Article

시화호 중형동물플랑크톤 군집의 시공간적 변동

유정규¹ · 명철수² · 최종기^{1*} · 홍현표¹ · 김은수³

¹인하대학교 자연과학대학 해양학과
(402-751) 인천광역시 남구 용현동 253

²(주)에코션
(406-840) 인천광역시 연수구 송도동 7-27 산업기술연구집적센터 101-503

³한국해양연구원 해양환경 · 방제연구본부
(425-600) 경기도 안산시 안산우체국 사서함 29

Spatial and Temporal Variation of Mesozooplankton
Community in Lake Sihwa, Korea

Jeong Kyu Yoo¹, Cheol Soo Myung², Joong Ki Choi^{1*},
Hyun Pyo Hong¹, and Eun Soo Kim³

¹Department of Oceanography, College of Natural Sciences
Inha University, Incheon 402-752, Korea

²ECOCEAN Co. Ltd.,
Incheon 406-840, Korea

³Marine Environment & Pollution Prevention Research Department, KORDI
Ansan P.O. Box 29, Seoul 425-600, Korea

Abstract : The purpose of this study was to investigate the temporal and spatial variability of taxonomic groups and major species of the mesozooplankton community in Lake Shihwa, Korea. Monthly collections were carried out at five stations in Lake Shihwa for a period of one year. The mesozooplankton community showed distinct seasonal variability with water temperature and salinity. Major mesozooplankton species in each seasonal community were derived from non-metric MDS and SIMPER as follows: winter community (*Acartia hongi* and *Eurytemora pacifica*), spring community (*Acartia hudsonica* and Polychaeta larvae), summer community (*Acartia sinjiensis*, *Pavocalanus crassirostris*, *Evadne tergestina* and Cirripedia nauplii) and fall community (*Paracalanus indicus* and *Podon leuckarti*). The succession of the seasonal species, *A. hudsonica* and *A. sinjiensis*, was the most remarkable event during the seasonal changes of the mesozooplankton community. The species response curve of these species fitted with the logistic regression in relation to water temperature and salinity. The curve also correctly represented the characteristics of the occurrence of *A. hudsonica* and *A. sinjiensis* in Lake Shihwa.

Key words : mesozooplankton, seasonal species succession, *Acartia hudsonica*, *Acartia sinjiensis*, species response curve

*Corresponding author. E-mail : jkchoi@inha.ac.kr

1. 서 론

수심이 낮고 조석 간만의 차가 큰 서해 연안은 국내 갯벌의 83%를 차지할 만큼 갯벌이 넓게 발달해 있다(해양수산부 1998). 이러한 조건으로 인해 서해 연안은 국토확장과 지역개발이라는 미명 하에 오래전부터 크고 작은 간척매립사업이 활발하게 진행되어 왔다. 연안 매립은 농지, 도시 용지, 공업 및 산업 단지, 항만 시설의 확보와 용수 공급을 위한 담수호 조성을 통해 국토의 효율적이고 균형적인 개발을 도모하지만 동시에 자연 환경 및 생태계의 필연적인 손상을 동반한다. 시화호는 대단위 간척종합개발 사업의 일환으로 1987년에 물막이 공사가 시작되어 1994년에 완료되면서 인공호수로 생성되었다(한국수자원공사·농어촌진흥공사 1996). 시화호는 본래 간척지에 조성될 농지나 산업단지에 용수를 공급하기 위한 담수호로 계획되었으나 담수화 과정에서 발생한 부영양화, 성층 형성, 수질악화, 식물플랑크톤 대증식 그리고 무산소 환경의 출현 등으로 인해 매우 심각한 환경 문제(박 등 1997; 최 등 1997; Lee and Cha 1997; Han and Park 1999)를 야기하여 담수화를 포기하고 2000년 해수화를 확정하였으며, 해수화 확정 이후 상시 배수 갑문 운영을 통해 연안수와 해수 유통을 실시하고 있다. 그러나 여전히 폐쇄적인 구조와 제한적인 해수 유통으로 인해 강우 등 기상 변화에 민감하며, 부영양화, 성층 형성, 그리고 저산소층 출현 등으로 인해 불안정한 환경이 나타나고 있다(김 등 2002; 박 등 2003; 김 등 2004; 김 등 2007).

동물플랑크톤은 해양 먹이망에서 일차생산자와 상위 단계의 수산 및 어류자원을 연결하는 중요한 중간자 역할을 하며, 특히 생산력이 높은 연안 먹이망에서 중요한 구성원으로 인식된다(Raymont 1983; Runge 1988). 또한 동물플랑크톤은 무생물 또는 생물학적 환경 변화에 민감하여 직접적으로 반응하기 때문에 환경 변화의 지시자로서 인식된다(Beaugrand 2004; Bonnet and Frid 2004; Marques et al. 2008). 따라서 연안 생태계에서 동물플랑크톤에 대한 연구는 수산자원의 변화를 예측하고 잠재적으로 환경 변화를 감지하는 측면에서 매우 중요하다. 일반적으로 생태계에서 생물 집단은 생물학적 상호 관계 뿐만 아니라 무생물학적 환경에 영향을 받으며, 이는 담수 또는 해양 환경보다는 환경적으로 변이성이 큰 기수 환경에서 뚜렷이 관찰된다(McLusky and Elliott 2004). 비록 시화호는 자연적인 기수 환경과는 차이를 보이지만 수온의 계절 변화가 크고 앞서 언급한 바와 같이 강우에 따른 담수 유입, 성층 형성, 저산소 현상 등 시공간적으로 이벤트성 환경 변화가 크게 나타나기 때문에 환경 요인과 동물플랑크톤 변동에 관한 연구를 하기에 비교적 유리한 조건을 가지고 있다. 시화호에서는 현재 배수 갑문을 통해 연안 방류를 지속적

으로 하고 있으며, 이는 주변 연안역의 생물 군집 변화에 영향을 줄 수 있다. 그러나 시화호 방류가 주변 연안역에 미치는 영향을 파악하기 위해서는 우선적으로 시화호 내의 생물 군집 변동에 대한 연구가 선행되어야 한다. 또한 향후 시화호 조력발전 등 개발 시나리오에 따라 현 상태와는 다른 환경적 변화를 겪게 될 가능성이 높으며, 연안역에서 시화호와 유사한 개발이 진행될 가능성도 배제할 수 없다. 따라서 시화호에서 환경 변화에 민감하고 먹이망에서 기초 생산을 담당하는 부유생물에 대한 연구는 타 개발에 따른 생태계 변화를 비교 예측하는데 필요한 본보기 연구가 될 수 있다. 그러나 시화호에서 부유생물 군집에 대한 연구는 현재까지 매우 미흡한 실정이다. 식물플랑크톤에 관한 연구는 일부 있어왔으나(최 등 1997; 신 등 2000a; 신 등 2000b; 이 등 2006) 특히 동물플랑크톤에 대한 연구는 박과 허(1997)를 제외하고 현재까지 전무하다.

따라서 본 연구는 해수화 확정 이후 연구가 전무한 현 시화호 환경과 동물플랑크톤 군집 현황을 월별 자료를 통해 파악하고 환경 변화와 동물플랑크톤 군집 변동의 상관성을 파악하고자 한다. 또한 중별 출현 특성을 모델화하여 향후 시화호 환경 변화에 따른 동물플랑크톤 변동을 예측할 수 있는 자료로 활용하기를 기대한다.

2. 재료 및 방법

시료 채집 및 분석

동물플랑크톤의 채집은 2008년 1월부터 12월까지 매달 시화호 상류부터 갑문 인근 수역까지 5개 정점에서 수행되었다(Fig. 1). 조사 정점의 수심은 2.5~15.5 m의 범위를 보였으며, 중앙수역에서 높고 상류 수역에서 낮게 나타났다. 동물플랑크톤 시료 채집은 망구 45 cm, 망목 200 μ m 인 원추형 네트를 이용하여 수심 5 m 이하에서는 수평 예인하였으며, 수심 5 m 이상에서는 저층부터 표층까지 경사 예인하였다. 해파리 및 생물량이 지나치게 많은 경우 네트의 막힘으로 인한 채집 오류를 줄이기 위해 예인 시간을 줄이거나 5~10회 수직 채집을 통해 시료를 채집하였다. 네트에 의해 여과된 해수의 양을 측정하기 위해 네트에 유량계(General Oceanics, 2030R)를 부착하였으며, 네트에 의해 여과된 해수량은 유량계의 회전수에 진행거리로 환산하기 위한 계수와 망구 면적을 곱하여 구하였다. 예인 후 네트와 버킷을 세척하여 버킷에 모인 시료를 시료병으로 옮긴 후 즉시 시료 내 최종 농도가 4~5%가 되도록 중성포르말린(formalin)으로 고정하였다.

채집된 동물플랑크톤 시료는 종구분과 계수를 위해 총량을 메스실린더로 계량한 후 잘 혼합하여 총 시료 부피를 시료량에 따라 1/4~1/64로 분할하여 계수판으로 옮긴 후 해부 현미경(Olympus SZX-12) 하에서 분류하고 계수

Fig. 1. A map showing the mesozooplankton and water sampling sites (SH1-SH5) in Lake Shihwa.

하였다. 동정된 각 동물플랑크톤은 단위 체적(1 m^3)당 개체수로 환산하였다. 동물플랑크톤 시료 채집과 동시에 수온, 염분, 용존산소를 YSI-6600으로 측정하였으며, 식물플랑크톤의 엽록소 a 농도를 측정하였다. 또한 강수량 자료는 기상청(<http://www.kma.go.kr>)의 인천 지역 자료를 인용하였다. 엽록소 a 농도는 수심 1 m 깊이에서 Niskin을 이용하여 채수한 후 해수 300 ml를 유리섬유여과지(Whatman, GF/C)로 여과하였다. 여과지는 패트리디쉬에 넣은 후 빛을 차단하기 위해 호일로 감싼 후 드라이아이스가 보관된 아이스 박스에서 냉동 보관하였다. 실험실에서 미리 준비된 90% 아세톤에 여과지를 넣고 냉암소에서 24시간 동안 보관 후 형광 광도계(Turner design fluorometer)로 엽록소 a 농도를 측정하였다(Parsons et al. 1984).

자료분석

중형동물플랑크톤 군집의 유사성을 파악하기 위해 Bray-curtis의 유사도 지수로 집괴분석(Cluster analysis, CA)을 실시하였다. 집괴분석에 이용된 동물플랑크톤 개체수는 정규분포의 가정을 위해 자연로그 $\log_e(\text{개체수}+1)$ 로 변환하여 분석에 이용하였다. 집괴분석 결과에서 유사도 50%를 기준으로 구분된 그룹에 기초하여 다차원척도(Non-metric Multidimensional Scaling, NMDS) 배열법으로 나타내었으며, 그룹 구분에 대한 유의성을 파악하기 위해 ANOSIM(Analysis of Similarity)을 실시하였다. 그리고 그룹 간 군집 차이를 나타내게 하는 주요 동물플랑크톤을 파악하기 위해 SIMPER(Similarity Percentages) 분석을 수행하였다. 주요 동물플랑크톤은 각 구분된 군집에서 10% 이상의 기여율을 기준으로 선정하였으며, 이들 중은 환경 요인과 상관분석을 실시하였다. 상관분석 전 모든

자료는 Kolmogorov-Smirnov 검정을 통해 정규성 분포 검정을 실시하였으며, 모든 자료가 정규분포를 따르지 않아 Spearman rank correlation을 실시하였다. 환경 요인으로 수온, 염분, 엽록소 a 농도, 용존산소 등이 이용되었으며, 저층 빈산소 현상과 주요 동물플랑크톤 간 상관성을 파악하기 위해 용존산소는 표층과 저층으로 구분하여 분석에 이용하였다. CA, NMDS, ANOSIM 그리고 SIMPER 분석은 Primer(version 5.2.4)로 수행되었으며, 상관분석은 SPSS(version 12)로 수행되었다.

상관분석에 이용된 동물플랑크톤 출현종은 로지스틱 회귀모델을 이용하여 수온 및 염분에 따른 출현 가능성을 제시하였다(Hosmer and Lemeshow 2000; Marques et al. 2008). 모델 설정에서 동물플랑크톤 개체수 자료는 계절성과 일시적인 출현량 증가 특성 그리고 채집 여건에 따른 채집 크기 및 방법의 차이로 인해 발생하는 생물량의 변이성을 최소화하기 위해 각 정점에 대한 종 출현유무(출현: 1, 비출현: 0)의 자료로 이원화하였다. 수온과 염분 자료는 χ^2 검정을 기초로 Wald 통계량으로 유의성을 판단하였다($p < 0.05$). 회귀계수의 추정에는 최대우도법(Maximum likelihood method)을 이용하였다. 수온과 염분에 따른 주요 동물플랑크톤의 종 반응 선형 모델(Species response curve)은 CANOCO(version 4.5)을 통해 일반화하였다.

3. 결 과

환경 요인

전 정점에서 수온은 표층에서 $0.3 \sim 27.8^\circ\text{C}$, 저층에서 $0.1 \sim 24.3^\circ\text{C}$ 의 범위를 보였으며, 평균적으로 7월에 가장 높았다. 표층과 저층 간 수온 차이는 5월부터 8월 사이에 상대적으로 높게 나타났다(Fig. 2). 동 시기의 정점 간 수온

Fig. 2. Monthly variation of water temperature, salinity, dissolved oxygen and chlorophyll *a* in average, and precipitation in Lake Shihwa. The vertical bars indicate the standard deviation of the mean.

차이는 크지 않았다. 염분은 표층에서 18.2~31.3 psu, 저층에서 24.6~31.5 psu의 범위로 나타났으며, 평균적으로 강수량이 가장 높은 7월에 가장 낮았다. 표층과 저층 간 염분 차이는 6월부터 8월 사이에 상대적으로 크게 나타나고 있으며, 7월에 가장 크게 나타났다(Fig. 2). 용존산소는 표층에서 1.6~16.5 mg/l, 저층에서 0.7~12.4 mg/l의 범위를 보이며, 7월에 공통적으로 가장 낮았다. 수온 및 염분의 수직적 차이가 공통적으로 큰 7월과 8월 사이에 전 정점의 저층에서 빈산소 현상(Hypoxia)이 관찰되었다(Fig. 2). 표층 엽록소 *a* 농도는 전 정점에서 2.2~31.2 µg/l의 범위를 보였다. 평균 엽록소 *a* 농도는 1월, 4~5월, 7~8월, 10월, 12월에 peak가 나타났으며, 이 중 7월에 가장 높았다(Fig. 2). 정점 간 엽록소 *a* 농도의 편차는 2, 11, 12월에 가장 작았으며, 4~7월 사이에 크게 나타나는 특징을 보였다.

평균 출현 개체수

중형동물플랑크톤의 월별 평균 개체수는 591~89,631 indiv./m³의 범위를 보이면서 4월에 가장 높고 11월에 가

Fig. 3. Monthly variation in mean abundance of total mesozooplankton, copepoda, cladocera and planktonic larvae. The vertical bars indicate the standard deviation of the mean.

장 낮았다(Fig. 3). 1월과 2월에도 상대적으로 높은 개체수가 나타났으며, 8월과 9월에 작은 피크가 나타나는 특징을 보였다. 요각류는 전체 개체수에서 평균 80.5%를 차지하면서 302~85,027 indiv./m³의 월 평균 개체수 범위를 보였다. 요각류의 월간 평균 개체수 변동 양상은 전체 개체수와 거의 유사하였다. 지각류는 9월에만 평균 8,336 indiv./m³이 출현하여 급격한 증가 현상을 보였으며, 12월에 작은 증가 현상이 관찰되었다. 부유유생 분류군은 4, 8, 10월에 개체수 증가 현상이 나타났으며, 그 중 4월의 평균 개체수(2,975 indiv./m³)가 가장 높았다.

정점별 동물플랑크톤 군집 및 우점종 변동

조사 해역의 정점별 동물플랑크톤 군집의 변화 특성은 Fig. 4에 나타내었다. 최상류에 위치한 SH1에서 전체 동물플랑크톤의 개체수는 2월과 4월에 peak를 보였으며, 9월에 작은 peak가 나타났다. 2월과 4월에는 각각 요각류 *Acartia hongii*와 *A. hudsonica*가 높은 개체수 점유율을 나타냈으며, 공통적으로 미성숙 *Acartia*가 높은 점유율을 보였다. 9월에는 지각류 *Evadne tergestina*와 요각류 *A. sinjiensis*의 상대개체수가 높게 나타났다. 대부분 시기에서 요각류가 높은 점유율을 보였으나 3월에 해파리 유생(young medusa), 9월에 지각류 *E. tergestina*, 그리고 10월

Fig. 4. Monthly change in mesozooplankton abundance (upper), higher taxonomic composition (middle) and dominant species composition (bottom) at SH1, SH2 and SH3. Abbreviations of dominant species are as follows: Aho: *Acartia hongii*; Asin: *Acartia sinjiensis*; Ahud: *Acartia hudsonica*; Eury: *Eurytemora pacifica*; Pind: *Paracalanus indicus*; Acopt: copepodite *Acartia*; Eocopt: copepodite *Eurytemora*; copt: other copepodites; medus: young medusae; Planul: Planulae of medusae; Evad: *Evadne tergestina*; Podon: *Podon leuckartii*; Cirri: Cirripedia nauplii and cypris; Others: other zooplankton.

Fig. 4. Continued. at SH4 and SH5.

에 따개비 유생(*Cirripedia nauplii*+*cypris*)의 점유율이 매우 높게 나타났다. SH2에서는 1월, 4월, 8월에 전체 개체수 peak가 나타났으며, 4월에 가장 높았다. SH1과 매우 유사한 군집 구성 변화를 나타냈으며, 10월에 *Cirripedia nauplii*가 높은 점유율을 보인 것은 SH1과 동일하였으나 지각류 *Podon leuckarti*의 점유율이 높은 것이 특징이었고 이러한 경향이 11월까지 지속되는 것이 SH1과 차이를 보인 점이다. SH3에서 전체 개체수의 변화는 SH2와 매우 유사하였다. 그러나 3월에 해파리 유생의 개체수 점유율이 낮고 미성숙 *Eurytemora*의 점유율이 높은 것과 10월에 요각류 *Paracalanus indicus*의 점유율이 높게 나타난 것이 특징이었다. SH4에서 전체 개체수는 4월에 가장 큰 peak를 보였으며, 8월과 9월 사이에 작은 peak를 나타냈다. 대부분 조사 시기에서 요각류가 가장 높은 점유율을 나타냈으며, 9월과 11월에 지각류의 개체수 점유율을 증가하는 특징을 보였다. 9월에는 *E. tergestina*, 11월에는 *P. leuckarti*가 전체 동물플랑크톤에서 차지하는 비중이 높게 나타났다. SH5에서는 타 정점에 비해 상대적으로 가장 낮은 출현 개체수를 보였으며, 변동 폭도 작았다. 타 정점과 달리 4월보다 5월에 개체수 peak가 가장 크게 나타났다. *A. hongii*의 점유율이 8월을 제외하고 지속적으로 높게 나타난 것이 타 정점과 다른 특징이었다. 또한 *P. indicus*의 개체수 점유율이 9월부터 11월까지 높은 특징을 보였다. 상대적으로 지각류는 11월과 12월에 *P. leuckarti*에 의해

점유율이 높은 특징을 나타냈다. SH1부터 SH4까지 높은 점유율을 나타냈던 *A. hudsonica*와 *A. sinjiensis*가 상대적으로 낮은 개체수 점유율을 보였다. 전 정점에서 동물플랑크톤 변동의 공통적인 특징은 *A. hongii*와 *A. hudsonica* 그리고 *A. sinjiensis*가 같은 속간 계절적 종 변동을 뚜렷하게 보인다는 것이며, *A. sinjiensis*의 출현 개체수가 감소하는 시기에 이들 종을 대신하여 지각류 *E. tergestina*, *P. leuckarti* 그리고 요각류 *P. indicus*의 중요도가 증가하는 것이었다.

전 정점에서 공통적으로 중요도가 높은 동물플랑크톤의 시공간적 출현 개체수 분포는 Fig. 5에 나타내었다. *Acartia hongii*는 1월과 2월 사이에 출현 개체수가 높았으며, 상류에 위치한 정점 SH1에서 상대적으로 높았다. *A. hudsonica*는 4월에 출현 개체수가 가장 높고 상류 해역에 위치한 정점 SH1에서 갑문 인근 해역으로 갈수록 감소하는 특징을 보였다. *A. sinjiensis*는 7월과 9월 사이에 출현 개체수가 높았는데 공통적으로 중앙수역에서 출현 개체수가 높게 나타났다. *Evadne tergestina*는 9월에 출현 개체수가 가장 높게 나타났다. 이 시기에 SH1에서 SH3까지 감소하는 특징을 보이다가 SH4에서 다시 높게 나타나는 특징을 보였다. 그러나 SH5에서는 다시 매우 낮은 개체수를 보였다. *Podon leuckarti*는 8월부터 출현하기 시작하여 12월에 출현 개체수가 가장 높게 나타났다. 10월과 11월에는 대체적으로 중앙수역에서 출현 개체수가 높았으나

Fig. 5. Spatial and temporal variations of dominant mesozooplankton species abundance.

Fig. 6. Two-dimensional non-metric MDS ordination plot of mesozooplankton abundance. Solid lines represent groups with more than 50% similarity obtained by Bray-Curtis cluster analysis. The numbers beside each month indicate stations.

12월에는 갑문 인근 해역으로 갈수록 출현 개체수가 증가하는 특징을 보였다. *Paracalanus indicus*는 춘계를 제외하고 대부분 계절에서 출현하는 특징을 보였으며, 10월에 출현 개체수가 가장 높았다. 정점별로는 갑문 인근 해역으로 갈수록 출현 개체수가 증가하는 특징을 보였다.

군집 분석

집괴 분석 결과(Cluster analysis)에 따른 다차원척도 분

석(NMDS)에서 동물플랑크톤 군집은 계절적으로 뚜렷이 구분되는 경향을 나타냈다(Fig. 6). 크게 6개 군집으로 구분이 가능하였다. ANOSIM 분석에서 군집의 구분은 모두 유의한 것으로 나타났다($r=0.94$, $p<0.01$). 6개 군집에서 A 그룹은 12월부터 4월까지 겨울과 초봄 사이에 나타나는 동물플랑크톤 군집이 포함되며, *Acartia hudsonica*, 미성숙 *Acartia*, *A. hongii*, *Eurytemora pacifica*가 10% 이상의 군집 기여도를 나타냈다(Table 1). B1 그룹은 5월 상류 해

Table 1. Results of SIMPER analysis for zooplankton from each group. Similarity in percent and species contribution based on log(abund.+1) transformed data. Abbreviations are as follows: Av.Abund=Average abundance (indiv./m³), Av.Sim=Average similarity, Contrib%=Percentage contribution, Cum%=Cumulative contribution

Species	Av.Abund	Av.Sim	Sim/SD	Contrib%	Cum.%
Group A (Avr.Sim 63.78)					
<i>Acartia hudsonica</i>	8642.04	12.61	6.02	19.77	19.77
copepodite <i>Acartia</i>	10217.96	12.13	2.97	19.01	38.78
<i>Acartia hongii</i>	6008.56	10.47	2.03	16.41	55.19
<i>Eurytemora pacifica</i>	2276.4	9.89	3.04	15.5	70.69
Group B1 (Avr.Sim 73.29)					
<i>Acartia hudsonica</i>	5068	38.4	6.01	52.4	52.4
copepodite <i>Acartia</i>	1932.33	34.88	5.54	47.6	100
Group B2 (Avr.Sim 60.6)					
<i>Acartia hudsonica</i>	5874.14	14.27	7.36	23.56	23.56
copepodite <i>Acartia</i>	2882.14	11.68	4.43	19.27	42.83
Polychaeta larvae	62	6.49	5.68	10.71	53.53
Group C1 (Avr.Sim 57.75)					
<i>Acartia sinjiensis</i>	9181.36	10.39	2.81	17.99	17.99
copepodite <i>Acartia</i>	1281.29	8.02	3.14	13.89	31.87
Cirripedia nauplii	210.07	5.88	4.06	10.17	42.05
Group C2 (Avr.Sim 71.44)					
Cirripedia nauplii	726.25	9.17	5.51	12.84	12.84
<i>Podon leuckarti</i>	607	8.25	5.69	11.55	24.39
<i>Paracalanus indicus</i>	2989.25	7.83	4.52	10.96	35.35
<i>Pavocalanus crassirostris</i>	767.5	7.4	10.39	10.35	45.7
Group D (Avr.Sim 73.26)					
<i>Podon leuckarti</i>	261.2	14.35	20.54	19.59	19.59
<i>Acartia hudsonica</i>	171.2	9.1	3.4	12.42	32.01
<i>Paracalanus indicus</i>	34.8	8.53	4.51	11.64	43.65

역부터 중앙 수역에 해당하는 정점의 군집이 포함되었다. B1 그룹에서는 *A. hudsonica*와 미성숙 *Acartia*의 기여도가 각각 52.4%, 47.6%를 나타내어 누적 기여율이 100%를 나타냈다(Table 1). B2 그룹은 봄와 초 여름 사이에 나타나는 군집으로 5월 중앙수역과 갑문 인근 해역 사이의 정점과 6월의 동물플랑크톤 군집이 포함되었다. B2 그룹에서는 *A. hudsonica*, 미성숙 *Acartia*, 갯지렁이 유생 (Polychaeta larvae)의 기여율이 10% 이상으로 나타났다 (Table 1). C1 그룹은 하계의 대표적인 동물플랑크톤 군집의 특성을 나타내며, 7월 정점 SH1을 제외하고 7월부터 9월까지의 동물플랑크톤 군집이 포함되었다. 군집에 대한 기여율이 10% 이상을 보인 동물플랑크톤은 *A. sinjiensis*, 미성숙 *Acartia*, 그리고 Cirripedia nauplii였다(Table 1).

C2 그룹은 정점 SH1을 제외하고 10월의 전 정점이 포함되며, Cirripedia nauplii, *Podon leuckarti*, *Paracalanus indicus*, *Pavocalanus crassirostris* 등이 10% 이상의 기여율을 나타냈다(Table 1). D 그룹은 11월에 나타난 동물플랑크톤 군집이 포함되며, 10% 이상의 기여율을 보인 동물플랑크톤은 *P. leuckarti*, *A. hudsonica*, *P. indicus* 등이었다(Table 1).

환경 요인과의 관계 및 수온-염분에 따른 종 출현 반응 모델

군집분석에서 시화호 동물플랑크톤 군집의 구분에 10% 이상 기여율을 나타낸 동물플랑크톤과 환경 요인 간 상관분석(Table 2)에서 *Acartia hongii*는 수온과 유의한 음의

Table 2. Spearman rank correlation coefficients between abundance of major mesozooplankton and environmental parameters. * and ** indicate the significant correlation at the levels of 0.05 and 0.01, respectively. Abbreviations of taxonomic group are as follows; COP=Copepoda, PL=Planktonic larvae, CLA=Cladocera

Species	Taxomic group	Group by NMDS	Temp.	Sal.	DO-s	DO-b	Chl.a
<i>Acartia hongii</i>	COP	A	** -0.53	** 0.50	ns	** 0.39	ns
<i>Eurytemora pacifica</i>	COP	A	ns	ns	ns	* -0.42	ns
<i>Acartia hudsonica</i>	COP	A,B1,B2 D	* 0.37	ns	ns	* -0.39	ns
Polychaeta larvae	PL	B2	* 0.46	ns	ns	ns	ns
<i>Acartia sinjiensis</i>	COP	C1	ns	ns	ns	* -0.54	ns
<i>Evadne tergestina</i>	CLA	C1	ns	ns	* -0.69	ns	ns
<i>Pavocalanus crassirostris</i>	COP	C2	ns	ns	ns	ns	ns
Cirripedia nauplii	PL	C1,C2	ns	ns	ns	ns	ns
<i>Paracalanus indicus</i>	COP	C2,D	ns	ns	ns	ns	ns
<i>Podon leuckarti</i>	CLA	C2,D	** -0.70	** 0.68	ns	** 0.66	ns

Fig. 7. Probability of dominant mesozooplankton occurrence fitted with logistic regression in relation to water temperature (°C) and salinity (psu). (a) Group A, (b) Group B, (c) Group C, (d) Group D divided by NMDS.

상관관계를 보였으며($p < 0.01$), 염분 및 저층 용존산소와 유의한 양의 상관관계를 나타냈다($p < 0.01$). *Acartia hudsonica*는 수온과 유의한 양의 상관관계를 보였으며($p < 0.05$), 저층 용존 산소와 유의한 음의 상관관계를 나타냈다($p < 0.05$). *Eurytemora pacifica*는 저층 용존 산소와 유의한 음의 상관관계를 나타냈다($p < 0.05$). *Podon leuckarti*는 수온과 유의한 음의 상관관계를 보였으며, 염분과 저층 용존산소와는 유의한 양의 상관관계를 나타냈다($p < 0.05$). Polychaeta larvae는 수온과 유의한 양의 상관

관계를 나타냈다($p < 0.05$).

수온과 염분에 따른 종 출현 반응 모델(Table 3; Fig. 7)에서 A 그룹에서 기여율이 높은 *Acartia hongii*와 *Eurytemora pacifica*는 수온 증가에 따라 출현 가능성이 감소하는 특징을 보였다. 그러나 *A. hongii*가 비교적 넓은 수온 범위에서 출현 가능성이 높게 나타난데 반해 *E. pacifica*는 수온 10~15°C 사이에서 출현 가능성이 급격히 감소하는 특징을 보였다. 염분에 따른 출현 가능성은 *A. hongii*는 전 조사 시기에서 나타난 염분 범위에서 모두

Table 3. Logistic regression models of the mesozooplankton species occurrence for water temperature (T) and salinity (S)

Species	Water temperature (°C)			Salinity (psu)		
	F	p(model)	Exponent coefficient	F	p(model)	Exponent coefficient
Group A						
<i>Acartia hongii</i>	8.17	0.006	3.380-0.113T	1.28	0.286	27.823-2.219S+0.045S ²
<i>Eurytemora pacifica</i>	142.30	<0.001	7.866-0.606T	36.51	<0.001	-29.264+1.001S
Group B						
<i>Acartia hudsonica</i>	29.97	<0.001	3.847-0.186T	11.60	0.001	-14.443+0.546S
Polychaeta larvae	7.86	0.007	-1.227+0.083T	1.29	0.284	-19.966+1.700S-0.035S ²
Group C						
<i>Acartia sinjiensis</i>	42.44	<0.001	-5.725+0.266T	68.81	<0.001	48.179-1.748S
<i>Pavocalanus crassirostris</i>	0.98	0.383	0.079-0.156T+0.006T ²	1.79	0.176	-25.410+2.123S-0.043S ²
Cirripedia nauplii	12.91	0.001	-0.790+0.114T	18.16	<0.001	18.264-0.607S
<i>Evadne tergestina</i>	15.34	<0.001	-19.160+1.904T-0.047T ²	3.96	0.025	-110.127+9.009S-0.182S ²
Group D						
<i>Paracalanus indicus</i>	1.14	0.328	0.146-0.065T+0.004T ²	4.57	0.040	5.567-0.188S
<i>Podon leuckarti</i>	0.89	0.416	-1.255+0.165T-0.005T ²	5.93	0.005	-80.270+6.139S-0.116S ²

50% 이상의 출현 확률을 보였으나 *E. pacifica*는 염분 30 psu 이하에서 출현 가능성이 급격히 감소하는 특징을 나타냈다.

B 그룹에 대한 기여도가 높은 *Acartia hudsonica*와 갯지렁이 유생(Polychaeta larvae)은 수온과 염분에 따른 출현 반응이 다르게 나타나는 특징을 보였다. *A. hudsonica*는 수온 증가에 따라 출현 가능성이 감소하는 특징을 보였으며, 수온 20°C 이상에서 출현 가능성이 낮게 나타나고 있다. 그러나 갯지렁이 유생은 수온 증가와 함께 출현 가능성이 증가하는 경향을 나타냈다. 따라서 *A. hudsonica*는 A, D 그룹에서도 기여도가 높은 동물플랑크톤으로 나타나는 특징을 보이고 있다. 염분에 따른 *A. hudsonica*의 출현 가능성은 25 psu 이상에서 급격히 증가하는 경향을 보였다. 갯지렁이 유생은 25 psu 부근에서 출현 가능성이 높은 특징을 보였다.

C 그룹에서 *Acartia sinjiensis*는 수온이 증가함에 따라 급격히 출현 가능성이 증가하는 특징을 보였으며, 25°C 이하에서는 출현 가능성이 매우 낮은 것으로 나타났다. 파개비 유생(Cirripedia nauplii)도 수온 증가에 따라 출현 가능성이 증가하지만 비교적 완만한 증가 추세를 보임으로써 5°C 이상의 넓은 수온 범위에서 출현 가능성이 높은 특징을 보였다. 지각류 *Evadne tergestina*는 25°C 부근의 수온에서 특징적으로 출현 가능성이 높게 나타나고 있다. 염분에 대한 출현 반응에서 *A. sinjiensis*는 25 psu 이상에서 출현 가능성이 급격히 감소하는 경향을 나타냈다. 파개비 유생은 염분 25 psu 이상에서는 출현 가능성이 감소하

는 특징을 보이거나 30 psu 이상을 제외하고 대부분의 염분 범위에서 높은 출현 가능성을 보였다. *E. tergestina*는 25 psu 부근에서 출현 가능성이 높은 특징을 보였다.

D 그룹의 *Paracalanus indicus*는 대부분의 수온 범위 내에서 출현 가능성이 높은 특징을 보였다. 그러나 *Podon leuckarti*는 15°C 부근에서만 출현 가능성이 높게 나타났다. 염분 변화에 대해서 *P. indicus*는 수온과 마찬가지로 염분 범위에서 50% 이상의 출현 가능성을 나타냈으나 염분 증가에 따라 출현 가능성이 감소하는 특징을 보였다. *P. leuckarti*는 26~27 psu 사이에서 출현 가능성이 높게 나타났다.

4. 토 의

동물플랑크톤의 시공간적 분포에 영향을 미치는 요인은 일반적으로 수온, 염분 그리고 먹이 조건 등이 제시된다(David et al. 2005). 그러나 동물플랑크톤은 식물플랑크톤 생물량이 높게 나타나는 부영양화된 수역에서 먹이 조건 보다는 수온과 염분에 의해 더 큰 영향을 받는다(Uye et al. 2000). 시화호에서 엽록소 *a* 농도는 평균 12.7 µg/l로 나타나서 Marchetti (1984)의 분류에 의해 과영양 수역으로 구분된다. 따라서 먹이의 제한이 없다는 가정을 적용하면 시화호 동물플랑크톤의 분포는 수온과 염분 같은 무생물학적 환경 요인에 의해 더 큰 영향을 받을 것으로 예상된다. 본 연구 결과에서 주요 동물플랑크톤은 엽록소 *a* 농도와 유의한 상관성을 보이지 않았다($p>0.05$). 또한 먹이

섭취와 재생산이 개체군에 반영되기까지는 시간차(Time-lag)가 존재하기 때문에 현장 먹이 농도와 개체군의 동 시간 비교를 통해 유의한 상관성을 얻는 것은 쉽지 않다(유 등 2006; Youn 2004).

하계 저층 수괴의 빈산소층 형성은 시화호의 뚜렷한 환경 특성 중 하나이다. 부영양화의 산물로 나타나는 빈산소 혹은 무산소 환경은 동물플랑크톤 군집 구조를 변화시키거나 개체군 형성에 부정적인 영향을 미친다(Uye 1994; Marcus et al. 1997; Marcus 2004). 연중 출현하는 *A. hongii*는 저층 용존산소와의 상관분석에서 유의한 양의 관계($p < 0.01$)를 보여 저층 용존산소의 감소에 따라 개체수가 감소하는 경향을 보였다. 그러나 *A. hongii*는 시화호 외측 경기만에서 연중 출현하지만 출현 개체수가 높은 시기는 동계와 춘계이며, 하계에는 낮은 재생산으로 인해 극소수의 개체가 출현한다(유 등 2006; Youn and Choi 2007). 또한 윤과 최 (2003)의 결과에서도 이 종은 23°C 이상의 수온에서는 내성이 상당히 약해져서 개체수가 급감하는 것으로 나타난다. 따라서 시화호에서 빈산소 현상이 나타나는 시기에 이 종의 출현 개체수 감소는 낮은 산소 농도의 영향보다는 수온에 의한 영향으로 판단된다. *A. hudsonica*와 *E. pacifica*도 저층 용존 산소와 유의한 관계($p < 0.05$)를 보였으나 음의 관계를 나타냈고 이들 종이 출현하는 시기에는 빈산소 현상이 나타나지 않는 것으로 보아 빈산소에 대한 영향은 없는 것으로 판단된다. 하계 빈산소 현상이 나타나는 시기에 다량 출현하는 *A. sinjiensis*는 저층 용존산소와 유의한 음의 상관관계($p < 0.05$)를 보여 빈산소 현상이 강한 시기에 출현 개체수가 높게 나타나는 경향을 보였다. 이는 *A. sinjiensis*는 수온이 높은 하계에 다량 출현하는 특징을 보이고 이 시기에 빈산소 현상이 강하게 나타나기 때문이다. 따라서 시화호에서 빈산소 현상에 따른 동물플랑크톤의 영향은 뚜렷하게 나타나지 않았다. 동물플랑크톤은 빈산소층에 노출되었을 때 부화에 제한을 받아 개체군 형성에 영향을 미친다(Marcus and Lutz 1994; Katajisto 2004). 따라서 시화호에서 빈산소 현상과 동물플랑크톤 개체군과의 관계에서는 먹이 농도의 관계와 같이 시간차가 존재할 가능성이 있다. 그러나 본 연구에서는 이러한 관계를 확인할 수 없었으며, 시화호에서 빈산소에 대한 동물플랑크톤의 영향 여부는 실험적인 연구와 함께 보다 장기적인 조사를 통해 밝혀져야 할 것으로 판단된다.

수온과 염분의 계절 변화가 크게 나타나는 시화호에서 동물플랑크톤 군집은 뚜렷한 계절 변동을 보였다. 염분은 정점 간 차이보다 계절 차이가 크게 나타나서 동 시

기의 지역적인 군집 구분보다는 계절에 따라 변화하는 염분에 의한 구분이 나타났다. NMDS 분석 결과에서 나타났듯이 동계부터 춘계에는 *Acartia hongii*, *A. hudsonica*, *Eurytemora pacifica*의 출현 분포에 따라 군집이 대별되며, 25 psu 이상 염분에서 서식하는 종들이 주요 동물플랑크톤으로 나타났으며, 하계에는 *A. sinjiensis*, *Evadne tergestina*, 따개비 유생(*Cirripedia nauplii*) 등 상대적으로 25 psu 이하 저염 환경에서 출현하는 동물플랑크톤이 주요 종으로 나타났다. 그리고 추계에는 *Paracalanus indicus*, *Podon leuckarti*가 계절 군집을 대표하는 동물플랑크톤으로 나타났다.

시화호에서 동계를 대표하는 동물플랑크톤으로 *Acartia hongii*는 시화호 인근 경기만에서 연중 출현하며, 비교적 저수온기에 출현 개체수가 높게 나타난다(유 등 2006). 시화호에서 *A. hongii*는 연중 출현하는 특징을 보였으며, 이는 전 수온 범위 내에서 50% 이상의 출현 가능성을 보인 로지스틱 회귀 모델에서도 확인된다. 경기만에서 *A. hongii*는 동계보다는 춘계에 개체군이 대량 증가한다(윤과 최 2003). 그러나 시화호에서는 동계에 출현 개체수가 가장 높고 이후 감소하는 특징을 보이고 있어 시화호 외측 연안 해역에서 나타나는 출현 특성과는 차이를 보였다. *A. hongii*는 5°C 이하의 낮은 수온에서도 높은 재생산이 나타나며, 개체수도 지속적으로 증가한다(윤과 최 2003; Youn and Choi 2007). 따라서 시화호에서 동계에 높은 먹이 농도를 바탕으로 출현 개체수가 높게 나타날 수 있는 환경이 조성되는 것으로 판단된다. 춘계에는 주 분포 수역이 중앙수역을 중심으로 갑문 인근 해역의 사이로 이동하며, 2000 indiv./m³ 이상의 개체수를 보임으로써 동계보다 상대적으로 개체수는 낮게 나타나지만 여전히 높은 수준을 유지하였다. 다만 경기만에서 이 종은 춘계에 10,000 indiv./m³ 이상의 개체수로 출현하는 점(윤과 최 2003)에 비추어 이 시기에 상류 해역을 중심으로 개체수가 크게 증가하는 *A. hudsonica*와의 중간 경쟁에서 밀리는 것으로 추정된다. 그러나 현재의 조사 간격과 방법으로는 중간 경쟁을 설명하기에는 무리가 있다. 일반적으로 중간 경쟁은 매우 복잡한 요인에 의해 나타나기 때문에(Lakkis 1994) 제한된 환경 내에서 중간 출현 개체수 변화와 차이에 의해 설명된다(Alcaraz 1983; Rodriguez and Jimenez 1990). 따라서 시화호에서도 동계와 춘계 사이에 *A. hudsonica*와 *A. hongii*의 중간 경쟁은 2종의 출현 개체수 변화 관점에서 추정되었을 뿐이다.

요각류 *E. pacifica*도 시화호 동계 동물플랑크톤 군집의 주요 구성원으로 나타난다. 이 종은 수온 10°C 이상에서 출현이 극히 제한적이며, 염분에 대해서는 27 psu 이상에서 출현 가능성이 높게 나타난다. 따라서 시화호에서 출현하는 요각류 중 가장 협소한 수온-염분 범위에 대한 출현

특성을 보인다. *E. pacifica*는 섬진강 하구역에서 4.4~16.7°C의 수온 범위에서 출현하고 상대적으로 저수온기에 출현 개체수가 높게 나타나며(박 등 2002), 내만의 부영양화된 수역에서 다량 출현하는 것이 특징이다(문 등 2006; Ueda 1982). 특히 문 등 (2006)은 이 종이 다량 출현하는 해역의 특성을 지속적인 오폐수 유입과 지형적으로 해수의 수렴 현상에 따른 수질이 악화된 해역으로 정의함으로써 시화호에서도 이 종이 다량 출현할 수 있는 환경임을 확인할 수 있었다.

NMDS 분석에서 동계와 춘계 군집의 구분에서 가장 중요한 동물플랑크톤은 *Acartia hudsonica*였으며, 하계에는 *A. sinjiensis*로 나타났다(Table 1). 시화호에서 *Acartia* 군집의 뚜렷한 계절적 종 변동은 시화호 동물플랑크톤 군집 변화의 가장 큰 특징이었다. 특히 출현 개체수 관점에서 저수온기에는 *A. hudsonica*, 고수온기에는 *A. sinjiensis*가 시화호를 대표하는 동물플랑크톤으로 나타난다. *Acartia*의 계절적 종 변동은 전 세계 하구 및 연안에서 다양하게 나타나며, 일반적으로 동계-춘계종과 하계-추계종으로 구분된다(Martin 1965; Herman et al. 1968; Sullivan and McManus 1986; Uye et al. 2000; Soh and Jeong 2003). 그러나 동일 계절에 여러 종의 *Acartia*가 혼재되어 나타나기도 한다(Lee and McAlice 1979). 시화호에서는 4종(*A. hudsonica*, *A. hongii*, *A. sinjiensis*, *A. pacifica*)의 *Acartia*가 2종씩 동 시기에 출현하며, 계절적 종 변동을 보임으로써 위에서 언급한 *Acartia* 변동 특성을 동시에 나타냈으나 출현 개체수 관점에서 *A. hudsonica*와 *A. sinjiensis*의 종 변동이 가장 뚜렷하였다. 로지스틱 회귀모델에서 *A. hudsonica*와 *A. sinjiensis*의 수온에 따른 출현 특성은 수온 20~22°C 부근에서 50%의 출현 가능성이 교차하는 경향을 보여 2종의 종 변동이 발생하는 수온은 20~22°C 사이로 추정된다. 염분에 대한 출현 가능성에서도 2종은 비교적 뚜렷한 차이를 보였는데 *A. hudsonica*는 25 psu 이상에서 출현 가능성이 증가하지만 *A. sinjiensis*는 25 psu 이상에서 출현 가능성이 급격히 감소하는 특징을 보인다. *A. hudsonica*의 출현 시기를 조절하는 요인은 수온이 일차적으로 중요하나 하계 풍수기 시 염분 변화에 따라 고수온에서 출현하는 시기가 확장될 소지가 있다. 이는 *A. hudsonica*가 완전히 소멸하는 시기로 추정되는 7월에 상대적으로 고염 지역에 해당되는 SH5에서만 출현하는 특성으로부터 추정할 수 있다.

*Acartia hudsonica*와 *A. sinjiensis*는 연중 세대가 지속적으로 유지되는 것이 아니라 일정 수온 범위 내에서 세대가 단절되며, 계절적으로 종 변동을 뚜렷하게 보인다. 휴면란 생산은 이와 같은 생활 패턴에서 요각류가 개체군을 유지하기 위한 기작으로 잘 알려져 있다(Grice and Marcus 1981; Uye 1985; Castro-Longoria and Williams

1999). 대부분 해양 요각류의 휴면란은 복온대수역에서 관찰되고 아열대에서는 소수이고 열대에서는 존재하지 않는다(Marcus 1996). 많은 *Acartia* 속(genus)에 대한 휴면란의 존재가 보고되며, 초기 개체군 형성에 큰 영향을 미친다(Uye 1980; Uye 1985; Viitasalo 1992; Zhong and Xiao 1992; Jiang et al. 2004). 개체군이 번성하는 시기에 세대유지를 위해 재생산을 통해 개체군을 유지하고 확장하게 되며, 환경 변화, 특히 수온 변화에 따라 휴면란을 생산한 후 일정 시기가 지난 후 적합한 수온이 되면 일시적으로 부화하여 개체군에 가입되는 반복적인 세대 유지 전략을 보이게 된다(Chen and Marcus 1997; Katajisto et al. 1998). 시화호에서 *A. hudsonica*와 *A. sinjiensis*의 개체군 변동에서 일시적으로 급격한 개체수 증가가 공통적으로 관찰된 점은 요각류의 일반적인 성장을 고려하면 매우 이해하기 어려운 경우로 휴면란의 일시적인 부화로 설명가능하다는 박과 허(1997)의 추정과 부합된다. 비록 본 연구에서 *A. hudsonica*와 *A. sinjiensis*의 휴면란 생산 여부는 조사되지 않아 구체적으로 확인할 수는 없으나 *A. hudsonica*와 *A. sinjiensis*가 휴면란을 생산한다는 연구결과(Uye 1985; Ohtsuka et al. 1999; Avery 2005)와 연중 출현하며, 수온에 따라 개체군의 증감이 뚜렷한 *Acartia*는 휴면란을 생산하지 않는다는 연구 결과(유 등 2006; Katajisto 2003)를 종합해 볼 때 시화호에서 일정 수온 범위 내에서 세대가 단절되었다가 다시 출현하는 2종의 *Acartia*는 휴면란을 통해 세대를 유지하는 전략을 보일 것으로 예측된다.

*Acartia sinjiensis*의 개체수가 감소하는 9월 이후에는 지각류와 따개비 유생의 출현이 두드러진다. 8월과 9월 사이에 *Evadne tergestina*의 상대 개체수가 증가하고 이후에는 *Podon leuckarti*와 따개비 유생으로 변동되는 특징을 보였다. 해산 지각류는 때때로 일시적으로 다량 출현하기 때문에 생산성이 높은 연안과 기수역의 동물플랑크톤 군집에서 중요한 구성원으로 인식된다(유와 김 1987; Onbe 1985). 본 연구에서 지각류는 수온과 염분에 대한 로지스틱 모델 결과에서 특정한 수온 및 염분 범위에서 출현 가능성이 높게 나타나는 특징을 보여 일시적으로 출현하는 이들의 출현 경향성을 잘 나타내었다. 해산 지각류는 연안 및 하구역에서 상대적으로 염분이 낮은 해역이나 해수 유동이 약하고 엽록소 *a* 농도가 높은 지형적으로 폐쇄적인 해역에서 기회적으로 다량 출현한다(Onbe 1974; Tang et al. 1995; Uye et al. 2000). 진해만에서 *E. tergestina*는 수온 20°C 이상, 염분 25 psu 이상에서 다량 출현하며, *P. leuckarti*는 *E. tergestina*보다 낮은 수온과 높은 염분에서 출현한다(유와 김 1987). 장목만에서 *E. tergestina*는 *P. leuckarti*보다 고수온을 선호하며 염분 22~26 psu 범위에서 출현 개체수가 높게 나타난다(장 등 2010). 따라서 2종

의 수온 및 염분에 대한 출현 특성은 다소 차이를 보인다. 이러한 경향성은 본 연구의 로지스틱 회귀모델에서 명확히 확인되며, *P. leuckarti*는 *E. tergestina*보다 저수온과 고염에서 출현 가능성이 높은 결과를 보여주고 있다.

*Cirripedia nauplii*는 로지스틱 회귀모델에서 10°C 이상의 수온과 염분 10~25 psu 사이에서 출현 가능성이 높게 나타나며, 비교적 넓은 수온과 염분 범위에서 출현 가능성이 높게 나타난다. 염분에 대한 분포 특성에서 장 등 (2010)이 제시한 26 psu 이하에서의 높은 개체수는 본 조사 결과와도 일치하였다. *Paracalanus indicus*는 경기만에서 하계에 출현 개체수가 높고 추계까지 개체수가 높게 지속되는 것(윤과 최 2003)과 달리 시화호에서는 추계에만 출현 개체수가 높게 나타났다. 로지스틱 회귀모델에서 비교적 넓은 수온 및 염분 범위에서 출현 가능성이 높게 나타나고 있으나 상대적으로 수온이 증가하고 염분이 감소함에 따라 출현 가능성이 증가하는 특징을 보여 하계에 출현 가능성이 높을 것으로 추정된다. 그러나 출현 개체수는 추계에 비해 하계에 매우 낮게 나타나고 있어 정량적인 관점에서 하계에 출현이 다소 제한되고 있음을 보였다. 이는 이 시기에 다량 출현하는 *Acartia sinjiensis*와의 경쟁과 관련이 있을 것으로 보인다.

시화호 동물플랑크톤의 계절적 종 변동은 다음과 같이 요약할 수 있다. 동계에는 *Acartia hongii*와 같은 시화호 주변 연안에서 우점하는 동물플랑크톤이 우점종으로 나타나고 동계부터 춘계 사이에는 시화호에서 다량 서식하는 *A. hudsonica*, *Eurytemora pacifica* 등이 주요 구성원으로 나타난다. 하계에는 *A. sinjiensis*로 대표되는 군집이 출현하며, 이후 해산 지각류와 따개비 유생 등 일시적으로 다량 출현하는 동물플랑크톤이 짧은 기간 동안 출현하다가 다시 *P. indicus*와 *A. hongii* 등 주변 연안종으로 대체되는 특징을 보인다. 출현 개체수 관점에서 시화호 동물플랑크톤 군집은 *A. hudsonica*와 *A. sinjiensis* 그리고 지각류로 이어지는 단순한 변동 과정을 보이고 있으며, 이들의 개체군 유지 전략은 휴면란을 생산한다는 기존 연구 결과(Onbe 1985; Uye 1985; Egloff et al. 1997; Ohtsuka et al. 1999; Avery 2005; Sullivan et al. 2007)와 관련이 있을 것으로 사료된다. 따라서 시화호 동물플랑크톤 군집의 변동을 보다 명확히 이해하기 위해서는 주요 종에 대한 휴면란 생산 여부를 조사하는 것이 필요할 것으로 본다.

사 사

논문의 세세한 심사와 지도를 해주신 심사위원님께 진심으로 감사드립니다. 또한 시료 채집 및 분석에 도움을 주신 한국해양연구원 해양환경·방제연구본부 연구원, (주)에코선 연구원 그리고 박준진 박사님께도 감사드립니다.

다. 본 논문은 국토해양부 “시화호 해양환경 개선 사업 (BSPM54791-2138-4)” 연구의 일환으로 수행되었습니다.

참고문헌

- 김종구, 김준우, 조은일 (2002) 시화호의 배수갑문 운용에 따른 수질 변화. 한국환경과학회지 11:1205-1215
- 김태하, 박용철, 이효진, 김동화, 박준건, 김성준, 이미연 (2004) 시화호의 계절변화에 따른 지화학적 환경요인 특성 연구. 한국환경과학회지 13:1089-1102
- 김형철, 최우정, 이원찬, 구준호, 이필용, 박성은, 홍석진, 장주형 (2007) 수질관리를 위한 시화호의 환경용량 산정. 한국환경과학회지 16:571-581
- 박용철, 박준건, 한명우, 손승규, 김문구, 허성희 (1997) 시화호 산화-환원 환경 하의 용존 유, 무기 화합물의 생지화학적 연구. 한국해양학회지 2:53-68
- 박준건, 김은수, 조성록, 김경태, 박용철 (2003) 시화호 수질의 연변화 양상에 대한 연구. Ocean and Polar Res 25:459-468
- 박철, 허성희 (1997) 시화호와 인근 해역의 동물플랑크톤 분포로 본 시화호의 생태적 안정성. 한국해양학회지 2:87-91
- 박철, 이평강, 양성렬 (2002) 계절 염분 변화에 따른 섬진강 하구역 동물플랑크톤의 분포 변화. 한국해양학회지 7:71-59
- 문성용, 윤호섭, 서호영, 최상덕 (2006) 가막만 동물플랑크톤 군집의 변동 특성과 환경 요인. Ocean and Polar Res 28:79-94
- 신재기, 김동섭, 조경제 (2000a) 시화호에서 무기영양염과 식물플랑크톤의 동태. 한국육수학회지 33:109-118
- 신재기, 김동섭, 조경제 (2000b) 시화호에서 해수유입 전·후의 수환경 요인과 식물플랑크톤 동태. 한국환경과학회지 9:115-123
- 유광일, 김세화 (1987) 진해만 해산 지각류의 계절적인 소장. 한국해양학회지 22:80-86
- 유정규, 윤석현, 최중기 (2006) 인천 연안에서 요각류 *Acartia hongii* 춘계 개체군 형성의 영향 요인. 한국해양학회지 11:108-116
- 윤석현, 최중기 (2003) 경기만 동물플랑크톤 군집의 시공간적 분포. 한국해양학회지 8:243-250
- 이연정, 김민섭, 원은지, 신경훈 (2006) ^{13}C 추적자를 사용한 시화호 상류역에서의 식물플랑크톤 크기에 따른 1차생산성 측정에 관한 연구. 한국육수학회지 39:93-99
- 장민철, 신경순, 장풍국, 이우진 (2010) 여름철 장목만의 환경요인과 중형동물플랑크톤 단주기 변동과의 상관성. Ocean and Polar Res 32:41-52
- 최중기, 이은희, 노재훈, 허성희 (1997) 시화호와 시화호 주변 해역 식물플랑크톤의 대증식과 일차생산력에 관한 연구. 한국해양학회지 2:78-86

- 한국수자원공사 · 농어촌진흥공사 (1996) 시화방조제 방재차원 배수갑문 운영에 따른 수질조사 결과보고서. 242 p
- 해양수산부 (1998) 우리나라의 갯벌. 해양수산부, 28 p
- Alcaraz M (1983) Coexistence and segregation of congeneric pelagic copepods: spatial distribution of the *Acartia* complex in the Ria of Vigo (NW of Spain). J Plankton Res **6**:891-900
- Avery DE (2005) Induction of embryonic dormancy in the calanoid copepod *Acartia hudsonica*: proximal cues and variation among individuals. J Exp Mar Biol Ecol **314**:203-214
- Beaugrand G (2004) The North Sea regime shift: evidence, causes, mechanisms and consequences. Prog Oceanogr **60**:245-262
- Bonnet D, Frid CLJ (2004) Seven copepod species considered as indicators of water-mass influence and changes: results from a Northumberland coastal station. ICES J Mar Sci **61**:485-491
- Castro-Longoria E, Williams JA (1999) The production of subitaneous and diapause eggs: a reproductive strategy for *Acartia bifilosa* (Copepoda: Calanoida) in Southampton water, UK. J Plankton Res **21**:65-84
- Chen F, Marcus NH (1997) Subitaneous, diapause, and delayed-hatching eggs of planktonic copepods from the northern Gulf of Mexico: morphology and hatching success. Mar Biol **127**:587-597
- David V, Sautour B, Chardy P, Leconte M (2005) Long-term changes of the zooplankton variability in a turbid environmental: The Gironde estuary (France). Estuar Coast Shelf Sci **64**:171-184
- Egloff DA, Fofanoff PW, Onbe T (1997) Reproductive biology of marine cladocerans. Adv Mar Biol **31**:79-167
- Grice GD, Marcus NH (1981) Dormant eggs of marine copepods. Oceanogr Mar Biol Annu Rev **19**:125-140
- Han MW, Park YC (1999) The development of anoxia in the artificial Lake Shihwa, Korea, as a consequence of intertidal reclamation. Mar Pollut Bull **38**:1194-1199
- Herman SS, Mithursky JA, McErlean AJ (1968) Zooplankton and environmental characteristics of the Patuxent River estuary 1963-1965. Chesapeake Sci **9**:67-82
- Hosmer D, Lemeshow S (2000) Applied logistic regression. Wiley, NY, 373 p
- Jiang X, Wang G, Li S (2004) Age, distribution and abundance of viable resting eggs of *Acartia pacifica* (Copepoda: Calanoida) in Xiamen Bay, China. J Exp Mar Biol Ecol **312**:89-100
- Katajisto T, Viitasalo M, Koski M (1998) Seasonal occurrence and hatching of calanoid eggs in sediments of the northern Baltic Sea. Mar Ecol Prog Ser **163**:133-143
- Katajisto T (2003) Development of *Acartia bifilosa* (Copepoda: Calanoida) eggs in the northern Baltic Sea with special reference to dormancy. J Plankton Res **25**:357-364
- Katajisto T (2004) Effects of anoxia and hypoxia on the dormancy and survival of subitaneous eggs of *Acartia bifilosa* (Copepoda: Calanoida). Mar Biol **145**:751-757
- Lakkis S (1994) Coexistence and competition within *Acartia* (Copepoda, Calanoida) congeners from Lebanese coastal water: niche overlap measurements. Hydrobiologia **292/293**:481-490
- Lee JH, Cha JH (1997) A study of ecological succession of macrobenthic community in an artificial lake of Shihwa on the west coast of Korea : An assessment of ecological impact by embankment. Ocean Res **19**:1-12
- Lee WY, McAlice BJ (1979) Seasonal succession and breeding cycles of three species of *Acartia* (Copepoda: Calanoida) in a Maine estuary. Estuar **2**:228-235
- Marchetti R (1984) Quadro analitico complessivo dei risultati delle indagini condotte negli acque costiere dell'Emilia Romagna: situazione e ipotesi di intervento. Regione Emilia Romagna, 310 p
- Marcus NH, Lutz RV (1994) Effects of anoxia on the viability of subitaneous eggs of planktonic copepods. Mar Biol **121**:83-87
- Marcus NH (1996) Ecological and evolutionary significance of resting eggs in marine copepods: past, present, and future studies. Hydrobiologia **320**:141-152
- Marcus NH, Lutz JP, Chanton JP (1997) Impact of anoxia and sulfide on the viability of eggs of three planktonic copepods. Mar Ecol Prog Ser **146**:291-295
- Marcus NH (2004) An overview of the impacts of eutrophication and chemical pollutants on copepods of the coastal zone. Zool Stud **43**:211-217
- Marques SC, Azeiteiro UM, Leandro SM, Queiroga H, Primo AL, Martinho F, Viegas I, Pardal MA (2008) Predicting zooplankton response to environmental changes in a temperate estuarine ecosystem. Mar Biol **155**:531-541
- Martin JH (1965) Phytoplankton-zooplankton relationship in Narragansett Bay. Limnol Oceanogr **10**:185-191
- McLusky DS, Elliott M (2004) The Estuarine ecosystem: Ecology, threats and management. Oxford University Press, 216 p
- Ohtsuka S, Hoshina T, Seike Y, Ohtani S, Kunii H (1999) Seasonal changes of zooplankton community in Honjo area and its neighboring waters of Lake Nakami. Laguna **6**:73-87
- Onbe T (1974) Studies on the ecology of marine cladocerans.

- J Fac Fish Anim Husb Hiroshima Univ **13**:83-179
- Onbe T (1985) Seasonal fluctuation in the abundance of populations of marine cladocerans and resting eggs in the Inland Sea of Japan. Mar Biol **87**:83-88
- Parson TR, Matia Y, Lalli CM (1984) A manual of chemical and biological methods for seawater analysis. Pergamon Press, 173 p
- Raymont JEG (1983) Plankton and productivity in the oceans. Vol II. Zooplankton. Pergamon Press, Oxford, 824 p
- Rodriguez V, Jimenez F (1990) Co-existence within a group of congeneric species *Acartia* (Copepoda, Calanoida): sexual dimorphism and ecological niche in *Acartia grani*. J Plankton Res **12**:497-511
- Runge JA (1988) Should we expect a relationship between primary production and fisheries? The role of copepod dynamics as a filter of trophic variability. Hydrobiologia **167/168**:67-71
- Sedlacek C, Marcus NH (2005) Egg production of the copepod *Acartia tonsa*: The influence of hypoxia and food concentration. J Exp Mar Biol Ecol **318**:183-190
- Soh HY, Jeong HG (2003) Spatio-temporal distribution of the genus *Acartia* (Copepoda: Calanoida) in the Southwestern waters of Korea. Korean J Environ Biol **21**:422-427
- Sullivan BK, McManus L (1986) Factors controlling seasonal succession of the copepods *Acartia hudsonica* and *A. tonsa* in Narragansett Bay, Rhode Island: temperature and resting egg production. Mar Ecol Prog Ser **28**:121-128
- Sullivan BK, Castello JH, Van Keuren D (2007) Seasonality of copepods *Acartia hudsonica* and *Acartia tonsa* in Narragansett Bay, RI, USA during a period of climate change. Estuar Coast Shelf Sci **73**:259-267
- Tang KW, Chen QC, Wong CK (1995) Distribution and biology of marine cladocerans in the coastal waters of southern China. Hydrobiologia **307**:99-107
- Ueda, H (1982) Zooplankton investigations in Shijiki Bay. II. Zooplankton communities from September 1975 to April 1976, with special reference to distributional characteristics of inlet copepods. Bull Seikai Reg Fish Res Lab **58**:1-22
- Uye S (1980) Development of neritic copepods *Acartia clausi* and *A. steueri*. I. Some environmental factors affecting egg development and the nature of resting eggs. Bull Plankton Soc Jpn **27**:1-9
- Uye S (1985) Resting egg production as a life history strategy of marine planktonic copepods. Bull Mar Sci **37**:440-449
- Uye S (1994) Replacement of large copepods by small ones with eutrophication of embayments: cause and consequence. Hydrobiologia **292/293**:513-519
- Uye S, Shimazu T, Yamamuro M, Ishitobi Y, Kamiya H (2000) Geographic and seasonal variations in meso-zooplankton abundance and biomass in relation to environmental parameters in Lake Shinji-Ohashi River-Lake Nakaumi brackish-water system, Japan. J Mar Sys **26**:193-207
- Viitasalo M (1992) Calanoid resting eggs in the Baltic Sea: implications for the population dynamics of *Acartia bifilosa* (Copepoda). Mar Biol **114**:397-405
- Youn SH (2004) Spatial and temporal distribution of zooplankton community and production of copepod *Acartia hongii* in Kyeonggi Bay. Ph.D Thesis Inha Univ 306 p
- Youn SH, Choi JK (2007) Egg production of the copepod *Acartia hongii* in Kyeonggi Bay, Korea. J Mar Sys **67**:217-224
- Zhong XF, Xiao YC (1992) Resting eggs of *Acartia bifilosa* Giesbrecht and *A. pacifica* Steuer in Jiaozhou Bay. Mar Sci (Qingdao) **5**:55-59

Received Apr. 29, 2010

Revised Jun. 18, 2010

Accepted Jul. 4, 2010