1995; Cho and Matsuoka, 2001). Cho and Matsuoka (2001)에 따르면, 황해 표층 퇴적물의 외편모조류 시스트는 36° N 해역에서 가장 높은 산출량을 보이며, 우점종은 *Spiniferites bulloideus*와 *Alexandrium* 종이다. 하지만, 이들 시스트가 수주 내에서 생산되어 저층으로 바로 퇴적된 현지성(autochthonous)인지, 아니면 영양염이 풍부한 인근 연안에서 생산되어 이동되어 온 타지성(allochthonous)인지에 대한 이해는 부족하다. 특히 PSP(Paralytic Shellfish Poisoning)을 일으키는 원인으로 알려진 *Alexandrium* 외편모조류의 시스트가 황해 중앙역에 집적되어있다고 보고된 바 있으나(Kim et al., 1995; Cho, 2000), 그 집적 기작이나 주변 환경에 미치는 영향에 대해서는 아직까지 조사되지 않았다.

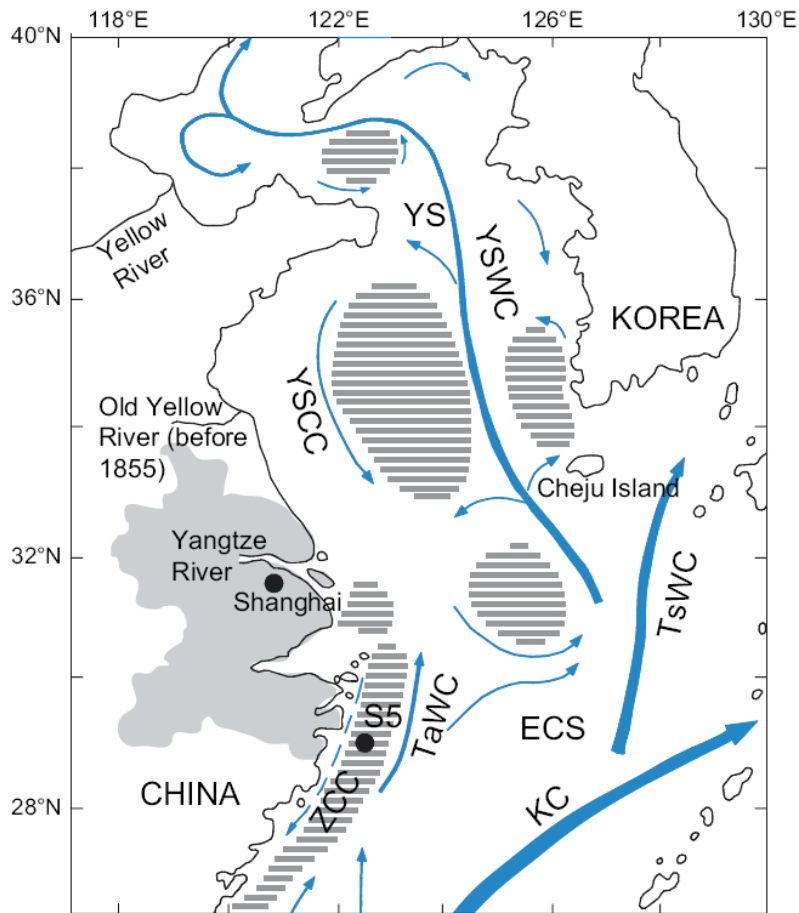


Figure 2. 황해의 해류 시스템과 주요 니질대 형성 위치(Hao et al., 2008): ECS: East China Sea, YS: Yellow Sea, KC: Kuroshio Current, TaWC: Taiwan Warm Current, TsWC: Tsushima Warm Current.

본 연구는 황해저층냉수대 해역에 분포하는 니질대 퇴적물의 미고생물(와편모조류 시스트, 유공충) 군집에 대한 시/공간적 변화를 분석함으로써, 황해저층냉수대 해역의 생태학적 특성을 알아보기 위한 목적으로 수행되었다. 특히 황해 연안의 유독성 적조 원인종인 *Alexandrium* 종의 황해 대륙붕에서의 분포를 파악함으로써, 황해중앙 니질대 퇴적물이 *Alexandrium* 시스트의 seed bed로서의 가능성을 알아보고자 한다. 또한, 황해저층냉수대 해역에서 채집된 코어 퇴적물의 퇴적학적 및 지화학적 특성을 분석함으로써, 과거 황해저층냉수대의 고환경적 특성 및 발달 과정을 밝히고, 황해 해양환경의 향후 변동을 이해하는데 중요한 자료를 제공하고자 한다.

2. 연구방법

본 연구를 위해 황해에서 44개의 표층 퇴적물 시료를 확보하였으며, 본 연구사업

의 하계조사 시 황해중앙니질대 해역에서 2개의 박스 코어 시료(길이 약 50cm)와 타 연구사업을 통해 황해(CYSM)와 북동중국해 니질대(SWCIM) 퇴적체로부터 9개의 코어 퇴적물 시료(길이 약 3-5m)를 확보하였다. 2차 연도 연구를 통해 44개의 표층 퇴적물 시료와 2개 주상시추 코어 퇴적물에 대한 미고생물 군집이 분석되었으며, 2개의 주상시추 코어 퇴적물에 대한 저서유공충 군집 및 안정동위원소비 분석을 수행하였다.

2.1. 표층 및 코어 퇴적물의 미고생물 분석

가. 외편모조류 시스트 분석

표층 퇴적물 시료로부터 부시료를 취하여 Mudie(1982)의 방법에 따라 다음과 같이 전처리를 하였다. 먼저 건조되지 않은 퇴적물의 무게를 측정한 다음, 하루 동안 60° C 온도의 오븐에서 건조시켜 건조된 퇴적물 무게를 측정하였다. 시료 무게 당 외편모조류 시스트 농도를 계산하기 위해 건조된 퇴적물 시료에 *Lycopodium clavatum* tablet을 첨가한 후, 탄산질(calcium carbonate)을 제거하기 위해 10% 염산(HCl)으로 처리하였다. 탄산물질이 녹아있는 시료를 이온교환수로 세척하여 중성화시킨 다음, 규산질을 제거하기 위해 40% 불산(HF)를 넣어 24시간 동안 처리하였다. 규산질이 녹아있는 시료를 다시 이온교환수로 세척하여 중성화시킨 다음, 10 μ m 크기의 그물체(mesh sieve)로 걸러내었다. 이온교환수를 이용하여 체에 남아 있는 입자를 플라스틱 튜브에 옮겨 담은 후, 2~3 방울의 페놀을 첨가하였다. 각 현미경 시료를 잘 섞이게 한 다음, 일부를 취하여 glycerine jelly와 paraffin wax를 이용하여 현미경 슬라이드를 만들어 현미경으로 분석하였다. Nikon(Eclipse 55i) 현미경을 이용하여 250과 400배율 하에서 각 시료 당 가능한 200개 이상의 외편모조류 시스트 개체수를 동정 및 분석하였으며, 시료 당 외편모조류 시스트 농도는 퇴적물 1g 중 시스트 수(cysts/g)로 나타내었다.

나. 저서유공충 분석

유공충 군집 분석을 위하여, 2개의 피스톤 코어(06-1, 06-5)에서 10~20cm 간격으로 시료를 채취하였다. 각 시료는 건조중량을 측정한 다음, 63 μ m의 체를 이용하여 수선한 다음 24시간 이상 건조시킨 후 분리기(microsplitter)를 이용하여 적당한 양으로 분리하였다.

각 시료별로 저서성 유공충 약 200개체 이상 추출하였으며, 동시에 부유성 유공충은 개체수를 측정하였으며, 이를 근거로 부유성 유공충 산출비율(P/T ratio)을 산출하였다. 유공충의 종조성 및 군집특성을 조사하기 위해 각 시료별로 산출된 전체 개체수에 대한 각 종의 산출비율을 계산하였으며, 부유성 유공충의 산출비율

(P/T ratio; number of planktonic individuals/number of total population, %) 과 저서성 유공충의 각(test) 성분 및 구조별 산출비율(calcareous-hyaline / calcareous-porcelaneous / agglutinated test, %)을 측정하였다. 각 시료별로 산출된 저서성 유공충 빈도 분포를 근거로 종다양도(species diversity)를 측정하였다. 가장 간단한 종다양도 측정방법(simple diversity)은 산출되는 종의 수(S)를 측정하는 것이나, 시료 중에 함유된 종들은 그 존재비가 다르고 또한 개체수가 많아짐에 따라 종의 수도 증가하는 경향이 있다(Gibson and Buzas, 1973). 따라서 종 다양도를 논할 때는 종의 수와 상대적인 존재량까지 고려해야 한다. 종 다양도를 측정하기 위해 여러 가지 공식 및 지수들이 제안되어 왔으며(Buzas, 1979), 그 중에서 가장 많이 이용되고 있는 것이 Shannon-Wiener information function, H(S)이다(Gibson and Buzas, 1973; Hazel, 1975; Sen Gupta and Kilbourne, 1974; Murray, 1976; Hasegawa, 1979; Akimoto, 1990).

$$H(S) = - \sum_{i=1}^S P_i \ln P_i$$

H(S)가 종 다양도이며, S는 종의 수, P_i 는 i 번째 종의 존재비율이다. 모든 개체가 같은 종에 속할 경우 최소값 0을 가지며, 모든 개체가 다른 종으로 구성될 경우 종 다양도 H(S)는 $\ln S$ 로 최대가 된다. 개체수가 작은 종에 의해 영향을 비교적 덜 받으므로 우연히 존재하게 된 소량의 종에 의해서 지수가 크게 바뀌지 않는다는 장점이 있다. 그러나 작은 수의 종이 거의 균등하게 배분되는 집단과 많은 종이 불균등하게 배분되는 집단이 거의 비슷한 H(S) 값을 가지게 된다. 따라서 종 다양도를 측정할 경우 균형도(equitability) E를 함께 측정한다. 모든 종이 그 수에 관계없이 같은 비율로 존재한다면 그 값은 1이 된다.

$$E = \frac{e^{-H(S)}}{S}$$

2.2. 코어 퇴적물의 탄소 및 산소 안정동위원소비 분석

코어 퇴적물이 형성될 당시의 주변 해수의 특성(수온, 염분)을 규명하기 위하여 코어 퇴적물에서 산출되는 유공충 각을 이용하여 산소 및 탄소 안정동위원소비를 분석하였다. 각 퇴적물 시료에서 150 μm 크기 이상의 *Ammonia ketienziensis angulata* 및 *A. beccarii* 각을 추출하였으며, 분석은 미국 Michigan 대학의 Stable Isotope Laboratory에 의뢰하였다. 산소 동위원소비 값을 이용한 고염도(paleo-salinity)의 추정치 계산은 다음의 식을 이용하였다.

$$\delta^{18}\text{O}_{\text{water}} (\text{‰ vs SMOW}) = -8.41 + 0.44 \text{ CL } (\text{‰}) \text{ (Zhang et al., 1990)}$$

$$\delta^{18}\text{O} (\text{vs PDB}) = \delta^{18}\text{O} (\text{vs SMOW}) - 0.27 \text{ (Hut, 1987)}$$

또한, 산소동위원소비 값을 이용한 고수온(paleo-temperature)의 추정치 계산은 다음의 식을 이용하였다.

$$\delta^{18}\text{O}_{\text{water}} (\text{‰ vs SMOW}) = 0.32 \times \text{Salinity} - 10.96 \text{ (정규귀 외, 2005)}$$

$$\delta^{18}\text{O} (\text{vs PDB}) = \delta^{18}\text{O} (\text{vs SMOW}) - 0.27 \text{ (Hut, 1987)}$$

$$T (\text{°C}) = 16.5 - 4.8 (\delta^{18}\text{O}_{\text{calcite}} - \delta^{18}\text{O}_{\text{water}}) \text{ (Bemis et al., 1998)}$$

3. 연구내용 및 결과

3.1. 황해표층 퇴적물의 외편모조류 시스트 군집 분포

가. 외편모조류 시스트의 군집구성

황해저층냉수대 해역 퇴적물의 외편모조류 시스트 군집 특징을 알아보기 위해, 황해중앙 해역의 저층 퇴적물에서 채집된 총 44개 표층 퇴적물을 분석하였다(Fig. 3). 분석 결과, 외편모조류 시스트는 gonyaulacoid 그룹 6속 15종, protoperidinioid 그룹 7속 8종, gymnodinioid 그룹 1속 2종, 그리고 tuberculodinioid 그룹 1속 1종으로, 총 15속 26종이 동정되었다. Gonyaulacoid, tuberculodinioid에 속하는 종은 독립영양종이며, protoperidinioid와 gymnodinioid 그룹에 속하는 종은 중속영양종이다. 본 조사에서는 주로 gonyaulacoid와 protoperidinioid 그룹이 모든 정점에서 우세하는 양상을 보였다(Fig. 4).

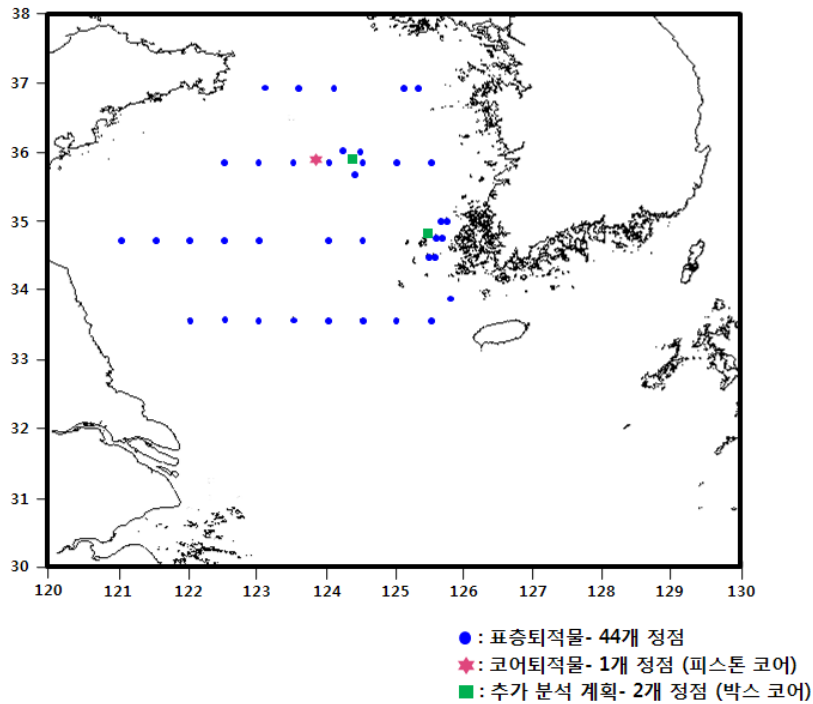


Figure 3. 황해 표층 및 코어 퇴적물 시료의 채집 정점

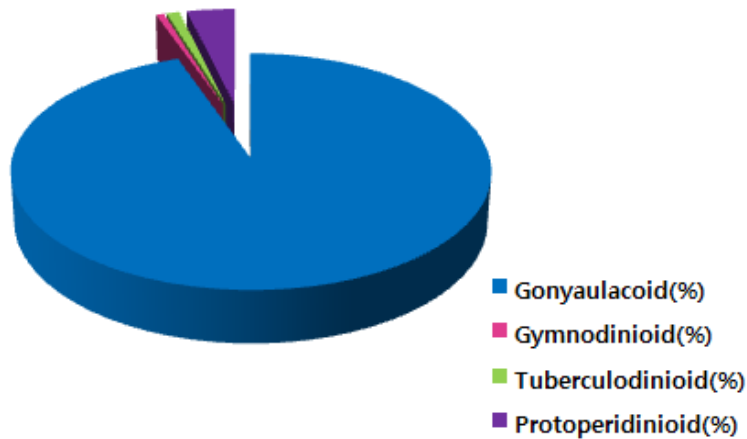


Figure 4. 황해표층 퇴적물의 주요 외편모조류 시스트 그룹의 상대적 산출빈도

한편, 두 주요 외편모조류 시스트 그룹의 상대적 산출비율을 비교하였을 때, gonyaulacoid 그룹의 조사해역의 동편에, protoperidinioid 그룹은 서편에 상대적으로 더 높게 분포하는 양상이 관찰되었다(Fig. 5). 전반적으로, gonyaulacoid 그룹에 속하는 *Spiniferites*, *Operculodinium*, *Alexandrium* 종이 거의 모든 정점에서 우점하였다(Fig. 6). 특히 *Alexandrium* 시스트의 경우, 연구해역의 북동부에 위치한 조사정점에서 전체 외편모조류 시스트 군집 중 70% 이상의 높은 산출빈도를 보였다. 이와 같은 결과는, Cho and Matsuoka(2001)의 연구에서 gonyaulacoid 그룹에 속하는 *Spiniferites* 종과 *Alexandrium* 종 시스트가 황해

중양의 표층 퇴적물에서 현저하게 우세하는 것과 일치하는 결과이다. 김 등 (2010)에 따르면, 제주도 남쪽 북동중국해의 니질 퇴적물에서도 gonyaulacoid 그룹이 다른 그룹보다 월등히 우세하게 분포하는 동일한 양상을 보인다. 이와 같이, 대륙주변부의 수심이 얇은 해역의 퇴적물에서 외편모조류 시스트 군집이 gonyaulacoid 그룹으로 우점하는 현상은 북대서양 및 북태평양의 연구에서도 보고되고 있으나(Novichkova and Polyakova, 2007; Radi et al., 2007), 그 원 인기작에 대해서는 아직 밝혀진 바가 없다. 이에 따라, 중위도 대륙붕 해역의 퇴적물에서 gonyaulacoid 그룹의 외편모조류 시스트가 우점하는 현상을 이해하기 위한 추가적인 연구가 요구된다.

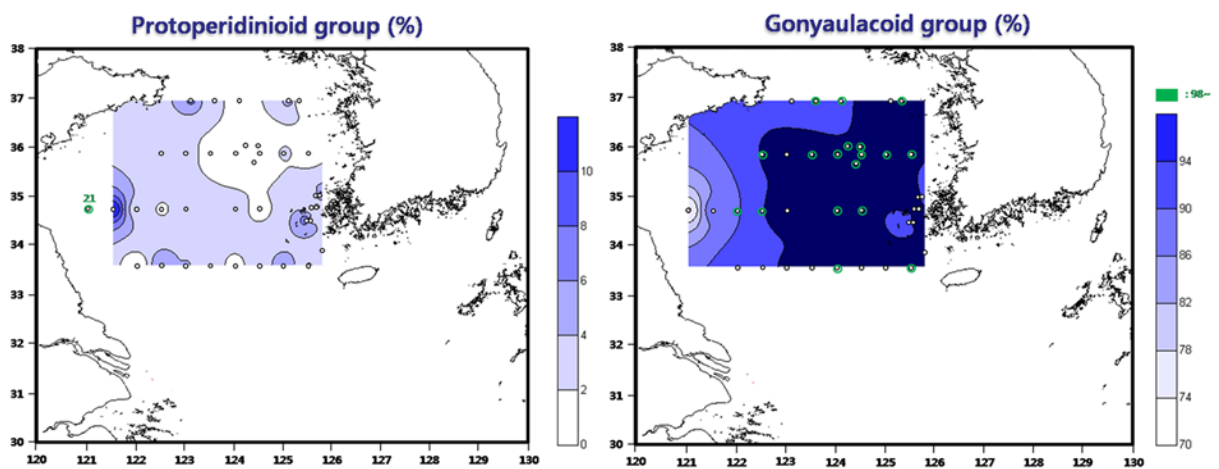


Figure 5. 황해표층 퇴적물의 주요 외편모조류 시스트 그룹의 상대적 산출빈도

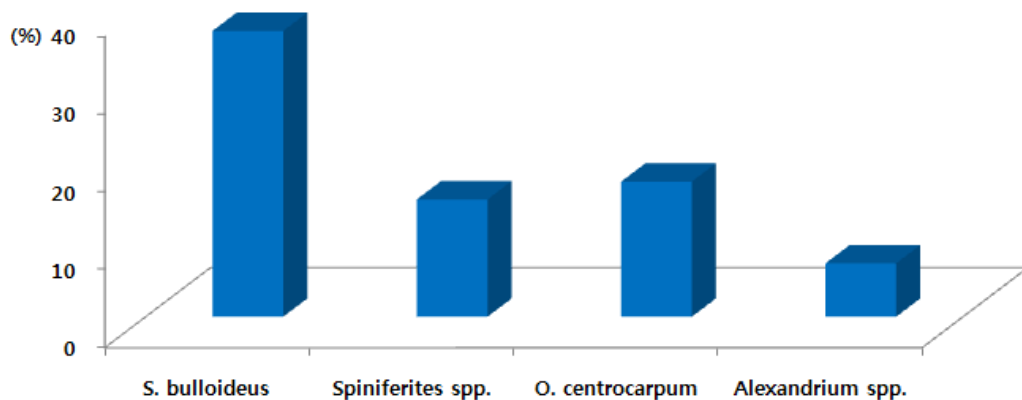


Figure 6. 황해표층 퇴적물에서 우점하는 주요 외편모조류 시스트 종의 상대적 산출빈도

나. 황해저층냉수대 해역과 외편모조류 시스트 분포와의 상관성

황해중양니질대 퇴적물에서 외편모조류 시스트의 농도는 0~48,442 cysts/g의

범위로 조사정점에 따라 높은 변동 폭을 보였으며, 전반적으로 조사해역의 36° N에 해당하는 정점에서 밀집되어 집적된 양상을 나타냈다(Fig. 7). 대표적인 우점종으로, *S. bulloideus*는 0~14,853 cysts/g의 농도로 분포하였다. *Operculodinium centrocarpum*은 0~8542 cysts/g의 범위로, *Alexandrium* 시스트는 0~33,987의 농도로 분포하였다(Fig. 8). 전반적으로, 황해에서 외편모조류 시스트의 농도는 황해중앙해역의 퇴적물에서 높은 값을 나타내었으며, 특히 황해저층냉수대가 형성되는 북서-남동 방향으로 총 외편모조류 시스트 농도 및 주요 외편모조류 시스트 종의 농도가 높게 관찰되는 특징을 보였다(Fig. 7).

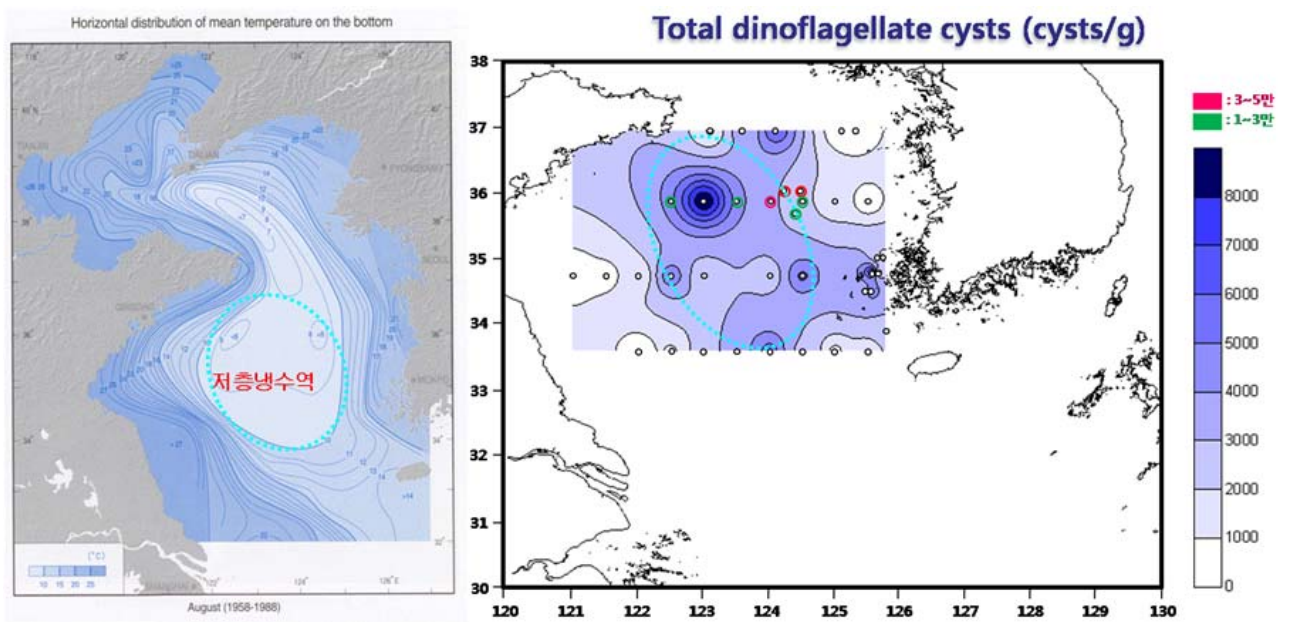


Figure 7. 황해중앙 표층 퇴적물의 외편모조류 시스트 농도 분포

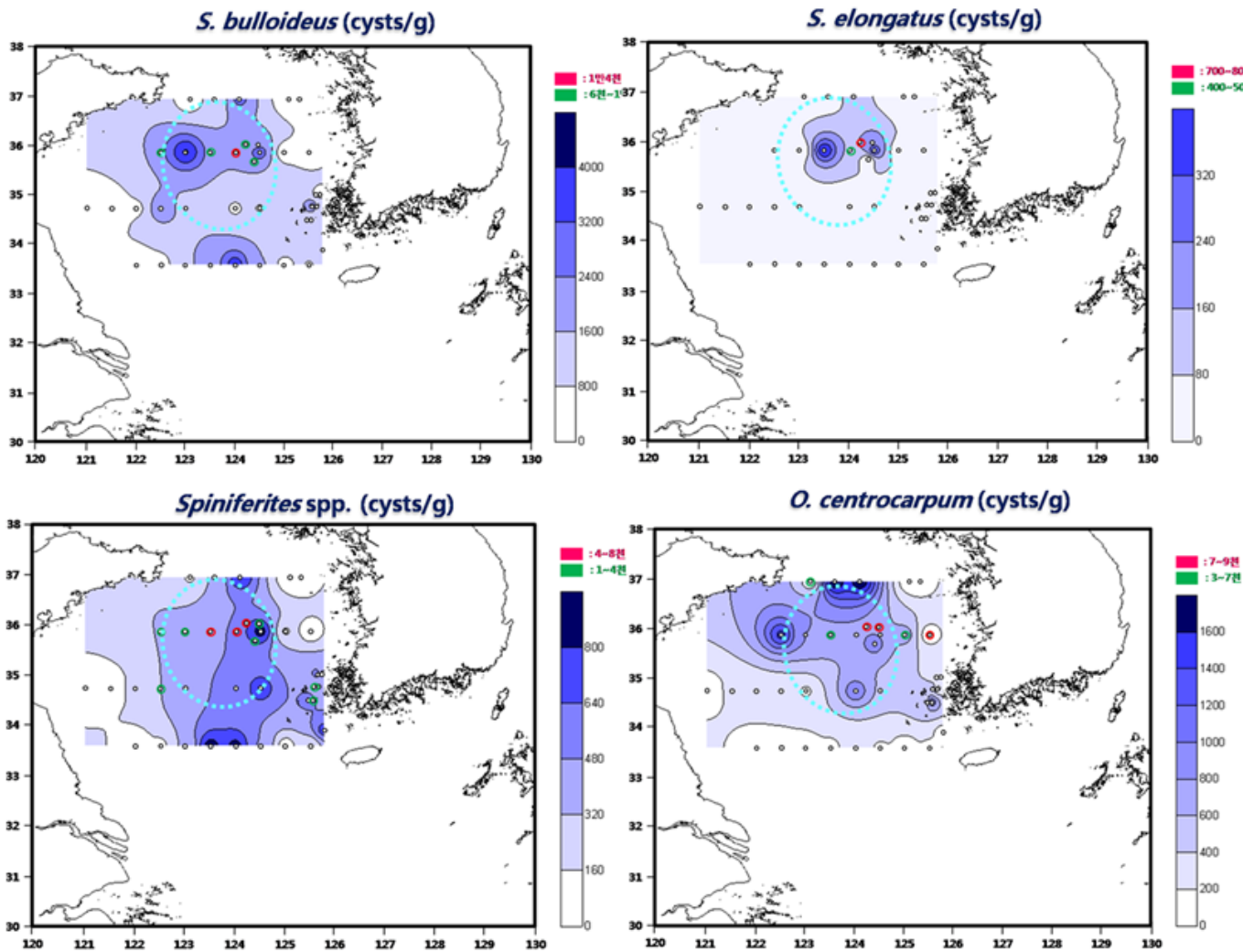


Figure 8. 황해중앙 표층 퇴적물의 주요 외편모조류 시스트 농도 분포

다. 황해저층냉수대 해역 표층 환경의 기초생산성 추정

본 조사에서 현저하게 높은 비율로 산출된 gonyaulacoid 그룹에 속하는 외편모조류는 독립영양종으로, 수주 내 유영생활 기간 동안 광합성 활동을 하는 것으로 알려져 있다. 기존 연구에 따르면, 황해저층냉수대는 성층이 형성되는 봄부터 가을까지 표층과 연안, 저질로부터 영양염을 비롯한 다양한 물질들을 저장/축적하다가, 늦가을과 초봄에 수괴의 혼합이 일어나는 시기에 식물플랑크톤 대증식을 야기한다. 이는 황해저층냉수대가 형성되는 해역은 영양염 상태가 양호하여, 식물플랑크톤이 번식하기에 좋은 환경을 가지고 있기 때문인 것으로 추정된다. 따라서 본 연구에서 황해저층냉수대가 형성된 해역을 따라 저층 퇴적물에서 gonyaulacoid 시스트가 높은 농도를 보이는 것은 이 해역의 표층환경의 기초생산성을 지시하는 것으로 판단된다(Fig. 9). 한편, 외편모조류 시스트는 그 크기가 대부분 30~65 μm 에 해당하여, 퇴적환경 내에서 미세한 실트입자와 수력학

적으로 유사한 거동을 보이는 것으로 알려져 있다(Dale, 1983).그러므로 황해 냉수대 형성 해역과 거의 유사한 위치에 존재하는 황해중양니질대 퇴적물에서 와편모조류 시스트가 상대적으로 높은 산출량을 보이는 데에는, 이 해역에 넓게 분포하는 미세한 니질 입자의 퇴적물의 영향도 함께 받았을 가능성도 함께 고려되어야 한다.

한편, 본 조사에서 황해중양니질대, 특히 36° N 해역에서 높은 산출량을 보인 *Alexandrium* 시스트는 타원형의 투명한 벽에 점막층으로 덮여있는 형태적 특징을 보였다. 이 종은 연안에서 유해성 적조(마비성 패독, paralytic shellfish poisoning)을 유발시키는 종으로 널리 알려져 있다. *Spiniferites*와 함께 황해니질대 퇴적물에서 높은 집적량을 보이는 *Alexandrium* 시스트는, 조사해역의 북동쪽에 위치한 정점에서 가장 높은 농도를 보였으며 전체 와편모조류 시스트 군집에서 약 70%의 산출빈도를 나타내었다. 지금까지 수행된 *Alexandrium* 시스트 연구를 살펴보면, 유해적조 문제와 관련하여 주로 연안 해역을 중심으로 진행되어 왔다. White and Lewis(1982)에 따르면, 캐나다의 Fundy 만에서 2000~8000 cysts/cm³의 *Alexandrium* 시스트가 관찰되었으며, Lee and Matsuoka(1994)는 대한해협에 존재하는 *Alexandrium* 시스트의 농도 범위는 16~23cysts/cm³라고 보고하였다. 한국 남해의 진해만 퇴적물의 경우, *Alexandrium* 시스트의 최고 농도는 1240 cysts/cm³이라고 보고되었다. 비록 대륙주변부 해양 퇴적물을 대상으로 수행된 *Alexandrium* 시스트의 분포 조사가 전세계적으로 볼 때 매우 미흡함에도 불구하고, 황해중양니질대 퇴적물에서의 *Alexandrium* 시스트의 산출량이 매우 높다는 점은 특징적인 결과이다. 이와 관련하여, Kim et al.(1995)과 Cho and Matsuoka(2001)에서도 황해중양의 퇴적물에서 많은 양의 *Alexandrium* 시스트가 관찰됨을 보고한 바 있다.

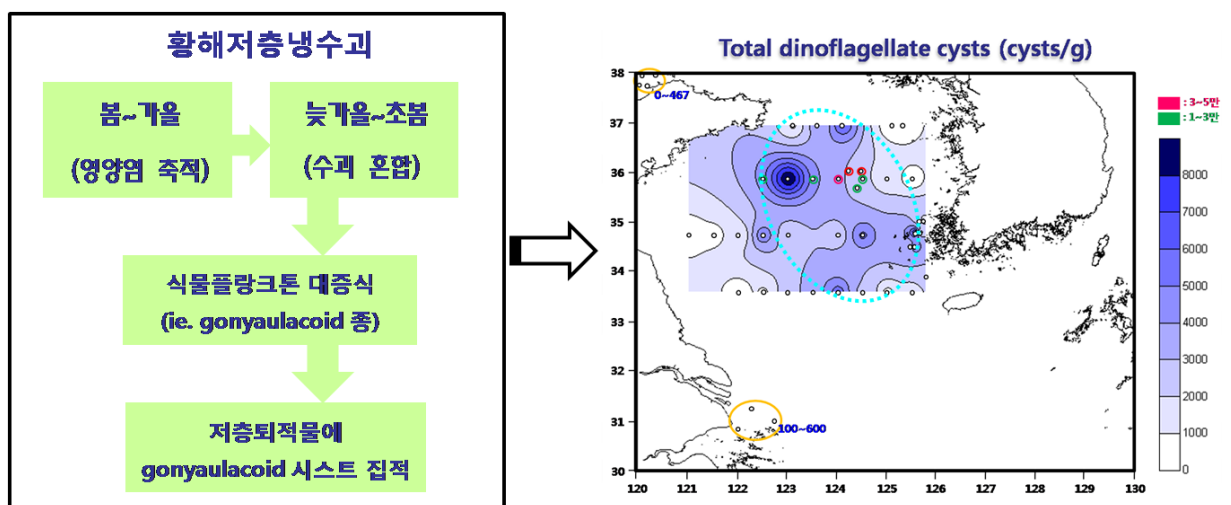


Figure 9. 황해저층냉수대 해역의 기초생산성과 와편모조류 시스트 농도와와의 상관관계

3.2. 황해중앙니질대 코어 퇴적물(06-1, 06-5)의 미고생물 군집 및 화학적 특성

가. 코어 퇴적물의 퇴적학적 특성

코어 06-1: 총길이 약 390cm이며, 암록회색(dark greenish gray, 5G 4/1)을 띠는 니질 퇴적물이다. 전반적으로 물리적 퇴적구조의 발달이 없는 괴상의 퇴적상(massive facies)을 보이거나, 코어 깊이 280cm 이하 하부 구간에서는 부분적으로 생물활동에 의해 교란된 엽층리(parallel laminations) 구조가 관찰된다. 코어의 최상부에서 270cm까지의 퇴적물의 평균입도(mean grain size)는 8.1~9.0 phi로, 모래의 함량은 5% 미만인 반면 실트와 점토의 함량은 각각 24~39%와 56~74% 범위이다. 그러나 270cm의 하부 구간에서는 범위의입도 조직 특성이 크게 변화하여, 평균입도가 5~7phi 범위이며, 모래의 함량은 9.3~14.9%, 실트와 점토의 함량은 각각 56~69%, 17~34% 범위로 모래와 실트의 함량은 증가한 반면 세립한 니질 퇴적물의 함량은 크게 감소하였다(Fig. 12). 따라서 본 코어는 290cm 깊이를 기준으로 하부의 실트 퇴적물에서 상부의 점토 퇴적물로 급격한 입도 변화를 보인다. 이러한 퇴적물 특성의 변화는 황해의 해류시스템의 변화와 직접적으로 관련되어 나타나며, 290cm 깊이의 상부 퇴적물이 황해중앙니질대 퇴적물로 정의된다. 퇴적물의 함수율은 290cm 깊이의 상부 점토 퇴적물은 41~58%, 하부 실트 퇴적물은 27~40% 범위이며, 전반적으로 입도의 변화에 따라 하부에서 상부로 갈수록 증가하는 경향을 보인다(Fig. 10).

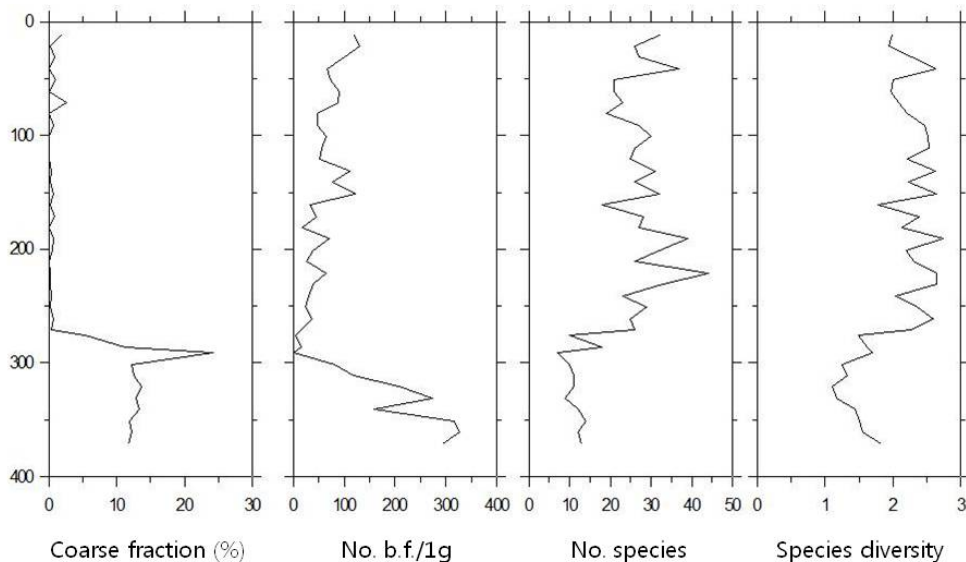


Figure 10. 코어 06-1의 입도 및 저서유공충 군집 조성 변화

코어 06-5: 총길이가 395cm이며, 전반적으로 암록회색(dark greenish gray,

5G 4/1)을 띈다. 퇴적물은 뚜렷한 물리적 퇴적구조가 관찰되지 않는다. 평균입도는 7.1~8.9 phi의 범위이며, 전 깊이에 걸쳐 괴상의 니질 퇴적층으로 구성되고 상부로 갈수록 세립해지는 경향을 보인다. 모래 함량은 1~16%, 실트와 점토의 함량은 각각 24~44%, 44~72% 이다. 퇴적물의 함수율은 38~53% 범위이며, 하부에서 상부로 갈수록 증가한다(Fig. 11).

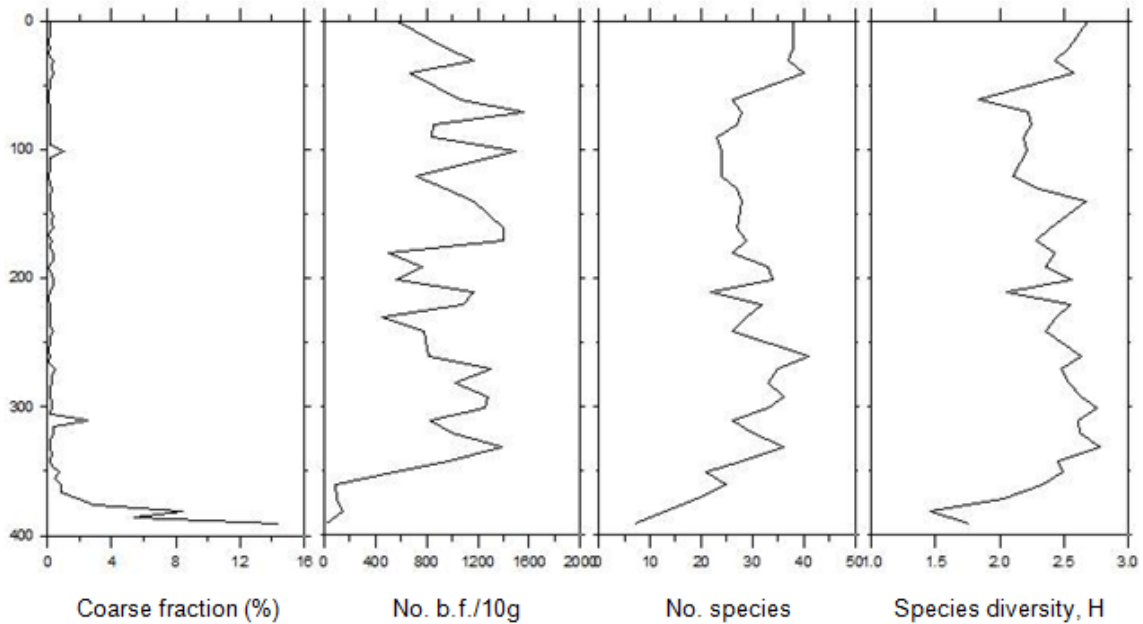


Figure 11. 코어 06-5의 입도 및 저서유공충 군집 조성 변화

나. 코어 퇴적물의 저서 유공충 군집 특성

황해중양니질대(CYSM)에서 채취한 2개(06-1, 06-5)의 피스톤 코어 퇴적물에서 유공충 군집 특성을 분석하였다.

코어 06-1 퇴적물: 코어 퇴적물은 깊이 280cm를 기준으로 하부의 실트질 퇴적물에서 상부의 점토질 퇴적물로 급격한 입도의 변화를 보이며, 이에 따라 유공충 산출특성도 변화를 보인다. 퇴적물 입도가 세립화되면서 건조시료 1g 당 산출되는 저서 유공충의 개체수는 급격히 감소하며, 산출되는 종의 수와 종다양도는 증가한다(Fig. 12). 코어 깊이 290cm 하부 퇴적물에서의 주요 산출종은 *Elphidium clavatum*, *Ammonia beccarii*, *Buccella frigida*이며, *Angulogerina* sp.와 *Ammonia* sp. B가 특징적으로 수반된다. 코어 깊이 290cm 상부의 퇴적물에서는 *Ammonia ketienziensis angulata*, *Melonis barleeanus*가 가장 우세하게 산출되며, *Bulimina marginata*, *Bulimina tenuata*, *Pseudoparella naraensis*가 수반된다. *Hanzawaia nipponica*는 깊이 170cm 상부에서 주요종으로 산출되며, *E.*

*clavatum*이 100cm 상부에서 다시 주요종으로 산출되는 것이 특징적이다(Fig 12).

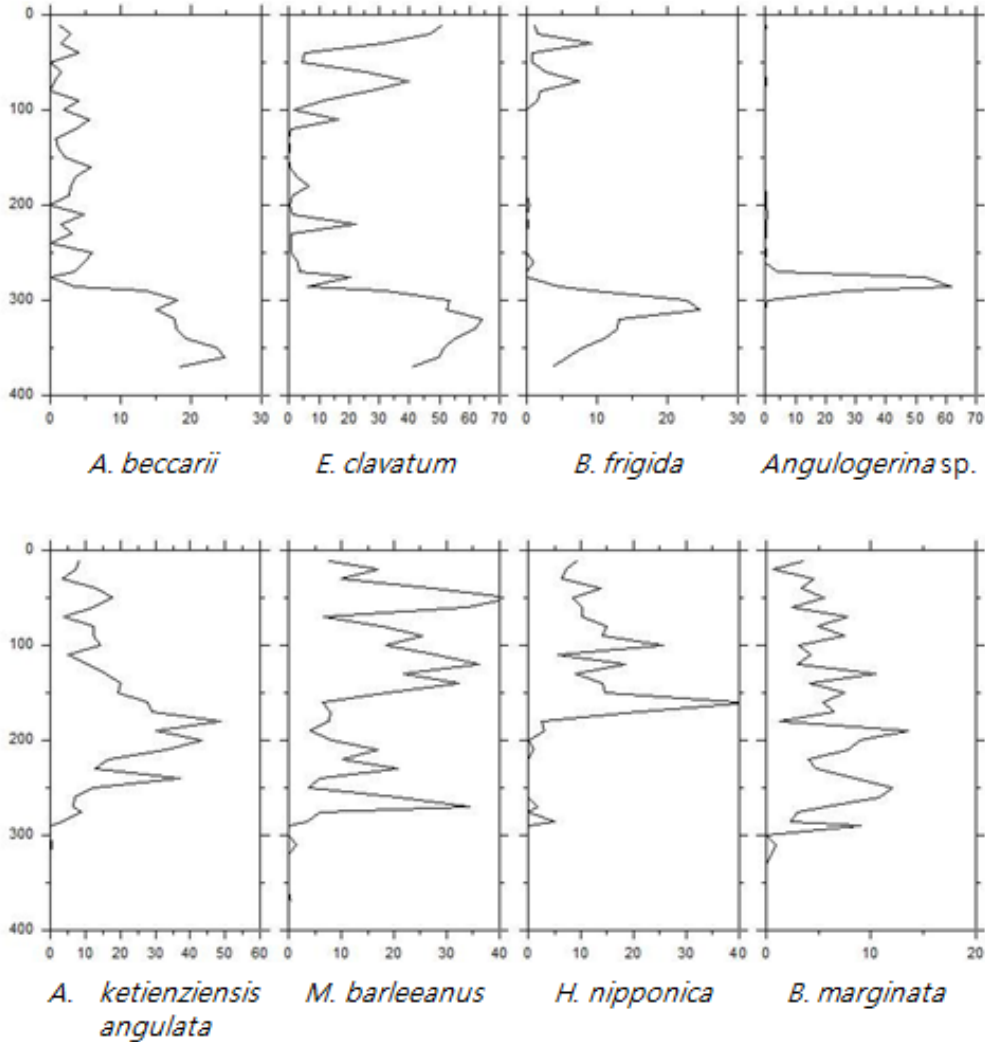


Figure 12. 코어 06-1의 주요 저서유공충 군집의 산출빈도(%) 변화

코어 06-5 퇴적물: 코어 퇴적물은 깊이 380cm를 기준으로 하부의 실트질 퇴적물에서 상부의 점토질 퇴적물로 급격한 입도의 변화를 보인다. 유공충 산출특성은 약 350cm 깊이를 기준으로 하부의 퇴적물에서는 유공충의 산출량이 매우 적고 산출되는 종의 수 및 종다양도에서도 상부와 매우 큰 차이를 보인다(Fig. 13). 코어 깊이 350cm 하부 퇴적물에서의 주요 산출종은 *Angulogerina* sp.와 *Bulimina tenuata*가 주요종이며, *Bulimina marginata*, *Elphidium clavatum*, *Buccella frigida*, *Melonis barleeanus*가 수반된다. 350cm 상부의 퇴적물에서는 *Melonis barleeanus*와 *Ammonia ketienziensis angulata*가 가장 우세하게 산출되며, *Pseudoparella naraensis*, *Bulimina marginata*, *Bulimina tenuata*, *Hanzawaia*

nipponica 등이 수반된다(Fig. 13).

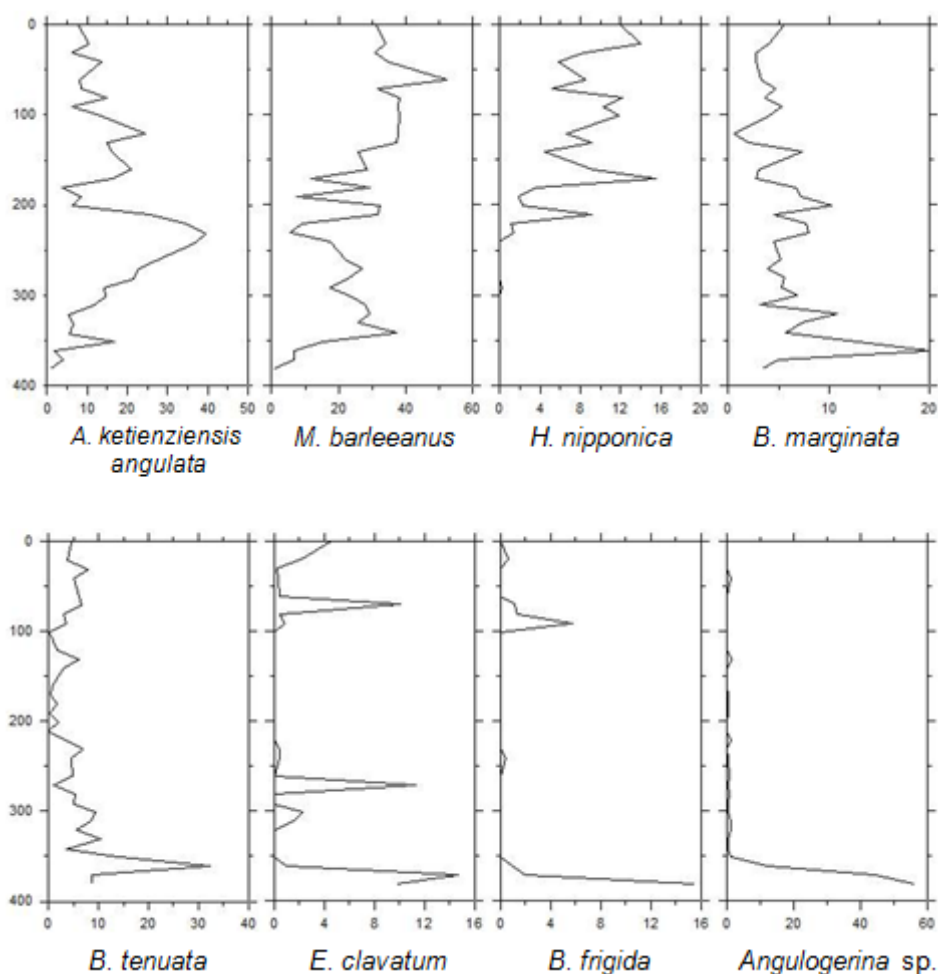


Figure 13. 코어 06-5의 주요 저서유공충 군집의 산출빈도(%) 변화

코어 퇴적물에서 산출되는 유공충의 군집 특성 분석 결과, 06-1 및 06-5 코어 퇴적물은 코어의 하부로부터 다음과 같이 5개의 생물상(biofacies)으로 구분되었다. 각 생물상의 형성 시기는 Kim and Kennett (1998)와 Kim and Kucera(2000)의 생물상과의 대비를 통하여 추정하였다(Fig. 14, 15).

생물상 E: 06-5 코어에서는 인지되지 않으며, 06-1 코어 최하부의 퇴적구간으로 저서 유공충의 산출량은 가장 많으나, 산출되는 종의 수와 종다양도는 가장 낮은 생물상이다. *E. clavatum*과 *A. beccarii*, *B. frigida*가 가장 우세하게 산출되는 것으로 볼 때, 과거 해수면이 낮았을 시기에 연안수/담수의 영향을 많이 받는 조건대/하구의 환경에서 형성된 것으로 해석된다. Kim and Kucera(2000)의 생물상 D와 같은 시기로 약 10~7.5 ka에 형성된 것으로 추론된다.

생물상 D: 유공충의 산출량이 가장 낮으며, 종수 및 종다양도 역시 매우 낮다. 특징적으로 *Angulogerina* sp.가 06-1 코어에서는 50%가 이상, 그리고 06-5 코어에서는 30% 이상의 산출량을 보인다. Kim and Kucera (2000)의 생물상 C와 대비되며, 퇴적시기는 약 7.5~6.6 ka이다. Kim and Kucera(2000)는 *Angulogerina* sp. (*A. semitrigona*)를 유기물의 공급이 많은 저산소의 환경에서 번성한 기회종으로 해석하였다.

생물상 C: 저서 유공충의 산출량은 많지 않으나 종의 수와 종다양도가 가장 높은 생물상으로 환경이 변화하는 전이대의 특성을 보인다. 두 코어 모두에서 *A. ketienziensis angulata*와 *M. barleeanus*가 급격히 증가하고 그 외 수반되는 *B. tenuata*, *Fissurina* spp., *Bolivina* spp. 등으로 볼 때, 수심이 증가하였으며 수온이 낮아져서 황해저층냉수대가 형성되기 시작하였음을 알 수 있다. Kim and Kucera(2000)의 생물상 B와 대비되며, 약 6.6~4.5 ka의 시기이다.

생물상 B: 저서 유공충 산출량이 증가하며, *H. nipponica*가 우세종으로 산출되기 시작한다. 이전 시기에 형성되기 시작한 황해저층냉수가 이 시기에 연중 수온이나 염분의 변화가 적은 안정된 상태를 유지하였을 것으로 해석된다. 저서 유공충 군집 역시 현재와 거의 같은 구성을 보인다. Kim and Kucera(2000)의 생물상 A에 대비되며, 시기는 약 4.5~1.5 ka이다.

생물상 A: 코어 06-1에서만 인지되며, 06-5 코어에서는 생물상 A와 B의 구분이 명확하지 않다. 약 1.5 ka 이후에 형성된 생물상으로 생물상 B의 우세종 외에, 특징적으로 *E. clavatum*이 다시 증가하며, 소량이기는 하지만 *B. frigida* 역시 증가하는 양상을 보인다. 이 두 종은 대표적인 냉수종(cold-water species)으로서 이 시기에 황해저층냉수대에 수온의 변화가 있었음을 지지하는 것으로 해석된다.

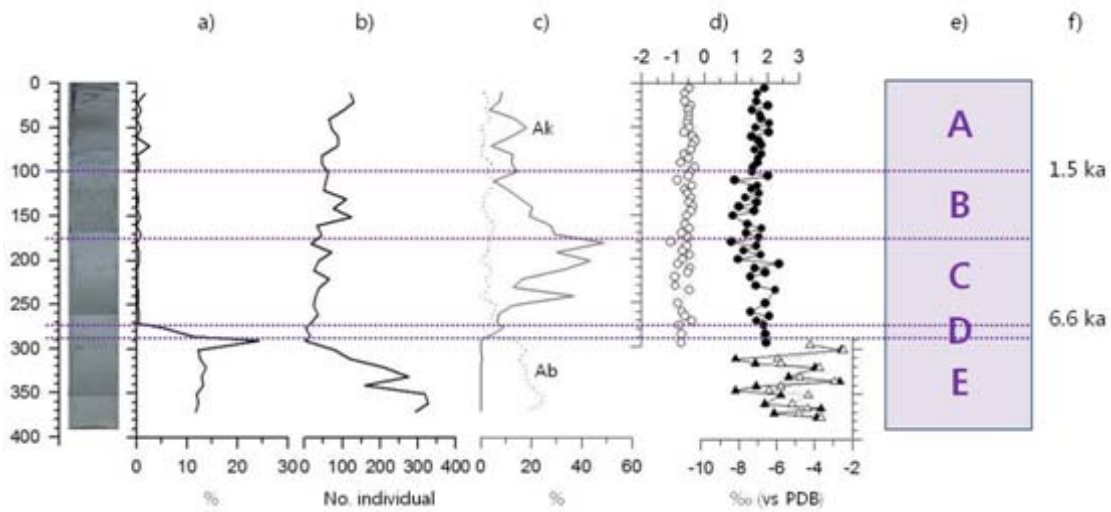


Fig. 14. 코어 06-1의 유공충 및 산소, 탄소 안정동위원소 변화- a) 입도; b) 퇴적물 1g 당 저서유공충 개체수; c) *A. beccarii*(Ab)와 *A. ketienziensis angulata* (Ak)의 퇴적물 깊이 별 변화; d) *A. beccarii*(삼각형)과 *A. ketienziensis angulata* (원형)을 이용한 산소(흑색 원) 및 탄소(백색 원) 안정동위원소의 퇴적물 깊이에 따른 변화; e) 저서유공충 생물상; f) 유공충 군집 변화 추정 연대- Kim and Kennett, (1998)과 Kim and Kucera, (2000).

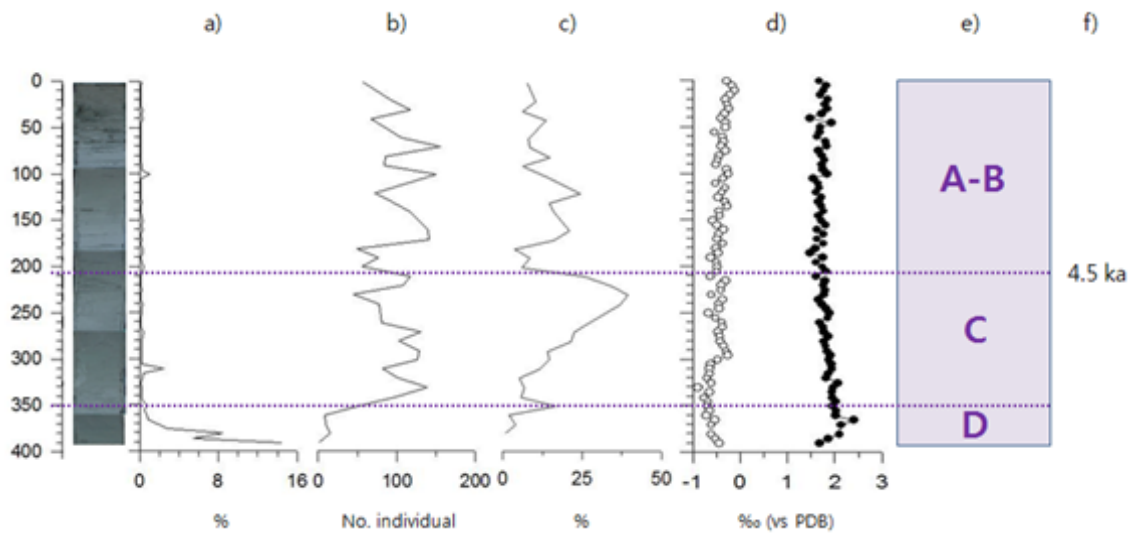


Fig. 15. 코어 06-5의 유공충 및 산소, 탄소 안정동위원소 변화- a) 입도; b) 퇴적물 1g 당 저서유공충 개체수; c) *A. beccarii*(Ab)와 *A. ketienziensis angulata* (Ak)의 퇴적물 깊이 별 변화; d) *A. beccarii*(삼각형)과 *A. ketienziensis angulata* (원형)을 이용한 산소(흑색 원) 및 탄소(백색 원) 안정동위원소의 퇴적물 깊이에 따른 변화; e) 저서유공충 생물상; f) 유공충 군집 변화 추정 연대- Kim and Kennett, (1998)과 Kim and Kucera, (2000).

다. 코어 퇴적물의 외편모조류 시스트 군집 특성

본 결과는 현재 분석이 진행 중인 예비 자료이다. 분석 결과, 외편모조류 시스트는 gonyaulacoid 그룹 5속 14종, protoperidinioid 그룹 3속 5종, 그리고 tuberculodinioid 그룹 1속 1종으로, 총 9속 20종이 동정되었다. 시스트 농도는 약 12,000~120,000cysts/g의 범위였다. 가장 많이 발견된 외편모조류 시스트는 gonyaulacoid 그룹에 속하는 *Spiniferites bulloideus*였으며, *Spiniferites* spp., *O. centrocarpum* 등이 함께 관찰되었다(Fig. 16). 황해중앙니질대 코어 퇴적물의 외편모조류 시스트 농도는 북동중국해 퇴적물의 코어 퇴적물과 비교할 때, 현저하게 높은 농도를 보인다. 이는 황해중앙에서의 외편모조류 생산량이 북동중국해 해역보다 월등히 높음을 지시한다. 한편, 황해중앙니질대에서 채집된 코어 퇴적물은 전반적으로 하부 퇴적물에서 높은 시스트 농도를 보였으며 이후 감소하다가, 상부 퇴적물에서 농도가 다시 증가하는 경향을 나타냈다. 특히 *Alexandrium* 시스트는 하부 및 중앙부 퇴적물에서는 거의 관찰되지 않는 반면, 상부 퇴적물에 집중적으로 집적된 특징을 보였다. 이는 *Alexandrium*가 황해중앙해역에서 대량으로 증식하기 시작한 시기가 비교적 최근임을 의미한다. 향후, 보다 세밀한 간격으로 외편모조류 시스트 분석을 퇴적물 연대측정과 함께 진행함으로써, 황해에서 *Alexandrium* 종의 발달 역사에 대한 자세한 분석이 수행될 계획이다.

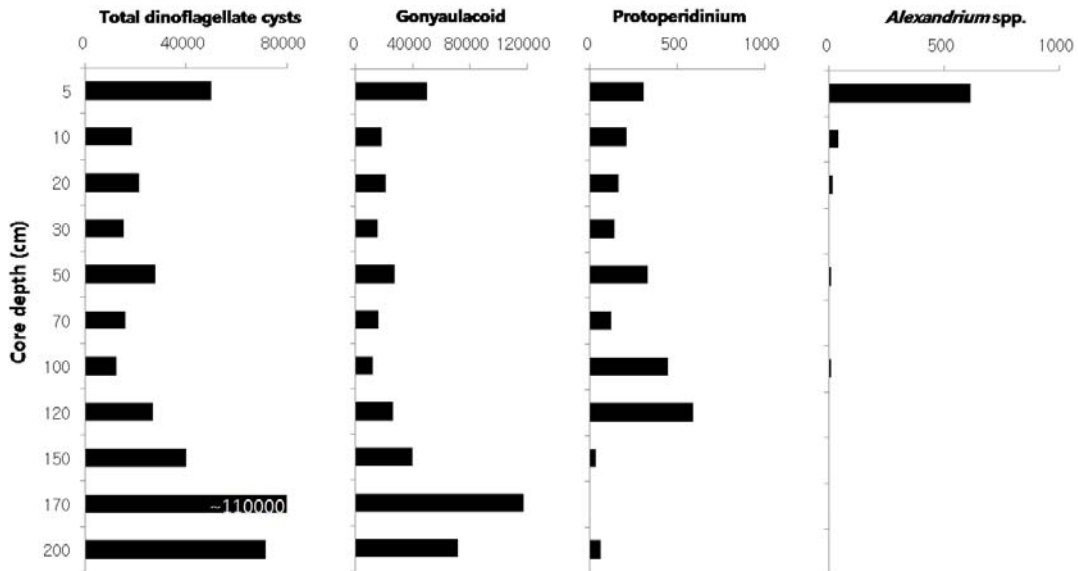


Figure 16. 06-1 코어 퇴적물의 주요 외편모조류 시스트 군집 변화

라. 유공충 각을 이용한 산소 및 탄소 안정동위원소비 분석

코어 퇴적물이 형성될 당시의 주변 해수의 특성(수온, 염분)을 규명하기 위하여 코어 06-1과 06-5 퇴적물에서 산출되는 유공충 각을 이용하여 산소 및 탄소 안

정동위원소비를 분석하였다.

06-1 코어 퇴적물: 코어 심도 290cm 이하의 퇴적물에서는 우세종인 *A. beccarii* 각을 이용하였으며, 290cm 이상의 퇴적물에서는 우세종인 *A. ketienziensis angulata* 각을 이용하여 분석하였다. 분석 결과, *A. beccarii* 각은 $\delta^{18}\text{O}$ 값이 $-8.19\sim-2.57\%$ (vs PDB), $\delta^{13}\text{C}$ 값은 $-6.39\sim-2.49\%$ (vs PDB)의 범위를 보였다. *A. ketienziensis angulata* 각은 $\delta^{18}\text{O}$ 값이 $0.86\sim2.37\%$ (vs PDB), $\delta^{13}\text{C}$ 값은 $-1.07\sim-0.28\%$ (vs PDB)의 범위를 보였다(Fig. 17). *A. beccarii*의 동위원소비가 가벼운 값을 보이고, 변화의 폭이 매우 크게 나타나고 있다. 저서 유공충 생물상 E에 해당하는 퇴적구간으로 조간대/연안의 환경에서 육지로부터의 담수와 이와 함께 유입되는 육상기원 유기물의 영향이 크기 때문으로 해석된다. 이 시기의 주변 해수의 염도를 산소동위원소비 값으로부터 산출해 본 결과, 염도는 최대 15‰을 넘지 않을 것으로 해석된다. 변화의 폭이 비교적 적은 *A. ketienziensis angulata*의 동위원소비의 값은 훨씬 안정된 해양환경을 반영하고 있다. 탄소동위원소비의 값이 대체로 코어 상부로 갈수록 무거워지는 것으로 보아 육상으로부터의 담수와 유기물의 공급이 점차로 감소하는 것을 알 수 있다. 산소동위원소비 값으로부터 저층 해수의 온도를 추정해 본 결과, 염도(32.5‰)의 변화가 없다고 가정할 경우, 황해저층냉수가 형성된 이후 평균 약 4.6 °C 저층수온을 가지는 것으로 계산되었다.

06-5 코어 퇴적물: *A. ketienziensis angulata* 각을 이용하여 산소 및 탄소 동위원소비 분석 결과, $\delta^{18}\text{O}$ 값이 $1.48\sim2.41\%$ (vs PDB), $\delta^{13}\text{C}$ 값은 $-0.89\sim-0.62\%$ (vs PDB)의 범위를 보였다(Fig. 18). 탄소동위원소비의 값이 코어의 하부에서는 가벼운 값을 보이다가 대체로 코어 상부로 갈수록 무거워지는 것으로 보아 육상으로부터의 담수와 유기물의 공급이 점차로 감소하는 것을 알 수 있다. 황해저층냉수가 형성된 이후의 저층해수의 온도를 산소동위원소비 값으로부터 추정해 본 결과, 염도(32.5‰)의 변화가 없다고 가정할 경우, 평균 약 4.0 °C의 값을 가지는 것으로 계산되었다.

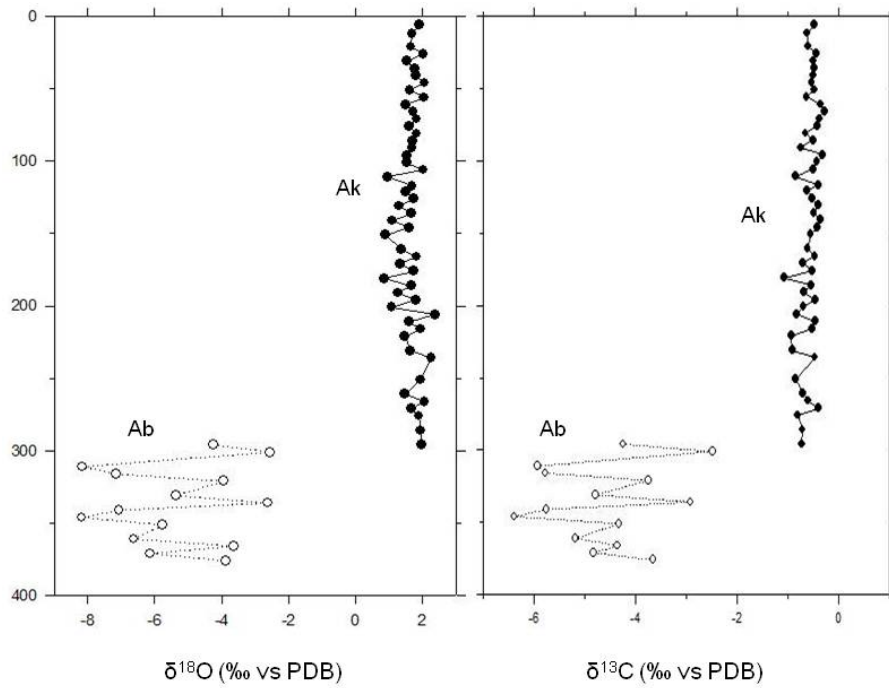


Figure 17. 코어 06-1의 산소 및 탄소 안정동위원소 기록- *Ammonia beccarii*(Ab); *Ammonia ketienziensis angulata*(Ak).

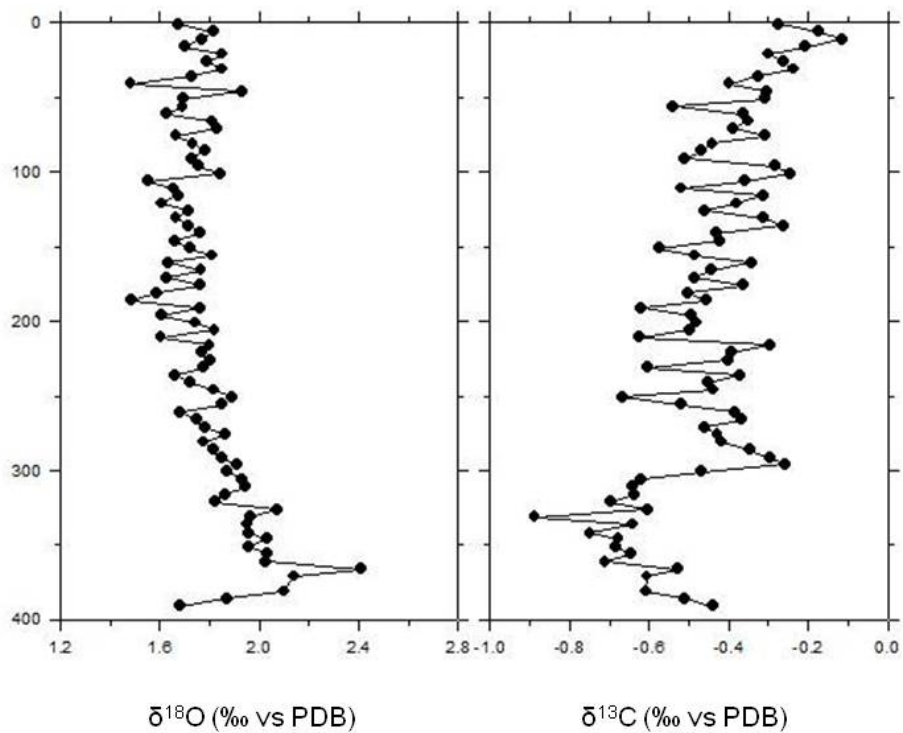


Figure 18. 코어 06-5의 산소 및 탄소 안정동위원소 기록- *Ammonia beccarii*(Ab); *Ammonia ketienziensis angulata*(Ak).



제 4 장 목표달성도 및 대외기여도

제 1 절 목표달성도

제 2 절 대외기여도

제 4장 연구개발목표 달성도 및 대외기여도

제 1 절 목표달성도

1. 2차년도(2010년) 연구내용 대비 달성율

총연구기간내 년차별 연구내용 대비 달성율(%)					
년차	연구성과	진척율		성취도 (정상, 부진)	특기사항 (우수성 및 부진사유)
		년차별 계획대비	총연구 기간대비		
2차 년도	<물리> - 춘계, 하계 정밀관측 실시 - 성층 구조와 해류의 계절변동성 파악 - 장기연속자료 분석에 의한 냉수대의 형성과 발달과정 분석	100	40	정상	
	<생물> - 춘계 선상사육실험을 통한 <i>E. pacifica</i> 의 알생산량, 부화율 측정 - 춘계/하계 동안 <i>E. pacifica</i> 발달 단계별 시료 확보 및 공간 분포 파악 - 생물 음향(bioacoustics) 자료와 net 샘플 분석을 통해 냉수대해역에서 <i>E. pacifica</i> 의 수직이동양상 파악 - 냉수대 형성 vs. 발달 시기 동안 <i>E. pacifica</i> 의 지방 바 이오마커 분석과 위내용물 분석을 통한 섭식생태 파악	0	20	부진	천안함 사건으로 인한 조사 일정 축소 및 미국 NOAA 연구 팀 과 의 공동 조사 및 실험 연구 취소
		100	60	정상	
		100	60	정상	
		100	70	정상	
	- 냉수대 형성(춘계) 및 발달(하계)시기의 <i>C. sinicus</i> 의 주야 수직 이동 변동성 파악	100	70	정상	
	- <i>C. sinicus</i> 의 주야 수직 이동 변동성과 주요 환경요인과의 상관성 파악	100	70	정상	
	<음향> - 황해저층생태계 구조 파악을 위한 음향산란층 특성 연구	100	100	정상	
<지질> - 표층 퇴적물 시료 외편모조류 시스트 균집분석 - 박스/피스톤코아 퇴적물 시료 외편모조류 시스트 균집 분석 및 퇴적물 연대 측정 - 코아 퇴적물 연대측정 - 황해중앙니질대의 외편모조류 시스트(<i>Alexandrium</i>) 분포 및 주요 집적지 파악	90	70	정상	박스 코아 퇴적물 분석이 다소 지연됨	

2. 정량적 목표달성도

가. 논문게재 성과

게재일	논문명	저 자			학술지명	Vol. (No.)	국가명/ SCI 구분
		주저자	교신 저자	공동 저자			
2010.03	Reconstruction of regular time series from Bi-monthly temperature data in the Yellow Sea and the Northwestern East China Sea	이홍재		이석	Ocean Science Journal	45 (2)	한국
2010.03	Early development of euphausiid <i>Thysanoessa inspinata</i> and <i>T. longipes</i> observed in the laboratory	Kim, H.S		Yamaguchi, A.	Bull. Fish. Sci. Hokkaido Uni	60 (1)	일본/국 외 기타
2010.05	The biochemical estimation of age in Euphausiids: Laboratory calibration and field comparisons	Harvey, H. R.	Ju, S.-J.	Son, S.K., Feinberg L.R., Shaw, L.T. Peterson, W.T.	Deep-Sea Res. II	57 (7)	영국/국 외 SCI
2010.06	Comparisons of feeding ecology of <i>Euphausia pacifica</i> from Korean waters using lipid composition	Kim, H.S.	Ju, S.-J.	Ko, A.-R.	Ocean Polar Res	32 (2)	한국/국 내
2010.06	Feeding activity of the copepod <i>Acartia hongii</i> on phytoplankton and micro-zooplankton in Gyeonggi Bay, Yellow Sea	Yang, E.J.	Choi, J.G	Ju, S.-J.	Estuarine Coastal & Shelf Sci.	88 (1)	미국/국 외 SCI
2010.07	북동중국해 코어 퇴적물의 와편모조류 시스트 군집 특성과 의미.	김소영	김소영	임동일, 강소라	지질학회지	46 (3)	한국/등 재
2010.08	북동중국해 내대륙붕 코아 퇴적물의 저서유공충 군집 특성과 고해양환경 변화	강소라	강소라	임동일, 김소영	지질학회지	46 (4)	한국/등 재

2010.08	Benthic foraminiferal assemblage of Seogwipo Formation in Jeju Island, South Sea of Korea: Implication for late Pliocene to early Pleistocene cold episode in the northwestern Pacific margin.	Sora Kang	Dhongil Lim	So-Young Kim	Quaternary International	225	네덜란드/SCI
2010.09	A 26,000-year integrated record of marine and terrestrial environmental change off Gabon, west equatorial Africa	So-Young Kim	So-Young Kim	James Scourse, Fabienne Marret, Dhong-Il Lim	Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology,	297	영국/SCI
2010.10	황해 주변 강 퇴적물의 점토 광물 함량 특성과 대륙붕 니질대 세립 퇴적물의 기원지 연구	최진용	임동일	김소영, 강소라, 정희수	지질학회지	46 (6)	한국/등재

나. 논문발표 성과

발표일	논문명	저자		학술회의명	국내외 구분
		주발표자	공동발표자		
2010.02	황해중앙니질대 코아 퇴적층의 저서성 유공충 군집특성과 변동	강소라	강소라, 임동일, 김소영	한국고생물학회 학술발표회	국내
2010.06	Variability of water mass properties in the northern East China Sea during Holocene: evidence from planktic foraminiferal assemblages of the core sediments.	강소라	강소라, 임동일, 김소영, 김웅서	한국해양과학기술협의회 공동학술대회	국내
2010.06	Dinoflagellate cyst record of Holocene climate changes in the core sediments from the northern East China Sea shelf	김소영	임동일, 강소라, 김웅서	한국해양과학기술협의회 공동학술대회	국내

2010.06	Overview about ecological studies of the copepod <i>Calanus sinicus</i> conducted in the Yellow Sea and surrounding waters	강정훈		2010년도 한국해양과학기술 술회의 공동학술대회	국내
2010.06	여름철 황해 남동부해역 황해저층냉수의 분포	오경희	이석, 송규민, 이흥재, 정우진, 방익찬	한국해양학회	국내
2010.06	난바다곤쟁이 <i>Thysanoessa inspinata</i> 와 <i>T. longipes</i> 의 초기 유생 발달	김혜선	A. Yamaguchi, 주세종	해양학회	국내
2010.10	Understanding the role of the Yellow Sea Bottom Cold water Mass ($\leq 10^{\circ}\text{C}$) on the survival strategy of <i>Euphausia pacifica</i> throughout the hot summer in the Yellow Sea	Ju, S.-J.	Kim, H.S., Kim, W.S., Kang, D.H., and Ko, A.-R.	PICES	국외
2010.10	Vertical signatures in acoustic estimates of zooplankton around the Yellow Sea Bottom Cold Water, Korea	Kang, D.H.	Lee, H.B., Kim, H.S., Kim, W.S., and Ju, S.-J.	PICES	국외
2010.11	황해 저층냉수대 형성 전 요각류 <i>Calanus sinicus</i> 개체군의 수직분포와 환경특성	강정훈	권오윤, 조대현, 김웅서	2010년도 추계 한국해양학회	국내
2010.11	황해저층냉수 형성 전 후의 크기별 식물플랑크톤 분포양상	권오윤	강정훈	2010년도 추계 한국해양학회	국내
2010.11	Dinoflagellate cyst record of Holocene climate changes in the core sediments from the northern East China Sea shelf	김소영	임동일, 강소라, 정희수, 김웅서	한국해양과학기술 술회의 공동학술대회	국내
2010.11	Holocene gonyaulacoid dinoflagellate cysts as an indicator of palaeoproductivity in the northern East China Sea shelf.	김소영	임동일, 강소라	한국해양과학기술 술회의 공동학술대회	국내

2010.11	저서 유공충 특성 분석을 통한 황해중양니질대(CYSM) 퇴적층의 발달 연구	강소라	임동일, 김소영	한국해양과학기술협의회 공동학술대회	국내
2010.11	2010년 봄철과 여름철 황해 남동부 해역 황해 저층냉수의 분포 특성	오경희	이석, 송규민, 이흥재, 심진경	한국해양학회 발표예정	국내

제 2 절 대외기여도

1. 기술적 측면

- 황해저층냉수대로 유입되는 오염물질 현황과 영향의 정량적 분석을 통한 월경오염 분쟁의 정책적 대응 자료를 축적함.
 - 주요 오염원 : 대기(중국), 하천(양자강, 황하), 폐기물(한국) 등
- 황해의 해양환경 감시 및 종합적인 예측기술 확보를 통해 전 지구적 기후변화 등에 의한 중장기 변동성과 연안환경과 한반도에 미치는 영향 예측 및 평가에 활용함.
 - 미국의 경우 IOOS (Integrated Ocean Observation System)을 구축하여 해양 환경 감시 및 예측 지원
- 황해 연구의 국제적 협력을 통해 황해 전문연구인력을 육성함.
- 한·중 국제공동연구를 통한 황해저층냉수대의 해양환경학적 및 생태학적 중요성을 심층 분석함.
- 황해저층냉수대 연구를 한·중 국제 공동연구의 해양과학자 네트워크 형성과 국제 공조에 기여함.
- 황해저층냉수대의 위도별 해양환경특성과 부유생물군집의 시, 공간적 상관성의 규명으로 현재의 변화와 향후 변동 예측에 필요한 기초 및 단서 자료를 확보함.
- 하계의 저층냉수대, 표층혼합수 및 연안수역을 특징짓는 부유생태계 특성의 수직 및 수평적 분포반응과 위도별 반응특성 기작을 규명함.
- 음향-황해저층냉수 내의 유용어류 자원의 먹이원인 동물플랑크톤의 수층별 구조 특성 파악
- 주요종 선정 및 생물 및 환경간의 상호관계성 규명으로 실질적 상향조절관점의 예측단서자료를 제공함.
- 기후변동과 관련된 황해 저층냉수대 규모변화에 따른 온대해역 해양학적 특성 변화 해석의 생태계 기반 접근 방법 개발이 가능함.

- 황해 전체의 표층 퇴적물에서 외편모조류 시스트 분포를 알아봄으로써 황해중양니질대의 외편모조류 시스트 집적지로서의 역할을 규명함.
- 특히 황해 연안의 유독성 적조 원인종인 *Alexandrium* 종의 외양역에서의 분포를 파악할 수 있음.
- 황해 전해역에 걸친 주요 외편모조류 시스트의 분포를 파악함으로써, 서해 연안의 부영양화 또는 적조 발생 기작을 이해하기 위한 유용한 자료 제공함.
- 박스코아 퇴적물 분석을 통해 과거부터 현재까지 시간적 변화에 따른 황해의 외편모조류 시스트 군집의 변화 역사를 복원할 수 있음.
- 다양한 해양환경에서 광범위하게 분포하는 외편모조류 중 분포와 주요 해양환경 요인과의 상관관계를 파악함으로써, 향후 해양환경 지표생물로서 외편모조류 시스트를 이용하기 위한 기초자료 제공
- 1, 2차년도 연구를 통하여 황해중양 해역의 외편모조류 시스트(특히 *Alexandrium* 종)의 분포특성 및 주요 집적지를 파악함
- 연구를 통해 확립된 국제공동연구 네트워크는 타 연구를 위한 인적 인프라로 활용될 수 있음.
- 황해 저층 냉수 해역에서 계절별 동물플랑크톤의 수직 이동 패턴을 음향학적 방법으로 확인.
- 계절 별 수온 변화에 따른 동물플랑크톤의 수직이동 범위의 차이를 음향을 이용, 확인.
- 황해 저층 냉수 해역에서의 동물플랑크톤의 수직이동 패턴을 기존의 네트를 이용한 불연속적인 방법이 아닌 음향을 이용한 연속적인 방법으로 탐지 및 확인.

2. 경제 · 산업적 측면

- 황해의 수중/해저 생태계의 생산성과 변동성 예측기술 향상을 통해 해양생물자원 관리 및 예보에 활용함.
- 연안 환경 보전을 위한 기초 자료, 연안개발/방호를 위한 설계 및 평가 자료를 제공함.
- 연안 가두리 양식장과 같은 수온에 민감한 어종 생육장 보호와 오염원에 대한 생태계 보호를 위한 정책결정에 필요한 생태학적 위해도 평가 방법 기술을 적용함.
- 본 연구는 직접적인 경제적 이익 창출을 위한 연구사업은 아니나, 최적의 경계획정을 통한 해양영토 확보와 해양 광물 및 수산자원 확보 등은 국익에 미치는 경제적 파급효과가 매우 큼.
- 종합적 해양과학 탐사는 그 자체가 큰 경제적, 사회적 파급효과를 창출하는 것은 아니지만, 탐사와 연구를 통한 기후변화, 환경보전 등의 사회정의 확립은 국가운영차원에서 가치가 크다고 할 수 있음.
- 황해저층냉수대의 종합적인 해양환경도 제작으로 황해의 해양환경 관리, 활용에서

국제적인 우위를 선점함.

- 해류체계, 퇴적환경, 수질환경, 생태계특성 종합분석,

- 과학적 사실에 근거한 홍보를 통해 황해의 경계획정 논리에 대한 국제적인 공감대를 유도함.
- 황해광역생태계의 중요성 대비 낮은 국제적 인지도의 현실을 타개하고 선도적 해역관리 생태계 모델의 제시로 한반도 주변해역 해양과학의 국제적 선진화를 달성함.
- 황해 수산자원의 먹이생물인 동물플랑크톤의 분포 및 양을 분석하여 주요 수산어종의 생물량 변화를 예측.
- 향후 황해에서 발생하는 제반 해양환경문제 및 해양경계획정 문제에 대한 해양과학적 자료 구축 및 대처능력 로드맵을 도출함.
- 이러한 해양과학적 연구는 우리나라 영토에 대한 지식을 확대하고 도출된 결과를 후세의 교육 자료로 활용함.
- 순수 해양과학적 지식이 국가 경영에 활용 될 수 있음을 보여주고, 이를 통하여 해양과학의 가치를 재고하는데 기여함.
- 황해 해양환경에 대한 한국과 중국 과학자의 지식의 틀을 넓히고 황해 환경보전에 대한 양국의 노력을 자극하고 황해유역 통합관리의 필요성 도출에 기여함.
- 유해성 적조를 일으키는 주요 외편모조류 종의 집적지와 그 형성 기작을 밝힘으로써, 향후 해양 생태계 관리, 공중보건, 수산 양식업에 미치는 영향 평가 및 잠재적 사회,경제적 손실 방지를 위한 자료 제공
- 황해 수산자원의 먹이생물인 동물플랑크톤의 분포 및 양을 분석하여 주요 수산 어종의 생물량 변화를 예측 할 수 있다.

3. 사회 · 문화적 측면

- 미지의 황해저층 냉수대의 생태계 특성을 밝힘으로서 대중적인 관심을 끌어 올릴 수 있는 계기를 마련.
- 황해저층냉수대의 저층 퇴적물에서 외편모조류 시스트의 산출량이 매우 높은 수괴의 성층이 약화되는 늦가을과 초봄에 저층에 축적된 영양염이 표층으로 원활하게 공급됨으로써, 식물플랑크톤 생장에 알맞은 영양염 환경을 조성하기 때문인 것으로 판단됨.
- 유공층 각을 이용한 산소 및 탄소 안정동위원소비 값을 분석한 결과, 과거 황해중앙해역이 조간대/연안 환경이었을 당시의 연구해역의 염분값은 15‰ 미만이었으며, 황해저층냉수가 형성된 이후 저층수의 온도는 평균 4~4.6 °C이었던 것으로 추정됨.



제 5 장 연구개발 결과의 활용계획



제 5 장 연구개발결과의 활용계획

- 기후변동의 영향을 가늠할 수 있는 지시자로서 황해저층냉수대의 역할이 예상되며, 이에 반응하는 생태계의 하위영양단계 변화는 상향조절을 통해 수산자원의 변동 예측이 가능할 것으로 기대됨.
- 황해저층냉수대에서 에너지 흐름을 이해하기 위한 해양생물 먹이망에 대한 결과는 기후변화에 따른 한반도 주변해역의 해양 생태계 변화를 예측하는 모델 연구에 중요한 자료로서 활용 가능함.
- 춘계, 하계 관측을 통해 황해냉수와 연안수의 공간적 ■ 시간적 분포 특성을 분석하고 기존 자료들과 비교 검토함. 위성 추적 뜰개와 해류계를 계류를 통해 황해 해류의 거동을 살펴보았음. 황해 냉수 변동성 모의를 위해 수치모델을 구성하고 초기 조석 모의를 수행함. 관측자료를 입력자료로 이용함으로써 모델에 타당성을 부여할 수 있을 것임.
- 광범위한 해역에서의 *E. pacifica* 시료 확보에는 어려움이 있었으나, 이들의 시·공간분포, 주야수직이동, 및 섭식생태의 특징을 제한된 지역이지만 계절(춘계 vs. 하계)별로 비교 검토하였음. 이러한 결과는 *E. pacifica*의 계절별 생존 전략 및 냉수대의 황해생태계에 대한 역할을 이해하는데 중요한 정보를 제공하였으며, 3차년도 연구방향 및 탐사계획 설정에 대한 가이드라인 제시
- 황해냉수대 형성 전과 후인 춘계와 하계에 25시간동안 3시간 간격으로 수직분포를 층별로 채집하여 발달 단계 별 분포를 확인하고, 환경요인과의 관련성을 검토하였음. 계절별 수층구조 특성이 *C. sinicus*의 발달 단계별 수직이동범위를 제한하였고, 하계에 기존 연구결과(중국 측)와 일치하지 않는 경향을 나타냄. *C. sinicus*의 수직분포를 제한하는 측면에서 황해냉수대 역할 규명을 위한 구체적인 연구관점을 제시함.
- 황해 냉수대 내의 음향 자원량 조사는 황해 내의 동물플랑크톤의 시 공간적인 분포량 및 양의 기초적인 자료를 제공
- 음향 자원량 조사 결과를 이용, 기후 변화에 따른 황해 해양환경 변화(냉수대 변동)가 해양 생태계에 미칠 영향 예측을 위한 모델 연구에 중요한 자료로서 활용가능
- 연구 결과들은 3차년도의 연구목표인 ‘황해중안니질대 퇴적물의 미고생물학적, 지화학적 특성 분석을 통한 황해냉수대 과거환경 및 생태환경 변화 특성’을 이해하는데 유용한 자료로 이용될 것임.



제 6 장 참고문헌

제 6 장 참고문헌

○ 물리분야

- 과학기술부, 1998a. 황해의 해수순환과 물질플럭스 연구. 한국해양연구소 보고서, BSPN 97357-00-1103-1. 105p.
- China Ocean Press, 1992, Marine Atlas of Bohai Sea, Yellow Sea, East China Sea - Hydrology, China Ocean Press, Beijing, 524pp .
- Chu, P. C., C.R. Fralick Jr., S. D. Haeger, and M. J. Carron (1987). A parametric model for the Yellow Sea thermal variability. J. Geophys. Res., 102(C5), 10,499-10,507.
- Inoue, N., 1974, Oceanography Characteristics in the western sea of Japan, in: Tsushima Warm Current, edited by Japan Fishery Society, fishery Science series, p.27-41.
- Kondo, M., 1985. Oceanographic investigation of fishing grounds in the East China Sea and the Yellow Sea-1, Characteristics of the mean temperature and salinity, distributions measured at 50m and near the bottom. Bull. Seikai Reg. Fish. a Res., Lab., F62, p19-66.
- Lie, H.J., 1984. A note on Water masses and general circulation in the Yellow Sea (Hwanghae)., J. Oceanogra. Soc. Korea, Vol. 19(2), p.187-194.
- Lie, H.-J., I. K. Bang, and Y. Q. Kang, 1986. Empirical orthogonal function analysis of seawater temperature in the southeastern Hwanghae. J. Oceanol. Soc. Korea, 21(4), 193-202.
- Lie, H.J., 1989. tidal fronts in the southern Hwanghae(Yellow Sea). Continental Shelf Res., 9, p527-546.
- Nakao, T., 1977, Oceanic variability in relation to fisheries in the East China Sea and the Yellow Sea., J. Fac. Mar. Sci. Tech. Tokai. Univ., Japan. Spec. No., p.190-367.

- 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.
- Su, Y. and X. Weng, 1994. Water masses in China seas, In 'Oceanology of China Seas, Vol. 1, Eds D. Zhou et al., Kluwer Academic Pub., Dordrecht, 3-16.
- Weng, X., Z. Ding and Y. Zhang, 1993. Thermohaline structure and interannual variation of the Yellow Sea cold water mass, Proceedings of the 2nd Int'l Symp. on the Marine Sci. in the Yellow Sea, July 27-29, 1991, Qingdao, China, Qingdao Univ. Press, 77-87.

○ 생태계 분야 - 크릴

- Bligh, E.G., Dyer, W.J. 1959. A rapid method of total lipid extraction and purification. Can J Biochem Physiol 37: 911-917.
- Falk-Petersen, S., Hagen, W., Kattner, G., Clarke, A., Sargent, J. 2000. Lipid, trophic relationships, and biodiversity in Arctic and Antarctic krill. Can J Fish Aquat Sci 57: 178-191.
- FAO, 2009. The state of world review of fisheries and Aquaculture 2008. Rome, Italy, pp 546.
- Gomez-Gutierrez J., Feinberg, L.R., Shaw, T., Peterson, W.T. 2006. Variability in brood size and female length of *Euphausia pacifica* among three populations in the North Pacific. Mar Ecol Prog Ser 323: 185-194.
- Graeve, M., G. Kattner, Hagen, W. 1994. Diet-induced changes in the fatty acid composition of Arctic herbivorous copepods: Experimental evidence of trophic markers. J Exp Mar Biol Ecol 182: 97-110.
- Iguchi, N., Ikeda, T. 1994. Experimental study on brood size, egg hatchability and early development of a euphausiid *Euphausia pacifica* from Toyama Bay, Southern Japan Sea. Bull Japan Sea Natl Fish

Res Inst 44: 49–57.

- Ju, S.-J., Kucklick, J.R., Kozlova, T., Harvey, H.R. 1997. Lipid accumulation and fatty acid composition during maturation of three pelagic fish species in Lake Baikal. *J Great Lakes Res* 23: 241–253.
- Nakagawa, Y., Endo, Y., Taki, K. 2001. Diet of *Euphausia pacifica* Hansen in Sanriku waters off northeastern Japan. *Plankton Biol Ecol* 48(1): 68–77.
- Nakagawa, Y., Ota, T., Endo, Y., Taki, K., Sugisaki, H. 2004. Importance of ciliates as prey of the euphausiid *Euphausia pacifica* in the NW North Pacific. *Mar Ecol Prog Ser* 271: 261–266.
- Pu, X., Sun, S., Yang, B., Zhang, G., Zhang, F. 2004. Life history strategies of *Calanus sinicus* in the southern Yellow Sea in summer. *J Plankton Res* 26: 1059–1068.
- Sargent, J.R., J. Henderson, and D.R. Tocher. 1989. The lipids. In: *Fish Nutrition*, p. 153–218. ed. by Halver, J.E.
- Wang, R., Zuo, T., Wang, K.E. 2003. The Yellow Sea cold bottom water – an overwintering site for *Calanus sinicus* (copepoda, Crustacea). *J Plankton Res* 25: 169–183.

○ 생태계 분야 – 요각류

과학기술부 (1998) 황해 해수순환과 물질플럭스 연구: 황해의 물질 균형 및 생지화학적 순환연구. 한국해양연구원, BSPN97357-03-1100-4, 437p.

¹Pu, X.-M., Sun, S., Yang, B., Ji, P., Zhang, Y.-S., Zhang, F. (2004) The combined effects of temperature and food supply on *Calanus sinicus* in the southern Yellow Sea in summer. *J. Plankton Res.* 26(9): 1049–1057.

²Pu, X.M., Sun, S., Yang, B., Zhang, G.-T. and Zhang, F. (2004) Life history strategies of *Calanus sinicus* in the southern Yellow Sea in summer. *J. Plankton Res.* 26(9): 1059–1068.

- Chihara, M. and Murano, M., 1997. An illustrated guide to marine plankton in Japan, Tokai University Press.
- Bouman, H.A., Nakane, T., Oka, K., Nakata, K., Kurita, K., Sathyendranath, S., Platt, T., 2010. Environmental controls on phytoplankton production in coastal ecosystems: A case study from Tokyo Bay. *Estuar. Coast. Shelf. S.* 87, 63–72.
- Cupp, E.E. 1943. Marine plankton diatoms of the west coast of north America. *Bull. Scripps Inst. of Oceanogr., Univ. Calif.*, 5 : 1–237.
- Dodge, J.D. 1982. Marine dinoflagellates of the British Isles. Her Majesty's Office. London. 214 pp.
- Hasle, G.R. and E.E. Syvertsen. 1996. Marine diatoms. C.R. Tomas ed. "Identifying Marine Diatoms and Dinoflagellates". Academic Press. 838 pp.
- Hendey, N.I. 1964. An introductory account of the smaller algae of British coastal waters. Part 5: Bacillariophyceae (Diatoms). "Ministry of Agriculture, Fisheries and Food. Fishery Investigation Series IV". HMSO London. 317pp.
- Howarth R.W (1988) Nutrient limitation of net primary production in marine ecosystems. *Ann Rev Ecol* 19:89–110.
- Li, C., Sun, S., Wang, R., Wang, X. (2004) Feeding and respiration rates of a planktonic copepod (*Calanus sinicus*) overwintering in Yellow Sea Cold Bottom Waters. *Mar. Biol.* 145: 149–157.
- Liu, G.M., Sun, S., Wang, H., Zhang, Y., Yang, B., Ji, P. (2003) Abundance of *Calanus sinicus* across the tidal front in the Yellow Sea, China. *Fish. Oceanogr.* 12(4/5): 291–298.
- Parsons, T.R., Maita, Y. Lalli, C.M. (1984) A manual of chemical and biological methods for seawater analysis. Pergamon Press, 173 p.
- Round, F.E., R.M. Crawford and D.G. Mann. 1990. The Diatoms: Biology and Morphology of the Genera. Cambridge University Press.
- Simonsen, R., 1974. The diatom plankton of the Indian Ocean expedition,

- R/V "Meteor", 1964–1965. Meteor Forsch.–Ergebnisse, 19 : 1–107.
- Wang, R., Zuo, T., Wang, K. (2003) The Yellow Sea Cold Bottom Water—an overwintering site for *Calanus sinicus* (Copepoda, Crustacea). J. Plankton Res. 25(2): 169–183.
- Wu JT, Chou TL (2003) Silicate as limiting nutrient for phytoplankton in a subtropical eutrophic estuary of Taiwan. Estuar Coast Shelf S 58:155–162.
- Zhang, G.-T., Sun, S., Yang, B. (2007) Summer reproduction of the planktonic copepod *Calanus sinicus* in the Yellow Sea: influences of high surface temperature and cold bottom water. J. Plankton Res. 29(2): 179–186.
- Zhang, G.-T., Sun, S., Zhang, F. (2005) Seasonal variation of reproduction rates and body size of *Calanus sinicus* in the southern Yellow Sea, China. J. Plankton Res. 27(2): 135–143

○ 음향 분야

- Aoki, I. and T. Inagaki. 1992. Acoustic observation of fish schools and scattering layers in a Kuroshio warm-core and its environs. Fish. Oceanography, 1, 137–142.
- BioSonics. 2005. User Guide; Visual Acquisition, version 5.0. 64 pp.
- Chou, S.C., M.A. Lee and K.T. Lee. 1999. Diel vertical movement of the deep scattering layer on the continental slope of Lan Bay, Taiwan, Fish. Oceanography, 65, 694–699.
- Kang D.H., D.J. Hwang, H.Y. Soh, Y.H. Yoon, H.L. Suh, Y.G. Kim, H.C. Shin and K. Iida. 2003. Density estimation of the Euphausiid (*Euphausia pacifica*) in the sound scattering layer of the East China Sea. J. Kor. Fish. Soc. 36(6), 742–756. (in Korean)
- Lee D.J., H.I. Shin and J.H. Park. 1990. Acoustic scattering layers in the East China Sea I. Diurnal fluctuations in echo level of the scattering

layers. Bull. Kor. Soc. Fish. Tech., 26, 14–19. (in Korean)

Lee M.A., J.R. Wang, T.J. Cheng, S.C. Chou and K.T. Lee, 1999. A case study on the category composition and distribution of zooplankton in the sound scattering layer of offshore waters of north Taiwan. J. Fish. Soc. Taiwan, 26, 133–144.

Medwin, H. and C.S. Clay. 1998. Biomass echoes, reverberation, and scattering models In: Fundamentals of Acoustical Oceanography. Academic Press, pp.348–404.

○ 퇴적물 분야

김소영, 임동일, 강소라, 2010. 북동중국해 코어 퇴적물의 외편모조류 시스트 군집 특성과 의미. 지질학회지 46(3), 221–231.

정규귀, Austin, W., 정희동, 2005, 현생 저서성 유공충 산소동위원소의 해양퇴적학적 응용. 한국해양학회 2005년도 추계 학술발표대회 요약집, 419–420.

Akimoto, K., 1990, Distribution of recent benthonic foraminiferal faunas in the Pacific off southwest Japan and around Hachijojima Island. Tohoku Univ., Sci. Rep., 2nd ser. (Geol.) 60(2), 139–223.

Anderson, D.M., Stock, C.A., Keafer, B.A., Nelson, A.B., Thompson, B., McGillicuddy, J., Keller, M., Matrai, P.A., Martin, J., 2005. Alexandrium fundyense cyst dynamics in the Gulf of Maine. Deep-Sea Research II 52, 2522–2542.

Bemis, B.E., Spero, H.J., Bijma, J., Lea, D.W., 1998, Reevaluation of the oxygen isotopic composition of planktonic foraminifera: Experimental results and revised paleotemperature equations. Paleoceanography, 13 (2), 150–160.

Cho, H.J., 2000, Utility of Dinoflagellates in Studying the Marine Environment : the Case of the East China Sea and Adjacent Areas. Ph.D. Thesis, Nagasaki University, Japan, 123 p.

Cho, H.J., Matsuoka, K., 2001. Distribution of dinoflagellate cysts in

- surface sediments from the Yellow Sea and East China Sea. *Marine Micropaleontology* 42, 103–123.
- Dale, B., 1983. Dinoflagellate resting cysts: "benthic plankton". In: *Survival Strategies of the Algae*, edited by G. A. Fryxell. Cambridge Univ. Press. pp. 69–136.
- Gibson, T.G., Buzas, M.A., 1973, Species diversity: Patterns in modern and Miocene Foraminifera of the eastern margin of north America. *Geological Society of America Bulletin* 84, 217–238.
- Hao, Y., Guo, Z., Yang, Z, Fan, D., Fang, M. and Li, X., 2008. Tracking historical lead pollution in the coastal area adjacent to the Yangtze River Estuary using lead isotopic compositions. *Environmental Pollution* 156(3), 1325–1331.
- Hasegawa, S., 1979, Foraminifera of the Himi Group, Hokuriku Province, Central Japan. *Tohoku Univ., Sci. Rep., 2nd ser. (Geol.)* 49(2), 89–163.
- Hazel, J., 1975, Patterns of marine ostracode diversity in the Cape Hatteras, North Carolina area. *Jour. Paleont.*, 49(4), 731–744.
- Kim, C.H., 1995. Paralytic shellfish toxin profiles of the dinoflagellate *Alexandrium* species isolated from benthic cysts in Jinhae Bay, Korea. *J. Korean Fish. Soc.*, **28**: 364–372.
- Kim, J.M., Kucera, M., 2000, Benthic foraminifer record of environmental changes in the Yellow Sea (Hwanghae) during the last 15,000 years. *Quaternary Science Reviews* 19, 1067–1085.
- Kim, J.M., Kennett, J.P., 1998, Paleoenvironmental changes associated with the Holocene marine transgression, Yellow Sea (Hwanghae). *Marine Micropaleontology*, 34, 71–89.
- Lee, J.B. and K. Matsuoka, 1996. Dinoflagellate cysts in surface sediments of southern Korean Waters. In: *Harmful and Toxic Algal Blooms*, edited by T. Yasumoto, Y. Oshima and Y. Fukuyo. Intergovernmental Oceanographic Commission of UNESCO, pp. 173–176.

- Ma, M., Feng, Z., Guan, C., Ma, Y., Xu, H., Li, H., 2001. DDT, PAH and PCB in sediments from the intertidal zone of the Bohai Sea and the Yellow Sea. *Mar. Pollut. Bull.* 42, 132–136.
- Marret, F., Eiriksson, J., Knudsen, K.L., Turon, J.L., Scourse, J.D., 2004. Distribution of dinoflagellate cyst assemblages in surface sediments from the northern and western shelf of Iceland. *Review of Palaeobotany and Palynology* 128, 35–53.
- Matsuoka, K., 1999. Eutrophication process recorded in dinoflagellate cyst assemblages – a case of Yokohama Port, Tokyo Bay, Japan. *Science of the Total Environment* 231, 17–35.
- McGillicuddy, D., Anderson, D.M., Lynch, D.R., Townsend, D.W., 2005. Mechanisms regulating large-scale seasonal fluctuations in *Alexandrium fundyense* populations in the Gulf of Maine: results from a physical-biological model. *Deep-Sea Research II* 52, 2698–2714.
- Mudie, P.J., 1982. Pollen distribution in recent marine sediments, Eastern Canada. *Canadian Journal of Earth Sciences*, 19, 729–747.
- Murray, J.W., 1976. Comparative studies of living and dead benthic foraminiferal distribution. *In: Foraminifera*, v. 2, Hedley, R.H., Adams, C.G., eds., p. 45–110.
- Nehring, S., 1997. Dinoflagellate resting cysts from recent German coastal sediments. *Botanica Marina* 40, 307–324.
- Novichkova, E.A., Polyakova, E.I., 2007. Dinoflagellate cysts in the surface sediments of the White Sea. *Oceanology* 47(5), 660–670.
- Pospelova, V., Chmura, G.L., Walker, H.A., 2004. Environmental factors influencing the spatial distribution of dinoflagellate cyst assemblages in shallow lagoons of southern New England (USA). *Review of Palaeobotany and Palynology* 128, 7–34.
- Radi, T., Pospelova, V., de Vernal, A., Barrie, J.V., 2007. Dinoflagellate cysts as indicators of water quality and productivity in British

- Columbia estuarine environments. *Marine Micropaleontology* 62, 269–297.
- Sen Gupta, B.K., Kilbourne, R.T., 1974, Diversity of benthic foraminifera on the Georgia Continental Shelf. *Geological Society of America Bulletin*, 85, 696–972.
- Shi, X., Shen, S., Yi, H.I., Chen, Z., Yi, M., 2003. Modern sedimentary environments and dynamic depositional systems in the southern Yellow Sea. *Chinese Science Bulletin* 48, 1–7.
- Shin, H.H., Yoon, Y.H. and Matsuoka, K., 2007, Modern Dinoflagellate Cysts Distribution off the Eastern Part of Geoje Island. *Korea Ocean Science Journal*, 42(1), 31–39.
- White, A.W., Lewis, C.M., 1982. Resting cysts of the toxic, red tide dinoflagellate *Gonyaulax excavata* in Bay of Fundy sediments. *Canadian Journal of Fisheries and Aquatic Sciences* 39, 1185–1194.
- Wu, Y., Zhang, J., Mi, T.Z., Li, B., 2001. Occurrence of n-alkanes and polycyclic aromatic hydrocarbons in the core sediments of the Yellow Sea. *Mar. Chem.* 76, 1-15.
- Zhang J., Letolle, R., Martin, J.M., Jusserand, C., Mouchel, J.M., 1990, Stable oxygen isotope distribution in the Huanghe (Yellow River) and the Changjiang (Yangtze River) estuarine systems. *Continental Shelf Research*, 10(4), 369–384.