Article

북서태평양의 위도별 중형동물플랑크톤의 분포 특성

이창래¹ · 강형구^{2*} · 최근형²

¹국립공원관리공단 국립공원연구원
(590-811) 전라북도 남원시 주천면 호경리 16-1
²한국해양연구원 해양생물자원연구부
(426-744) 경기도 안산시 상록구 해안로 787

Latitudinal Distribution of Mesozooplankton Community in the Northwestern Pacific Ocean

Chang-Rae Lee¹, Hyung-Ku Kang^{2*}, and Keun-Hyung Choi²

¹National Park Research Institute, Korea National Park Service
Namwon 590-811, Korea

²Marine Biology & Living Resources Research Department, KORDI
Ansan, P.O. Box 29, Seoul 425-600, Korea

Abstract : We investigated latitudinal changes in mesozooplankton community structure during a cruise between October 16 and November 30 of 2007 from four distinctive regions in the northwestern Pacific Ocean: Warm pool area (longitude 135° line), Philippine EEZ (PEEZ), Japan EEZ (JEEZ), and East China Sea (ECS). Major taxa of numerical importance were Clausocalanidae (*Clausocalanus* spp.), Oncaeididae (*Oncaea* spp.), and Oithonidae (*Oithona* spp.) in oligotrophic regions, however Paracalanidae (*Paracalanus* spp.) was the most abundant group in the ECS. Mesozooplankton size group of <1 mm dominated in PEEZ and WP (48% and 56%, respectively), but mesozooplankton (>1 mm) were of importance in the JEEZ and ECS (34% and 38%, respectively). Mesozooplankton biomass and abundance were high in the JEEZ and ECS, and low in the oligotrophic WP and PEEZ waters, with positive relationship with both total Chl-*a* and heterotrophic protist biomass. Latitudinal change in mesozooplankton community structure was related with water temperature, with copepods such as *Lucicutia* spp. and *Pleuromamma* spp. being present only in warm waters. The geographical expansion of mesozooplankton with a preference for warmer waters could potentially be useful as an indicator for detecting ocean warming.

Key words : mesozooplankton community, size-fractionated mesozooplankton biomass, latitudinal distribution, northwestern Pacific Ocean

1. 서 론

동물플랑크톤은 해양생태계 안에서 식물플랑크톤의 섭식을 통해 얻은 에너지를 먹이망(food web)을 따라 상위

영양단계로, 표층에서 저서생태계로 에너지를 전달해 주는 중요한 역할을 한다(Frost 1991). 특히, 동물플랑크톤의 분립(fecal pellet)은 해저바닥으로 침강하면서 표층의 CO₂를 제거하는 역할이 알려지면서 이들의 생태적 역할에 대한 중요성이 강조되고 있다(Fowler and Knauer 1986; Small et al. 1989; Altabet and Small 1990;

*Corresponding author. E-mail : kanghk@kordi.re.kr

Steinberg et al. 1997). 최근에는 동물플랑크톤의 생체량 변화(Roemmich and McGowan 1995; Park et al. 2004) 및 수괴지표종의 지리적인 변동(Beaugrand et al. 2002) 연구 등을 통해 동물플랑크톤이 기후변동 및 해양환경 변화에 대한 좋은 지시자로 활용되고 있다.

북서태평양의 북적도 해류가 흐르는 Warm pool에서 기원한 고온·고염의 쿠로시오 해류는 우리나라 주변해역으로 열 에너지뿐만 아니라 열대성 해양생물을 공급한다(Yuan et al. 1998; 한국해양연구원 2007). 이 결과, 한반도 주변 해역에서는 아열대성 해양생물의 출현, 아한대 수산생물의 고갈 등과 같이 수산자원 변화와 관련한 이상 징후가 나타나고 있어 쿠로시오 해류 및 대마난류의 변동으로 인해 한반도 주변 해양생태계 구조가 변화하고 있음을 감지할 수 있다. 남해 및 대한해협은 쿠로시오 해류가 지나가는 서쪽 경계에 위치해 있어 쿠로시오 해류의 직·간접적인 영향을 받지만, 아직 쿠로시오 난류가 해양 생태계에 어떤 영향을 주는 지에 대한 연구는 미흡한 실정이다. 따라서 기후변화에 따른 해양 생태계 변동을 예측하기 위해서는 북서태평양 저위도 해역의 생태계 구조특성과 우리나라 주변 해양생태계와의 상호 연관성 연구를 통해 북서태평양의 환경변화가 한반도 주변 해양생태계에 미치는 영향을 살펴 볼 필요가 있다.

북서태평양에서 진행된 동물플랑크톤을 중심으로 한 해양생태계 연구는 Odate (1994), Sugimoto and Tadokoro (1998), Chiba et al. (2006), Chiba (2007) 등이 있지만, 북서태평양의 북적도 해류 및 쿠로시오 해류의 중심해역으로 부터 온대해역에 이르는 위도변화에 따른 동물플랑크톤의 군집변동과 환경요인과의 상관성과 관련한 연구는 매우 빈약한 실정이다. 본 연구는 2007년 북서태평양의 Warm pool과 쿠로시오 해류의 세력이 강한 필리핀 EEZ와 일본 EEZ 대륙사면 경계, 그리고 동중국해역(East China Sea)에 출현하는 중형동물플랑크톤 군집의 총 생체량 및 개체수 분포와 동물플랑크톤 군집과 환경요인 간의 관계를 살펴보고, 위도변화에 따른 중형동물플랑크톤 크기그룹의 상대적인 중요성을 파악하고자 한다.

2. 재료 및 방법

환경요인분석

현장 조사는 2007년 9월 30일부터 10월 16일 사이에 수행되었다. 조사정점은 Warm pool이 위치한 동경 135° 라인에서 5개 정점, 필리핀 EEZ에서 3개 정점, 일본 EEZ에서 4개 정점, 동중국해에서 4정점으로 총 16개 정점에서 실시되었다(Fig. 1). 조사해역에서 해수의 수온과 염분은 CTD(Sea Bird 911 plus)를 이용하여 측정하였다. Chl-*a* 농도는 각 정점의 0, 15, 30, 50, 75, 100 m와 Chl-*a* 최대

Fig. 1. Sampling stations of mesozooplankton in the four sampled regions from the northwestern Pacific Ocean; Warm pool (St. 1-9), Philippine EEZ (St. 19-23), Japan EEZ (St. 24-31), and East China Sea (St. 32-35)

층에서 해수를 채수하여 Turner Design Fluorometer(10-AU)를 사용하여 현장에서 측정하였다. 수층 내 종속영양 원생생물의 생물량을 파악하기 위하여 0, 15, 30, 50, 75, 100 m와 Chl-*a* 최대층에서 해수를 채수하였다. 종속영양 원생생물은 양 등 (2008)의 방법에 따라 분석하였다. 종속영양 원생생물 중 섬모충류를 관찰하기 위하여 500 ml 해수를 Lugol's solution으로 최종농도 5%가 되도록 고정하였으며, 종속영양 미소편모류와 와편모류의 생물량을 파악하기 위해 300 ml 해수를 glutaraldehyde로 최종농도 1%가 되게 고정을 한 후 실험실로 운반하였다. 현장에서 고정한 시료는 실험실에서 도립현미경(Olympus 70)과 형광현미경(Nikon type 104)을 이용하여 계수하였다. 그리고 미소편모류의 탄소량은 현미경 아래에서 체적을 구한 후 Børsheim and Bratbak (1987)의 방법에 따라 구하였다. 그 외 원생동물은 체적을 구한 후 세포용적을 Elder (1979)의 방법에 따라 구하였다.

중형동물플랑크톤 생체량 및 개체수 분석

동물플랑크톤 채집은 봉고네트(망목 200 μ m, 망구 60 cm)를 이용하여 수심이 깊은 대양해역에서는 수심 약

200-300 m(Wire out: 500 m), 수심이 낮은 일본 EEZ 일부 정점과 동중국해에서는 표층에서 바닥 약 5 m까지의 상층부를 대상으로 경사채집을 하였다. 채집된 시료는 시료의 양에 따라 최종 농도가 5-10%가 되도록 증성포르말린으로 고정하였다. 고정된 시료는 실험실에서 약 1,000개체가 되도록 subsample을 취한 후, 계수판(Bogorov counting chamber)으로 옮겨 해부현미경(ZEISS Stemi 2000C)을 이용하여 동정·계수하였다. Warm pool과 필리핀 EEZ에서 채집한 동물플랑크톤 중 요각류(Copepoda)는 동정의 어려움으로 대부분 과 또는 속 수준까지 동정하였다. 그리고 일부 동물플랑크톤 및 기타 부유유생은 강(class) 혹은 문(phylum) 수준의 상위 분류군으로 구분하였다. 동정된 각 동물플랑크톤은 단위 체적(m^3)당 개체수로 환산하였다. 채집한 시료 중 일부는 중형동물플랑크톤의 각 크기그룹별 중요성을 파악하기 위해 선상에서 0.2, 0.5, 1, 2, 5 mm 스테인레스 sieve를 이용하여, 4개의 동물플랑크톤 크기그룹(0.2-0.5 mm, 0.5-1 mm, 1-2 mm, 2-5 mm)으로 구분하였다. 크기별로 분리한 시료는 미리 무게를 측정 한 여과지(Whatmann GF/C)에 여과하였으며, 시료에 포함된 염분을 제거하기 위해 증류수로 세척하였다. 여과가 끝난 여과지는 펠트리디쉬에 담아 -20°C 에서 냉동보관한 뒤 실험실로 운반하여 60°C , 24시간 건조한 후, 건중량을 측정하였다. 동물플랑크톤의 총 생체량(탄소량)과 크기그룹별 생체량(탄소량)은 건중량의 45%로 가정하여 동물플랑크톤의 생체량(탄소량)을 계산하였다(Ara

2001; Peterson et al. 2002).

통계분석

동물플랑크톤의 개체수 자료를 바탕으로 Bray-Curtis similarity index를 이용하여 군집분석(Cluster analysis)을 하였다(PRIMER 6.1.6). 그리고 환경요인과 동물플랑크톤 군집의 관계를 파악하기 위해 통계프로그램 R(R Development Team 2006)을 이용하여 다차원 배열법(NMDS; Non-metric multidimensional scaling) 분석을 수행하였다. 동물플랑크톤 자료의 정규분포 가정이 필요한 경우 원 자료를 로그($\log_{10} x+1$)로 변환한 후 분석하였다.

3. 결 과

환경요인 변화

Warm pool에서는 수온 28.5°C 이상, 염분 34.2 psu 이하의 고온의 표층해수가 북위 $15^\circ30'$ 남쪽(정점 1, 3, 5, 7, 9)에 위치하였고, 약 150 m 수층에 최대 염분층(35 psu)이 존재하였다(Figs. 2, 3). 필리핀 동부해역(정점 19, 21, 23)에서는 표층수온이 $28.1-28.3^\circ\text{C}$, 염분이 34.4 psu 이상으로 북적도 해류역보다 저온·고염의 특성을 보였다. 오키나와 남쪽 일본 EEZ 해역(정점 24, 26, 28, 31)에서는 대륙사면을 경계로 남쪽(정점 24, 26) 심해역과 북쪽(정점 28, 31) 천해역의 수온과 염분구조가 서로 달랐다(Figs. 2,

Fig. 2. Vertical distribution of water temperatures in the upper 150-300 m of the study area: (a) Warm pool, (b) Philippine EEZ, (c) Japan EEZ, and (d) East China Sea

Fig. 3. Vertical distribution of salinity in the upper 150-300 m of the study area: (a) Warm pool, (b) Philippine EEZ, (c) Japan EEZ, and (d) East China Sea

Fig. 4. Regional distribution of total chlorophyll-a concentration and ratio of picoplankton to total chlorophyll-a in the study area

3). 대륙사면 심해역에서는 28°C, 34.5 psu 이상의 고온·고염을, 대륙붕 천해역은 27°C, 34.3 psu 이하의 상대적으로 저온·저염의 특성을 보였다. 일본 EEZ를 지나 동중국해역에서는 전체적으로 27°C 이하를 기록하였고, 염분은 정점 32에서 34 psu 이하를 기록하였지만, 정점 33, 34, 35에서는 34.0 psu 이상의 고염이었다.

전체 Chl-a 농도분포는 북적도 해류와 쿠로시오 해류가 흐르는 Warm pool부터 일본 EEZ의 정점 26까지는 0.2 $\mu\text{g L}^{-1}$ 이하로 매우 낮았지만, 대륙붕이 시작되는 정점

28부터 0.2 $\mu\text{g L}^{-1}$ 이상이었고, 동중국해역의 정점 32에서 0.7 $\mu\text{g L}^{-1}$ 로 최대값을 기록하였다(Fig. 4).

중형동물플랑크톤의 생체량과 개체수 변화

중형동물플랑크톤의 평균 생체량(탄소량)은 Warm pool과 필리핀 EEZ(1.8-3.4 mgC m^{-3})에서 낮았고, 일본 EEZ와 동중국해역(13.4-14.8 mgC m^{-3})에서 높았다(Fig. 5). 가장 높은 생체량을 기록한 일본 EEZ 내 정점 28과 31에서는 다른 정점에 비해 특히, 요각류와 연체동물의 복족류, 척삭동물인 젤라틴성 살파류(Salpa) 등의 생물량이 많았다. 또한, 대륙사면이 끝나고 대륙붕단에 위치한 정점 28과 정점 31에서는 척삭동물인 젤라틴성 살파류의 대량 출현이 매우 특징적이었다.

동물플랑크톤 출현 개체수는 Warm pool에서 약 967 ind m^{-3} , 필리핀 EEZ에서 440 ind m^{-3} , 일본 EEZ에서 7,015 ind m^{-3} , 동중국해에서 1,915 ind m^{-3} 였다(Fig. 6). 일본 EEZ에서의 급격한 개체수 증가는 젤라틴성 살파류, 요각류 *Temora* spp., *Oncaea* spp., *Corycaeus* spp., 연체동물 복족류의 증가와 관련되었다. 그러나 일본 EEZ를 벗어나 동중국해역으로 접어들면서 그 증가 양상이 크게 감소하였고, 전체 동물플랑크톤의 개체수와 생체량 변화는 Chl-a 농도분포와 유사하였다.

동물플랑크톤의 크기그룹별 생체량(탄소량) 분포를 살펴보면 Warm pool에서는 각 크기그룹 간에 두드러진 차

Fig. 5. Regional distribution of mesozooplankton biomass (mgC m^{-3}) in the study area

Fig. 6. Regional distribution of mesozooplankton abundance (ind. m^{-3}) in the study area

Fig. 7. Regional distribution of biomass (mgC m^{-3}) of size-fractionated mesozooplankton in the study area. (a) 0.2-0.5 mm, (b) 0.5-1 mm, (c) 1-2 mm, and (d) 2-5 mm

Fig. 8. Regional variation in composition of size-fractionated mesozooplankton biomass in the study area

이를 보이지 않았지만, 정점 3에서 1-2 mm 크기, 정점 9에서 0.5-1 mm 크기그룹이 다소 우세하였다. 필리핀 EEZ의 정점 19에서는 2-5 mm, 정점 21과 23에서는 0.5-1 mm 크기그룹이 우세해 Warm pool과는 다른 양상을 보였다. 대륙사면과 대륙붕에 걸쳐 위치한 일본 EEZ와 동중국해로 가면서 1 mm 이상의 크기 그룹이 중요하였다(Figs. 7, 8). 각 크기그룹에 대한 정점별 분포를 살펴본 결과, 대체로 대양 정점에서는 1 mm 이하의 작은 크기그룹이 중요하였으며, 우리나라 근해로 들어오면서 1 mm 이상의 크기그룹이 중요하였다.

Fig. 9. Regional variation in taxonomic composition of mesozooplankton in the study area

중형동물플랑크톤의 종조성과 주요 우점 분류군 변화

개체수 자료를 바탕으로 동물플랑크톤의 조성률을 살펴보면, 동물플랑크톤 군집 안에서 가장 우점한 그룹은 요각류(Copepoda)였으며, 일본 EEZ를 제외한 전 해역에서 80%이상 우점하였다(Fig. 9). 문(phylum) 수준에서의 동물플랑크톤 조성률은 일본 EEZ 내 두 정점(정점 28, 31)을 제외한 대부분의 정점에서 절지동물인 요각류가 높은 우점률을 기록하여 분류군별로 큰 차이를 보이지 않았다. 일본 EEZ 내 정점 28과 31에서의 분류군별 조성률은 척삭동물인 탈리아(Thaliacea)강의 증가가 매우 특징적이었

Table 1. Abundance (Abu.: ind. m⁻³) and (Com.: %) of major mesozooplankton taxa in the study area. Blanks indicate no occurrence

Taxon group		Warm pool		Philippine EEZ		Japan EEZ		East China Sea	
		Abu. (ind. m ⁻³)	Com (%)	Abu. (ind. m ⁻³)	Com (%)	Abu. (ind. m ⁻³)	Com (%)	Abu. (ind. m ⁻³)	Com (%)
1	Acartiidae	41	8.7	25	11.5	84	4.8	13	1.0
2	Calanidae	19	4.1	5	2.1	78	4.4	30	2.4
3	Calocalanidae	13	2.7	<1	<1	18	1.0	14	1.1
4	Candaciidae	11	2.4	1	<1	11	<1	2	<1
5	Clausocalanidae	105	22.3	31	14.3	198	11.1	168	13.4
6	Euchaetidae	<1	<1	<1	<1	19	1.1	10	0.8
7	Lucicutiidae	3	6.5	13	6.1	30	1.7	<1	<1
8	Metridinidae	11	2.4	10	4.7	17	<1	<1	<1
9	Paracalanidae	7	1.5	7	3.4	108	6.1	538	42.9
10	Scolecithrichidae	9	1.9	3	1.4	44	2.5	15	1.2
11	Temoridae	<1	<1	<1	<1	230	12.9		
12	Oithonidae	55	11.5	43	20	220	12.4	178	14.2
13	Corycaeidae	71	15.0	28	13	190	10.7	44	3.5
14	Oncaeidae	96	20.3	45	20.7	466	26.2	225	17.9
Copepoda total		473		217		1,778		1,255	

다. 최 우점분류군인 요각류에서 과(family) 수준의 분류군 별 우점분류군을 살펴보았다(Table 1). Warm pool에서는 Clausocalanidae와 Oncaeidae가 20% 이상의 높은 우점률을 보였으며, 다음으로 Corycaidae, Oithonidae가 각각 15%와 12% 순이었다. 필리핀 EEZ에서는 Oncaeidae와 Oithonidae가 약 20% 이상으로 최 우점하였으며, 다음으로 Clausocalanidae와 Acartiidae가 10% 이상 우점하였다. 일본 EEZ에서는 Oncaeidae 26%, Temoridae 13%, Oithonidae 12%, Clausocalanidae 11% 순이었다. 동중국해에서는 연안성 동물플랑크톤인 Paracalanidae가 40% 이상의 높은 우점률을 기록하였으며, 다음으로 Oncaeidae (18%), Oithonidae(14%) 순이었다. 모든 해역에서 공통적으로 Clausocalanidae, Oncaeidae, Oithonidae가 상위 우점분류군으로 출현하면서 동물플랑크톤의 구성물에 큰 영향을 주었다.

군집분석 및 동물플랑크톤과 환경요인과의 관계

동물플랑크톤 전체 개체수 중 상위 30개 분류군의 출현 개체수를 대상으로 Bray-Curtis similarity index를 구한 후 이를 바탕으로 정점 간 군집분석(MDS analysis)을 하였다. 정점 간 유사도(similarity) 70% 수준($p < 0.05$)에서 크게 4개 그룹으로 구분할 수 있었다(Fig. 10). 각각의 그룹은 Warm pool 내 정점 1(Group I), Warm pool 해역의 정점 5, 필리핀 EEZ 내 정점 21과 23(Group II), 그밖의 다른 Warm pool 해역의 정점 3, 7, 9와 필리핀 EEZ 내 정점 19, 일본 EEZ 내 정점 24, 26(Group III), 마지막으로 일본 EEZ 내에서 대륙붕이 시작되는 정점 28을 중심으로 동중국해 정점(St. 31, 32, 33, 34, 35)들로 구분되었다(Group IV). Group I은 요각류 Oncaeidae가 최 우점분류군으로 출현했지만, 전체 중형동물플랑크톤 출현 개체수가 100 ind m^{-3} 이하로 매우 낮았다. Group II는 전체 출

현개체수가 300 ind m^{-3} 이하였으며, Oncaeidae, Oithonidae, Corycaidae가 우점 출현하였다. 다음으로 Group III에서는 전체 출현개체수가 $500\text{--}2,000 \text{ ind m}^{-3}$ 였으며, 앞에서 구분된 두 그룹과 비교하여 Lucicutiidae, Clausocalanidae, Acartiidae 등의 분류군의 출현이 두드러졌다. 마지막으로 Group IV는 대륙붕에 위치한 모든 정점들로 구성되었으며, 연안성 동물플랑크톤인 요각류 Paracalanidae와 척삭동물인 살파류와 미충류인 Oikopleuridae가 우점하였다.

동물플랑크톤 군집 내에서 각 개체군과 환경요인과의 관계를 알아보기 위해 30개 우점 분류군과 환경요인에 대하여 다차원 배열법(NMDS) 분석을 실시하였다(Fig. 11). 분석 결과, 제 1축과 제 2축이 전체 자료 분산의 89%를 차지하였다. 동물플랑크톤 30개 분류군의 고유벡터(eigenvector) 값을 제 1축과 제 2축에 도시해 본 결과, Warm pool과 필리핀 EEZ 그리고 일본 EEZ 내 정점 24

Fig. 10. Two-dimensional non-metric MDS ordination plot of mesozooplankton abundance. Solid circles represent stations with more than 70% similarity

Fig. 11. Spatial structuring of the mesozooplankton community revealed by non-metric multidimensional scaling (NMDS) of major taxonomic groups. Upper panel shows species distribution on the two dimensions of the NMDS and corresponding environmental variables. Lower panel shows stations distribution on the two dimensions of the NMDS. A: Acartiidae, B: Aetideidae, C: Eucalaneidae, D: Augaptilidae, E: Calanidae, F: Calocalanidae, G: Candaciidae, H: Clausocalanidae, I: Eucalanidae, J: Euchaetidae, K: Lucicutiidae, L: Metridinidae, M: Paracalanidae, N: Pontellidae, O: Scolecithrichidae, P: Temoridae, Q: Oithonidae, R: Harpacticoidae, S: Corycaidae, T: Oncaeidae, U: Sapphirinidae

과 26에서는 수온의 영향이 크며, 동중국해역 내 전 정점에서 원생동물과 식물플랑크톤의 영향이 큰 것으로 분석되었다. 그러나 생체량(탄소량)과 개체수가 가장 많았던 정점 28과 31은 다른 동중국해역의 정점들에 비해 생물학적 환경요인과 상관성이 낮은 것으로 확인되었다(Fig. 11). 각 분류군들과 환경요인과의 상관성을 살펴보면 Lucicutiidae *Lucicutia* spp, Metridinidae *Pleuromamma* spp. 등의 분포는 수온과 상관성이 높았고, 요각류 Paracalanidae *Paracalanus* sp. Euchaetidae, Calanidae, Eucalanidae 등은 Chl-*a*, 원생동물과 같은 생물학적 환경요인의 영향을 받았다.

4. 고찰

식물플랑크톤의 현존량을 대변할 수 있는 Chl-*a* 농도는 저위도 빈영양해역인 북적도 해류역과 쿠로시오 해류역에서는 낮은 농도(평균 $0.07 \mu\text{g l}^{-1}$)를 보였지만, 일본 EEZ(평균 $0.26 \mu\text{g l}^{-1}$)에서 동중국해(평균 $0.40 \mu\text{g l}^{-1}$)로 이동하면서 증가하였다. 이 중에서 극미소($0.2\text{--}2 \mu\text{m}$) 식물플랑크톤(picophytoplankton)이 차지하는 비중은 정점 21과 32를 제외한 전 정점에서 70% 이상을 기록하였다(Fig. 4). 극미소식물플랑크톤은 전 세계의 열대와 아열대 해역에서 우점 출현하는 식물플랑크톤이며, 특히 빈영양해역에서 기초생산력에 크게 기여하는 것으로 알려져 있다(Moore et al. 1995; Shimada et al. 1996). 종속영양 원생동물 군집은 종속영양미소편모류, 부유성 섬모충류가 빈영양해역에서 평균 100 cells l^{-1} 이상으로 우점하였다. 특히, Warm pool과 필리핀 EEZ에서는 미소형($<20 \mu\text{m}$) 종속영양 외편모조류가 우점하였고, 일본 EEZ 해역에서는 소형($>20 \mu\text{m}$) 종속영양 외편모조류가 우점한 것으로 보아 이들 종속영양 외편모류의 분포는 식물플랑크톤의 크기별 분포와 밀접한 관련이 있었다(한국해양연구원 2007; 양 등 2008).

빈영양해역인 아열대 해양에서는 1 mm 미만의 요각류가 먹이망 에너지 흐름에 중요한 역할을 하는 것으로 알려져 있다. 이 작은 크기의 요각류 그룹에는 Calanoid에 속한 *Paracalanus*, *Clausocalanus*, *Acartia*와 Cyclopoid에 속한 *Oithona*, *Oncaea*, *Corycaeus*의 성체와 후기 유생기(copepodite)가 포함되어 있는데(Turner 2004), 본 연구해역의 Warm pool과 필리핀 EEZ에서 출현한 우점 분류군과 대체로 일치하였다(Table 1). 본 연구에서 중형동물플랑크톤의 생체량 분포와 먹이생물인 식물플랑크톤과 원생동물 간의 회귀분석을 한 결과, 전체 중형동물플랑크톤 생체량(탄소량)은 $3 \mu\text{m}$ 이상 크기의 큰 식물플랑크톤과 섬모충류의 생체량과 통계적으로 유의한 관계를 보였다(Table 2). 아열대 해역에서는 높은 생물량을 보이는 극미소식물플랑크톤은 크기가 너무 작아 중형동물플랑크톤이 직접 소비하기는 어렵지만(Hansen et al. 1994), 섬모충류가 극미소식물플랑크톤을 섭식하여 중형동물플랑크톤으로 에너지를 전달해 동물플랑크톤의 생체량을 유지해 준다(Calbet and Landary 1999). 그러나 온대해역인 동중국해역에서는 $3 \mu\text{m}$ 이상의 식물플랑크톤의 현존량이 증가함에 따라 중형동물플랑크톤이 섬모충류와 외편모조류와 더불어 큰 식물플랑크톤을 섭식함으로써 중형동물플랑크톤의 생체량을 유지하는 것으로 판단된다. 온대해역에서도 종속영양 원생동물 특히, 섬모충류가 중형동물플랑크톤에게 상당히 중요한 먹이로 많이 인용되지만(Yang et al. 2009), 본 연구에서는 중형동물플랑크톤의 생체량 증가에는 $3 \mu\text{m}$ 이상의 큰 식물플랑크톤도 중요한 것으로 확인되었다. 예를 들면, 북부동중국해의 주요 우점분류군인 *Calanus sinicus*는 다른 소형플랑크톤보다 섬모충류를 먼저 섭식하며, 또한 *C. sinicus* 암컷의 알 생산력은 섬모충류의 현존량에 비례한다(Huo et al. 2008). 그리고 *C. sinicus*의 순성장효율(gross growth efficiency)은 섭식한 먹이 중에서 섬모충류의 비율에 비례한다(Huo et al.

Table 2. Multiple regression analyses of potential prey and predator biomass from $\log_{10}$ transformed predator biomass data. Results show the minimal model reduced from a full model including the highest interaction term. Asterisks indicate full model including each parameter and interactions between parameters. Pico=picophytoplankton, lphyto=large phytoplankton ($>3 \mu\text{m}$), HNF=heterotrophic nanoflagellates, HDF=heterotrophic dinoflagellates, tzoo=total mesozooplankton biomass

Full model	$\text{Log}_{10}(\text{HDF}) \sim \text{pico} * \text{lphyto} * \text{HNF}$
Minimal model	$\text{Log}_{10}(\text{HDF}) = 0.25 - 0.10(\text{pico}) + 0.22(\text{lphyto}) + 0.06(\text{pico})(\text{HNF}) - 0.13(\text{lphyto})(\text{HNF})$ (Adjusted $R^2 = 0.72$, $p < 0.01$)
Full model	$\text{Log}_{10}(\text{ciliate}) \sim \text{pico} * \text{lphyto} * \text{HNF}$
Minimal model	$\text{Log}_{10}(\text{ciliate}) = -0.80(\text{pico})$ (Adjusted $R^2 = 0.81$, $p < 0.01$)
Full model	$\text{Log}_{10}(\text{HNF}) \sim \text{bacteria} * \text{pico} * \text{lphyto}$
Minimal model	No parameter including intercept significant (Adjusted $R^2 = 0.13$, $p = 0.16$)
Full model	$\text{Log}_{10}(\text{tzoo}) \sim \text{lphyto} * \text{ciliate} * \text{HDF}$
Minimal model	$\text{Log}_{10}(\text{tzoo}) = -0.62(\text{lphyto}) + 0.13(\text{ciliate}) + 1.58(\text{lphyto})(\text{ciliate})$ (Adjusted $R^2 = 0.78$, $p < 0.01$)

2008). 그러나 섬모충류를 섭식한 요각류의 순성장 효율은 13%에 불과하기 때문에, 결국 섬모충류는 다른 생물의 먹이원으로 영양상태가 양호하지만(양과 최 2009), 요각류 *C. sinicus*의 먹이로는 영양상 완전하지 않다는 것을 시사한다.

대륙사면이 끝나고 대륙붕이 시작되는 해역에 위치한 정점 28과 31은 쿠로시오 저층해류(Kuroshio Subsurface Water)의 용승(upwelling)으로 많은 영양염이 유입되어 식물플랑크톤의 현존량과 생산력이 높은 해역으로서(Chen 1995a, b; Chern et al. 1990), 중형동물플랑크톤의 높은 생물량을 기대할 수 있다. 특히, 본 연구에서는 일부 요각류의 증가를 확인하였지만, 다른 분류군에 비해 젤라틴성 살파류의 대량 출현이 매우 큰 특징이었다. 그러나 이 두 정점에서 살파류의 대량 출현에 대한 생물학적 환경요인의 영향은 크지 않은 것으로 분석되었다(Fig. 11). 이러한 원인은 최 우점 분류군인 살파류의 분포가 대륙사면과 인접한 정점 28과 31에 제한되어 있고, 다른 동중국해 정점들에서는 출현량이 아주 적거나 전혀 출현하지 않았다는 점에서 찾아볼 수 있다. 살파류는 아주 작은 생물을 섭식할 수 있는 여과식자(filter feeder)로서, 박테리아, 편모류(flagellates), 규조류(diatoms), 방산충, 유기쇄설물(detritus), 요각류, 심지어 익족류(pteropods)까지 상당히 넓은 크기 범위의 먹이를 소비한다(Silver 1971). 또한, 1차 생산량의 10-100%를 하루 동안 섭식하는 능력을 가지고 있으며(Perissinotto and Pakhomov 1998), 무성생식을 통한 빠른 성장과 짧은 세대교번(generation time)의 생활사와 사슬 형태의 대규모의 무리를 짓는 특성을 갖고 있기 때문에 살파는 생태적으로 유리한 환경 조건에서 일시적인 대량 증식이 가능한 것으로 판단된다(Silver 1971; Heron 1972a, b).

동물플랑크톤의 크기그룹별 생체량(탄소량)은 동물플랑크톤의 생리반응을 추정하거나 동물플랑크톤 군집의 모델 연구에 있어 매우 중요하기 때문에(Dam et al. 1993; Madin et al. 2001), 크기그룹별 생체량에 대한 정보는 해양생태계 먹이망에서 동물플랑크톤의 역할을 이해하는데 매우 유용하다(Landary et al. 2001; Roman et al. 2002). 본 연구에서 각 크기그룹별 생체량 분포를 살펴보면 Warm pool에서는 1 mm 이하의 크기그룹이 56% 이상을 차지하였으며, 필리핀 EEZ에서는 48%, 일본 EEZ와 동중국해에서는 각각 34%와 38%를 차지하였다. Warm pool에서는 1 mm 이하의 작은 크기그룹이, 우리나라 근해로 들어오면서 1 mm 이상의 크기그룹이 중요하였다(Fig. 8). 이것은 위도변화에 따른 식물플랑크톤과 종속영양 와편모류의 분포와 크기별 분포와 밀접한 관련이 있는 것으로 판단된다. 최 등 (2011)에 의하면 동중국해 해역에서 4년(2006-2009)간의 크기그룹별 동물플랑크톤 생체량을 관찰

한 결과, 1 mm 미만의 작은 동물플랑크톤은 Chl-*a* 농도와 양의 상관관계를 보였지만, 1 mm 이상의 큰 크기그룹은 어떠한 상관관계를 보이지 않았다. 이러한 결과는 북부 동중국해에서 2008년에 조사한 각 크기그룹별 우점 분류군이 1 mm 미만의 크기그룹에서는 대부분 초식성에 가까운(Giesecke and Gonzalez 2004) *Paracalanus* spp. 성체와 copepodites가 유생이었으나, 1 mm 이상의 그룹에서는 육식성 *Sagitta* spp.의 비율이 높다는 사실을 통해 확인할 수 있었다(강 2008). 이처럼 중형동물플랑크톤의 크기스펙트럼에 대한 자료는 해양환경 및 생태계 변동을 이해하는 데 많은 정보를 제공해 준다.

본 조사에서 주요 난수성 요각류는 *Pleuromamma gracilis*, *Cosmocalanus darwini*, *Lucicutia flavicornis*, *Undimula vulgaris* 등이 출현하였다. 이 종들은 쿠로시오 해류계를 대표하는 해양생물로 알려져 있지만(Chihara and Murano 1997), 이들의 해역별 분포자료에 대한 정보는 거의 없다. 본 연구에서 조사된 요각류 *P. gracilis*와 *C. darwini*는 대양역에서 일본 EEZ로 가면서 증가하였으며, 반대로 *L. flavicornis*는 대양역에서 일본 EEZ로 가면서 감소하였고, *U. vulgaris*는 분포의 중심이 일본 EEZ와 동중국해에 위치하였다(Fig. 12). *Pleuromamma gracilis*와 *C. darwini* 그리고 *L. flavicornis*는 서로 다른 분포 패턴을 가졌지만, 이들의 분포를 통해 일본 EEZ의 대륙사면과 대륙붕 경계(정점 28)까지는 쿠로시오 해류의 직접적인 영향을 받는 것으로 판단할 수 있으며, 동중국해를 경계로 쿠로시오 해류의 세력이 약해짐을 알 수 있었다. 따라서 난수성 요각류들의 분포를 통해 Warm pool에서 시작된 난류수는 필리핀 EEZ를 지나 일본 EEZ의 대륙사면까지 그 영향이 강하게 나타나지만, 대륙사면과 바로 인접한 대륙붕 해역부터 동중국해에 분포하는 물리적으로 서로 다른 수괴와 혼합이 일어나면서 쿠로시오 해류 본래의 특성이 희석되는 것으로 판단되며, 이것을 통해 동중국해역이

Fig. 12. Regional distribution in abundance (ind. m⁻³) of the warm water mesozooplankton

쿠로시오 해류의 유입을 부분적으로 차단하고 있음을 간접적으로 확인할 수 있었다.

Richardson (2008)은 지구온난화로 인한 수온상승이 동물플랑크톤 군집에 미치는 영향에 대해 보고한 바 있다. 지구온난화에 의한 수온상승은 수온약층이 강화되어 수층의 성층화가 지속되고 저층으로부터 영양염의 유입을 차단하여 표층의 1차 생산력이 감소시키는 결과를 초래한다. 또한, 식물플랑크톤 군집도 크기가 작은 극미소식물플랑크톤이나 편모류(flagellates)가 우점할 것이다. 이러한 환경조건 아래에서 상대적으로 크기가 작은 동물플랑크톤과 젤라틴성 동물플랑크톤(salps, doliolids, ctenophore)이 우점하면서 전체적으로 동물플랑크톤 생체량이 감소할 것이고, 동물플랑크톤의 군집 내 개체군의 조성물과 다양성도 변화할 것으로 추정했다. 비록 본 연구에서는 2007년 북서태평양의 열대해역에서 온대해역에 이르는 넓은 해역에 분포하는 중형동물플랑크톤의 위도별 총 생체량과 크기그룹별 생체량, 개체수, 종조성에 대한 결과만을 기술하였지만, 이러한 기초자료들이 장기적으로 축적된다면 동물플랑크톤의 장기변동 자료를 통해 지구온난화에 의한 해양생태계 변동을 이해하는 간접적인 척도로 유용하게 사용될 수 있을 것이다.

사 사

현장조사에 많은 도움을 주신 연구선 “온누리호” 승조원께 감사드립니다. 또한, 식물플랑크톤의 Chl-*a* 자료 및 원생동물 자료를 제공해 주신 노재훈, 양은진 박사님께 감사드립니다. 이 논문은 한국해양연구원 과제인 “북서태평양이 한반도 주변해(대한해협)에 미치는 영향 연구(PE98563)”의 지원을 받아 수행되었습니다.

참고문헌

- 강경아 (2008) 여름철 북부 동중국해의 중형동물플랑크톤 분포 특성과 요각류 *Calanus sinicus*의 개체군 동태. 석사학위 논문, 부경대학교, 80 p
- 양은진, 주세종, 최중기 (2008) 북서태평양에서 종속영양 원생생물 군집 및 섭식압의 해역별 비교. *Ocean and Polar Res* **30**:289-301
- 양은진, 최중기 (2009) 섬모충류에 대한 요각류 *Acartia hongii*의 섭식: 실험실 연구. *Ocean and Polar Res* **31**:265-276
- 최근형, 이창래, 강형구, 강경아 (2011) 동중국해 북부해역의 동물플랑크톤 크기그룹별 생체량의 분포 특성 및 변화. *Ocean and Polar Res* **33**:135-147
- 한국해양연구원 (2007) 북서태평양이 한반도 주변해(대한해협)에 미치는 영향 연구. 한국해양연구원, BSPP07401-1917-1, 783 p
- Ara K (2001) Length-weight relationship and chemical content of the planktonic copepods in the Cananéia Lagoon estuarine system, Sao Paulo, Brazil. *Plankton Biol Ecol* **48**:35-45
- Altabet MA, Small LF (1990) Nitrogen isotopic ratios in fecal pellets produced by marine zooplankton. *Geochimica et Cosmochimica Acta* **54**:155-163
- Beaugrand G, Reid PC, Ibanez F, Lindley JA, Edwards M (2002) Reorganization of North Atlantic Marine Copepod Biodiversity and Climate. *Science* **296**:1692-1694
- Børsheim KY, Bratbak G (1987) Cell volume to cell carbon conversion factors for a bacterivorous *Monas* sp. enriched from sea waters. *Mar Ecol Prog Ser* **36**:171-175
- Calbet A, Landary MR (1999) Mesozooplankton Influences on the Microbial Food Web: Direct and Indirect Trophic Interactions in the Oligotrophic Open Ocean. *Limnol Oceanogr* **44**:1370-1380
- Chen YLL (1995a) Temporal and spatial changes of chlorophyll *a* in the KEEP study waters off northern Taiwan. *Terr Atmos Ocean Sci* **6**:607-620
- Chen YLL (1995b) Phytoplankton composition and productivity in response to the upwelling off northeastern Taiwan. *Proc Nat Sci Coun Part B* **19**:66-72
- Chern CS, Wang J, Wang, DP (1990) The exchange of Kuroshio and East China Sea shelf water. *J Geophys Res* **95**:16017-16022
- Chiba S (2007) Transformation of zooplankton community in the Western North Pacific with warming condition after the 1990s. In: 4th Zooplankton production symposium, Hiroshima, Japan, 28 May-1 Jun 2007
- Chiba S, Tadokoro K, Sugisaki H, Saino T (2006) Effects of decadal climate change on zooplankton over the last 50 years in the western Subarctic North Pacific. *Global Change Biol* **12**:907-920
- Chihara M, Murano M (1997) An Illustrated Guide to Marine Plankton in Japan. University of Tokyo Press, Tokyo, 1479 p
- Dam HG, Miller CA, Jónasdóttir SH (1993) The trophic role of mesozooplankton at 47°N, 20°W during the North Atlantic Bloom Experiment. *Deep-Sea Res II* **40**:197-212
- Elder L (1979) Recommendations on methods for marine biological studies in the Baltic Sea: phytoplankton and chlorophyll. *Balt Mar Biolog Publ* **5**:1-39
- Fowler SW, Knauer GA (1986) Role of large particles in the transport of elements and organic compounds through the oceanic water column. *Prog Oceanogr* **16**:147-194

- Frost BW (1991) The role of grazing in nutrient-rich area of the open sea. *Limnol Oceanogr* **36**:1616-1630
- Giesecke R, Gonzalez HE (2004) Mandible characteristics and allometric relations in copepods: a reliable method to estimate prey size and composition from mandible occurrence in predator guts. *Rev Chil Hist Nat* **77**:607-616
- Hansen B, Hjornsen PK, Hansen PJ (1994) The size ratio between planktonic predators and their prey. *Limnol Oceanogr* **39**:395-403
- Heron AC (1972a) Population ecology of a colonizing species: the pelagic tunicate *Thalia democratica*. I. Individual growth rate and generation time. *Oecologia* **10**:269-293
- Heron AC (1972b) Population ecology of a colonizing species: the pelagic tunicate *Thalia democratica*. II population growth rate. *Oecologia* **10**:294-312
- Huo YZ, Wang SW, Sun S, Li CL, Liu MT (2008): Feeding and egg production of the planktonic copepod *Calanus sinicus* in spring and autumn in the Yellow Sea, China. *J Plankton Res* **30**:723-734
- Landary MR, Al-Mutairi H, Selph KE, Christensen S, Nunnery S (2001) Seasonal patterns of mesozooplankton abundance and biomass at Station ALOHA. *Deep-Sea Res II* **48**:2037-2061
- Madin LP, Horgan EF, Steinberg DK (2001) Zooplankton at the Bermuda Atlantic Time-series Study (BATS) station: diel, seasonal interannual variation in biomass, 1994-1998. *Deep-Sea Res II* **47**:2063-2082
- Moore LR, Goericke R, Chisholm SW (1995) Comparative physiology of *Synechococcus* and *Prochlorococcus*: influence of light and temperature on growth, pigment, fluorescence and absorptive properties. *Mar Ecol Prog Ser* **116**:259-275
- Odate K (1994) Zooplankton biomass and its long-term variation in the north Pacific Ocean, Tohoku sea area, Japan. *Bull Tohoku. Nat Fish Res Inst* **56**:115-173
- Park W, Sturdevant M, Orsi J, Wertheimer A, Fergusson E, Heard W, Shirley T (2004) Interannual abundance patterns of copepods during an ENSO event in Icy Strait, southeastern Alaska. *ICES J Mar Sci* **61**:464-477
- Perissinotto R, Pakhomov EA (1998) The trophic role of the tunicate *Salpa thompsoni* in the Antarctic marine ecosystem, *ICES J Mar Sys* **17**:361-374
- Peterson WT, Gómez-Gutiérrez J, Morgan CA (2002) Cross-shelf variation in calanoid copepod production during summer 1996 off the Oregon coast, USA. *Mar Biol* **141**:353-365
- R Development Team (2006) A language and environment for statistical computing. R Foundation for Statistical computing, Vienna, Austria
- Richardson AJ (2008) In hot water: zooplankton and climate change. *ICES J Mar Sci* **65**:279-295
- Roemmich D, McGowan J (1995) Climatic warming and the decline of zooplankton in the California Current. *Science* **267**:1324-1326
- Roman MR, Damb HG, Le Borgne R, Zhang X (2002) Latitudinal comparisons of equatorial Pacific zooplankton. *Deep-Sea Res II* **49**:2695-2711
- Shimada A, Maruyama T, Miyachi S (1996) Vertical distribution and photosynthetic action spectra of two oceanic pico-phytoplankters, *Prochlorococcus marinus* and *Synechococcus* sp.. *Mar Biol* **127**:15-23
- Silver MW (1971) The habitat of *Salpa fusiformis* in the California Current as defined by stomach content studies and the effect of salp swarms on the food supply of the plankton community. Ph.D. Thesis, University of California, San Diego, 135 p
- Small LF, Landary MR, Eppley RW, Azam F, Carlucci AF (1989) Role of plankton in the carbon and nitrogen budgets of Santa Monica Basin, California. *Mar Ecol Prog Ser* **56**:57-74
- Steinberg DK, Silver MW, Pilskaln CH (1997). Role of mesopelagic zooplankton in the community metabolism of giant larvacean house detritus in Monterey Bay, California, USA. *Mar Ecol Prog Ser* **147**:167-179
- Sugimoto T, Tadokoro K (1998) Interdecadal variations of plankton biomass and physical environment in the North Pacific. *Fish Oceanogr* **7**:289-299
- Turner JT (2004) The importance of small planktonic copepods and their roles in pelagic marine food webs. *Zool Stud* **43**:255-266
- Yang EJ, Kang HK, Yoo S, Hyun JH (2009) Contribution of auto- and heterotrophic protozoa to the diet of copepods in the Ulleung Basin, East Sea/Japan Sea. *J Plankton Res* **31**:647-659
- Yuan Y, Liu Y, Liu CT, Su J (1998) The Kuroshio east of Taiwan and the currents east of the Ryukyu Islands during October of 1995. *Acta Oceanol Sin* **17**:1-13

Received Jul. 25, 2011

Revised Aug. 22, 2011

Accepted Aug. 30, 2011