

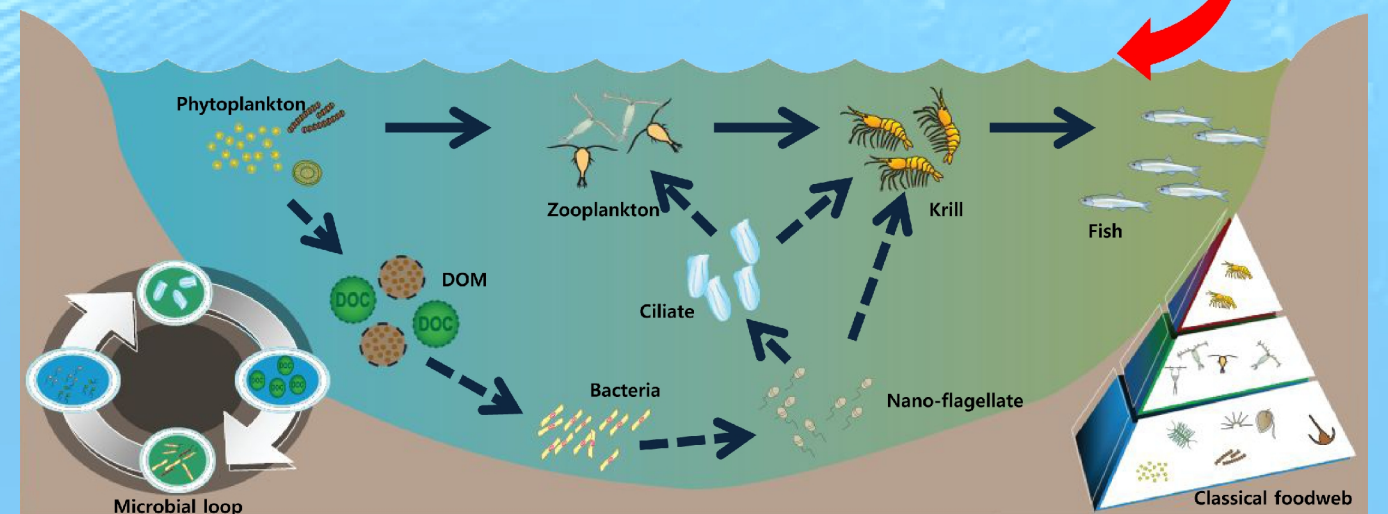
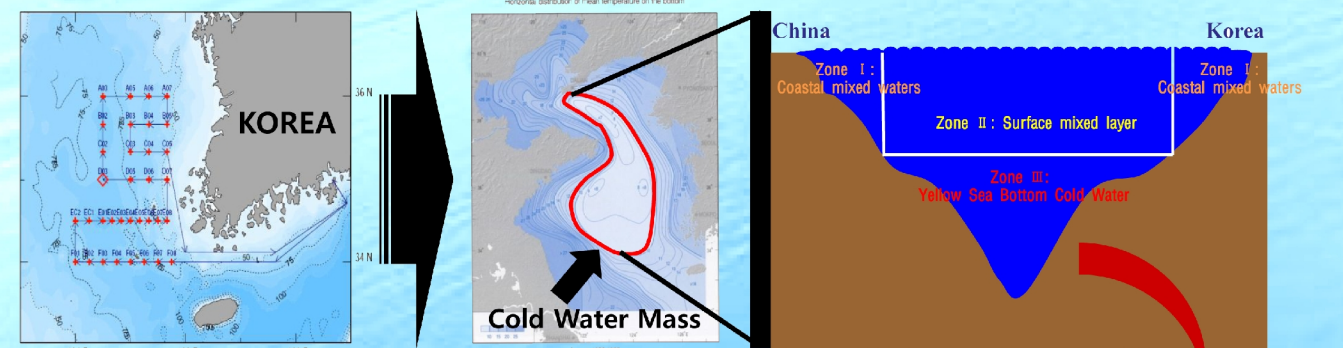


황해저층냉수괴의 거동과 생태계에 미치는 영향 연구

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

(2단계 1차년도 보고서)

2013. 02



- 주 의**
1. 이 보고서는 한국해양과학기술원에서 수행한 주요사업의 연구결과 보고서입니다.
 2. 이 보고서 내용을 발표할 때에는 반드시 한국해양과학기술원에서 수행한 주요사업의 연구결과임을 밝혀야 합니다.
 3. 국가과학기술 기밀유지에 필요한 내용은 대외적으로 발표 또는 공개하여서는 안됩니다.

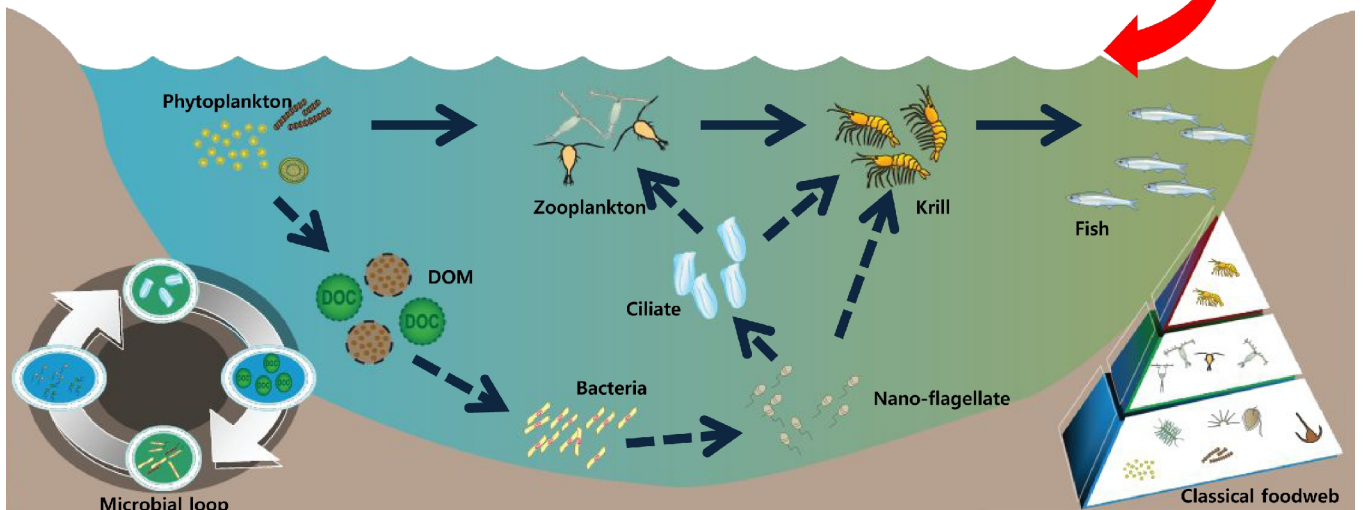
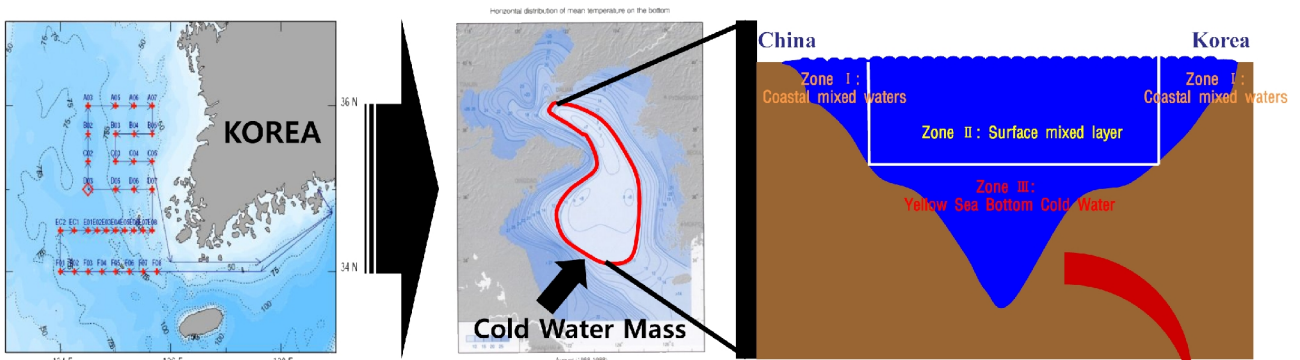


황해저층냉수괴의 거동과 생태계에 미치는 영향 연구

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

(2단계 1차년도 보고서)

2013. 02



제 출 문

한국해양과학기술원장 귀하

본 보고서를 “황해 저층냉수괴의 거동과 생태계에 미치는 영향 연구” 과제의 2단계 1년차 보고서로 제출합니다.

2013. 2.

총괄연구책임자 : 강 정 훈

참 여 연 구 원 : 강돈혁, 권오윤,
고아라, 김경옥, 김미라, 김민섭, 김웅서,
김희중, 송규민, 오경희, 이균우, 이동진,
이 석, 이선희, 이하웅, 이형빈, 이홍재,
장 용, 장풍국, 조규희, 조성호, 조철호,
주세중, 최보형

위탁연구기관명 : 한양대학교

위탁연구책임자 : 신 경 훈

위탁연구기관명 : 극지연구소

위탁연구책임자 : 양 은 진

요 약 문

I. 제 목

황해 저층냉수괴의 거동과 생태계에 미치는 영향 연구

II. 연구개발의 목적 및 필요성

1. 연구개발의 필요성

- 황해저층냉수(Yellow Sea Bottom Cold Water)(수온<10°C)가 황해 유용어류자원의 주요 먹이인 요각류 *Calanus sinicus*의 over-summering site임이 밝혀지면서 황해 저층냉수괴의 생태계 구조와 기능 및 가치의 해석 필요성이 대두되고 있음
- 우리나라에서는 황해저층냉수괴를 기초로 한 해양환경특성 연구가 전무한 상태이며, 황해저층냉수괴의 특성이 가장 뚜렷한 하계철의 생태계 수직구조 특성 연구 또한 전무한 상태임

2. 연구개발의 목적

- 황해저층냉수괴 내 부유생태계 먹이망 구조 및 환경특성 그리고 상호관계 파악
- 황해저층냉수대의 시공간적 거동과 생태계 end-to-end 먹이망 구조와의 상호관계 규명
- 황해저층냉수괴 발달 전과 후의 동물플랑크톤 분포 특성 파악
- 황해저층냉수괴 대표종인 *Calanus sinicus* 이외의 잠재적 주요종 탐색
- 황해저층냉수괴 형성/발달에 따라 크릴 *Euphausia pacifica*를 포함한 동물플랑크톤의 크기별 섭식 생태 비교 및 역할 변화 규명
- 황해저층냉수괴 내의 주요 동물플랑크톤의 생존 전략을 음향산란층의 표층-저층 수직 구조와 환경자료와의 비교·분석을 통해 규명
- 황해저층냉수대 유무에 의한 생태계 구조(먹이망) 특성 규명을 하기 위해 주요 생물종에 대한 탄소 및 질소 안정동위원소 분석을 수행하여 에너지흐름 및 영양단계를 파악

III. 연구개발의 내용 및 범위

1. 연구기간

2012년 1월 1일 ~ 2012년 12월 31일

2. 연구내용 및 범위

가. 물리분야

- 황해냉수괴의 경년변동성 분석
 - 춘계/하계 정밀조사 자료와 기존자료의 분석을 통해 황해냉수괴의 시공간적 변동성과 경년변동 특성을 파악
 - 우리나라 근해 정선 자료와 바람자료, 기후자료의 분석을 통해 기후의 장기변동과 황해냉수괴의 변동에 대한 관련성 해석
 - 황해냉수괴의 변동 역학을 파악하기 위해 수치모델 구축 및 보완작업 수행
- 황해남부해역 열염전선 구조 분석
 - 열염전선에서 발생하는 수온역전현상과 열풍효과에 의한 서향류 규명
 - 서향류의 형성과 난류수의 복상에 의한 해수순환 구조 분석

나. 이화학 특성 및 식물플랑크톤

- 황해 저층냉수괴가 형성되는 황해 남동부 지역의 이화학적 요인의 분포 및 이에 따른 식물플랑크톤 생체량 변화 요인 파악
 - 냉수괴 형성 및 발달 시기 이화학적 요인의 분포 변화특성 파악
 - 식물플랑크톤 생체량에 영향을 미치는 주요 인자 파악
- 황해 저층냉수괴의 크기 변화에 따른 식물플랑크톤 생체량 및 분포 파악
 - 소형, 미소 및 초미소 플랑크톤의 군집 변화 양상 파악
- 황해 저층냉수괴의 크기별 주요 핵심종 파악
 - 상위 포식자와의 포식 관계 이해를 위한 식물플랑크톤 핵심종 파악
 - 저층 냉수괴의 변화 양상에 따른 주요 핵심종 군집 분포 파악

다. 원생동물

- 황해 냉수대의 형성 유·무에 따른 부유 원생동물 분포 및 군집 특성파악
- 식물플랑크톤에 대한 원생동물의 섭식률 분석

라. 동물플랑크톤

- 황해에서 동물플랑크톤의 군집 구조 및 분포 파악
 - 정점별로 수층을 4 또는 5개로 나누어 층별 채집
- 정점 D03에서 *Calanus sinicus* 주야 수직 이동 파악
 - 정점 D03에서 시간 간격을 두어 채집
- *C. sinicus*의 섭식 특성 조사

- 황해 해양생태계를 이해하기 위한 동물플랑크톤 잠재적 주요종 탐색

마. 크릴 및 상위 포식자

- 황해 저층 냉수대 유무에 따른 생태계 구조(먹이망) 특성 규명
 - 지방산 바이오마커를 통한 포식-피식 관계 파악
 - 계절별 황해 생태계 주요 상위 포식자(어류) 시료 확보

바. 생물음향

- 음향 산란층 수직 구조에 따른 황해냉수괴 내의 동물플랑크톤의 생존 전략 규명
 - 해양환경 차이에 따른 음향산란층 구조 차이 규명
 - 황해저층냉수괴 내의 동물플랑크톤 표층-저층 이동 특성 규명

사. 먹이망 구조

- 저층냉수대 유무에 따른 황해 생태계 구조 (먹이망) 특성 규명
- 춘/하계 하위 부유 생태계 현장조사 및 시료채집
- 계절별 주요 상위 포식자(어류) 조사 및 시료 확보
- 생지화학 마커인 안정동위원소 분석을 통한 포식-피식 관계 파악

IV. 연구개발결과

1. 물리분야

황해냉수괴의 변동성을 파악하기 위해 현장 조사를 수행함과 동시에 기존 우리나라 근해에서 관측된 정선자료와 바람 및 기후자료를 분석. 현장조사 결과 2011년 4월과 8월에 고온고염의 해수가 황해 남부해역에서 관측됨. 이는 고염수의 유입에 의한 것으로 판단됨. 여름철 황해 저층에 나타나는 고염수는 이전 시기의 겨울철과 봄철동안 동중국해로부터 관입된 고온고염수에 의한 것으로 판단됨. 겨울철 강한 북서계절풍은 황해로 관입되는 고온고염수의 주원인임. 2011년 겨울철 바람은 다른 시기에 비해 북풍이 강하고 오래 지속됨. 이 시기 북극진동지수는 강한 음의 지수를 나타냄. 이와 같은 고염수 현상은 4년 또는 10년 간격으로 발생하면서 경년변동성을 보임. 연구해역이 황해냉수괴를 다 포함하고 있지 않고 관측기간도 충분하지 않지만, 북극진동지수와 수온의 변동, 고염수와 바람과의 관계 등을 살펴봤을 때 황해냉수괴의 변동은 기후변화와 관련이 높은 것으로 판단됨. 겨울철 황해 남부해역에서는 열염전선이 형성되며, 제주난류와 황해냉수가 만나 지형류균형을 이루는 과정에서 수온역전 구조가 나타남. 밀도가 큰 고온고염수가 저온저염수 아래에 위치하면서 이중확산 layering이 발생.

열염전선의 상층에서는 열풍효과에 의해 전선을 따라 흐르는 서향류가 형성됨. 이 전선의 구조는 전선을 가로질러 흐르는 해수순환이 매우 미약함을 뜻함. 겨울철 황해난류수가 황해내부로 유입되는 것을 생각한다면 이 전선을 통과하기는 무척 어려울 것으로 판단됨. 결국 역풍류 이론에 의한 북향류는 서쪽으로 편향되어 쇄기 모양으로 전선의 끝 부분에서 유입될 수밖에 없음. 이와 같은 해수순환 구조는 겨울철 황해냉수의 분포에도 영향을 미침.

2. 이화학 특성 및 식물플랑크톤

조사 지역의 이화학적 요인들의 분포와 이들이 식물플랑크톤의 생체량에 미치는 영향을 알아보기 위해 봄철과 여름철 황해 남동부 지역을 조사하였다. 2012년 여름철은 다른 연도의 여름철과 달리 장강 희석수의 출현이 뚜렷하게 나타났으며, 이는 태풍의 진로 방향과 연관성이 있다. 봄철 표층의 엽록소-*a* 농도가 높게 나타난 곳은 외해수와 연안수가 만날 것으로 판단되는 중앙 지역이었다. 이는 두 수체에 의해서 형성된 수온 전선에 의해 식물플랑크톤이 축적되어 나타난 현상으로 판단된다. 조사 지역의 식물플랑크톤의 수직적 분포를 보면, 황해 저층냉수괴가 위치하여 수층의 안정도가 증가한 지역에서 엽록소-*a* 농도가 높게 나타난다. 여름철 조사에서도 저층냉수괴가 강하게 나타난 지역에서 엽록소-*a* 농도가 높게 나타나 저층냉수괴에 의한 수층 안정도가 식물플랑크톤 생체량을 조절하는 주요 요인으로 판단된다. 또한 조사 지역의 남측에 위치한 E 라인에서는 조석전선 및 지형적인 특성에 의해서 외해에서 연안으로 올수록 수온 약층의 깊이가 얕아지고, 이러한 수온 약층은 영양염 약층과 Subsurface Chlorophyll Maximum (SCM) 층과 일치하는 경향을 보였다. 이는 수온 전선 내의 영양염 공급과 수층의 안정도 증가가 식물플랑크톤 생체량에 중요한 요인으로 작용하는 것을 의미한다. 봄철 위도별 식물플랑크톤 군집의 분포 양상은 고위도 정점 (A03, A05, A06, A07) 표층에서 *Thalassiosira nordenskioldii*, *T. proschkiniae*, *Skeletonema costatum*, *Leptocylindrus danicus*와 같은 규조류가 우점종을 나타냈다. 그러나 D line (D03, D05, D06, D07) 표층의 제 1우점종은 unidentified nanoflagellates 가 21.4%의 우점율을 보여 A line 정점과 다른 경향을 보였다. E line (E01, E03, E05, E07) 정점의 표층 제 1우점종은 D line과 같이 unidentified nanoflagellates 가 28.1%로 유사한 경향을 보였고, *Chaetoceros compressus*가 14.1%로 제 2 우점종을 차지하였다. 이전 데이터와 비교시 식물플랑크톤 우점종은 조사 정점에서 춘계에 규조류인 *Sk. costatum*과 *T. nordenskioldii*가 항시 우점하는 종으로 나타나 대표종으로 판단된다. 그러나 하계에는 A 라인에서 *T. proschkiniae*가 E 라인에서는 nano-flagellates 그룹이 그 크기에 변화가 있지만, 항시 우점 하는 것으로 나타났다. 하계에 저층냉수는 수온이 10°C 이하로 식물플랑크톤 군집 중 규조류가 조사 정점에서 우점종을 차지하였다. 이 때 식물플랑크톤 우점종은 *S. costatum*, *Paralia sulcata*,

Chaetoceros spp. 가 차지하였다.

3. 원생동물

중속영양 원생동물의 생물량 분포와 섭식압을 조사하기 위하여 2012년 춘계와 하계에 조사를 수행하였다. 조사수역에서 중속영양 원생동물의 생물량은 춘계와 하계에 큰 차이를 보였으며, 하계에 비하여 춘계에 상당히 높은 생물량을 보였다. 그러나 두시기 모두 중속영양와편모류 보다는 섬모충류에 의하여 80% 이상의 높은 우점율을 보였다. 춘계에 중속영양 원생동물의 분포는 엽록소-a 농도의 분포와 높은 상관관계를 보이는 것으로 나타났으며($r=0.682$, $p<0.01$), 하계에는 큰 상관성을 보이지 않았다. 조사수역에서 춘계에 조사된 식물플랑크톤에 대한 중속영양 원생동물의 섭식압은 평균 65.7 % 로 나타났다. 이와 같은 결과는 황해의 춘계시기에 식물플랑크톤에 의해 생산된 탄소의 많은 부분은 원생동물을 통해 동물플랑크톤에게 전달될 수 있음을 시사한다.

4. 동물플랑크톤

황해에 우점하는 요각류는 *Calanus sinicus*, *Oithona atlantica*, *O. similis*, *Paracalanus parvus* s.l., *Corycaeus affinis*, *Acartia*속에 속하는 세 종 (*A. hongii*, *A. omorii*, *A. hudsonica*)이 나타났다. 황해 중심에 가까운 정점과 연안 정점 간에 동물플랑크톤 군집 구조 차이를 보였다. 춘계에는 연안 정점에서 해파리 및 극피동물과 같은 분류군들의 유생들이 대량 발생함. 하계의 경우는 유형류와 야광충이 연안 정점에서 높은 출현량을 보였다. E-line의 정점들은 고온고염의 난류수의 유입으로 A-line의 정점들과 동물플랑크톤 군집구조 차이를 보였다. 하계에는 지각류가 출현하여 황해의 동물플랑크톤 군집의 계절변화를 보였고, 냉수종으로 알려진 *Oithona atlantica*의 공간분포특성을 통해서 다른 종들보다 *C. sinicus*와 함께 저층냉수괴 내에서의 역할이 고려되어야 할 잠재적 종으로서 가능성이 나타났다.

5. 크릴 및 상위 포식자

본 연구에서는 황해의 동물플랑크톤, 특히 *Euphausia pacifica*, 은 수산자원의 주요 먹이원 일 뿐만 아니라 생태계에서도 기초생산자(식물플랑크톤)와 상위포식자간을 연결하는 중요한 매개체 역할을 담당하고 있다. 따라서 황해 생태계가 기후/환경변화에 대한 영향 파악을 하기 위해서는 *Euphausia pacifica*의 에너지 저장전략과 섭식생태 그리고 더 나아가 먹이망 구조를 정확히 파악하는 것은 필수적이다. 따라서 춘, 하계 현장조사와 계절별 주요 어시장 방문을 통해 *E. pacifica*를 비롯하여 동· 식물플랑크톤과 상위포식자(어류) 시료를 확보하여, 지방 함량 및 지방산 먹이 추적자를 분석하였다. 그 결과, *E. pacifica*의 지방함

량은 춘계 (건중량의 $16.22 \pm 0.42\%$)가 하계 (건중량의 $8.41 \pm 3.04\%$)보다 약 1.5-2배 정도 높게 나타났다. 그리고, 채집지역에 따른 차이가 춘계에는 나타나지 않았으나, 하계에는 남쪽 (건중량의 $10.56 \pm 2.24\%$)이 북쪽 (건중량의 $6.26 \pm 1.19\%$)에 비해 높은 지방함량을 보였다. 이러한 계절별 지방함량의 차이는 춘계에 집중된 *E. pacifica* 산란 때문에 체내 에너지 저장 (지방함량)이 높은 것으로 추정할 수 있다. 이러한 황해 크릴의 지방함량은 타 해역 (미국 서부연안)의 크릴과 유사한 범위를 가지는 것으로 나타났다. 입자유기물과 동물플랑크톤의 지방산 구성에 따르면, 연안의 유기물 중상당한 부분이 육상 기원으로 나타났으며, 냉수권 지역은 현장에서 기초 생산자에 의해 생산된 유기물이 전적으로 우세한 것으로 나타났다. 특히 하계 크릴의 먹이원 (탄소 기원)이 모든 채집 지역에서 유사한 반면, 춘계에는 공간적으로 매우 다양하게 나타나고 있다. 가장 작은 크기의 동물플랑크톤 그룹의 지방산 구성은 계절에 관계없이 입자유기물의 지방산 구성과 일치하고 있는 것으로 나타났다. 이러한 결과에 따르면, 특히 크릴의 경우 먹이생물이 부족하고 표층수온이 매우 높은 하계 동안 하층의 냉수대에만 주로 서식, 섭식하고 있음을 재확인할 수 있었다.

6. 생물음향

○ 황해저층냉수권 내의 음향산란층과 환경자료와의 비교 분석을 통한 주요 동물플랑크톤 표층-저층 이동 특성 규명을 하였다. 음향기법을 이용, 음향산란층의 주·야 및 계절별 표층-저층 수직이동 자료획득 하였고, 황해저층냉수권 해역의 음향산란층은 춘계시기에는 전 수층에서, 하계시기에는 높은 표층수온($< 25^\circ\text{C}$)으로 수온약층 아래와 해저면 사이에서 주·야 수직이동 하는 것을 확인 되었다. 부유물질의 농도가 높은 일부정점에서 주간시기에 음향산란층 수심과 부유물질 농도와의 연관성을 보였다. 본 연구를 통해서 황해저층냉수권 해역에서 동물플랑크톤 표층-저층 이동시 수온 및 부유물질 농도의 환경적인 요소 규명 하였다.

7. 먹이망 구조

탄소 안정동위원소비 분석 결과 크릴은 해양플랑크톤을 주 먹이원으로 섭식하고 있음을 유추할 수 있었으며, 우럭은 해양플랑크톤과 치어, 소형어류 등을 섭식하는 것으로 사료되고, 홍어, 낙지, 게는 저서성 어종의 섭식활동을 나타내고 있는 것으로 해석되었다. 또한, 크릴과 어류는 각각의 탄소와 질소 안정동위원소비의 분포가 확연히 구분되는 것으로 분석되었다. 정점별 분석결과 각 정점에서 서식하는 크릴은 춘계에는 저층POM(BOT)을 먹이원으로 주로 섭식하고 있는 것으로 생각되나, 하계에는 먹이원들과의 안정동위원소비 연관성이 없어 주위의 먹이원을 섭식하고 있지는 않은 것으로 판단된다. 크릴의 안정동위원소

비를 춘계와 하계로 살펴본 결과 크릴은 춘계와 하계 때의 안정동위원소비 분포 패턴이 다르게 나타남을 확인할 수 있었으며, 이는 춘계와 하계의 먹이섭식 활동 형태가 다르다는 것을 나타내고 있는 것으로 해석할 수 있다.

V. 연구개발결과의 활용계획

1. 물리분야

- 장기기후변화는 황해냉수괴의 변동성을 초래함, 이는 황해냉수괴가 기후변동의 영향을 가늠하는 지표로 사용될 수 있음을 시사
- 황해냉수괴의 특성을 파악함으로써 이에 반응하는 생태계의 하위영향단계 변화의 상향조절을 통해 수산자원의 변동 예측이 가능할 것으로 기대
- 황해냉수괴에서 에너지 흐름을 이해하기 위한 해양생물 먹이망에 대한 결과는 기후변화에 따른 한반도 주변해역의 해양 생태계 변화를 예측하는 모델 연구에 중요한 자료로서 활용 가능

2. 이화학 특성 및 식물플랑크톤

- 황해 저층냉수괴에 의한 이화학적 요인들의 영향과 이들에 의한 식물플랑크톤의 생체량의 변화에 대한 이해는 향후 황해 저층냉수괴의 변화에 따른 황해 해역의 생태계 변동 예측 연구에 중요한 자료로 활용 가능
- 황해 저층냉수괴의 발달 전 후 시기의 식물플랑크톤 주요 핵심종을 파악함으로써 상위 단계의 포식자와의 에너지 흐름에 관한 연구 방향을 제시

3. 원생동물

- 황해 냉수대의 미세생물 먹이망 구조와 변동성 이해
- 황해 저층냉수대와 관련된 황해 생태계에서 에너지 흐름과 생태계 구조 변화 예측

4. 동물플랑크톤

- 황해의 *Euphausia pacifica* 산란시기(춘계)를 확인할 수 있었으며 해양생태계 내에서의 생존 전략을 이해하는데 중요한 정보를 제공
- 황해 주요 먹이원인 동시에 해양생태계 에너지 전달에 있어 중요한 동물플랑크톤의 양 및 분포특성의 기초적인 자료 제공
- 황해의 주요종인 *Calanus sinicus* 이외 황해 생태계를 이해하는데 있어 잠재종으로 *Oithona atlantica*를 발굴하여 향후 이들의 황해 해양생태계 내의 역할을 이해하기 위한 연구방향을 제시

5. 크릴 및 상위 포식자

- 황해 생태계에서 먹이망 구조 및 에너지 흐름 이해는 기후변화에 따른 황해 생태계 변동 예측 연구에 중요 자료로 활용 가능

6. 생물음향

- 황해저층냉수괴 내의 음향조사 결과를 이용, 황해 내의 음향산란층의 시·공간적인 분포 및 양의 기초적인 자료를 제공
- 생물음향조사 결과를 이용, 기후 변화에 따른 황해 해양환경 변화 (저층냉수괴변화)가 해양 생태계에 미치는 영향을 예측하기 모델 연구에 기초 자료로서 활용가능

7. 먹이망 구조

- 황해저층냉수괴 지역은 동북아시아 지역에서 매우 관심이 높은 지역으로 국제적 수준의 결과로서 활용할 수 있음
- 기후변화로 인한 생태계 변동성 연구에 있어서 기초적인 자료로 매우 유용할 것으로 기대됨

S U M M A R Y

I . Title

The study on the impact of the Yellow Sea Bottom Cold Water Mass to the ecosystem

II . Necessities and Objectives of the Study

1. Necessities of the Study

- The Yellow Sea ecosystem needs management in terms of large marine ecosystem's view because environmental capacity of the ecosystem is nearly on the edge of their tolerance by inappropriate anthropogenic activities.
- Spatial and temporal variabilities of oceanographic structures considering YSBCW characteristics are required for sustainable and systematic management of environment in the Yellow Sea.

2. Objectives of the Study

- Surveys about oceanographic features of YSBCW, which support marine fishery resources, could be practical data for making estimates of major fisheries resources in the Yellow Sea.
- The sustainable investigation of characteristics of YSBCW is available to induce public interest which help to conserve and protect the ecosystem from the marine pollutant, overfishing and drifting sewage problems.

III . Contents and Scopes of the Study

1. Research period

January 1, 2012 - December 31, 2012

2. Contents and scopes of the study

a. Physical system

- Interannual variability of the Yellow Sea Cold Water Mass (YSCWM)
 - Characteristics on the interannual variability and temporal/spatial variation of the YSCWM through the KODC data and field survey in April/August
 - Identify the relation between the YSCWM variation and long-term climate fluctuation by the analysis of the available hydrographic, wind and climate data
 - Development and validation of a numerical model for understanding the dynamics of the YSCWM variability
- Study on the thermohaline frontal structure in the southern Yellow Sea
 - Identify the westward flow by the thermal wind effect and temperature inversion in the thermohaline front area
 - Analysis on the circulation structure by formation of the westward flow and the northward intrusion of the warm and saline water

b. Chemical factors and Phytoplankton

- The effect of Yellow Sea Bottom water on the environmental factors and phytoplankton biomass
 - To understand the spatial the temporal distribution of environmental factors and their effects on phytoplankton biomass in the southeast of Yellow Sea.
 - To understand the role of Yellow Sea Bottom Water on the environmental factors and phytoplankton biomass
- The effect of Yellow Sea cold bottom water on the phytoplankton distribution

c. Protozoa

- To understand the role of heterotrophic protozoa in the microbial food web in the Yellow Sea Bottom Cold Water.
- Investigation the abundance and community structure of heterotrophic

protozoa

- Analysis of grazing impact on phytoplankton

d. Zooplankton

- To investigate the vertical distribution of Zooplankton community in the Yellow sea during spring and summer
- The stratified collection for zooplankton at each station with four or five depths strata
- To understand the vertical distribution of *C. sinicus* at station D03
- The 3 hour interval collection of *C. sinicus* at station D03 with five depths strata
- To estimate the gut pigment of *C. sinicus* female
- To search the potentially major species of zooplankton to understand Yellow sea planktonic ecosystem

e. Krill and Prey-predator relationship

- To understand the structure (food-web) of Yellow Sea ecosystem
- To determine the prey-predator relationship using lipid biomarkers
- To collect upper trophic level organisms throughout seasons

f. Bio-acoustic

- Survival strategy of identifying the major zooplankton in the Yellow Sea Bottom Cold water.

g. Food-web structure

- In situ investigation of downward water column ecology and sampling in Spring/Summer.
- Seasonal investigations of higher consumer (fish) and sampling
- Investigation of relation between diet and consumer through stable isotope analysis.

IV. Results

1. Physical system

A distinct warm and saline event occurred in the southern part of the YS in April and August 2011 due to the intrusion of warm and saline water from the ECS. We can expect that the saline event in the bottom layer in August 2011 was induced by the saline water intrusion from the ECS during the previous winter and spring. The strong northerly wind is considered to be a main driving force of the warm and saline water intrusion into the YS. The wind data show that the northerly wind in 2011 winter season was much stronger and lasted for longer than that in the previous two winter seasons. The reason of this phenomenon could be confirmation by variation of the Arctic Oscillation index. This saline events happened 4- to 10-year intervals and it shows a distinct interannual variation. In spite of the limitations, we can suggest that the variation of the YSCWM are closely related to the atmospheric variability at the sea surface. A tongue shape thermohaline is closely related on the intrusion of warm and saline water, known as the Yellow Sea Warm Current, into the Yellow Sea from the East China Sea. The warm and saline Cheju Warm Current Water is denser than the cold and fresh Yellow Sea Cold Water. In wintertime, the two water mass are boarded each other, the interface of them forms tilted front in vertical by the geostrophic adjustment. In this case, theoretically, a westward thermal wind should be induced in upper layer, while a eastward flow should be induced in lower layer. It is hard to consider the existence of a cross frontal flow through the thermohaline front. The westward flow along the front may shift the northward intrusion of warm and saline water toward western flank of the Yellow Sea Central Trough.

2. Chemical factors and Phytoplankton

We investigated spatial and temporal variation in physiochemical parameters in the southeastern Yellow Sea in spring and summer of 2012. The Changjiang Diluted Water appeared the study area due to the appearance of typhoon in summer. Nutrients showed a strong negative

relationship with chlorophyll-a (Chl-a) in spring, and the subsurface chlorophyll-a maxima (SCM) layer was associated with the nitracline in summer. In summer, the SCM was usually found within or above the pycnocline and at the depths of shoals from the open sea to the coastal sea due to tidal and/or topographical fronts in the southern most study area. High Chl-a concentrations were found in the central southern YS, where the YS Cold Water layer expanded under the pycnocline and encountered water masses during spring and summer.

3. Protozoa

To investigate grazing impact and community structure of heterotrophic protozoa in the Yellow Sea Bottom Cold Water (YSBCW), we collected water sample in spring and summer, 2012. Biomass of heterotrophic protozoa was much higher in spring than summer. In spring and summer, ciliates was the most dominant component, and biomass of ciliates comprised over 80% of total heterotrophic protozoa. Biomass of heterotrophic protozoa correlated well with chlorophyll-a concentration in the spring ($r^2=0.682$, $p<0.01$). Heterotrophic protozoan grazing impacts in the spring season accounted for 65.7 % of potential phytoplankton production. However, a high proportion of carbon production by phytoplankton would be channeled to the heterotrophic protozoa. The results suggest that heterotrophic protozoa is important consumers of phytoplankton and may represent a significant food resource for mesozooplankton.

4. Zooplankton

Dominant copepods are *Calanus sinicus*, *Oithona atlantica*, *O. similis*, *Paracalanus parvus s.l.*, *Corycaeus affinis*, and three species of genus *Acartia* (*A. hongii*, *A. omorii*, *A. hudsonica*) in Yellow sea. And spatial variation of zooplankton community - at offshore stations vs. inshore stations. The high abundance of hydromedusae and echinordemata larvae at inshore stations in spring. The high abundance of appendicularians and *Noctiluca scintillans* at inshore stations in summer. And variation of zooplankton composition between E-line and A-line (whether or not appendicularians related to the

inflow of warm water appears). Seasonal variation of zooplankton composition in Yellow sea. And cladocerans appeared only in summer. The *Oithona atlantica*, known as cold water species may be the potentially major species to be considered the role of Yellow Sea Bottom cold Water.

5. Krill and Prey-predator relationship

Zooplankton, especially *Euphausia pacifica* (hereafter named 'krill'), play a key role in the Yellow Sea ecosystem, where they are key grazers on phytoplankton (primarily) and are major prey items for many upper trophic level species, including many commercially important fishes. Given that, it is essential for scientists, modelers, and managers to understand their feeding ecology and more solidly establish the food-web structure in Yellow Sea ecosystem. Therefore, we collected zooplankton, including krill, with particulate organic matter (POM) at the selected sampling stations in the south part of Yellow Sea during April (spring) and August (summer) 2012. All samples (POM and 4 size-grouped zooplankton) were analyzed for lipid biomarkers (total lipid, fatty acids, etc) to track the spatial and temporal variability of diet (carbon) source of zooplankton. *E. pacifica* from the spring (16.52% of dry mass) had slightly higher lipid content than those from summer (10.56% of dry mass) because major spawning (high energy demands) occurs in the spring. However, the level of lipid contents in krill from Yellow Sea was not significantly differed from krill from the California coast. The previous study suggest that krill utilize the Yellow Sea Bottom Cold Water mass ($\leq 10^{\circ}\text{C}$) as their over-summering refuse site during the summer when the temperature of the surface reaches $\geq 28^{\circ}\text{C}$ with low food availability. Several fatty acid components in *E. pacifica* showed spatial and temporal variability. Particularly, algal (i.e., diatom, dinoflagellate) origin fatty acids (20:5(n-3), 22:6(n-3), and other polyunsaturated fatty acids) were most abundant in the spring and summer except for krill from the south region in the spring, whereas microbial-origin (i.e., detritus, protozoa) fatty acids (Branched FA) were slightly increased from the spring to the summer. Based on the results of the principle component analysis of fatty acid profiles in krill and POM, relatively significant fraction of allochthonous

organic matter contributed in the coast region, whereas the organic carbons in the offshore, including the bottom cold mass, is dominated by autochthonous origin coming from in-situ production. Additionally, fatty acid composition of the smallest size-grouped zooplankton (0.2-0.5 mm) were very similar to that of POM (<0.7 μm) regardless of seasonal change. The results of this study also confirm that the habitat (foraging area) of krill could be very limited within the Yellow Sea Bottom Cold Water Mass during the summer.

6. Bio-acoustic

To know what are limiting factors for migration of the sound scattering layer (SSL). As the limiting factors that affects vertical migration, temperature/beam attenuation data were chosen. The beam attenuation data is an index for density or volume of the suspended particle materials (SPM). As a temperature factor, the SSL migration has a general pattern that moved near the surface layer at night time and near the bottom layer at day time. Another factor, beam attenuation value with depth was related to migration depth at day time. The SSL at day time has a tendency to migrate not to near the bottom but to high beam attenuation layer. high density of the SPM acts on the barrier of the SSL migration.

7. Food-web structure

Carbon and nitrogen isotope ratios between fish and krill were clearly separated. It is defined that major diet source of krill sampled in each study site is bottom particulate organic matter (BOT) in spring while carbon and nitrogen isotope ratios of krill and diet source sampled in summer have not shown any relation. It was observed that different patterns for isotope ratios of krill between sampling seasons (spring and summer). These different patterns could be interpreted that feeding behavior of krill might be different between spring and summer.

V. Application plans of the study results

1. Physical system

- The long-term climate change leads to interannual variability of the YSCWM. It suggested that the YSCWM can be used as an indicator to determine the impact of climate change.
- We will expect to predict the fluctuation of fisheries resources through control of low level of the ecosystem.
- The result about the food web of marine organism which is to understanding of energy flow in YSCWM can be available on the development of the model to predict the variation of marine ecology for climate change in the sea around the Korean peninsula.

2. Chemical factors and Phytoplankton

- Understanding of the variation of the environmental parameters by the effect of Yellow Sea Bottom Cold Water will be used to predict the future impact of the change of Yellow Sea Bottom Cold Water in the ecosystem of Yellow Sea.
- Provide information on the environmental factors and their effect of phytoplankton community structure in Yellow Sea Bottom Cold water.

3. Protozoa

- To understand the variation and structure of microbial food web in the YSBCW
- To predict the structure change and energy dynamics of basic ecosystem in the Yellow Sea related to cold bottom water.

4. Zooplankton

- The main reproductive season of *Euphausia pacifica* is Spring. It will provide important information for understanding the survival strategies of *Euphausia pacifica* within the marine ecosystem of Yellow Sea.
- Providing information for abundance and distribution of zooplankton community will be used to understand the energy flow in marine

ecosystem of Yellow Sea.

- *Oithona atlantica* could be the potentially major species in Yellow Sea cold water mass.

5. Krill and Prey-predator relationship

- Understanding the food-web structure and energy flow in the marine ecosystem of the Yellow Sea will be used to predict the future impact of climate change on the marine ecosystem in the Yellow Sea.

6. Bio-acoustic

- Provide information on the spatial/temporal distribution pattern of sound scattering layer (SSL) in Yellow sea bottom cold water.
- Provide information on the diel/seasonal migration pattern of sound scattering layer (SSL) in Yellow sea bottom cold water.

7. Food-web structure

- Because yellow sea bottom cold water area is interested area among east north asia, result of this study can be applied to international grade.
- It is expected that this result can be useful basal reference for research of ecological variability caused by climate change.

Keywords ; Interannual variability of the YSCWM, thermohaline front in YS, the westward flow in frontal, phytoplankton biomass, heterotrophic protozoa, microbial food web, grazing impact, zooplankton community, gut pigment, *Calanus sinicus*, *Oithona atlantica*, *Euphausia pacifica*, lipid biomarkers, trophodynamics, hydroacoustic survey, sound scattering layer, diel/seasonal migration, limiting factor, stable isotope, foodweb, carbon, nitrogen

C O N T E N T S

Summary	i
Chapter 1. Outline of the study	1
Section 1. Necessities of the study	1
Section 2. Objectives and contents of the study	5
Chapter 2. States of technical trends and outlook	8
Section 1. Trends of study in Korea	8
Section 2. Trends of study in foreign countries	14
Chapter 3. Results of the study	19
Section 1. Physical system	19
Section 2. Chemical factors and Phytoplankton	72
Section 3. Protozoa	85
Section 4. Zooplankton	95
Section 5. Krill and Prey-predator relationship	113
Section 6. Bio-acoustic	130
Section 6. Food-web structure	137
Chapter 4. Achievements of objectives and contributions to the related area	148
Section 1. Achievements of objectives	148
Section 2. Contributions to the related area	152
Chapter 5. Application plans of the study results	154
Chapter 6. References	156

목 차

요약문	i
제 1 장 서론	1
제1절 연구개발의 필요성	1
제2절 연구개발 목표 및 내용	5
제 2 장 국내외 기술개발 현황	8
제1절 국내 연구동향	8
제2절 국외 연구동향	14
제 3 장 연구개발수행 내용 및 결과	19
제1절 물리환경분야	19
제2절 이화학특성 및 식물플랑크톤	72
제3절 원생동물	85
제4절 동물플랑크톤	95
제5절 크릴 및 먹이관계	113
제6절 생물음향	130
제7절 먹이망 구조	137
제 4 장 연구개발목표 달성도 및 대외 기여도	148
제1절 목표 달성도	148
제2절 대외 기여도	152
제 5 장 연구개발결과의 활용계획	154
제 6 장 참고문헌	156

Figure List

- Fig. 3.1.1.1. Study area with bathymetry contours (in meters). 20
- Fig. 3.1.1.2. Horizontal circulation patterns near 50 m depth (Kondo, 1985). 22
- Fig. 3.1.1.3. 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). 22
- Fig. 3.1.1.4. Seasonal variation of the vertical structures of temperature and salinity at the 35°N. 23
- Fig. 3.1.1.5. Water masses in February and August at the southeastern Yellow Sea. 24
- Fig. 3.1.1.6. Horizontal distribution of temperature at 50 m depth layer (left) and bottom layer (right) in August (China Ocean Press, 1992). 24
- Fig. 3.1.1.7. Study area with the CTD casting stations during 2009~2012. 27
- Fig. 3.1.1.8. Sea surface temperature image from NOAA in Feb. 16, 2003 with the CTD casting stations (+), Ocean data buoy (☆) and drifter (◇). 28
- Fig. 3.1.1.9. T-S diagrams in April (upper) and August (lower), from 2009 to 2012. 30
- Fig. 3.1.1.10. Horizontal distributions of temperature and salinity at 2m depth in April, 2010 to 2012. 32
- Fig. 3.1.1.11. Horizontal distributions of temperature and salinity at 50m depth in April, 2010 to 2012. 33
- Fig. 3.1.1.12. Horizontal distributions of temperature and salinity at 2m depth in August, 2009 to 2010. 34
- Fig. 3.1.1.13. Horizontal distributions of temperature and salinity at 2m depth in

August, 2011 to 2012.	35
Fig. 3.1.1.14. Horizontal distributions of temperature and salinity at 50m depth in August, 2009 to 2010.	36
Fig. 3.1.1.15. Horizontal distributions of temperature and salinity at 50m depth in August, 2011 to 2012.	37
Fig. 3.1.1.16. Variation of the isothermal 10°C at the 50m depth in August, 2009 to 2012, represented by the thick line. Black contours show the mean temperature during 22 years at 50m depth by KODC.	39
Fig. 3.1.1.17. Time series of temperature and salinity at the 50m depth in April during the 1990 to 2011. The solid lines represented the variation of temperature at 124.39°E, 34.717°N, and the dotted lines means the variation at 125.°E, 34.717°N.	40
Fig. 3.1.1.18. Horizontal distribution of temperature and salinity at 50m depth in April, 1992 and 2011(KODC).	42
Fig. 3.1.1.19. Study area with wind data station (diamonds for NCEP2 and circle for local WRF model) and the KODC data marked with the triangle symbol. Bathymetry contours are shown in meters.	43
Fig. 3.1.1.20. Variation of the North-south components of daily mean wind at 124.5°E, 36°N by the high resolution Weather Research and Forecast (WRF) model during winter season, 2009 to 2011.	44
Fig. 3.1.1.21. Correlation of wind (North component) from NCEP2 and salinity at 124.4°E, 34.0°N during 1991 and 2010.	45
Fig. 3.1.1.22. Time series of the Arctic oscillation index from 1990 to October 2012 (NOAA).	46
Fig. 3.1.1.23. Variation of temperature anomalies at 124.4°E -36.9°N, 36.3°N, 35.85°N, 35.3°N, 34.0°N with the AO index, (a) surface temperature anomalies in April, (b) temperature anomalies at 50 m depth in August.	47

Fig. 3.1.1.24. Vertical distributions of temperature at section C, D, E and F shown in Fig. 3.1.1.8.	48
Fig. 3.1.1.25. Dash-dot lines are isopleths of along shelf current (isotachs) in the adjusted state. Open dashed lines are fronts.	49
Fig. 3.1.1.26. The ADCP data temperature($^{\circ}\text{C}$) (a) U-component(cm/s) (b) V-component(cm/s) \odot on the ocean data buoy shown in Fig. 3.1.1.8.	50
Fig. 3.1.1.27. (a) Background stratification (WS/CF) during a ‘‘rundown’’ salt-fingering experiment. The net fluxes, shown schematically as arrows, are proportional to the difference between the initial (dashed) and final (solid) profiles. (b) Diagram of tank containing salt-finger interface between well-mixed layers. (c) Magnified view of salt-fingers showing the mechanism of the instability. (d) Background stratification (CF/WS) for a diffusive sense convection experiment, with a diffusive interface and well-mixed layers above and below. (e) Diagram of tank showing convecting layers and diffusive interface.	52
Fig. 3.1.1.28. This sketch illustrates the definition of the Turner angle, T_u (degree), with corresponding R_{ρ} value indicated. Double-diffusion is scaled in low, medium and strong conditions (You, 2002).	54
Fig. 3.1.1.29. Vertical structure of temperature and Turner angle at section C, D, E and F.	55
Fig. 3.1.1.30. Water masses distribution at section D in the frontal area.	56
Fig. 3.1.1.31. Domain and depth of the MOHID.	58
Fig. 3.1.1.32. Monthly mean temperature at 50m depth in February, (a) Moon et al.(2009), (b) HYCOM (2009–2010).	60
Fig. 3.1.1.33. Monthly mean temperature at 50m depth in August, (a) Moon et al.(2009), (b) HYCOM (2009–2010).	61

Fig. 3.1.1.34. Surface monthly mean temperature of the surface layer in 2010.	62
Fig. 3.1.1.35. Monthly mean temperature of the 51 m depth layer in 2010.	63
Fig. 3.1.1.36. Vertical temperture distributions of the observation and calculated by MOHID in August 2009, 2010 and 2011.	64
Fig. 3.1.1.37. Vertical salinity distributions of the observation and calculated by MOHID in August 2009, 2010 and 2011.	65
Fig. 3.1.1.38. Vertical salinity distributions of the observation and calculated by MOHID in April 2010 and 2011.	66
Fig. 3.1.1.39. Prediction results of the HYCOM (left) and MOHID (right) of the surface salinity in April 2011.	67
Fig. 3.1.1.40. Monthly mean current at 50m depth without tide in Feburary, (a) Moon et al.(2009), (b) MOHID (2009–2010).	69
Fig. 3.1.1.41. Monthly mean current at 50m depth with tide in Feburary, (a) Moon et al.(2009), (b) MOHID (2009–2010).	70
Fig. 3.1.1.43. Surface temperature field by ECMWF (left) and the beginning results by MOHID (right).	71
Fig. 3.2.1.1. Map showing the study area and sampling station in the southern Yellow Sea. Stations discussed in detail are marked by filled circles. The CS line is composed of meridional stations in the center of the Yellow Sea and the E line is composed of zonal stations in the southernmost portion of the study area.	73
Fig. 3.2.1.2. Spatial distribution of temperature (°C), salinity, nitrate (µM), phosphate (µM), silicate (µM) and chlorophyll-a (µg L ⁻¹) in the surface water of study area.	76
Fig. 3.2.1.3. Spring profiles of temperature (°C), salinity, nitrate(µM ⁻¹), phosphate (µM), silicate (µM), and chlorophyll-a (µg L ⁻¹) in (A) the CS and (B) E lines in April 2012.	78

Fig. 3.2.1.4. Temperature - salinity diagram of the CS line and the E line in spring and summer 2012. Identified water masses are the Yellow Sea Surface Water (YSSW), the Yellow Sea Cold Water (YSCW), the Kuroshio-East China Sea (KE, which is split into a surface layer, KES, and a subsurface layer, KEB, in the summer), and the Changjiang Diluted Water (CDW).	79
Fig. 3.2.1.5. Summer profiles of temperature (°C), salinity, nitrate(μM^{-1}), phosphate (μM), silicate (μM), and chlorophyll-a ($\mu\text{g L}^{-1}$) in (A) the CS and (B) E lines in August 2012.	80
Fig. 3.2.1.6. Vertical profiles of chlorophyll a at A, D and E lines in the Yellow Sea	82
Fig. 3.2.1.7. The ratio of size-fractionated chlorophyll a at A, D and E lines in the Yellow Sea.	82
Fig. 3.2.1.8. Flow chart of selection on major species.	84
Fig. 3.3.1.1. Abundance distribution of heterotrophic protozoa in spring(A) and summer(B).	88
Fig. 3.3.1.2. Distribution of heterotrophic protozoan carbon biomass in the study area.	89
Fig. 3.3.1.3. Relationship of heterotrophic protozoan biomass and chlorophyll-a concentration.	91
Fig. 3.3.1.4. Grazing impact of heterotrophic protozoa on phytoplankton and regional comparisons of grazing impact reported in the world ocean.	93
Fig. 3.3.1.5. Future study plan using the heterotrophic protozoa in YSBCW. ...	94
Fig. 3.4.1.1. Working principles for the gut fluorescence method (ICES zooplankton methodological manual, p.329, Fig. 8.5).	99
Fig. 3.4.1.2. The regional patterns in vertical distribution of taxon in Zooplankton in the Yellow sea in spring.	102

Fig. 3.4.1.3. The regional patterns in vertical distribution of taxon in Zooplankton in the Yellow sea in summer.	103
Fig. 3.4.1.4. The variation in the vertical distribution of taxon in zooplankton and <i>Calanus sinicus</i> according to the developmental stage in the Yellow Sea in Spring.	106
Fig. 3.4.1.5. The variation in the vertical distribution of taxon in zooplankton and <i>Calanus sinicus</i> according to the developmental stage in the Yellow Sea in summer.	108
Fig. 3.4.1.6. Gut pigment contents of <i>C. sinicus</i> in spring.	109
Fig. 3.4.1.7. The vertical variation in gut pigment contents of <i>C. sinicus</i> in spring.	111
Fig. 3.4.1.8. The variation in the vertical distribution of <i>Oithona atlantica</i> in the Yellow Sea in April and August 2011, and April and August 2012.	112
Fig. 3.5.1.1. Spatial distribution of the number of <i>Euphausia pacifica</i> egg in the Yellow Sea from March to December in the Yellow Sea (Sun 2008).	115
Fig. 3.5.1.2. Map of the study area with sampling stations during a) spring and b) summer 2012.	117
Fig. 3.5.1.3. Relationship between brood size (the number of eggs/female) and total length(mm) of female <i>E. pacifica</i> in various regions.	122
Fig. 3.5.1.4. Total lipid content and class composition of <i>Euphausia pacifica</i> in the Yellow sea during the spring (April) and summer (August), 2012.	124
Fig. 3.5.1.5. Seasonal variation of total lipid contents (in % of dry mass, DS) with different life stages. Black and red (from 2011)/blue (from 2012) colored symbols indicate lipid values in krill from California current system and Yellow Sea, respectively. Gray shaded areas	

indicate the winter season. Lipid data from California taken from Ju et al. (2009).	124
Fig. 3.5.1.6. Relative abundance (%) of individual fatty acids in <i>E. pacifica</i> adults from selected sampling stations during the spring and summer, 2012.	126
Fig. 3.5.1.7. Relative abundance (%) of grouped fatty acids in <i>E. pacifica</i> adults from selected sampling stations during the spring and summer, 2012.	127
Fig. 3.5.1.8. Two-dimensional PCA score plots based on fatty acid profiles of a) particulate organic matter and b) krill in spring (green colored circle) and summer (red colored square), 2012.	127
Fig. 3.5.1.9. Relative abundance (%) of grouped fatty acids in particle organic matter (POM) and four groups zooplankton (0.2–0.5 mm, 0.5–1.0 mm, 1.0–2.0 mm, 2.0–5.0mm) from selected sampling stations during the spring and summer, 2012.	129
Fig. 3.6.1.1 Locations of the hydroacoustic survey sites in the Yellow Sea during April and August in 2012.	131
Fig. 3.6.1.2 Experimental set up for hydroacoustic surveys.	132
Fig. 3.6.1.3 A sample echogram for post-processing of acoustic data.	133
Fig. 3.6.1.4 A sample echogram of sound scattering layer from 200 kHz signal in the YSBCW (day–night time, April 2012).	133
Fig. 3.6.1.5 A sample echogram of sound scattering layer from 200 kHz signal in the YSBCW (night time, August 2012).	134
Fig. 3.6.1.6. A echogram of sound scattering layer during daytime at April 2011, (a) B–line and (b) E–line.	134
Fig. 3.6.1.7. A echogram of sound scattering layer in April 2012, (a) B04, (b) B03, (c) E07 and (d) E05.	136

Fig. 3.6.1.8. A echogram of sound scattering layer in August 2012, (a) E01 (b) E02 (c) F06 and (d) F07.	136
Fig. 3.7.1.1 Plots of $\delta^{13}\text{C}$ versus $\delta^{15}\text{N}$ for samples collected in the Yellow sea in spring 2012.	140
Fig. 3.7.1.2 Plots of isotopic ratios signature at station A03 in this study.	141
Fig. 3.7.1.3 Plots of isotopic ratios signature at station A05 in this study.	142
Fig. 3.7.1.4 Plots of isotopic ratios signature at station A07 in this study.	143
Fig. 3.7.1.5 Plots of isotopic ratios signature at station D03 in this study.	143
Fig. 3.7.1.6 Plots of isotopic ratios signature at station D05 in this study.	144
Fig. 3.1.1.7 Plots of isotopic ratios signature at station D07 in this study.	145
Fig 3.7.1.8 The $\delta^{13}\text{C}$ versus $\delta^{15}\text{N}$ plot of krill samples analyzed in this study.	146
Fig 3.7.1.9 Schematic plot of condition to Iso-source mixing model calculated.	146

Table List

Table 3.1.1.1. Summary of the surveys in the Yellow Sea by KIOST during 2009–2012	26
Table 3.2.1.1. Dominant species at A, D and E lines in the Yellow Sea.	83
Table. 3.4.1.1. Sampling stations and time of zooplankton in the Yellow Sea in spring and summer.	97
Table 3.5.1.1. Regional comparison of spawning season and life span of the euphausiid <i>E. pacifica</i>	114
Table 3.5.1.2. <i>Euphausia pacifica</i> . Diameter of eggs and total length of larvae in the Yellow Sea. SD: standard deviation, n: no. of specimens measured.	115
Table 3.5.1.3. Summary of obtained higher trophic species through the local fish markets and fisherman in 2012.	119
Table 3.5.1.4. Egg production data of krill, <i>Euphausia pacifica</i> , obtained in-situ rearing experiments.	120
Table 3.7.1.1 Carbon stable isotope ratio($\delta^{13}C$) signatures of organisms in the Yellow sea.	139
Table 3.7.1.2 Size-fractioned criterion of zooplankton for food source.	140

제 1 장 서론

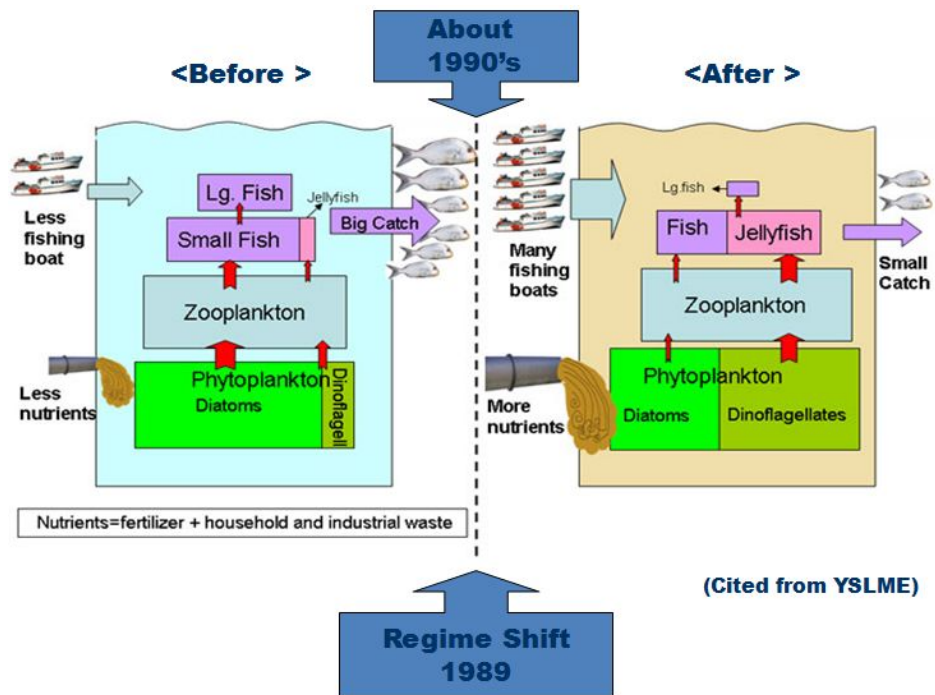
제 1 절 연구개발의 필요성

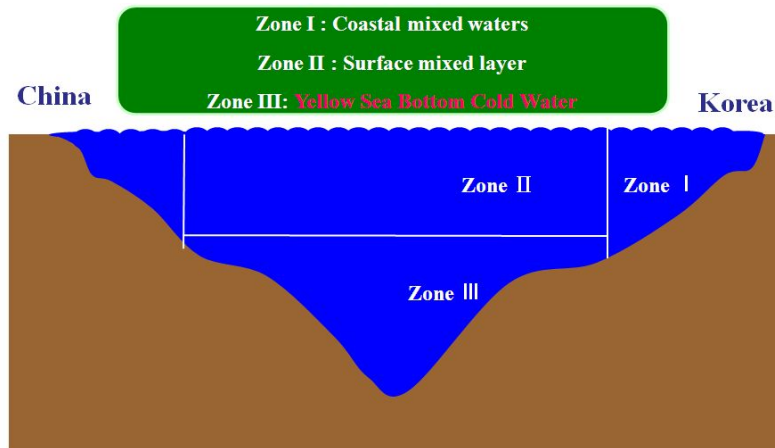
1. 기술적 측면

- 황해저층냉수(Yellow Sea Bottom Cold Water)(수온<10℃)가 황해 유용어류자원의 주요 먹이인 요각류 *Calanus sinicus*의 over-summering site임이 밝혀지면서 황해저층냉수피의 생태계 구조와 기능 및 가치의 해석 필요성이 대두되고 있음.
- 2001년-2010년에 걸쳐 중국영해에 해당하는 황해에서 주요 먹이생물인 요각류 (*C. sinicus*)와 크릴(*Euphausia pacifica*)의 중규모의 시공간 수평 분포, 수직특성, 생리학적 특성 및 기후변동과 관련된 생태계 구조 변화 연구가 수행되었고, 지속적으로 진행되고 있음.
- 최근 황해냉수 특성의 장기 또는 경년변동이 보고되고 있지만 관련된 역학과정과의 관련성에 따른 생태계의 반응은 거의 알려져 있지 않음
- 장기 기후변화의 영향은 평균적인 수온, 염분의 변화 그리고 이벤트성 극한 변동을 유발할 수 있음. 따라서 두 가지에 외력에 의한 냉수의 반응을 나누어 분석하고 예측할 필요가 있음.
- 황해저층냉수대의 지표성 어종으로 밝혀진 대구, 등가시치, 삼세기, 용가자미의 자원량은 냉수대 연변동과 밀접한 연관성이 있는 것으로 고려되고 있으나 정확한 원인 규명이 필요함.
- 황해에서의 초미소 식물플랑크톤의 분포나 현존량에 관한 연구는 존재하나 저층냉수대의 변동이 군집변화에 미치는 내용은 거의 알려져 있지 않음
- 최근 연구결과에 따르면 전 지구적 기후변동의 이해 못지않게, 지역해 (Regional Sea)의 변동성에 주목하고 있으며, 이의 하나로 빠른 온난화 특성과 광역생태계 (Large Marine Ecosystems)의 수산자원과 이를 뒷받침하는 생태계 구조의 변동성에 주목하고 있음 (Belkin, 2009).
- 황해는 전지구의 중요 해양 광역 생태계 (Large Marine ecosystems) 중 하나로 전 세계 해양 어획량의 약 5%(3백만톤/년)가 어획됨.
- 직·간접적 인간 활동 영향(개발, 오염, 남획, 양식 등) 심화, 3개국 (한국, 중국, 북한) 분할로 이에 대한 연구/관리 어려워, 국제 공동 연구 및 프로그램의 필요가 절실함.
- 현재까지 우리나라에서는 한국해양연구원에서 황해저층냉수피를 기초로 한 기초적 해양환경특성 연구가 2009년-2011년의 3년간 수행되었으며, 요각류 *C.*

*sisnicus*와 크릴 (*Euphausia pacifica*)를 대상으로 황해저층냉수괴의 특성이 생기기 전과 후의 생태계 수직구조 특성연구 일부 수행.

- 물리적 측면으로, 해류의 유동측면을 준, 하계에 3년간 특성을 파악하였고, 생물 음향기법으로 황해저층냉수괴 내의 주요 먹이원인 동물플랑크톤의 수층별 구조 특성 파악함.
- 그러나 정작 황해의 80%이상을 차지하는 황해저층냉수괴의 중요성과 달리 냉수괴의 물리적 특성과 생태계 기본구조 및 상호관계에 관한 연구는 미흡한 상태임.
- 냉수괴 구조를 중심으로 한 물리환경 특성 및 생태계 기본구조 및 기능 특성이해는 광역생태계인 황해환경의 변화를 올바르게 인식하고 미래 변화를 가늠하는데 기초적 단계일 수 밖에 없음.
- YSLME에서 수행된 연구결과의 예를 들면, 황해에서 나타난 체제변화(regime shift)를 아래와 같이 도식화하여 현 상황을 정확히 인식토록 제시하고 있음.



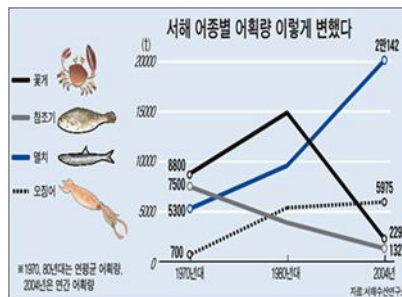


<그림 1> 황해광역생태계에서의 regime shift와 황해저층냉수대 구조

- 그러나 황해저층냉수괴 그 자체의 물리적 특성과 생태계 필수 구성성분 기본구조 및 상호관계에 관한 연구가 미흡한 상태이므로 그 필요성은 현재 최고조임.
- 또한 북태평양 해양과학기구(PICES)의 향후 10년간의 연구방향을 조정하고 심의하는 FUTURE program [Forecasting and Understanding Trends, Uncertainty and Responses of North Pacific Marine Ecosystems (Oct. 2009 -)]에서 내세운 주요 질문 중 하나가 자연 및 인위적 강제력에 대한 종 및 생태계 반응 연구임.
- 특히 주요 물리화학적 현상 및 과정을 규명하고 이에 대한 생태계 반응 및 회복력을 규명하는 것이 핵심임.
- 따라서 기술적인 측면에서 황해 저층냉수괴의 생태계 기본 핵심구조 및 핵심종 그리고 상호관계에 대한 연구의 시작이 절실하면서도 국제적으로 요구되는 실정임.

2. 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.



- 장기 기후변화에 따른 황해냉수의 분포 및 특성변화가 예상되어, 하계 저층냉수괴의 규모 및 특성 변이는 장기적으로 부유생태계 구조에 영향을 미칠 것임. 이는 유용수산자원의 주된 먹이원 중에 하나인 요각류와 크릴의 하계 서식지의 범위가 축소되는 것을 의미하여, 수산자원의 관리차원에서도 황해냉수괴의 변화 파악이 필요함.
- 황해 수산자원의 먹이생물인 동물플랑크톤의 분포 및 생산력 및 먹이생물을 부양하는 하위영양단계와 해양환경 특성을 고려하여 저층냉수괴의 생태적 가치를 평가하면 주요 수산어종의 생물량 변화 등을 예측할 수 있음.
- 황해전체면적의 80% 이상을 나타내는 황해저층냉수괴 내 생태계 구조 및 기능의 파악을 통해 수산자원 부양 능력 및 변동량을 체계적으로 과학적으로 파악할 수 있어, 보존에 필요한 정책적 기준을 제시할 수 있음.
- 황해 수산자원의 먹이생물인 동물플랑크톤의 분포 및 양을 분석하여 주요 수산어종의 생물량 변화를 예측 가능케 하여 관련 산업의 규모 신규확장 혹은 시장성을 파악할 수 있는 구체적 수치를 제시할 수 있게 함.

3. 사회·문화적 측면

- UN 해양법이 발효되면서 중국과의 황해 경계 획정이 민감한 외교 문제가 되고 있으며, 황해를 중심으로 경제권이 확대되고 있으므로 황해의 지속가능한 발전을 위해서는 인근 국가들과의 지역협력체 구축을 통한 긴밀한 관계 유지가 필요함. 따라서 한중 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 황해저층냉수괴의 생태계 특성을 밝힘으로써 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 공동 연구를 통한 체계적이고 광역적인 황해의 해양과학 조사와 자료의 축적이 절실함.
- 미지의 황해저층냉수괴의 생태계 특성을 밝힘으로서 대중적인 관심도를 끌어 올릴 수 있는 계기를 마련

제 2 절 연구개발의 목표 및 내용

구 분	목 표	내용 및 범위
1 차년도 (2012)	황해냉수의 경년변동성 분석	<ul style="list-style-type: none"> - 기존자료에서 정량적인 경년변동성 분석 . 보정된 KODC 분석 . 1단계 현장 관측자료 재분석 . 연도별, 격월별 수온/염분 이상치 분석 - 춘계 하계 황해냉수 현장조사 . 황해냉수의 공간분포 특성 분석 . 25시간 관측 및 단주기 변동특성 분석 . 중국측 현장관측 자료와 비교 - 수치모델을 이용하여 경년변동성 재현 . 기존 수치모델 결과와 관측자료 비교 . 냉수의 공간분포의 경년변화 분석
	저층냉수대 유무에 따른 황해 생태계 구조 (먹이망) 특성 규명	<ul style="list-style-type: none"> - 춘/하계 하위 부유 생태계 현장조사 및 시료채집 - 계절별 주요 상위 포식자(어류) 시료 확보 - 생태마커인 안정동위원소비 분석을 통한 포식-피식 관계 파악
	음향 산란층 수직 구조에 따른 황해냉수괴 내의 <i>E. pacifica</i> 의 생존 전략 규명	<ul style="list-style-type: none"> - 해양환경 차이에 따른 음향산란층 구조 차이 규명 - 황해저층냉수괴 내의 동물플랑크톤 표층-저층 이동 특성 규명
	저층냉수대 크기 변화에 따른 중형 동물플랑크톤 분포 파악	<ul style="list-style-type: none"> - 2010년, 2011년의 연구결과 분석을 통한 잠재적 주요종 탐색 - 저층냉수괴를 고려한 분포특성 파악 - 장기모니터링 조사(하계): 25시간 포함 - 현장 조사 후 사전탐색 종과 대조 후 선별
	저층냉수대의 유무에 따른 다른 원생생물 분포 파악	<ul style="list-style-type: none"> - 저층냉수괴를 고려한 원생동물 분포특성 파악 - 원생동물의 섭식형태 측정
	저층냉수대 크기 변화에 따른 식물플랑크톤(미소, 초미소) 생물량 분포 파악 및 이화학 요인 분포 연구	<ul style="list-style-type: none"> - 각 크기별 식물플랑크톤 군집 파악을 위한 시료 채집 - 미소 및 초미소 식물플랑크톤 군집의 다양성 및 현존량 파악 - 이화학요인 분포(영양염) 조사

구 분	목 표	내용 및 범위
2 차년도 (2013)	황해냉수의 변동역학 분석	<ul style="list-style-type: none"> - 냉수의 경년변동을 유발하는 요인 분석 . 바람, 열속 등 기상요인과 냉수 변동성 . 강수량, 양자강 담수의 영향 - 춘계 하계 황해냉수 현장조사 . 황해냉수의 공간분포 특성 분석 . 25시간 관측 및 단주기 변동특성 분석 - 수치모델을 이용한 역학 분석 . 냉수특성변화와 해수순환의 관계 분석 . 동중국해와 황해의 해수(열염) 교환 특성
	황해 생태계 주요 생물군의 영양단계 및 기능 파악	<ul style="list-style-type: none"> - 계절별 상위포식자 시료 확보 - 계절별 주요 생물군의 영양단계 및 상세 먹이관계 분석을 체내 안정동위원소비와 지방산 안정동위원소비를 이용하여 파악 - 황해 key species(<i>Euphausia pacifica</i>)의 계절/발달단계별 대사율(feeding, grazing, and growth rate) 측정
	지역별 저층 냉수괴 분포차이에 따른 음향산란층의 공간적인 분포 특성 차이 파악	<ul style="list-style-type: none"> - 음향 산란층 내의 주요 우점플랑크톤 밀도 파악 - 누적 자료를 이용한 황해냉수괴 해역의 지역별 음향산란층 특성 차이 규명
	동물플랑크톤 주요종의 생물량, 기능파악 및 분포 특성 파악	<ul style="list-style-type: none"> - 계절별 주요종의 섭식율 파악 - 계절별 주요종의 생물량 및 분포특성 파악
	원생동물 주요종의 생물량 및 섭식률 측정	<ul style="list-style-type: none"> - 주요종의 섭식율 파악 - 주요종의 생물량 및 분포특성 파악
	황해 저층냉수괴 내 크기별 식물플랑크톤 군집의 핵심종 선택 및 이화학요인과의 연계성 파악	<ul style="list-style-type: none"> - 크기별 군집 핵심종의 분포 및 계절별 특성 파악 - 시공간적인 이화학적 요인과 식물플랑크톤과의 관계 파악

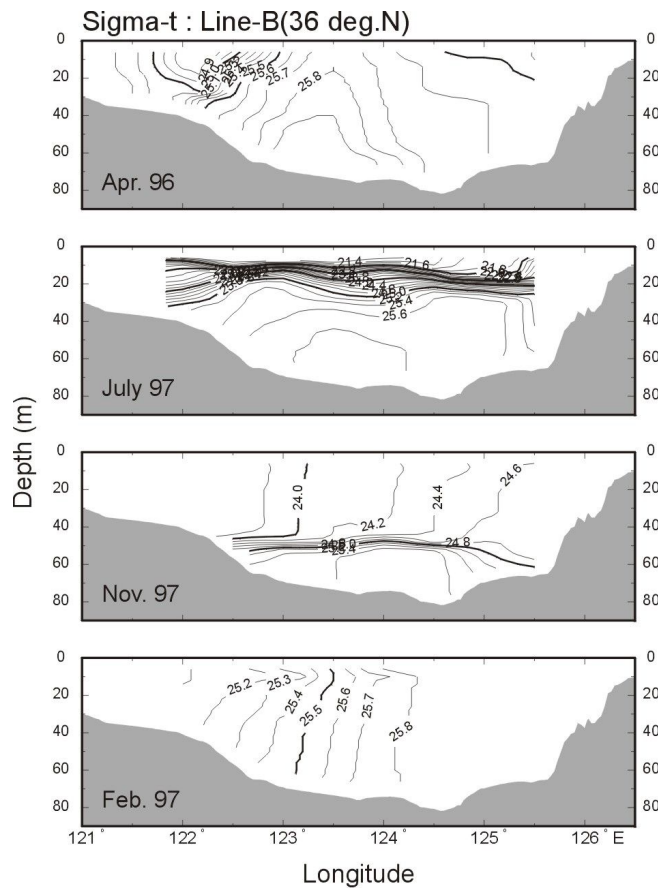
구 분	목 표	내용 및 범위
3 차년도 (2014)	황해냉수의 장기변동성 해석	<ul style="list-style-type: none"> - 장기 기후변화에 따른 변동성 예측 . 최근까지의 변화 추세 해석 . 냉수의 수온 및 성층강도 변화 예측 . 특성변동과 극한기상의 관계 분석 - 춘계 하계 황해냉수 현장조사 . 황해냉수의 공간분포 특성 분석 . 6년간의 장단기 변동특성 분석 - 수치모델을 이용한 역학 해석 . 이벤트성 이상기후에 대한 냉수의 반응 . 열, 염 수지의 변화와 냉수괴의 변동
	황해 생태계의 end-to-end(하위 생산자에서 육식성 어류를 총망라한)먹이망 구조 및 변동성 제시	<ul style="list-style-type: none"> - 계절별 먹이단계별 주요 생물군(주요 어종 포함) 상세먹이관계 분석 - 냉수대 변동성이 생태계 구조(먹이망) 및 기능에 미칠 영향 제시
	황해 저층 냉수괴 해역의 해양환경 구조와 음향산란층 구조 해석	<ul style="list-style-type: none"> - 해양환경 변화와 황해냉수괴 구조 변화에 따른 동물플랑크톤 군집의 수직 및 공간 구조 특성 규명
	황해 저층냉수괴 생태계 내 핵심종(동물플랑크톤)의 생태학적 지위 파악 및 제시	<ul style="list-style-type: none"> - 계절별 핵심 동물플랑크톤 종 시료채집 및 대사능력 분석 - 냉수대 변동성이 먹이망 및 핵심 동물플랑크톤의 생산력에 미칠 영향 제시
	황해 저층냉수괴 생태계 내 원생동물의 생태학적 지위 파악 및 제시	<ul style="list-style-type: none"> - 냉수괴 원생생물 대사능력 분석 - 냉수괴 변동성이 먹이망 및 원생생물의 생산력에 미칠 영향 제시
	황해 저층냉수대 변동에 따른 식물플랑크톤 군집구조 파악	<ul style="list-style-type: none"> - 황해 저층냉수대의 변동에 따른 핵심종의 생태적 위치 파악 - 장기간 자료를 통한 황해에서의 식물플랑크톤 군집분포 특성 규명

제 2 장 국내외 기술개발 현황

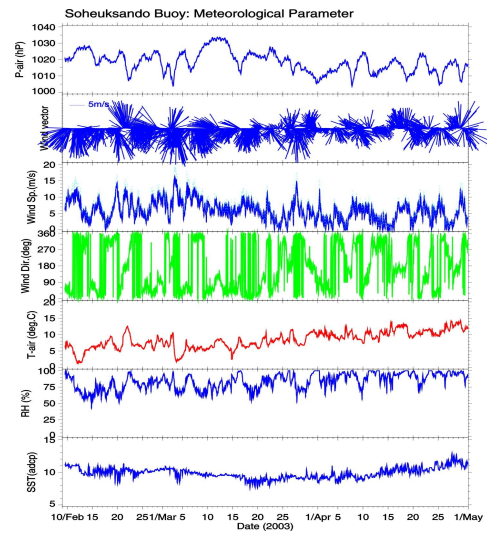
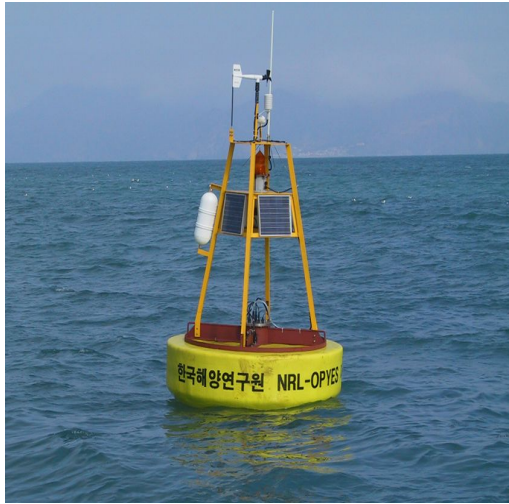
제 1 절 국내 연구동향

- ▷ 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 황해냉수괴의 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 준계 중규모 분포 및 환경 요인과의 관련성을 연구함.

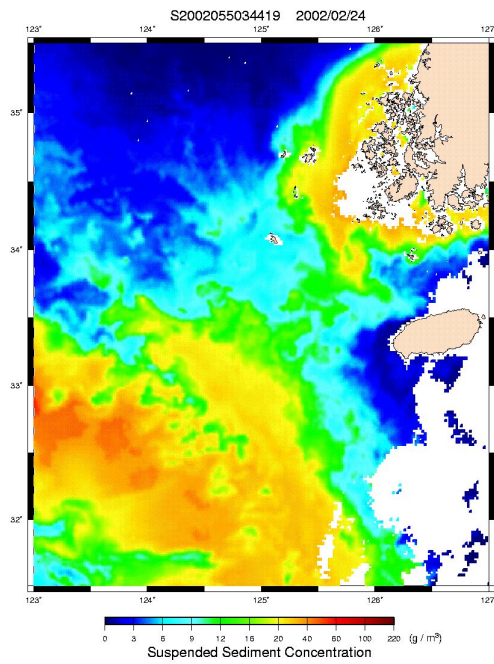
- ▷ 2002-2005 : 황해의 해황변동예보 기반기술(해양연) 연구를 수행함.
 - 우리나라 서해연안과 황해남부의 전선역을 통한 해수교환 특성을 연구함.
 - 해양관측부이를 이용한 장기해양관측기술 및 원격탐사 기술을 개선함.
 - 황해의 해수순환 및 생태계 수치모델 기술 적용 초기 연구 수행
- ▷ 1997 - 현재 : 한국(국립수산 과학원 서해수산 연구소)과 중국 국가 환경 보호 총국(중국 과학원)에서는 매년 한번씩 한-중 황해 환경 공동 연구를 수행하여 양국간의 자료 비교를 하고 있으나 황해저층냉수괴에 대한 연구는 수행되지 않았음.
- ▷ 1961 - 현재 : 국립수산과학원에서 황해의 119개 관측점에서 매년 총 6회의 조사를 실시하여 현재까지 해양 기초자료를 축적하고 있으나, 황해저층냉수괴에 대한 전문적인 조사는 수행되지 않고 있음.



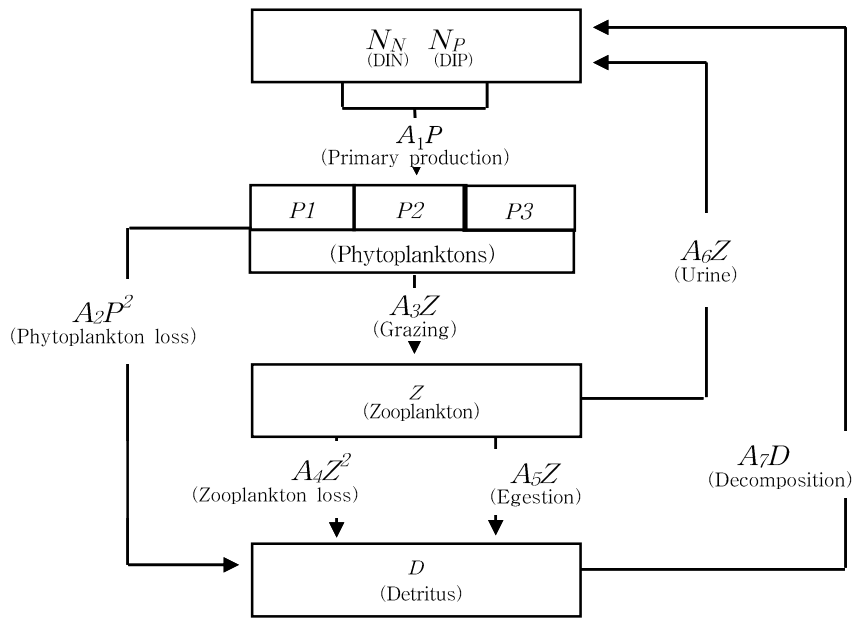
북위 36도 동서관측선에서의 수온 수직분포의 계절변화



소흑산도에 설치되었던 해양관측부이와 관측 예



위성영상으로 계산된 황해 남부 연안의 표층 SS 농도 분포



NPZ 개념에 의한 해양생태계 모델의 구성 인자와 관계도

- ▷ 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 저층냉수괴의 생태환경 및 지표 생물종을 조사하였음.
- ▷ 2005 : 하계 동중국해 북부해역에 위치한 황해저층냉수괴와 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 장기변동 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 장기변동과 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 황해저층냉수괴의 영향을 받음을 보고함.
- ▷ 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.
- ▷ 최근 안정동위원소를 활용하여 동해에 서식하는 *Euphausia pacifica*의 섭식 생태 연구가 수행되었으나(Park et al. 2011), 황해 *E. pacifica*의 섭식 생태 뿐만 아니라 다양한 방법(지방바이오마커, 동위원소, 위 내용물)을 함께 활용한 연구는 한국 근해에서 거의 이루어지지 않음.
- ▷ 국외의 해양탐사 기술에 응용되어진 수중음향 분야는 어군탐지기, 수심 관측, 해류 측정, 해저 퇴적층, 수온 분포 측정, 군사적 용도 등 많은 분야에 적용되어져 왔고, 원양 및 연근해 생태계 조사와 자원 측면에서의 조사에 많이 응용되고 있음
- ▷ 기존의 동물플랑크톤의 채집 방법으로는 전체적인 현상 규명이 힘들었던 음향산란층의 존재 및 특성 파악은 다양한 수중음향장비의 개발로 가능해짐.
- ▷ 국내의 음향을 이용한 생물탐지에 대한 연구는 매우 빈약한 수준이다. 그러나 해양생태 규명, 수산자원 보호 및 연안 산업시설 보호 등 활용 및 필요 분야에서 확대되고 있는 상황임.
- ▷ 2009-2011. “황해저층냉수괴의 거동과 생태계에 미치는 영향연구“ 사업에서 총 6개 분야의 연구를 수행하였고, 아래와 같은 결과를 도출함.
 1. 물리분야: 2009년과 2010년은 유사한 분포 구조 나타냈고, 2011년 황해 남부해역에서 고온고염분수 존재를 관측. 장기간 자료를 고려했을 때 주기적인 양상임.
 2. 크릴분야: 산란시기 4월, 뚜렷한 수직이동, 먹이원은 춘계-규조류, 하계-미세조류, 유기 쇄설물, 원생동물임을 밝혀냄.

3. 요각류분야: *Calanus sinicus*의 뚜렷한 주야수직이동성(층계)확인 및 하계 표층관찰 (성체, 미성숙체 5기), 그리고 4기 미만의 미성숙체는 계절적 SCM수심에 항존함을 밝혀냄.

4. 음향분야: 동물플랑크톤의 주야수직이동성 객관적 증거 제공

5. 퇴적물분야: 퇴적물 내 유해 와편모류 시스트 고밀도 관찰(특히 dump site).

6. 어류분야: 유전자 마커 활용 자치어 분류

▷ 국내 황해에서 초미소 및 미소 식물플랑크톤 군집의 분포와 특성에 관한 연구는 빈약한 상황임. 특히, 저층냉수대의 변동과 연관된 식물플랑크톤 군집에 관한 연구는 매우 미흡한 실정임.

▷ 국내에서의 음향산란층에 대한 연구는 1980년 중반부터 시작되어 지금까지 진행되고 있으나, 동중국 해역에 국한되어 연구가 실시되었음. 황해에서의 음향 산란층 연구는 거의 이루어지지 않음.

▷ 강 등(2003)은 저서 미세조류가 조간대지역에 서식하는 대형저서동물의 먹이원으로서의 기여도가 크다는 것을 탄소 및 질소 안정동위원소비를 분석하여 밝혀내었다(Kang et al., 2003, Trophic importance of benthic microalgae to macrozoobenthos in coastal bay systems in Korea: Dual stable C and N isotope analyses, Marine ecology progress series, 259, 79-92).

▷ 양 등(2009)은 탄소 및 질소 안정동위원소비를 이용한 경남 동대만에 서식하는 참굴의 먹이원 규명 연구에서 조간대에 서식하는 겨울철 참굴은 조류에 의해 재부유되는 퇴적물내의 저서미세조류를 주로 섭식한다고 보고하였다 (Jin-Yong Yang, Kyung-Hoon Shin, 2009, Identification of the food sources-metabolism of the Pacific Oyster *Crassostrea gigas* using carbon and nitrogen stable isotopic ratios, Korean journal of environmental biology, 27(3), 279-284).

▷ 국내에서 원생동물의 생태 및 생산력에 대한 연구는 동해, 황해 중앙해역 및 인천연안 수역에서 일부 연구가 수행되었음.

▷ 인천연안 해역에서 1997-1999년까지 원생동물의 장주기 변동에 대한 연구가 수행되었음 (Yang et al., 2008)

▷ 동해 울릉분지 부근해역에서 콜드 에디의 형성 유무에 따른 미세생물 군집의 반응에 대한 연구가 수행되었음 (Hyun et al., 2009)

제 2 절 국외 연구동향

▷ 중국

- China-GLOBEC (China-Global Ocean Ecosystem Dynamics) program의 일환으로 황해저층냉수괴를 중심으로 수산자원의 주요 먹이원인 요각류 *Calanus sinicus*의 분포 및 개체군 동력학 연구 수행. 주요 연구목표 : 하계에 형성되어 있는 황해저층냉수괴의 생태학적 역할로서 *C. sinicus*의 계절적 도피처의 가능성을 규명함.

- 중국은 10여 년 전부터 황해저층냉수괴와 관련한 연구를 진행하였고, 특히 동물플랑크톤의 생리, 생태학적 연구가 집중적으로 진행되었음. 일부 초소형플랑크톤의 분포에 미치는 저층냉수괴의 영향을 연구한 예가 있음.

- 하계에는 크기가 큰 식물플랑크톤(20 μm 이상)보다 초미소플랑크톤이 상대적으로 우세하게 출현하며, 그 생물량의 분포는 수직으로는 수온약층 혹은 표층에서 높게 나타남. 수평적으로는 황해저층냉수괴가 존재하는 곳에서 상대적으로 적은 생물량이 나타나 중규모분포 특성에 직접적 영향을 주었다고 보고함.

- 대부분의 연구가 동중국해와 연안지역에서 많은 연구가 진행되었으나, 최근 들어 황해 중부해역까지 넓은 범위의 연구가 진행됨.

- 2011년 11월 중국 상하이에서 개최된 한, 중, 일 중심의 IMBER(Integrated Marine Biogeochemistry and Ecosystem Research) meeting에서 황해저층냉수괴에 관련된 다수의 연구결과가 발표됨.

1. Dissolved oxygen and pH within the Yellow Sea Cold Water during summer. (Dr. Liang Xue) : 낮은 DO는 통상적으로 낮은 pH와 연동하는데, 황해저층냉수괴에서는 높은 DO와 낮은 pH가 형성됨. 높은 DO는 낮은 수온으로 제한된 호흡과 관련 있으며, 낮은 pH는 염분과 관련이 있다고 함.

2. Weak coupling between heterotrophic nanoflagellate and bacteria in the Yellow Sea. (Shiquan Lin, Yuan Xiong, Lingfeng Huang; Department of Oceanography, Xiamen University)

- 황해저층냉수괴에서 미소생물환 내 종속영양성 미소편모류 군집(HNF)의 분포와 영양학적 역할에 관한 연구

- 부영양성 환경에서 HNF와 박테리아와의 관계가 약하거나 coupling이 없는 것으로 나타남.

3. Forcing mechanism of inter-annual to decadal variability of seawater temperature in the Yellow Sea during 1958 to 2007. (Chengyi Yuan, Hao Wei, Youyu Lu, Xiaofan Luo, Zhihua Zhang; College of physical and

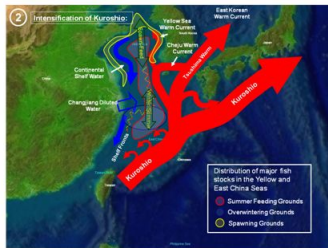
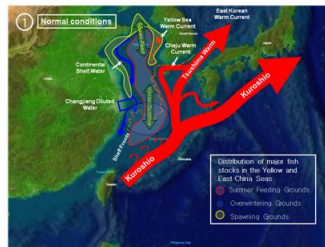
Environmental Oceanography, Ocean University of China, Qingdao)

- 하계 수온이 서태평양 아열대 및 동아시아 하계 몬순과 관련이 있음
- 동계수온과 춘계 혼합과정이 수온약층 아래 연간 및 수십년간의 수온변이에 영향을 미침.

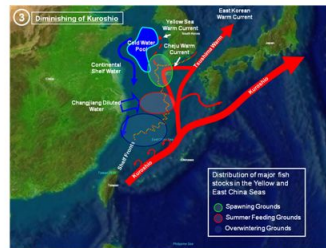
4. Spatial and temporal variation of picoplankton distribution in Yellow Sea, China (Yuan Zhao, Tian Xiao, Li Zhao, Sanjun Zhao, Jiliang Xuan, Chaolun Li, Xiuren Ning; College of Marine Life Sciences, Ocean University of China, Qingdao)

- 황해에서 *Synechococcus*와 종속영양성 박테리아의 분포는 수온 의존적이고, 초미소 플랑크톤 존재는 황해저층냉수괴에서 매우 미약함을 발표.

Effects of physical variability (strength of Kuroshio current) on fisheries in ECS,YS, and South sea



- Shelf fronts shift west due to increase in Cheju Warm Current
- Intensified Yellow Sea Warm Current increases outflowing shelf water
- Overwintering/feeding grounds constrict



- Shelf fronts shift east due to decrease in Cheju Warm Current
- Yellow Sea Warm Current diminishes
- Yellow Sea cold water pool increases
- Major Fish stock distributions shift south

[황해의 해양학적 환경특성에 영향을 미치는 요인으로 쿠로시오 해류의 세기를 고려해야 함을 제안함]

- 중국과학원 산하 지리연구소에서 발행한 Atlas of Ecological Environment in the Beijing-Tianjin Area (1990, Science Press, Beijing)에는 발해만의 해양 환경에 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 (*Amphiplus 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 황

해의 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.

○ 해양 생태계의 미세생물 먹이망에서 원생동물 생태 및 에너지 흐름에 대한 많은 연구들이 다양한 해역에서 수행되었으나 황해에서 연구는 매우 부족함.

○ 중국 연안해역에서 원생동물의 분포 및 섭식률에 대한 연구가 하계를 중심으로 수행되었으나 황해 냉수대와 관련이 없는 연구임 (Zhang et al., 2006)

○ 2006년 겨울과 2007년 여름철에 YSLME를 통하여 중국과의 공동연구가 대단위로 수행되었으며, 박테리아, 식물플랑크톤, 원생동물, 요각류에 대한 연구가 수행되었음. 그러나 황해 냉수대 연구에 목적을 두지는 않았음 (UNDF/GEF, 2011).

▷ 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 우리나라 인근해에 대한 연구를 간헐적으로 수행하고 있어, 80년대 위성추적부이 관측, 90년대 ADCP 장기관측을 수행함. 수치모델과 연계하여 황해 해수 특성과 해류의 시공간 변동성 연구를 수행함. 최근 황동중국해의 전선분포, 황해냉수의 경연변동성에 대한 연구 지속하고 있음.

- 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.

▷ 일본

- 일본인에 의한 황해의 생물 조사는 일제강점기 조선총독부 시절 수산시험

장에서 어업생물을 대상으로 한 수산학적 연구가 대부분임.

- 일본 서해수산연구소에서는 황해 수산자원 조사의 일환으로 수행된 조업 시험에서 트롤, 기선저인망, 대형 드래지를 이용해 어류와 저서동물을 채집하였음. 조사기간은 1953년 10월부터 1971년 5월까지이며, 19년간 총 1,000여회가 넘는 조사를 하였음. 이 연구결과는 1961년부터 1980년까지 서해수산연구소 연구 보고지에 분류군별로 수록되어 있음.

- 지리적인 한계로 직접 관측에 의한 연구는 거의 없으나, 수치모델을 이용한 해수순환 및 생태계 반응 연구를 주로 수행함.

▷ 기타

- 주로 해양탐사 기술에 응용되어진 수중음향 기법을 연근해 생태계 조사에 적용하여, 기존의 동물플랑크톤의 채집 방법으로는 전체적인 현상 규명이 힘들었던 음향 산란층의 존재 및 특성파악이 가능해짐

1. Per B. Holliland et al.(2012)은 발틱해에서 일시적 대발생 종인 지각류 *Cercopagis pengoi*의 먹이원 조사를 탄소 및 질소 안정동위원소 기법을 사용하여 분석한 결과 주요 동물플랑크톤섭식 어류와 매우 유사한 먹이원을 갖고 있고 그들은 서로 먹이원 경쟁관계에 있다는 것을 보고하였다(Per B. Holliland et al., 2012, Assessing diet of the non-indigenous predatory cladoceran *Cercopagis pengoi* using stable isotopes, Journal of plankton research, 34(5), 376-387).

2. Pitt et al.(2008)은 호주의 석호에서 채집한 해파리(*Cartostylus mosaicus*)의 선호 먹이원을 알아보기 위해 해파리와 예상 먹이원의 탄소 및 질소 안정동위원소비를 분석한 결과 상대적으로 몸집이 크고 신생의 십각류인 *Lucifer* sp.나 곤쟁이류를 선호한다고 보고하였다(Pitt et al., 2008, Predation by jellyfish on large and emergent zooplankton: Implications for benthic-pelagic coupling, Estuarine coastal and shelf science, 76, 827-833)

▷ 안정동위원소비를 이용한 생태계 내 먹이망 구조 해석에 관한 연구로 Per B. Holliland et al.(2012)은 발틱해에서 일시적 대발생 종인 지각류 *Cercopagis pengoi*의 먹이원 조사를 탄소 및 질소 안정동위원소 기법을 사용하여 분석한 결과 주요 동물플랑크톤 섭식 어류와 매우 유사한 먹이원을 갖고 있고 그들은 서로 먹이원 경쟁관계에 있다는 것을 보고하였다(Per B. Holliland et al., 2012).

▷ Pitt et al.(2008)은 호주의 석호에서 채집한 해파리(*Cartostylus mosaicus*)의

선호 먹이원을 알아보기 위해 해파리와 예상 먹이원의 탄소 및 질소 안정동위원소비를 분석한 결과 상대적으로 몸집이 크고 신생의 십각류인 *Lucifer* sp.나 곤쟁이류를 선호한다고 보고하였다(Pitt et al., 2008).

제 3 장 연구개발수행 내용 및 결과

제1절 물리환경분야

1. 물리 환경분야

가. 서론

황해는 북서태평양에 위치한 반폐쇄적인 연안해로서 동쪽으로는 우리나라 서쪽으로는 중국과 경계를 이루고 있으며, 북쪽으로는 보하이해(Bohai Sea) 남쪽으로는 동중국해와 연결되어 있다(Fig. 3.1.1.1). 황해는 평균 수심이 약 44m로 아주 얇은 대륙붕으로 이루어져 있으며, 중앙부에는 황해 중앙골로 알려진 비교적 수심이 깊은 골이 형성되어 있다.

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. 3.1.1.2) 겨울철 황해에서는 쿠로시오에서 기원된 고온고염의 황해난류수가 황해 중앙골을 따라 유입되며, 우리나라의 연안과 중국연안을 따라서 연안수가 남하하는 순환구조를 보인다. 여름철 표층수는 양자강입구에서 제주해협 방향으로 이동하는 저염의 양자강희석수에 의해 영향을 받는다. 저층에서는 황해 중심부에 10°C 이하의 냉수괴가 존재하며(Uda, 1934), 바람에 의한 역풍류에 의해 남하하는 것으로 알려져 있다(Park, 1986).

황해 내부에서 수온분포는 남에서 북으로 갈수록 수온이 낮아지는 분포특성을 보인다(Lie, 1986; Chu et al., 1997). 여름철에는 태양복사에너지로 인해 표층수온이 증가하면서 황해 전반에 걸쳐 고온수가 분포한다. 겨울철에는 황해 남부해역에 상대적으로 고온의 특성을 보이는 동중국해 해수가 황해로 유입됨으로써, 여름철보다 남북방향의 수온구배가 크게 나타난다. 물론 지역적으로는 해류와 조류 그리고 기상조건 등에 따라 작은 규모의 변동은 발생할 수 있지만, 황해 전반에 걸친 계절별 수온분포는 Fig. 3.1.1.3a에 나타난 것과 크게 다르지 않다. 염분의 경우도 황해 남부에서 북부로 갈수록 감소하면서 수온과 유사한 분포특성을 보인다(Fig. 3.1.1.3b). 그러나 여름철에는 양자강담수 세력과 강수량에 따라 지역적인 차이를 보인다.

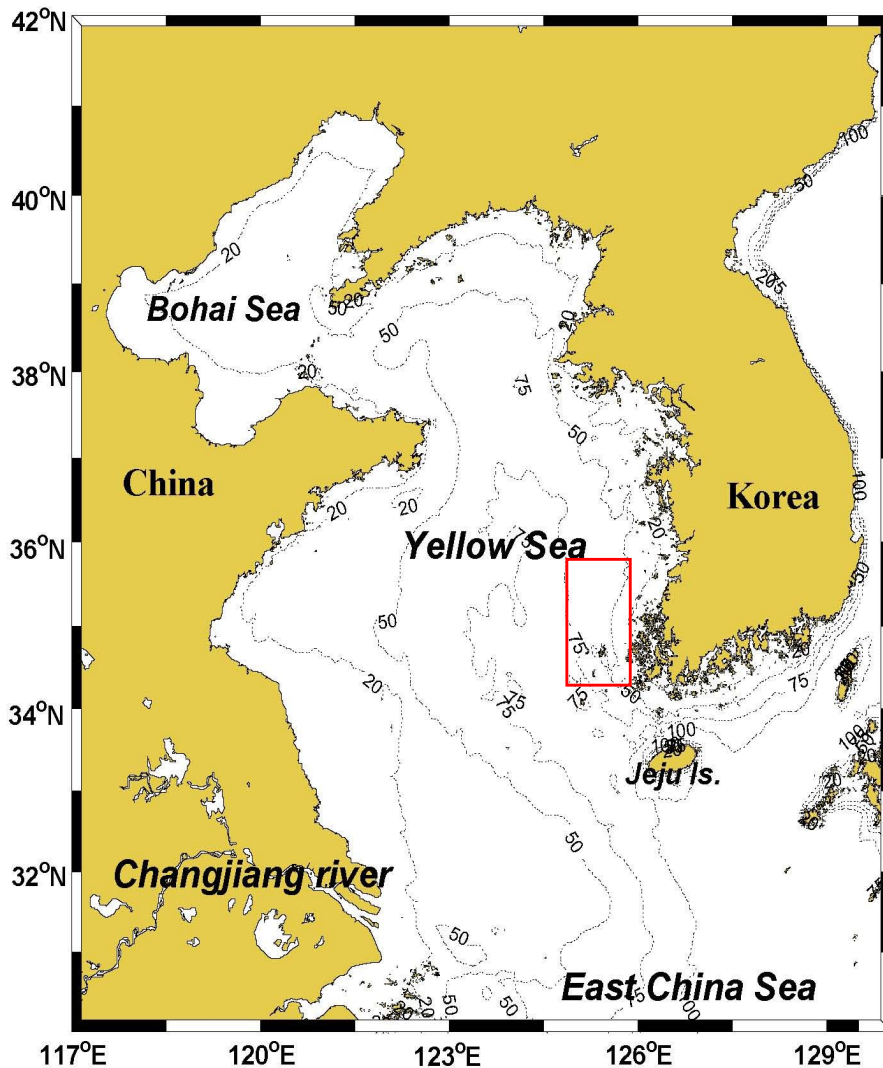


Fig. 3.1.1.1. Study area with bathymetry contours (in meters).

황해의 연직구조는 겨울철에는 강한 연직 혼합으로 인해 해수 기둥이 거의 균질한 분포를 보인다 (Fig. 3.1.1.4). 봄철에는 서서히 태양복사에너지가 증가하면서 표층수온이 상승하고 강수 증가로 표층염분이 저하됨에 따라 상층과 하층의 밀도차가 커지게 된다. 여름철에는 표층수온의 증가와 저염수의 유입으로 인해, 표층에서는 고온저염수가 저층에서는 저온고염수가 존재하면서 강한 밀도약층이 형성된다. 이러한 밀도약층은 상층과 하층사이에 열교환은 물론 물질교환을 차단시키는 역할을 한다. 가을철에는 상층의 수온이 점점 낮아지면서 혼합층이 깊어지고, 겨울철에는 전 층이 균질화되는 과정이 반복된다. 연안역에서 조류가 강한 곳은 조석혼합으

로 인하여 계절약층이 깨지거나 약해져서 수직혼합이 활발하여 수온이 수직적으로 균질한 분포를 나타낸다 (Lie, 1989; Seung et al., 1990).

황해를 지배하는 수괴는 크게 고온고염의 황해난류수 (Yellow Sea Warm Current Water, YSWCW), 저온의 황해냉수괴 (Yellow Sea Cold Water Mass, YSCWM), 저온저염의 한국연안수 (Coastal Water, CW)와 중국연안수 및 고온저염의 양자강희석수 (Changjiang Diluted Water, CDW)로 대별되며 이들 사이의 혼합수가 여러 형태로 존재한다 (Fig. 3.1.1.5). 여기서 황해냉수괴라 함은 여름철 황해의 저층에 분포하는 황해저층냉수를 포함한 냉수괴를 총칭한다.

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

황해저층냉수의 핵은 일반적으로 3곳에 위치하는 것으로 파악된다 (Fig. 3.1.1.6). 황해 북부에는 (Su and Weng, 1994) 비교적 안정적이고 수온이 가장 낮은 ($< 6.0^{\circ}\text{C}$) 저온수 핵이 있으며 황해 남부의 끝에는 8°C 이하의 저온수 핵이 폭넓게 분포한다. 한-중 해양공동 조사의 (과학기술부, 1998) 관측 자료에서는 저층 냉수의 염분의 범위는 대략 32.0~33.5psu로 나타났다. 중국의 학자들은 또 하나의 저온수 핵이 황해 남부의 서쪽에 자주 관측이 되었음을 보고하고 있다. 이는 4~6월에 산둥반도 아래쪽 40m 이심의 천해역에 나타나는 것으로 7월이 되면 태양복사에너지로 수온이 높아져 저온수 핵은 소멸된다. 황해저층냉수는 안정적으로 존재하지만 분포 범위와 수온 및 염분값은 연변화가 있다 (Weng et al., 1994).

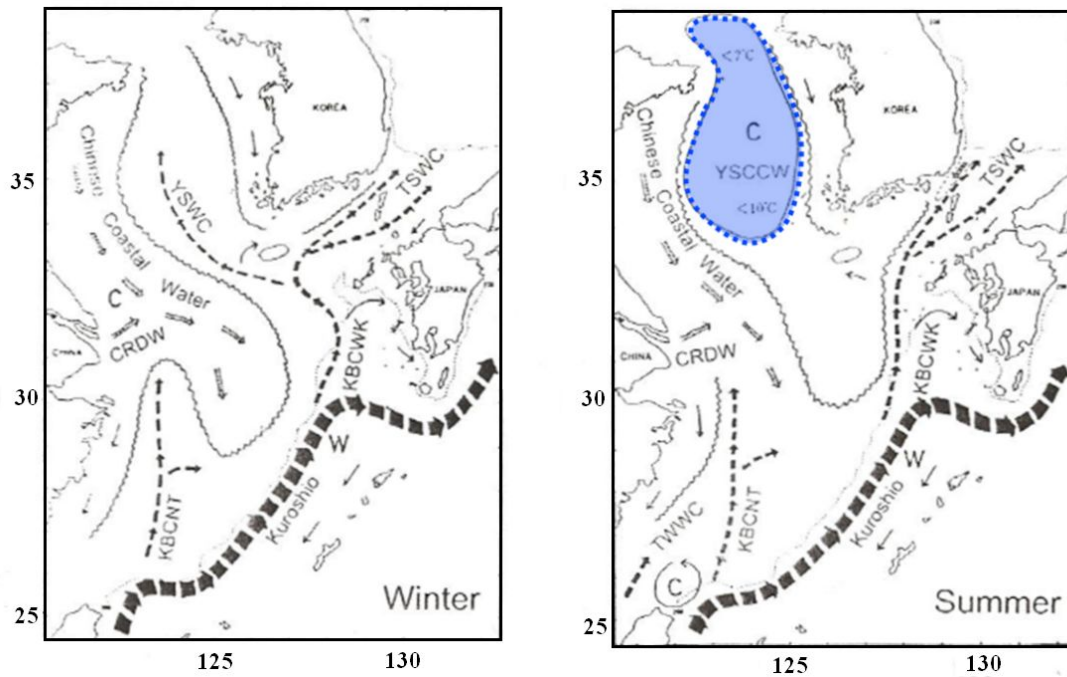


Fig. 3.1.1.2. Horizontal circulation patterns near 50 m depth (Kondo, 1985).



Fig. 3.1.1.3. 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).

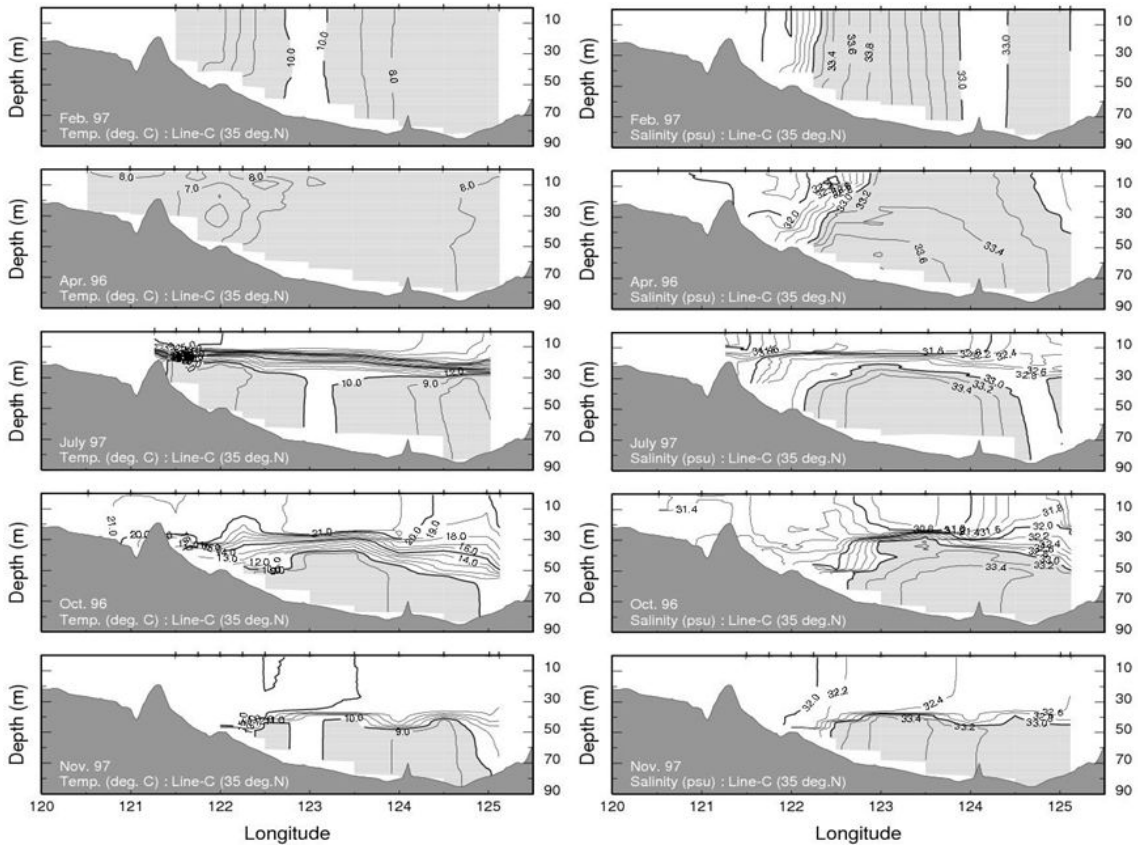


Fig. 3.1.1.4. Seasonal variation of the vertical structures of temperature and salinity at the 35°N.

황해저층냉수는 다른 곳으로부터 유입되어 새롭게 형성된 해수가 아닌 황해저층에 분포하면서 계절적 해수 특성이 다른 수괴와 뚜렷하게 구분되는 하나의 수괴로 고려되어 진다 (과학기술부, 1998). 명확하게 규명되지는 않았지만 최근 보고에 의하면, 여름철 표층수온이 상승하면서 표층과 저층사이에 강한 수온약층이 형성되어 표층의 열이 저층으로 전달되는 것을 막아 동계에 형성된 냉수가 변질되지 않고 저층에 남아서 황해저층냉수괴를 형성한다는 설이 일반적이다. 표층 해수에 비하여 상대적으로 수온이 낮기 때문에 냉수로 불리는 것이다. 일반적으로 황해저층냉수는 여름철 황해 중앙골을 중심으로 저층에 고립된 형태로 유지되고 있으며, 연중 존재하고 있는 것으로 보고되고 있다. 따라서 여기서는 여름철 저층에 존재하는 저층냉수와 그 이외의 시기에 존재하는 냉수괴를 통틀어 황해냉수괴라 칭하였다.

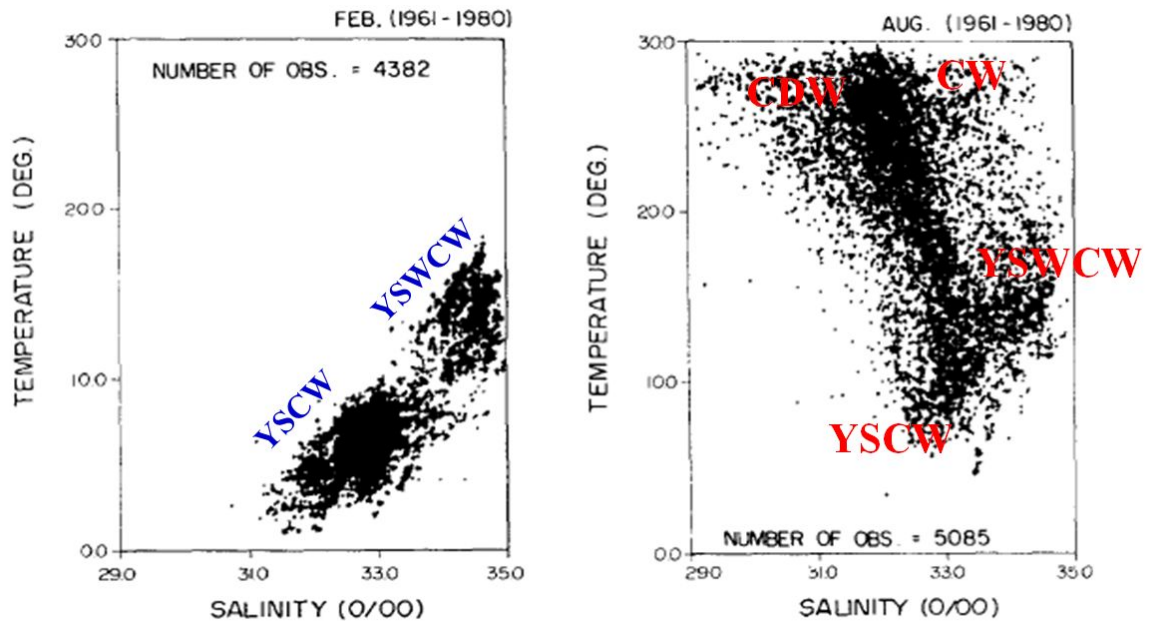


Fig. 3.1.1.5. Water masses in February and August at the southeastern Yellow Sea.

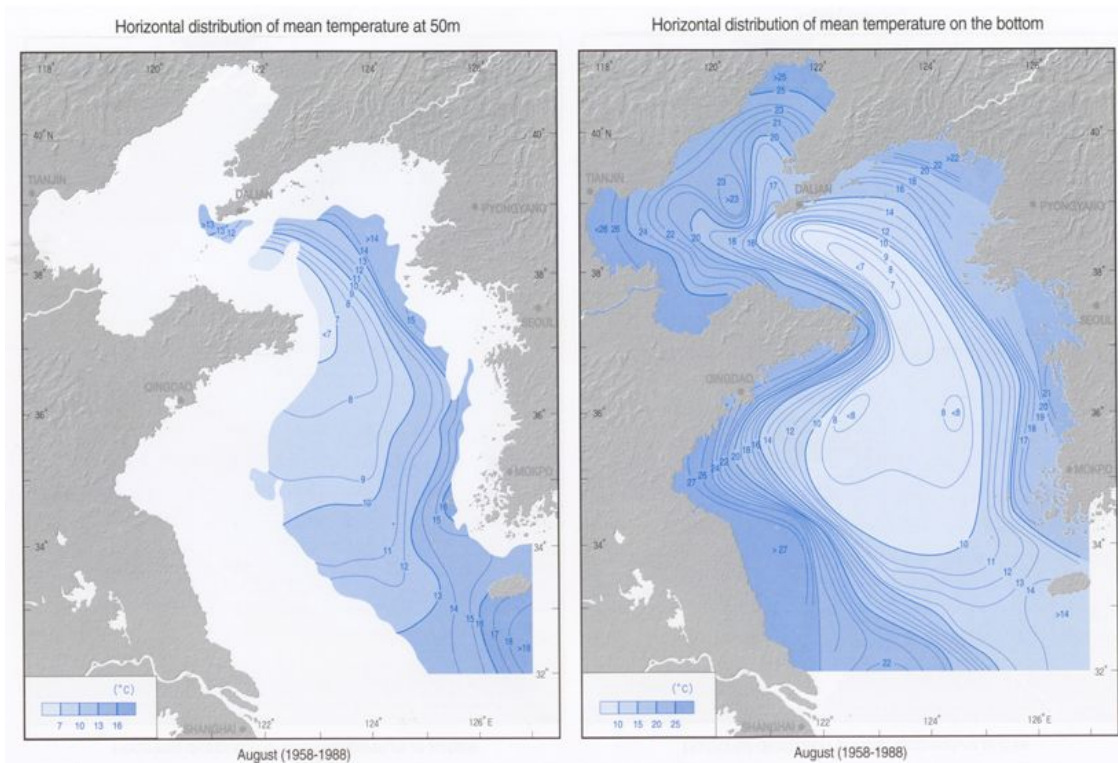


Fig. 3.1.1.6. Horizontal distribution of temperature at 50 m depth layer (left) and bottom layer (right) in August (China Ocean Press, 1992).

위에서 황해의 해수순환을 살펴보았듯이, 여름철 황해에서는 강한 약층에 의해 상층과 하층이 서로 상이한 순환구조를 갖는다. 저층에서는 황해 중앙부에서 냉수괴가 남하하며, 연안을 따라 난류수가 유입한다. 반면 표층에서는 연안수와 더불어 양자강 저염수와 강수 등이 유입되면서 다소 복잡한 해수순환 구조를 보인다.

겨울철 황해 남부에서는 남쪽해역에는 고온고염의 제주난류수가 북쪽해역에는 저온저염의 연안수가 위치하고 있으며, 황해난류수로 불리는 고온고염수가 혁모양의 열염전선을 형성하면서 황해 내부로 유입되는 순환 구조를 보인다. 일반적으로 겨울철 황해의 해수순환은 강한 북풍에 의해 남향하는 연안수와 역풍류 이론에 의해 북향하는 황해난류의 유입으로 해석되어졌다. 그러나 황해 남부에서 동서방향으로 형성되는 강한 열염전선은 이러한 남북방향의 흐름을 제약하리라는 주장이 제기되어 왔다. 특히 최근에는 전선역에서 서향의 흐름이 존재한다는 관측결과에 대한 분석이 보고되었는데 (Lie et al., submitted), 이는 기존에 알려진 황해 남부의 해수순환체계와는 다른 것이다. 이러한 순환체계는 황해냉수괴의 변동에도 영향을 미칠 것으로 판단된다.

여기서는 크게 황해냉수괴의 물성 변동과 겨울철 열염전선역의 물성 구조에 대해 살펴보았다. 황해냉수괴는 황해에 서식하는 가장 중요한 동물플랑크톤의 일종인 *Calanus sinicus*의 over-summering 사이트로 알려지면서 해양생태계에도 중요한 영향을 미치는 것으로 보고되고 있다 (Kang and Kim, 2008; Wang et al., 2003). 따라서 황해냉수괴의 물성변동과 주변해역의 물성구조를 파악하는 것은 황해의 해양환경과 해양생태계의 영향을 이해하는데 있어 반드시 이루어져야하는 과정이다. 이 연구를 위해서 한국해양과학기술원에서는 2009년부터 8월부터 2012년까지 8월까지 4년 동안 봄철(4월)과 여름철(8월)에 황해저층냉수대의 중심해역을 포함한 황해 남동부해역에 대한 현장조사를 실시하였다. 현장조사 자료는 기존 관측 자료와 함께 비교 분석되었다. 또한 겨울철 열염전선에서 서향류가 나타나는 이유와 이에 관련된 황해냉수괴의 순환 체계를 살펴보기 위해 기존에 관측된 물성자료와 인근에 위치한 해양관측부이 자료를 분석하여 열염전선의 구조를 살펴보고자 한다.

나. 재료 및 방법

한국해양과학기술원 (KIOST)에서는 2009년 8월부터 2012년 8월까지 총 7회에 걸쳐 연구선 이어도호를 이용하여 황해 남동부해역에 대한 현장 관측을 수행하였다 (Table 3.1.1.1). 관측영역은 Fig. 3.1.1.1에서 빨간색 선으로 나타낸 해역 (124°E~126°E, 34°N~36°N) 이다. 황해의 일부인 남동부해역에 치우쳐서 위치해 있으며, 황해냉수괴를 다 포함하지는 못하고 있다. 그러나 이 해역은 동중국해에서 황해 내부로 유입되는 것으로 알려진 고온고염수와 황해냉수괴가 저층을 통해 황해에서 동중국해로 남하하는 통로로 알려져 있다. 또한 연구해역의 남쪽에는 겨울철 황해로 유입되는 고온고염수가 혀모양 (tongue-shape)의 형태를 이루는 열염전선이 존재하는 곳이다 (Lie et al., 2009). 즉, 이 해역은 황해와 동중국해를 연결하는 해역으로 두 해역간의 해수 특성을 이해하는데 매우 중요한 곳이다.

해수물성 관측은 4월과 8월에 초점을 맞춰 수행하였다. 4월달은 북서계절풍의 영향이 남아있는 시기로 겨울철의 특성을 유지하고 있지만, 태양 복사에너지가 증가되면서 표층에서 성층이 시작되고 이와 더불어 spring bloom이 나타나는 시기이다. 8월달은 태양복사에너지의 증가로 인해 성층이 강화되면서 표층과 저층이 뚜렷하게 구분되는 특징을 보인다. 이 시기 표층에서는 복사열과 저염수의 유입으로 인해 고온저염의 수괴가 형성되고, 저층에서는 겨울철에 형성된 냉수괴가 수온약층 아래에 존재하면서 저온고염의 특성을 유지하고 있다.

황해냉수괴의 변동성을 파악하기 위해 CTD (SBE 911 plus) 관측을 통한 해수 물성 조사를 실시하였다. 관측 해역과 정점은 Fig. 3.1.1.7과 같으며, 관측 시기는 Table 3.1.1.1에 나타내었다.

Table 3.1.1.1. Summary of the surveys in the Yellow Sea by KIOST during 2009–2012

Obs. Periods	R/V	CTD	Sta.
August 5–9, 2009	Eardo	SBE 911plus	14
April 15–17, 2010	Eardo	SBE 911plus	21
August 17–20, 2010	Eardo	SBE 911plus	21
April 9–12, 2011	Eardo	SBE 911plus	23
August 9–12, 2011	Eardo	SBE 911plus	21
April 17–20, 2012	Eardo	SBE 911plus	27
August 5–10, 2012	Duri	SBE 911plus	34

각각의 조사는 전체 조사 일정이 4일을 넘기지 않았으며, 조사 정점 간 거리도 50~80km (Chu et al., 1997)를 넘지 않아 자료는 높은 신뢰도를 보인다. 이외에도 장기간 특성을 파악하기 위해 한국해양자료센터 (KODC)에서 제공하는 해수물성 자료를 분석하였으며, 바람자료와 북극진동지수와 비교를 통해 외부요인에 의한 영향을 살펴보았다.

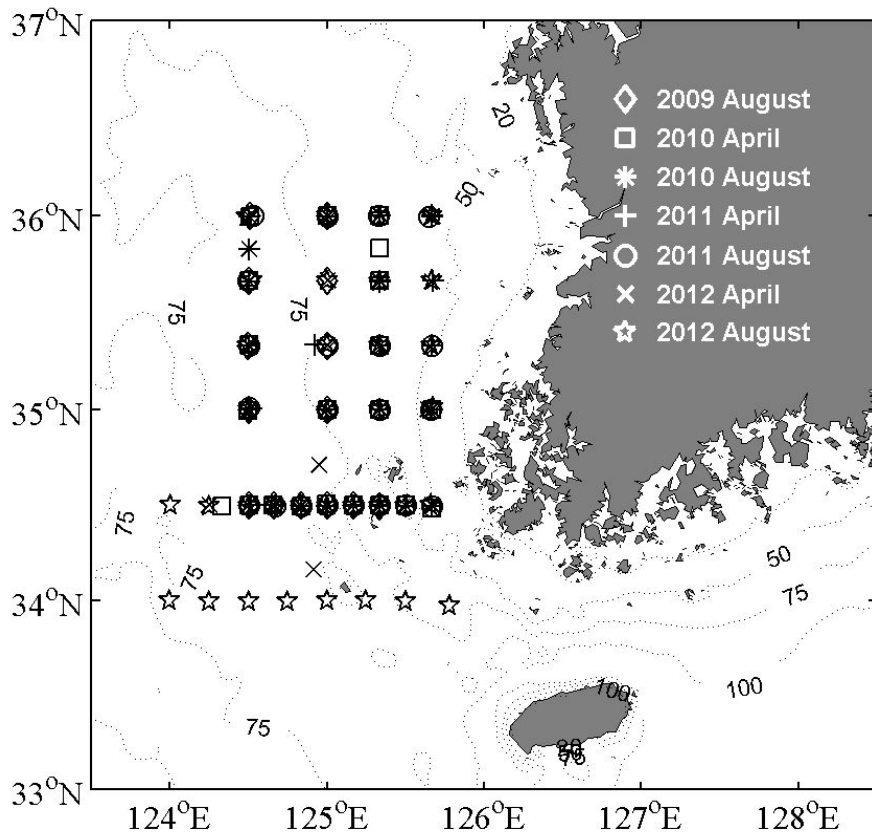


Fig. 3.1.1.7. Study area with the CTD casting stations during 2009~2012.

또한 겨울철 황해냉수괴 이남에 위치한 열염전선의 구조를 파악하기 위해 과거에 관측된 해수물성 자료를 재분석하였다. 이 해역은 난류수의 황해 유입이 일어나는 것으로 잘 알려진 곳이다. Figure 3.1.1.8은 2003년 2월의 NOAA 인공위성에 의한 표층수온 분포와 이 시기 조사선을 이용한 CTD 관측정점 그리고 해양관측부이 정점을 함께 도시한 것이다. 이 기간 중 겨울철 황해에 일반적으로 나타나는 'S'자 형태의 열염전선이 잘 발달해 있음을 보여준다. 관측은 이 전선 중에 제주도 서

방에서 황해 내부방향으로 비스듬하게 유입되는 고온수 - 혀모양을 형성하는 - 영역에서 집중적으로 이루어졌다. 이 중에서 제주도 북서부해역에서 동서방향으로 형성된 전선을 가로질러 남북방향으로 관측한 자료를 주로 분석하였다. 해수물성 자료와 함께 해양관측부이의 유속자료를 함께 비교하여 전선에서의 해수순환과 관련된 역학과정을 해석하였다.

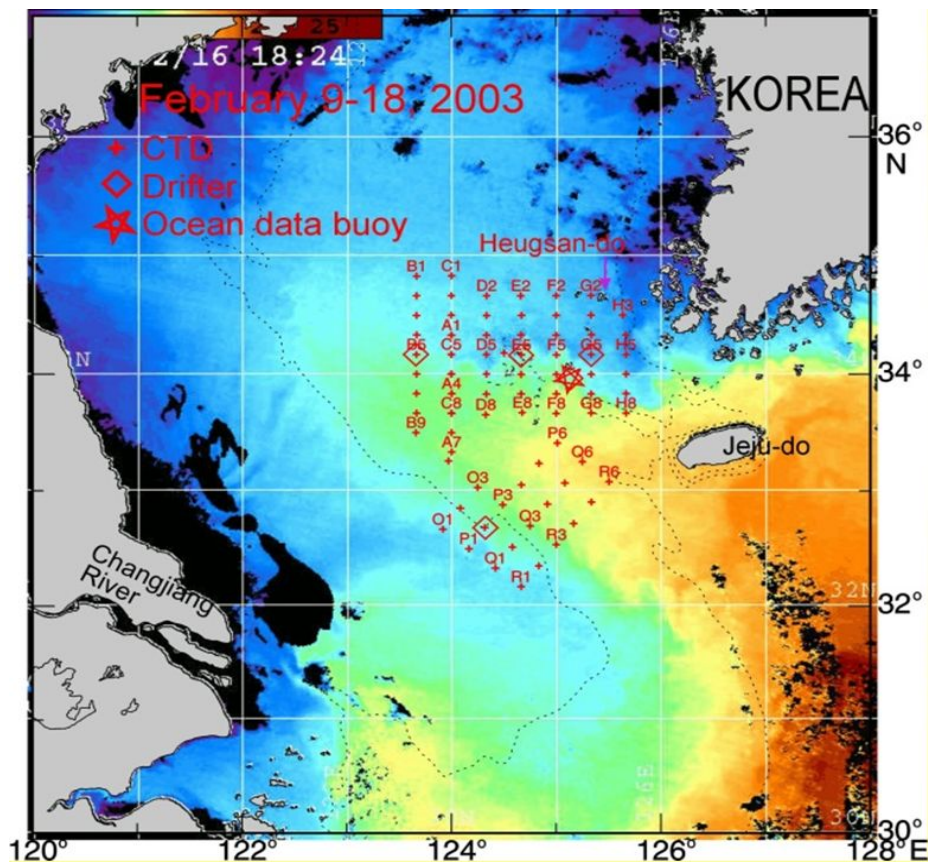


Fig. 3.1.1.8. Sea surface temperature image from NOAA in Feb. 16, 2003 with the CTD casting stations (+), Ocean data buoy (☆) and drifter (◇).

다. 결과 및 토의

(1) 황해냉수괴의 변동성

(가) 봄철과 여름철 수괴특성

일반적으로 겨울철 황해의 해수는 활발한 연직 혼합에 의해 표층과 저층이 거의 균질한 구조를 보인다. 이와 같은 특성은 복사에너지의 증가로 인해 표층수가 가열되지 전까지 유지되며, 여름철에 접어들면서 표층과 저층의 해수가 뚜렷하게 구분되어 진다.

Figure 3.1.1.9는 연구해역에서 관측된 봄철 (4월) 과 여름철 (8월)의 물성을 나타낸 T-S diagrams이다. 봄철 해수 특성을 보면, 2010년 4월에는 수온과 염분 모두 매우 작은 변동폭을 보인다. 이는 전 해역이 거의 동질한 해수로 이루어져 있고, 표층과 저층에서 연직혼합이 이루어지고 있음을 시사한다. 겨울철 특성이 4월까지도 유지되고 있으며, 연구해역 전반에 걸쳐 황해냉수괴가 분포하고 있다. 2012년 4월 특성도 2010년보다는 변동폭이 약간 크지만, 대부분 냉수괴의 특성 범위 안에 포함되고 있다. 단, 일부 정점에서는 33~33.5psu로 상대적으로 고염의 특성이 나타나고 있다. 이는 황해난류수의 특성과 유사하다.

그러나 두 시기와 달리 2011년 4월에는 저온저염의 황해냉수괴와 함께 고온고염의 황해난류수의 특성이 뚜렷하게 나타나고 있다. 이 고염의 해수는 34psu 이상의 염분을 나타내는데, 이는 쿠로시오에 기원한 난류수의 염분 특성과 같다. 다시 말해 동중국해로부터 황해 남부해역으로 난류수가 유입되고 있음을 뜻한다.

여름철에 관측된 해수 특성은 저온저염의 황해냉수괴와 고염의 난류수, 고온저염의 연안수, 그리고 저염의 양자강희석수가 혼합된 분포를 보이고 있다. 2009년과 2010년 2012년에는 이와 같은 수괴특성들이 뚜렷하게 나타나고 있으며, 유사한 구조를 보이고 있다. 그러나 2011년에는 다른 년도에 비해 특이한 특징을 보이고 있다. 표층에서는 23°C이하의 해수가 분포하면서 다른 시기에 비해 표층 수온이 5°C이상 낮은 값을 나타낸다. 염분 또한 큰 변화를 보이는데, 저층에서는 33.5psu보다 높은 염분 특성이 나타난다. 이는 봄철에 나타났던 황해난류수의 범위와 유사하다.

표층에 나타난 저온수는 태풍으로 인한 연직혼합의 영향에 의한 것으로 판단된다. 관측이 있기 3일전에 중심 기압 980hpa의 매우 강한 태풍이 황해 중앙부를

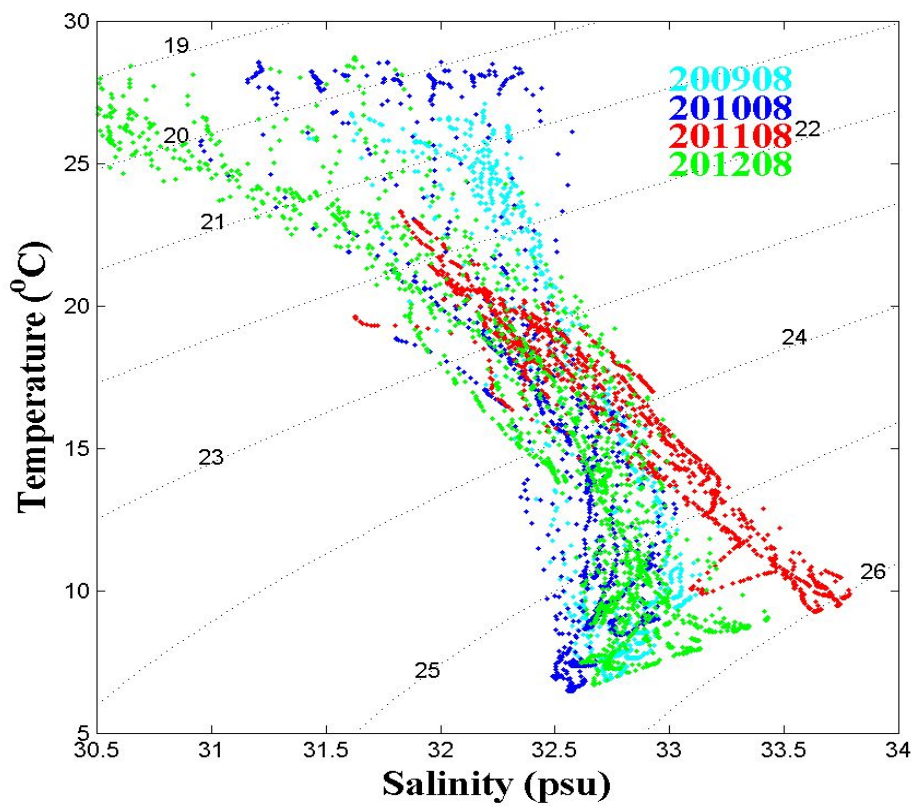
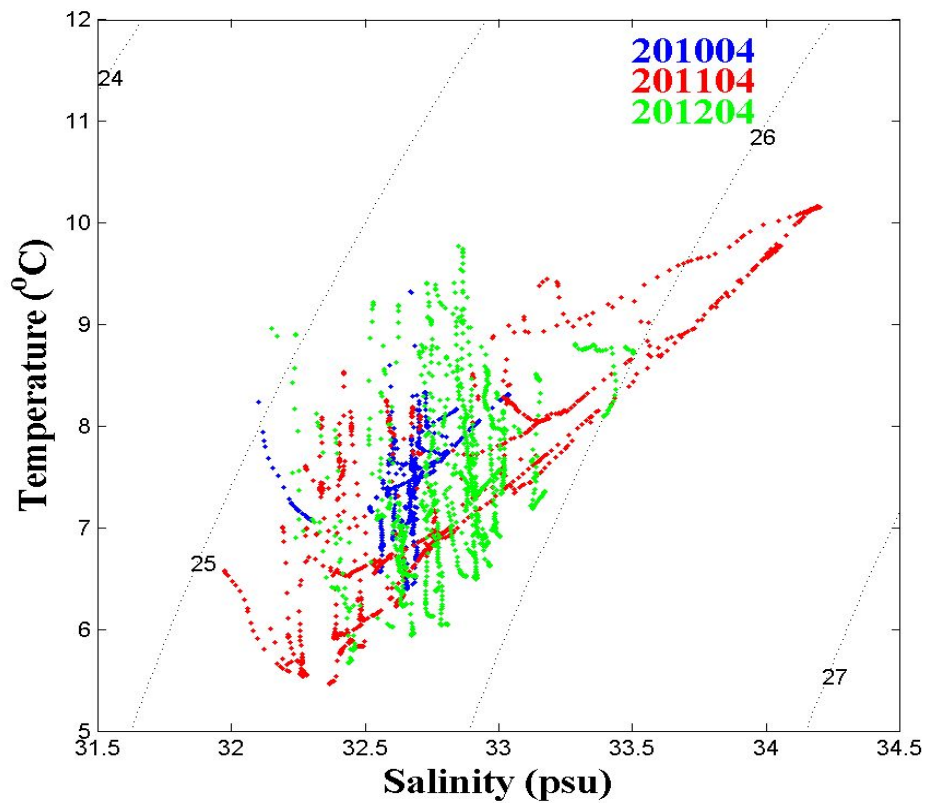


Fig. 3.1.1.9. T-S diagrams in April (upper) and August (lower), 2009 to 2012.

남북방향으로 통과하였다.

(나) 봄철 해수의 변동

Figure 3.1.1.10과 3.1.1.11은 2010년과 2011년, 2012년 4월에 관측된 표층과 저층(수심 50m 층)의 수온과 염분에 대한 수평분포를 나타낸 것이다. 모든 관측기간 동안 표층에서는 전반적으로 10°C 이하의 냉수괴가 분포하고 있으며, 연안보다는 황해 중앙부해역에서 높은 수온을 보이고 있다. 염분의 경우 대부분 33psu 보다 낮은 수치를 보이고 있다. 단, 2011년과 2012년에는 남부해역 일부에서 33psu보다 높은 값을 보이면서 난류수의 특징이 나타나고 있다. 전체적인 분포구조는 수온과 마찬가지로 연안에서 중앙부로 갈수록 높아지는 양상을 띤다.

저층의 경우, 2010년에는 8°C 이하, 33psu 이하의 냉수괴가 전 영역에 걸쳐 균질하게 분포하면서 전형적인 겨울철 특징을 보이고 있다. 그러나 2011년에는 북위 35°N 이북의 해역에서는 전년도보다 저온저염의 해수가 분포하고 있으며, 남부해역에서 고온고염의 해수가 황해 내부로 유입되는 해수구조가 나타나고 있다.

관측 자료가 황해 남부해역에 국한되어 있어 보다 정확한 해수의 공간적 분포를 파악하기는 어렵지만 이 고온고염수는 동중국해의 고온고염의 난류수가 황해 방면으로 확장되어 분포한 것으로 생각되어진다. 이 해역에서 최대 염분값은 34.2 psu로 이는 동중국해의 쿠로시오 해수에서 기원된 난류수의 특성과 같다.

2012년에는 35°N 이북에서는 2011년 북부해역의 특성과 유사하지만 남부해역에서는 2011년에 나타났던 고온고염수의 특성은 나타나지 않는다. 다만 주변해역보다 상대적으로 높은 수온과 염분을 가진 해수가 황해 중앙부와 흑산도 부근해역에 분포하고 있다. 이와 같은 해수 구조는 제주도 북서부해역에서 북서방향의 황해 중앙부로 난류수의 유입이 있음을 암시하고 있으며, 황해 중앙부의 고염분수는 이전 시기에 유입된 난류수가 떨어져 나간 것으로 판단된다. 한편 황해 중앙부의 냉수괴는 중앙골을 따라 남쪽으로 확장되어 분포하고 있다.

(다) 여름철 해수의 변동

Figure 3.1.1.12와 3.1.1.13은 2009년부터 2012년까지 8월에 관측된 표층 수온과 염분 분포를 나타낸 것이다. 수온의 경우, 대부분의 시기에 연안보다 황해 중앙부가, 남쪽해역보다는 북쪽해역에서 높게 나타나고 있다. 2009년과 2010년, 2012년에는

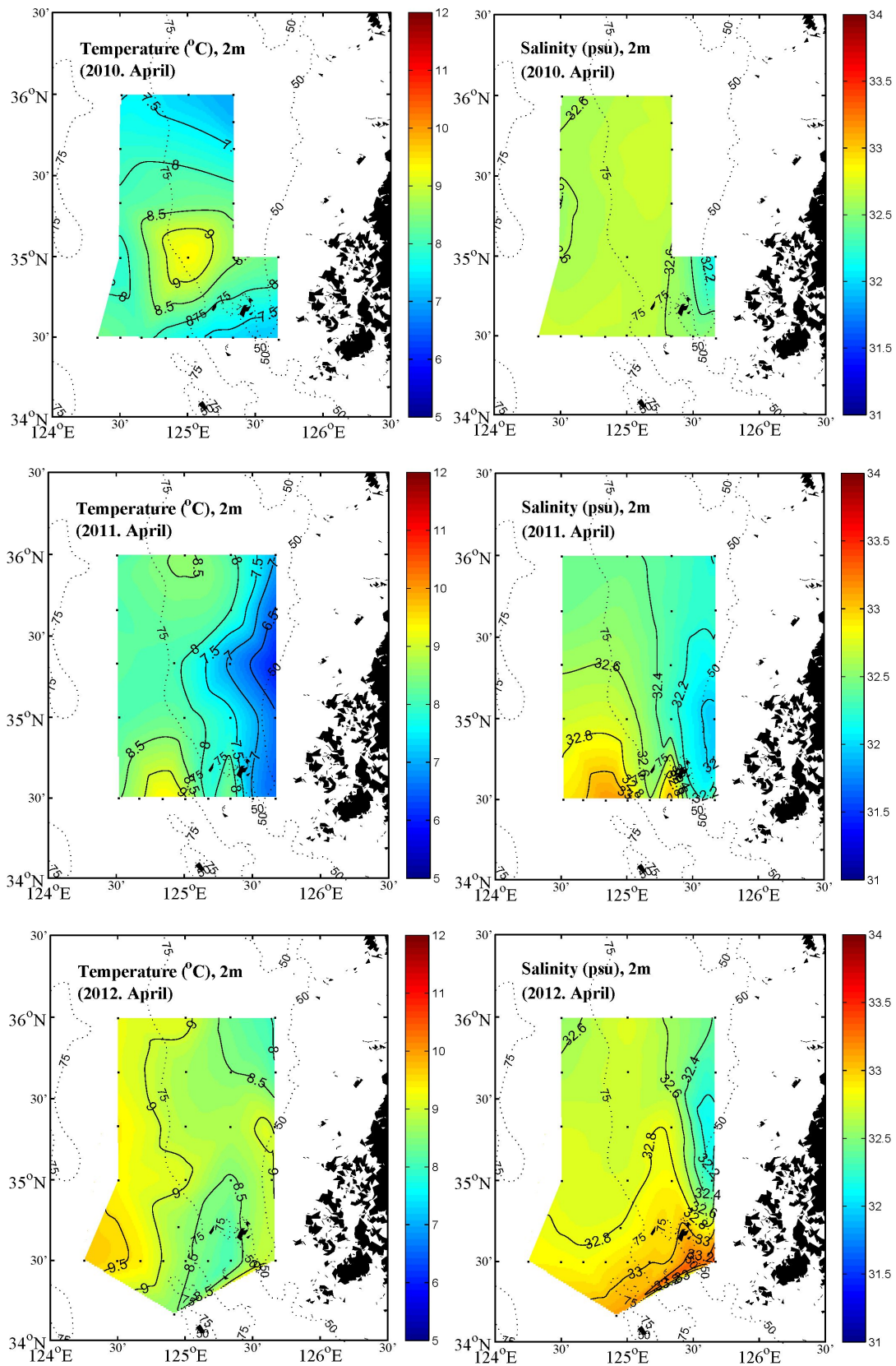


Fig. 3.1.1.10. Horizontal distributions of temperature and salinity at 2m depth in April, 2010 to 2012.

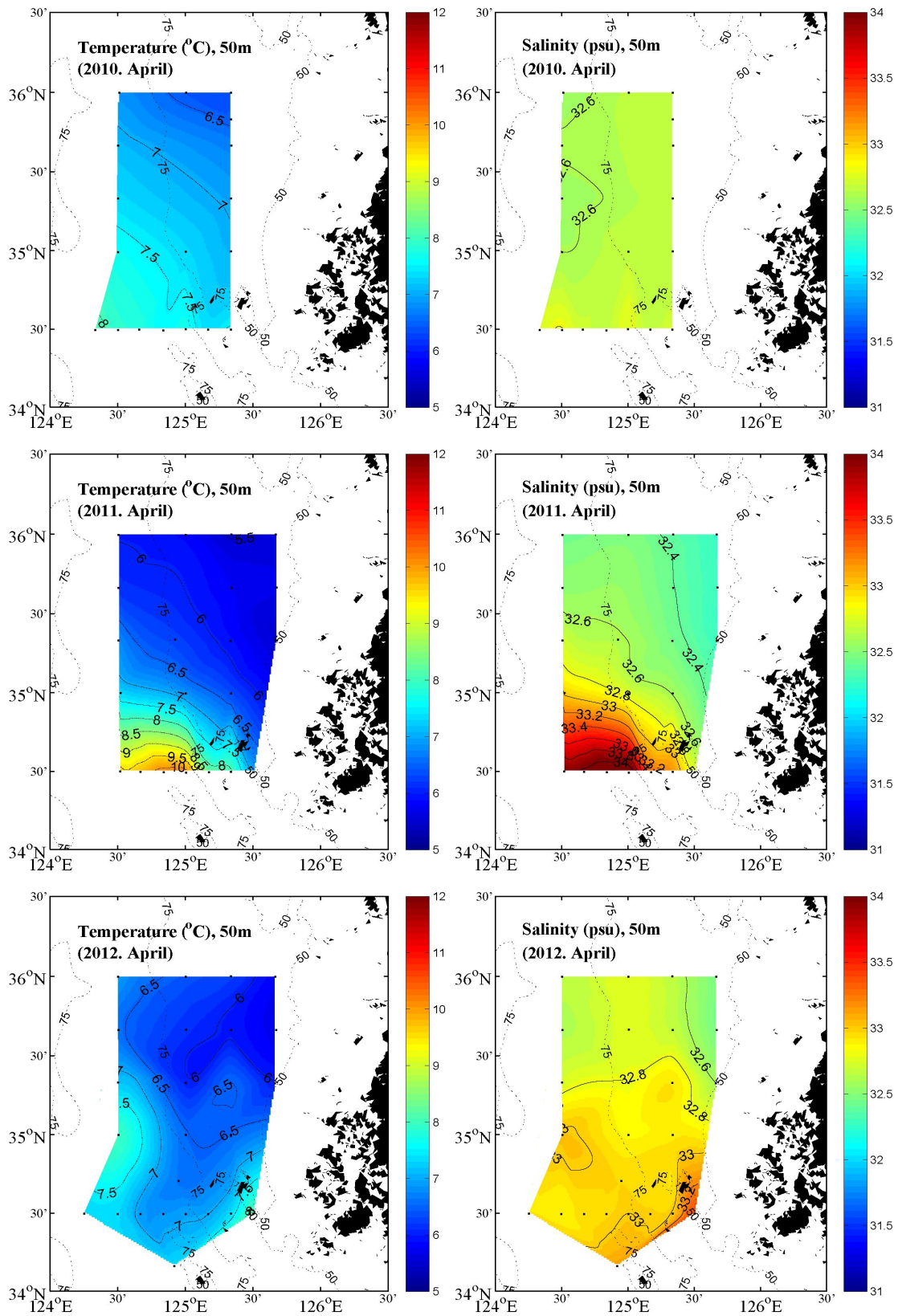


Fig. 3.1.1.11. Horizontal distributions of temperature and salinity at 50m depth in April, 2010 to 2012.

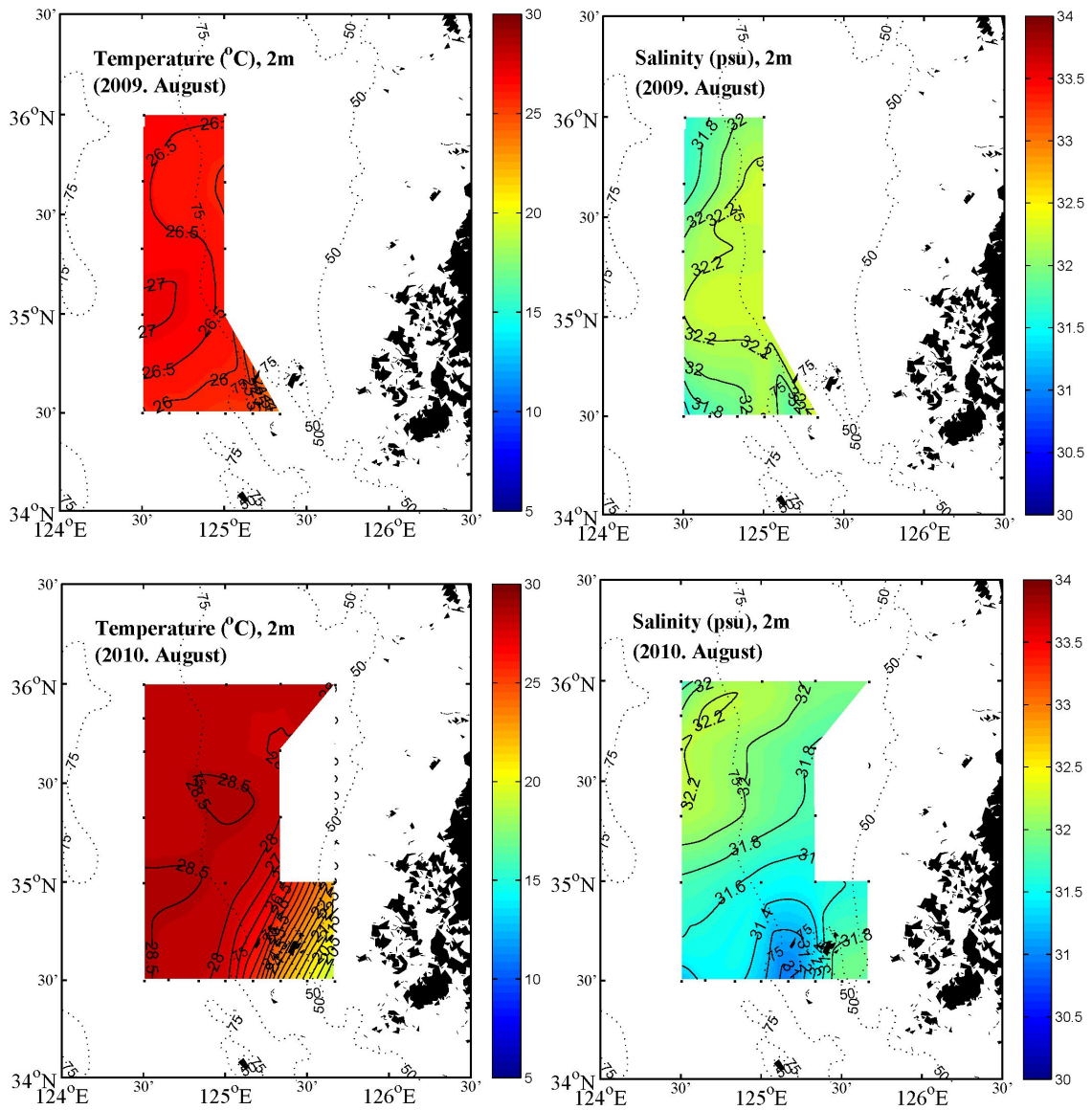


Fig. 3.1.1.12. Horizontal distributions of temperature and salinity at 2m depth in August, 2009 to 2010.

관측해역 전반에 걸쳐 26°C 이상의 고온수가 분포하면서 유사한 해수 구조를 보이고 있다. 그러나, 2011년에는 표층수온이 23°C 이하의 낮은 값을 보이며 황해 중앙부해역보다도 연안역이 더 높은 특징을 보인다. 이는 앞서 언급한 것처럼 태풍의 영향에 의한 것으로 판단된다. 관측이 있기 3일전에 태풍이 지나갔지만, 그 영향이 여전히 남아 있음을 알 수 있다.

염분의 경우, 전반적으로 변화폭이 그다지 크지 않고 대체적으로 유사한 구조를 보이고 있다. 단, 2012년에는 이전 관측과 달리 29psu 이하의 저염수대가 황해

내부에 분포하면서 표층 전반에 걸쳐 염분이 낮은 수치를 보인다. 이 저염수대는 양자강희석수에서 볼 수 있는 염분 범위를 보이고 있다. 양자강 입구에서 제주도 방면으로 향하던 저염수대가 외부영향에 의해 황해내부로 유입된 것으로 판단된다.

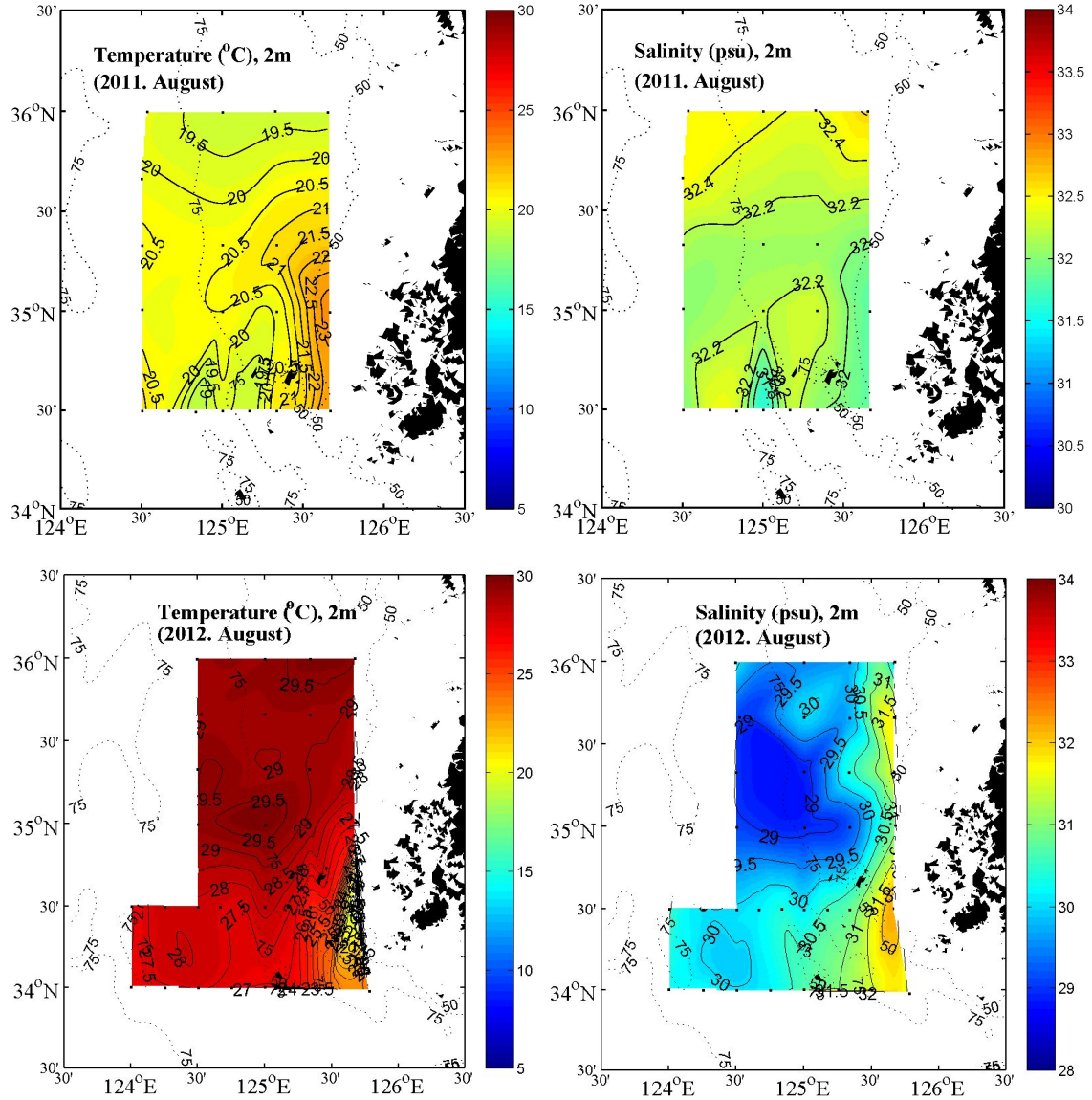


Fig. 3.1.1.13. Horizontal distributions of temperature and salinity at 2m depth in August, 2011 to 2012.

Figure 3.1.1.14와 3.1.1.15는 2009년부터 2012년까지 8월에 관측된 수심 50m 층의 수온과 염분 분포를 나타낸 것이다. 수온의 경우, 2009년과 2010년, 2012년 등 대부분의 관측시기에 10°C 이하의 냉수괴가 황해 중앙부해역에 분포하고 있다.

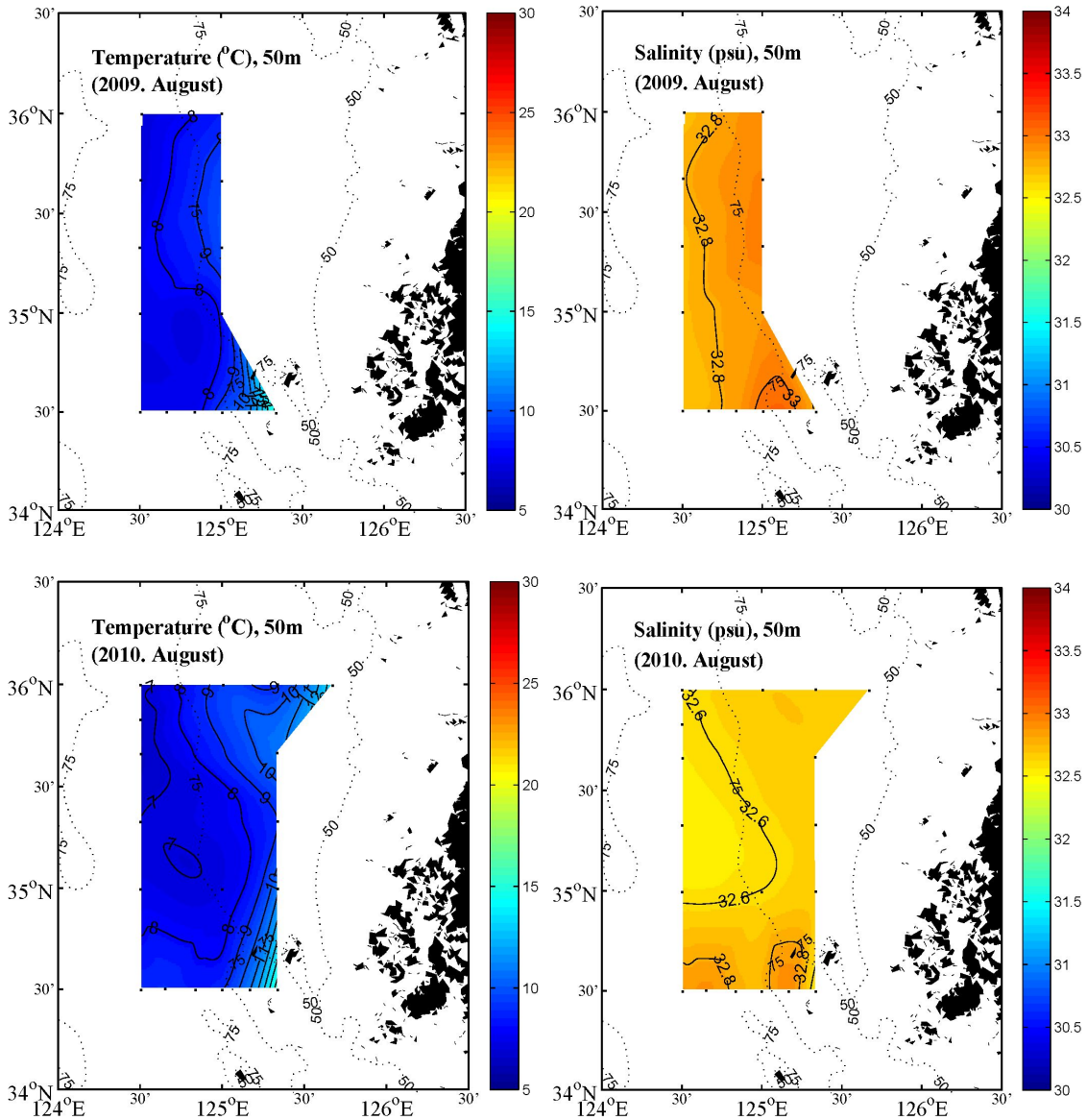


Fig. 3.1.1.14. Horizontal distributions of temperature and salinity at 50m depth in August, 2009 to 2010.

기존 자료들과 비교해 볼 때 이는 전형적인 황해냉수괴의 분포 형태를 보여 주고 있다. 그러나 이와 같은 냉수괴의 분포와 달리 2011년에는 황해 중앙부해역에서 다른 시기보다 상대적으로 고온인 냉수괴가 관측되었다. 등수심선의 분포를 보면 10°C 이하의 해수가 35.5°N 이남에 위치하고 있으며, 보통 125.5° E까지 분포하던 냉수괴가 125° E 이전까지 분포하면서 전반적으로 냉수괴의 분포영역이 축소된 경향을 보인다.

다른 시기와 비교해 볼 때 황해 중앙부해역에서 수온은 약 3°C 이상의 수온차가 난다. 태풍에 의한 영향이 저층냉수괴의 분포에도 영향을 주고 있음을 알 수 있다. 2012년에는 황해 중앙골 해역에서 34°N 이남까지 냉수괴가 분포하고 있다. 다른 시기보다도 더 냉수괴가 남북방향으로 확장되어 분포하고 있는 양상을 보인다.

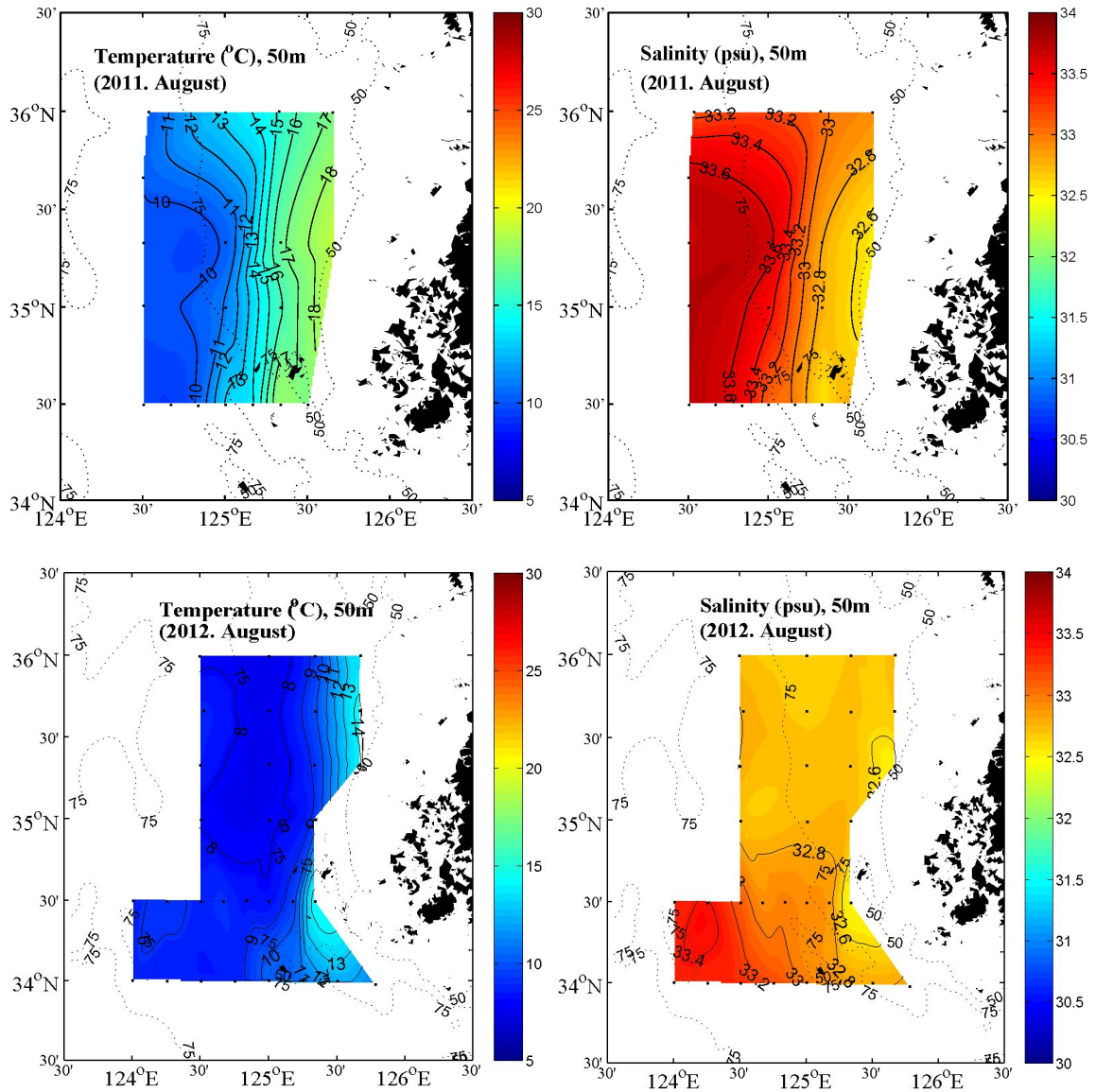


Fig. 3.1.1.15. Horizontal distributions of temperature and salinity at 50m depth in August, 2011 to 2012.

염분의 경우, 다른 시기에는 33psu 이하의 염분을 나타내지만 2011년에는

33.6psu 이상의 고염분이 황해 중앙부해역에서 나타나면서, 1psu 이상의 큰 차를 보이고 있다. 이와 같은 저층 염분의 고염화 현상은 이 관측시기에 있었던 태풍에 의한 연직혼합만으로는 설명하기 어렵다. 왜냐하면, 표층 염분은 다른 시기의 염분 분포와 크게 다르지 않기 때문이다. 전반적으로 약 0.2psu 정도 증가하였다. 이는 연직혼합에 의한 영향보다는 외력에 의한 고염수의 유입 가능성을 시사하고 있다.

(라) 황해냉수괴의 공간분포

지난 4년간의 현장조사 결과를 통해, 황해냉수괴의 분포 특성을 살펴보았다. 관측 기간이 짧고, 관측 영역 또한 황해 냉수괴를 대표하지는 못하지만 대략적인 분포 구조를 파악할 수 있다. Figure 3.1.1.16은 Fig. 3.1.1.14와 3.1.1.15에서 여름철 저층에 존재하는 황해냉수괴의 분포를 간단히 도시한 것이다. 그림에서 바탕에 검정색 등온선으로 나타낸 수온 수평분포도는 KODC에서 제공하는 자료로, 1990년부터 2011년까지 22년간 자료를 평균하여 나타낸 것이다. 황해 중앙부로 갈수록 수온이 낮아지고 있으며, 10°C 이하의 냉수괴는 전체 수심이 50m 이심인 비교적 수심이 깊은 황해 중앙골 해역에 위치하고 있다. 관측영역이 제한된 관계로 냉수괴의 전체 구조를 파악할 수는 없지만, 비교적 넓은 영역에 걸쳐 분포하고 있으며, 남북방향으로 길게 분포하고 있음을 유추할 수 있다.

평균수온 분포도 위에 도시된 분홍색(2009년)과 노란색(2010년), 흰색(2011년), 빨간색(2012년) 실선은 2009년부터 2012년까지 8월달 황해냉수괴의 경계를 나타낸 것이다. 황해냉수괴를 10°C 이하의 해수로 정의하였기 때문에, 냉수괴의 경계는 10°C 등온선으로 나타냈다.

냉수괴의 분포는 평균 분포 해역보다 더 남쪽으로 확장된 양상을 보인다. 동서 방향의 분포 또한 2009년도에는 평균 분포도와 유사한 분포 영역을 보이고 있으나, 2010년과 2012년은 냉수대가 서쪽 방향으로 더 확장되어 우리나라 연안에 근접하게 분포하고 있다. 태풍의 영향을 받았던 2011년에는 냉수괴의 영역이 2009년에 나타난 냉수괴의 경계보다도 서쪽에 치우치면서 냉수괴가 중앙골 부근에 제한되고 있으며, 북쪽의 경계도 상당히 남쪽으로 치우쳐 분포하고 있다.

이 관측으로는 냉수괴의 남북방면의 경계는 예측하기 어렵지만, 중앙부에서 동쪽으로는 대략 125°E~125.5°E를 냉수괴의 경계로 볼 수 있다. 여기서 제시된 자료는 극히 제한된 자료로서, 이 자료만으로는 전체적인 냉수괴의 구조를 알 수 없

기 때문에 냉수괴가 우리나라 방면으로 치우친 것인지, 아니면 전반적으로 냉수괴의 분포영역이 확장 또는 축소된 것인지는 판단할 수 없다. 황해냉수괴가 환경요인에 영향을 받고 있으며, 시·공간적으로도 변동성이 커서 그 영역을 정의하기는 쉽지 않다.

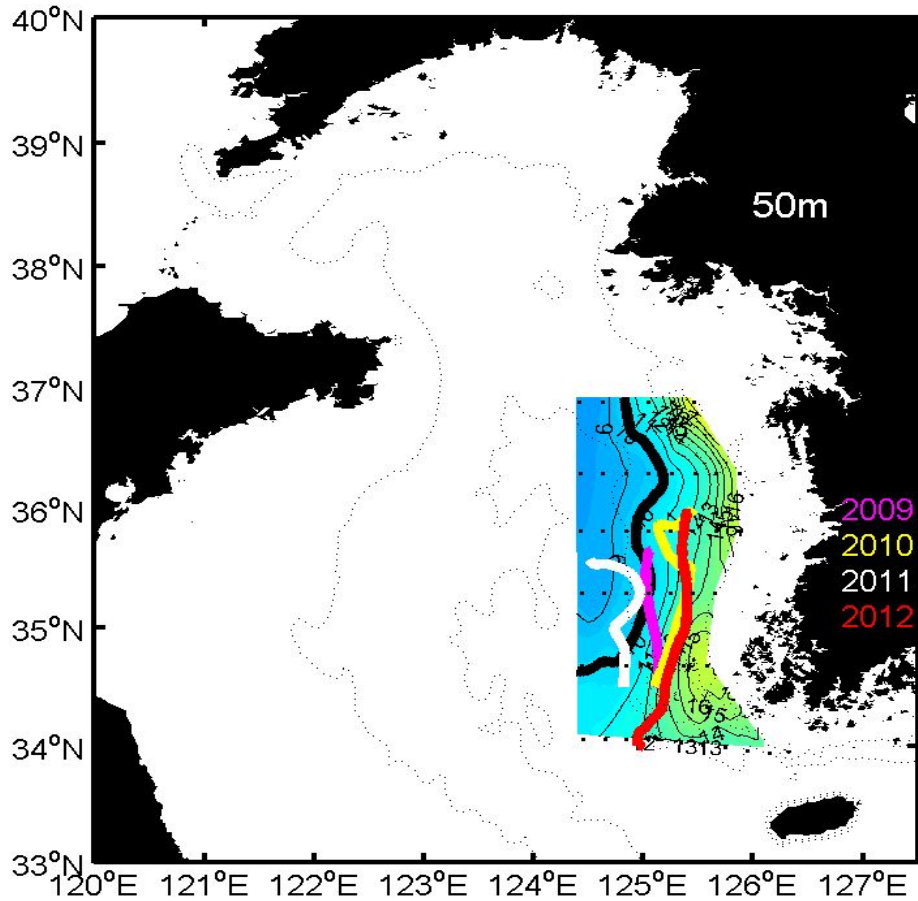


Fig. 3.1.1.16. Variation of the isothermal 10°C at the 50m depth in August, 2009 to 2012, represented by the thick line. Black contours show the mean temperature during 22 years at 50m depth by KODC.

(마) 황해냉수괴의 경년변동성

앞 절에서 언급한 것처럼, 4년에 걸친 관측결과 2011년 4월에 예년보다 고온고염의 해수가 황해 중앙부해역에서 관측되었다. 이 고온고염수는 일반적으로 겨울철에 황해 중앙부를 통해 유입되는 것으로 알려진 황해난류수의 특성과 유사하지

만, 황해 중앙부해역보다는 우리나라 방면으로 치우쳐 분포하고 있다. 이와 같이 4월에 이 해역에서 고염의 황해난류수가 황해 내부로 유입되는 경우는 매우 드문 현상이다. 황해로 유입된 고염분수의 특성을 파악하기 위해 장기간 동안 관측된 정선 자료를 살펴보았다.

Figure 3.1.1.17은 황해 남동부해역에 위치한 정점에서 관측된 4월달 수온과 염분의 변동을 나타낸 것이다. KODC 정선자료로 냉수괴의 특성을 반영하고 있는 수심 50m의 자료를 선택하였다. 1990년부터 2011년까지 약 22년간 자료로, 북위 34.717°N 정선에서 황해 중앙부해역에 가장 가까운 정점 124.39°E와 우리나라 방면에 위치한 정점 125°E의 해수 물성 자료이다. 평균 수온은 약 8°C이며, 평균 염분은 약 33psu이다.

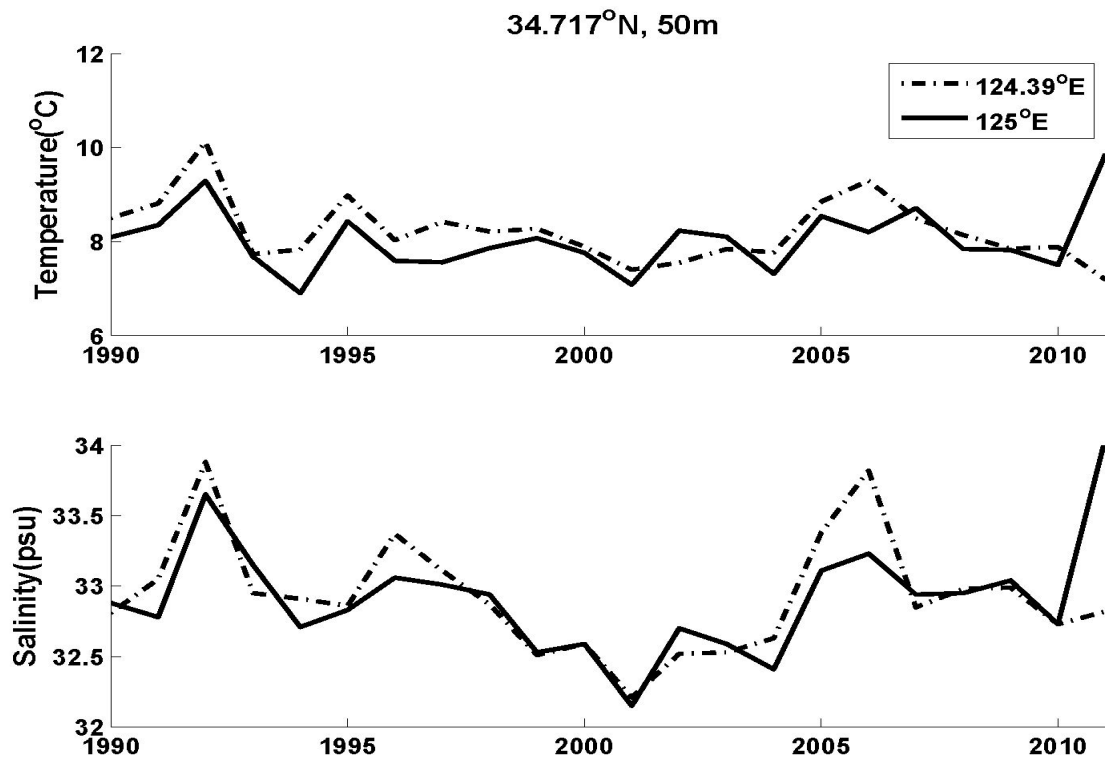


Fig. 3.1.1.17. Time series of temperature and salinity at the 50m depth in April during the 1990 to 2011. The solid lines represented the variation of temperature at 124.39°E, 34.717°N, and the dotted lines means the variation at 125.°E, 34.717°N.

시계열분포에서 33psu 이상의 고염이 나타나는 시기는 두 지점 모두 1992~

1993년, 1996~1997년, 2005~2006년, 2011년 등 총 4회에 걸쳐 나타나고 있다. 짧게는 4년, 길게는 10년의 주기를 보이고 있다. 특히, 2011년 관측치를 보면 황해 중앙부해역보다 우리나라 방면에 치우친 정점에서 보다 고온고염의 물성 특성이 나타나고 있다.

(바) 고온고염수의 유입과 바람의 영향

Figure 3.1.1.18은 Fig. 3.1.1.17에서 고온고염수가 관측되었던 1992년과 2011년 4월달 수심 50m 에서의 수온과 염분의 수평분포를 나타낸 것이다. 두 시기 모두 10°C 이상의 고온수가 황해내부로 유입되고 있으며, 염분은 34psu 이상을 나타내고 있다. 황해 중앙골해역보다 우리나라 방면으로 치우친 곳에서 고온고염수의 유입이 나타나고 있다. 여기서 2011년 4월 관측은 Fig. 3.1.1.11에 나타낸 관측 보다 일주일 후에 수행되어졌다.

이 같은 고온고염의 난류수는 제주도 북서부해역에 위치한 황해난류수의 북상에 의한 것으로 판단되지만, 유입 원인에 대해서는 아직 명확히 밝혀지지 않았다. 겨울철 황해 내부로 북상하는 난류수가 강한 북서계절풍에 의한 역풍류 (Upwind flow)로 설명되어지고 있는 것처럼, 이 난류수의 북상 역시 북서계절풍에 의한 영향으로 판단되어지고 있다. Lie and Cho (2001)는 간헐적으로 부는 강한 북서계절풍에 의해 동중국해의 난류수가 황해 중앙골을 통해 황해 내부로 유입된다고 하였다. 그러나 최근에 보고된 내용에 의하면, 황해난류수는 연중 존재하며 저층에서 황해 중앙골의 서쪽에 치우쳐서 황해 내부로 유입된다고 한다 (Lin et al., 2011a,b).

이와 같은 난류수의 유입 변동은 저층에 위치하는 냉수괴의 분포에도 영향을 미칠 수 있을 것으로 판단된다. 실제로 2011년 4월에 고온고염수가 남쪽에서 북쪽으로 황해 내부 깊숙이 유입됨에 따라 황해 중앙부에 위치한 냉수괴가 북쪽으로 치우쳐 분포하는 양상을 보이고 있다. 이 시기 황해 남부해역에는 고염수가 위치하고 있다.

난류수의 북상을 일으키는 원인을 파악하기 위해 이 해역에서의 바람자료를 살펴보았다. Figure 3.1.1.19는 분석에 이용된 바람자료의 정점을 나타낸 것이다. 그림에서 원(●)으로 나타낸 것은 우리나라 주변해역을 대상으로 고해상도 기상모델 (WRF model)을 수행한 후 얻은 자료의 정점이며, 마름모(◆)는 전지구 바람자료 (NCEP2)의 정점을 나타낸 것이다.

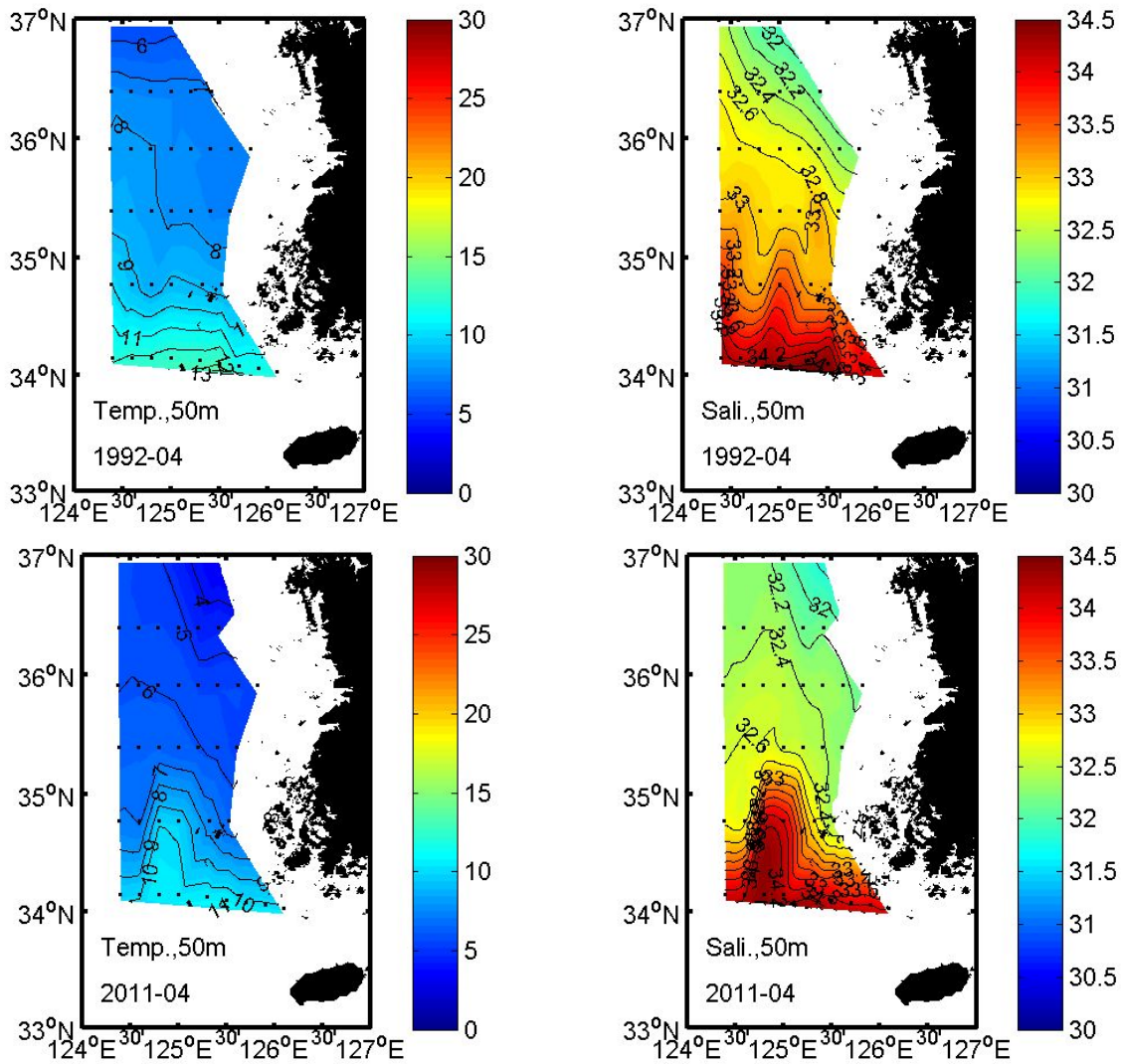


Fig. 3.1.1.18. Horizontal distribution of temperature and salinity at 50m depth in April, 1992 and 2011(KODC).

Figure 3.1.1.20은 기상모델 결과에서 얻은 바람의 시계열분포로, 황해 중앙골에 위치한 124.5°E, 36°N 지점의 자료를 나타낸 것이다. 일평균 바람자료의 남북성분을 나타낸 것으로, 2009년부터 2011년까지 겨울철 바람을 대표하는 1월부터 3월까지의 풍속이다. 전 기간에 걸쳐 남풍계열보다는 북풍계열의 성분이 크게 나타나고 있다. 특히, 2011년 겨울이 다른 시기보다 북풍계열의 바람이 약 30% 이상 강하게 나타났으며, 북풍계열의 바람이 있던 시기도 남풍계열의 바람이 있던 시기보

다 더 오래 지속되었다.

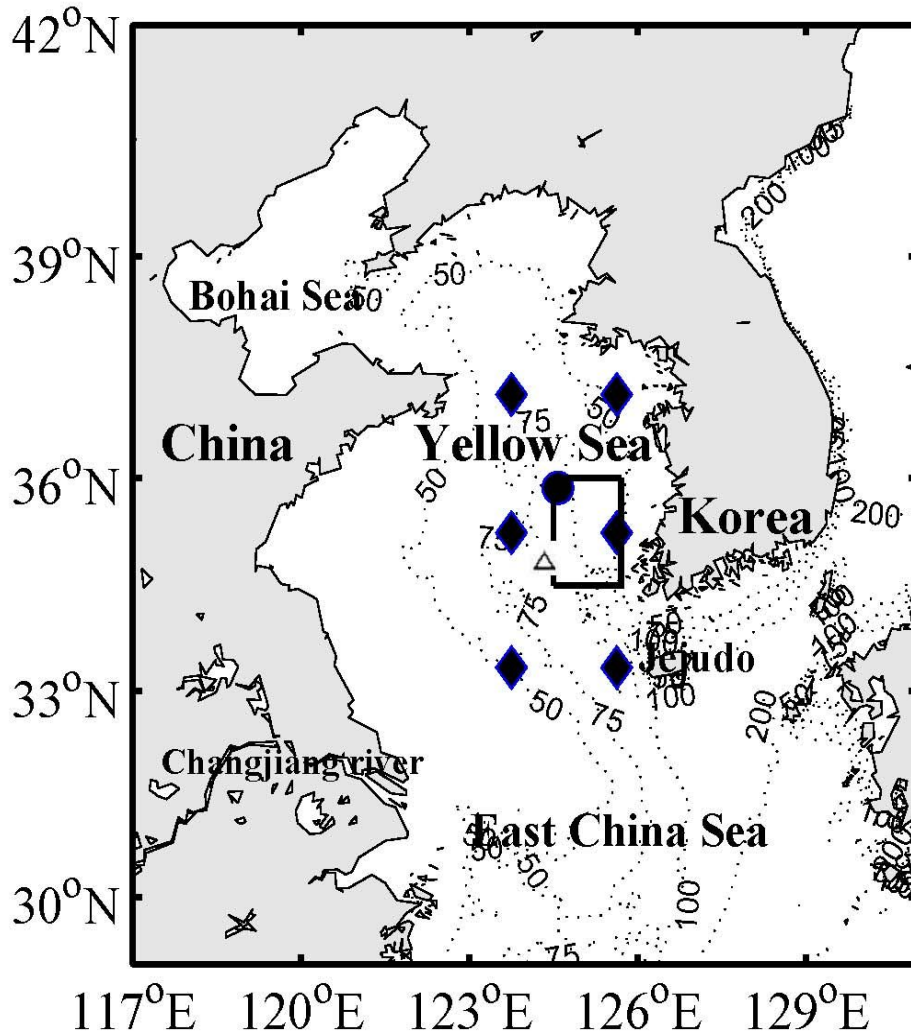


Fig. 3.1.1.19. Study area with wind data station (diamonds for NCEP2 and circle for local WRF model) and the KODC data marked with the triangle symbol. Bathymetry contours are shown in meters.

Figure 3.1.1.21은 황해 남동부 해역에서 바람(북풍성분)과 염분과의 상관관계를 나타낸 것이다. 여기서 사용된 바람은 전지구 바람자료인 NOAA NCEP2이며, 염분은 KODC의 정점 124.4°E, 34.0°N에서 4월에 관측된 자료이다. 두 자료 모두 기간은 1991년부터 2010년까지이다. 바람자료는 현장관측 해역을 포함한 황해 중앙부의 6 지점에 해당되는 자료를 선출하여 평균한 값을 사용하였다. 각 자료의 위치

는 Fig. 3.1.1.19와 같다. 두 요소를 비교하기 위해 상관성을 계산해본 결과, 상관계수는 약 0.56로 비교적 높은 수치를 보였다. 전 지구 바람자료의 해상도가 $2.5^{\circ} \times 2.5^{\circ}$ 이고 월별 평균자료임을 고려한다면 이 수치는 비교적 높다고 판단된다.

이와 같은 결과는 북풍계열 바람과 염분이 서로 상관성이 있음을 시사한다. 앞서 황해 중앙부 해역에서 북풍계열의 바람이 있던 시기와 남부해역에서 고온고염수가 발생했던 시기가 일치하는 것으로 보아 강한 북서계절풍에 의한 역풍류가 난류수의 북상을 유도한 것으로 생각되어진다.

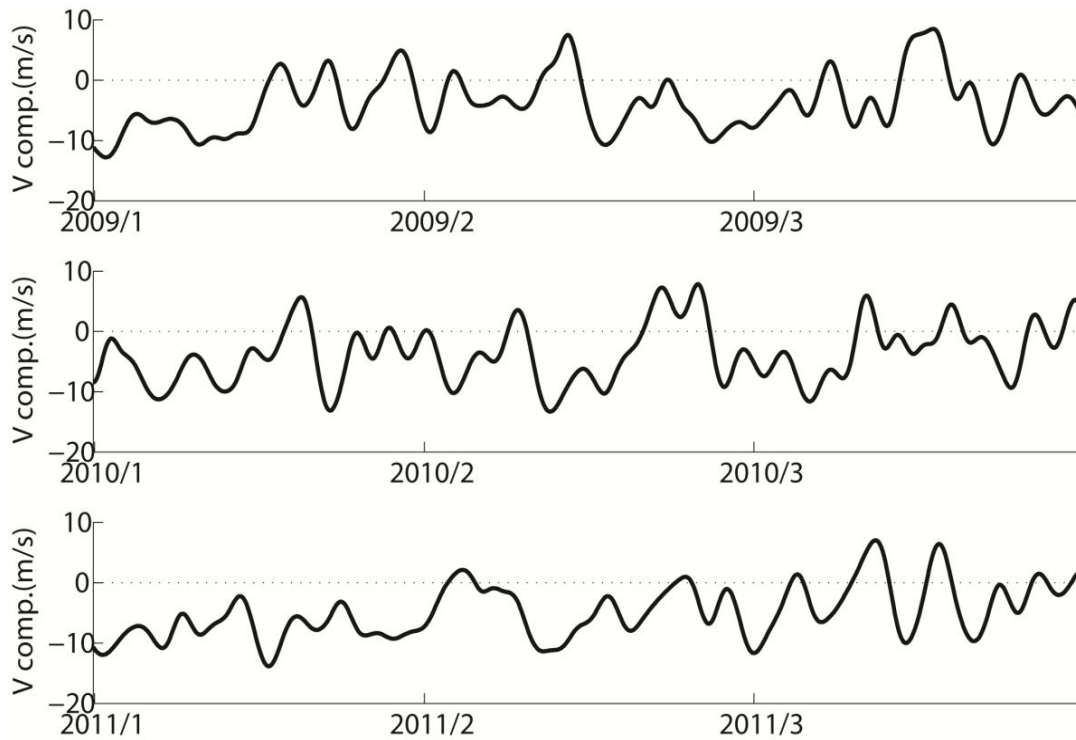


Fig. 3.1.1.20. Variation of the North-south components of daily mean wind at 124.5°E , 36°N by the high resolution Weather Research and Forecast (WRF) model during winter season, 2009 to 2011.

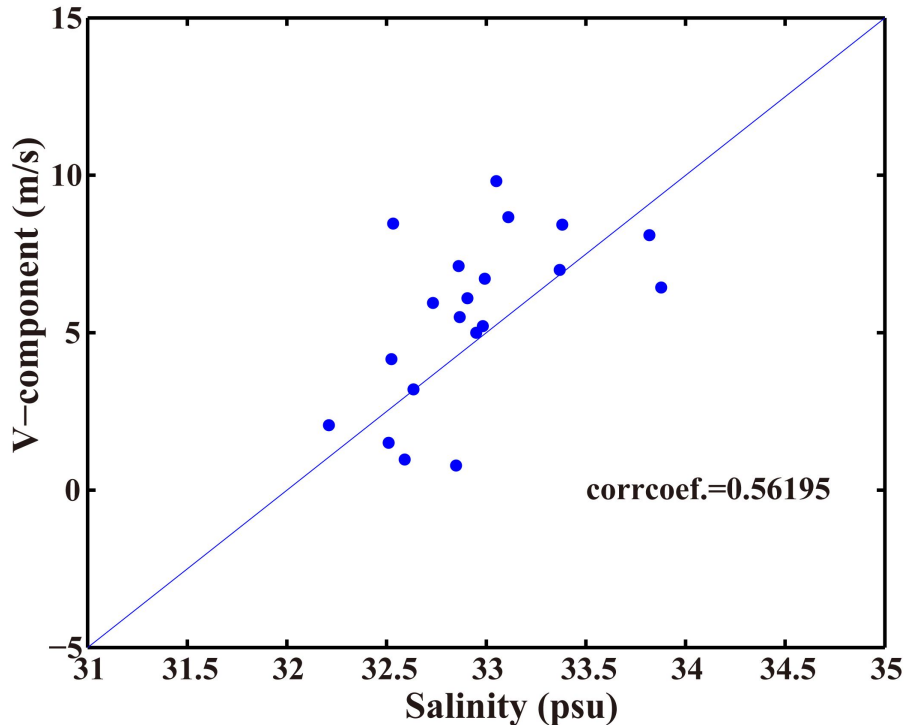


Fig. 3.1.1.21. Correlation of wind (North component) from NCEP2 and salinity at 124.4°E, 34.0°N during 1991 and 2010.

(사) 황해냉수괴의 변동과 북극진동지수

우리나라를 포함하고 있는 중위도 지역의 기후는 북극진동과 관련성이 높은 것으로 알려져 있으며, 최근 황해냉수괴의 변동이 북극진동지수와 밀접하게 관련되어 있다고 보고되고 있다 (Jang et al., 2010; Part et al, 2011).

Figure 3.1.1.22는 1990년부터 2012년 10월까지의 북극진동지수(AO index)를 나타낸 것이다 (NOAA). 장기간에 걸친 변동 특성을 보면, 2009년 겨울부터 2011년까지 매우 낮은 북극진동지수가 나타나고 있다. 특히 2010년 12월부터 2011년 3월까지 매우 강한 음의 지수가 나타나고 있다. 음의 북극진동지수는 중위도 지역의 기온이 낮아짐을 뜻한다. 즉 강한 음의 지수가 나타나는 2010년 12월부터 2011년 3월까지의 우리나라해역에 지속적으로 강한 한파가 있었음을 알 수 있다. 이 시기에 우리나라에서는 강한 북서계절풍이 지속되었다.

Figure 3.1.1.23은 북극진동지수와 황해냉수괴와의 관계를 보여준다. Figure 3.1.1.23(a)는 4월달 황해 중앙부에 위치한 정점에서의 표층수온 anomaly와 북극진

동지수의 변동을 나타낸 것이며, Fig. 3.1.1.23(b)는 (a)와 같은 지점에서 8월달 수심 50m층의 수온 anomaly와 북극진동지수의 변동을 나타낸 것이다. 황해중앙부 정점은 총 5개 지점 - 124.4°E/36.9°N, 36.3°N, 35.85°N, 35.3°N, 34.0°N - 에서의 평균값이다.

4월달 수온의 변동과 북극진동지수의 변동을 살펴보면, 전반적으로 두 변수의 변동 패턴이 매우 유사함을 알 수 있다. 북극진동지수가 양의 값을 보일 때, 수온도 증가하는 패턴을 보인다. 그러나 일부 시기에는 반대되는 변동을 보이기도 한다. 즉, 강한 음의 북극진동지수가 있었던 2010년에는 표층수온도 감소하는 경향을 보였다. 그러나 1993년에는 북극진동지수가 양의 값을 보이는데 반해 수온은 음의 값을 보였다. 8월달 냉수괴의 수온 변동도 이와 같은 특성을 보인다. 그러나 4월달 표층수온의 변동보다는 매우 잘 일치하는 것으로 나타났다. 일부시기에 냉수괴의 수온 변동이 북극진동지수의 변동과 일치하지는 않지만, 전반적으로 매우 유사한 변동을 보이고 있다. 이는 냉수괴의 변동이 북극진동지수의 변동과 무관하지 않음을 시사한다.

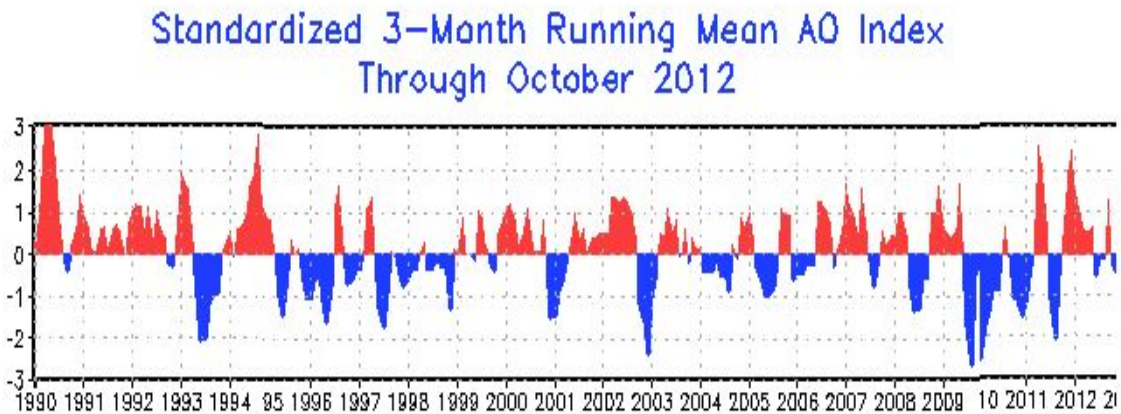


Fig. 3.1.1.22. Time series of the Arctic oscillation index from 1990 to October 2012 (NOAA).

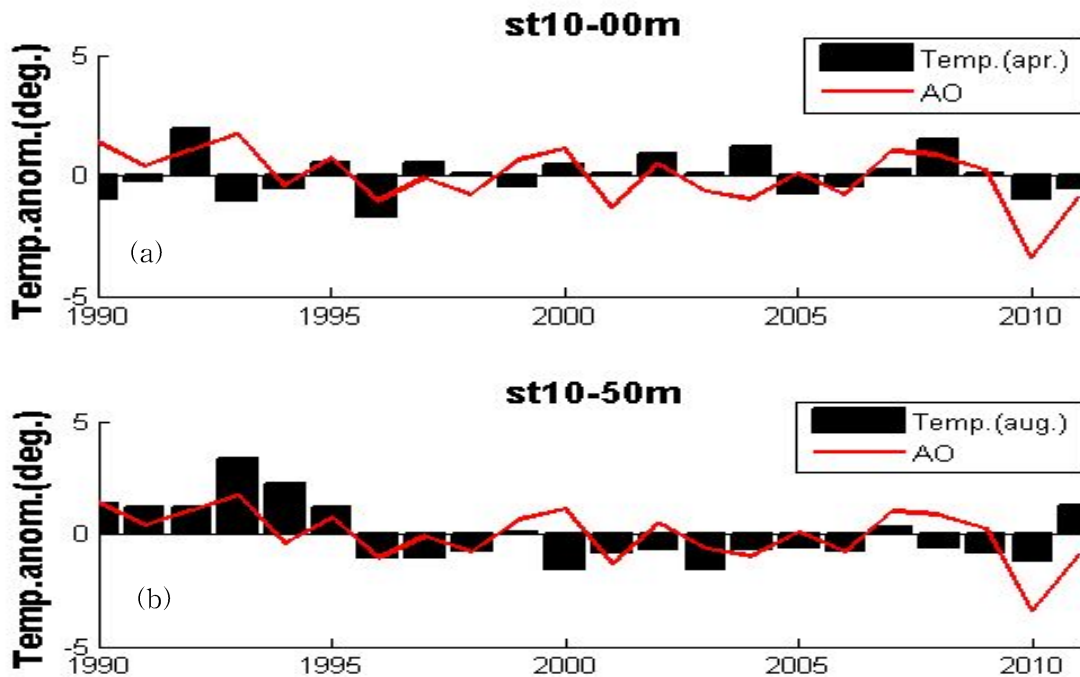


Fig. 3.1.1.23. Variation of temperature anomalies at 124.4°E -36.9°N, 36.3°N, 35.85°N, 35.3°N, 34.0°N with the AO index, (a) surface temperature anomalies in April, (b) temperature anomalies at 50 m depth in August.

(2). 겨울철 황해남부 열염전선의 물성구조와 해수순환

(가) 연직 수온분포 특성

열염전선의 물성구조를 파악하기 위해 전선을 따르는 남북방향의 단면 구조를 살펴보았다. Figure 3.1.1.8에서 황해 중앙부에 가까운 부분부터 B~H 정선으로 명명되어졌으며, 그 중 C~F에 대한 남북방향의 단면구조를 분석하였다. 단면에 대한 연직 수온분포를 보면 남쪽의 고온고염수가 북쪽의 저온저염수 아래로 비스듬한 썰기형태로 밀려들어간 형태가 나타난다 (Fig. 3.1.1.24).

이와 같이 고온고염수가 저온저염수를 파고드는 해역에서는 저층의 수온이 상층의 수온보다 높은 수온역전이 형성되는데 겨울철 황해 남부의 전선역에서 종종 관측되는 현상이다. 이는 고온고염의 난류수가 상대적으로 밀도가 낮고 저온저염인 황해냉수를 만나면서 형성되는 구조로 해석된다.

겨울철 황해역에서는 저온저염의 황해냉수괴가 위치하고 있으며, 황해 남쪽 동중국해와 맞닿은 해역에서는 황해내부로 유입되는 고온고염의 황해난류수와 제주

도 북서부해역에서 제주해협으로 빠져나가는 고온고염의 제주난류수가 위치하고 있다. 이러한 수온의 역전 현상은 봄철까지 유지되기도 하는데, 2009년 이후 4월에 관측된 자료에서도 나타난다.

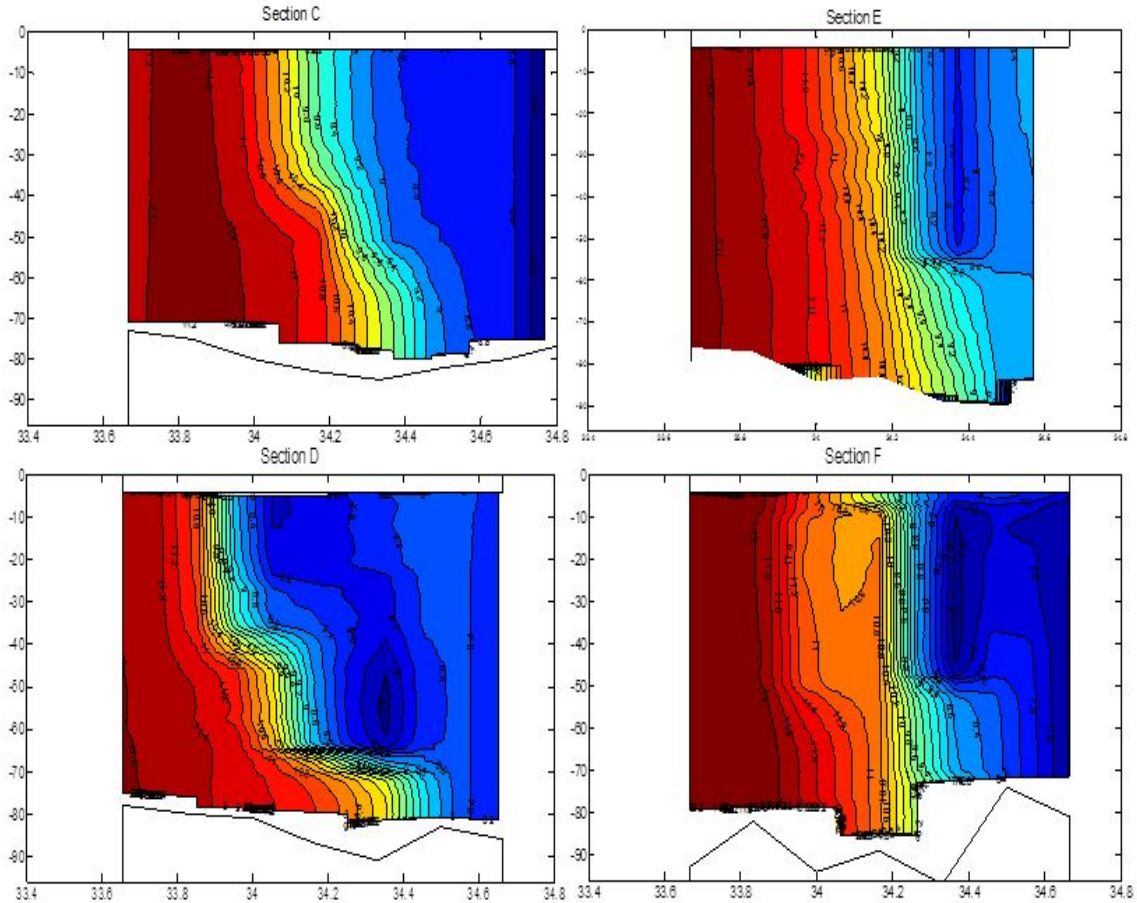


Fig. 3.1.1.24. Vertical distributions of temperature at section C, D, E and F shown in Fig. 3.1.1.8.

(나) 지형류 조정(Geostrophic adjustment)

이런 구조가 형성되는 것은 밀도가 다른 두 수괴가 만나면서 지형류 조정(Geostrophic adjustment)을 이루는 과정 때문이다. 즉, 두 수괴의 밀도차이에 의해 형성된 압력경도력과 전향력이 서로 균형을 이루게 되고, 수괴의 경계면은 연직에 대하여 비스듬한 경사를 이루면서 전선을 형성하게 된다.

Ou (1983)는 Fig. 3.1.1.25처럼 two-layer 모델을 이용하여 전선을 가로지르는 해역의 상층에서는 외해에서 멀어지는 방향으로 해류가 흐름을 설명했다. 저층에서

는 고온고염의 밀도가 높은 동중국해 해수가 위치하고 있고, 상층에서는 저온저염의 상대적으로 밀도가 낮은 황해냉수가 존재할 때 상층에서는 연안에서 외해방면으로 향하는 서향류가 형성된다. 이론적으로 남쪽에 밀도가 높은 수괴가 위치하는 경우 열풍 (thermal wind)효과에 의하여 전선의 상층에서는 서향류가 그리고 전선의 하부에서는 동향류를 형성된다.

2003년 황해남부 전선의 경우, 전선의 폭은 약 30km 정도로, Fig. 3.1.1.25에서 제시하는 전선의 폭과 유사한 값을 보였다. 이는 Fig. 3.1.1.24에서 제시된 전선에서 나타나는 수온역전 구조가 지형류 조정에 의한 것임을 뒷받침한다. 전선의 상층에서 관측된 서향류는 이러한 밀도구조에서 나타나는 열풍효과에 의한 것으로 해석된다.

전선해역에서 관측된 해양관측부이 자료는 이와 같은 특성을 잘 반영하고 있다. Figure 3.1.1.26은 해양관측부이에서 관측된 ADCP 자료의 수온과 유속성분을 나타낸 것이다. 표층(13m)과 저층(73m)의 유속을 각각 동서성분(U-component)과 남북성분(V-component)으로 분리하였다.

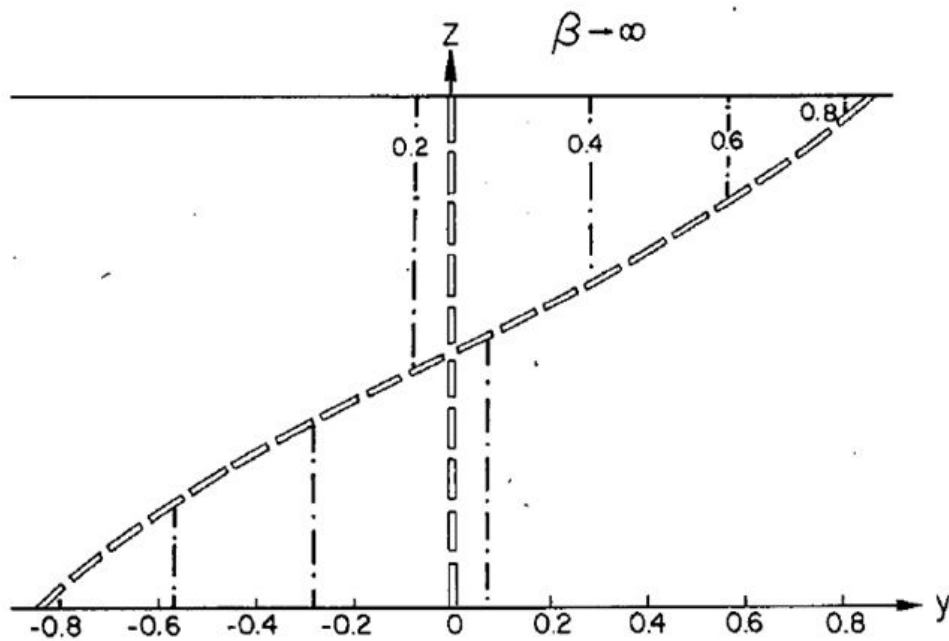


Fig. 3.1.1.25. Dash-dot lines are isopleths of along shelf current (isotachs) in the adjusted state. Open dashed lines are fronts.

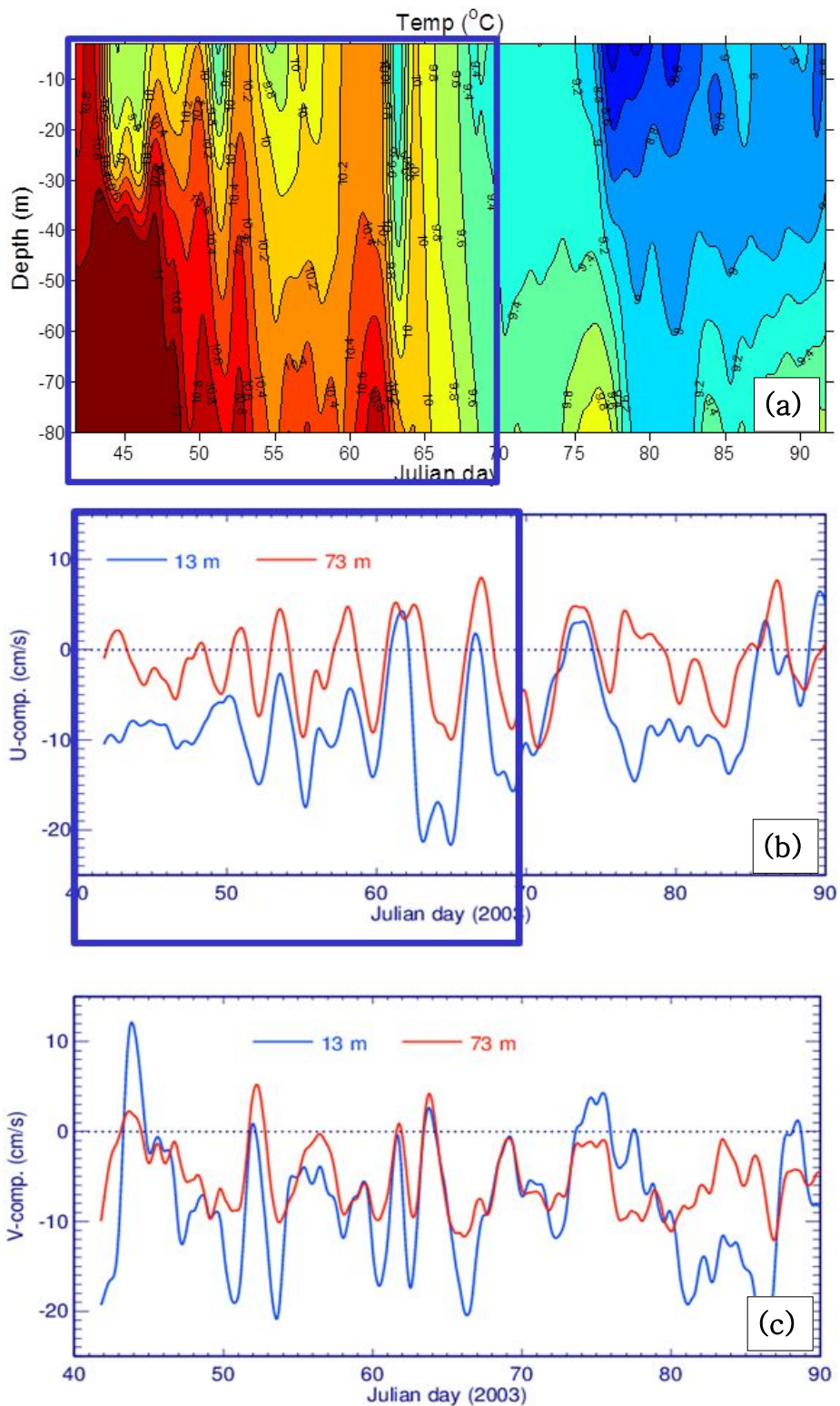


Fig. 3.1.1.26. The ADCP data temperature(°C) (a) U-component(cm/s) (b) V-component(cm/s) © on the ocean data buoy shown in Fig. 3.1.1.8.

수온자료를 보면 관측 40일부터 70일 사이에 저층에 고온수가 분포하고 있고, 등온선이 조밀하게 형성되면서 전선을 이루고 있다. 전선이 존재하던 시기동안 유속분포를 보면 상층에서는 동서방향 유속이 -10cm/s 정도로 서향류의 특성이 강하게 나타났다. 그러나 저층에서의 동서방향 유속성분은 아주 미약하게 나타나고 있으며, 이 기간 동안 상층의 유속이 하층보다 서향 성분이 10cm/s 정도 강하게 형성되고 있다. 이는 열풍효과에 의하여 상층의 유속이 하층보다 강하게 서향류가 형성되는 이론과 일치하는 결과이다.

그런데 이러한 연직 유속의 차이와 배경 조류의 존재는 연직혼합을 유발하여 수온역전 구조를 약화시킬 수 있음에도 이러한 구조가 봄철까지 유지되는 것은 특이한 현상이다.

(다) 이중확산 (Double-diffusion)

밀도 차이가 크지 않은 고온고염수와 저온저염수가 만나 성층을 이루는 경우에는 이중확산이 발생하는 것으로 잘 알려져 있다. 이중확산은 Fig. 3.1.1.27에 제시한 것처럼 두 가지 다른 경우로 진행된다. 확산이 일어날 경우 열은 염보다 100배 이상 빠른 확산을 보인다.

고온고염수가 저온저염수 위에 있는 경우에는 열이 먼저 하층으로 내려가면서 혼합이 이루어진다 (Fig. 3.1.1.27a). 이 후 상층에는 밀도가 높은 고염수가 존재하고 하층에는 밀도가 낮은 저염수가 존재하면서 (Fig. 3.1.1.27b와 c) 상층의 고염수가 하층으로 확산되는 salt finger를 형성한다. 두 수괴 사이에서는 활발한 연직혼합이 이루어진다.

이와 달리 고온고염수가 저온저염수 아래에 위치하는 경우에는 (Fig. 3.1.1.27d) 밀도가 높은 수괴가 하층에 위치하고 있기 때문에 두 수괴사이에 연직혼합은 발생하지 않는다. 그러나 각 층에서는 경계층을 중심으로 상층에서는 상층내부에서, 하층에서는 하층내부에서 대류 (Fig. 3.1.1.27e)가 발생하면서 내부 혼합이 일어난다. 이 과정에서 두 층 사이에 밀도차가 유지가 되면서 성층이 안정화되는 layering 과정이 나타난다. 이렇게 밀도가 불안정하지 않은 상태에서도 해수의 대류를 일으킬수 있기 때문에, 해양의 혼합과 순환에 있어 이중확산의 역할은 매우 중요하다 (You, 2002).

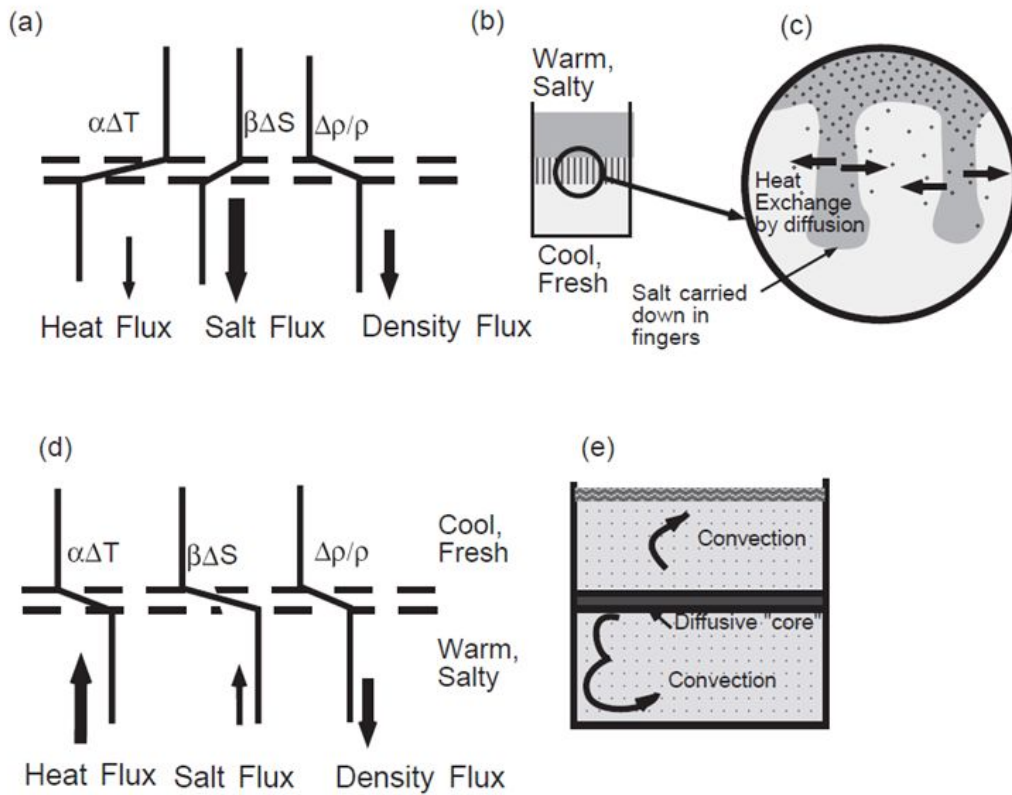


Fig. 3.1.1.27. (a) Background stratification (WS/CF) during a “rundown” salt-fingering experiment. The net fluxes, shown schematically as arrows, are proportional to the difference between the initial (dashed) and final (solid) profiles. (b) Diagram of tank containing salt-finger interface between well-mixed layers. (c) Magnified view of salt-fingers showing the mechanism of the instability. (d) Background stratification (CF/WS) for a diffusive sense convection experiment, with a diffusive interface and well-mixed layers above and below. (e) Diagram of tank showing convecting layers and diffusive interface. (Ruddick and Gargett, 2003)

(라) Turner angle

Ruddick(1983)는 CTD 자료에 처음으로 Turner angle (Tu)를 이중확산의 지표로 사용하였다. 고온고염수 또는 저온저염수가 관입하는 미세구조에서는 salt-fingering 또는 diffusive convection (layering) 이 연관되어 있다.

Turner angle은 Fig. 3.1.1.28처럼 4 사분면 아크탄젠트(arctangent)의 형태로 표현된다 (You, 2002).

$$Tu(\text{deg}) = \tan^{-1} \left(\alpha \frac{\partial \theta}{\partial z} - \beta \frac{\partial S}{\partial z}, \alpha \frac{\partial \theta}{\partial z} + \beta \frac{\partial S}{\partial z} \right)$$

그림에서 R_ρ ($R_\rho = \frac{\alpha\theta_z}{\beta S_z}$)는 수온과 염분의 경사 비율이며, 안정화 비율 혹은 밀도 비율로 불리기도 한다. 이 수치는 이중확산의 상대강도를 설명하는데 이용된다. 여기서 $\alpha = -\rho^{-1} \frac{\partial \rho}{\partial \theta}$ 는 열확장계수이며, $\beta = -\rho^{-1} \frac{\partial \rho}{\partial S}$ 는 염감소계수이다. ρ 는 밀도, θ_z 와 S_z 는 연직 수온과 염분 구배를 뜻한다. 이중확산의 두 경우 모두 R_ρ 가 1에 근접할 때 가장 강하다. 해양에서 전선의 수평적 분포를 볼 때, 한쪽이 저온저염이고 다른 쪽이 고온고염이면 R_ρ 은 1에 근접한다 (Rudnick and Ferrari, 1999).

R_ρ 와 Tu의 관계는 다음과 같다.

$$R_\rho = -\tan(Tu + 45)$$

Tu가 -45° 와 -90° 사이 또는 R_ρ 가 0과 1 사이일 때 “diffusive convection (layering)” 이중확산이 일어날 수 있다. Tu가 -45° 와 45° 사이 (R_ρ 가 0과 $\pm\infty$ 사이)일 때, 물기둥은 매우 안정적이다. 이는 물기둥이 수온과 염분에 대해 안정적으로 성층화가 되어 있음을 뜻한다. Tu가 45° 와 90° 사이 (R_ρ 가 1과 $\pm\infty$ 사이)일 때는 “salt-fingering” 이중확산이 일어날 수 있다. 그림에서 확인 할 수 있듯이 salt-fingering과 diffusive convection의 범위는 Tu= 75° ($R_\rho=2$), Tu= 60° ($R_\rho=4$), Tu= -75° ($R_\rho=0.5$), Tu= -60° ($R_\rho=0.25$)에 의해 구분되어 지며, 강, 중, 약으로 이중확산의 강도를 명기한다.

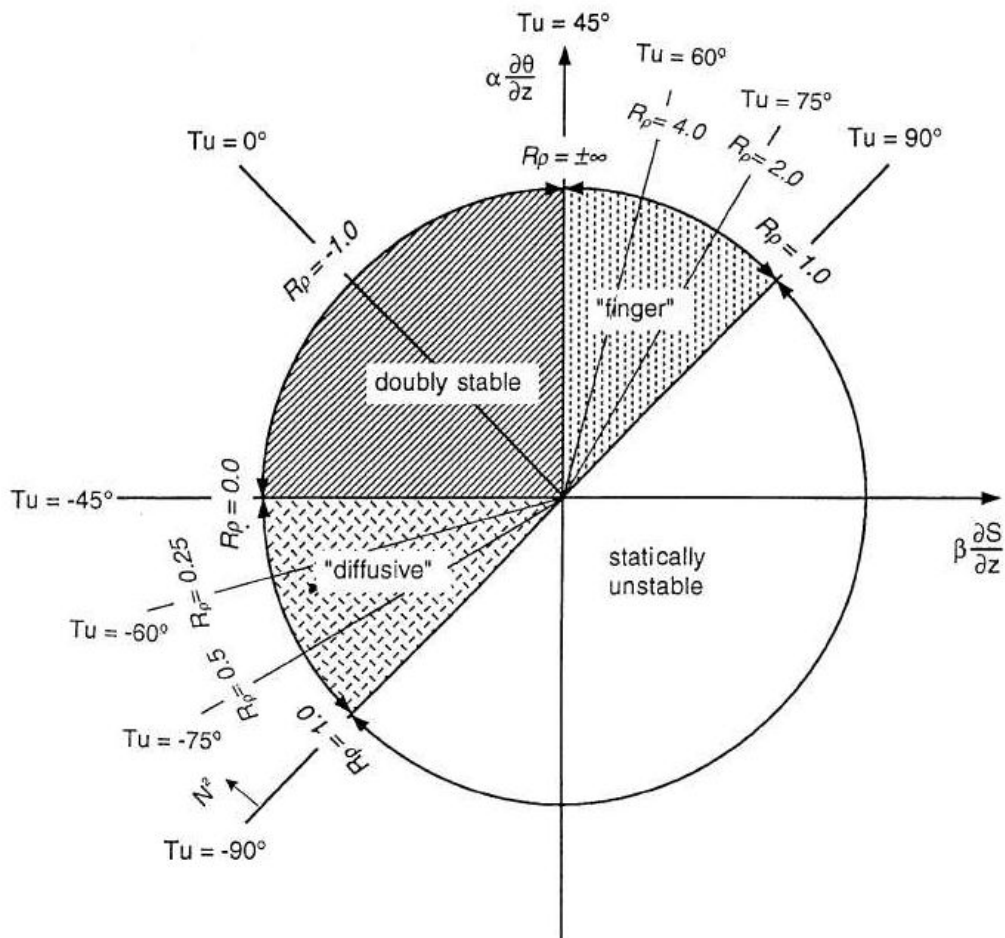


Fig. 3.1.1.28. This sketch illustrates the definition of the Turner angle, Tu (degree), with corresponding R_p value indicated. Double-diffusion is scaled in low, medium and strong conditions (You, 2002).

위에서 살펴본 황해 남부해역 열염전선에서 나타나는 해수 구조는 이중확산 중에서 layering 과정이 나타나는 조건과 일치한다. Figure 3.1.1.29는 Fig. 3.1.1.24와 같은 단면 C와 D, E, F의 수온과 Turner angle의 연직분포를 나타낸 것이다. 그림에서 붉은색으로 표시된 부분은 layering (Fig. 3.1.1.28에서 diffusive 영역)이 발생하는 영역이며, salt-fingering이 일어나는 영역은 파란색으로 표시된 곳이다.

수온구조와 비교할 때 수온역전이 발생한 구간에서 layering 과정이 폭넓게 발생하고 있는 것을 알 수 있다. 그러나 layering 현상과 함께 salt-fingering 현상도 일부 구간에서 발생하고 있다. 이렇게 두 현상이 동시에 나타나는 것은 이 전선역에서 서로 다른 3개의 수괴가 만나고 있기 때문이다. 황해 남부해역에서는 제주

도 북서부해역에서 제주도를 경유하여 제주해협으로 빠져나가는 고온고염의 제주난류수와 황해 중앙부와 북부해역에 존재하는 저온저염의 황해냉수 그리고 연안부근에 위치하는 연안수가 존재하고 있다.

Figure 3.1.1.30은 단면 D의 수온구조와 수괴분포를 나타낸 것이다. 고온고염의 제주난류수 (Cheju Warm Current, CWC)와 저온저염의 한국연안수 (Korea Coastal Water)와 황해냉수 (Yellow Sea Cold Water)가 분포하고 있다. 저온저염의 특성을 가지고 있는 연안수는 제주난류수 보다는 밀도가 작고 황해냉수보다는 밀도가 크다. 제주난류수와 황해냉수 그리고 제주난류수와 연안수가 만나는 경우에는 이중확산 layering이 발생하면서 그 구조를 유지하게 된다.

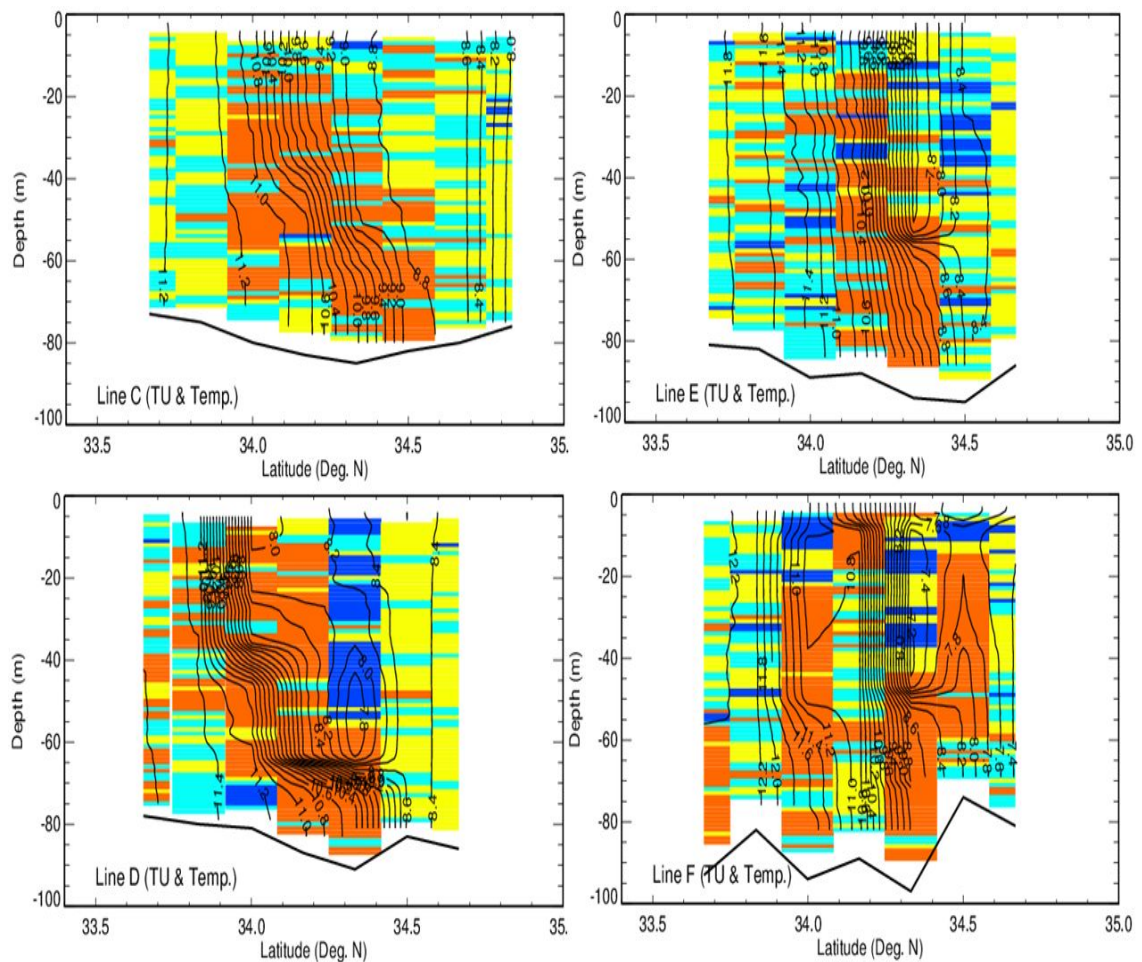


Fig. 3.1.1.29. Vertical structure of temperature and Turner angle at section C, D, E and F.

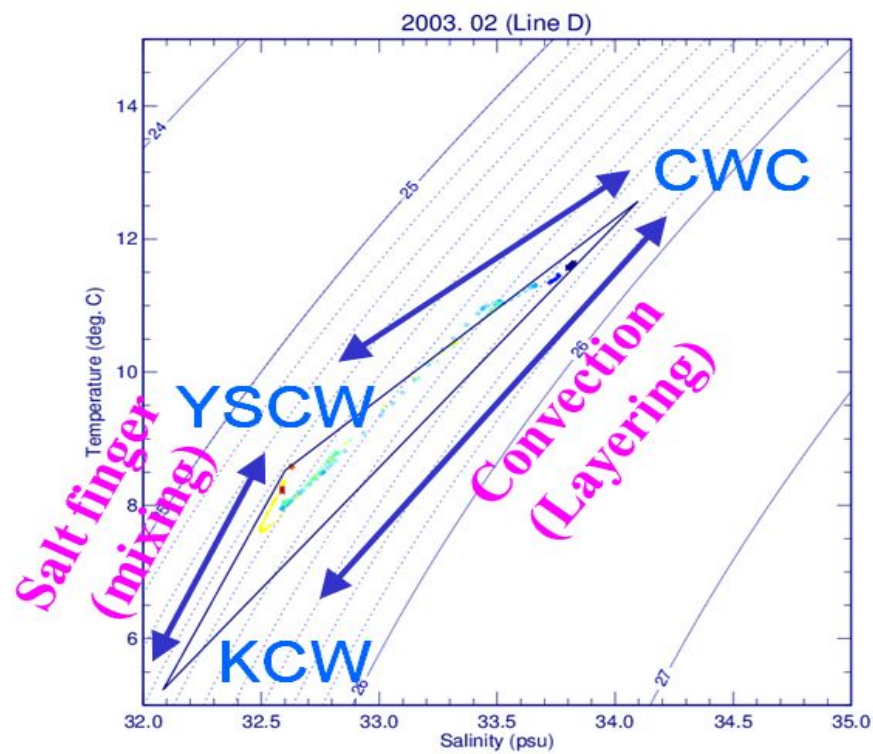
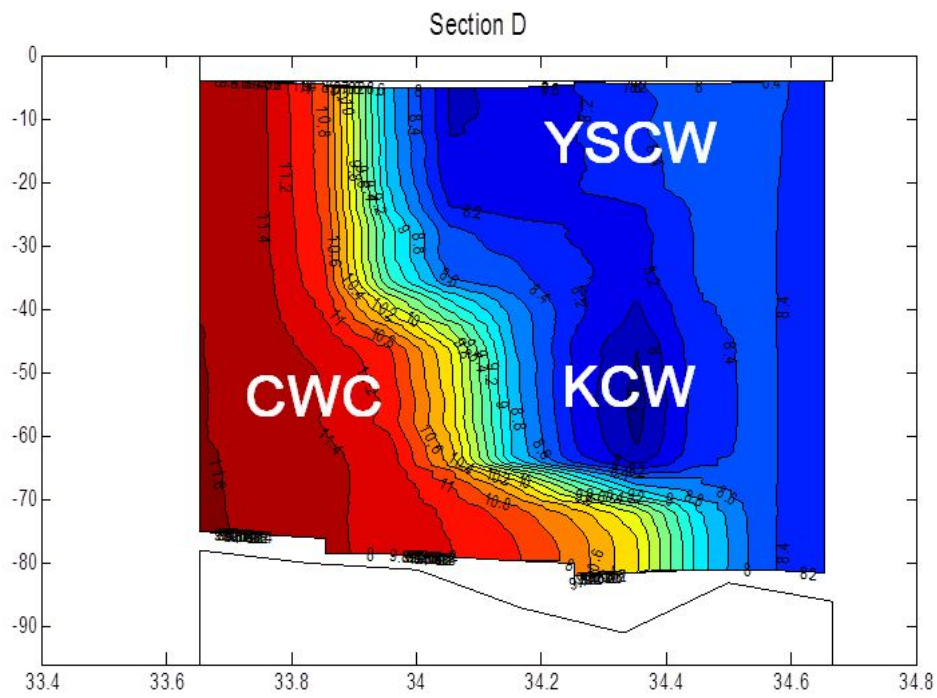


Fig. 3.1.1.30. Water masses distribution at section D in the frontal area.

그러나 황해냉수와 연안수가 만나는 경우에는 salt-fingering이 발생하여 그 구조는 쉽게 혼합된다. Figure 3.1.1.29의 단면 D, E, F에서 salt-fingering이 나타나는 해역은 관측 결과 서향류가 나타나는 곳이다. 전선의 상층에서 형성된 서향류에 의하여 동쪽에서 밀려온 연안수와 황해냉수가 만나 형성된 것으로 판단된다. 다른 단면에서 이 구조가 더 나타나지 않는 것은 이런 구조가 오래 유지될 수 없기 때문으로 판단된다.

(3). 고해상도 황해냉수대 해수순환모델 개발

(가) 모델 특성

MOHID (Modelo Hidrodinâmico)는 포르투갈의 리스본기술대학과 Instituto Superior Técnico (IST)의 MARETEC (해양환경기술연구센터)에서 개발된 3차원 물순환 모델시스템이다. MOHID 모델링 시스템은 해수순환 뿐만 아니라 물리, 화학, 생물, 하구 및 육지의 물순환 시스템을 아우르는 통합시스템으로 개발 되었다. MOHID 모델링 시스템은 MOHID Water, MOHID Land 및 MOHID Soil의 수치계산모듈과 동일한 프레임 워크를 기반으로 하여 통합 관리하는 GUI 시스템으로 구성되어 각 모듈의 결합은 쉽게 이루어지게 구성되어 있다. 해양순환을 모의하는 MOHID Water는 ANSI-Fortran 95로 코딩되어 있으며 객체지향 프로그램 개념을 이용하여 다양한 수치모델이 통합되게 구성되었다. MOHID는 해안, 하구 영역뿐만 아니라 해양순환 및 호수의 복잡한 현상을 모의하는 것이 가능하다.

MOHID 시스템에 대한 뚜렷한 특징은 다음과 같다. 동일 영역에 대한 여러 가지 응용 계산을 동시에 관리하는 것이 가능하며, 새로운 계산에 대한 적용, 적응성이 뛰어나다. 다른 시간적 스케일에 각각의 다른 모듈을 적용하는 것이 가능하며, 어떠한 차원(1차원, 2차원 및 3차원)의 계산이라도 가능하게 구성되어 있다. 공간차분에 유한체적기법을 이용하였기 때문에 어떠한 기하학적인 공간좌표라도 유연성 있게 구성할 수 있다. 또한 유연성 있는 Nesting 기법을 이용하여 광역에서부터 상세역에 대한 적용이 가능하다.

① 수심 및 초기 입력 자료 구성

고해상도 황해냉수대 해수순환모델은 양자강유역과 황해 전체를 포함하는 영역을 포함하게 세 개의 Nesting 격자체계로 구성되었다. 첫 번째 도메인은 12분 격

자 해상도를 가지며 2차원 순압 조석모델로 조석경계조건은 FES2004의 16개 분조 값을 입력하여 조석만 계산하고, 두 번째 도메인부터는 3차원 경압 광역순환모델로 수온 및 염분이 포함된 Baroclinic 계산이 수행되며, 각각 6분 및 2분의 해상도를 갖게 구성되었다. 수심과일은 KIOST에서 제작한 30초 격자자료 (서승남, 2008)와 그 외의 지역에는 GEBCO 30초 자료 (IHO, 2003)를 이용하였으며, Fig. 3.1.1.31은 구성된 격자체계를 나타낸다.

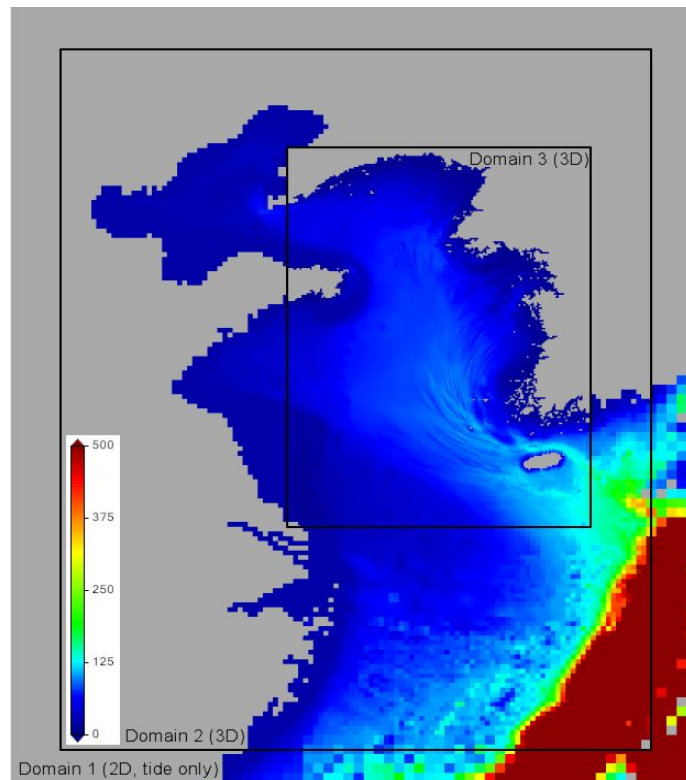


Fig. 3.1.1.31. Domain and depth of the MOHID

수직 격자 체계는 각각의 도메인마다 다르게 구성되었는데, 첫 번째 도메인은 하나의 층을 가진 2차원으로 구성되었으며, 두 번째 광역 황해 도메인은 상층 3개의 Sigma 레이어, 하층 22개의 절대수심 레이어로 구성되었다. 상층은 초기에는 각각 5m의 수직두께를 가지며 자유 수면 높이에 따라 수직두께가 변화하게 된다. 하층은 5m~100m의 두께를 쌍곡탄젠트의 함수로 구성하였다. 세 번째 상세역 황해 도메인은 상층 5개의 Sigma 레이어, 하층 15개의 절대수심 레이어로 구성되었다. 상층은 각각 3m의 수직두께를 가지며, 하층은 3m~20m의 두께를 쌍곡탄젠트의 함

수로 구성하였다.

② 해면 및 개방 경계 조건

해면 경계(기상)조건은 NCEP으로부터 확보한 기상자료를 초기 및 경계조건으로 하여 중규모 기상모형인 WRF 모델의 결과값 (기온, 장파 및 단파, 습도, 압력, 바람장)을 매 시간 간격으로 사용하였다. 조석경계 입력 자료는 첫 번째 도메인에서 조석경계 입력점을 지정하고, 이 지점에서의 조화분조상수를 FES2004 조석데이터로부터 내삽하는 과정을 거쳐서 생성하였다. 광역황해순환모델의 조석을 제외한 흐름 및 열염 개방 경계조건은 HYCOM의 1일평균 자료를 이용하였다. 3차원 경압 광역순환모델의 계산을 위한 초기 및 경계조건은 약 1/12° 해상도를 가진 HYCOM의 NCODA 자료동화 모델 자료 (Expt_09.8)을 1주일 간격으로 사용하였다. Figure 3.1.1.32와 3.1.1.33은 수심 50m에서의 월평균 수온을 Moon et al. (2009)의 연구결과와 HYCOM의 자료와 비교하였다.

수심 50m의 수온은 제주 부근은 연도에 따라 정도의 차이가 있지만 비슷한 패턴으로 보이나, 황해 중심부에서는 조석을 직접적으로 고려하지 못한 HYCOM의 자료와 상이한 결과를 보인다. 계산은 2007년 7월 1일부터 2011년 9월 30일까지 수행하였으며, 2년간의 Spin-up (Cold start) 과정을 거쳐서, 첫 황해냉수괴 관측시기인 2009년 8월부터 관측치와 비교하였다.

(나) 고해상도 상세역 황해 해수순환모델 결과

고해상도 국지 해수순환모델의 검증을 위해 우선 황해의 순환모형을 구성하고 해양연구원에서 수행된 황해냉수대 관측의 결과와 비교하였다. 황해냉수대 관측은 2009년 여름부터 1년에 2번 관측을 수행하고 있다. 실제 지형을 고려한 황해순환모형은 총 3개의 등지형 격자로 구성되어 있으며, 황해 상세역인 세 번째 영역의 계산값과 관측 자료를 비교하였다. 계산은 매달 1일 0시부터 다음달 1일 0시까지 수행되는데, 3차원 자료는 12시간의 시간간격으로 저장된다. 이 한달간의 계산결과를 평균하여 관측치와 각각 비교하였다. Figure 3.1.1.34와 3.1.1.35는 표층 및 수심 51m의 2010년 월평균 수온을 나타내며, 6월부터 황해의 표층수온이 높아지며 11월에야 표층수온이 낮아지는 것을 볼 수 있다. 하지만 저층의 냉수괴는 황해 중심부

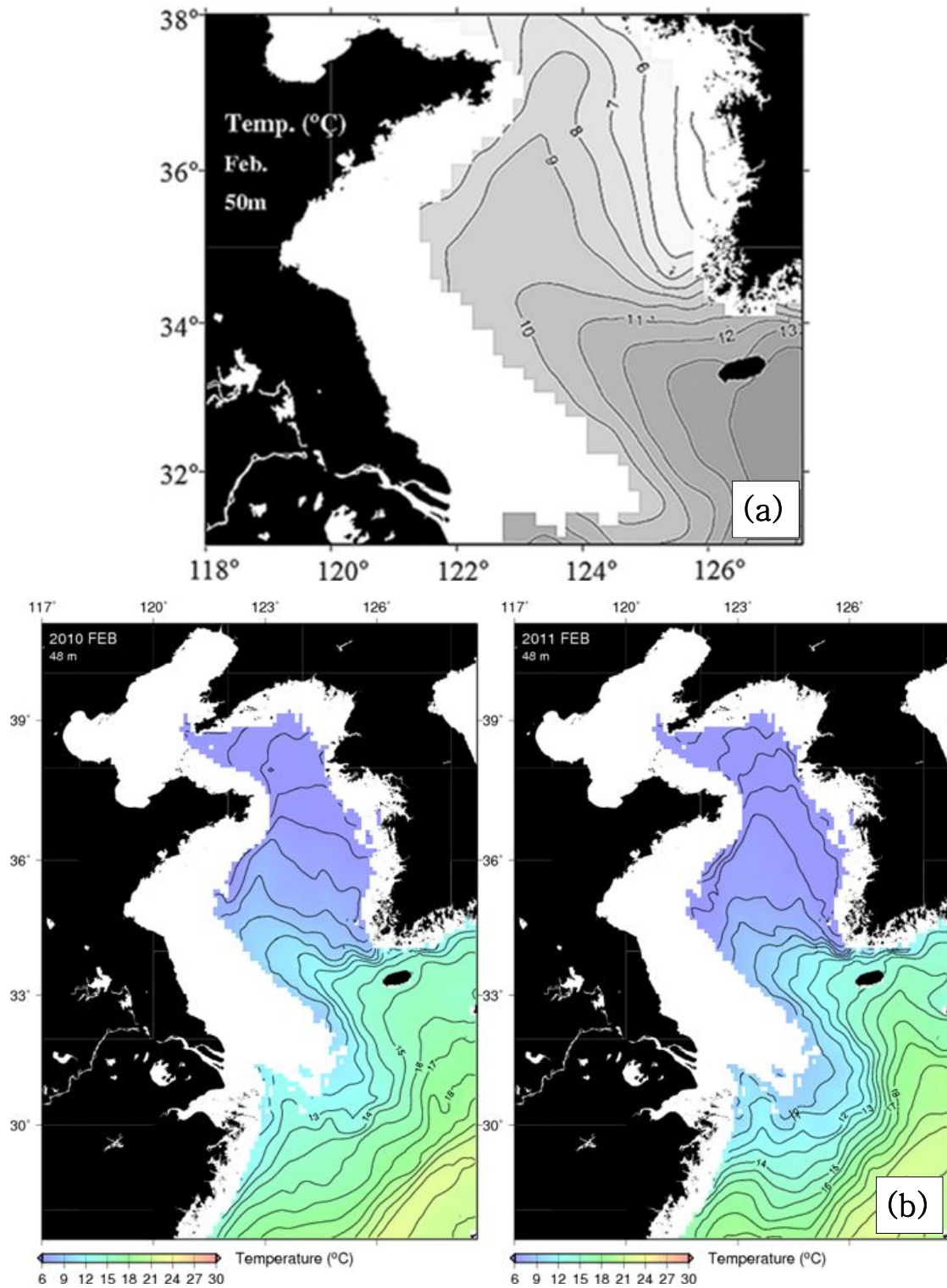


Fig. 3.1.1.32. Monthly mean temperature at 50m depth in February, (a) Moon et al.(2009), (b) HYCOM (2009-2010).

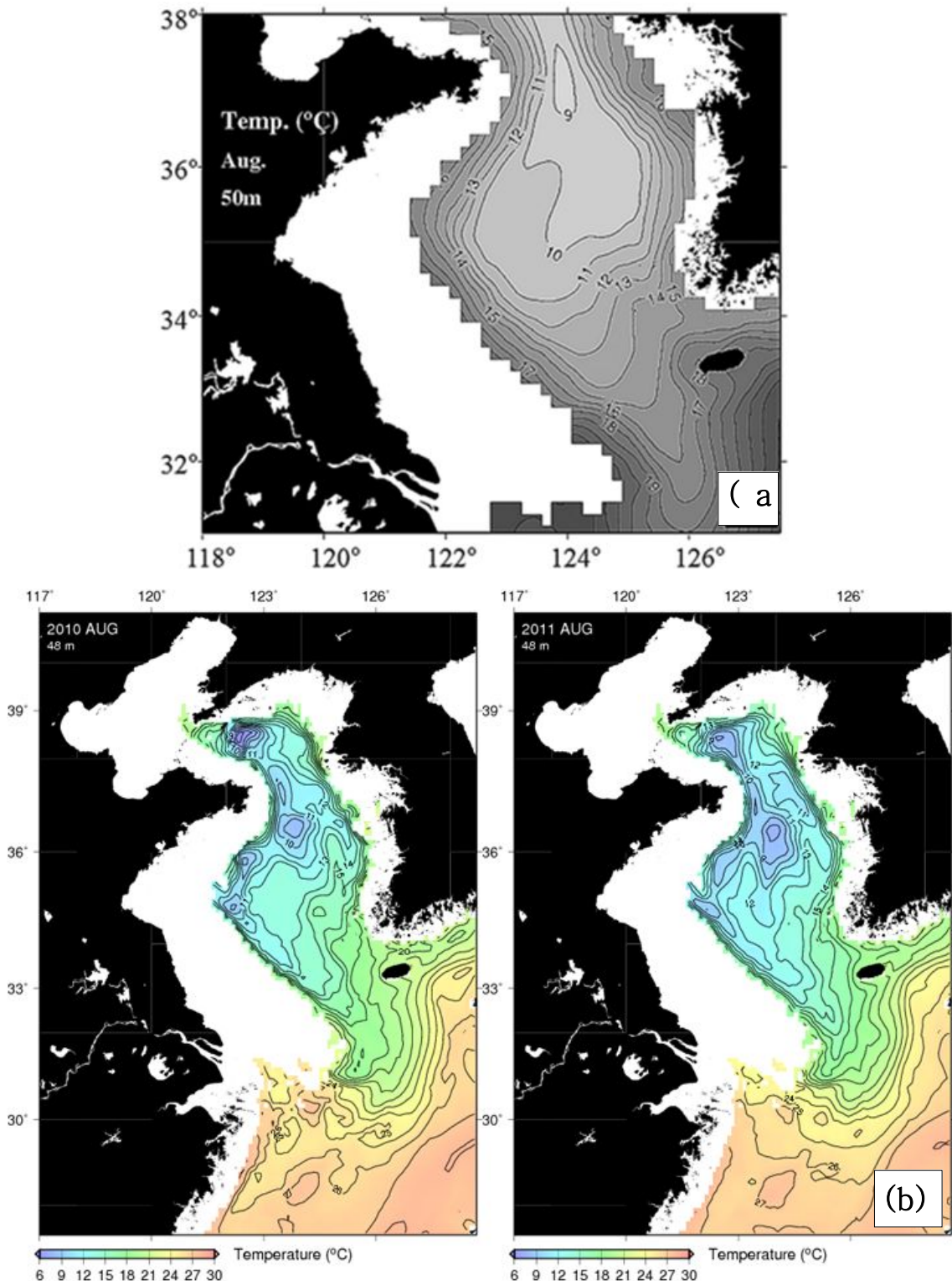


Fig. 3.1.1.33. Monthly mean temperature at 50m depth in August, (a) Moon et al.(2009), (b) HYCOM (2009-2010).

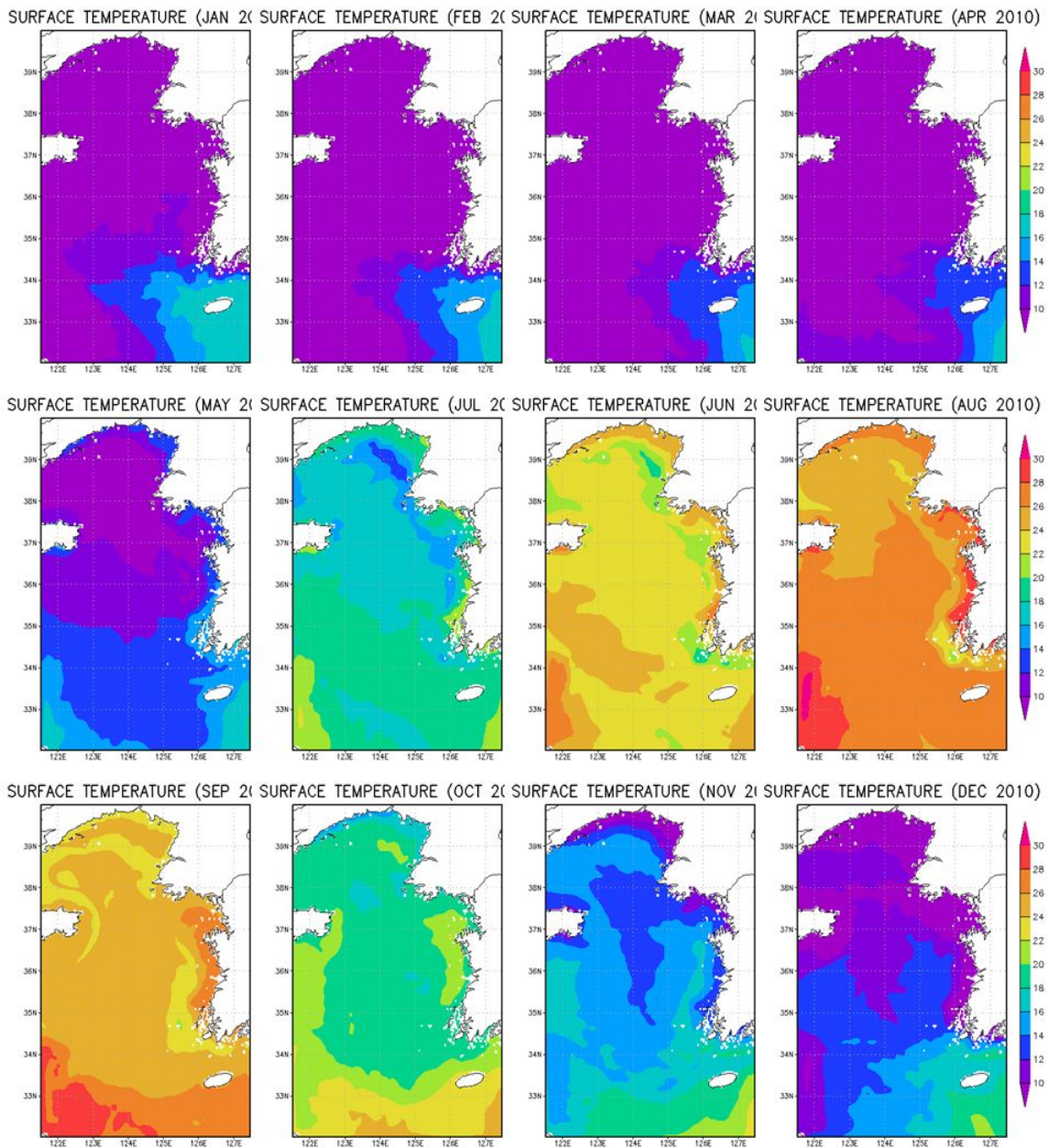


Fig. 3.1.1.34. Surface monthly mean temperature of the surface layer in 2010.

의 꼴을 따라 1년 내내 분포되어 있는 것을 볼 수 있으며, 10°C 이하의 냉수괴의 경계는 약 북위 35.5°N임을 알 수 있다.

연직적인 분포를 비교해 보기 위해 동경 124.5도를 따르는 남-북 수직면분포와 북위 34.5°N을 따르는 서-동 수직면 분포를 2009, 2010 및 2011년 8월의 계산결과와 비교하였다 (Fig. 3.1.1.36). 북위 34.5°N을 따르는 Line E의 수직면 분포를 봤을

때 서쪽이 동쪽보다 강한 성층을 보이는데, 이는 연안에서 조류에 의한 연직 혼합 효과에 의한 것으로 판단된다. 2011년의 경우 관측시에는 성층이 나타나지 않는 것으로 보이는데, 이는 관측 바로 전 통과한 태풍의 영향으로 추정되며, 계산치의 경우에도 2011년의 계산결과가 2009년 및 2010년의 계산결과보다 성층이 약화되거나 관측치 만큼은 나타나지 않는다. 이는 표층입력에 따른 것으로 보이며, 상세히 검토해 볼 필요가 있다.

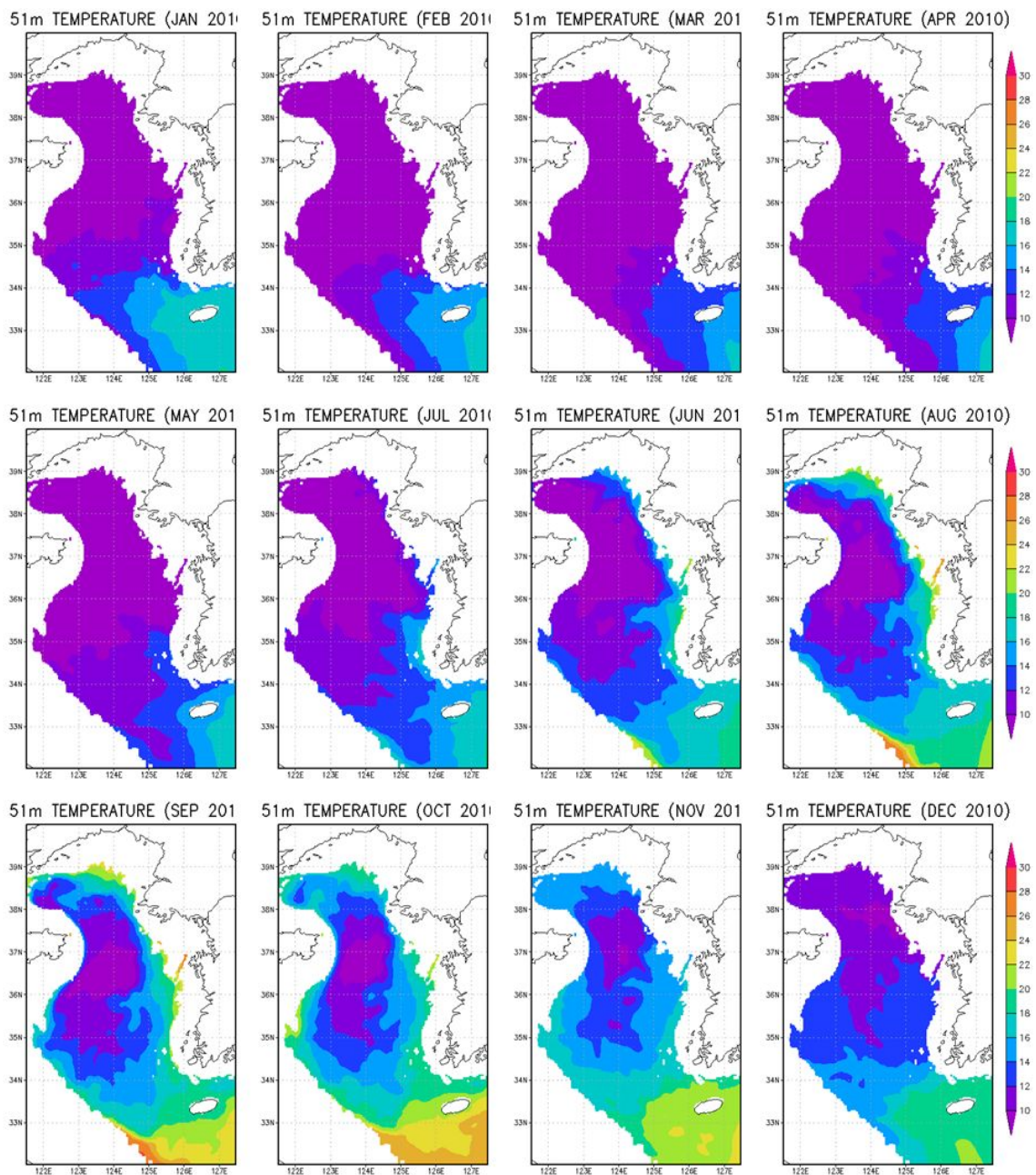


Fig. 3.1.1.35. Monthly mean temperature of the 51 m depth layer in 2010.

황해중심을 남북으로 가로지르는 Line A에서, 성층 아래 40m 수심 이하에서는 10°C 이하의 냉수괴가 나타난다. 계산 결과에서는 다소 높긴하나 냉수괴가 잘 묘사됨을 알 수 있다. 2009년 및 2010년에는 수심 10~30m의 강한 성층이 나타나나 2011년에는 태풍의 영향으로 인해 성층이 약화된 것으로 관측되었다. 2009년 및 2010년의 혼합층의 두께, 분포 및 저층냉수괴의 존재 등은 비교적 잘 묘사하고 있으나, 2011년의 경우 Line E와 마찬가지로 태풍으로 인한 성층이 약화되는 것은 묘사가 잘 안된 것으로 보인다.

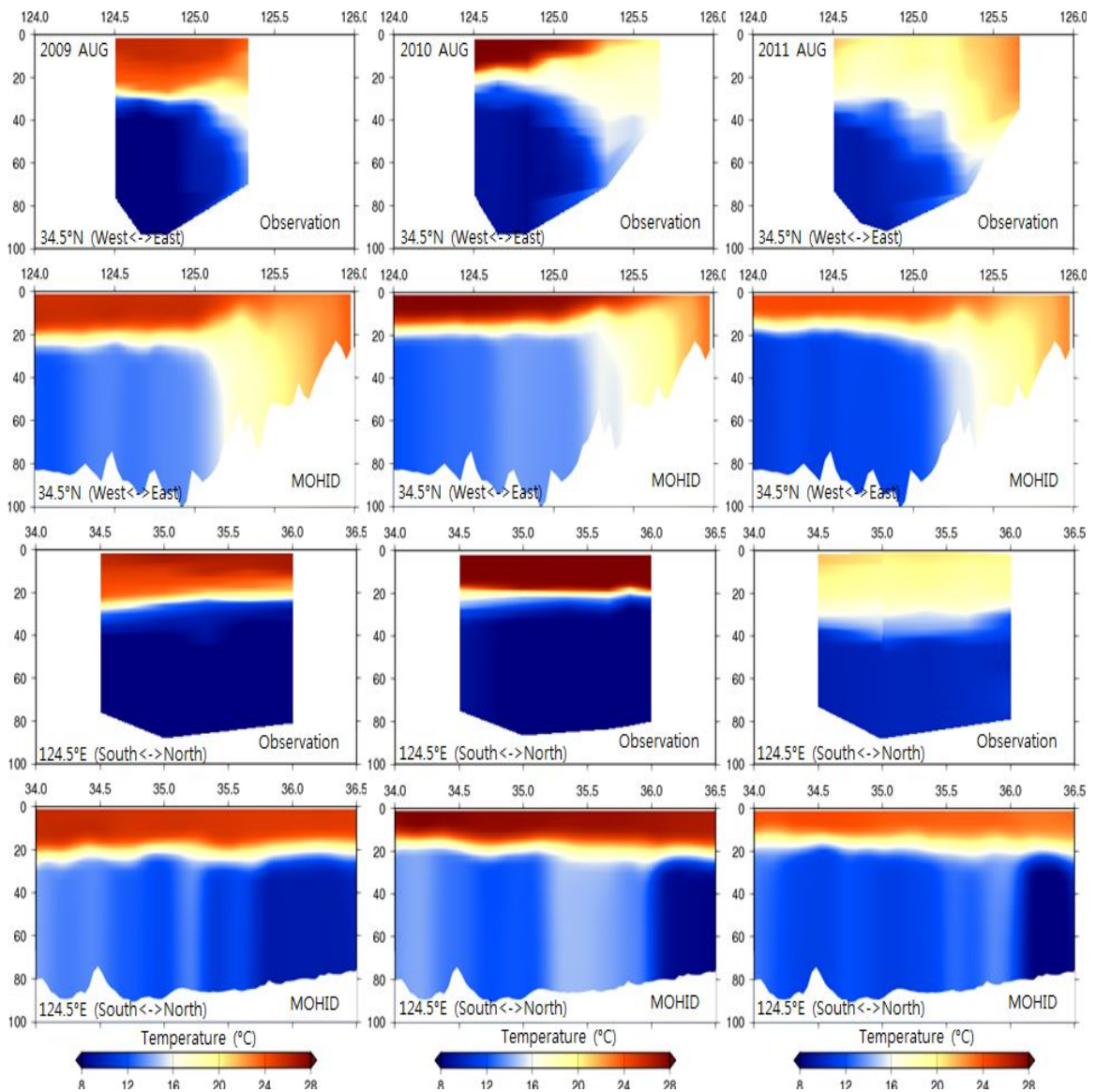


Fig. 3.1.1.36. Vertical temperature distributions of the observation and calculated by MOHID in August 2009, 2010 and 2011.

Figure 3.1.1.37은 2009, 2010 및 2011년 8월의 관측 염분 분포와 계산 결과를 비교하였다. 염분 또한 구조를 수온과 비슷하게 비교적 잘 묘사하고 있으나, 2011년 8월의 경우 태풍으로 인한 성층이 약화되는 현상을 재현하지 못하였고, 저층에서의 고염분수가 관측되었는데, 이를 재현하지 못하였다.

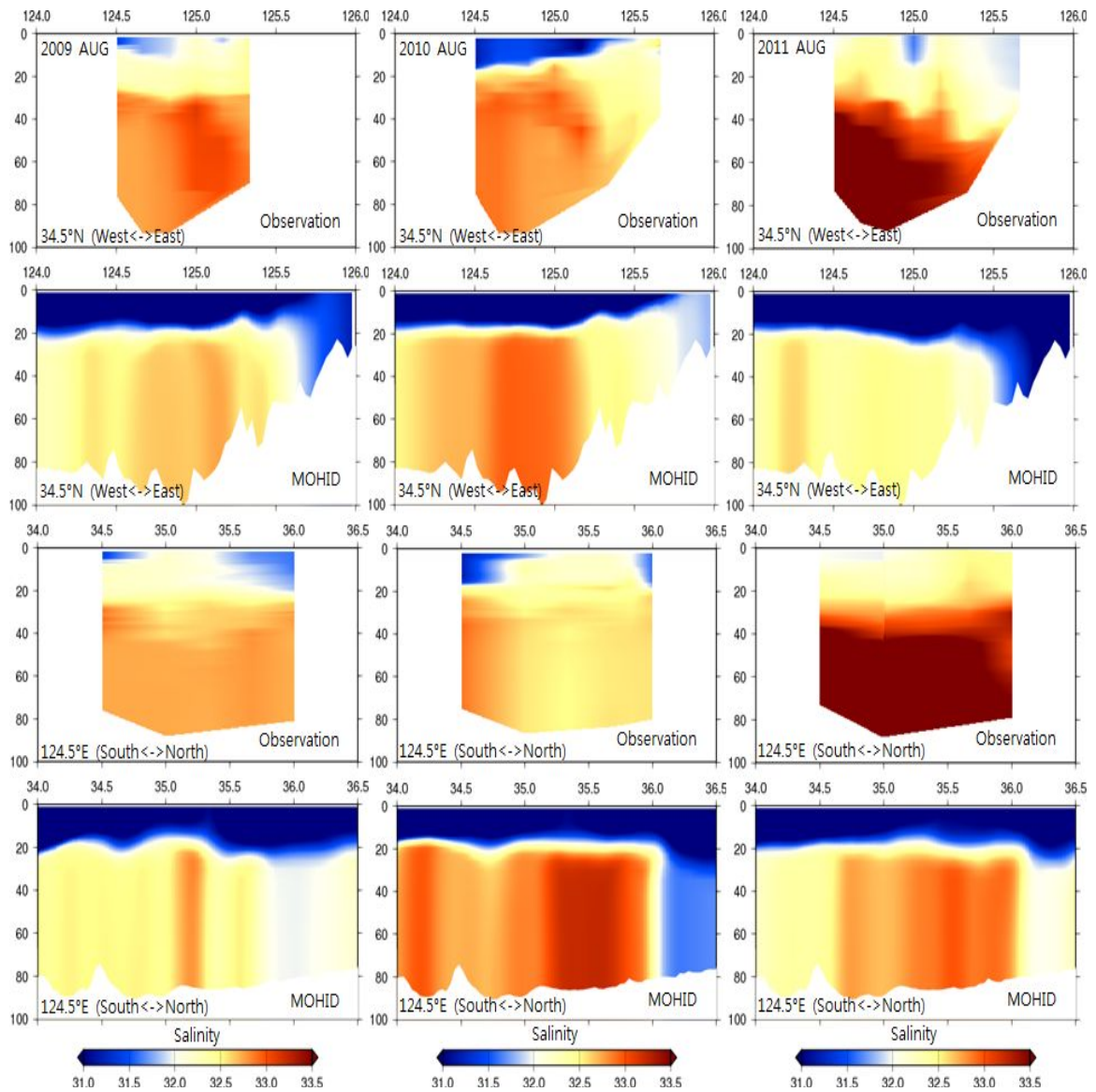


Fig. 3.1.1.37. Vertical salinity distributions of the observation and calculated by MOHID in August 2009, 2010 and 2011.

Figure 3.1.1.38은 2010년 및 2011년 4월의 관측 수온, 염분 및 계산결과를 비교하였으며, 수온의 경우 뚜렷한 분포를 보이지 않고, 전영역 및 전층에 걸쳐 비슷한 수온이 분포되었다. 2010년 염분의 경우 저층에서의 강한 고염분수가 관측되었고, 동측 (전라남도 연안)으로 저염분수가 관측되었으나, 계산 결과는 연안에서 고염분수가 분포하고 있다.

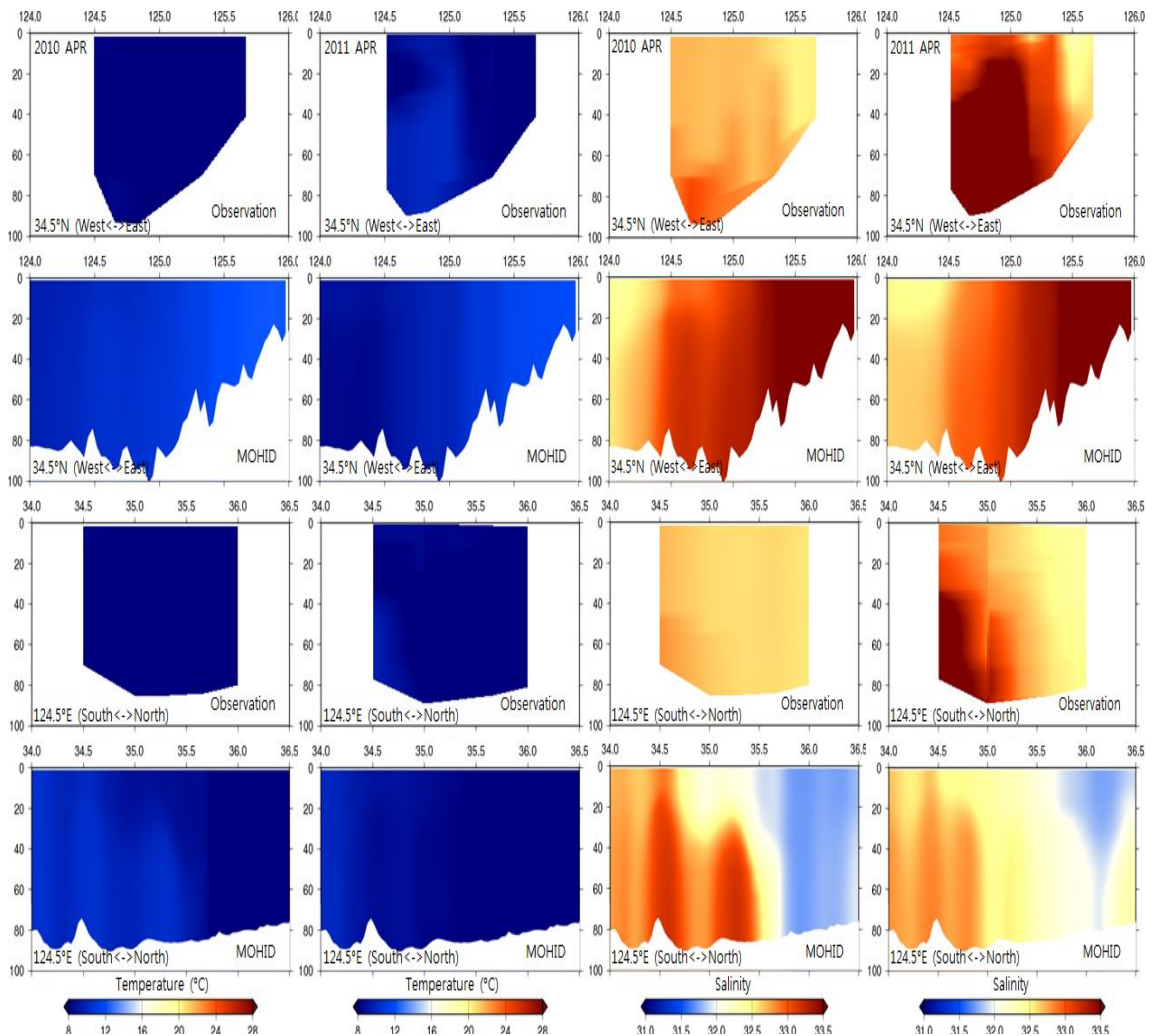


Fig. 3.1.1.38. Vertical salinity distributions of the observation and calculated by MOHID in April 2010 and 2011.

Figure 3.1.1.39는 HYCOM과 MOHID에서 계산된 2011년 4월의 표층염분 예측 결과이다. MOHID에서 계산된 표층염분분포를 보았을 때 서측 표층의 저염분수는 양자강 희석수의 영향으로 보이며, 양자강 유출량이 과대 입력된 것으로 추정된다. 또한 연안에서의 저염분수의 남측경계가 관측라인인 Line E보다 약간 북쪽에 위치하고 있는 것으로 보인다. 남북방향인 Line A에서의 염분 분포는 염분값의 차이는 다소 있지만 분포패턴은 남측저층의 고염분, 북측상층의 저염분의 비슷한 결과를 보이고 있다.

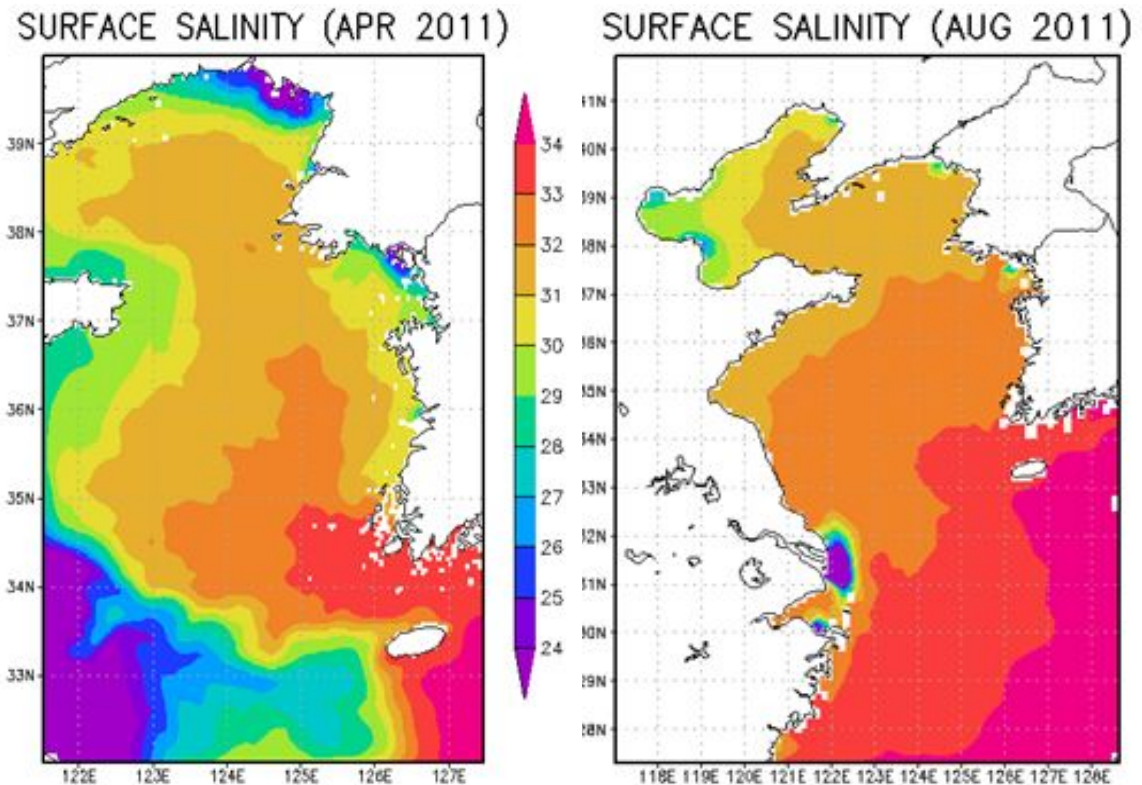


Fig. 3.1.1.39. Prediction results of the HYCOM (left) and MOHID (right) of the surface salinity in April 2011.

(다) 고해상도 순환모델에서의 조석의 영향

Figure 3.1.1.40은 조석을 고려하지 않은 수심 50m에서의 겨울철(2월) 평균해류로 MOHID의 2009년 및 2010년의 결과와 Moon et al.(2009)의 결과를 비교해 보면 비슷한 양상으로 보인다. Figure 3.1.1.41은 조석을 고려한 수심 50m에서의 겨울철(2월) 평균해류로 조석을 고려함에 따라 평균해류의 유속이 상당히 감소하며, 쿠

로시오 난류의 지류가 지나는 제주도 부근의 경계에서 큰 차이를 보임을 알 수 있다. 조석의 효과가 고려되지 않는 HYCOM의 자료를 지역모델(MOHID)에 직접 입력하여 발생된 것으로 계산영역을 북서태평양으로 확대하여 광역계산을 수행중이다 (Fig. 3.1.1.42). 광역계산을 위한 초기 수온, 염분장은 1도 격자해상도, 33 수직격자체계를 갖는 ECMWF의 OR3EG자료를 이용하였으며, 표층경계조건은 2.5도 격자해상도를 갖는 ECMWF의 DEMETER자료를 이용하여 10년간의 안정화 계산을 수행하였다. Figure 3.1.1.43은 ECMWF의 표층 수온 및 MOHID의 초기계산결과를 나타낸다.

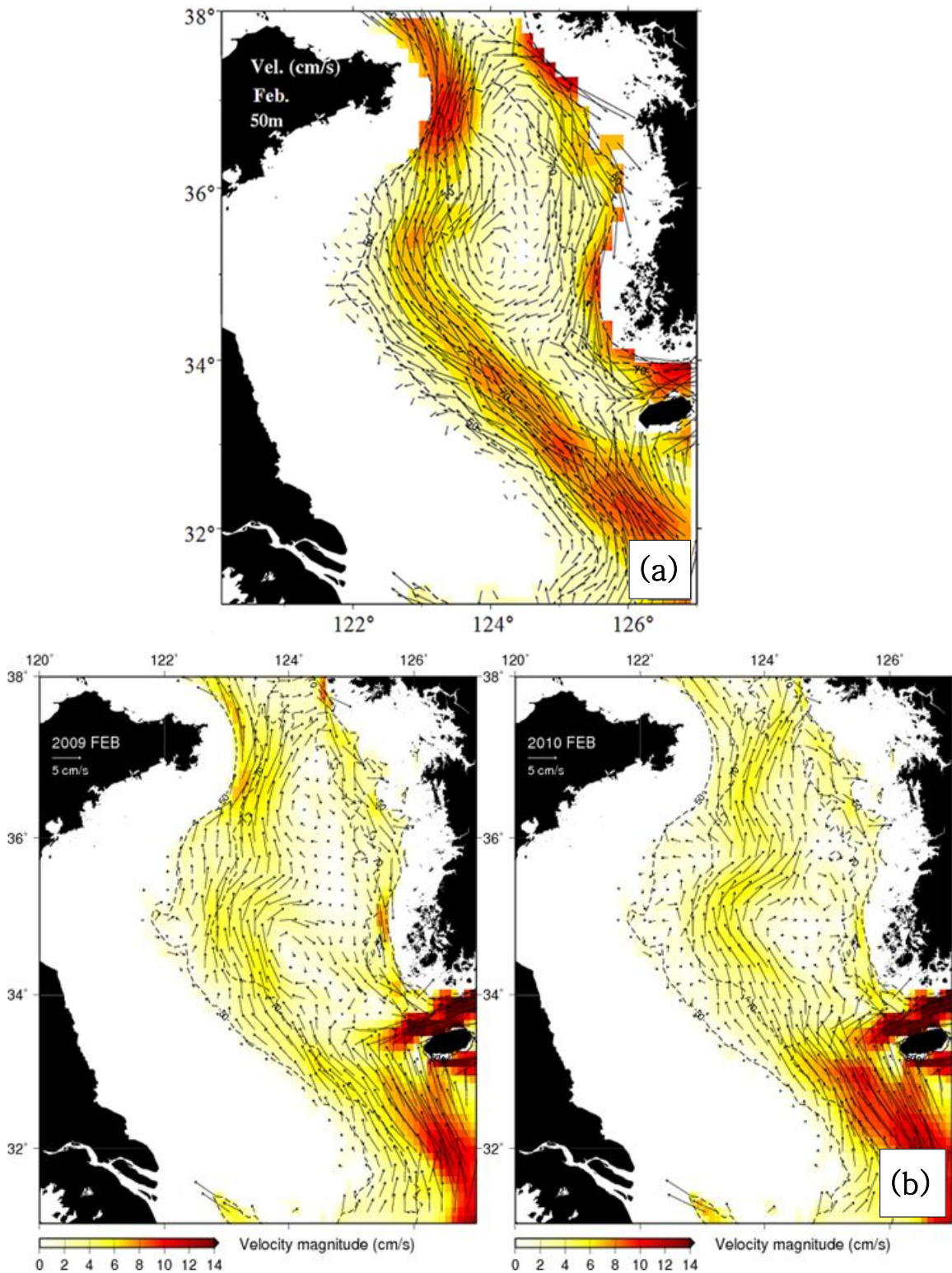


Fig. 3.1.1.40. Monthly mean current at 50m depth without tide in February, (a) Moon et al.(2009), (b) MOHID (2009–2010).

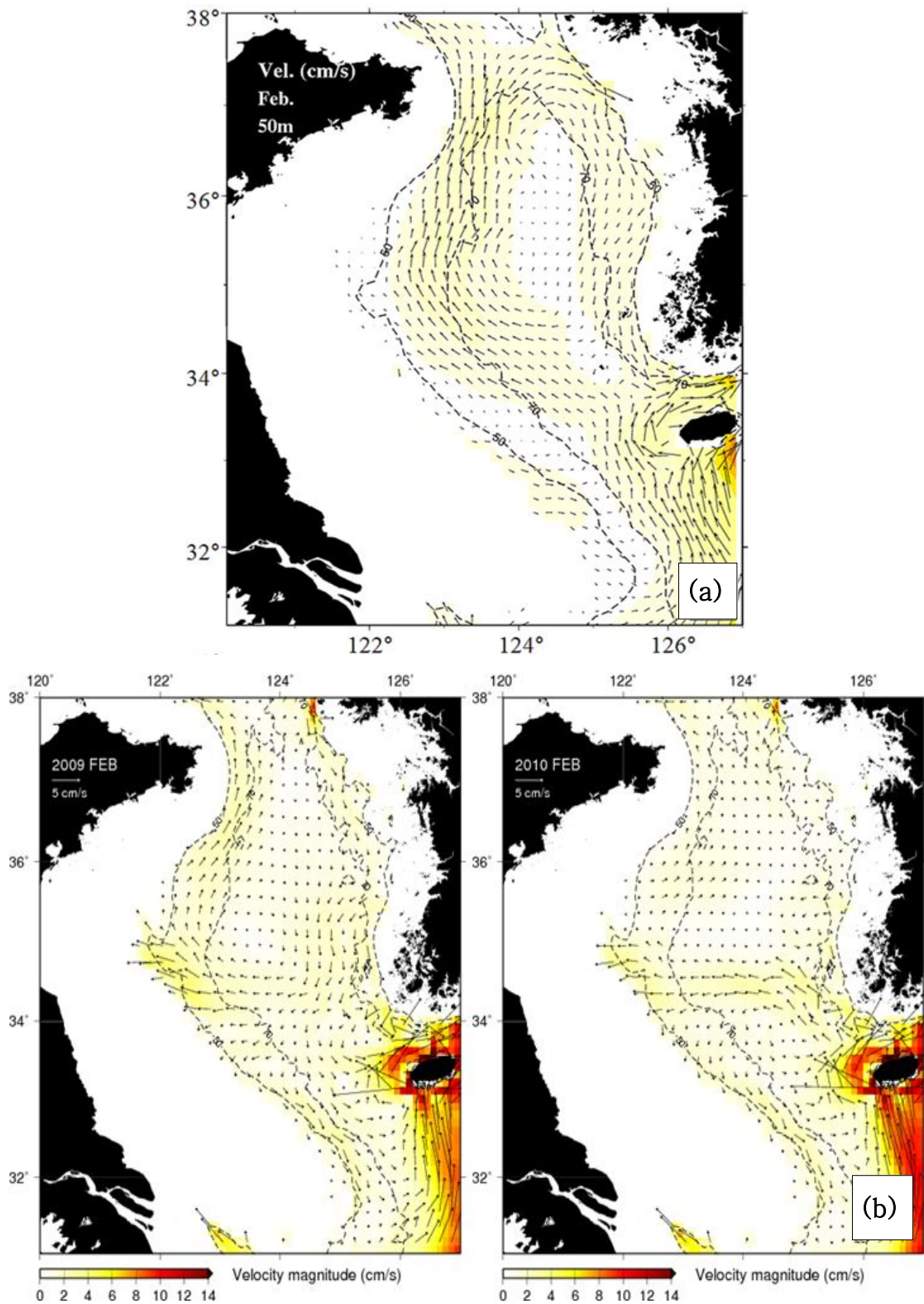


Fig. 3.1.1.41. Monthly mean current at 50m depth with tide in February, (a) Moon et al.(2009), (b) MOHID (2009–2010).

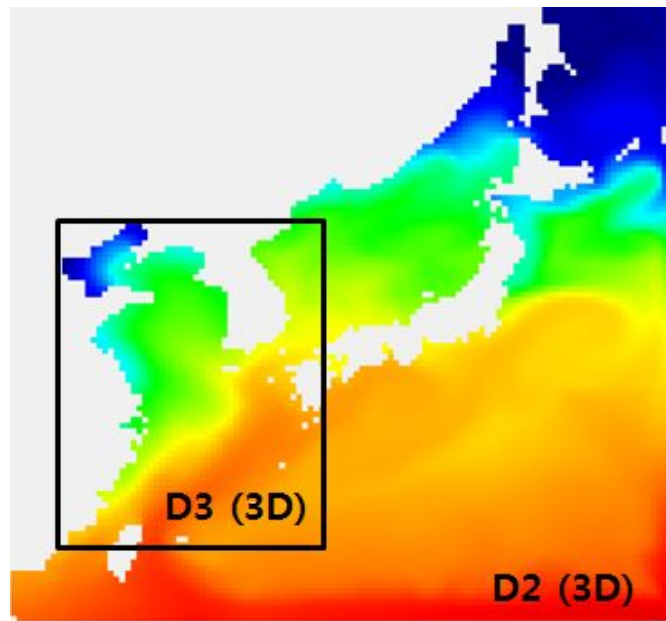


Fig. 3.1.1.42. Domain of a wide area model for calculating the boundary of the Yellow Sea model.

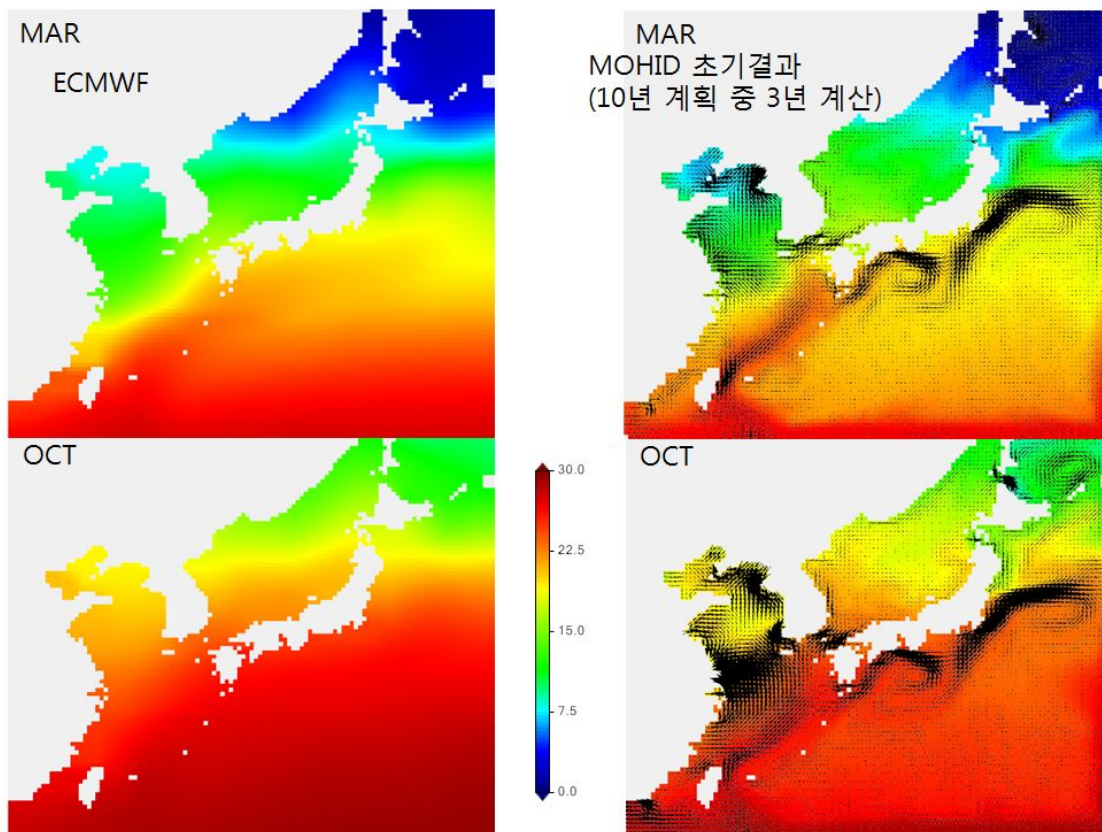


Fig. 3.1.1.43. Surface temperature field by ECMWF (left) and the beginning results by MOHID (right).

제2절 이화학특성 및 식물플랑크톤

1. 이화학 특성 및 식물플랑크톤

가. 서론

황해는 한반도와 중국 사이에 있는 반-폐쇄적인 얇은 대륙붕이다. 황해의 남부는 어장으로서 높은 생산력을 가지고 있어 중요한 곳이다. 하지만 남획과 기후변화 같은 요인으로 인해 장기적으로 보면 어획량과 질이 감소하고 있으며, 생태계의 종도 감소하는 경향을 보이고 있다 (Lin et al., 2005). 황해의 수체의 특성을 보면 쿠로시오와 동중국해 수체가 혼합된 수체 (KE; 표층수는 KES, 중층이하 수체는 KEB), 황해 냉수(YSCW), 황해표층수 (YSSW), 그리고 황해 연안수로 구성되며, 이들의 분포는 봄철과 여름철에 달리 나타난다. 황해에서 가장 두드러진 특징은 황해냉수괴의 존재이며, 이 수체는 여름철에 강하게 형성되는 것으로 알려져 있으며, 황해 생태계에 중요한 영향을 미치는 것으로 알려져 있다 (Chen et al. 2004; Kang and Kim 2008). 이러한 수체들의 수평적 수직적인 밀도의 차이와 식물플랑크톤의 성장에서의 이들의 역할이 해양 생태계에서 흥미로운 연구대상이 되고 있다.

식물플랑크톤의 생체량과 환경요인들 간의 상호연관성에 관한 연구는 식물플랑크톤의 계절적 변이를 조절하는 주요 요인을 밝히는데 있어 중요한 연구이다. 수온, 빛의 조건, 영양염과 물리적인 요인들은 이들의 생체량을 조절하는 주요 요인이다. 봄철은 겨울철 수층 혼합에 의해서 공급된 영양염에 의해서 봄철 식물플랑크톤의 대발생이 일어난다. 봄철 식물플랑크톤의 대발생의 시공간적인 분포에 영향을 미치는 물리적인 요인은 바람의 세기, 수온, 수층의 안정도와 수체의 움직임이 중요한 요인으로 작용하며, 이 중에서도 수층의 안정도가 황해에서 식물플랑크톤의 대발생의 요인이 된다고 보고하고 있다 (Kassi 1997; Fu et al., 2009; Xuan et al., 2011). 여름철에는 강한 성층이 발달하기 때문에 성층아래의 풍부한 영양염이 상층부로 공급되지 못해 식물플랑크톤 성장을 제한하게 된다. 그래서 여름철 유광층 내의 영양염은 외부에서 유입되는 수체, 밀도 약층의 내부파, 그리고 태풍에 의한 수층 혼합으로 공급될 수 있다. 밀도 약층에서의 내부파는 여름철에 SCM 형성에 중요한 요인이며, 태풍의 강한 바람과 강우는 영양염이 풍부한 중층 이하의 수체를 유광층으로 이동시킨다. 본 연구는 황해 남동부에서 수체 특성이 봄철과 여름철 영양염 및 엽록소-a 분포에 미치는 영향을 이해하는 것이 목적이다.

나. 재료 및 방법

황해 냉수괴는 황해의 북쪽과 남쪽 두 지역에서 형성되는데, 본 연구 지역은 남쪽에 형성되는 냉수괴의 가장 자리 지역인 34°30 - 36°00N과 124°30-125°40E 범위에서 수행되었다 (Fig. 3.2.1.1.). 수온과 염분은 CTD (SBE, 911 plus)를 이용하여 각 정점에서 현장조사를 하였다. 영양염 시료 채취는 현장에서 Watman GF/F 여과지로 거른 다음 시료의 일정량을 채취하여 50ml의 플라스틱 vial에 넣어 냉동 보관하였다. 영양염류는 발색 법으로 시료를 발색시켜 발색 강도를 측정하였다. 발색된 강도는 자동 영양염 분석기인 FIA (Flow Injection Analyzer, Quickchem 8000, LACHAT Co.)로 분석하였다. 엽록소-*a*는 1L의 해수를 직경 45mm GF/F로 여과하고, 여과지는 -20°C 냉동고에 보관하였다. 분석 시 90% 아세톤을 10ml을 넣은 후 교반시킨 다음 빛을 차단하고 냉장고에 12시간 이상 용출시켰다. 용출된 용액 중에 섞여 있는 입자를 제거하기 위해 1000g에서 5분 동안 원심분리시킨 후 상등액만을 취하여 형광광도계 (Tuner Desigms 10-AU Flurometer)로 측정하였다. 초미세 식물플랑크톤 (picoplankton)의 엽록소-*a* 농도분석을 위해 3 μ m의 막 여과지 (47mm, Millipore)로 해수 1L를 여과한 후, GF/F filter에 거른 후 즉시 냉동보관 하였다. 분석은 총 엽록소-*a* 농도분석과정과 동일하게 하였다.

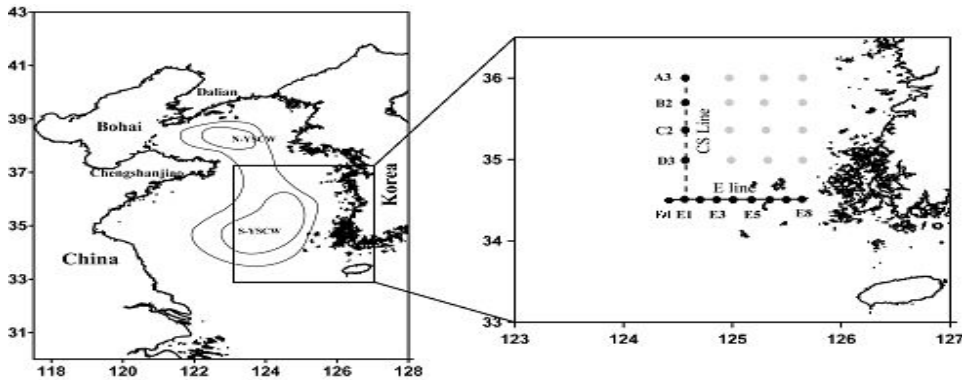


Fig. 3.2.1.1. Map showing the study area and sampling station in the southern Yellow Sea. Stations discussed in detail are marked by filled circles. The CS line is composed of meridional stations in the center of the Yellow Sea and the E line is composed of zonal stations in the southernmost portion of the study area.

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 $\times 100$ -200배율에서 계수하였다. 식물플랑크톤 정성분석은 광학현미경 $\times 400$ -1000배 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 50mL정도를 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.

다. 결과 및 토의

(1) 봄철 및 여름철 표층수의 일반 환경요인의 공간적 분포 특성

조사 지역의 봄철 및 여름철 표층 수온, 염분, 질산염, 인산염, 규산염 그리고 엽록소-a의 공간적 분포를 Fig. 3.2.1.2에 나타내었다. 조사 지역의 봄철 표층 평균 수온은 8.84°C, 염분은 32.74의 값을 보였다. 조사 지역의 북동쪽 지역은 낮은 수온을 보인 반면 대각선 방향인 남서쪽은 상대적으로 높은 수온을 보였다. 이는 북동쪽 지역은 연안수의 영향을 크게 받는 반면 남서쪽 지역은 외해의 영향을 받는 것으로 보인다. 염분은 연안 지역이 낮은 값을 보이고 외해 지역은 거의 동일한 값을 보이지만, 연안지역 임에도 불구하고 정점 E6부터 E8까지는 33 이상의 높은 값을 보인다. 봄철 표층 영양염의 평균 농도는 질산염 3.36 μ M, 인산염 0.31 μ M, 규산염 8.62 μ M의 농도를 나타내었으며, 엽록소-a의 평균 농도는 1.36 μ g L⁻¹의 값을 보였다. 영양염 농도 간의 공간적인 분포는 유사한 경향을 보이고 있으며, 남측에 위치한 E 라인 중에서 E4에서 E8까지 높은 값을 보였다. 그리고 연안지역 보다는 외해 지역의 영양염 농도가 낮게 나는 경향을 보인 반면, 엽록소-a의 농도는 외해 지역이 연안지역보다 높게 나타났다. 특히 외해지역과 연안 지역의 중앙에 위치한 지역에서 농도가 높게 나타났다. 이러한 경향은 서로 다른 수체들이 조사 지역의 가운데 지점에서 조우하면서 형성된 수온 전선의 영향으로 판단된다. 수온 전선의 형성은 수층의 안정도를 증가시키는 역할을 하며, 식물플랑크톤의 집적이 발생한다 (Kim et al., 2009). 이로 인해 조사 지역의 중앙 지역의 엽록소-a 농

도가 다른 정점들보다 높은 것으로 판단된다.

여름철 평균 표층 수온은 28.1℃ 이며, 평균 염분은 30.2을 나타내었다. 수온의 분포를 보면 대각선 방향으로 북쪽에서 아래로 내려올수록 수온이 낮아지는 경향 보여, E 라인의 E8에서 가장 낮은 수온을 보인다. 염분은 수온과 달리 조사 지역 중앙부에서 연안 쪽으로 혀의 모양으로 낮은 염분의 분포가 형성되었다. 조사 지역의 중앙부에서 나타나는 낮은 30 이하의 염분은 지금까지 여름철 조사에서는 나타나지 않았다. 이 수체의 염분의 특성을 보았을 때 장강 희석수로 판단된다. 이러한 장강 희석수의 유입의 뚜렷한 경향은 조사가 이루어지 전 지나간 태풍의 영향으로 판단된다. 2010년과 2011년에 지나간 태풍은 황해를 가로 질러 보헤만으로 지나간 반면 2012년 지나간 태풍은 큐슈 아래에서부터 청도 방향으로 지나감으로써 장강 희석수를 조사 지역으로 밀어 올린 것으로 판단된다. 장강 희석수의 경우 장강의 하구에서부터 덩어리 형태로 떨어져 나와 우리나라에 영향을 미치는데 이번 조사에서 태풍의 진로 때문에 조사 지역 내로 유입된 것으로 판단된다. 여름철은 표층 영양염의 평균 농도는 질산염 0.14 μM , 인산염 0.05 μM , 규산염 4.43 μM 을 나타내었으며, 엽록소-a의 평균 농도는 1.19 $\mu\text{g L}^{-1}$ 의 값을 보였다. 특히 표층의 질산염과 인산염 농도는 식물플랑크톤 성장에 제한하는 농도를 나타내었다. 표층 평균 엽록소-a 농도는 봄철보다 여름철이 다소 낮지만 봄철과는 달리 연안에서의 농도가 높게 나타났다. 이는 여름철 연안 부근에서 관측되는 조석 전선과 지형적인 요인에 따른 영양염 용승과 상관성이 있는 것으로 판단된다.

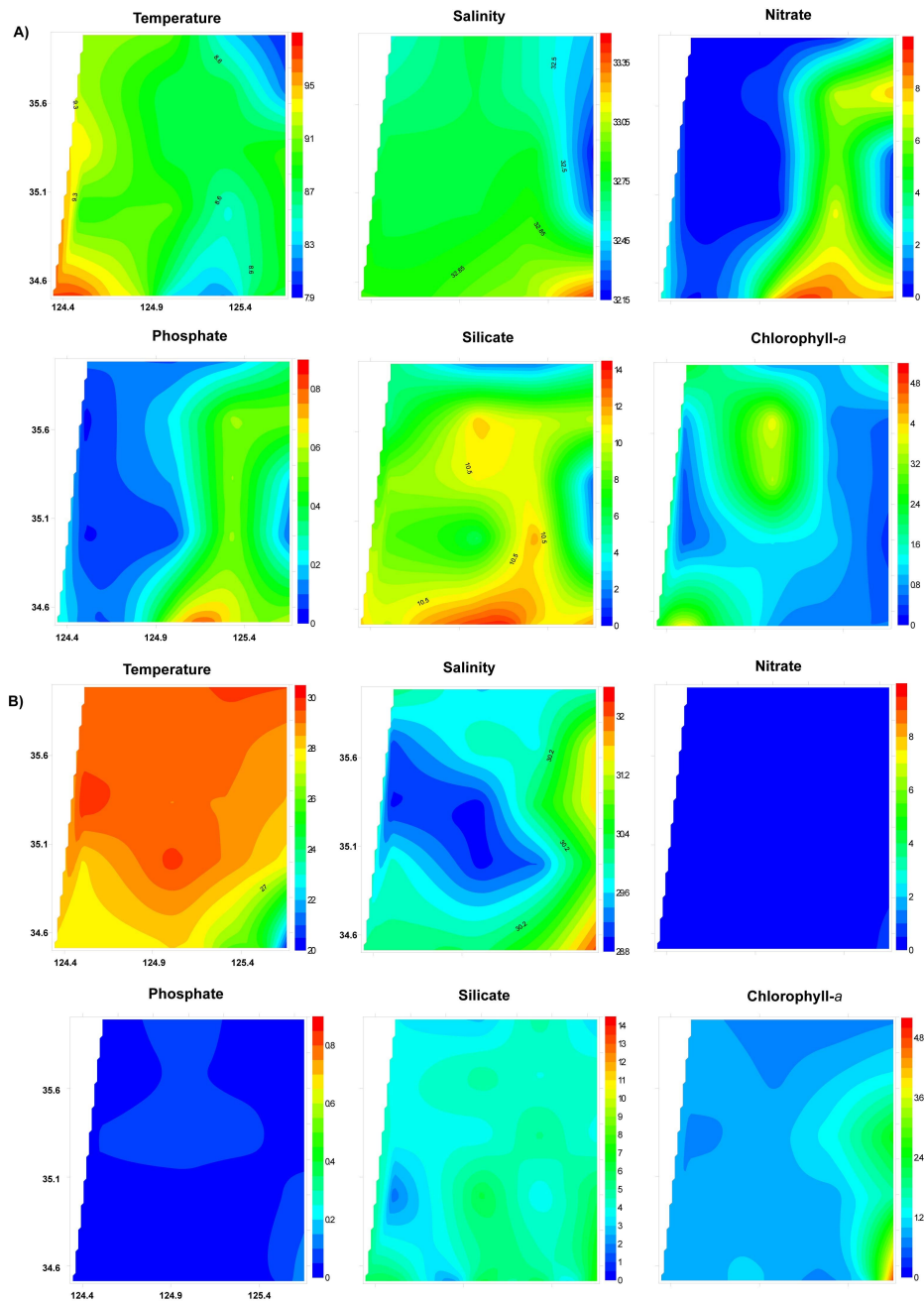


Fig. 3.2.1.2. Spatial distribution of temperature ($^{\circ}\text{C}$), salinity, nitrate (μM), phosphate (μM), silicate (μM) and chlorophyll-a ($\mu\text{g L}^{-1}$) in the surface water of study area.

(2) 봄철 일반 환경요인의 수직적 분포 특성

조사 지역의 봄철 황해 중앙부에서 수온은 $6.52 - 9.77^{\circ}\text{C}$ (평균 7.55°C), 염분은 $32.5 - 33.1$ (평균 32.8)의 값을 보였으며, 조사 지역의 최남단에 위치한 E 라인에서는 수온은 $6.83 - 9.77^{\circ}\text{C}$ (평균 7.65°C), 염분은 $32.8 - 33.5$ (평균 33.0)

의 범위를 보였다 (Fig. 3.2.1.3). 황해 중앙부의 수온의 수직적 분포를 보면 상층부 수온은 상대적으로 높은 반면, 20m 아래에서 낮은 수온을 보여 저층냉수대의 영향을 나타낸다. 염분은 수직적으로 혼합되는 경향을 보이며, 북쪽에 위치한 정점들이 남쪽에 위치한 정점보다 낮은 값을 보인다. 봄철 수온-염분의 다이어그램을 보면, 상층부는 YSSW가 주를 이루고 YSCW는 저층에 위치하고 있다 (Fig. 3.2.1.4a). 특히 북쪽에 위치한 A3와 B2 정점에서 황해저층냉수괴가 강하게 형성되어 있다. 조사 지역의 남쪽에 위치한 E 정점의 상층부 수온 분포는 외해(서쪽)에서 연안(동쪽)으로 갈수록 수온이 낮아지는 경향을 보인 반면, 수온 약층이 형성된 수심아래에서는 외해에서 연안으로 갈수록 증가하는 경향을 보인다. 수온 약층 아래에 나타나는 저층냉수는 끝이 깊은 정점 E3을 기점으로 양쪽으로 확산되는 경향을 보인다. 염분은 외해에서 연안으로 갈수록 더 높아지는 경향을 보인다. 특히 정점 E7과 E8은 상대적으로 고온고염의 특성을 보인다. E 라인에서 수온-염분의 다이어그램을 보면, 대부분 수체는 YSSW의 특성을 보이고 외해 정점은 저층에서 YSCW의 특성을 보인다. 하지만 연안에 위치한 정점 E7과 E8은 KE의 특성을 보이는데 이러한 경향은 이전 봄철 조사에서는 나타나지 않은 경향이다.

황해 중앙부 영양염의 평균 농도는 질산염 $5.37 \mu\text{M}$, 인산염 $0.43 \mu\text{M}$, 규산염 $10.9 \mu\text{M}$, 그리고 엽록소 a 는 $0.95 \mu\text{g L}^{-1}$ 의 값을 보이며, E 라인은 질산염 $8.36 \mu\text{M}$, 인산염 $0.63 \mu\text{M}$, 규산염 $13.09 \mu\text{M}$, 엽록소 a 는 $1.02 \mu\text{g L}^{-1}$ 의 값을 나타내었다. E 라인의 영양염 농도가 황해 중앙보다 높은 평균값을 보였다. 황해 중앙부의 영양염의 수직적 분포는 북쪽에서는 영양염 약층이 20m 부근에서 형성되며, 남쪽으로 내려올수록 상층부로 이동해 영양염 약층은 10m 부근에서 형성되었다. 황해 중앙부의 엽록소- a 농도는 영양염 약층이 형성된 상층부에서 높게 나타났고, 북쪽과 남쪽 끝 정점에서 높게 나타나는 반면, 가운데에 위치한 C2와 D3에서는 낮은 값을 보인다. E 라인에서의 영양염 분포는 외해 쪽 상층부에 영양염 농도가 낮은 반면 정점 E4와 E5에서 가장 높은 값을 보이고 연안 지역인 E8에서도 높은 값을 보인다. 이 지역은 작은 섬들이 위치하고 있는 지형적인 특성을 보이는 곳이기 때문에 섬의 영향으로 용승이 일어나는 것으로 판단된다. 또한 서해는 조석의 차가 크기 때문에 조석에 의한 영향 또한 받는 것으로 판단된다. E 라인에서 엽록소- a 의 분포를 보면 외해지역에서 뚜렷이 높은 값을 나타내

는 경향을 보인다. 이는 저층냉수괴가 위치한 지역과 일치하기 때문에 저층냉수에 의한 수층 안정도의 증가가 식물플랑크톤의 농도에 영향을 미친 것으로 판단된다. 본 연구 결과는 이전의 황해에서 봄철 식물플랑크톤 대발생이 수층의 안정도와 연관성이 있다는 논문들과 유사하다 (Hu et al., 2004; Fu et al., 2009; Xuan et al., 2011).

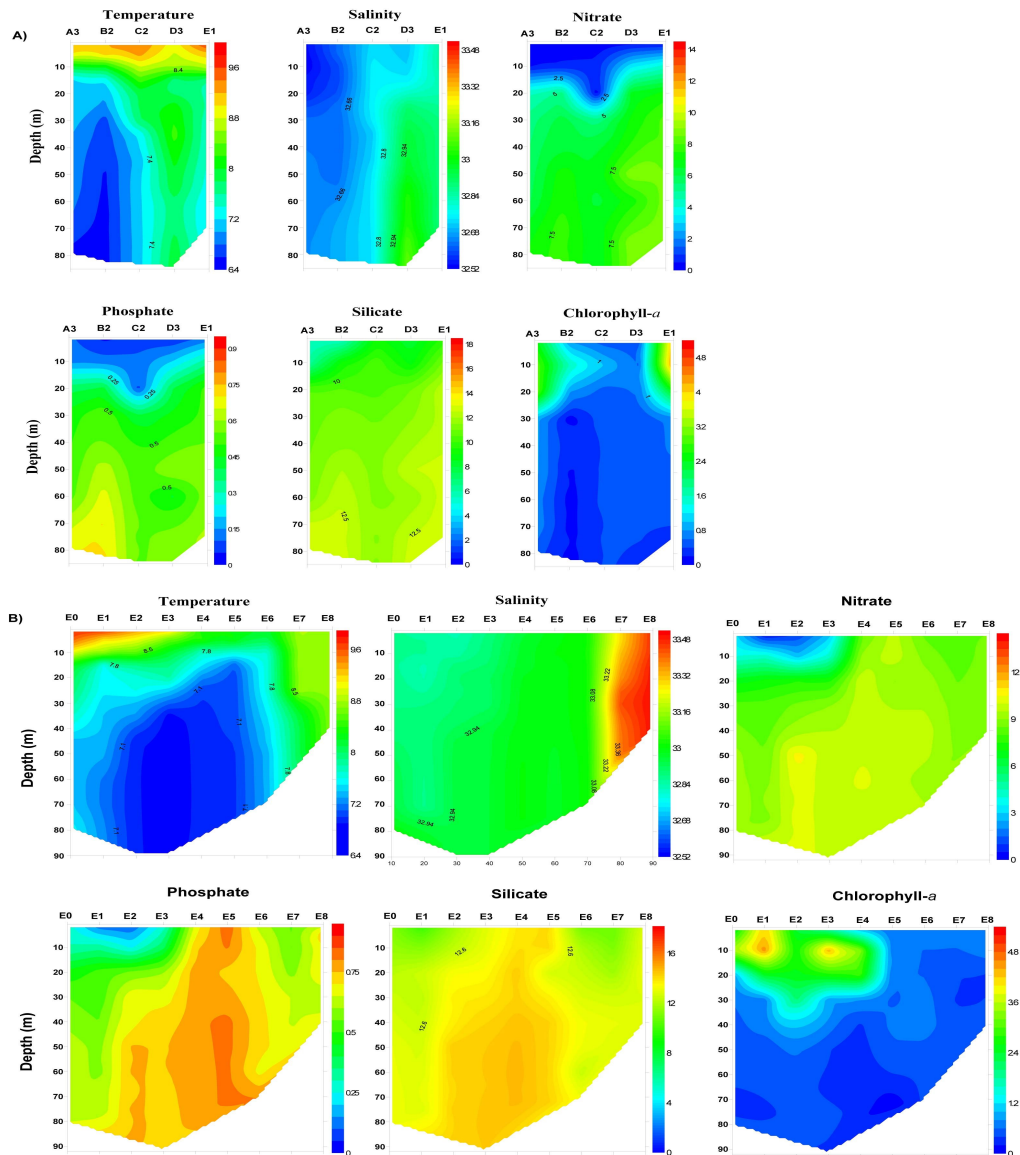


Fig. 3.2.1.3. Spring profiles of temperature ($^{\circ}\text{C}$), salinity, nitrate(μM), phosphate (μM), silicate (μM), and chlorophyll- a ($\mu\text{g L}^{-1}$) in (A) the CS and (B) E lines in April 2012.

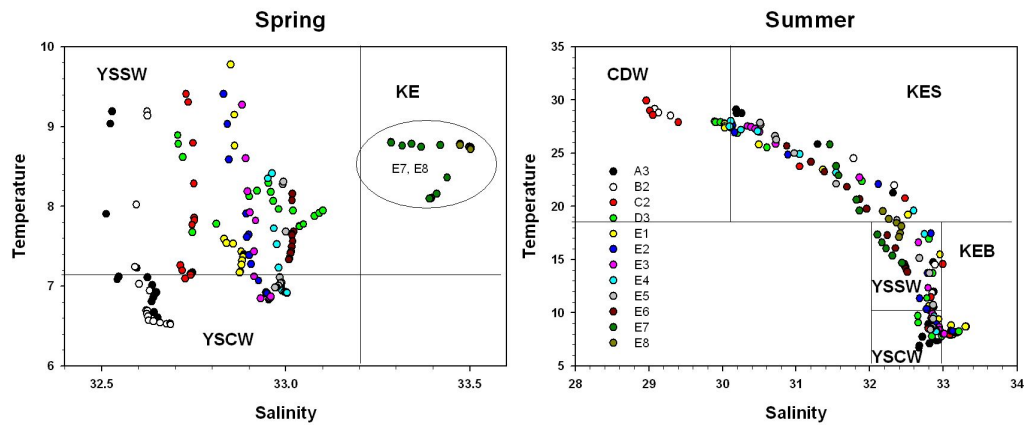


Fig. 3.2.1.4. Temperature - salinity diagram of the CS line and the E line in spring and summer 2012. Identified water masses are the Yellow Sea Surface Water (YSSW), the Yellow Sea Cold Water (YSCW), the Kuroshio-East China Sea (KE, which is split into a surface layer, KES, and a subsurface layer, KEB, in the summer), and the Changjiang Diluted Water (CDW).

(3) 여름철 일반 환경요인의 수직적 분포 특성

조사 지역의 여름철 황해 중앙부에서 수온은 6.70 - 29.9°C (평균 15.8°C), 염분은 29.0 - 33.3 (평균 32.0)의 값을 보였으며, 조사 지역의 최남단에 위치한 E 라인에서는 수온은 8.01 - 28.0°C (평균 16.6°C), 염분은 30.0 - 33.4 (평균 32.1)의 범위를 보였다 (Fig. 3.2.1.5). 수온과 염분의 범위를 보면 봄철에 비해 상당히 큰 폭의 값의 변화를 보인다. 이는 여름철 상층부로 유입된 장강 희석수와 저층에 존재하는 저층 냉수괴 때문이다. 여름철은 두 지역 모두 수온 약층이 40m 부근에서 강하게 나타났다. 하지만 E 라인의 경우 정점 E6부터 E8까지는 저층에서 10°C 이하의 저층냉수괴가 나타나지 않았으며, 연안으로 갈수록 수온 약층이 얇아지는 경향을 보였다. 이는 여름철 서해안의 조석 전선과 지형적인 특성에 의해 연안 지역에서 용승 작용이 일어나기 때문이다. 수온-염분 다이어그램을 보면, 다른 조사 연도 여름철에는 나타나지 않았던 CDW가 나타났으며, 다른 수체는 다른 조사 연도 여름철과 유사한 경향을 보였다 (Fig. 3.2.1.4b).

여름철 황해 중앙부 영양염의 평균 농도는 질산염 3.86 μM , 인산염 0.30 μM , 규산염 7.92 μM , 그리고 엽록소-*a*는 1.05 $\mu\text{g L}^{-1}$ 의 값을 보이며, E 라인은 질산염 3.84 μM , 인산염 0.29 μM , 규산염 8.48 μM , 엽록소-*a*는 1.17 $\mu\text{g L}^{-1}$ 의 값을 나타내었다. 봄철에 비해 영양염의 평균 농도는 낮게 나타났으며, 봄철 영양염

평균 농도는 E 라인이 황해 중앙부보다 높게 나타났지만 여름철은 두 지역이 유사한 평균 농도 값을 보였다. 황해 중앙부에서 영양염의 수직적 분포를 보면, 수온 약층이 형성되는 40m 부근까지 질산염 및 인산염 농도는 고갈되어 있으며 B2와 C2의 저층에서 영양염 농도가 높게 나타났다.

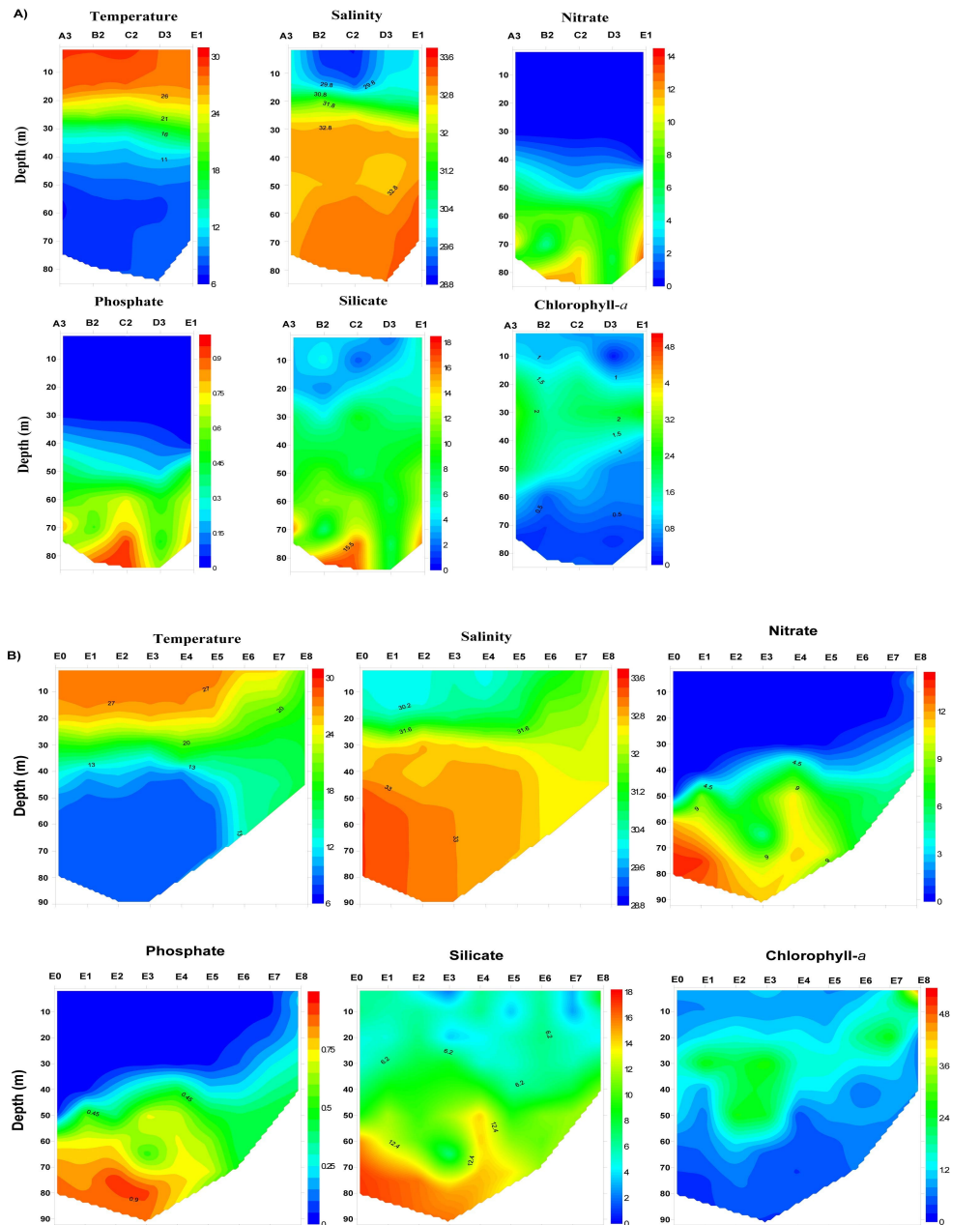


Fig. 3.2.1.5. Summer profiles of temperature ($^{\circ}\text{C}$), salinity, nitrate(μM^1), phosphate (μM), silicate (μM), and chlorophyll-a ($\mu\text{g L}^{-1}$) in (A) the CS and (B) E lines in August 2012.

엽록소-a 분포를 보면 표층에서의 농도는 낮지만 표층 아래 20-40m 부근에서 높은 농도를 나타내 Subsurface Chlorophyll Maximum (SCM) 층이 뚜렷하게 형성되어 있는 것을 볼 수 있다. 이러한 SCM 층의 폭은 외해에서 연안으로 갈수록 좁아드는 경향을 보인다. E 라인에서의 영양염 수직 분포를 보면 영양염 약층이 수온 약층이 형성되는 지점과 일치하는 것을 볼 수 있다. 외해에서 SCM 층이 20 - 40m 사이에 형성되고 있는 반면 연안으로 갈수록 상층부로 이동하는 경향을 보였고, E8에서는 표층의 엽록소-a 값이 가장 높게 나타났다. 이러한 현상은 여름철 조석 전선과 지형적인 요인에 따른 용승작용과 연관성이 있다 (Lie, 1986; Odate and Furuya, 1998). 수체가 연안 지역에서 용승작용이 일어나면 수온 전선이 연안으로 갈수록 상층부로 이동한다. 수온 전선이 형성되는 지점은 수온 전선의 진동에 의해서 수온 약층 상층부에 영양염을 공급하게 되고 (Holligan et al., 1985), 또한 여름철 강한 성층은 수층의 안정도를 증가 시킨다. 또한 여름철은 강한 일사량으로 인해 수체의 상층부의 수온이 높다. 이로 인해 식물플랑크톤 성장이 촉진되고 이로 인해서 SCM 층이 형성되는 것이다. 결과적으로 수온 약층, 영양염 약층 및 SCM 층이 거의 일치하는 경향을 보인다. 정점 E2와 E3의 경우 다른 정점과 달리 60m 부근까지 SCM 층이 두껍게 형성되어 있으며 이로 인해 영양염 농도도 다른 정점들에 비해 낮은 값을 보인 것으로 판단된다.

(4) 엽록소 a의 분포와 크기별 식물플랑크톤 생체량 비교

위도별 총 엽록소 a 농도는 그림 3.2.1.6과 같다. A line (A03, A05, A06, A07)의 엽록소 a 농도는 10-20m 수심에서 높은 농도를 보였고 저층으로 갈수록 낮은 농도를 보였고 정점별 차이를 보이지 않았다. D line (D03, D05, D06, D07)의 엽록소 a 농도는 외양정점인 D03 정점 20m 수심에서 $4.06 \mu\text{g L}^{-1}$ 로 가장 높은 농도를 보였다. 그러나 연안정점인 D07에서는 $0.26-1.22 \mu\text{g L}^{-1}$ 를 보여 D03 정점보다 낮았다. E line에서는 E01와 E03 10m 수심에서 $4 \mu\text{g L}^{-1}$ 이상의 농도를 보였고, E05와 E07 정점에서는 $1 \mu\text{g L}^{-1}$ 이하의 농도를 보여 정점별 차이가 크게 나타났다. 크기별 엽록소 a의 분포는 D03을 제외한 전 정점에서 $20\mu\text{m}$ 이상의 소형 식물플랑크톤이 44.3%를 차지하였다 (Fig. 3.2.1.7). 그러나 D03 정점은 3-20 μm 사이의 미소 식물플랑크톤이 57.5%의 우점율을 보여 다른 정점과 다른 양상

을 보였다.

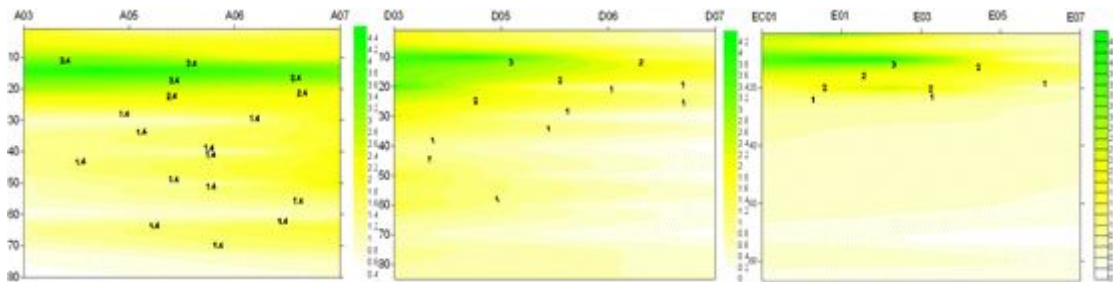


Fig. 3.2.1.6. Vertical profiles of chlorophyll a at A, D and E lines in the Yellow Sea.

특히, 연안 정점인 A07, D07, E07에서는 소형 식물플랑크톤이 높은 우점율을 보였으나, 외양정점에서는 상대적으로 미소 식물플랑크톤이 높은 우점율을 차지하였다. 또한 $3\mu\text{m}$ 이하의 초미소 식물플랑크톤은 저위도 정점인 E line 정점에서 18.5-25.7%의 우점율을 보여 고위도 정점 (A03, A05, A06, A07)의 2.9-10.8%와 비교하여 높은 우점율을 보였다.

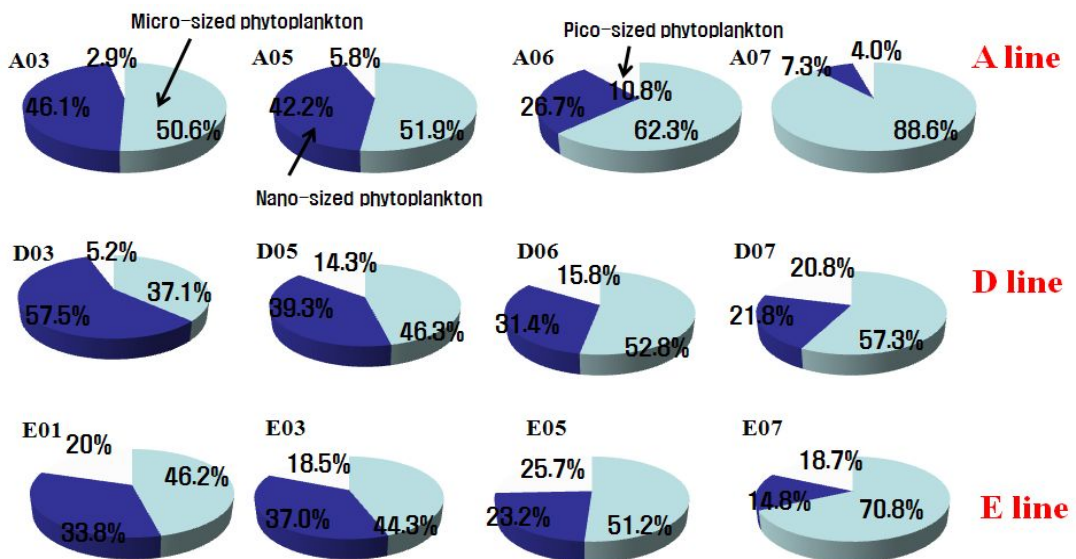


Fig. 3.2.1.7. The ratio of size-fractionated chlorophyll a at A, D and E lines in the Yellow Sea.

(5) 식물플랑크톤 군집의 위도별 분포특성

2012년 봄철 위도별 식물플랑크톤 군집의 분포 양상은 고위도 정점 (A03, A05, A06, A07) 표층에서 *Thalassiosira nordenskioldii*, *Th. proschkiniae*,

Skeletonema costatum, *Leptocylindrus danicus*와 같은 규조류가 우점종을 나타냈다 (Table 3.2.1.1). 그러나 D line (D03, D05, D06, D07) 표층의 제 1우점종은 unidentified nanoflagellates 가 21.4%의 우점율을 보여 A line 정점과 다른 경향을 보였다. E line (E01, E03, E05, E07) 정점의 표층 제 1우점종은 D line과 같이 unidentified nanoflagellates 가 28.1%로 유사한 경향을 보였고, *Chaetoceros compressus*가 14.1%로 제 2 우점종을 차지하였다.

Table 3.2.1.1. Dominant species at A, D and E lines in the Yellow Sea.

Stations	Dominant species (over 5% of total)	
	Surface	Bottom
A-Line	<i>Thalassiosira nordenskioldii</i> (25.7%), <i>Thalassiosira prochinaea</i> (21.3), <i>Leptocylindrus danicus</i> (6.22%) <i>Skeletonema costatum</i> (5.89%)	<i>Paralia sulcata</i> (62.5%), <i>Skeletonema costatum</i> (18.3%)
D-Line	Unidentified nano-flagellates (21.4%) <i>Skeletonema costatum</i> (20.9%), <i>Eucampia zodiacus</i> (8.69%)	<i>Paralia sulcata</i> (22.4%), Nanoflagellates (12.1%)
E-Line	Unidentified nano-flagellates (28.1%) <i>Chaetoceros compressus</i> (14.1%) <i>Skeletonema costatum</i> (12.5%)	<i>Paralia sulcata</i> (38.4%), <i>Skeletonema costatum</i> (23.38%), Nanoflagellates (14.7%)

(6) 식물플랑크톤 핵심종 탐색

2012년 춘계 표층의 식물플랑크톤 군집은 A 라인에서 규조류가 52.14-61.62%로 제 1 우점 그룹으로 파악되었고, E 라인에서도 55.21-62.17%로 이와 유사한 경향을 보였다. 이 때 우점종으로는 *Skeletonema costatum*, *Thalassiosira nordenskioldii*, *Leptocylindrus danicus*, *Chaetoceros compressus* 등이 A와 E 라인에서 나타났다. 하계 식물플랑크톤 군집은 A 라인에서 규조류가 38.27-44.25%로 제 1 우점 그룹으로 나타났고, 이 때 *Thalassiosira prockinae*, *Sk. costatum*이 우점종으로 출현하였다. E 라인은 nano-flagellates 그룹이 34.70-42.46%로 가장 우점하였고, 규조류는 28.54-34.25%로 제 2 우점 그룹으로 나타나 위도별 다른 양상을 보였다. 이전 데이터와 비교시 식물플랑크톤 우점종은 조사 정점에서 춘계에 규조류인 *Sk. costatum*과 *T. nordenskioldii*가 항시 우점하는 종으로 나타나 대표종으로

판단된다.



Fig. 3.2.1.8. Flow chart of selection on major species.

그러나 하계에는 A 라인에서 *T. proskinae*가 E 라인에서는 nano-flagellates 그룹이 그 크기에 변화가 있지만, 항시 우점 하는 것으로 나타났다. 하계에 저층냉수는 수온이 10°C 이하로 식물플랑크톤 군집 중 규조류가 조사 정점에서 우점종을 차지하였다. 이 때 식물플랑크톤 우점종은 *Sk. costatum*, *Paralia sulcata*, *Chaetoceros* spp. 가 차지하였다. 이는 낮은 수온 및 비교적 높은 영양염 농도로 인하여 규조류가 다른 분류군과 비교하여 성장에 유리 하였을 거라 판단된다.

제3절 원생동물

1. 원생동물

가. 서론

해양의 표영 생태계에서 종속영양 원생동물은 미소형 동물플랑크톤 (2-20 μm) 과 소형 동물플랑크톤 (20-200 μm)의 중요한 구성자로서 방산충류, 유공충류, 섬모충류, 종속영양 편모충류, 종속영양 와편모류로 구성되어 있다 (Stoecker and Capuzzo, 1990). 종속영양 원생동물은 작은 크기와 상대적으로 빠른 신진대사 활동으로 인해 유기탄소와 미량원소의 흐름을 촉진하므로 생태계의 에너지 흐름에 중요한 영향을 미치며 (Sheldon *et al.*, 1986), 박테리아부터 미소 플랑크톤까지 다양한 크기의 먹이를 효과적으로 섭식하고, 중형 동물플랑크톤과 난치자어의 좋은 먹이원이 되기 때문에 해양 생태계의 기저부에 미세생물 먹이망 (microbial food web)과 중형 동물플랑크톤 먹이망 (metazoan food web)을 연결하는 에너지 전달과 유기물질의 순환에 매우 중요한 역할을 한다(Sherr *et al.*, 1986; Sherr *et al.*, 1988; Pierce and Turner, 1992). 전형적으로 원생동물의 생물량은 식물플랑크톤과 유사한 분포를 보이며, 해양 일일 일차 생산력의 10 - 70 % 또는 100 % 이상까지 소비하기 때문에 해양 먹이망의 탄소순환에 중요한 역할을 한다 (Pierce and Turner, 1992). 특히 미세생물 먹이망을 통한 탄소의 흐름은 그 해역의 영양 상태와 플랑크톤 군집구조에 따라 변화하기 때문에(Weisse *et al.* 1990; Wylie and Currie 1991) 원생생물의 분포는 플랑크톤 군집의 영양구조에 중요한 영향을 미칠 수 있다 (Rassoulzadegan and Étienne 1981). 이와 관련하여 지난 20년 이상 해양 생태계에서 원생생물의 섭식률, 원생생물의 군집과 미세생물 군집구조와 관련한 미세생물 먹이망에 대한 연구들이 세계의 다양한 해양에서 수행되었다 (Verity *et al.* 1996; Garrison *et al.* 1998; Landry and Kirchman 2002; Landry *et al.* 2003).

황해는 북서태평양에 위치한 반폐쇄적인 연안수역으로 북쪽으로는 보해와 남쪽으로는 동중국해의 영향을 받는 복잡한 환경 특성을 구성하고 있는 해역이다. 특히 황해는 겨울철 형성된 냉수가 다음해 여름까지 저층에 남아서 표층 해수에 비하여 상대적으로 수온이 낮은 저층수가 형성되는 황해 저층냉수대라는 독특한 환경을 구성하고 있다. 이러한 황해 냉수괴의 거동은 황해의 기후와 지형 특성에 의해 직접적으로 영향을 받으며, 황해의 생태계 및 환경변화를 조절하는 중요한 인자로 알려져 있다. 그러나 황해 냉수대에서 미세생물 군집에 대한 연구는 박테리아 및 초

미소 플랑크톤의 분포에 대한 연구결과가 있을뿐 미세생물 먹이망과 관련된 종속영양 원생동물에 관한 연구는 전무하다 (Hongbo *et al.*, 2006).

따라서 본 조사는 황해 저층냉수괴의 거동에 따른 생태계 영향 연구의 일환으로 하위 영양단계에서 에너지 흐름의 전달자로서 중요한 역할을 하는 종속영양 원생생물의 군집구조 및 이들의 식물플랑크톤에 대한 섭식압의 공간 분포를 분석하여 황해의 냉수대 환경의 표영 생태계에서 종속영양 원생생물의 군집 구조 및 식물플랑크톤에 대한 섭식압을 조사 하였다.

나. 재료 및 방법

(1) 종속영양 원생생물의 개체수 및 탄소생체량

수층내 종속영양 원생생물의 생물량을 파악하기 위하여 표층과 저층에서 해수를 채수하였다. 종속영양 원생생물중 섬모충류와 종속영양 와편모류를 관찰하기 위하여 500 ml 해수를 Lugol's solution으로 최종농도 5 % 되게 고정하였고, 고정된 시료는 실험실로 운반해 섬모추출의 관찰을 위해 Lugol로 고정된 시료는 50 ml 까지 가라앉게 한 후 Utermöhl chamber를 사용하여 도립 현미경(Olympus IX 70)으로 관찰하였다. 종속영양 미소편모류와 종속영양 와편모류의 생물량을 파악하기 위하여 300 ml의 해수를 글루타르 알데하이드로 최종농도 1%가 되게 고정한 후 현장에서 슬라이드를 제작하였다.

종속영양 원생동물의 탄소량은 현미경하에서 각 세포 크기를 측정후 세포용적을 Edler(1979)의 방법에 따라 구하였다. 유충 섬모충류(Tintinnids)는 $\text{carbon}(\text{pg})=444.5+0.053 \text{ lorica volum}(\mu\text{m}^3)$ (Verity and Langdon, 1984)의 식에 따라 구하였으며, 피각이 없는 빈모 섬모충류(Oligotrichs)는 $0.19 \text{ pgC } \mu\text{m}^{-3}$ (Putt and Stoecker 1989)의 전환값을 사용하여 환산하였다. 와편모류의 탄소량은 Edler(1979)의 방법에 따라 용적을 구한 후 Menden-Deuer and Lessard(2000)의 실험식인 $\text{Carbon}(\text{pg})=0.216 [\text{volume, m}^3]^{0.939}$ 을 이용하여 각 세포의 탄소량을 구하였다.

(2) 식물플랑크톤에 대한 종속영양 원생생물 섭식율

Landry and Hasett(1982)의 해수희석 방법(Dilution method)을 사용하여 식물플랑크톤의 성장률과 종속영양 원생생물의 섭식률을 측정하였다. 각 정점의 10 m 수심에서 10 ℓ의 해수를 채수하여 실험에 사용하였다. 섭식률 실험을 위해 사용된

실험 용기는 사용 전에 10% 염산으로 세척한 후 3차 증류수로 세척한 2.3ℓ PC bottle을 사용하였다. 채수한 해수는 희석수를 만들기 위하여 0.2 μm로 실험직전에 현장 해수를 여과하였다. 채수한 해수와 0.2 μm로 여과된 해수의 비율을 각각 100%, 80%, 60%, 40%, 20%가 되게 희석하였다. 희석 후 각각의 실험용기(100%, 80%, 60%, 40%, 20%)에 식물플랑크톤의 원활한 성장을 위해 질산염(최종농도 0.5 uM)과 인산염(최종농도 0.03 uM)을 첨가하여 24 시간 자연 상태에서 배양하였다. 배양 초기와 24시간 후에 각각의 실험 용기에서 엽록소-a 농도 측정을 위해 해수 500 ml를 여과하여 현장에서 Turner Design Fluorometer(10-AU)를 이용하여 분석하였다. 각각의 dilution factor에서 얻은 엽록소-a 농도의 기울기와 절대값으로 식물플랑크톤의 성장률과 사망률을 얻었고, 이 값을 이용하여 식물플랑크톤에 대한 종속영양 원생생물의 섭식률을 계산하였다.

다. 결과 및 토의

(1) 종속영양 원생동물의 현존량 및 군집구조 특성

해양 생태계에서 미세생물 먹이망을 통한 탄소의 흐름은 그 수역의 영양상태와 플랑크톤 군집구조에 따라 변화하기 때문에 종속영양 원생동물의 분포와 군집구조는 전반적인 플랑크톤 군집의 영양구조에 중요한 영향을 미치며, 생태계 구조를 변형시킨다 (Rassoulzadegan and Étienne, 1981). 따라서 생태계의 미세생물 먹이망의 구조를 이해하기 위하여 종속영양 원생동물의 군집구조를 이해하는 것은 필수적이다.

2012년 춘계와 하계 조사에서 종속영양 원생동물 군집은 섬모충류와 종속영양 와편모류 그룹을 중심으로 분석하였다. 춘계에 섬모충류의 현존량은 800 - 33,000 cells/L 로 평균 9900 cells/L 로 분포 하였으며 조사수역의 중앙수역에서 가장 높게 분포하였다 (Fig. 3.3.1.1). 섬모충류 그룹은 피각을 갖고 있지 않은 빈섬모충류에 의하여 90% 이상의 높은 분포를 보였다. 춘계에 종속영양 와편모류는 720 - 15,000 cells/L 로 평균 4200 cells/L 로 분포 하였으며 섬모충류와는 반대로 연안수역에서 비교적 높은 분포를 보였다. 종속영양 와편모류 그룹은 피각을 갖지 않은 *Gyrodinium* sp.에 의하여 90% 이상 우점 하였으며, 피각을 갖고 있는 *Protoperidinium* spp. 는 매우 낮게 출현하였다. 종속영양 원생동물은 정점 E05와 E07를 제외하고 대부분 정점에서 섬모충류에 의하여 80% 이상 우점하여 나타났다

(Fig. 2). 종속영양 원생동물의 분포는 기존에 황해의 춘계에 조사되어진 연구가 없기 때문에 기존의 자료와 비교하기는 불가능하다. 그러나 기존에 황해에서 조사된 동계의 원생동물 분포 특성과 유사한 결과이다 (UNDP/GEF, 2011).

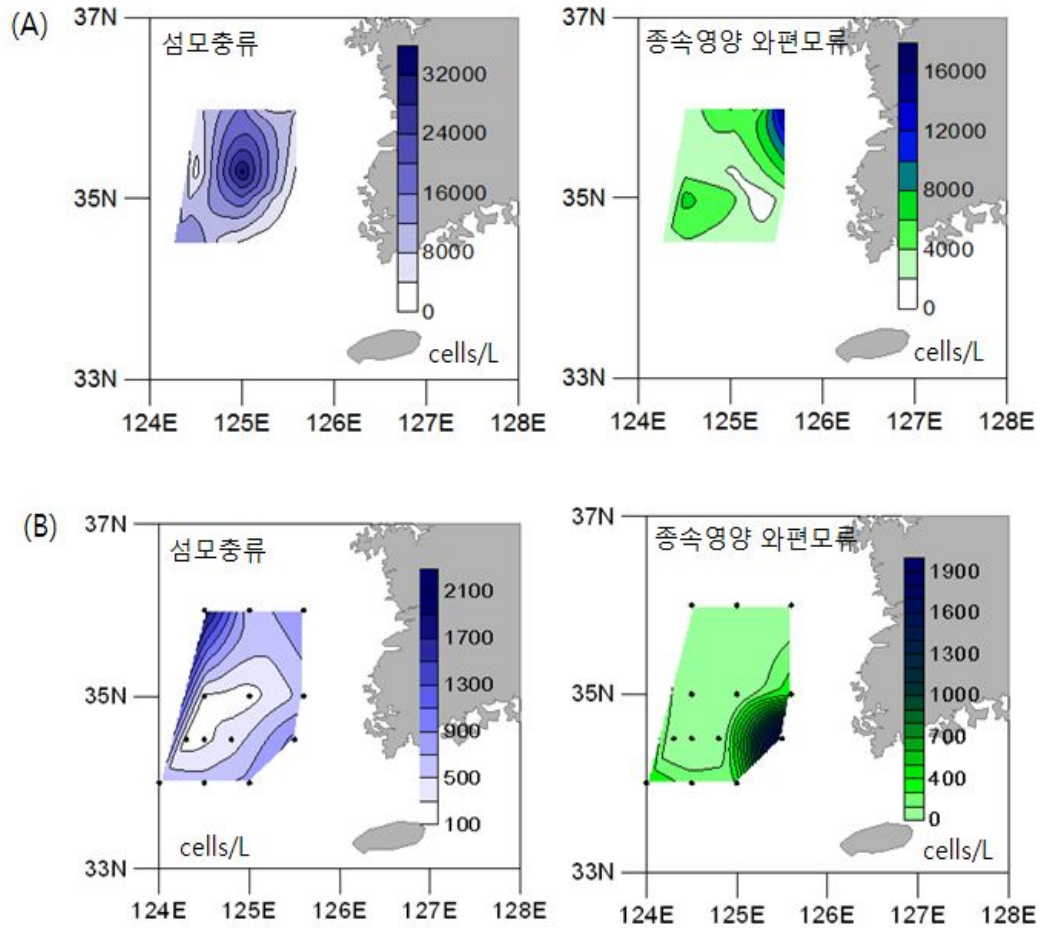


Fig. 3.3.1.1. Abundance distribution of heterotrophic protozoa in spring(A) and summer(B).

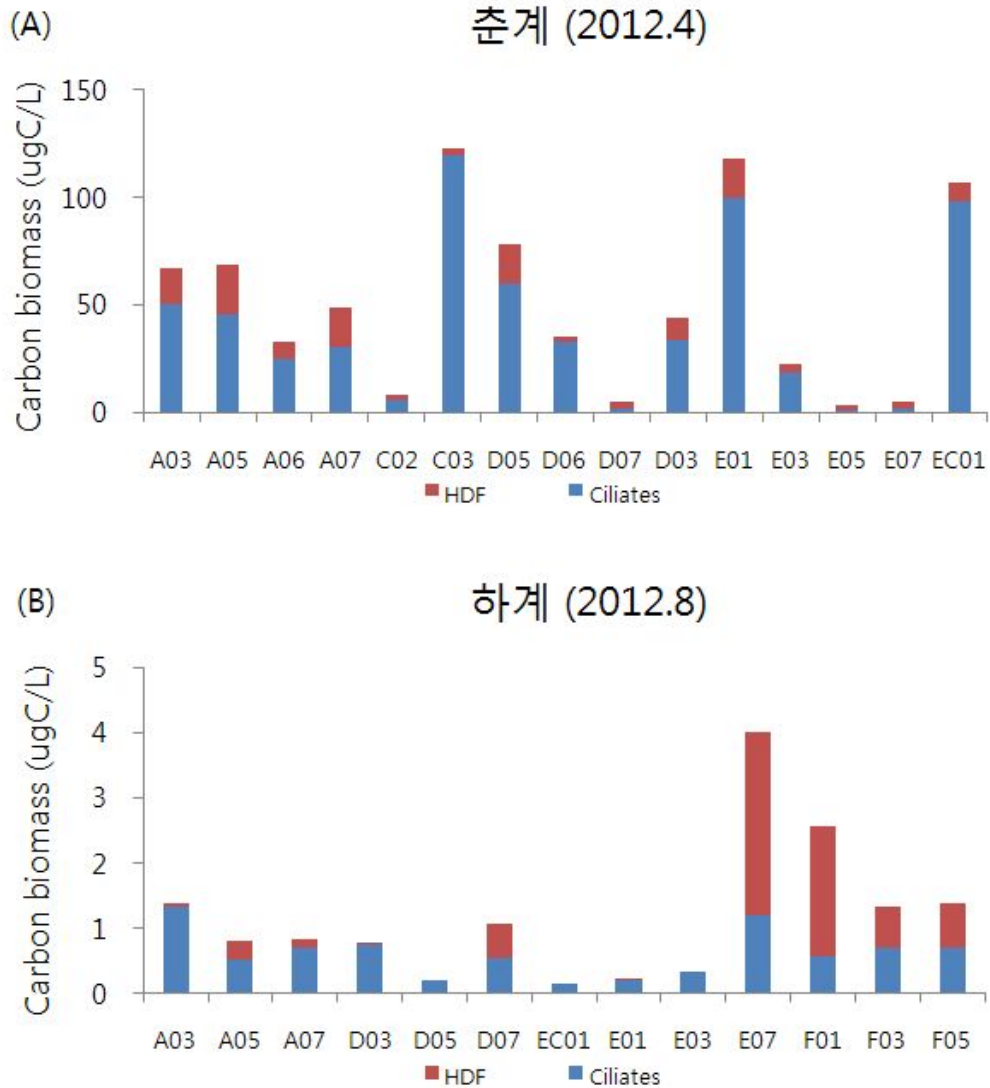


Fig. 3.3.1.2. Distribution of heterotrophic protozoan carbon biomass in the study area.

이와 같이 종속영양 와편모류에 비하여 섬모충류의 생물량이 높게 분포하는 것은 그들의 먹이 특성과 연관이 있을 것이며, 특히 섬모충류가 높게 분포하는 수역에서는 큰 크기의 식물플랑크톤 보다는 작은 크기의 미소형 및 극미소형 식물플랑크톤에 의하여 우점할 가능성이 높음을 의미한다. 특히 총엽록소-a 농도와 종속영양 원생동물 생물량 사이의 높은 상관관계는 두 그룹 사이에 피식-포식의 관계가 성립되고 있음을 의미하며, 이 같은 결과는 섭식률 실험결과에도 잘 반영되고 있다.

하계에 원생동물의 분포 특성은 춘계와 비교하여 다른 결과를 보였다. 섬모충류는 250 - 1800 cells/L 로 평균 600 cells/L 로 분포 하였으며 춘계와는 반대로 조

사수역의 중앙수역에서 가장 낮게 분포하였다 (Fig. 3.3.1.1). 특히 하계에 섬모충류의 현존량은 춘계에 비하여 10배 이상 낮은 분포를 보였다. 이와 같은 결과는 2007년 하계에 조사된 평균 3,680 cell/L 에 비하여 5배 이상 낮은 결과이다 (UNDP/GEF, 2011). 그러나 섬모충류 그룹은 춘계와 유사하게 피각을 갖고 있지 않은 빈섬모충류에 의하여 90% 이상의 높은 분포를 보였으며, 특히 크기가 작은 미소형 섬모충류에 의하여 우점하여, 크기별 섬모충류의 분포는 계절별로 다소 차이를 보였다. 하계에 종속영양 와편모류는 20 - 11900 cells/L 로 평균 240 cells/L 로 분포 하였으며 섬모충류와는 반대로 수온이 낮았던 정점 E01에서 가장 높게 분포하였고, E-line 과 F-line 을 제외하고는 대부분 100 cells/L의 낮은 현존량 분포를 보였다. 하계 종속영양 와편모류의 현존량은 섬모충류와 유사하게 춘계에 비하여 10배 이상 낮은 값을 보였다. 또한 이와 같은 결과는 2007년 하계에 조사된 평균 1400 cells/L에 비하여 4배 정도 낮은 결과이다. 그러나 와편모류 그룹은 춘계와는 다르게 피각을 갖지 않은 *Gyrodinium* sp. 에 비하여 피각을 갖고 있는 *Protoperidinium* sp. 에 의하여 더 높은 분포를 보였다.

이상과 같이 춘계에 비하여 하계에 상당히 낮은 종속영양 원생동물의 분포는 이들의 먹이원 분포 및 물리화학적인 환경요인의 분포와 밀접하게 관련이 있을 것으로 판단되며, 특히 하계에 낮은 원생동물의 생물량은 낮은 엽록소-a 농도와도 관련이 있을 것으로 보인다. 그러나 2007년의 하계 조사에 비하여 본 조사의 하계에 상당히 낮은 원생동물의 생물량은 먹이원 뿐 아니라 윗단계 섭식자인 중형 동물플랑크톤에 의한 top-down 의 영향도 간과할수 없음을 제시한다 .

2) 식물플랑크톤에 대한 종속영양 원생동물의 섭식률

해양 생태계에서 부유 원생동물의 생물량은 수온과 염분과 같은 수괴의 특성, 이들이 이용 할수 있는 먹이의 크기와 농도, 상위 단계 섭식자에 의한 포식등에 의해 조절되어 진다. 또한 수온과 염분에 대한 수괴 특성은 원생동물 군집의 생물량에 직접적으로 영향을 미치는 것이 아니라 그들의 먹이원인 식물플랑크톤에 의한 간접적인 영향으로 보고되었다. 따라서 지금까지 많은 연구를 통해 연안 및 외해역에서 종속영양 원생동물의 생물량은 엽록소-a 농도와 밀접한 관련을 갖고 있는 것으로 보고 되었다 (Burkill *et al.* 1995; Garrison *et al.* 1998). 특히 생태계내에서 미세생물 군집 사이의 상관관계를 분석하는 것은 먹이와 포식자 사이에 어떤 양의 상

관관계가 있음을 설명한다 (Hwang and Heath, 1997; James and Hall, 1995). 비록 상관관계 분석이 미세생물 그룹들 사이에서 직접적인 먹이와 포식자 관계를 설명하는데 사용될 수는 없지만, 두 그룹 사이에 상관관계가 높은 것은 부유 원생동물과 식물플랑크톤 사이에 강한 영양 관계를 암시할 수는 있다. 그래서 본 조사에서는 상관관계 분석을 통하여 식물플랑크톤의 생물량과 종속영양 원생동물 사이에 피식-포식자의 관계를 설명하였다. 본 조사에서 종속영양 원생동물의 생물량과 엽록소-a 농도 사이는 춘계와 하계에 다른 경향을 보였다. 춘계에 원생동물의 생물량은 엽록소-a 농도와 높은 상관관계를 보여 두 그룹 사이에 피식-포식자의 관계를 암시하였다 (Fig. 3.3.1.3).

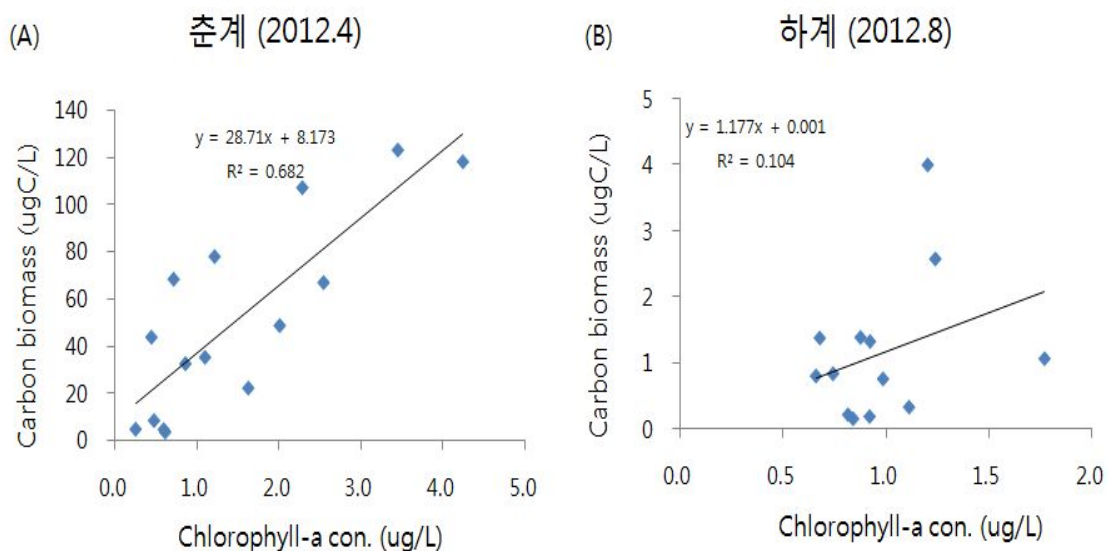


Fig. 3.3.1.3. Relationship of heterotrophic protozoan biomass and chlorophyll-a concentration.

이러한 피식-포식자의 관계는 미세생물 먹이망에서 에너지 흐름을 조절하는 중요한 조절 인자가 될 수 있음을 시사한다. 그러나 춘계에 비하여 하계에 전반적으로 매우 낮은 원생동물의 생물량은 식물플랑크톤의 농도 분포와 유사한 관계를 보이지 않았다. 이와 같은 결과는 하계에 원생동물의 생물량 및 생산력은 식물플랑크톤 외에 박테리아와 같은 다른 먹이원에 의해 더 크게 영향을 받을수도 있음을 시사 한다. 식물플랑크톤과 원생동물 사이의 관계를 설명하기 위한 이러한 추론은

해수 희석방법(Dilution method)을 통해 수행된 식물플랑크톤에 대한 종속영양 원생생물의 섭식률 실험 결과에서 잘 뒷받침 해주고 있다.

종속영양 원생생물은 일차 생산자의 가장 중요한 소비자로서 미소형 식물플랑크톤이 우점하는 해역에서 일일 일차 생산력의 평균 70%까지 소비하는 것으로 알려졌다. 종속영양 원생동물의 섭식률은 춘계조사에서만 수행되었다. 조사수역에서 식물플랑크톤 생물량에 대한 부유 원생동물의 섭식률은 28 - 98% (평균 65.7%)로 나타났으며, 조사수역의 남쪽에 비하여 북쪽에서 비교적 높게 나타났다 (Fig. 3.3.1.4). 이와 같은 결과는 이전에 황해에서 하계에 조사된 평균 71% 와 유사한 결과로서 황해에서 원생동물의 생물량 분포는 계절적 차이를 보이지만 식물플랑크톤의 생물량을 조절할수 있는 원생동물의 잠재적 생산력은 크게 차이가 없을 수도 있다. 또한 원생동물의 섭식압은 이전에 연안 및 온대해역에서 조사된 값과 유사하게 분포하여 황해의 춘계에 종속영양 원생동물은 미세생물 군집에서 중요한 역할을 할 수 있음을 시사 하였다. 이러한 결과는 조사수역의 표영 생태계에서 원생동물은 먹이 공급의 변화에 빠르게 반응하기 때문에 생산과 소비 사이에 균형 있는 관계가 유지되는 것으로 생각된다. 본 연구수역의 표영 생태계에서 미세생물 그룹들은 생산과 소비사이에 강한 coupling을 형성하여 종속영양 원생동물은 미세생물 먹이망 내에서 유기 탄소의 전달자로서 중요한 역할을 할 것으로 추측할수 있다. 그러나 미세생물 먹이망내에서 종속영양 원생동물의 탄소의 이용률과 전달률은 수괴의 특성에 따라 다르게 나타나기 때문에 종속영양 원생동물의 역할도 수괴의 특성및 계절에 따라 차이가 있을 것으로 사료된다. 향후 이와 같은 연구는 냉수대가 강하게 발달되어 있는 하계에 혼합층과 냉수대층에서 동시에 수행하여 냉수대에서 미세생물 먹이망의 발달 정도를 측정할 예정이다.

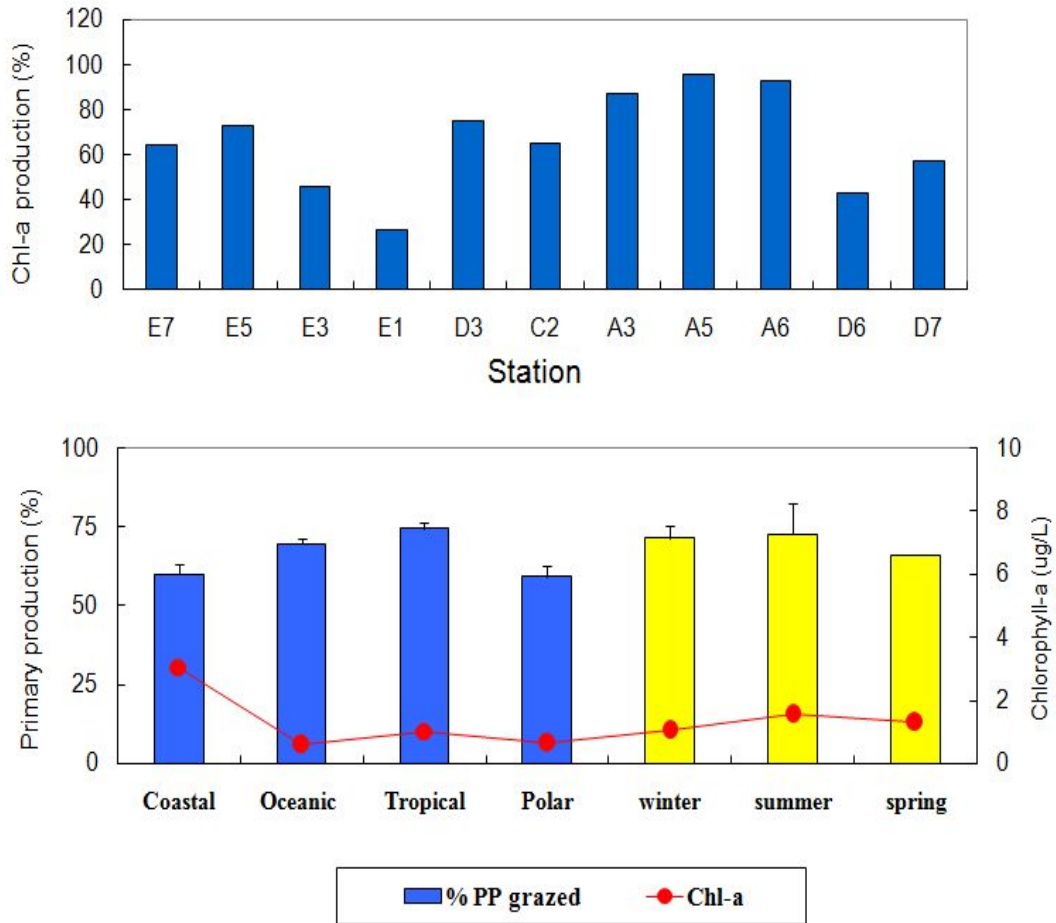


Fig. 3.3.1.4. Grazing impact of heterotrophic protozoa on phytoplankton and regional comparisons of grazing impact reported in the world ocean.

3) 원생동물을 활용한 냉수대 지표종 연구 및 향후 연구 방향

수괴지시자로서 원생동물의 활용은 섬모충류 그룹에 국한되어 비교적 많이 되어 조사되었다 (Balech 1972; Kato and Taniguchi 1993; 김등, 2012). 원생동물 중 섬모충류에 속하는 유충섬모류는 세포를 에워싸는 피갑(lorica)을 가지고 있어 비교적 보존이 잘되기 때문에 이들의 출현은 전 세계의 해역에 걸쳐 보고되어 왔다. 이 그룹은 수온과 염분에 따른 수괴 지표성이 뛰어난 분류군으로 종 특이적 분포 특성이 명확하게 구분되며, 특정한 수괴에 종 특이적 분포를 보이는 분포 특성으로 유충섬모류의 일부 종은 수괴의 지표종으로 제시되어 왔다 (Balech 1972). 여러 해류가 만나는 복잡한 해역에서 이 같은 유충섬모류의 지표 성을 이용하여 해역의 특성을 이해하고자 관련 연구가 시도되었으며, 그 결과 유충섬모류의 수괴 지표성이 잘 입증되었다 (Lindley 1975; Kato and Taniguchi 1993; 김등, 2012).

그러나 본 조사수역에서 이그룹을 이용하여 복잡한 수괴의 특성 보다는 냉수대에 분포하는 냉수 지표종의 분포 특성 발견에는 다음과 같은 문제점을 갖고 있다. 현재 하계 시료에서 원생동물의 현존량이 매우 낮아서 섬모충류의 우점종을 설명하기는 매우 어려움이 따른다. 그러나 저층 (바닥부분)에는 피각에 particle들이 부착되어 있는 유종섬모충류가 우점하여 나타난다. 이와 같은 현상은 표층 혼합층과 명확하게 구분되는 현상이지만 이들의 저층에서 출현은 수온에 의한 영향 보다는 유종섬모충류의 특성상 퇴적물 particle 과 관련이 있는 것으로 사료된다. 따라서 원생동물 분야에서는 냉수괴 지표종을 찾는것 보다는 표층부근과 저층부근을 냉수괴의 유무를 기준으로 구분하여 먹이망 구조 분석을 유도하는 것이 좋을 것으로 사료된다 (Fig. 5). 즉, 식물플랑크톤의 생물량이 높은 표층 혼합층에서는 식물플랑크톤에 의해 원생동물로 연결되는 흐름이 용이 할것 같으며, 빛이 들어가지 않는 냉수괴가 형성되는 저층부근에서는 식물플랑크톤 보다는 박테리아에서 원생동물로 연결되는 흐름이 우선시 될것으로 판단된다.

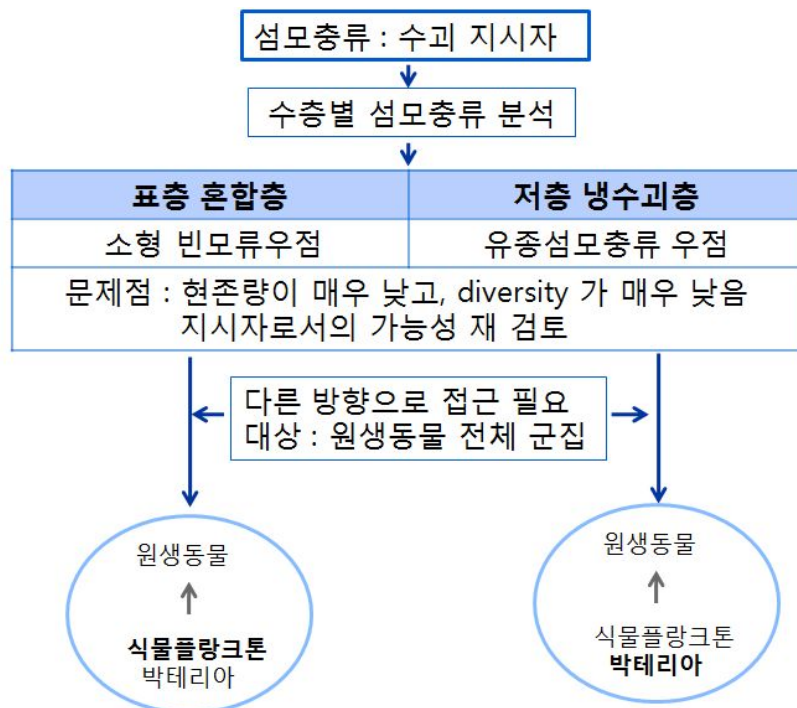


Fig. 3.3.1.5. Future study plan using the heterotrophic protozoa in YSBCW.

향후 이와 같은 연구를 수행하기 위해서는 첫째로 냉수괴의 형성을 계절별로 구분하기 보다는 냉수괴가 뚜렷하게 형성되는 하계시기에 냉수괴가 발달되어 있는

층과 냉수대가 없는 층을 구분하여 각 층에서 미세생물 군집들의 구조를 정확하게 파악하는 것이 급선무일 것이다. 미세생물 먹이망의 구조를 정확하게 파악한 후에, 그들 각 군집들의 생산력 및 섭식능력 등을 측정하여 냉수괴의 형성 유·무에 따른 에너지 흐름을 정확하게 파악하는 것이 앞으로 연구에 더 필요할 것으로 판단된다.

제 4 절 동물플랑크톤

1. 동물플랑크톤

가. 서론

황해는 반 폐쇄적 해역으로 수산 자원의 산란장 및 회유지로 잘 알려져 있으며, 세계 주요 어장의 하나로 세계 어획량의 약 5%를 차지하여 생산성이 높은 해역이다. 이러한 이유로 이들의 먹이 생물인 동물플랑크톤에 대한 연구는 가장 기본이 되는 동시에 필수적이라고 할 수 있다. 황해의 최근 동물플랑크톤 연구는 주요 우점종인 동시에 어류의 먹이원인 *C. sinicus*에 대한 조사가 초점이 맞추어져 있으며 (Pu et al., 2004a, b; Zhang et al., 2007), 이 중은 하계동안 황해 저층냉수괴 내에서 over-summering하는 것이 밝혀지면서 황해 저층냉수괴의 생태계 구조와 기능 및 가치에 대한 해석의 필요성이 대두되고 있다 (Wang et al., 2003; Pu et al., 2004b).

기존에 황해 냉수괴 조사에서는 황해 주요종인 *C. sinicus*의 주야 수직이동이 냉수괴 발달 전과 후에 어떻게 달라지는 지에 대한 조사가 주를 이루었다. 그러나 황해 저층 냉수괴의 생태계 구조를 이해하기 위해서는 우선적으로 동물플랑크톤의 군집 구조 및 각 종들의 분포특성을 파악해야 할 것이다. 또한 황해에 2011년 연안종으로 알려진 *A. hongii*의 분포가 외양까지 출현함에 따라 황해에 출현하는 동물플랑크톤의 공간적 수층별 분포특성에 대한 조사의 필요성이 대두되었다. 따라서 본 연구에서는 해 저층냉수괴 형성 전(춘계)과 후(하계)의 동물플랑크톤의 정점별, 수층별 분포특성을 통해 황해 동물플랑크톤의 군집 구조를 파악하고 황해의 저층냉수괴 내의 주요종인 *C. sinicus* 이외의 잠재적 주요종 탐색 연구를 실시하였다. 또한 2차년도 목표인 동물플랑크톤 주요종의 생물량, 기능파악 및 분포 특성 파악을 위한 기초 조사의 일환으로 *C. sinicus* 암컷의 gut pigment 조사를 통해 섭식특성 조사를 함께 실시하였다.

나. 재료 및 방법

(1) 동물플랑크톤 채집 방법

(가) 동물플랑크톤 군집 구조 분석을 위한 층별채집

황해 동물플랑크톤 조사를 위해 2012년 4월 17일부터 20일까지 춘계조사를, 8월 6일부터 10일까지 하계조사를 실시하였다. 동물플랑크톤 채집은 층별채집기

(Double-Trip mechanisms)를 사용하여 망목 200 μ m, 망구 60 cm인 open-closing 네트로 조사선이 정선한 상태에서 수직 예인하여 시료를 획득하였다. 채집 수심은 CTD profile과 해당 정점의 수심을 고려하여 2-5개 층으로 나누어 1회 채집하였다. 조사 시기별 채집 정점 및 조사 정보는 표 3. 4. 1. 1에 정리하여 나타내었다. 층계는 A-line, D-line, E-line 그리고 외곽 정점 등 총 14개 정점에서 조사가 수행되었으며, 하계는 A-line, D-line, 그리고 E-line 정점 등 총 12개 정점에서 채집이 이루어졌다.

네트 입구 중앙에 유량계(Hydro-Bios Kiel 438110: back-run stop)를 부착하여 여과된 해수의 양을 계산하였다. 채집된 동물플랑크톤을 1리터 폴리에틸렌 시료병에 옮겨 담은 후 중성포르말린으로 최종 농도가 약 5%가 되도록 고정시켜 보관하였다. 실험실에서 시료병 속의 동물플랑크톤 시료를 잘 섞은 후 스템펠 파이펫(Stempel pipette; 10 ml)으로 부표품(subsample) 8ml를 채취하여, 보고로브 계수판(Bogorov counting tray)에서 계수하였다. 요각류는 속 수준까지, 그 외 동물플랑크톤은 분류군별로 현미경(Zeiss Stemi 2000-C) 하에서 동정되었다. 계수된 시료는 최종적으로 ind./m³로 환산하였다.

Table. 3.4.1.1. Sampling stations and time of zooplankton in the Yellow Sea in spring and summer.

Date	Station	Depth (m)	Time	Sampling Depth (m)	Remarks
April 18-19, 2012	A03	83.7	17:41-18:00	0-10, 10-20, 20-40, 40-70	흐림(안개)
	A05	80	23:08-23:30	0-10, 10-20, 20-40, 40-70	흐림(안개)
	A06	85	01:44-02:08	0-10, 10-20, 20-40, 40-80	흐림(안개)
	A07	62	05:18-05:34	0-10, 10-20, 20-40, 40-60	흐림(안개)
April 19, 20 2012	D07	34	21:44-21:48	0-10, 10-20	흐림(안개)
	D06	74	23:50-00:06	0-10, 10-20, 20-40, 40-60	흐림(안개)
	D05	90	02:21-02:41	0-10, 10-20, 20-40, 40-60, 60-80	흐림(안개)
April 17, 2012	E07	54.1	10:03-10:21	0-10, 10-20, 20-40	맑음
	E05	77.5	13:00-13:21	0-10, 10-20, 20-40, 40-70	맑음
	E03	94.5	16:10-16:50	0-10, 10-20, 20-40, 40-60, 60-90	맑음
	E01	75	20:02-20:21	0-10, 10-20, 20-40, 40-70	맑음
April 18, 2012	D03-1	90	02:18-02:48	0-10, 10-20, 20-40, 40-60, 60-80	맑음
	D03-2	90	04:32-05:08	0-10, 10-20, 20-40, 40-60, 60-80	맑음
	D03-3	90	06:38-07:13	0-10, 10-20, 20-40, 40-60, 60-80	맑음
	D03-4	90	08:36-09:11	0-10, 10-20, 20-40, 40-60, 60-80	맑음
	B02	87.6	11:30-12:36	0-10, 10-20, 20-40, 40-60, 60-80	흐림(안개)
	C02	84	14:49-15:14	0-10, 10-20, 20-40, 40-60, 60-80	흐림(안개)
August 8, 2012	A03	85	06:30-07:29	0-10, 10-20, 20-40, 40-70	맑음
	A05	75	11:35-12:40	0-10, 10-20, 20-40, 40-70	맑음
	A06	68	15:00-16:00	0-10, 10-20, 20-40, 40-60	맑음
	A07	70	16:55-17:35	0-10, 10-20, 20-40, 40-60	맑음
August 7, 2012	D07	28	06:10-06:30	0-10, 10-20	맑음
	D06	71	09:20-10:27	0-10, 10-20, 20-40, 40-60	맑음
	D05	86.5	01:50-02:50	0-10, 10-20, 20-40, 40-60, 60-80	맑음
	D03	89	06:55-08:00	0-10, 10-20, 20-40, 40-60, 60-80	맑음
April 6-7, 2012	E07	52	00:14-00:37	0-10, 10-20, 20-40	맑음
	E05	736	20:12-20:35	0-10, 10-20, 20-40, 40-70	맑음
	E03	94.5	16:02-16:43	0-10, 10-20, 20-40, 40-60, 60-90	맑음
	E01	75	12:03-12:35	0-10, 10-20, 20-40, 40-70	맑음
August 9-10, 2012	D03-1	89	19:00-20:00	0-10, 10-20, 20-40, 40-60, 60-80	비
	D03-2	89	21:15-22:10	0-10, 10-20, 20-40, 40-60, 60-80	비
	D03-3	89	00:00-01:00	0-10, 10-20, 20-40, 40-60, 60-80	비
	D03-4	89	03:00-03:55	0-10, 10-20, 20-40, 40-60, 60-80	비
	D03-5	89	04:30-05:00	0-10, 10-20, 20-40, 40-60, 60-80	비
	D03-6	89	06:00-07:00	0-10, 10-20, 20-40, 40-60, 60-80	비

(나) D03에서 *C. sinicus* 주야수직이동 조사

황해 저층냉수괴의 *C. sinicus*의 수직 분포에 대한 장기모니터링 개념으로 춘계와 하계 모두 정점 D03에서 동물플랑크톤 주야수직이동을 위한 24시간 조사를 계획하였으나 현장 조사 시 현지 여건 및 기상 제약으로 인하여 춘계에서는 새벽 2시에 채집을 시작하여 대략 2시간 간격으로 일출까지 총 4회 채집하였고, 하계에서는 일몰 후 약 3시간 간격으로 일출 후 6시까지 총 6회 채집하였다. 동물플랑크톤 군집 구조와 마찬가지로 층별채집기(Double-Trip mechanisms)를 사용하여 망목 200 μ m, 망구 60 cm인 open-closing 네트로 조사선이 정선한 상태에서 수직 예인하여 시료를 획득하였다. 시료 분석은 군집 구조 분석을 위한 시료 분석과 동일하게 시료를 분석하였다.

(다) 요각류 *C. sinicus*의 시간별, 해역별 섭식특성

A03, A07, D03, D05, D07 등 총 5개 정점에서 음향 자료를 토대로 생물이 군집해 있는 수심 아래서부터 층별채집하여 *Calanus sinicus*의 암컷 성체만을 골라내어 gut pigment 분석을 위한 채집을 수행하였다. 채집된 동물플랑크톤 시료를 200 μ m 네트거즈로 거른 후 테프론 뚜껑의 유리병에 보관하여 드라이아이스로 급냉동하여 보관하였다. 냉동된 시료를 실험실로 옮긴 후, 시료를 자연 해동 후 *C. sinicus* 암컷 성체를 30개체씩 골라내어 아세톤 추출법을 이용하여 용출한 후 형광측정기(Tuner Designs 10-AU)로 분석하였다 (Fig. 3.4.1.1).

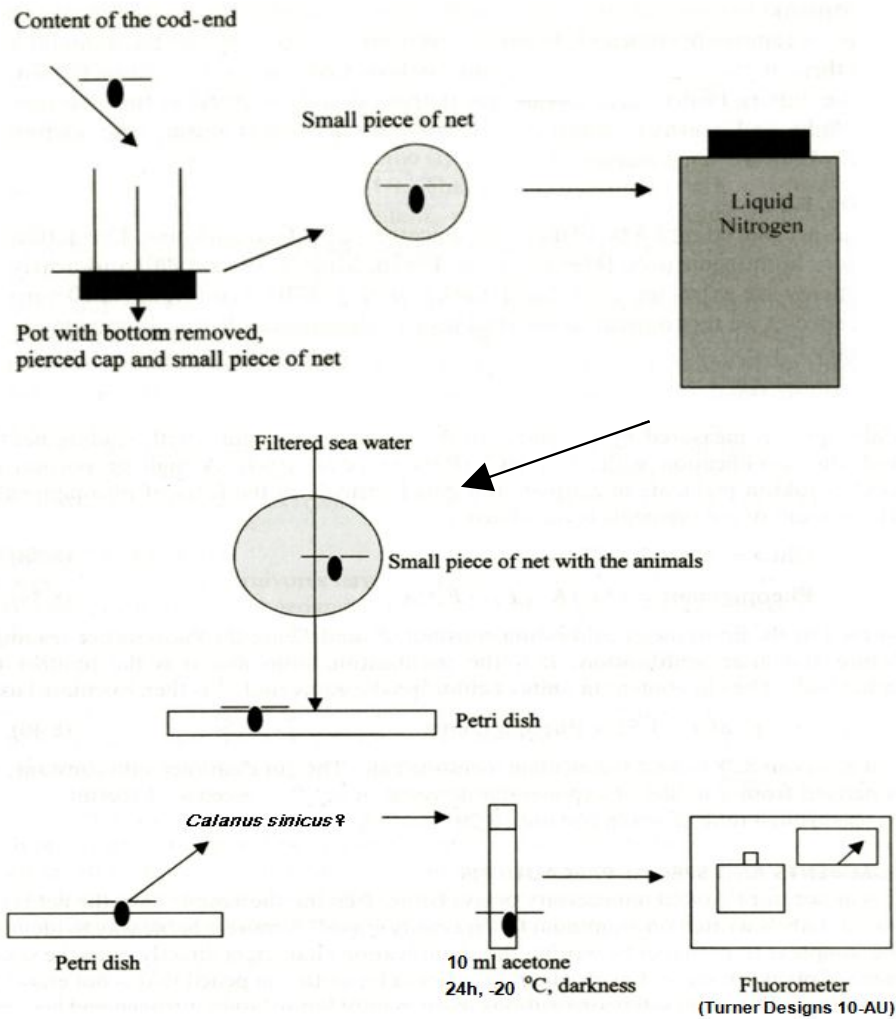


Fig. 3.4.1.1. Working principles for the gut fluorescence method (ICES zooplankton methodological manual, p.329, Fig. 8.5).

다. 결과 및 토의

(1) 동물플랑크톤 군집 구조

2012년 황해 동물플랑크톤 분석 결과, 야광충(*Noctiluca scintillans*), 히드로충류 (hydromedusae), 관해파리류(siphonophores), 빛해파리류(ctenophores), 요각류 (copepods), 지각류(cladocerans), 패충류(ostracods), 단각류(amphipods), 난바다 곤쟁이류(euphausiids), 십각류(decapods) 모악동물(chaletognaths), 유형류 (appendicularians), 탈리아류(thaliaceans) 그리고 기타 유생군 등이 출현하였다. 요각류는 15종 출현하였으며 이 중 *Paracalanus parvus s.l.*가 최우점종이었다. 그 밖의 우점종으로는 *C. sinicus*, *Oithona atlantica*, *O. similis*, *Paracalanus parvus s.l.*,

Corycaeus affinis 그리고 *Acartia* 속의 세 종(*A. hongii*, *A. omorii*, *A. hudsonica*)이었다. 모악류는 *Aidanosagitta crassa* (기존 *Sagitta crassa*)가 우점하였다. 이러한 군집 구조는 이전의 황해의 동물플랑크톤 조사와 유사하였다 (임 등 2003, 임 등 2009). 황해에 출현한 요각류의 출현 종 수는 남해와 동해에 비하여 매우 단순하였다 (박과 최, 1997; 박 등, 1998; Kim et al., 1996; Shim and Lee, 1986).

춘계의 정점별 동물플랑크톤 출현 개체수를 살펴보면, 가장 높은 출현 개체수는 정점 D03에서 40,226 inds./m³로 가장 높게 나타났으며 정점 E05에서 1,891 inds./m³로 가장 낮게 나타났다. 전체 동물플랑크톤 출현 개체수는 가장 남쪽에 있는 정점들이 위치한 E-line보다 북쪽에 위치한 정점들 (A-line)에서 5,240~14,574 inds./m³ 범위로 높게 나타났다. 동물플랑크톤 개체수에 많은 양을 차지하는 분류군은 정점별로 차이가 있으나, 난바다 곤쟁이류 (euphausiids)의 알이 116~15,757 inds./m³ 범위로 매우 높은 양으로 출현하였다. 다음으로 요각류가 우점하였다. 요각류 성체의 출현 개체수는 외곽에 위치한 정점들 A03, D03, E01에서 다른 정점들에 비해 높았고, 요각류 미성숙체의 경우는 A-line과 E-line에서는 가장 외곽정점과 가장 연안에 위치한 정점에서 출현 개체수가 높고, 중간에 위치한 정점에서 낮은 반면, D-line에서는 외곽 정점 D03에서 가장 높고 연안으로 갈수록 줄어들었다.

춘계에 동물플랑크톤 군집 구조는 정점이 외곽이나 연안이나, 북쪽이나 남쪽이나 등 위치에 따라 차이를 보였다. 먼저 A-line의 정점들의 군집구조를 살펴보면, 외곽에 있는 정점들 A03과 A05보다 연안에 있는 정점들 A06과 A07에서 동물플랑크톤 출현 개체수가 12,000 inds./m³ 이상으로 높게 나타났는데 이것은 이들 두 정점에서 극피동물 유생의 개체수가 외곽 정점에 비해 5,000 inds./m³ 개체수 이상으로 매우 높은 것에 기인한다. 극피동물 유생은 0-10 m 수층보다는 그 아래의 수층들에서 매우 높았다 (Fig. 3. 4. 1. 2). 난바다 곤쟁이류의 알은 A-line의 전 정점에서 높았으며 주로 10-40 m 수층에서 높았다. 요각류는 외곽정점(A03, A05)의 경우는 10-40m 수층에서 많은 양을 보인 반면, 연안 정점인 A06과 A07에서는 외곽정점 보다 0-10m 수층에 개체수가 높았다 (Fig. 3. 4. 1. 2). 모악류의 출현 개체수는 외곽정점에서 많고 연안으로 갈수록 줄어드는 경향을 보였지만 수층별 분포에서는 표층보다는 10 m 이하의 수층에 주로 분포하는 것을 확인할 수 있었다 (Fig. 3.4.1.2).

D-line에서 동물플랑크톤 군집 구조의 눈에 띄는 점은 연안 정점인 D07에서 크기가 작은 해파리의 대량 출현이었다. 이들의 출현 개체수는 정점 D07에서 2,015

inds./m³ 로 매우 높았으며 정점 D06에서 7 inds./m³ 로 매우 낮은 양이 출현하였지만 이 지역까지 퍼져있는 것을 확인할 수 있었다. 이들의 출현에 대해 명확한 답을 할 수는 없지만, 채집 정점의 주변에 섬들이 많고, 수심이 낮은 지역으로 해파리 서식지로 적합하여 해파리 부착기를 거쳐 성장하면서 떨어져 나와 해파리가 대량으로 발생한 것으로 보인다. A-line과 마찬가지로 다른 정점들에서는 난바다 곤쟁이류의 알이 차지하는 비율이 매우 높았다. 특히 정점 D03과 정점 D05에서는 요각류보다 높은 출현 개체수를 보였다. 이들의 분포는 정점 D03과 정점 D05에서 0-20 m 수층 사이에 많은 양이 분포한 반면, 정점 D06은 20m 이하에서 주로 분포하였다. 요각류의 수층 분포는 정점 D05에서는 전체적으로 고른 분포를 보인 반면, 연안에 가까운 정점 D03은 표층에서 가장 높은 개체수를 보였고, 정점 D06은 10-40m 사이에, 수심이 낮은 정점 D07은 두 수층에서 비슷한 수준으로 나타났다. D-line의 정점들은 A-line 정점들보다 요각류 미성숙체(copepodite)와 노플리우스(nauplius)를 포함한 요각류 유생의 개체수가 높게 나타나는 특징을 보였다 (Fig. 3.4.1.2).

E-line 정점들은 춘계의 수온 및 염분의 분포를 통해 고염수가 나타나 이들 정점에 난류수가 유입된 것이 확인되었다. 이 난류수의 유입으로 인해 A-line과 D-line의 정점들에서는 출현하지 않은 유형류가 E-line 정점들에서는 출현하였다. 전체 동물플랑크톤 출현 개체수는 외곽에 위치한 정점에서 높고, 연안에 가까운 정점들에서 낮은 경향을 보였다(Fig. 3.4.1.2). 정점 E01과 E03은 난바다 곤쟁이류의 알이 전 수층을 합쳐 각각 6,072 inds./m³와 2,584 inds./m³로 연안에 가까운 정점 E05 (155 inds./m³)와 E07(336 inds./m³)에 비하여 최소 7배 이상으로 높았다. 이들의 분포는 정점 E01에서는 10-20 m 수층에서 4,780 inds./m³로 가장 높고, 정점 E03에는 20-40 m 수층에서 1,005 inds./m³로 가장 높았다(Fig. 3.4.1.2). E-line에서는 *Acartia hongii*의 개체수가 다른 정점들에 비해 높았는데, 특히 D07과 함께 연안에 가까운 정점 E07에서 개체수가 높게 나타났다.

조사 정점 들 중 황해 중심부에 가까이 위치한 정점B02와 C02의 동물플랑크톤 군집은 비슷하게 나타났으며 남쪽에 있는 정점 C02보다 북쪽에 있는 정점 B02에서 개체수가 높게 나타났다.

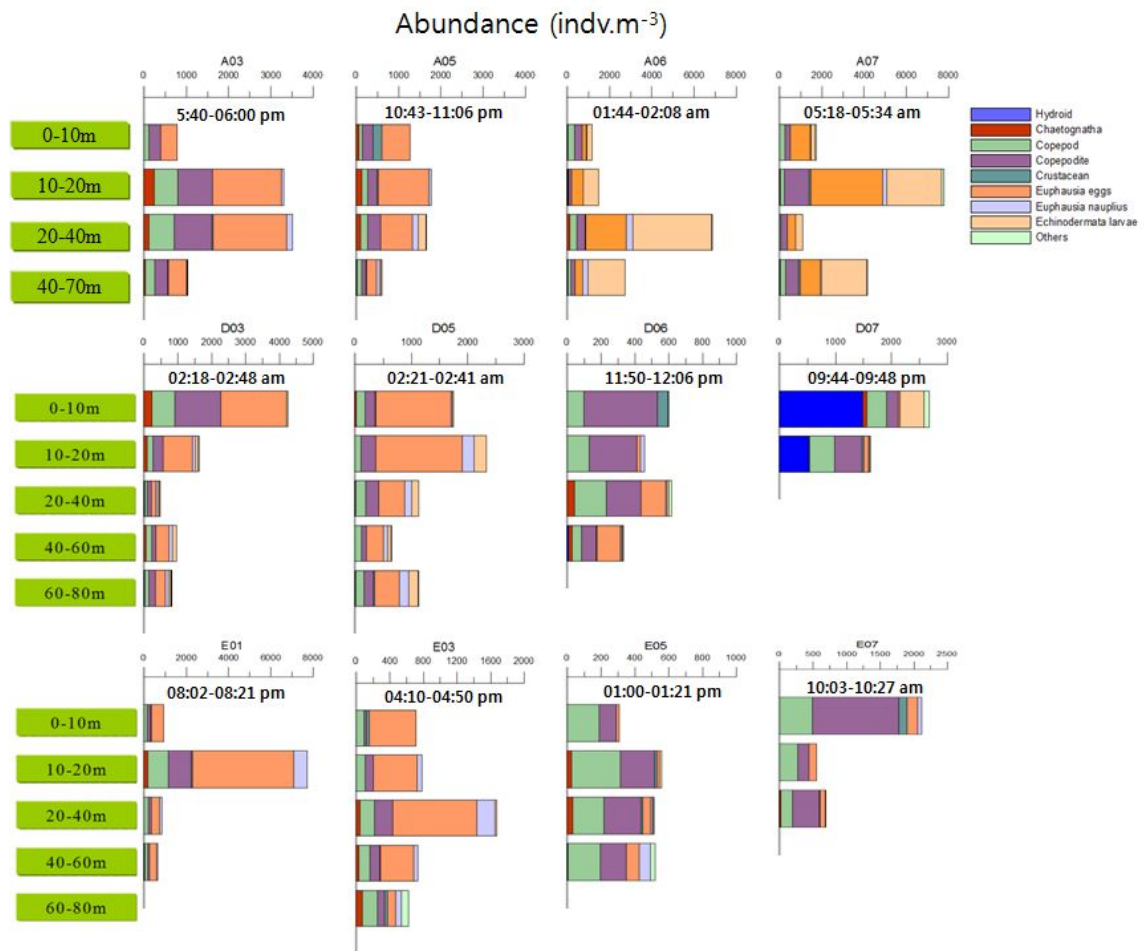


Fig. 3.4.1.2. The regional patterns in vertical distribution of taxon in Zooplankton in the Yellow sea in spring.

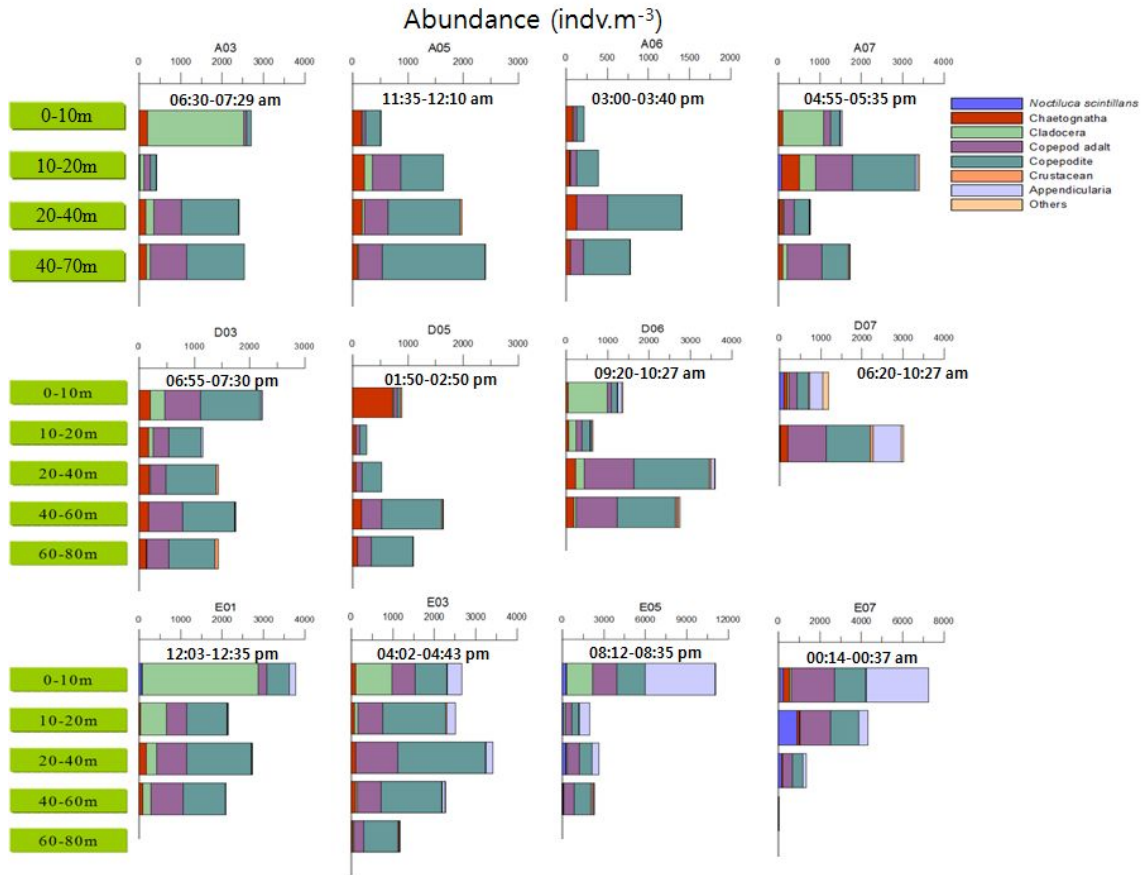


Fig. 3. 4. 1. 3. The regional patterns in vertical distribution of taxon in Zooplankton in the Yellow sea in summer.

하계의 동물플랑크톤 주요 출현 종은 춘계와 거의 유사하였으나 춘계에는 출현하지 않은 지각류 (*Evadne tergestina*, *Penilia avirostris*)가 많은 양이 출현하여 황해 동물플랑크톤 군집의 계절변화를 보여주었다(Fig. 3.4.1.3.). 모악류를 *Aidanosagitta crassa* 이외의 종이 출현하였고, 사이즈가 작아서 동정이 어려운 개체들을 *Sagitta* 유생(larvae)로 분류하여 개체수를 헤아렸는데 이들이 차지하는 개체수도 전 수층을 합쳐 최소 67 (정점 E01) inds./m³에서 최대 972 (정점 D05) inds./m³ 범위로 상당히 높았다. 춘계보다 하계에 동물플랑크톤의 정점별 군집 구조가 차이가 두드러지는 것을 확인할 수 있었다. 조사된 해역의 세 line (A-, D-, E-line)의 정점들 중 연안에 있는 정점들에서만 야광충, 관해파리류가 출현하였다. 또한 유형류의 출현 개체수도 외양보다 연안 정점에서 매우 높은 출현량을 보였다.

하계의 정점별 동물플랑크톤 총 출현 개체수는 E-line 정점 E03에서 18,013 inds./m³로 가장 높았고, 가장 적은 개체수는 정점 A06에서 2,799 inds./m³로 나타났

다 (Fig. 3.4.1.3). 하계는 춘계와 달리, E-line의 정점들이 북쪽에 위치한 정점들에 비하여 개체수가 높게 나타났다. 이는 지각류, 유형류 및 요각류인 *Paracalanus parvus* sl.의 높은 개체수에 의한 것이다. 춘계에는 개체수가 높았던 난바다곤쟁이 알이 하계에는 매우 적은 양이 나타나 황해의 난바다 곤쟁이의 생산이 주로 춘계에 활발하게 이루어짐을 미루어 짐작할 수 있었다.

A-line 정점들의 동물플랑크톤 출현 개체수는 정점 A06에서 3,000 inds./m³ 이하로 낮게 나타난 것을 제외하고 나머지 정점에서는 6,500 inds./m³ 이상으로 높은 출현량을 보였다. 동물플랑크톤 개체수는 주로 요각류 성체와 요각류 노플리우스 유생을 포함한 미성숙체가 대부분을 차지하였다 (Fig. 3.4.1.3). 그러나 각 정점의 수층별 군집 구조를 살펴본 결과 일부 정점에서는 요각류 이외의 분류군 개체수 비율이 높게 나타났는데, 정점 A03의 0-10 m 수층에서 지각류의 점유율이 86% 이상으로 가장 높은 점유율을 보였고, 정점 A07의 0-10 m 수층에서도 지각류의 점유율이 65% 이상으로 높게 나타났다 (Fig. 3.4.1.3).

D-line의 동물플랑크톤 전체 출현 개체수는 4,206 ~ 8,350 inds./m³ 범위였다. 각 정점별로 채집 수층에서 동물플랑크톤 분류군 중 요각류가 가장 높은 점유율을 차지하였다 (Fig. 3.4.1.3). 그러나 정점 D05의 0-10 m 수층의 경우 성체보다 크기가 작은 모악류의 개체수가 720 inds./m³ 로 전체 동물플랑크톤 출현 개체수의 81%를 차지하였고, 정점 D06의 0-10m 수층에서는 지각류의 비율이 69% 이상으로 나타났다. 가장 연안에 가까운 정점 D07의 경우 채집한 두 수층에서 각각 313 inds./m³, 688 inds./m³ 로 출현하여 D-line의 다른 정점에 비해 유형류가 높은 비율로 나타났다. 또한 정점 D07은 야광충도 출현하여 D-line의 다른 정점들과 다른 군집 구조를 보였다.

E-line의 정점 E05와 E07에서 조사해역의 다른 정점들에 비해 유형류의 점유율이 30% 전후로 높은 것을 확인할 수 있었으며 수층별로는 특히 표층 (0-10 m)에서 점유율이 가장 높았다 (Fig. 3.4.1.3). 이는 남쪽지역으로부터 유입되는 난류수의 영향에 의한 것으로 여겨진다. 정점 E01은 정점 A03과 마찬가지로 표층 0-10 m 수층에서 지각류의 점유율이 74% 이상으로 높았고 연안으로 갈수록 전체 동물플랑크톤에 대한 개체수 점유율이 감소하였다.

(2) 정점 D03에서 *C. sinicus* 주야수직이동

황해저층냉수괴의 *C. sinicus*의 수직 분포에 대한 장기모니터링 개념으로 25h 채집을 계획하여 춘계와 하계 모두 D03 정점에서 3시간 간격으로 채집하였다. 그러나 조사 일정 및 기상의 제약으로 인하여 춘계와 하계 주야수직이동을 위한 조사를 축소하여 채집을 실시하였다. 채집 시간별로 출현 동물플랑크톤의 종 조성 및 개체수 비율이 변화되어 정량적인 비교는 어렵지만 주야수직 이동하는 *C. sinicus* 종의 수층별 변화패턴을 살펴보고자 한다. 춘계에서는 표층에 올라와 머무르는 시간대인 새벽 2시부터 대략 2시간 간격으로 해가 뜬 후까지 총 4회의 조사를 실시하였다.

춘계의 조사 시간대별 *C. sinicus*의 발달 단계별(1기: *Calanus* I; 2기: *Calanus* II; 3기: *Calanus* III; 4기: *Calanus* IV; 5기: *Calanus* V)로 개체수를 분석하였다. *C. sinicus*의 미성숙체 1기부터 5기까지는 뚜렷한 주야 수직 이동성을 보이지 않았다. 일부 조사 시기를 제외하고는 표층보다는 10 m 이하의 수층에 머물러 있는 것을 확인할 수 있었다. 엽록소 농도는 새벽 4시 30분쯤 4기와 5기가 표층에 머물렀으나 이후 시간에는 아래 수층에 머물러 있었다. 미성숙체와 달리, *C. sinicus* 암컷 성체의 경우 확인한 주야 수직이동을 확인할 수 있었다. 첫 조사가 이루어진 2시 18분경에는 표층에 개체수가 높았으나 일출 시간에 가까워질수록 표층에서 아래 수층으로 이동하는 것을 확인할 수 있었다 (Fig. 3. 4. 1. 4). 수컷의 경우는 개체수가 거의 나타나지 않아 본 조사에서는 주야 수직 이동의 경향성을 확인할 수는 없다.

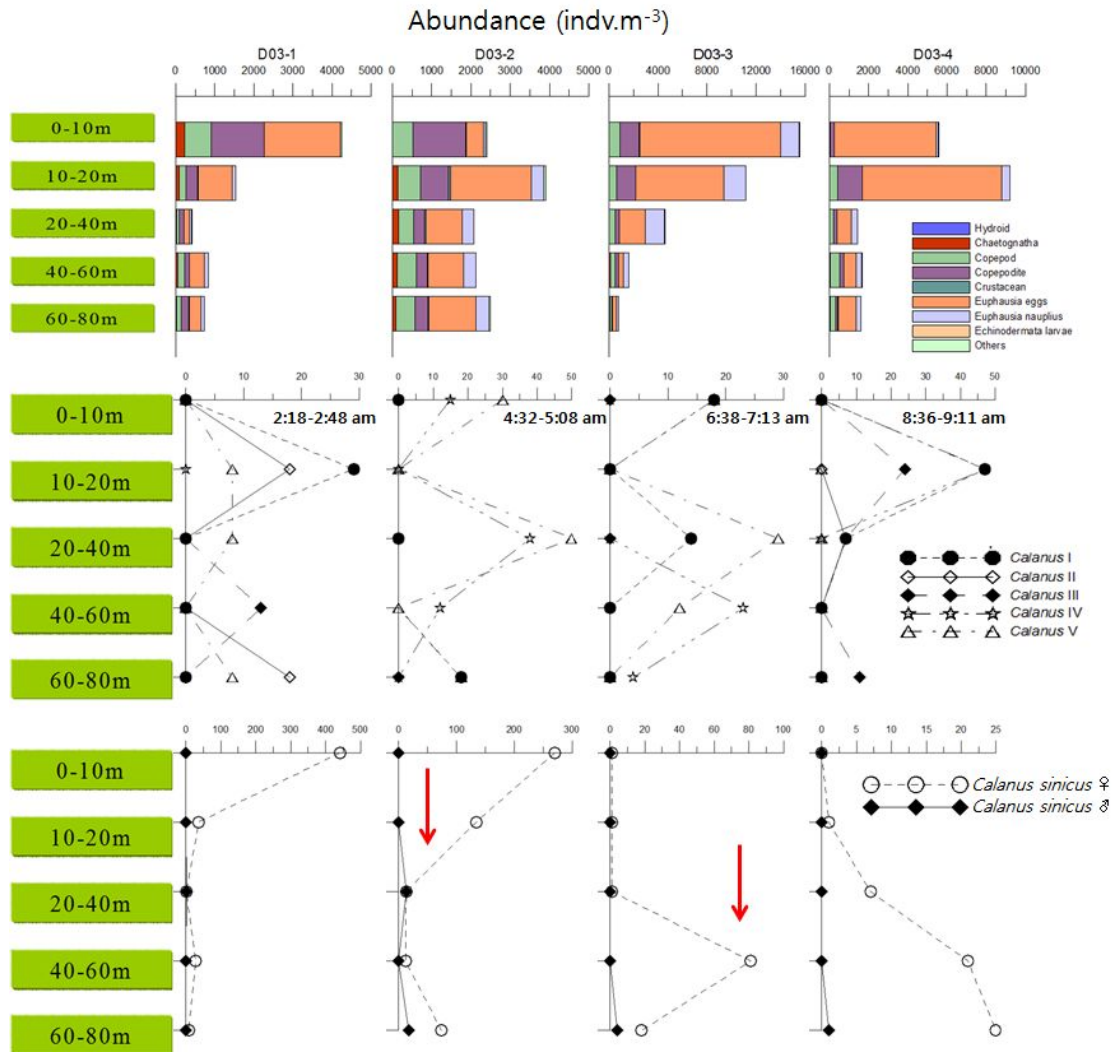


Fig. 3.4.1.4. The variation in the vertical distribution of taxon in zooplankton and *C. sinicus* according to the developmental stage in the Yellow Sea in Spring.

하계는 일몰 직후(저녁 7시)부터 일출한 이후(아침 6시)까지 총 6회의 조사를 실시하였다. 하계에 정점 D03에서 주야수직이동을 위한 조사에서는 1기와 2기의 미성숙체는 출현하지 않았다. 조사 시기에 따라 4기와 5기가 표층에 출현을 하기도 하였으나 대부분 10 m 이하 수층에 머물러 있으며, 주로 20-80 m 사이의 수층에 머물렀다 (Fig. 3. 4. 1. 5). 성체 암컷의 경우 미성숙체와 유사하게 표층에 출현하지 않거나 출현하여도 개체수가 매우 적었다. 대부분의 개체들은 일몰 후 저층에 있는 개체들이 위쪽으로 올라오는 양상이 보이며 표층까지는 상승하지 않고 10-20 m 수층까지 올라왔다 다시 아래 수층으로 내려가는 양상을 보였다 (Fig. 3. 4. 1. 5). 성체의 경우는 춘계와 마찬가지로 경향성을 확인할 정도의 충분한 개체수가 출현하지 않아 주야수직이동 여

부를 판단하기는 어려울 것으로 보인다.

주야 수직 이동 연구를 위한 짧은 시간이었지만 춘계에는 기존의 결과와 마찬가지로 *C. sinicus* 성체 암컷은 야간에 표층으로 이동하고 주간에는 저층으로 이동하는 양상을 보였으며, 하계는 봄철과 달리 표층까지 상승하지 않고 10-20 m 수층까지만 상승하는 것을 확인할 수 있었다. 그러나 춘계의 암컷 성체의 확실한 주야 수직 이동에 관한 결과는 일부 정점에서는 상이하게 나타났다. 정점별 채집시간을 고려하여 살펴본 결과, 춘계에 정점 A06의 경우 새벽에 채집되어 다른 수층보다 표층에 보다 많은 개체들이 있어야 됨에도 불구하고 *C. sinicus* 종들이 20-40 m 수층에 모여 있는 것이 확인되었다. *C. sinicus*의 주야수직이동이 다른 영향의 작용으로 인해 상이하게 나타난 것인지에 대해 추가적인 조사가 필요할 것으로 보인다.

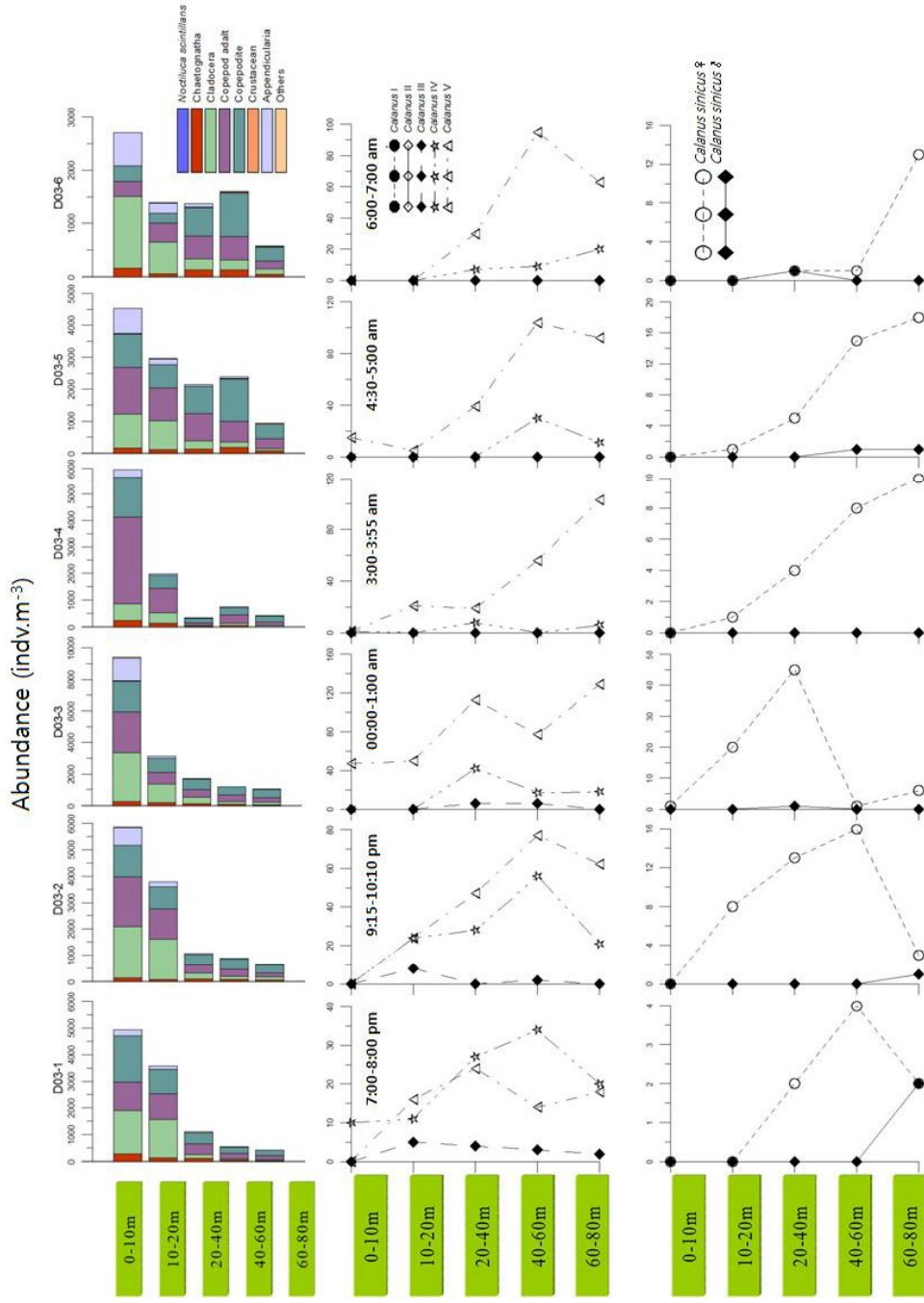


Fig. 3.4.1.5. The variation in the vertical distribution of taxon in zooplankton and *C. sinicus* according to the developmental stage in the Yellow Sea in summer.

(3) 요각류 *C. sinicus* 암컷의 시간별, 해역별 섭식특성

*C. sinicus*의 주야수직이동에 따른 섭식률의 차이를 보기 위해 5개의 정점에서 동물플랑크톤을 채집하여 *C. sinicus* 암컷만을 선별하여 gut pigment 분석을 실시하였다. 채집 시간은 해가 질 때(A03)와 해가 뜨는 시점(A07)에서 채집된 정점이 있고 나머지는 밤 시간에 이루어졌다. 해가 질 때 상층으로 향하는 시점에 채집이 이루어진 정점 A03에서 *C. sinicus*의 gut pigment 값이 낮고 해뜨는 시기(정점 A07)에 채집된 *C. sinicus*의 gut pigment 값이 높았다. 정점 A07의 엽록소 농도는 정점 A03보다 낮으나 *C. sinicus*의 gut pigment 값이 높게 나타난 것으로 미루어 *C. sinicus*가 야간에 표층에 머물면서 섭식이 활발하게 이루어지는 것으로 생각된다. 그러나 밤에 채집된 정점들 중 정점 D03과 D07은 채집 시간대가 다르나 gut pigment 농도 값이 A03보다 높게 나타난 반면, 정점 D05에서는 조사 정점 중 가장 낮은 gut pigment 농도 값을 보이고 있다. 채집 시간이 새벽 3시로 야간에 표층으로 상승하여 활발한 섭식활동을 할 것으로 예상되며, 이 정점의 수심 10 m에서 엽록소 a 농도값이 조사 기간 중 최대값이 나타났으나 gut pigment 농도값은 가장 낮았다. 이 결과로 이 정점 D05에서 *C. sinicus* 섭식 활동에 다른 영향이 있었을 것으로 예상된다.

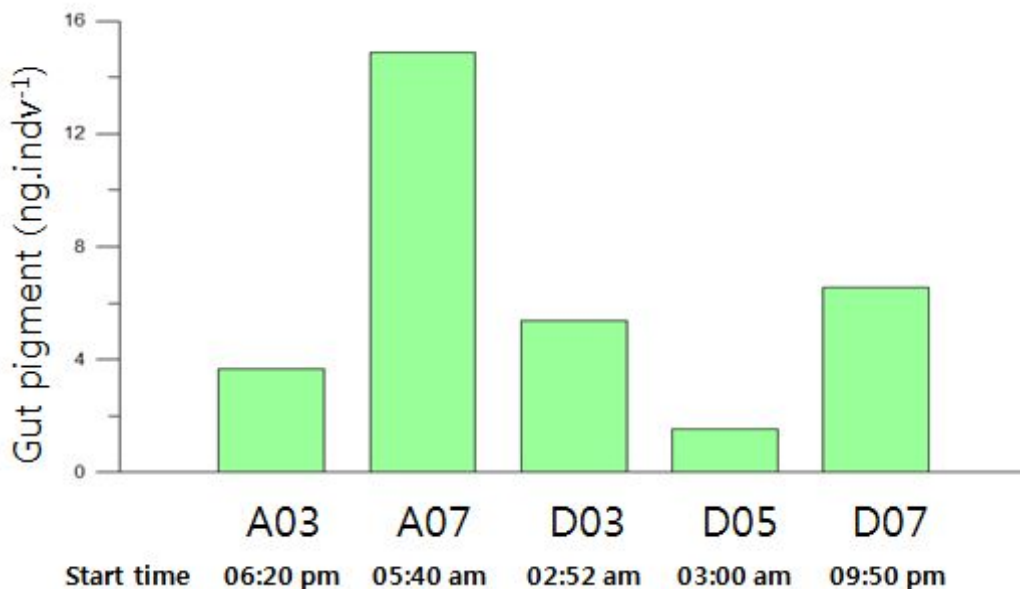


Fig. 3.4.1.6. Gut pigment contents of *C. sinicus* in spring.

수층별 *C. sinicus*의 gut pigment 농도를 보기 위하여 수층을 나누어 채집하였으며 정점 A05와 A06은 야간에 채집하였고 이에 대한 대조군으로 정오에 정점 B03은 정오에 채집하였다. 정오에 채집된 개체들의 gut pigment 농도는 야간에 채집된 개체들보다 낮았다. Durbin et al.(1995)의 연구에서 *Calanus finmarchicus*의 4기와 5기를 대상으로 시간에 따라 gut pigment 값을 측정하였는데 야간에 채집된 개체들이 정오에 채집된 개체들보다 gut pigment의 농도가 높았다. 비록 동일 종은 아니지만 Eurbin et al.의 결과와 본 연구 결과를 통해 주야 수직을 하는 *Calanus* 종의 섭식이 야간에 활발하게 이루어진다는 것을 확인할 수 있었다.

그러나 야간에 수층별로 채집된 개체들의 gut pigment 농도값은 표층에 높을 것으로 예상하였으나, 야간에 수층별로 채집한 A05와 A06 모두, 상층보다는 저층에 있는 개체들의 gut pigment 농도가 높게 나타났다. 뿐만 아니라, 암컷 성체의 개체수 분포도 표층보다는 아래 수층에 높았다. 이러한 결과로 저층에서 수층별 gut pigment 농도가 높게 나타난 이유가 섭식을 완료한 개체들이 저층으로 내려가 머무는 것인지 아니면 다른 이유가 있는지에 대한 주야수직이동과 섭식과의 관련성에 대한 보완조가 필요할 것으로 보인다.

본 연구에서의 gut pigment 측정 시에 색소가 파괴되는 것은 고려치 않았으며, 아세톤 추출법을 사용하여 측정하였다. 색소를 용출하는 용액으로 90% 아세톤을 일반적으로 많이 사용하지만, 다음 번 조사에서는 용출 용액을 N, N-Dimethylformamide (DMF) 용액 사용이 권장된다. 이 용액은 용출력이 뛰어날 뿐만 아니라 색소 추출시에 색소의 부패를 최소화하기 때문에 좀 더 정확한 용출값을 얻을 것으로 생각된다 (Takatsuji et al., 1997).

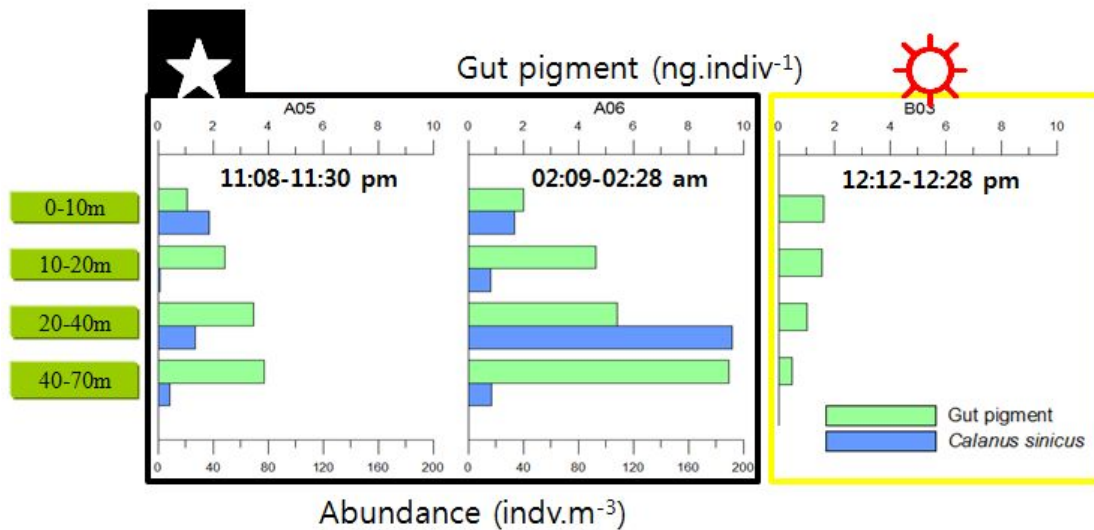


Fig. 3.4.1.7. The vertical variation in gut pigment contents of *C. sinicus* in spring.

(4) 황해 동물플랑크톤 잠재적 주요종 탐색

황해의 저층냉수괴 내의 주요종인 *C. sinicus* 이외의 잠재적 주요종을 탐색을 위해 지난 2011년의 A-line과 E-line 조사를 통해 얻은 결과와 2012년 조사를 통해 얻어진 결과를 통해 동물플랑크톤 분포 특성을 살펴보았다. 황해의 동물플랑크톤 종 조성은 다른 해역에 비해 매우 단순하다. 전반적으로 출현 동물플랑크톤 중 요각류 우점종 대부분은 냉수괴 발달 전과 후에 상관없이 전 수층에서 출현하였다. 황해에 출현하는 동물플랑크톤 중 개체수 면에서 *Paracalanus parvus* s.l.가 우세하였다. 그러나 조사 해역 전반에 분포할 뿐만 아니라 분포 수층은 0-20 m에서 높은 밀도를 보였다. *Acartia* 종들은 외양보다는 연안쪽에 밀도가 높으며 조사 시기에 따라 편차가 크게 나타나 주요종으로 선택하여 조사하기에는 적합하지 않을 것으로 생각되었다. *Oithona similis*와 *O. atlantica*는 조사 정점마다 차이가 있지만, *C. sinicus* 보다 개체수가 높게 나타났다. 그 중 *O. similis*는 *P. parvus* s.l. 와 같이 전체적으로 우점하고, 0-20 m 또는 20-40 m 사이에 밀도가 높게 출현하였다. 그러나 냉수층으로 잘 알려진 *O. atlantica*의 출현 양상은 표층에도 출현을 하지만 전체적으로 수온이 낮은 저층에서 출현하고 *O. similis* 보다 대체적으로 수심이 깊은 곳, 주로 20 m이하에 우점하였다 (Fig. 3. 4. 1. 8). 이들 분포 결과는 조사 해역은 다르지만 *Oithona* 이 두 종의 분포가 *O. atlantica*는 20m 이하에, *O. similis*는 10-30 m 사이에 분포한다는 연구 결과와 비

숫하였다 (Takahashi & Uchiyama, 2007). 또한 국내의 황해 동물플랑크톤 분포 특성에 대한 논문에서 황해 우점종으로 *O. atlantica*가 포함되었으며 이 종이 황해 중심부에 높은 밀도로 나타난다고 하였다 (임 등, 2009). 이러한 분포뿐만 아니라, 저층냉수괴가 형성된 하계의 경우는 저층의 출현 개체수는 춘계보다 월등히 높게 나타났다. 이러한 연구 결과를 통해서 *O. atlantica*가 다른 종들 보다 *C. sinicus*와 함께 저층냉수괴 내 생태계 내에서의 역할이 고려되어야 할 잠재적 종으로서의 가능성이 높다고 할 수 있을 것이다. 또한, *Oithona*의 먹이원으로 flagellate를 이용한다는 연구 결과가 있고, 어류의 치어(특히 멸치의 치어)시기에는 *Oithona* 유생의 작은 크기로 인하여 주요 먹이원의 하나로 알려져 있기 때문에 향후 황해 생태계 내에서 에너지 흐름 연구에도 중요한 역할을 할 것으로 여겨진다.

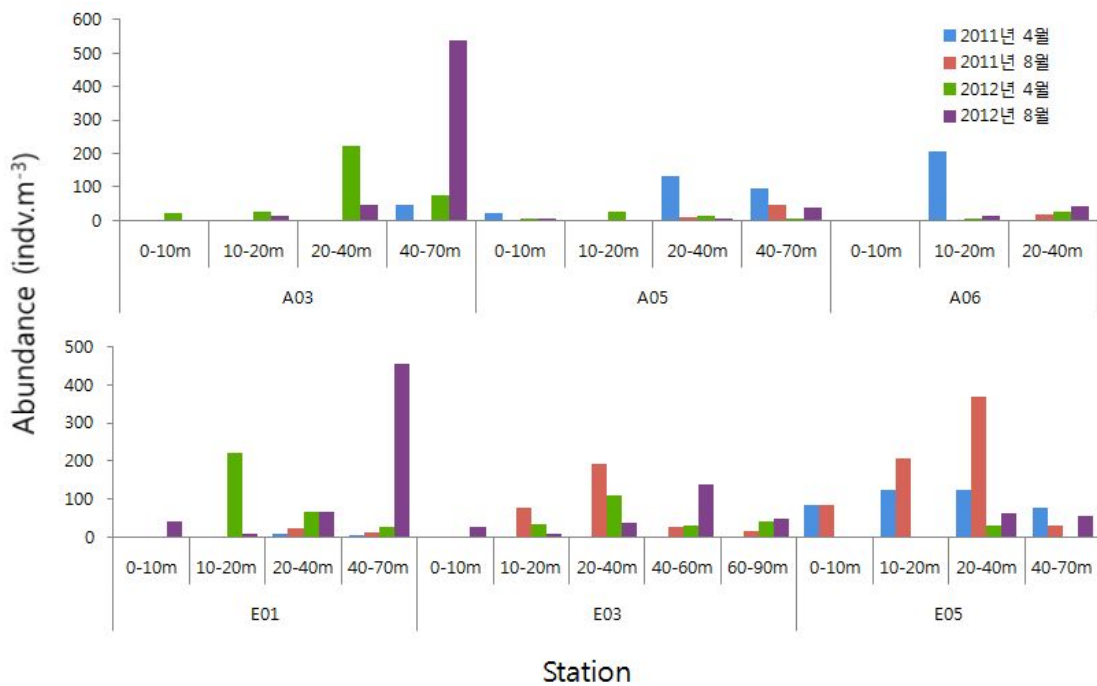


Fig. 3.4.1.8. The variation in the vertical distribution of *Oithona atlantica* in the Yellow Sea in April and August 2011, and April and August 2012.

제5절 크릴 및 먹이관계

1. 크릴 및 먹이관계

가. 서론

황해는 세계 어획량의 약 5%(연간 3백 만톤)를 차지할 정도로 생산성이 매우 높을 뿐만 아니라, 반 폐쇄성 해역으로 인간 활동(매립, 오염, 남획, 양식 등)에 의해 크게 영향을 받고 있다(FAO 2009). 최근에는 한반도의 국지적인 기상변화에도 큰 영향을 미치고 있는 것으로 여겨지고 있다. 황해의 수괴는 크게 표층 혼합수, 연안수, 그리고 저층 냉수괴로 대표된다. 그 중 저층냉수괴는 여름철 수심 30-40m 아래에 있는 수온 10°C 이하의 거대한 해수 덩어리로서, 봄부터 복사열에 의해 표층수온이 급속히 상승함에 따라 표층과 저층간의 온도차가 커지면서 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 저층냉수괴는 소멸하는 것으로 알려져 있다. 냉수괴의 분포와 거동은 황해의 기후변화와 지형 특성의 직접적인 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 *Euphausia pacifica*는 수온이 매우 높고 먹이가 부족한 하계기간 동안 생존을 위해 황해 저층 냉수를 피난처로 활용하는 것으로 최근 보고되었다(Wang et al. 2003; Pu et al. 2004). 하지만 아직까지 저층냉수괴의 기본적인 특성이나 분포 그리고 생태학적인 역할에 대한 체계적인 연구가 부족한 실정이다. 특히, 본 연구의 target species인 난바다 곤쟁이류, 일명 크릴은 세계 해양에 넓게 분포하며, 현재 2과 11속 86종이 보고되고 있다(Baker et al. 1990). 동물플랑크톤 군집의 주요 구성군 중 하나인 크릴은 어류, 고래, 조류 등의 주요 먹이생물로서, 기초생산자(식물플랑크톤)와 상위포식자간을 연결하는 매개체로 중요한 역할을 담당하고 있다(Mauchline and Fisher 1969; Mauchline 1980). 특히 난바다 곤쟁이류 중, *Euphausia pacifica*는 베링해, 오호츠크해와 일본 북동연안을 포함하는 북태평양의 넓은 해역에 걸쳐 서식하며 높은 생체량을 가지고 있다(Brinton et al. 2000). 이러한 *E. pacifica*의 중요성으로 인해, 세계의 여러 해역에서 이들의 생활사 패턴과 생체량에 관한 연구가 수행되어 왔다(Kim et al. 2009; Taki 2004; Iguchi et al. 1993; Smiles and Percy 1971; Brinton 1976; Feinberg and Peterson 2003). 그러나 이들의 생리 및 생활사는 지역에 따라 차이를 보이고 있다(Table 3.5.1.1 참조).

Table 3.5.1.1. Regional comparison of spawning season and life span of the euphausiid *E. pacifica*.

Species	Location	Spawning season	Life span (month)	References
<i>E. pacifica</i>	Oyashio region	Apr.–May, Aug.–Sep.	17–26	Kim et al. (2009)
	off northeastern Japan	Apr.–May, Aug.–Oct.	24–28	Taki (2004)
	Toyama Bay (Japan Sea)	Feb.–Apr.	< 21	Iguchi et al. (1993)
	off Oregon	All season	12	Smiles and Percy (1971)
	off southern California	All season	8–12	Brinton (1976)

한국 근해에서도 *E. pacifica*는 서로 다른 환경/지리학적 조건을 갖는 동-서-남해에 걸쳐 넓게 분포하며(Hong 1969), 특히 황해와 동중국해 생태계에서 높은 생체량을 가지며 중요한 위치를 차지하고 있다(Kang et al. 2003). 그럼에도 불구하고, 한국 근해의 *E. pacifica*에 관한 연구는 종 구성과 분포 정도에만 극히 제한되어 있다(Hong 1969; Suh 1990; Lee et al. 1998). 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 파악하기에는 미흡하였다. Suh et al. (1993)은 1989년 6월과 8월에 황해에서 채집된 *E. pacifica*의 유생으로부터 그들의 발달을 묘사한 바 있다(Table 3.5.1.2).

Table 3.5.1.2. *Euphausia pacifica*. Diameter of eggs and total length of larvae in the Yellow Sea. SD: standard deviation, n: no. of specimens measured.

	Range (mm)	Mean (mm)	SD (mm)	n
Egg capsule	0.50–0.68	0.58	0.03	326
Egg embryo	0.30–0.38	0.34	0.01	326
Nauplius I	0.35–0.45	0.38	0.03	13
Nauplius II	0.50–0.53	0.52	0.01	7
Metanauplius	0.45–0.70	0.58	0.05	239
Calyptopis I	0.80–1.05	0.93	0.03	329
Calyptopis II	1.20–1.60	1.39	0.07	266
Calyptopis III	1.58–2.20	1.92	0.11	187
Furcilia I	1.86–2.70	2.26	0.21	143
Furcilia II	2.40–3.87	3.02	0.27	335
Furcilia III	2.76–4.60	3.59	0.30	182
Furcilia IV	3.20–5.60	4.11	0.41	541
Furcilia V	3.53–5.73	4.58	0.44	445
Furcilia VI	3.93–7.20	5.36	0.57	847

그러나 그 이후, 황해에서 *E. pacifica*에 관한 연구는 지금까지 거의 보고된 바가 없다. 최근 크릴이 미래의 식량자원으로써 새롭게 각광을 받으면서 그 중요성이 다시 대두되어, 중국 연구자들에 의해 황해 생태계에서 *E. pacifica*의 산란이 식물플랑크톤 대발생이 일어나는 봄철에만 집중된다는 것을 보고하였다(Fig. 3.5.1.1).

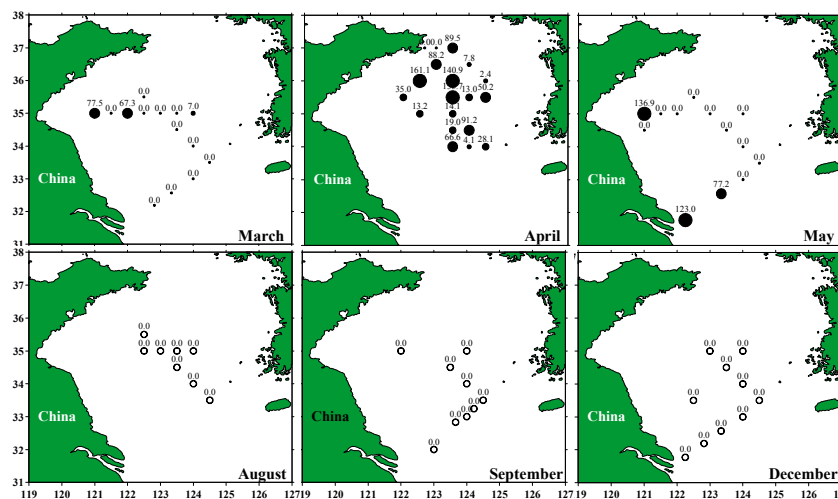


Fig. 3.5.1.1. Spatial distribution of the number of *Euphausia pacifica* egg in the Yellow Sea from March to December in the Yellow Sea (Sun 2008).

최근에는 크릴의 지방 구성성분 분석을 통해, 크릴의 생식(Clark 1984; Pond et al. 1995; Virtue et al. 1996)과 에너지 저장 역학(Bottino 1974; Quetin and Ross 1991; Hagen et al. 1996; Falk-Petersen et al. 1999) 등을 이해하려는 많은 연구가 진행되고 있다. 지방은 모든 생물체의 필수적인 생화학적 구성요소로서, 동물플랑크톤이 저장한 지방은 먹이공급이 낮은 시기에 에너지로 이용되며, 포식, 생식, 수직 이동 등에 필요한 에너지를 공급해준다. 또한, 지방은 다른 영양소(단백질과 탄수화물)는 약 17~18 kJ/g)에 비하여 높은 에너지 효율(약 39 kJ/g)을 가지며, 세포막, 호르몬 조절자, 항산화제, 부력조절자로서 중요한 역할을 하는 것으로 알려져 있다(Lee et al. 2006). 뿐만 아니라, 지방을 구성하는 지방산이나 스테롤 중에서 필수 영양 성분들(다 불포화 지방산 등)은 먹이를 통해서만 획득될 수 있기 때문에 생태계 내에서의 먹이 관계를 이해하는 먹이 추적자로도 많이 활용되고 있다(Bottino 1974; Virtue et al. 1993; Cripps et al. 1999; Cripps and Atkinson 2000). 주요 지방 class로는 트리아실글리세롤(triacylglycerols), 왁스 에스테르(wax esters), 인지질(phospholipids), 디아실글리세롤 에테르(diacylglycerol ether) 등이 있다. 이 중 트리아실글리세롤은 동물에 저장되는 가장 일반적인 지방 형태로써, 거의 모든 동물플랑크톤에서 발견되며, 글리세롤(glycerol)에 3개의 지방산이 붙어있는 구조를 가지고 있다. 그리고 고위도 해역에 서식하는 일부 초식 동물플랑크톤은 왁스 에스테르의 형태로 지방을 저장한다(Lee et al. 2006). 인지질은 세포막을 구성하는 중요성분으로 비대칭 지방산을 가지고 있으며, 이러한 비대칭구조는 세포막의 구조와 기능에 중요한 역할을 한다. 실제로 북서태평양과 북동태평양에서의 *E. pacifica*는 인지질을 주요 저장지방으로 사용하지만, 남극해의 *E. superba*는 트리아실글리세롤을, 남극해의 *E. crystallorophias*와 *Thysanoessa macrura* 그리고 북극해의 *T. inermis*는 왁스 에스테르를 각각 주요 저장지방으로 사용하는 것으로 보고되었다(Falk-Petersen et al. 2000; Hagen and Kattner 1998; Kusumoto et al. 2004; Ju et al. 2009). 그리고 디아실글리세롤 에테르는 극지 및 온대해역에 서식하는 동물플랑크톤에서 가끔 발견되는 지방의 형태로서 익족류(pteropod)의 주요 저장 지방으로 보고되고 있다(Kattner and Hagen 1998). 이와 같이 지방은 에너지 저장원으로서 생물체의 성장, 번식 등 생존과 밀접한 관계를 가지고 있기 때문에, 최근 들어 지방의 함량 및 구성 변화를 분석, 비교하여 해양 생물의 생존전략(월동, 먹이 생애) 및 생활사(산란, 성숙)를 이해하는데 활용되고 있다(Sargent et al. 1989; Lee et al. 2006; Budge et al. 2008). 본 연구에서는 황해 생태계에서 동물플랑크톤 중 가장 높은 생체량을 차지하며, 수산자원의 주요 먹이원으로써 기초생산자(식물플랑크톤)와 상위포식자간을 연결하는 중요한 매개체 역할을 담당하고 있는 난바다곤쟁이류 중,

*Euphausia pacifica*의 에너지 저장전략과 섭식생태를 살펴보고 나아가 황해 생태계의 먹이망 구조를 파악하고자 한다. 따라서 냉수괴가 형성되기 전인 봄과 냉수괴가 잘 발달된 여름에 현장 채집과 음향탐사를 통해 냉수괴 존재유무에 따른 *E. pacifica*의 발달단계 별 시·공간적인 분포양상을 비교하고 더불어 *E. pacifica*를 비롯하여 동·식물플랑크톤과 상위포식자(어류)의 지방 함량 및 지방산 먹이 추적자와 위 내용물 분석을 통해 이들의 생리 및 섭식생태를 냉수괴 존재 유무에 따라 비교 및 분석하였다.

나. 재료 및 방법

(1) 시료 채집 및 준비(Sample collection and preparation)

2012년 춘계(4월)와 하계(8월)에 걸쳐 실시된 황해 냉수대 현장 조사시 과학어군탐지기(BioSonics, Seattle, USA)로 채집 생물의 분포 수심을 확인한 후, conical net(mouth diameter: 1.0m; mesh aperture: 300 μ m)로 A line(A03, A05, A07)과 D line(D03, D05, D07)에서 크릴 *Euphausia pacifica*를 채집하였다(Fig. 3.5.1.1).

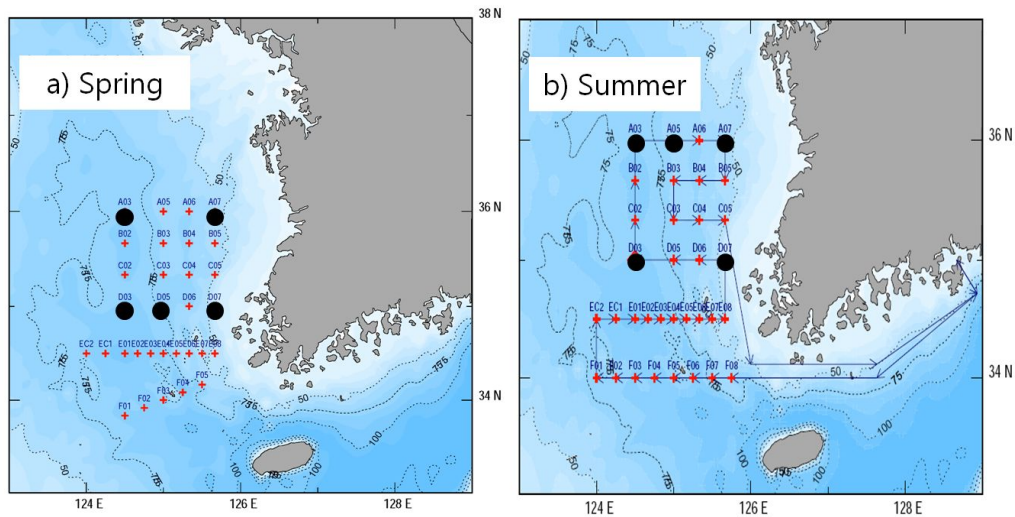


Fig. 3.5.1.2. Map of the study area with sampling stations during a) spring and b) summer 2012.

채집한 크릴은 발달 단계에 따라 유생과 성체로 구분하여 유리병에 약 50개 체씩 보관하였다. 또한 크릴을 채집한 정점과 동일한 정점에서 동물플랑크톤을 채집하여 4개의 크기(0.2-0.5mm, 0.5-1.0mm, 1.0-2.0mm, 2.0-5.0mm)로 분리하였다. 마

지막으로 크릴의 섭식생태를 파악하기 위하여 입자유기물을 47mm GF/F에 여과하여 페트리디쉬에 보관하였다. 모든 시료는 채집 후, 선상에서 -20℃의 냉동고에 보관하였으며, 실험실로 옮겨와 지방 및 지방산 분석 전까지 초저온 냉동고(-80℃)에 보관하였다.

황해 생태계의 먹이망 구조 파악을 위해 상위 포식자(어류, 무척추동물) 시료는 총 3회(4월, 7월, 12월)에 걸쳐 서해안에 위치한 어항(안흥항-태안, 곰소항-부안, 설도항-함평)을 통해 확보하였다. 또한 흑산도에서는 국립공원 흑산도 사무소를 통해 지역 어민으로부터 흑산도 근처의 어류 시료를 확보할 수 있었다 (Table 3.5.1.3).

Table 3.5.1.3. Summary of obtained higher trophic species through the local fish markets and fisherman in 2012.

	1차(4월)	2차(7월)	3차(12월)	흑산도(9월)
가자미류				●●●●
갈색띠매물고등				●
고등어				●●
굴			●●●	
꼬막			●●	
꽃게	●		●	
낙지	●		●●	
넙치				●●
노랑가오리	●●			
놀래미		●		
도다리				●
돌가자미				●
돧양태류				●
두툽상어				●●●
등가시치				●●
멸치				●
문어			●●	
물텀벙이			●	
방어류				●
별넙치				●●●●
보구치				●
블락류				●●●●●●
붕장어		●		
빼뜰이		●●		
성대				●
소라		●●	●●●●	
오징어		●		
우럭	●	●	●●	
조개			●●●●	
쥐노래미				●
파래가리비				●
해삼		●	●●	
홍어	●		●●	●●●
홍합			●●●●	

(2) 알 생산량 측정

알 생산량(egg production) 실험은 개체 당 brood sizes를 측정하는 것으로

써, 2012년 4월 현장조사시 정점 E07(3개체)과 D03(21개체)에서 과학어군탐지기로 크릴 *Euphausia pacifica*의 분포 수심을 확인하여 채집하였다. 채집된 크릴 중 gravid female(보라색 난소를 가진 산란 직전의 건강한 암컷)을 선별하여 사육실험을 진행하였다. 배양에 사용하기 위해 현장 해수를 채수하여 200 μ m sieve에 여과하였고, 1L 용기에 여과 해수를 채워 각 용기에 1개체씩을 넣었다. 사육 실험동안 배양기는 암 상태에서 현장수온(9 $^{\circ}$ C)을 유지시켜 주었다. 48시간동안 12시간 간격으로 알 생산량을 관찰하였으며, E07에서 채집한 일부 크릴은 60시간동안 관찰하였다.

Table 3.5.1.4. Egg production data of krill, *Euphausia pacifica*, obtained in-situ rearing experiments.

Bottle #	Purple	12h		24h		36h		48h		60h		Total eggs	BL (mm)	TL from BL
		eggs	purple	eggs	purple	eggs	purple	eggs	purple	eggs	purple			
E07 #1	y	0	sl	0	y	0	n	0	y	48	n	48	14.21	17.64
E07 #2	y	0	sl	311	n	0	n	0	n	0	n	311	14.95	18.52
E07 #3	y	492	n	0	n	0	n	0	n	0	n	492	13.16	16.38
D03 #1	y	141	n	0	n	0	n	0	n	-	-	141	12.53	15.63
D03 #2	y	169	n	0	y	0	y	37	sl?	-	-	206	13.68	17.01
D03 #3	y	169	n	0	y	0	y	0	y	-	-	169	14.20	17.62
D03 #4	y	290	n	0	y	260	n	0	n	-	-	550	14.54	18.04
D03 #5	y	0	y	0	y	0	y	106	n	-	-	106	13.22	16.46
D03 #6	y	167	n	0	y	8	n	0	n	-	-	175	15.17	18.79
D03 #7	y	0	y	0	y	0	y	0	y	-	-	0	14.37	17.83
D03 #8	y	113	n	0	n	0	n	0	n	-	-	113	12.30	15.36
D03 #9	y	8	y	0	DEAD-eggs still in ovary but doesn't look purple						8	13.91	17.28	
D03 #10	y	58	n	0	n	0	n	0	n	-	-	58	13.45	16.73
D03 #11	y	318	n	0	y	0	y	0	y	-	-	318	15.11	18.72
D03 #12	y	134	n	155	n	0	n	0	n	-	-	289	13.39	16.66
D03 #13	y	0	y	0	y	218	n	0	n	-	-	218	14.83	18.38
D03 #14	y	141	n	0	n,molt	0	n	0	n	-	-	141	14.89	18.45
D03 #15	y	249	n	0	y	148	n	0	n	-	-	397	14.31	17.76
D03 #16	y	10	y	0	y	0	y-bright	206	n	-	-	216	15.86	19.62
D03 #17	y	349	n	0	y	10	n	0	n	-	-	359	15.52	19.20
D03 #18	y	141	n	0	y	0	y-molt	0	y	-	-	141	14.08	17.49
D03 #19	y	6	y	98	y	0	y	0	y	-	-	104	12.93	16.11
D03 #20	y	351	n	218	n	0	n	0	sl	-	-	569	14.83	18.38
D03 #21	y	240	n	0	y	248	n	0	n	-	-	488	15.46	19.14

관찰 후 용기 내에서 알이 확인되면, 용기 내에 있는 알을 120 μ m sieve에 걸러내어, gridded petridish에 옮겨 해부현미경으로 확인 및 계수하였다. 실험 종료 후에는 산란한 모든 개체의 체장(total length)을 측정하고, 실험 중 탈피한 개체들은 탈피의 꼬리 마디를 측정하여 기록하였다. 그리고 용기에 남아있는 알

도 걸러서 계수하고 합산하여 총 알 생산량을 산정하였다(Table 3.5.1.4).

(2) 지방 함량 및 class 구성

초저온 냉동고(-80℃)에 보관되어 있는 일정량의 시료는 지방 분석을 위해 해동되었다. 분석에 사용되는 모든 용기는 세제로 세척 후 오염을 예방하기 위해 혼합유기용매로 2-3번 헹구어졌다.

유리 용기에 크릴 *E. pacifica* 및 동물플랑크톤을 각각 넣은 후, 혼합유기용매(CH₂CL₂:MeOH=1:1)를 첨가하고 1분 동안 gun sonication하였다. 그 다음 유리 용기에 용매의 최종비율이 CH₂CL₂:MeOH:H₂O=1:1:0.8이 되도록 증류수를 첨가하여 잘 흔들어준 후, 혼합용매가 두 층으로 분리되면 지방을 포함하고 있는 하층부를 제거하여 옮겨 담았다. 그리고 옮긴 양만큼 혼합유기용매를 재첨가하여 다시 두 층으로 분리되면 또 다시 하층부를 옮겼고, 같은 과정을 2-3회 반복하여 시료로부터 지방을 추출하였다(Bligh and Dyer 1959). 지방 함량 및 class 구성 분석을 위하여, 질소 가스로 추출물의 유기용매를 완전히 제거한 후, 혼합유기용매(CH₂CL₂:MeOH=2:1)에 다시 용해시켰다. 추출된 지방 중 적정량(0.6-1.0 μl)을 실리카 chromarods(Mitsubishi Kagaku Iatron)에 떨어뜨려 혼합유기용매(CH₂CL₂:MeOH=1:1)로 농축(focusing)하여 비극성 유기용매(Hexane:Diethyl ether:Formic acid=85:15:0.2)로 지방 class를 분리하였다. 그 다음 Iatroscan Mark-V TLC-FID(Thin-Layer Chromatography with Flame-Ionization Detector; IATRON LABORATORIES, INC.)로 지방을 정량, 정성 분석하였다(Ju et al. 1997). 총 지방 함량은 정량화된 각 지방 class의 합으로부터 계산되었다.

(3) 지방산 구성

추출된 지방에서 적정량(약 200μl)을 새로운 시험관에 옮겨 0.5N KOH/MeOH를 넣고, 30분 동안 70℃에서 가열하였다. 그 후, 혼합유기용매(Hexane:Diethyl ether=9:1)로 총 3회에 걸쳐 중성지방을 추출하여 분리 수거하였다. 그리고 남은 용액에 적정량의 염산(HCl)을 첨가하여 KOH를 침전시킨 후, 혼합유기용매(Hexane:Diethyl ether=9:1)로 지방산을 포함한 극성지방을 추출하였다. 추출된 극성지방에 BF₃/MeOH(Boron trifluoride methanol solution)를 넣

어서 지방산을 에스테르화하여 지방산 메틸에스테르(fatty acid methyl ester)로 유도하고 GC-FID(Gas Chromatography-Flame Ionization Detector)와 GC-MSD(GC-Mass Spectrum Detector)로 정량, 정성 분석하였다. 지방산 중 불포화 지방산의 이중결합(double bond) 위치는 GC-MSD를 이용하여 확인되었다.

다. 결과 및 토의

(1) 알 생산량 (egg production)

2012년 춘계(4월) 현장조사에서 정점 E07과 D03에서 채집한 크릴 *Euphausia pacifica*로 선상 사육 실험을 실시하였다. 정점 D03의 크릴 21개체는 48시간동안 한번 또는 두 번에 걸쳐 알을 생산하였으며, 총 24개체(D03 21개체, E07 3개체)의 평균 알 생산량은 227.0 eggs/female (최소 0, 최대 563)로 확인되었다. 북동태평양(Oregon and California coast)에 서식하는 *E. pacifica* 암컷(체장 15-24mm)은 최대 700 eggs/female까지 산란하였으며(Gomez-Gutierrez et al. 2006), 일본 Toyama bay에 서식하는 암컷(체장 17-28mm)은 12-296 eggs/female의 산란 범위를 보였다(Iguchi and Ikeda 1994). 비록 본 연구에서의 시료 수가 타 해역에 비해 매우 적지만, 황해에 서식하는 *E. pacifica*도 타 해역의 크릴 알 생산량과 유사한 범위를 보이는 것으로 나타났다(Fig. 3.5.1.3).

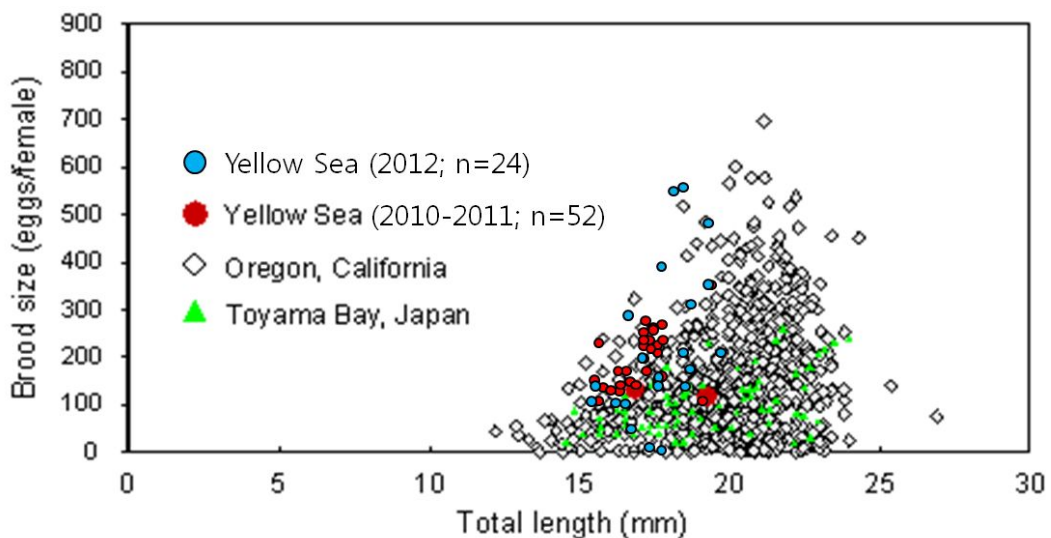


Fig. 3.5.1.3. Relationship between brood size (the number of eggs/female) and total length(mm) of female *E. pacifica* in various regions.

(2) 크릴의 총 지방 함량 및 class 구성

춘계(4월)와 하계(8월)에 북쪽(A line)과 남쪽(D line)에서 채집한 *E. pacifica*의 지방 함량 및 class 구성을 비교한 결과, 춘계 *E. pacifica*(건중량의 $16.22 \pm 0.42\%$)의 지방 함량이 하계(건중량의 $8.41 \pm 3.04\%$)보다 약 1.5-2배 정도 높게 나타나 계절적인 차이를 확인할 수 있었다. 춘계에 남쪽(건중량의 $15.93 \pm 2.48\%$)과 북쪽(건중량의 $16.52 \pm 0.77\%$)의 지역적인 차이는 나타나지 않았으나, 하계에는 남쪽(건중량의 $10.56 \pm 2.24\%$)이 북쪽(건중량의 $6.26 \pm 1.19\%$)에 비해 지방 함량이 높았다. 황해에 서식하는 크릴 *E. pacifica*는 춘계에 집중하여 산란하기 때문에 체내 저장한 지방 함량이 높았다. 그러나 춘계에 비해 수온이 높고 먹이 조건(농도, 구성 등)이 좋지 않은 하계에는 남쪽과 북쪽의 먹이원 구성이 다르기 때문에 춘계에 비해 지방 함량이 낮은 것으로 추정된다. 춘계와 하계에 남쪽과 북쪽에서 채집한 *E. pacifica*의 지방 class 성분 구성을 살펴보면, 세포막을 구성하는 인지질(phospholipid)이 총 지방의 50% 이상으로 가장 우점하게 나타났다. 저장 지방으로는 트리아실글리세롤(triacylglycerol)을 함유하였으며, 그 밖에 콜레스테롤(cholesterol)과 자유지방산(free fatty acid)이 검출되었다. 황해 *E. pacifica*의 지방 함량에서 나타난 계절적 차이와는 달리, 지방 class 구성은 채집 계절 및 지역에 따른 차이를 보이지 않았다(Fig. 3.5.1.4).

타 해역(미국 서부연안)과 비교하였을 때, 황해에 서식하는 *E. pacifica*의 지방 함량은 춘계에는 미국 서부 연안의 크릴보다 약간 높게 나타났으며, 냉수대가 발달한 하계에는 유사한 값을 보였다. 춘계에 산란하는 황해 *E. pacifica*는 산란기동안 지방을 저장하지만 연중 산란하는 미국 서부 연안의 *E. pacifica*는 축적하는 지방 함량이 낮다. 반면 황해 하계는 수온이 높고 먹이가 부족하기 때문에 에너지 저장량(지방 함량)이 낮았다. 이를 통해 황해와 미국 서부 연안의 크릴은 다른 생존 전략을 가지는 것으로 추정된다(Fig. 3.5.1.5).

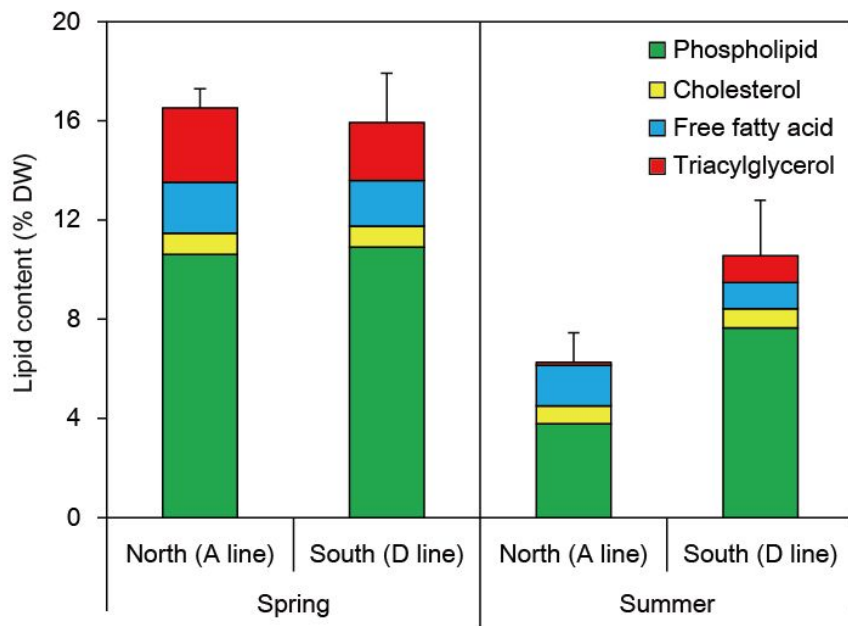


Fig. 3.5.1.4. Total lipid content and class composition of *Euphausia pacifica* in the Yellow sea during the spring (April) and summer (August), 2012.

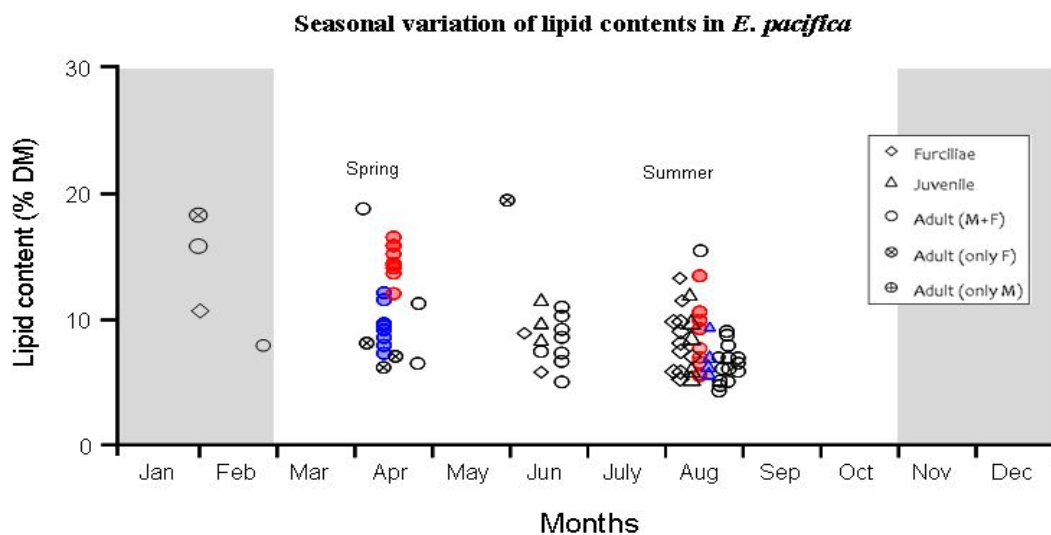


Fig. 3.5.1.5. Seasonal variation of total lipid contents (in % of dry mass, DS) with different life stages. Black and red (from 2011)/blue (from 2012) colored symbols indicate lipid values in krill from California current system and Yellow Sea, respectively. Gray shaded areas indicate the winter season. Lipid data from California taken from Ju et al. (2009).

(3) 크릴과 입자유기물의 지방산 구성 비교

크릴 *E. pacifica*의 먹이 생태를 이해하기 위하여 크릴과 입자유기물(POM)의 지방산 구성을 분석한 결과, 춘계와 하계의 크릴에서는 탄소 14~24개의 다양한 지방산이 검출되었으며, 포화지방산 중 16:0이 우점하게 나타났다. 특히 춘계에 남쪽(D line)에서는 지방산 중 상대적으로 16:0의 구성비가 매우 높았다. 그러나 북쪽(A line)에서는 포화지방산인 16:0을 비롯하여 구조류와 와편모조류에서 기원하는 것으로 알려진 다 불포화 지방산인 20:5(n-3)(Sargent et al. 1989; Falk-Petersen et al. 2000)과 22:6(n-3)(Graeve et al. 1994; Falk-Petersen et al. 2000)이 우점하였다. 춘계에 남쪽과 북쪽에서 나타난 크릴의 지방산 구성 차이는 달리 하계에는 지역적인 차이가 나타나지 않았다. 하계에 남쪽과 북쪽 모두 포화지방산 중 16:0, 단일 불포화 지방산 중 18:1(n-9), 다 불포화 지방산 중 20:5(n-3), 22:6(n-3)의 구성비가 높았다(Fig. 3.5.1.6). 지방산을 그룹화하여 살펴보면, 춘계 남쪽에서는 포화지방산이, 북쪽에서는 다 불포화 지방산의 구성비가 매우 높게 나타나 지역적인 차이를 뚜렷하게 확인할 수 있었다. 그러나 하계에는 식물플랑크톤 기원의 다 불포화 지방산이 남쪽과 북쪽에서 모두 높게 나타났으며, 미생물 기원의 branched 지방산(BrFA)은 상대적으로 매우 적지만 춘계에 비해 하계에 증가하였다(Fig. 3.5.1.7).

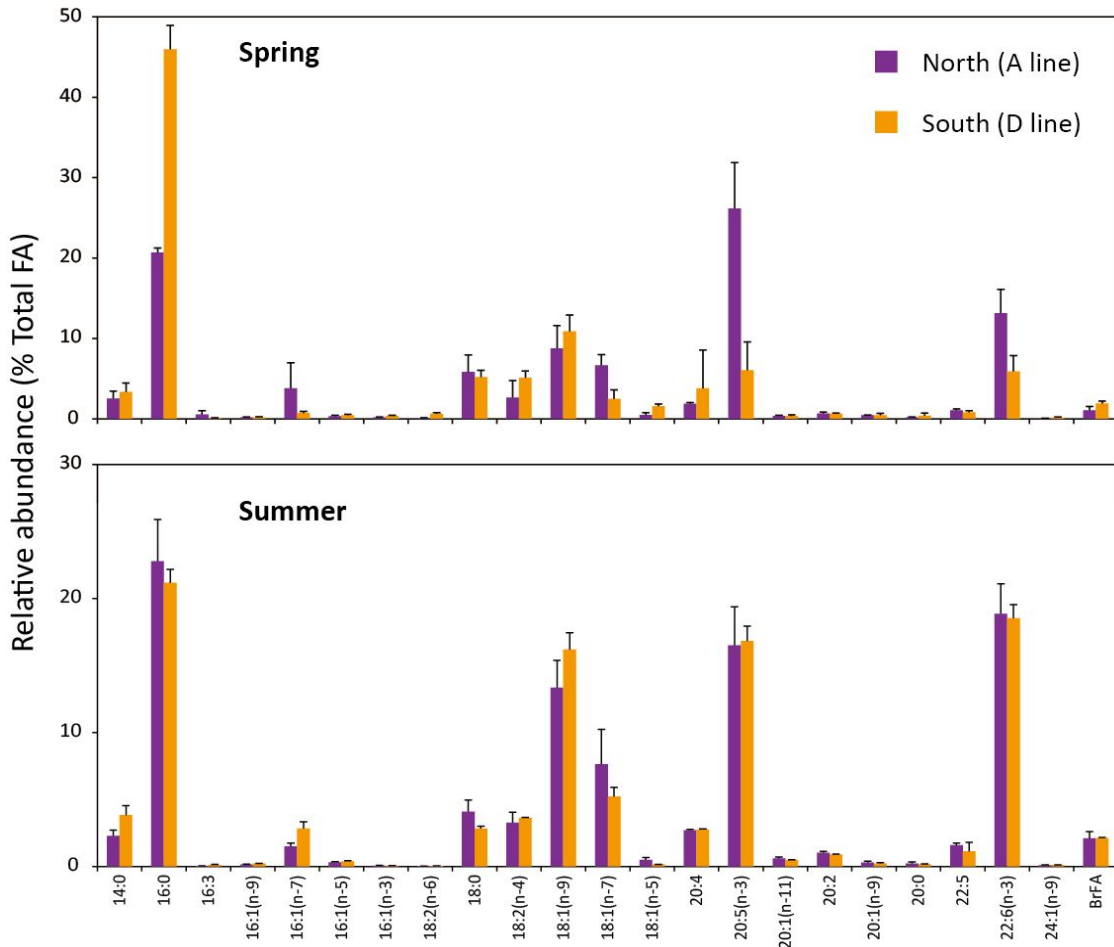


Fig. 3.5.1.6. Relative abundance (%) of individual fatty acids in *E. pacifica* adults from selected sampling stations during the spring and summer, 2012.

크릴과 입자유기물 지방산의 다변량 통계분석(주성분 분석; Principle Component Analysis) 결과, 입자유기물 기원은 계절보다 지역적인 차이가 더 뚜렷한 것으로 나타났다. 특히 연안(A07, D07)은 육상 기원의 성분(16:1(n-9), 24:1(n-9)를 포함한 단일 불포화 지방산)이 우세한 반면, 냉수괴 지역(A03, D03)은 현장 서식 생물로부터 기원하는 성분(18:1(n-7), 14:0, 16:0, 20:5(n-3), BrFA)이 우세한 것으로 나타났다. 하계에 모든 채집 지역의 크릴은 유사한 지방산 성분(20:5(n-3), 22:6(n-3), 18:1(n-9), BrFA)으로 구성되어 있었으나, 춘계에는 매우 다양한 지방산 성분으로 구성되어 있었다(Fig. 3.5.1.8). 이는 하계에는 먹이 생물이 부족할 뿐만 아니라 표층의 높은 수온을 피해 하층의 냉수대에만 서식하기 때문에 그 지역에서만 섭식 활동이 이루어지고 있으나, 춘계에는 지역적인 차이(다양한 먹이원)가 뚜렷한 것으로 추정된다.

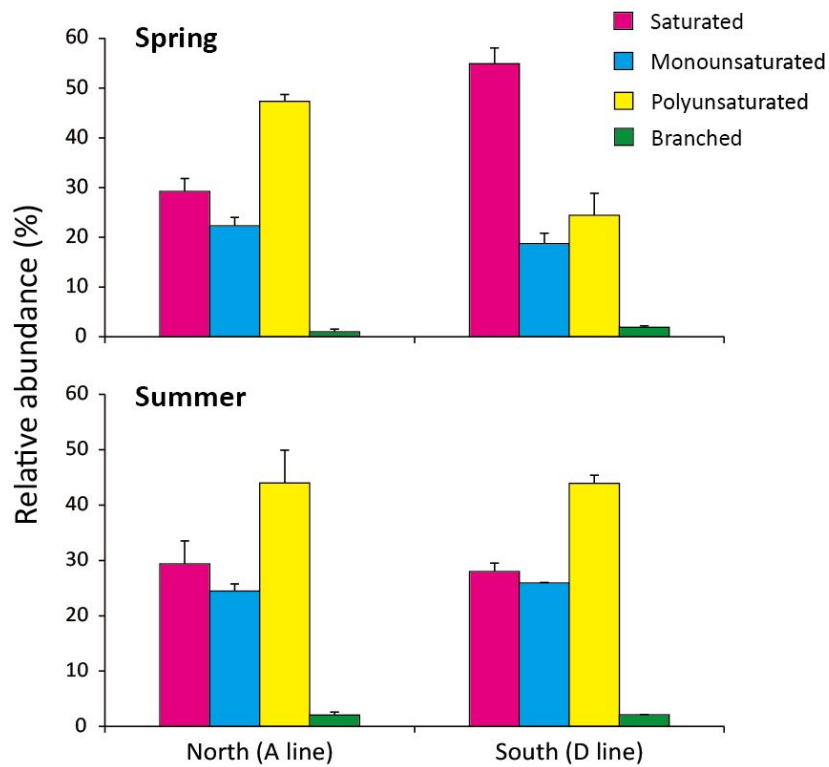


Fig. 3.5.1.7. Relative abundance (%) of grouped fatty acids in *E. pacifica* adults from selected sampling stations during the spring and summer, 2012.

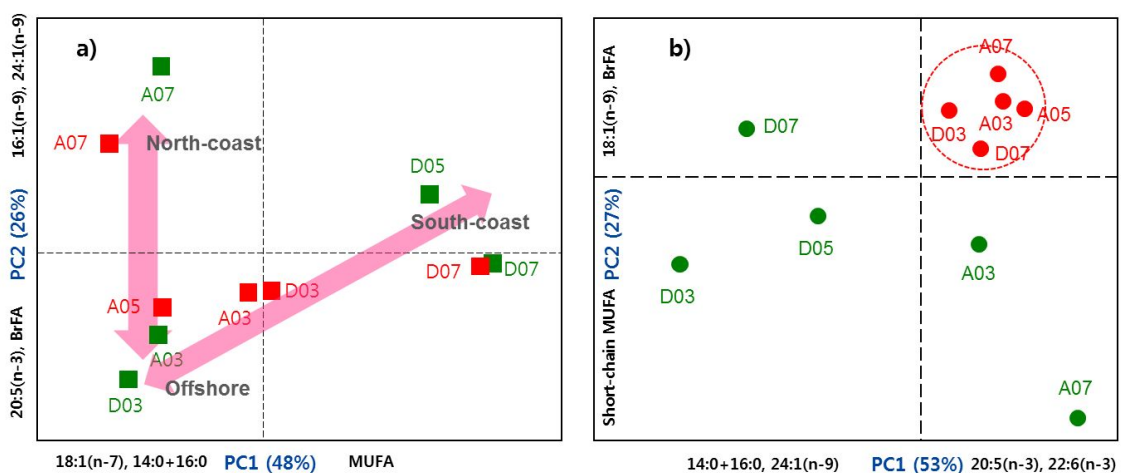


Fig. 3.5.1.8. Two-dimensional PCA score plots based on fatty acid profiles of a) particulate organic matter and b) krill in spring (green colored circle) and summer (red colored square), 2012.

(4) 크기별 동물플랑크톤의 지방산 구성

크기별 동물플랑크톤이 황해 생태계 먹이망 구조에서 냉수대의 유무에 따라 어떠한 역할을 하는지 파악하기 위하여, 채집한 동물플랑크톤을 4개의 크기별 (0.2-0.5mm, 0.5-1.0mm, 1.0-2.0mm, 2.0-5.0mm)로 분리하여 채집하였다. 동물플랑크톤 중 크기가 가장 작은 그룹(0.2-0.5mm)의 그룹화된 지방산 구성은 춘·하계 입자 유기물의 지방산 구성 변화와 유사하였다. 따라서 춘계와 하계에 *E. pacifica*와 요각류의 유생으로 이루어진 가장 작은 그룹의 지방산은 입자유기물의 영향을 가장 많이 받는 것으로 보인다. 그러나 춘·하계에 0.5mm에서 5.0mm의 그룹에 포함된 동물플랑크톤(*Echinodermata larvae*, *Oithona similis*, *Sagitta crass* 등)은 입자유기물의 지방산 구성과는 달리 춘계와 하계에 다 불포화 지방산의 구성비가 가장 높게 나타났으며, 계절적인 차이를 보이지는 않았다. 각 크기 그룹별 종 구성을 살펴본 결과, 각 그룹의 종 구성 변화에 따라 지방산 구성도 차이를 보였다. 이는 각 크기별 지방산 구성의 계절/지역에 따른 변화는 환경적 요인보다는 종 구성의 시공간적 변화가 가장 큰 요인인 것으로 추정된다.

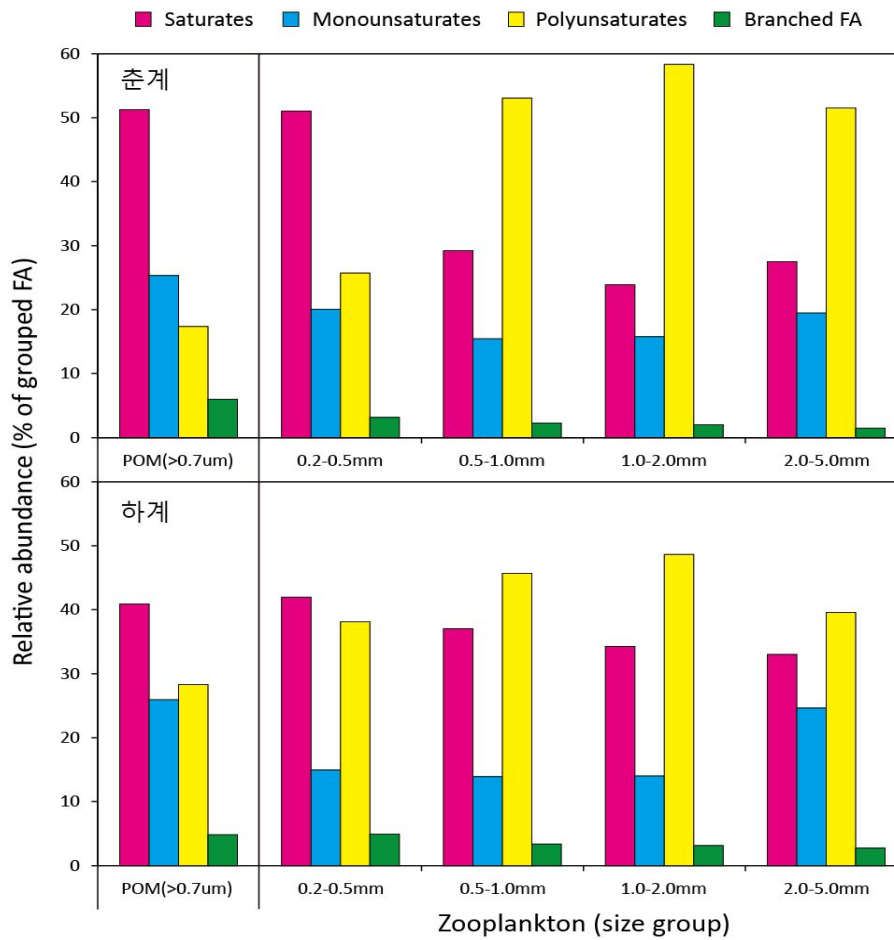


Fig. 3.5.1.9. Relative abundance (%) of grouped fatty acids in particle organic matter (POM) and four groups zooplankton (0.2-0.5mm, 0.5-1.0mm, 1.0-2.0mm, 2.0-5.0mm) from selected sampling stations during the spring and summer, 2012.

제 6 절 생물음향

1. 생물음향

가. 서론

해양의 음향산란층 (sound scattering layer, SSL) 의 존재는 1940 년대 발견된 이후 전 세계 많은 해역에서 관측되고 있다 (Lee et al., 1999; Medwin and Clay, 1999). SSL를 구성하는 주요생물은 동물플랑크톤 또는 소형어류이며, 이 층은 해양생물의 먹이사슬과 연관된 생태계 및 수산학 측면에서 중요한 해양현상으로 인식된다 (Medwin and Clay, 1998). SSL는 주간에는 깊은 수심에 존재하고 야간에 상층부에서 확인되는 것이 일반적인 형태이다. 이를 주·야 수직이동 (diel vertical migration; DVM)이라 하고, 기존의 연구결과 환경 (빛, 수온)과 생물학적인 요소 (섭식활동, 피식-포식자 관계)에 의해 영향을 받는다고 알려져 왔다 (Gliwicz 1986; Rogachev et al., 2000). 특히, 빛은 DVM의 가장 큰 영향을 주어, DVM의 시간과 일몰 및 일출시간과는 높은 연관성을 보인다. 그 외의 SSL는 eddy, 태풍 등의 일시적이고 특별한 환경의 변화에도 민감하게 변동된다 (Wade and Heywood, 2001).

SSL을 구성하는 주요 동물플랑크톤 분포 특성 파악은 해양생물학 측면에서 생태계의 이해 뿐만 아니라, 어류의 먹이로써 중요한 구성 요소이므로 수산자원 연구분야에도 고려해야 할 중요 연구사항이다. DVM의 특성 연구를 위해서 일반적으로 낮과 밤에 네트를 이용하여 동물플랑크톤을 채집하여 분석하게 된다. 생물채집을 이용한 방법은 정확한 양과 종은 알 수 있으나, 많은 시간을 필요로 한다. 또한 불연속적인 조사 기법이기에 때문에 특별하거나 일시적인 특성에 대한 연구가 불가능하다. 최근들어 국외에서는 생물음향기법을 이용하여 동물플랑크톤이나 소형어류의 특성 및 양을 추정하는 조사가 많이 이루어지고 있다 (Heywood, 1996; Iida et al. 1996). 국내에서 SSL에 대한 연구는 동해와 동중국해에서 실시되었고, SSL의 존재 파악 및 수직이동 특성의 연구의 주된 목적을 두었다 (Lee et al., 1990). 이러한 현상 파악만의 연구는 수산음향과 네트 채집이라는 방법론의 차이와 두 자료의 연관성 부족이 발생하였으나, 본 연구를 통해서 직·간접적인 두 방법 모두를 사용함으로써 상호 보완하는 방향으로 연구가 진행 중이다.

황해저층냉수괴 (Yellow Sea Bottom Cold water; YSBCW)는 황해 중앙부에 생성된 10 °C 이하의 수온과 상대적인 고염 (>32 psu)의 수괴로, 황해저층냉수괴에 의한 해양환경의 변동은 SSL를 비롯한 식물플랑크톤, 어류 등 모든 해양생물의 분

포에 직접적인 영향을 준다. 본 조사에서는 황해저층냉수괴 해역에서 생물음향 기법을 이용, 주·야 및 계절 별 음향자료를 획득하여 환경자료와의 비교 분석을 통해서 주요 동물플랑크톤의 표층-저층 이동 특성을 연구하였다

나. 재료 및 방법

(1) 황해저층냉수괴 해역 음향조사

황해저층냉수괴 해역에서 2012년 춘계시기 (4월)와 하계시기 (8월)에 걸쳐 생물음향조사를 실시하였다. 음향조사 해역은 동계시기 전 수층에 대해서 동일한 수온을 유지되고, 하계시기 표층과 저층의 큰 온도 차이와 강한 수온약층이 존재하는 계절적인 변화가 크다. 음향조사는 1개의 대표 정점 (D03)에서 12 시간 이상 연속적인 관측을 실시하였고, 나머지 정점에서 춘계시기와 하계시기 20-30 분 동안 음향자료를 획득하였다 (Fig. 3.6.1.1).

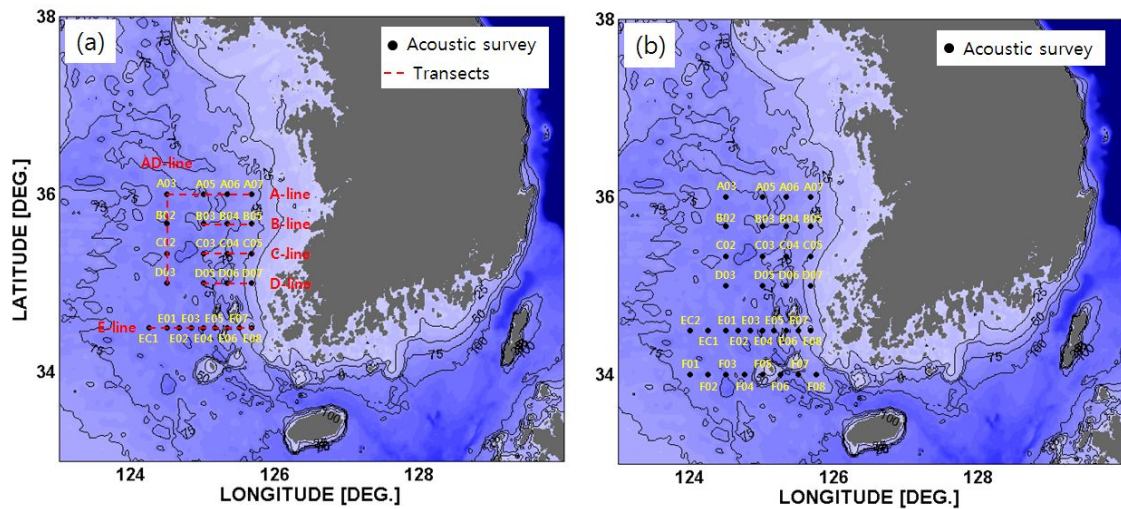


Fig. 3.6.1.1 Locations of the hydroacoustic survey sites in the Yellow Sea during April and August in 2012.

음향 조사에 사용된 장비는 어군 및 동물플랑크톤 탐지에 사용되는 과학어군 탐지장비로 입력변수 제어 및 음향 자료 송·수신을 유·무선으로 할 수 있는 통합시스템이다 (Fig. 3.6.1.2). 음향 주파수는 2012년 춘계 조사 (4월)시 38, 200, 1000 kHz, 2012년 하계 조사 (8월)는 38, 200, 420 kHz를 이용하였다. 조사방법은 조사선이 정선한 후, 예인체에 센서를 설치하여 조사선 측면에서 음향신호를 획득하였다

(Fig. 3.6.1.2). 음향 신호는 1 초에 1 ping 씩 송·수신하였고, pulse length는 0.5 ms로 음향신호를 획득하였고, 음향 조사와 동시에 DGPS를 연동하여 위치 정보를 실시간으로 저장하였다.



Fig. 3.6.1.2 Experimental set up for hydroacoustic surveys.

2012년 춘계시기의 경우 정점 별 음향자료 수집의 한계를 최소화하기 위해서 선저형 음향시스템을 이용하여 6개 정선에 대해서 SSL를 연속적으로 측정하였다 (Fig. 3.6.1.1(a)).

음향자료와 해양환경과의 비교 분석을 위해서 음향조사와 동시에 환경자료와 생물자료를 획득하였다. 환경자료는 모든 정점에서 CTD를 이용, 수온, 염분, beam attenuation 등을 측정하였고, 생물자료는 수심센서 (time depth recorder, TDR)를 설치한 conical net (100 cm mouth diameter, 333 μ m mesh size)를 이용하여 동물플랑크톤을 채집하였다 (Fig. 3.6.1.2).

나. 황해저층냉수괴 해역 음향조사 신호 분석

음향조사를 통해서 개개 생물의 음향특성을 나타내는 음향 표적강도 (TS, dB)와 생물 전체의 음향특성 정보를 제공하는 체적 후방산란강도 (volume backscattering strength, S_v , dB) 자료를 위치자료와 함께 저장하였다. 획득한 음향자료에 대해서 Myriax ecoview software를 이용하여 post-processing을 실시하였다 (Myriax, 2008). 자료 분석은 춘계와 하계시기에 획득한 200 kHz 주파수에 대한 S_v 신호를 분석하였다. 음향 신호는 virtual echogram 기법을 활용하여 먼저 표층과 해저면 신호를 제거하였고, 장비 운영과정에서 발생하는 잡음 (CTD 운용, 네트 채집 등) 및 해수면에 생성된 공기방울에 의한 노이즈를 제거하였다. 잡음이 제거된 음향신호에 대해서 수심과 시간 영역에서 압축 시킨 후에 환경자료와 분석하였다

(Fig. 3.6.1.3).

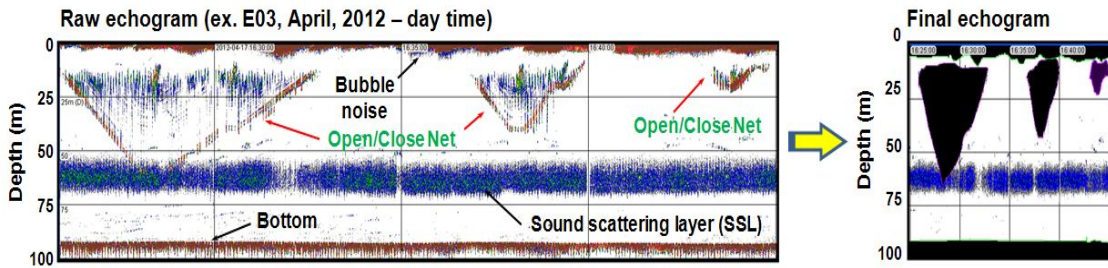


Fig. 3.6.1.3 A sample echogram for post-processing of acoustic data.

다. 결과 및 토의

1) 황해 저층냉수대 음향조사 결과

본 연구결과는 황해저층냉수대 해역에서 2012년 춘계와 하계시기에 주파수 200 kHz를 이용하여 획득한 신호의 예이다. 분석결과 SSL은 춘계 주간시기 해저면 근처, 야간시기 표층 부근에 분포하는 패턴을 보였다 (Fig. 3.6.1.4). 하계 주간시기에는 높은 표층수온 (>25 °C)으로 인해 SSL가 두 개의 층으로 분리되었고, 채집결과 및 음향산란강도를 통해 하부 SSL가 동물플랑크톤으로, 수온약층 아래에서 DVM 하는 것을 알 수 있다. 측정된 결과는 2010년과 2011년에 동일한 지역에서 조사한 선행연구와 유사한 DVM 패턴을 보였다 (Fig. 3.6.1.5).

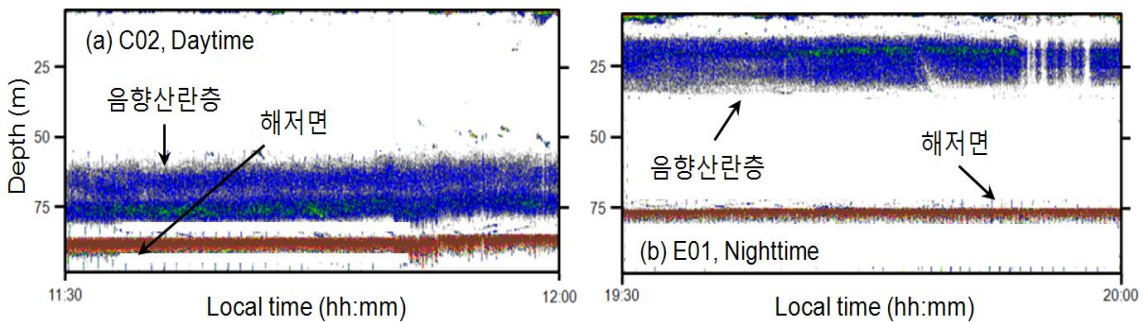


Fig. 3.6.1.4 A sample echogram of sound scattering layer from 200 kHz signal in the YSBCW (day-night time, April 2012).

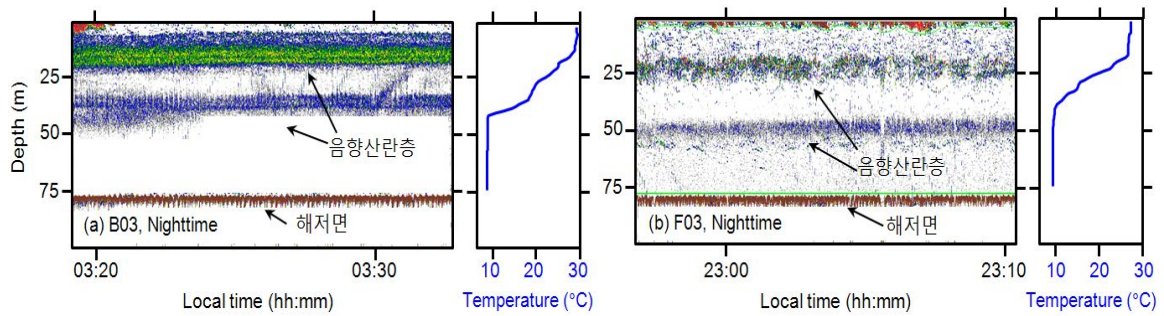


Fig. 3.6.15 A sample echogram of sound scattering layer from 200 kHz signal in the YSBCW (night time, August 2012).

2) SSL의 정선 별 표층-저층 수직 구조

획득한 음향자료 중 선저형 음향센서 (주파수 200 kHz)를 통해 획득한 정선자료 분석 중 비정상적인 SSL의 형태를 보였다 (Fig. 3.6.1.6). 정선자료 중 B-line은 일반적인 SSL의 형태를 보인 반면에, E-line 중 정점 E05과 E06 부근에서 주간시기 임에도 표층 부근 (< 15 m)에서 SSL이 존재하였다 (Fig. 3.6.1.6(b)). 따라서 SSL 수심의 정밀 조사를 위해 음향자료와 환경자료와의 비교 분석하였다.

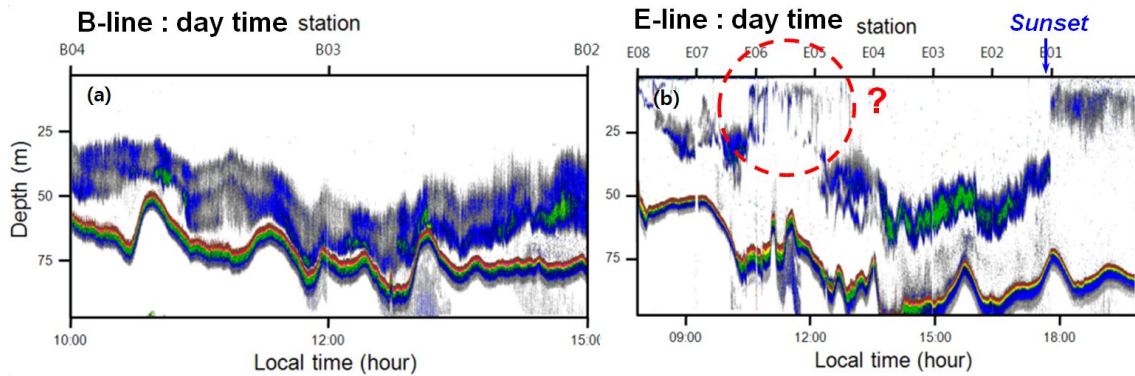


Fig. 3.6.1.6. A echogram of sound scattering layer during daytime at April 2011, (a) B-line and (b) E-line.

3) 음향자료와 환경자료와의 비교 분석 결과

과학어군탐지장비로 획득한 자료와 선저형 음향센서에서 획득한 자료 비교시 동일한 형태의 SSL이 존재하였다. 정점 별 음향자료와 환경자료와의 비교결과 수온, beam attenuation 그리고 부유물질 (suspended particle material, SPM)과 연관성을 보였다. 여기서 beam attenuation은 CTD 보조센서 중 하나인 transmissometer (ALPHAtrackII)를 통해서 획득한 자료로, 부유물질의 부피 또는 밀도의 상대적인 지표이며 수직적인 부유물질의 양이 측정된다. 음향자료와 환경자료 비교시 부유물질 농도가 상대적으로 높은 정점에서 주간시기 SSL이 해지면 근처가 아닌 일정 수심 이상에서 존재했다 (Fig. 3.6.1.7, Fig. 3.6.1.8). 계절 별로 음향자료와 환경자료 비교시 춘계시기 SSL의 수심과 부유물질의 농도와의 연관성을 보였고 (Fig. 3.6.1.7), 특히 하계시기에는 SSL의 수심과 부유물질과의 연관성 외에도 높은 표층 수온 (>25 °C)으로 인해 수온약층 아래까지만 SSL이 상승하였다 (Fig. 3.6.1.8). 본 환경자료를 통해서 동물플랑크톤의 표층-저층 이동특성에서 수온이 부유물질보다 큰 영향이 있음을 알 수 있다.

본 음향조사를 통해서 황해저층냉수피해역에서 SSL의 주·야 및 계절별 수직 이동 패턴을 음향학적인 방법으로 측정하였다. 또한 선저형 음향센서를 이용하여 활용하여 연속적인 음향조사 결과 음향산란층의 공간적인 차이가 있음을 확인하였다. 음향자료와 환경자료와의 분석 결과 황해저층냉수피에서 동물플랑크톤의 표층-저층 이동 특성은 수온이 가장 큰 영향을 주고, 그 다음으로 부유물질의 농도가 영향을 주는 것으로 분석되었다. 동물플랑크톤의 생존 전략을 위한 주·야 및 계절별 수직 이동 특성이 수직 수온 구조 변화와 부유물질의 농도에 따라 민감하게 반응하였다. 차후 음향자료와 수온, 부유물질의 상관성 분석을 통해서 연관성을 확인 할 것이다.

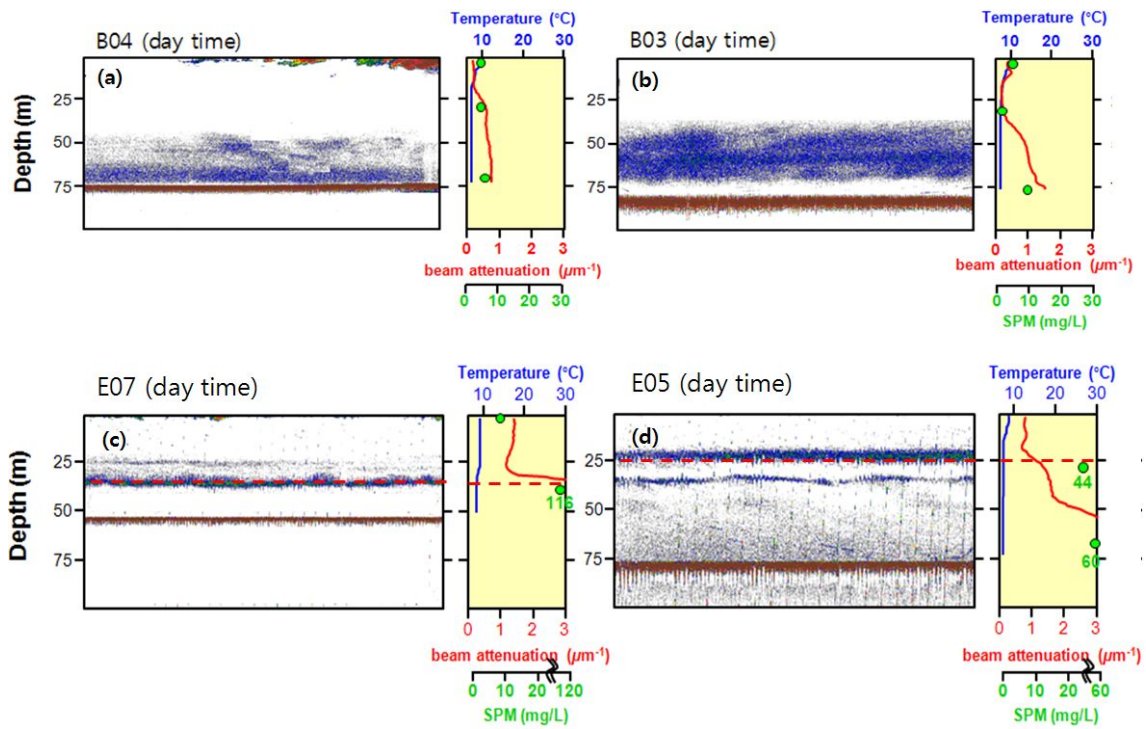


Fig. 3.6.1.7. A echogram of sound scattering layer in April 2012, (a) B04, (b) B03, (c) E07 and (d) E05.

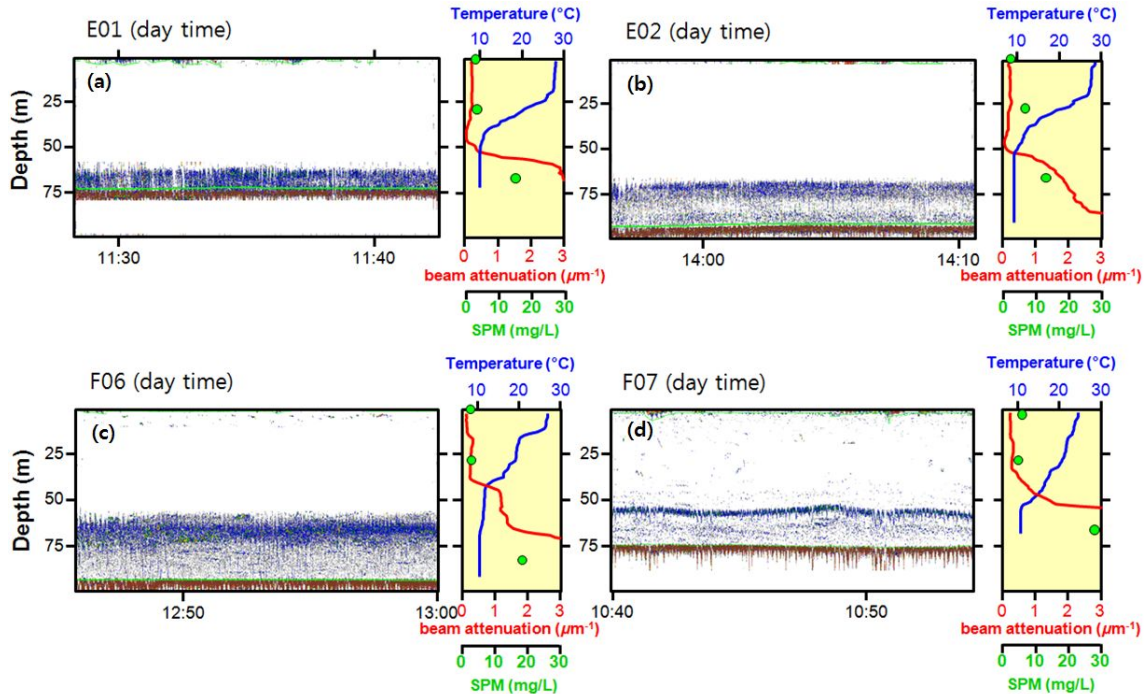


Fig. 3.6.1.8. A echogram of sound scattering layer in August 2012, (a) E01 (b) E02 (c) F06 and (d) F07.

제7절 먹이망 구조

1. 안정동위원소비를 이용한 황해 생태계 먹이망 해석

가. 서론

황해저층냉수는 황해 중앙의 중, 저층에 분포하는 수온 10°C 이하, 염분 33‰ 내외를 보이는 저온, 저염의 수괴를 일컫는 것으로(Nakato, 1977), 겨울에 차고 강한 북서계절풍의 영향으로 생성된 냉수가 봄부터 여름에 이르는 동안 기온의 영향으로 표층수온이 상승하여 저층수와 강한 성층이 일어나 연중 변질되지 않고 저층에 그대로 남게 되는 특성을 가지고 있다(Uda, 1934). 이러한 황해저층냉수가 황해 유용어류자원의 주요 먹이인 요각류와 크릴의 over-summering site임이 밝혀지면서 황해저층냉수괴의 생태계 구조와 기능 및 가치의 해석 필요성이 대두되고 있으며 그에 따라 요각류와 크릴의 시공간 분포와 수직특성, 생리학적 특성 및 기후변동과 관련된 생태계 구조 변화에 대한 연구와 식물플랑크톤의 분포, 현존량에 대한 연구가 진행되고 있지만, 냉수괴와 관련된 생태계 구조 및 상호관계에 관한 연구는 아직 미흡한 상태이다.

생태계 구조와 상호관계를 파악하기 위해서는 먹이망(foodweb) 구조를 이해하는 것이 중요한데, 최근 들어 각광받고 있는 분석기법으로 안정동위원소비를 이용하는 방법이 있다. 생물체내 안정동위원소비는 장기간 섭식하여 체내에 축적된 결과를 반영하기 때문에 기존 연구방법인 해부학적 방법의 단점을 보완할 수 있다(Fry, 1991; McCutchan et al., 2003; Herbert et al., 2006; Fukumori et al., 2008). 탄소 안정동위원소비의 경우 먹이원과 섭식자 간의 분별작용(fractionation factor)이 적기 때문에 생물이 이용한 유기물의 추적자로서 이용되고 있고(Peterson, 1999; Fry, 2006), 질소 안정동위원소비의 경우 평균 2.5~3.4‰의 분별작용을 나타내기 때문에 생태계 내 영양단계(trophic level)의 지표로 활용되고 있다(Minagawa and Wada, 1984; Post et al., 2000; Post, 2002). 국내에서 안정동위원소비를 이용한 먹이망 연구는 하구 및 연안 생태계를 대상으로 몇몇 사례가 있지만(Kang et al., 2003; 윤 등, 2006; Yang and Shin, 2009), 연안 바깥쪽 외해에서 활용된 사례는 드물다. 본 연구에서는 황해저층냉수괴 유무에 의한 생태계 구조(먹이망) 특성 규명을 위해 주요 생물종에 대한 탄소 및 질소 안정동위원소비 분석을 수행하여 에너지흐름 및 영양단계를 파악함으로써 먹이원과 섭식자 간의 관계를 보다 명확히 규명하고자 하였다.

나. 재료 및 방법

(1) 탄소 및 질소 안정동위원소비 분석

모든 시료는 분석전까지 냉동상태(-80°C)로 보관되었으며, 동결건조기를 이용하여 동결건조 후 생물시료는 막자사발과 분쇄기(FRITSCH-planetary mono

mill, Pulverisette 6, Germany)를 이용하여 분쇄하였고, 분쇄된 생물시료와 건조된 여과지시료는 안정동위원소비 분석을 위해 탄소용 시료와 질소용 시료로 구분하였다. 탄소용 시료 중에서 어류시료는 유기용매(DCM:MeOH=99:1)를 이용하여 지질을 추출하여 제거하고 재건조 하였으며, 이후 크릴시료, 부유생물의 크기별 분류(size-fraction)시료와 함께 1N HCl을 이용하여 무기탄소를 제거하였다. 무기탄소가 제거된 시료는 초순도수로 염산을 완전히 제거하고 재건조하여 다시 분말화 하고, 여과지시료는 훈증을 통해 무기탄소를 제거하였다. 산처리 과정은 질소 안정동위원소비 분석 결과에 영향을 미치지 않기 때문에 질소용 시료에는 아무 처리를 하지 않았다.

탄소와 질소의 안정동위원소비 측정은 원소분석기와 결합된 안정동위원소 질량분석기(EuroEA-Isoprime IRMS, GV instruments, UK)를 사용하여 측정하였다. 안정동위원소비 값은 질량분석기를 이용하여 분석된 표준시료와 분석시료 간의 동위원소비 차이를 δ 값으로 정의하여 ‰로 나타낸다. 표준물질로 탄소는 vPDB, 질소는 대기에서의 질소 가스를 사용하였고, 2차 표준물질로 탄소는 CH-6(IAEA), 질소는 N-1(IAEA)를 사용하였다. 분석기간동안 2차 표준물질의 안정동위원소비 분석 표준편차는 탄소와 질소 모두 $\pm 0.3\%$ 을 나타내었다.

시료의 탄소와 질소의 안정동위원소비는 다음과 같이 표현된다.

$$\delta^{13}\text{C} (\text{‰}) = [({}^{13}\text{C}/{}^{12}\text{C})_{\text{sample}}/({}^{13}\text{C}/{}^{12}\text{C})_{\text{standard}} - 1] \times 1000$$

$$\delta^{15}\text{N} (\text{‰}) = [({}^{15}\text{N}/{}^{14}\text{N})_{\text{sample}}/({}^{15}\text{N}/{}^{14}\text{N})_{\text{standard}} - 1] \times 1000$$

(2) 먹이원 기여도 평가

크릴에 대한 먹이원 기여도 평가는 IsoSource Mixing model을 이용하여 계산하였다. IsoSource Mixing model은 탄소 안정동위원소비와 질소 안정동위원소비의 값으로 먹이원과 소비자 간 상관관계를 계산하여 혼재된 먹이원의 기여도(contribution)를 정량적으로 계산할 수 있다. IsoSource Mixing model을 사용하기 위해서는 각 먹이원에 대한 탄소 분별작용 계수(fractionation factor)와 질소 분별작용 계수를 고려하여 계산 하여야 하며, 탄소 및 질소 분별계수는 소비자의 종마다 차이가 있기에 본 연구에서의 먹이원 기여도 평가를 위한 모델 입력 분별계수는 최근의 연구에서 밝힌 해양 동물의 탄소와 질소 분별계수 0.8‰과 3.2‰을 사용하였다(Michener and Kaufman, 2007). IsoSources Mixing model은 각 먹이원간의 기여도를 정량적으로 나타내는 장점이 있지만, 연구자의 먹이원 선정과 적용된 분별계수의 차이에 의한 변동을 고려할 때, 계산된 값이 절대적인 결과는 아님을 고려하여야 한다(Pillips et al., 2005).

다. 결과 및 토의

(1) 탄소 안정동위원소비를 이용한 어류와 크릴의 먹이원 해석

본 연구에서 분석된 어류와 크릴의 탄소 안정동위원소비 $\delta^{13}\text{C}$ 는 낙지(Small octopus)가 -13.33% , 우럭(Rockfish) -16.42% , 가오리(Ray) -14.95% , 홍어(Skate) -11.87% , 왕새우(Shrimp) -14.31% , 게(Crab) -13.07% 로 분석되었고, 크릴(Krill)의 경우 춘계 조사시 평균 -19.25% , 하계 조사시 평균 -19.85% 로 나타났다(Table 3.1.1.1). 해양플랑크톤의 $\delta^{13}\text{C}$ 의 범위는 일반적으로 평균 $-16\sim-22\%$ 로 보고되고 있으며, 이에 따라 크릴은 해양플랑크톤을 주 먹이원으로 섭식하고 있음을 유추할 수 있으며, 우럭의 경우에는 해양플랑크톤과 치어, 소형어류 등을 섭식하고 있는 것으로 생각할 수 있다. 연안 저서성 어종인 홍어, 낙지, 게는 상대적으로 가벼운 탄소 안정동위원소비를 나타내고 있으며, 연안서식 C4식물의 경우 탄소 안정동위원소비가 일반적으로 $-8\sim-14\%$ 의 범위를 나타내므로 홍어, 낙지, 게는 C4 식물기원 유기물을 먹이원으로서 이용하고 있는 것으로 생각할 수 있다. 게의 경우 쇄설물 섭식자(detritus feeder)로서 퇴적물 표층에 있는 유기물을 직접 섭식하는 종으로 충분히 C4식물 기원의 유기쇄설물을 섭식하고 있다고 판단할 수 있으나, 홍어나 낙지는 먹이망 구조에서 상위단계에 속하는 종들로서 이러한 유기물을 직접 섭식할 수는 없는 종이다. 따라서 이러한 탄소 안정동위원소비를 나타내는 것은 이들이 직접 C4기원 유기물을 섭식했다기 보다는 이들의 주 생활공간과 먹이활동공간이 주로 저서생태계에서 일어나기 때문에 섭식과정 중에서 표층퇴적물의 유기물이 먹이원과 함께 체내로 유입되는 것으로 판단할 수 있다.

Table 3.7.1.1 Carbon stable isotope ratio($\delta^{13}\text{C}$) signatures of organisms in the Yellow sea.

Classification	$\delta^{13}\text{C}(\%)$	
	2012-4(Spring)	2012-8(Summer)
Small octopus	-13.33	-
Rockfish	-16.42	-
Ray	-14.95	-
Skate	-11.87	-
Shrimp	-14.31	-
Crab	-13.07	-
Krill	-19.25 ± 1.25	-19.85 ± 0.40

Table 3.7.1.2 Size-fractionated criterion of zooplankton for food source.

Division	1	2	3	4	5
Size	200 μ m	500 μ m	1mm	2mm	5mm

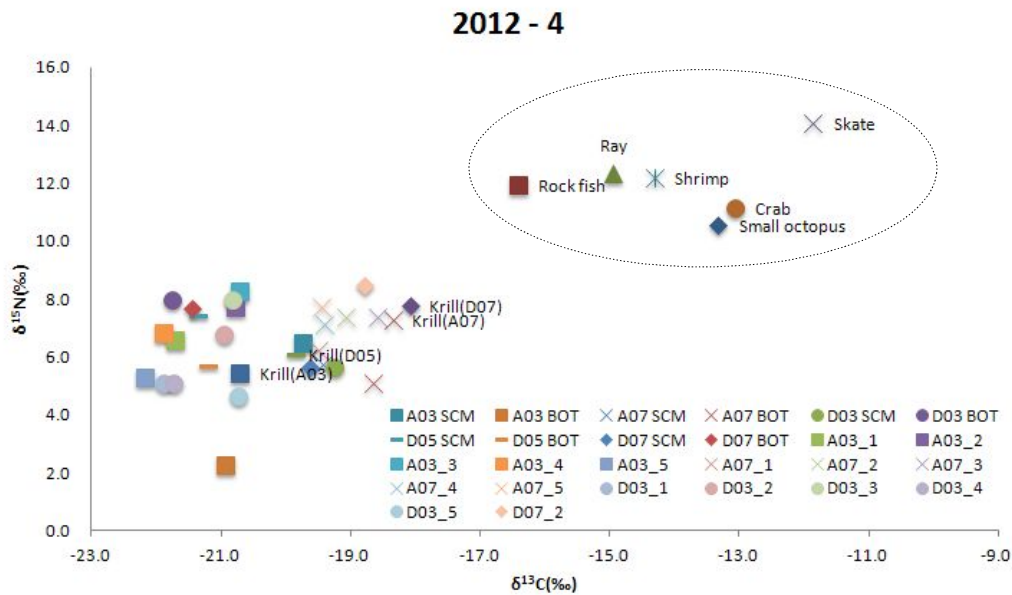


Fig. 3.7.1.1 Plots of $\delta^{13}\text{C}$ versus $\delta^{15}\text{N}$ for samples collected in the Yellow sea in spring 2012.

준계에 채집된 어류와 크릴, 먹이원으로 예상하는 POM 및 size-fraction 시료들을 모두 도시해 보면 어류와 크릴은 먹이원이 다르다는 것을 확인할 수 있다(Fig. 3.7.1.1). 일반적인 해양 생물의 분별계수인 탄소 0.5~1‰, 질소 2.5~3.4‰를 고려하면 어류로 분류한 종들은 나머지 시료들과 구분되고 있음을 알 수 있다. 분별계수 관계에서 우력은 크릴을 먹이원으로 이용하고 있을 가능성이 높을 것으로 생각되며, 홍어나 가오리, 왕새우 등은 크릴을 섭식한 중간 소비자를 섭식할 것으로 추측할 수 있기에 조금 더 세분화 된 먹이원을 채집할 수 있다면 더욱 명확한 먹이-섭식 관계를 파악할 수 있을 것이다.

(2) 정점별, 시기별 안정동위원소비의 변화

(가) A03 정점

준계에 채집된 시료들의 탄소와 질소 안정동위원소비를 나타낸 결과, 크릴은 예상된 먹이원으로 채집된 시료 값의 중앙 정도에 위치하고 있었다(Fig 3.7.1.2). 먹이원으로 예상되는 시료들의 탄소 안정동위원소비 값은 분별계수 0.5~1‰을 고려하였을 때, 저층 POM시료(BOT)와 size-fraction 2, 3 시료가 먹이

원으로서 가능성이 있을 것으로 생각되었으나, 질소 안정동위원소비와 같이 도시해보면 크릴시료의 값보다 낮은 값을 보이는 시료는 BOT 시료만이 존재하여 BOT 시료가 먹이원으로서의 역할을 하고 있을 것으로 판단되었다.

하계에 채집된 시료들의 탄소와 질소 안정동위원소비 값을 살펴보면, 크릴의 안정동위원소비 값은 다른 먹이원들보다 질소 안정동위원소비가 낮게 나타나 채집된 먹이원들 중에서는 크릴의 먹이원으로 이용되는 것이 없는 것으로 나타났다. 이는 A03 지역에 서식하는 크릴은 현재 그 수괴에 있는 먹이원들은 섭식하고 있지 않은 것으로 생각할 수 있다.

(나) A05 정점

A05 정점의 경우 춘계에는 채집이 이루어지지 않았으며, 하계 조사에서만 채집이 진행되었다. A05 정점에 서식하는 크릴의 안정동위원소비 값은 질소 값에 있어서 크릴이 가장 낮은 값을 보이고 있었으며, A03 정점의 하계 안정동위원소비 값과 유사한 특성을 보이고 있었다. 이 정점의 수괴에 서식하는 크릴 또한 주위의 먹이원을 섭식하고 있지 않은 것으로 생각할 수 있다(Fig 3.7.1.3).

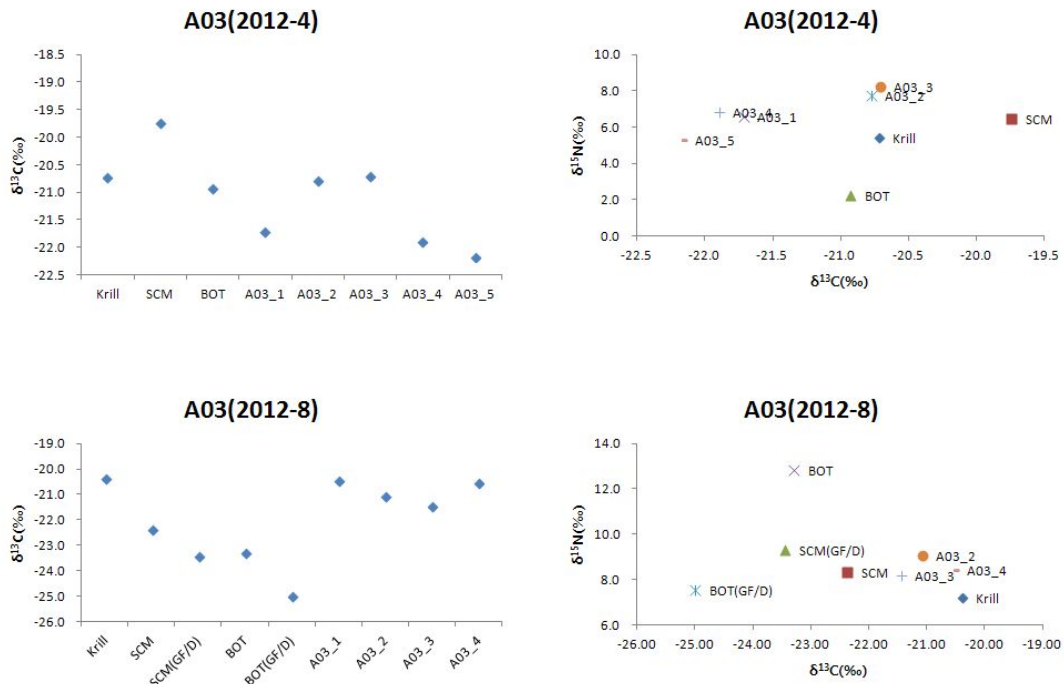


Fig. 3.7.1.2 Plots of isotopic ratios signature at station A03 in this study.

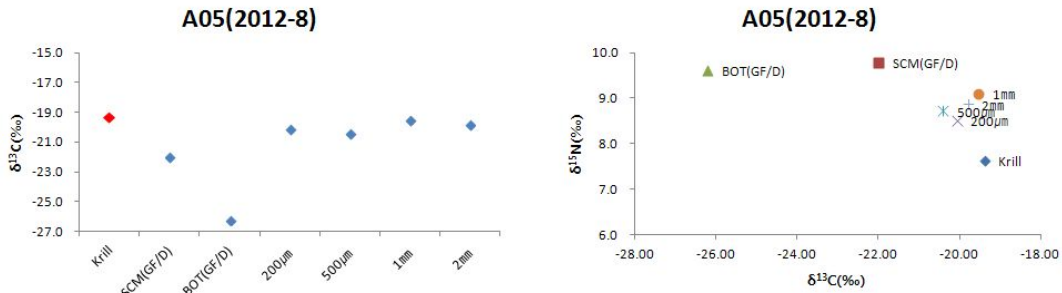


Fig. 3.7.1.3 Plots of isotopic ratios signature at station A05 in this study.

(다) A07 정점

A07 정점은 춘계와 하계 모두 채집이 이루어 졌는데, 탄소 안정동위원소비는 BOT 시료와 size-fraction 3 시료가 먹이원으로서의 역할을 할 것으로 생각되나, 질소 안정동위원소비와 함께 비교해 보면 size fraction 3 시료는 크릴의 질소 값과 유사한 값을 나타내고 있어, BOT 시료가 크릴의 먹이원으로서 이용되고 있음을 유추할 수 있다(Fig 3.7.1.4).

하계 조사에서는 크릴의 먹이원으로 예상된 시료의 채집이 원활하지 못하여 먹이원 시료는 3개 시료밖에 채집할 수 없었다. 따라서 정확한 해석은 실시할 수 없으나, 3개 시료의 분석 값은 모두 크릴의 분석 값과 비교하였을 때 차이가 큰 것으로 나타났다. 따라서 A07 정점 또한 하계의 경우에는 크릴이 주위의 먹이원을 이용하고 있지 않는 것으로 나타났다.

(라) D03 정점

D03 정점의 시료 채집은 하계에만 진행되었고, 크릴의 질소 안정동위원소비는 다른 먹이원들의 안정동위원소비 값 보다 더 낮게 나타나 하계에 이 지역에 서식하는 크릴은 주위 먹이원들은 이용하고 있지 않는 것으로 해석되었다(Fig 3.7.1.5).

(마) D05 정점

D05 정점의 시료 채집은 춘계에만 진행되었는데, 먹이원은 SCM 시료와 BOT 시료의 두 개 시료만이 채집되었다. 탄소와 질소의 분별계수 작용을 고려하여 보면, 먹이원으로 채집된 두 개의 시료는 크릴의 시료 값과 탄소의 경우 분별계수 이상으로 떨어져 있어 먹이원으로서의 역할을 기대하기 어려우며, 질소 동위원소비 역시 크릴과 비슷하거나 높은 것으로 나타나 먹이원으로서의 역할은 하지 못하는 것으로 나타났다(Fig 3.7.1.6).

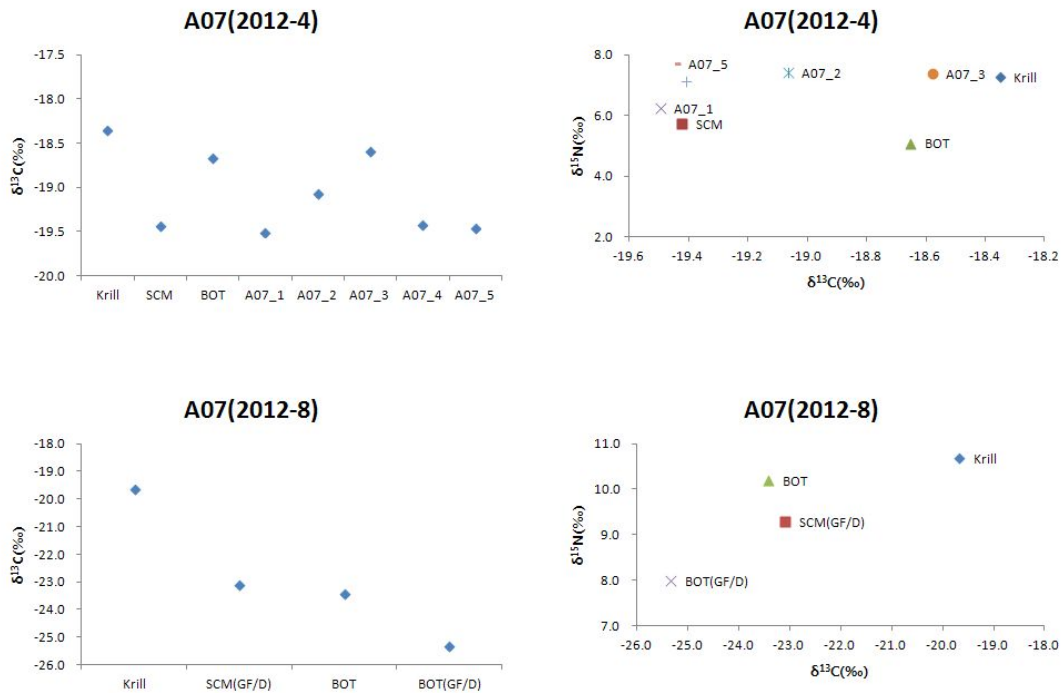


Fig. 3.7.1.4 Plots of isotopic ratios signature at station A07 in this study.

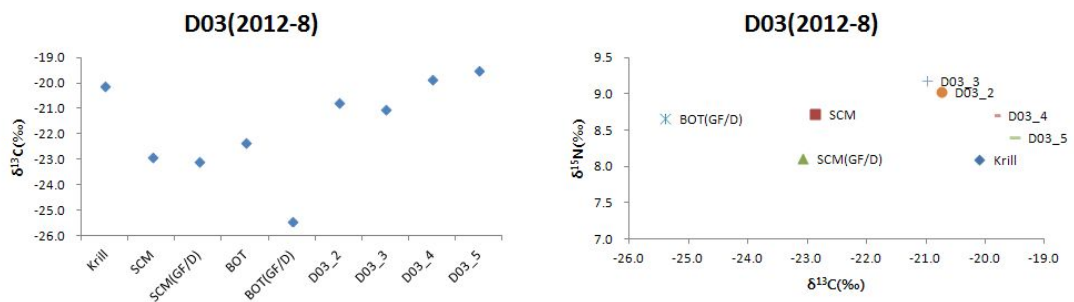


Fig. 3.7.1.5 Plots of isotopic ratios signature at station D03 in this study.

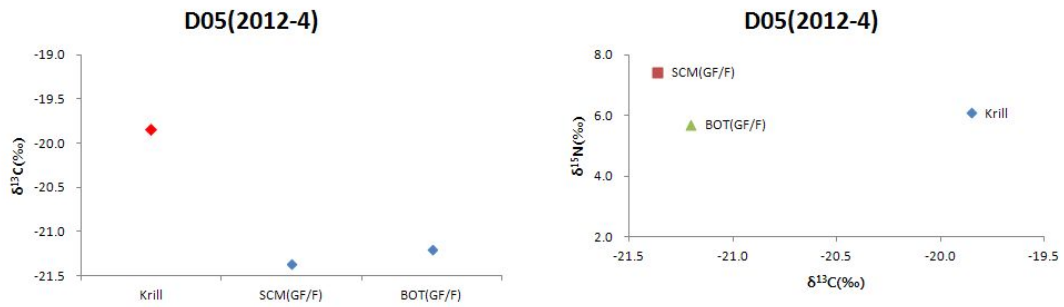


Fig. 3.7.1.6 Plots of isotopic ratios signature at station D05 in this study.

(바) D07 정점

D07 정점은 춘계와 하계 모두 시료 채집이 이루어 졌는데, 춘계의 경우에는 먹이원 시료는 3개 시료가 채집이 되었고, 이 시료들의 안정동위원소비 값을 크릴과 비교해 보면 탄소 값은 분별계수의 범위를 넘는 것으로 분석되어 먹이원으로서의 역할은 안되는 것으로 해석되며, 질소 값의 경우 SCM 시료가 크릴보다 낮게 나타났지만 그 차이는 약 2‰ 정도로 분별계수 범위보다 작게 나타나 역시 먹이원으로서의 역할을 못하는 것으로 해석된다.

하계의 경우에는 먹이원들의 탄소 값의 경우 1‰ 이내의 범위를 갖는 시료들은 size-fraction 시료들이 나타났으나, 질소 값을 비교해 보면 크릴은 다른 먹이원들보다 낮았고 BOT 시료보다 약간 높은 수준을 나타냈다. 따라서 하계에 이 지역에 서식하는 크릴은 주위 먹이원들을 이용하고 있지 않는 것으로 해석되었다(Fig 3.7.1.7).

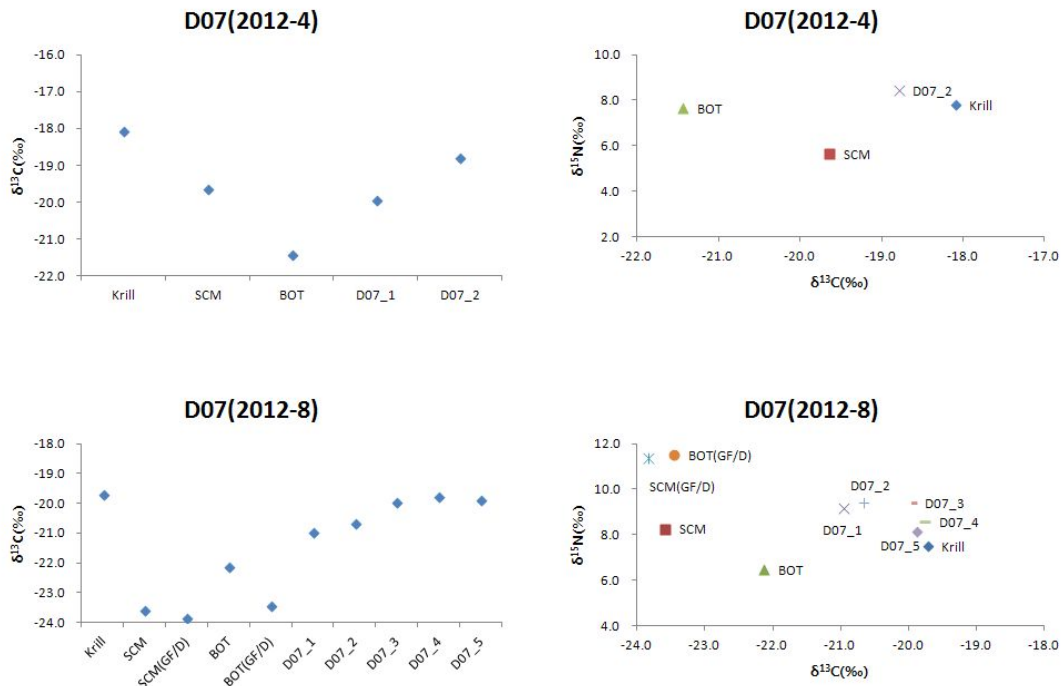


Fig. 3.1.1.7 Plots of isotopic ratios signature at station D07 in this study.

(3) 크릴의 시기별 안정동위원소비의 변화

크릴은 춘계와 하계에 섭식생물로서 채집하였으며, 크릴 체내의 안정동위원소비의 시기별 변화를 도시해 보았더니 춘계(Sp)와 하계(Su)에 다른 패턴의 안정동위원소비 분포를 나타냈다(Fig 3.7.1.8). 춘계의 분포 패턴과 하계의 분포 패턴을 비교해 보면 춘계에는 탄소 값의 범위가 약 $-20.7 \sim -18.2\%$ 정도를 보여 -2.5% 의 차이를 나타냈는데, 하계에는 탄소 값의 범위가 $-20.4 \sim -19.4\%$ 로 1% 의 차이를 나타냈다. 이는 크릴의 먹이활동에 있어서 춘계에는 각 정점에 서식하는 먹이원을 섭식하여 그 정점의 먹이원을 잘 반영하고 있다고 해석할 수 있으나, 하계에는 정점간의 차이가 춘계에 비해 그다지 크지 않고 이는 정점과 상관없는 먹이활동의 행동패턴을 보이고 있는 것으로 해석된다.

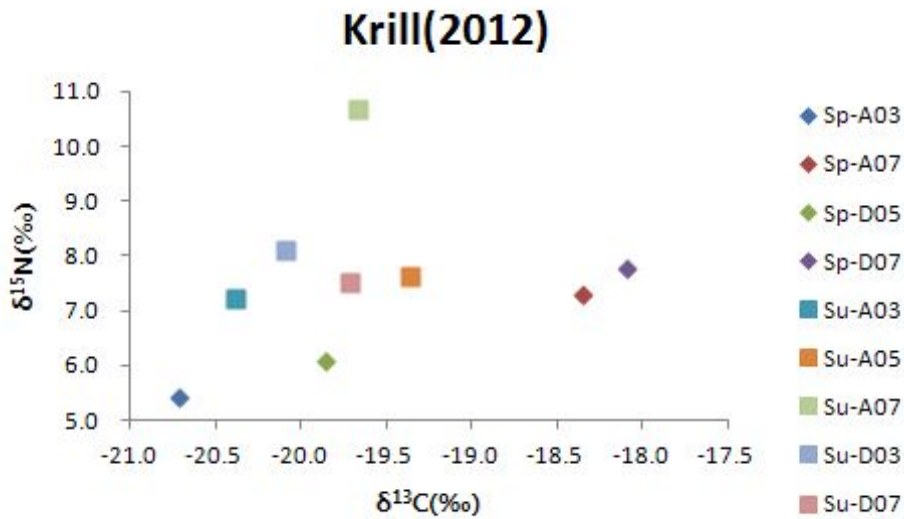


Fig 3.7.1.8 The $\delta^{13}\text{C}$ versus $\delta^{15}\text{N}$ plot of krill samples analyzed in this study.

(4) 크릴의 먹이원 기여도 평가

각 정점에서 시기별 크릴이 섭식하는 먹이원의 기여도를 평가하기 위해 Iso-source mixing model(Phillip and Gregg, 2003)을 사용하여 계산하였다. Iso-source mixing model이 계산되기 위해서는 섭식생물과 먹이원생물의 탄소 및 질소 안정동위원소비를 도시하였을 때, 분별계수를 고려한 섭식생물이 먹이원생물의 분포 내로 이동할 수 있을 때에만 계산될 수 있다(Fig 3.7.1.9).

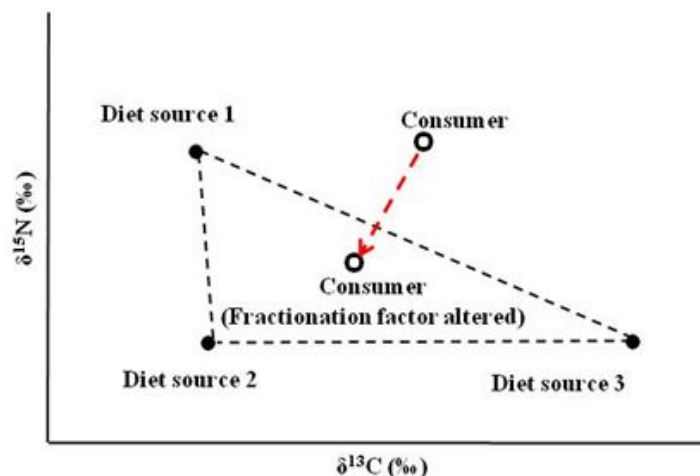


Fig 3.7.1.9 Schematic plot of condition to Iso-source mixing model calculated.

따라서 정점별, 시기별 크릴과 먹이생물의 안정동위원소비를 도시하여 모델

이 계산될 수 있는 분석 자료만을 선택하여 모델링을 실시하여야 하나, 본 연구에서는 각 정점별 분석 자료에서 위와 같은 조건이 성립될 수 있는 분석 자료는 없는 것으로 나타나 크릴의 먹이원에 대한 기여도를 계산할 수 없었다. 기여도를 평가하기 위해서는 추가적인 먹이생물에 대한 채집이 이루어져야 할 것으로 여겨지며, 크릴 자체의 정확한 분별계수가 밝혀진다면 더욱 정확한 기여도를 평가할 수 있을 것으로 사료된다.

제 4장 연구개발목표 달성도 및 대외기여도

제 1 절 목표 달성도

1. 연구내용 대비 달성율

총연구기간내 년차별 연구내용 대비 달성율(%)					
년차	연구성과	진척율		성취 도 (정상 , 부진)	특기사항 (우수성 및 부진사유)
		년차 별 계획 대비	총연 구기 간 대비		
1차년 도 (2012)	<물리환경분야> - 현장 관측자료(2009-2012)와 기존 자료(1990-2011) 그리고 바람과 기후자료 등을 이용하여 황해 남동부 해역에 존재하는 황해냉수괴의 시공간변동성 및 경년 변동성을 분석 - 황해 남부해역에 존재하는 열염전선역에서 전선을 따라 흐르는 서향류의 존재를 파악했으며, 그 현상을 규명	100	30	정상	
	<이화학특성 및 식물플랑크톤> - 춘계 및 하계 정밀관측조사 - 이화학적 요인 분포 특성과 이 들에 의한 식물플랑크톤의 생체량 변화량에 대한 역할 파악 - 식물플랑크톤의 생체량 및 군집 구조에 영향을 미칠 수 있는 주요 환경 요인에 대한 파악 - 식물플랑크톤 핵심종 선택	100	30	정상	
	<원생동물> - 춘/하계 현장탐사 및 시료 채집 - 저층냉수대 유무 따른 원생동물 분포 파악	100	30	정상	
	<동물플랑크톤> - 황해저층 냉수괴 형성 이후 동물플랑크톤 분포 특성 파악 및 잠재적 주요종 탐색 - 춘계, 하계 선상 조사에서 폐쇄 네트로 동물플랑크톤 시간별, 층별채집 - 동물플랑크톤의 황해 저층냉수괴 발달 전과 후의 공간 분포 양상 분석 - 2010년, 2011년의 연구 결과 분석을 통해 동물플랑크톤의 공간 분포 양상을 분석하고 이를 통해 잠재적 주요종 탐색	100	30	정상	

총연구기간내 년차별 연구내용 대비 달성율(%)					
년차	연구성과	진척율		성취도 (정상, 부진)	특기사항 (우수성 및 부진사유)
		년차별 계획 대비	총연 구기 간 대비		
1차년 도 (2012)	<크릴 및 상위포식자> - 춘·하계 현장조사 및 시료 채집 - 춘계 선상사육실험을 통한 <i>E. pacifica</i> 의 알 생산량 및 부화율 측정 - 계절별 주요 상위 포식자(어류) 시료 확보 - 지방산 바이오 마커 분석을 통한 하위 생태계 포식-피식 관계 파악	100	30	정상	
	<생물 음향> - 음향산란층 수직 구조에 따른 황해저층냉수괴 내의 주요 동물플랑크톤의 생존 전략 규명	100	30	정상	
	<먹이망 구조> - 춘/하계 하위 부유 생태계 현장조사 및 시료채집 - 계절별 상위 포식자(어류) 조사 및 시료 확보 - 생지화학 마커로 안정동위원소 분석을 통한 포식-피식 관계 파악	100	30	정상	

2. 정량적 목표달성도

가. 논문게재 성과

게재일	논문명	저자			학술지명	Vol.(No.)	국가명	SCI구분
		주저자	교신저자	공동저자				
심사중	Temporal and spatial variability of the Yellow Sea Cold Water Mass in the southeastern Yellow Sea, 2009 to 2011	오경희	이석	송규민, 이홍재, 김경옥, 김영택	Acta Oceanologica Sinica		중국	SCIE
심사중	Biological sound scattering layer around the Yellow Sea Bottom Cold Water, Korea.	이형빈	강돈혁	조성호, 김용서	Acta Oceanologica Sinica		중국	SCIE
심사중	Influence of the water column stability on the chlorophyll- <i>a</i> concentration during spring and summer in the southeastern Yellow sea (Korea)	장풍국	신경순	이동석, 강정훈, 신경순	Acta Oceanologica Sinica		중국	SCIE
심사중	Vertical distribution of the copepod <i>Calanus sinicus</i> before and during formation of the Yellow Sea Bottom Cold Water in the Yellow Sea	강정훈	강정훈	서민호, 권오윤, 김용서	Acta Oceanologica Sinica		중국	SCIE
심사중	Distribution of dinoflagellate cysts in Yellow Sea sediment	신현호	임동일	김소영	Acta Oceanologica Sinica		중국	SCIE

나. 논문발표 성과

발표일	논문명	저자		학술회의명	국내외 구분
		주발표자	공동발표자		
2012.05	Importance of the bottom cold-water mass as an over-summering refuge for <i>Euphausia pacifica</i> in the Yellow Sea	주세종	고아라 이형빈 강돈혁	Korea-China Society of Oceanography Joint Symposium	국외
2012.05	Temporal and spatial variability of the Yellow Sea Cold Water Mass in the southeastern Yellow Sea, 2009 to 2011	오경희	이석, 송규민, 김경옥, 조철호, 이홍재	한국해양과학기술협의회 공동학술대회	국내
2012.05	겨울철 황해남부를 서진하는 횡단류의 존재	이홍재	조철호, 이석	한국해양과학기술협의회 공동학술대회	국내
2012.05	황해에 출현하는 요각류의 gut pigment 분석	조규희	강정훈, 권오윤, 김웅서	한국해양과학기술협의회 공동학술대회	국내
2012.05	Influence of water column stability on chlorophyll- <i>a</i> concentrations during spring and summer in the southeastern Yellow Sea, Korea	장풍국	이동섭, 강정훈, 신경순	Korea-China Joint Symposium	국외
2012.05	Amplitude and shape of vertical distribution of the copepod <i>Calanus sinicus</i> based on the characteristics of water column in the Yellow Sea	강정훈	서민호, 권오윤, 김웅서	Korea-China Joint Symposium	국외
2012.10	Size-fractionated phytoplankton biomass and species composition in the Yellow Sea: A comparison of different latitudes in spring and summer	권오윤	강정훈, 이균우, 김웅서, 이진환	2012 PICES Annual meeting	국외

발표일	논문명	저자		학술회의명	국내외 구분
		주발표자	공동발표자		
2012.10	Range expansion of calanoid copepod <i>Acartia hongii</i> known as endemic species to the coastal waters of the Yellow Sea	강정훈	조규희, 이균우, 김용서	2012 PICES Annual meeting	국외
2012.11	겨울철 황해 남부 열염전선의 구조와 순환특성	이석	이홍재, 조철호, 오경희, 송규민	추계 한국해양학회	국내
2012.11	Seasonal variation of the Sound scattering Layer (SSL) around the Yellow Sea Bottom Cold Water (YSBCW) in Korea region, 2011-2012	이형빈	강돈혁	AFAS 2012 Annual Meeting	국외
2012.12	The frontal structures in the southern Yellow Sea in winter	이석	이홍재, 조철호, 오경희, 송규민	The 4rd Korea-China joint workshop on the YESCW	국외
2012.12	Understanding the trophodynamics of Yellow Sea ecosystem: the role of <i>Euphausia pacifica</i>	주세중	고아라 신경훈	The 4rd Korea-China joint workshop on the YESCW	국외
2012.12	Biomass and species composition of size-fractionated phytoplankton in the Yellow Sea	권오윤	강정훈	The 4rd Korea-China joint workshop on the YESCW	국외
2012.12	Effects of environmental factors on the phytoplankton assemblages of the southeastern Yellow Sea in spring and summer	장풍국	-	The 4rd Korea-China joint workshop on the YESCW	국외

발표일	논문명	저자		학술회의명	국내외 구분
		주발표자	공동발표자		
2012.12	Seasonal and regional patterns in vertical distribution of zooplankton in the Yellow Sea in spring and summer	조규희	강정훈, 김응서	The 4rd Korea-China joint workshop on the YESCW	국외
2012.12	Limiting factors of the vertical migration of sound scattering layer in Yellow Sea Bottom Cold Water	이형빈	강돈혁 강정훈	The 4rd Korea-China joint workshop on the YESCW	국외

제 2 절 대외 기여도

1. 기술적 측면

- 기후변동에 따른 황해냉수괴의 경년변동성이 나타날 수 있음을 파악.
- 황해 남부해역에 존재하는 열염전선에서 전선을 따라 흐르는 서향류를 확인하고 그 역학을 규명함.
- 황해냉수괴의 발달/형성시 이화학적인 요인들의 분포 특성에 영향을 미칠 수 있음을 확인함.
- 황해 남동부 지역의 지리적인 특성에 따른 이화학적인 요인의 변화가 식물플랑크톤의 생체량 및 군집 구조의 변화에 영향을 미칠 수 있음을 파악함.
- 황해 생태계의 미세생물 먹이망 구조와 기능파악을 통한 생태계 보전에 필요한 자료 획득
- 미래 해양환경 및 생태계 변화는 과거와 현재의 변동 추이를 관측하여 밝힘으로써 예측이 가능하며, 이는 미래수산자원 관리 정책 수립에 있어 중요 지표로 활용될 수 있으므로 국가 경제에 긍정적으로 기여할 것임.
- 환경변화에 따른 수층생태계의 구조와 기능의 변화를 예측함으로써 국제적, 국내적 환경여건 변화에 대처함
- 황해저층냉수괴 해역에서 계절별 동물플랑크톤의 주·야 수직 이동 패턴을 음향학적 기법을 이용 실시간 및 연속적으로 확인
- 먹이망(food web)을 해석하는데 있어 매우 유용한 기법인 생물체 내 안정동위원소비를 분석하는 연구 방법을 황해 주요 생물 중에 적용하여 분석함으로써 명확한 먹이원-섭식자 간 관계를 확인하여 먹이망 규명 기술 노하우를 습득하고, 어족 자원이 다양한 황해 생태계 내 유기체 에너지흐름의 규명으로 주요 관심 생물 중에 대한 해양생태계 먹이망 구조 평가에 유용한 과학적인 근거자료로 제시할 수 있을 것으로 기대됨.
- 본 연구를 통해 황해 냉수대와 관련된 생태계 먹이망 구조 특성을 탄소 및 질소 안정동위원소비를 사용하여 살펴봄으로서 향후 기후변화로 인한 해양생태계 먹이망 구조 변화를 평가하기 위한 기법으로 활용될 수 있을 것으로 예상된다.

2. 경제적 측면

- 황해 주요 먹이 생물인 동물플랑크톤의 종 조성 및 공간적, 수직적 분포 특성을 파악하여 향후 미래 수산자원의 생물량 변동 예측을 위한 자료 제공 가능
- 황해 주요 먹이생물인 동물플랑크톤의 분포 및 자원량을 파악하여 미래 수산자원의 생물량 변동 예측
- 황해 수산자원의 먹이생물인 동물플랑크톤의 분포 및 양을 분석하여 주요 수산 어종의 생물량 변화 예측

제 5 장 연구개발결과의 활용계획

- 춘계, 하계 정밀 관측을 통해 황해냉수와 연안수의 시공간적 분포 특성을 분석하고 기존 자료들과 비교 검토함. 그 결과 봄철 황해내부로 고온고염수의 유입과 함께 황해냉수괴의 경년변동성이 관측되었으며 이는 기후변동과도 연관되고 있음. 황해 냉수 변동성 모의를 위해 수치모델을 구성하고 관측치와 모델 계산치를 비교분석함.
- 자료의 축적과 모델의 수정과정을 통해 황해냉수괴의 경년변동성 역학에 대한 타당성을 부여할 수 있을 것으로 기대함. 또한 황해남부해역 열염전선역에서 전선을 따라 흐르는 서향류의 존재를 파악하고 그 역학 과정을 규명함.
- 이는 황해냉수괴 해역으로 유입되는 난류수의 경로 뿐 만 아니라 냉수괴의 분포 영역을 파악하는데도 도움을 줄 것으로 기대됨.
- 황해냉수괴의 형성/발달시 식물플랑크톤의 생체량에 영향을 미치는 이화학적 요인의 분포 특성을 파악하였으며, 황해저층냉수괴 출현으로 수체의 성층강도가 강해짐으로써 식물플랑크톤 생체량에 영향을 미칠 수 있음을 보여줌. 이는 향후 기후변화에 따른 황해냉수괴의 변화가 황해 해양생태계에 미칠 수 있는 영향을 이해하는데 중요한 정보 제공.
- 황해 저층냉수괴 생태계 중 기초생산자인 식물플랑크톤 군집 분포를 파악하고 대표적인 핵심종을 선택하여 이 지역의 생태계내 에너지 흐름 전달관계를 파악하는 중요 정보를 제공.
- 미세 생물 먹이망에 대한 전문적이고 지속적인 연구를 통해 향후 우리나라 생태계 장기변동을 이해하는데 중요한 기초자료로 활용.
- 황해 냉수대의 미세생물 군집 구조와 변동성 이해
- 황해의 수산자원 변동 예측을 위한 기초자료로 활용
- 국내 수층생태계 기능 연구의 선도적 역할 및 비교, 참고 자료로 활용.
- 황해의 해양환경 자료 및 생태계 자료 획득을 통해 지구 환경 변화에 따른 한반도 주변 해역의 장기 환경보전 정책 수립시 활용
- 황해의 *Euphausia pacifica* 산란시기(춘계)를 확인할 수 있었으며 해양생태계 내에서의 생존 전략을 이해하는데 중요한 정보를 제공
- 황해 주요 먹이원인 동시에 해양생태계 에너지 전달에 있어 중요한 동물플랑크톤의 양 및 분포특성의 기초적인 자료 제공
- 황해의 주요종인 *Calanus sinicus* 이외 황해 생태계를 이해하는데 있어 잠재종으

로 *Oithona atlantica*를 발굴하여 향후 이들의 황해 해양생태계 내의 역할을 이해하기 위한 연구방향을 제시함.

- 황해 생태계에서 주요 먹이원 *Euphausia pacifica* 및 상위 포식자(어류)의 섭식 생태를 통한 먹이망 구조에 대한 정보는 향후 기후변화에 따른 황해 생태계 변동을 이해하는데 중요 자료로 활용 가능.

- 황해저층냉수괴 해역의 생물음향조사는 황해 내의 동물플랑크톤의 시·공간적인 분포 및 양의 기초적인 자료 제공

- 생물음향조사 결과를 이용, 기후 변화에 따른 황해 해양환경 변화 (냉수대 변동)가 해양 생태계에 미칠 영향 예측을 위한 모델 연구에 중요한 자료로서 활용 가능

- 황해저층냉수괴와 관련된 주요 생물 종의 탄소 및 질소 안정동위원소비 분석 및 해석 연구는 국제적 수준의 결과로서 황해 생태계 에너지 흐름을 이해하는데 있어 매우 유용할 것으로 기대되며 향후 냉수괴 변동 등과 같은 기후변화로 인한 생태계 변동성 연구에 있어서 기초적인 자료로 사용될 수 있을 것으로 사료된다.

제 6 장 참고문헌

- 과학기술부. 1998. 황해의 해수순환과 물질플럭스 연구. 한국해양연구소 보고서, BSPN 97357-00-1103-1. 105p.
- 김영옥, 노재훈, 이태희, 장풍국, 주세중, 최동립. 2012. 북부 동중국해 수괴 변화 감시를 위한 유종섬모류 분포 적용. *Ocean and Polar Res.*, 34, 219-228
- 박철, 이창래, 김점창. 1998. 동해 전선역 동물플랑크톤 군집 : 2. 수온과 분포의 관계. *한국수산학회지*. 31, 749-759.
- 박철, 최중기. 1997. 동해 전선역 동물플랑크톤 군집 : 1. 종 목록, 우점종 분포, 중간 유연관계. *한국수산학회지*. 30, 225-238.
- 서승남. 2008. 한국 주변해역 30초 격자수심-KorBathy30s, *한국해안해양공학회*, 20(1): 110-120.
- 임동현, 윤원득, 양준용, 이윤. 2009. 가을-겨울철 황해 북부의 동물플랑크톤 시공분포 특성. *해양환경안전학회*. 15, 339-344.
- 임동현, 윤원득, 조성환, 이윤. 2003. 황해 동물플랑크톤의 시공분포. *한국의 해양생물학*. pp159-169.
- Ashjian CJ, Smith SL and Flagg CN (2002) Distribution, annual cycle, and vertical migration of acoustically derived biomass in the Arabian Sea during 1994-1995. *Deep-Sea Research Part II*, 49, 2377-2402.
- Baker, A de C., B.P. Boden, and E. Brinton. 1990. A practical guide to the euphausiids of the World. Natural History Museum Publications, London, 96pp.
- Balech, E. 1972. Los tintinnidos indicadores de afloramientos de aguas (Ciliata). *Physis*, Buenos Aires 31, 519-528
- Bligh, E.G. and W.J. Dyer. 1959. A rapid method of total lipid extraction and purification. *Can. J. Biochem. Physiol.*, 37, 911-917.
- Bottino, N.R. 1974. The fatty acids of Antarctic phytoplankton and euphausiids. Fatty acid exchange among trophic levels of the Ross Sea. *Mar. Biol.*, 27, 197-204.
- Brinton, E. 1976. Population biology of *Euphausia pacifica* off southern California. *Fish. Bull.*, 74, 733-762.
- Brinton, E., M.D. Ohman, A.W. Townsend, M.D. Knight, and A.L. Bridgeman.

2000. Euphausiids of the World Ocean (World Biodiversity Database CD-ROM Series), Springer-Verlag, New York.
- Budge, S.M., A.M. Springer, S.J. Iverson, G. Sheffield, and C. Rosa. 2008. Blubber fatty acid composition of bowhead whales, *Balaena mysticetus*: Implication for diet assessment and ecosystem monitoring. *J. Exp. Mar. Biol. Ecol.*, 359, 40-46.
- Burkill, P.H., E.S. Edwards, and M.A. Sleigh. 1995. Microzooplankton and their role in controlling phytoplankton growth in the marginal ice zone of the Bellingshausen Sea. *Deep-Sea Res II*, 42, 1277-1290.
- Chang-Keun Kang, Jeong Bae Kim, Kun-Seop Lee, Jong Bin Kim, Pil-Yong Lee, Jae-Sang Hong, 2003. Trophic importance of benthic microalgae to macrozoobenthos in coastal bay systems in Korea: dual stable C and N isotope analyses, *Mar. Ecol. Prog. Ser.*, 259, 79-92.
- Chen, Y.L., D.X. Hu, and F. Wang. 2004. Long-term variabilities of thermodynamic structure of the East China Sea Cold eddy in summer. *Chineses Journal of Oceanology and Limnology*. 22, 224-230.
- China Ocean Press. 1992. Marine Atlas of Bohai Sea, Yellow Sea, East China Sea - Hydrology, China Ocean Press, Beijing, 524pp.
- Chu, P., Wells S.K., Daeger S.D., Szczechowsk C., Carron M. 1997. Temporal and spatial scales of the Yellow Sea thermal variability. *J. Geophys. Res.*, 102(C3):5655-5667.
- Clark, A. 1984. Lipid content and composition of Antarctic krill *Euphausia superba* Dana. *J. Crustac. Biol.*, 4, 285-294.
- Cripps, G.C. and A. Atkinson. 2000. Fatty acid composition as an indicator of carnivory in Antarctic krill, *Euphausia superba*. *Can. J. Fish. Aqua. Sci.*, 57, 31-37.
- Cripps, G.C., J.L. Watkins, J. Hill, and A. Atkinson. 1999. Fatty acid content of Antarctic krill, *Euphausia superba*, at South Georgia related to regional populations and variations in diet. *Mar. Ecol. Prog. Ser.*, 181, 177-188.
- Donald L. Phillips, Seth D. Newsome, Jillian W. Gregg, 2005. Combining sources in stable isotope mixing models: alternative methods, *Oecologia*, 144, 520-527.
- Durbin, E. G., R. G. Campbell, S.L. Gilman, and A.G. Durbin. 1995. Diel feeding

- behavior and ingestion rate in the copepod *Calanus finmarchicus* in the southern Gulf of Maine during late spring. *Continental shelf Res.* 15, 539–570.
- Edler, L. 1979. Phytoplankton and chlorophyll recommendations for biological studies in the Baltic Sea. *Baltic Marine Biologists*, p. 13–25.
- Falk-Petersen, S., J.R. Sargent, O.J. Lønne, and S. Timofeev. 1999. Functional biodiversity of lipids in Antarctic zooplankton: *Calanoides acutus*, *Calanus propinquus*, *Thysanoessa macrura* and *Euphausia crystallorophias*. *Polar. Biol.*, 21, 37–47.
- Falk-Petersen, S., W. Hagen, G. Kattner, A. Clarke, and J. Sargent. 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, 546pp.
- Feinberg, L.R. and W.T. Peterson. 2003. Variability in duration and intensity of euphausiid spawning off central Pregon, 1996–2001. *Prog. Oceanogr.*, 57, 363–379.
- Fry, B., 1991. Stable isotope diagrams of freshwater food webs, *Ecology*, 72(6), 2293–2297.
- Fu, M., Z. Wang, Y. Li, R. Li, P. Sun, X. Wei, X. Lin, and J. Guo. 2009. Phytoplankton biomass size structure and its regulation in the southern Yellow Sea (China): Seasonal variability. *Continental Shelf Research* 29, 2178–2194.
- Fukumori, K., M. Oi, H. Doi, D. Takahashi, N. Okuda, T.W. Miller, M. Kuwae, H. Miyasaka, M.G. Kato, Y. Koizumi and K. Omori, H. Takeoka, 2008. Bivalve tissue as a carbon and nitrogen isotope baseline indicator in coastal ecosystems, *Estuarine, Coastal and Shelf Science*, 79, 45–50.
- Garrison, D.L., M.M. Gowing, and M.P. Hughes. 1998. Nano- and microplankton in the northern Arabian sea during the southwest Monsoon, August–September, 1995 A US–JGOFS study. *Deep-Sea Res. II*, 45, 2269–2299.
- Glwicz ZM (1986) A lunar cycle in zooplankton. *Ecology*. 67, 883–897.
- Gomez-Gutierrez, J., L.R. Reinberg, T. Shaw, W.T. Peterson. 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.
- Guan B.X. 1963. A preliminary study of the temperature variations and the characteristics of the circulation of the cold waer mass of the Yellow Sea. *Oceanologia et Limnologia Sinica* 5, 255–284.
- Hagen, W. and G. Kattner. 1998. Lipid metabolism of the Antarctic euphausiid *Thysanoessa macrura* and its ecological implications. *Limnol. Oceanogr.*, 43, 1894–1901.
- Hagen, W., E.S. Van Vleet, and G. Lattner. 1996. Seasonal lipid storage as overwintering strategy of Antarctic krill. *Mar. Ecol. Prog. Ser.*, 134, 85–89.
- He C.B., Wang Y.X., Lei Z.Y., Xu S. 1959. A preliminary study of the formation and its properies of the Yellow Sea Cold Water Mass. *Oceanologia et Limnologia Sinica* 2, 11–15.
- Herbert, C.E., M.T. Arts and D.V. Chip Weseloh, 2006. Ecological tracers can quantify food web structure and change, *Environmental Science*, 40(18), 5618–5623.
- Heywood KJ (1996) Diel vertical migration of zooplankton in the Northeast Atlantic. *Journal of Plankton Research* 18, 163–184.
- Holligan P., R.D. Pingree, and G.T. Mardell. 1985. Oceanic solitons, nutrient pulses and phytoplankton growth. *Nature*, 314, 348–350.
- Hong, S.Y. 1969. The euphausiids crustacean of korean waters. 291–300. In: *The Kuroshio (a symposium on the Japan Current)*, ed. by J.C. Marr. University of hawaii press.
- Hsueh Y. 1988. Recent current observations in the eastern Yellow Sea. *J. Geophys. Res.*, 93, 6875 - 6884.
- Hu H.G., Z.W. Wan, and Y.L. Yuan. 2004. Simulation of seasonal variation of phytoplankton in the southern Huanghai (Yellow) Sea and analysis on its influential factors. *Acta Oceanologica Sinica* 26, 74–88.
- Hwang, S.J. and R.T. Heath. 1997. The distribution of protozoa across a trophic gradient, factors controlling their abundance and importance in the plankton food web. *J. Plank. Res.*, 19, 491–518.
- Hyun, J.H., D. Kim, C.W. Shin, J.H Noh, E.J. Yang, J.S. Mok, S.H. Kim, H.C.

- Kim, and S. Yoo. 2009. Enhanced phytoplankton and bacterioplankton production coupled to coastal upwelling and an anticyclonic eddy in the Ulleung basin, East Sea Aqu. Micro. Ecol., 54, 45–54.
- Iguchi, N. and T. Ikeda. 1994. Experimental study on brood size, egg hatchability and early development of a euphausiid *Euphausia pacifica* from Toyama Bay, southern Japan Sea. Bull. Jpn. Sea. Natl. Fish. Res. Inst., 44, 47–55.
- Iida K, Mukai T and Hwang DJ (1996) Relationship between acoustic backscattering strength of zooplankton in the sound-scattering layer, ICES J. Mar. Sci., 53, 507–512.
- Inoue N. 1974. Oceanography Characteristics in the western sea of Japan, in: Tsushima Warm Current, edited by Japan Fishery Society, fishery Science series, p27–41.
- IOC, IHO and BODC. 2003. Centenary Edition of the GEBCO Digital Atlas, published on CD-ROM on behalf of the Intergovernmental Oceanographic Commission and the International Hydrographic Organization as part of the General Bathymetric Chart of the Oceans, British Oceanographic Data Centre, Liverpool, U.K.
- James, M.R. and J.A. Hall, 1995. Planktonic ciliated protozoa: their distribution and relationship to environmental variables in a marine coastal system. J. Plank. Res., 17: 659–683.
- Jang S-T., Lee J-H., Kim C-H., Jang C-J., Jang Y.S. 2011. Movement of Cold Water Mass in the Northern East China Sea in Summer. 「The Sea」 J. Korean Soc. Ocenaogr. 16(1): 1–13.
- Jin-Yong Yang and Kyung_Hoon Shin, 2009. Identification of the food sources-metabolism of the pacific oyster *Crassostrea gigas* using carbon and nitrogen stable isotopic ratios, Korean J. Environ. Biol., 27(3), 279–284
- Ju, S-J., H-K. Kang, W.S. Kim, and H.R. Harvey. 2009. Comparative lipid dynamics of euphausiids from the Antarctic and Northeast Pacific Oceans. Mar. Biol., 156, 1459–1473.
- Ju, S-J., J.R. Kucklick, T. Kozlova, and H.R. Harvey. 1997. Lipid accumulation and fatty acid composition during maturation of three pelagic fish species in Lake Baikal. J. Great. Lakes. Res., 23, 241–253.

- Kalie A. Pitt, Anne-Laure Clement, Rod M. Connolly, Delphine Thibault-Botha, 2008. Predation by jellyfish on large and emergent zooplankton: Implications for benthic-pelagic coupling, *Estuarine, Coastal and Shelf Science*, 76, 827-833.
- Kang J.H., and W.S. Kim. 2008. Spring dominant copepods and their distribution pattern in the Yellow Sea. *Ocean Science Journal*, 43(2), 67-69.
- Kang J-H, and Kim W-S. 2008. Spring Dominant Copepods and Their Distribution Pattern in the Yellow Sea. *Ocean Science Journal*, 43(2), 67-79.
- Kang Y-Q, Kim H-K. 1987. Relationships between the winter-time surface water temperature and the summer-time bottom water temperature in the West Sea of Korea. *J. Oceanolo. Soc. Korea*, 22 (4), 228 - 235.
- 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), 742-758.
- Kasai H., S. Hiroaki, and Y. Akira. 1997. Variability in timing and magnitude of spring bloom in the Oyashio region, the western subarctic Pacific off Hokkaido, Japan. *Fish. Oceanogr.*, 6(2), 4-88.
- Kato S, and A. Taniguchi. 1993. Tintinnid ciliates as indicator species of different water masses in the western North Pacific Polar Front. *Fish Oceanogr* 2, 166-174
- Kattner. G. and W. Hagen. 1998. Lipid metabolism of the Antarctic euphausiid *Euphausia crystallorophias* and its ecological implications. *Mar. Ecol. Prog. Ser.*, 170, 203-213.
- Kim D, S.H. Choi, K.H. Kim, J.H. Shim, S.J Yoo, and C.H. Kim. 2009. Spatial and temporal variations in nutrient and chlorophyll-*a* concentrations in the northern East China Sea surrounding Cheju Island. *Continental Shelf Research* 29, 1426-1436.
- Kim, H.S., A. Yamaguchi, and T. Ikeda. 2009. Abundance, biomass and life cycle patterns of euphausiids (*Euphausia pacifica*, *Thysanoessa inspinata* and *T. longipes*) in the Oyashio region, western subarctic Pacific.

- Plankton. Benthos. Res., 4(2), 43-52.
- Kim, W.-S., J.-M. Yoo and C.-S. Myung. 1993. A review on the copepods in the South Sea of Korea. Bull. Korean Fish. Soc., 26, 266-278.
- 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 Res Lab, F62, p19-66.
- Kusumoto, N., Y. Ando, R. Matsukura, and T. Mukai. 2004. Lipid profile of krill *Euphausia pacifica* collected in the Pacific Ocean near Funka Bay, Hokkaido, Japn. J. Oleo. Sci., 53, 45-51.
- Landry, M.R. and R.P. Hassett. 1982. Estimating the grazing impact of marine microzooplankton. Mar. Biol., 67, 283-288.
- Landry, M.R., S.L. Brown, J. Neveux, D. Dupouy, J. Blanchot, S. Christensen, and R.R. Bidigare. 2003. Phytoplankton growth and microzooplankton grazing in high-nutrient, low-chlorophyll waters of the equatorial Pacific: Community and taxon-specific rate assessment from pigment and flow cytometric analysis. J. Geophys. Res., 108, 8142.
- Landy, M.R. and D.L. Kirchman. 2002. Microbial community structure and variability in the tropical Pacific. Deep-Sea Res. II, 49, 2669-2693.
- Lee DJ, Shin HI and Park JH (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 MA, Wang JR, Cheng TJ, Chou SC and Lee KT (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.
- Lee, R.F., W. Hagen, and G. Kattner. 2006. Lipid storage in marine zooplankton. Mar. Ecol. Prog. Ser., 307, 273-306.
- Lee, Y.C., Y.S. Qin, and R.Y. Liu. 1998. Yellow Sea Atlas. Ho Young Publishing company, Seoul, 524p.
- Li, H., X. Tian, D. Tao and L. Ruihua. 2006. Effect of the Yellow Sea Cold Water Mass (YSCWM) on distribution of bacterioplankton. Acta Ecol.

- Sinica. 26, 1012–1020.
- Lie H.J. 1986. Summertime hydrographic features in the southeastern Hwanghae. *Prog. Oceanogr.* 17, 229–242.
- Lie H-J, Cho C-H, Lee J-H, Lee S. 2001. Does the Yellow Sea Warm Current really exist as a persistent mean flow? *J. Geophys. Res.* 106(C10): 22199–22210.
- Lie H-J. 1984. A note on water masses and general circulation in the Yellow Sea (Hwanghae). *J. Oceanogr. Soc. Korea* 19(2): 187–194.
- Lie H-J. 1986. Summertime hydrographic features in the southeastern Hwanghae. *Prog. Oceanogr.* 17:229–17242.
- Lie H-J. 1989. Tidal fronts in the southeastern Hwanghae (Yellow Sea). *Cont. Shelf Res.* 9(6): 527–546
- Lin C., X. Ning, J. Su, Y. Lim, and B. Xu. 2005. Environmental changes and the responses of the ecosystems of the Yellow Sea during 1976–2000. *Journal of Marine Systems* 55, 223–234.
- Lin X. and Yang J. 2011b. An asymmetric upwind flow, Yellow Sea Warm Current: 2. Arrested topographic waves in response to the northwesterly wind. *J. Geophys. Res.*, 116, C04027, doi:10.1029/2010JC006514.
- Lin X., Yang J., Guo J., Zhang Z, Yin Y, Song X and Zhang X. 2011a. An asymmetric upwind flow, Yellow Sea Warm Current: 1. New observations in the western Yellow Sea. *J. Geophys. Res.*, 116, C04026, doi:10.1029/2010JC006513.
- Lindley, J.A. 1975. Continuous plankton records: a plankton atlas of the North Atlantic and North Sea: Supplement 3–Tintinnida (Protozoa, Ciliophora) in 1965. *Bull Mar Ecol.*, 8, 201–213
- Mauchline, J. 1980. The biology of the euphausiids. *Adv. Mar. Biol.*, 18, 373–623.
- Mauchline, J. and L.R. Fisher. 1969. The biology of the euphausiids. *Adv. Mar. Biol.*, 7, 1–454.
- McCutchan, J.H. Jr, W.M. Lewis Jr, C. Kendall and C.C. McGrath, 2003. Variation in trophic shift for stable isotope ratios of carbon, nitrogen, and sulfur. *Oikos*, 102, 378–390.

- Medwin H and Clay CS (1998) Biomass echoes, reverberation, and scattering models In: *Fundamentals of Acoustical Oceanography*. Academic Press, pp. 348–404.
- Menden-Deuer S, and E.J. Lessard. 2000. Carbon to volume relationships for dinoflagellates, diatoms and other protist plankton. *Limnol Oceanogr* 45, 569–579
- Michener R.H. and Kaufman L., 2007. Stable isotopes as tracers in marine food webs: an update. In Michener R. and Lajtha K. (eds) *Stable isotopes in ecology and environmental science*. Boston, MA: Blackwell Publishing, 238–270.
- Minagawa, M. and E. Wada, 1984. Stepwise enrichment of ^{15}N along food chains: Further evidence and the relation between $\delta^{15}\text{N}$ and animal age, *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 48, 1135–1140.
- Moon, J-H, Hirose, N., Yoon, J-H. 2009. Comparison of wind and tidal contributions to seasonal circulation of the Yellow Sea, *J. Geophys. Res.*, 114, C08016.
- Myriax Pty Ltd. (2008) Myriax EchoView software Pty Ltd, Hobart, Tasmania, Australia.
- Nakao T. 1977. Oceanic variability in relation to fisheries in the East China Sea and the Yellow Sea. *J Fac. Mar. Sci. Tec.* 190–367.
- Nakato, T., 1977. Oceanic variability in relation to fisheries in the East China Sea and the Yellow Sea, *J. Faculty of Marine Science Technology*, special number 199–367.
- Odate T., and K. Furuya. 1998. Well-developed subsurface chlorophyll maximum near Komahashi No. 2 Seamount in the summer of 1991. *Deep-Sea Research I* 45, 1959–1607.
- Ou H.W. 1984. Geostrophic Adjustment: A mechanism for frontogenesis, *J. Phys. Oceanogr.*, 14, 994–1000.
- Park S-H., Chu P.C., Lee J-H. 2011. Interannual-to-interdecadal variability of the Yellow Sea Cold Water Mass in 1967–2008: Characteristics and seasonal forcings. *J. Mar. Sys.*, 87: 177–193
- Park Y-H. 1986. A simple theoretical model for the upwind flow in the

- southern Yellow Sea. J. Oceanogr. Soc. Korea, 21(4): 203–210.
- Per B. Hilliland, Towe Holmborn and Elena Gorokhova, 2012. Assessing diet of the non-indigenous predatory cladoceran *Cercopagis pengoi* using stable isotopes, Journal of plankton research, 34(5), 376–387.
- Peterson, B.J., 1999. Stable isotopes as tracers of organic matter input and transfer in benthic food webs: A review, Acta Oecologia, 20(4), 497–487.
- Pierce, R.W. and J.F. Turner. 1992. Ecology of planktonic ciliates in marine food webs. Rev. Auat. Sci., 6, 139–181.
- Pond, D., J. Warkins, J. Priddle, and J. Sargent. 1995. Variation in the lipid content and composition of Antarctic krill *Euphausia superba* at South Georgia. Mar. Ecol. Prog. Ser., 117, 49–57.
- Post, D.M., 2002. Using stable isotopes to estimate trophic position: models, methods, and assumptions. Ecology, 83(3), 703–718.
- Post, D.M., M.L. Pace and N.G. Halrston, 2000. Ecosystem size determines food-chain length in lake, Nature, 45(29), 1047–1049.
- Pu, X., S. Sun, B. Yang, G. Zhang, and F. Zhang. 2004. Life history strategies of *Calanus sinicus* in the southern Yellow Sea in summer. J. Plankton. Res., 26, 1059–1068.
- Pu, X.-M., S. Sun, B. yang, P. Ji, Y.-S. Zhang and F. Zhang. 2004a. The combined effects of temperature and food supply on *Calanus sinicus* in the southern Yellow Sea in summer. J. Plankton Res. 26, 1049–1057.
- Pu, X.-M., S. Sun, B. yang, P. Ji, Y.-S. Zhang and F. Zhang. 2004b. Life history strategies of *Calanus sinicus* in the southern Yellow Sea in summer. J. Plankton Res. 26, 1059–1068.
- Putt, M., and D.K. Stoecker. 1989. An experimentally determined carbon:volume ratio for marine “oligotrichous” ciliates from estuarine and coastal waters. Limnol. Oceanogr., 34, 1097–1103.
- Quetin, L.B. and R.M. Ross. 1991. Behavioural and physiological characteristics of the Antarctic krill, *Euphausia superba*. Am. Zool., 31, 49–63.
- Rassoulzadegan, F. and M. Étienne. 1981. Grazing rate of the tintinnid *Stenosoella ventricosa* (Clap. & Lachm.) Jörg. on the spectrum of the naturally occurring particulate matter from a Mediterranean neritic area. Limnol. Oceanogr., 26, 258–270.

- Rogachev KA, Carmack EC and Salomatin AS (2000) Recent thermohaline transition in the Pacific western subarctic boundary currents and their fresh core eddies: the response of sound-scattering layers. *J. Mar. Sys.*, 26, 239-258.
- Ruddick, B. and Gargett A.E. 2003. Oceanic double-infusion: Introduction. *Prog. Oceanogr.*, 56, 381 - 393.
- Sargent, J.R., J. Henderson, and D.R. Tocher. 1989. The lipids. In: Halver JE (ed) *Fish Nutrition*, 153-218pp.
- Sheldon, R.W., P. Nival and F. Rassoulzadegan. 1986. An experimental investigation of a flagellate-ciliate-copepod food chain with some observations relevant to the linear biomass hypothesis. *Limnol. Oceanogr.*, 31, 184-189.
- Sherr, E.B. and B.F. Sherr. 1988. Role of microbes in pelagic food webs: a revised concept. *Limnol. Oceanogr.*, 33, 1225-1227.
- Sherr, E.B., B.F. Sherr and G.A. Paffenhofer. 1986. Phagotrophic protozoa as food for metazoans: a "missing" trophic link in marine pelagic food webs? *Mar. Microb. Food Webs*, 1, 61-80.
- Shim, J. H. and T.-S Lee. 1986. Studies of the plankton in the southwestern waters of the East Sea (Sea of Japan) (III) Zooplankton-standing stock, composition and distribution. *J. Oceanol. Soc. Korea*. 21, 146-155.
- Smiles, M.C. and W.G. Percy. 1971. Size structure and growth rate of *Euphausia pacifica* off the Oregon coast. *Fish. Bull.*, 69, 79-86.
- Stoecker, D.K. and J.M. Capuzzo. 1990. Predation on protozoa: its importance to zooplankton. *J. Plank. Res.*, 12, 92-908.
- Su Y.S., Weng X.C. 1994. Water masses in China Seas. In: Zhou D, Liang Y-B, Tseng C K (Eds.), *Oceanology of China Seas*, vol.1. Kluwer Academic Publishers, The Netherlands, pp 3-16.
- Suh, H-L. 1990. *Pseudeuphausia sinica* (Euphausiacea, Crustacea): A new record from the Korean waters. *Bull. Kor. Fish. Soc.*, 23, 65-67.
- Suh, H-L., H.Y. Soh, and S.Y. Hong. 1993. Larval development of the euphausiid *Euphausia pacifica* in the Yellow Sea. *Mar. Biol.*, 115, 625-633.
- Sun, S. 2008. Krill Research in China. Krill working group, PICES.

- Takahashi, T., I. Uchiyama. 2007. Morphology of the naupliar stages of some *Oithona* species (Copepoda: Cyclopoida) occurring in Toyama Bay, Southern Japan Sea. *Plankton Benthos Res.* 2, 12-27.
- Takatsuji, H., K. Hamasaki, T. Toda and S. Taguchi. 1997. Improved technique for the gut fluorescence method in a feeding study of small zooplankton. *J. plankton Res.* 19, 159-165.
- Taki, K. 2004. Distribution and life history of *Euphausia pacifica* off northeastern Japan. *Fish. Oceanogr.*, 13, S34-S43.
- Uda M. 1934. Hydrographical researches on the normal monthly conditions in the Japan Sea, the Yellow Sea and the Okhotsk Sea. *J. Imperial Fish. Experiment Sta.*, 5, 191-236.
- Uda, M., 1934. Hydrographical researches on the normal monthly conditions in the Japan Sea, the Yellow Sea, and the Okhotsk Sea, *Jour. Imp. Fish. Exp. Stn.* 5, 191-236.
- UNDP/GEF. 2011. Seasonal variation of the major environment parameters in the Yellow Sea Basin. p. 96
- Verity, P.G., and C. Langdon. 1984. Relationships between lorica volume, carbon, nitrogen and ATP content of tintinnids in Narragansett Bay. *J. Plank. Res.*, 6: 859-868.
- Verity, P.G., D.K. Stoecker, M.E. Sieracki, and J.R. Nelson. 1996. Microzooplankton grazing of primary production at 140°W in the Equatorial Pacific. *Deep-Sea Res.* II, 43, 1227-125.
- Virtue, P., P.D. Nichols, S. Nicol, A. McMinn, and E.L. Sikes. 1993. The lipid composition of *Euphausia superba* Dana in relation to the nutritional value of *Phaeocystis pouchetii* (Hariot) Lagerheim. *Antarctic. Sci.*, 5, 169-177.
- Virtue, P., P.D. Nichols, S. Nicol, and G.W. Hosie. 1996. Reproductive trade-off in male Antarctic krill, *Euphausia superba*. *Mar. Biol.*, 126, 521-527.
- Wade IP and Heywood KJ (2001) Acoustic backscatter observations of zooplankton abundance and behaviour and the influence of oceanic fronts in the northeast Atlantic. *Deep-Sea Research Part II.* 48, 899-924.
- Wang R., Zuo T, and Wang K. 2003. The Yellow Sea Cold Bottom Water - an overwintering site for *Calanus sinicus* (Copepoda, Crustacea), *J. Plankton*

- Res., 25(2), 169–183.
- Wang, R., T. Zuo and K. Wang. 2003. The Yellow Sea Cold Bottom Water –and overwintering site for *Calanus sinicus* (Copepoda, Crustacea). J. plankton Res. 25, 169–183.
- Wang, R., T. Zuo, and K.E. Wang. 2003. The Yellow Sea cold bottom water—an overwintering site for *Calanus sinicus* (copepoda, Crustacea). J. Plankton. Res., 25, 169–183.
- Weisse, T., H. Muller, R.M. Pinto-Ceolho, A. Schweizer, D. Springman and G. Baldringer. 1990. Response of the microbial loop to the phytoplankton bloom in a large prealpine lake. Limnol. Oceanogr., 35, 781–794.
- Weng X., Ding Z., Zhang Y. 1994. 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.
- Wylie, J.L. and D.J. Currie. 1991. The relative importance of bacteria and algae as food source for crustacean zooplankton. Limnol. Oceanogr., 36, 708–728.
- Xuan J.L., F. Zhou, D.J. Huang, H. Wei, C.G. Liu, and C.X. Xing. 2011. Physical process and their role on the spatial and temporal variability of the spring phytoplankton bloom in the central Yellow Sea. Acta Ecologica Sinica, 31, 61–70.
- Yang, E. J., J.K. Choi and J.H. Hyun. 2008. Seasonal variation in the community and size structure of nano- and microzooplankton in Gyeonggi Bay, Yellow Sea. Est. Coas. and shelf Sci., 77, 320–330
- Yoon, W.D., S.H. Cho, D. Lim, Y.K. Choi, and Y. Lee. 2000. Spatial distribution of *Euphausia pacifica* (Euphausiacea: Crustacea) in the Yellow Sea. J. Plankton. Res., 22(5), 939–949.
- You Y. 2002. A global ocean climatological atlas of the Turner angle: implications for double-diffusion and water-mass structure, Deep-Sea Res., 49, 2075–2093.
- Yu F, Zhang Z, Diao X and Guo J. 2009. Observational evidence of the Yellow Sea Warm Current. Chinese Journal of Oceanology and Limnology, 27(2),

677-683,DOI: 10.1007/s00343-010-0006-2.

Yun, S.G., B.S. Yoon, D.G. Paik and C.K. Kang, 2006. The origin of organic matters utilized by soft bottom macrozoobenthos in Tongyeong, Journal of Korea Fishery Society, 39, 189-197.