Article

북동태평양 북위 10.5°에서 동물플랑크톤의 경도별 분포 특성

강정훈^{1*} · 조규희² · 손주원² · 김웅서²¹한국해양연구원 남해연구소
(656-830) 경상남도 거제시 장목면 장목리 391²한국해양연구원 해양자원연구본부
(425-600) 경기도 안산시 안산우체국 사서함 29호

Longitudinal Distribution of Zooplankton at 10.5°N in the Northeastern Pacific

Jung-Hoon Kang^{1*}, Kyu Hee Cho², Ju-Won Son², and Woong-Seo Kim²¹South Sea Research Institute, KORDI
Geje 656-830, Korea²Marine Resources Research Department, KORDI
Ansan P.O. Box 29, Seoul 425-600, Korea

Abstract : We investigated the longitudinal variations in zooplankton abundances and their related physico-chemical properties at nine stations located between 136°W and 128°W at 10.5°N in the northeastern Pacific in summer 2004. Temperature, salinity, inorganic nutrients, chlorophyll-*a* (hereafter chl-*a*) and zooplankton (>200 μ m) were sampled within the depth from the surface to 200 m depth at 1° longitude intervals. Zooplankton (>200 μ m) samples were vertically collected at two depth intervals from surface to 200 m, consisting of surface mixed and lower layers (thermocline~200 m). Longitudinal distributional pattern of hydrological parameters (especially salinity) was physically influenced by the intensity of westward geostrophic current passage relating to the NEC (North Equatorial Current). Data from the longitudinal survey showed clear zonal distributions in the hydrological parameters (temperature, salinity and nutrients). However, spatial patterns of the chl-*a* concentrations and zooplankton abundances were mostly independent of the zonal distributions of hydrological parameters. The two peaks of zooplankton abundance in the surface mixed layer were characterized by different controlling factors such as bottom-up control from nutrients to zooplankton (129°W) and accumulation by increment of friction force and taxonomic interrelationship (133° and 134°W). Divergence-related upwelling caused introduction of nutrients into surface waters leading to the increment of chl-*a* concentration and zooplankton abundances (129°W). Increased friction force in relation to reduced flow rates of geostrophic currents caused accumulation of zooplankton drifting from eastern stations of study area (133° and 134°W). Besides, high correlation between immature copepods and carnivorous groups such as chaetognaths and cyclopoids also possibly contributed to the enhanced total abundance of zooplankton in the surface mixed layer ($p < 0.05$). Zooplankton community was divided into three groups (A, B, C) which consecutively included the eastern peak of zooplankton (129°W), the western peak (133° and 134°W) and high nutrient but low chl-*a* concentration and zooplankton abundance (136°W). Moreover, Group B corresponded to the westward movement of low saline waters (<33.6 psu) from 128 to 132°W. In summary, longitudinal distributions of zooplankton community was characterized by three different controlling factors: bottom-up control (129°W), accumulation by increased friction force and relationships among zooplankton groups (133° and 134°W), and mismatch between hydrological parameters and zooplankton in the high nutrient low chlorophyll area (136°W) during the study period.

Key words : longitudinal distribution, zooplankton, chlorophyll-*a*, nutrient, the northeastern Pacific

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

1. 서 론

본 연구는 북동태평양 클라리온-클리퍼톤 균열대 (Clarion-Clipperton fracture zone) 내에 위치한 KODOS (Korea Deep Ocean Study) 연구해역 내에서 심해채광사업의 일환으로 수행되었다. 적도 용승(equatorial upwelling)에 의해 표층으로 유입된 고 농도의 영양염은 북위도로 이동하며 플랑크톤의 분포에 영향을 끼친다(Blackburn *et al.* 1970; Vinogradov 1981; Barber *et al.* 1996). 이 분포는 북동적도 태평양의 표층환경을 특징짓는 서로 반대방향으로 흐르는 해류로부터 형성된 물리적 특성인 수렴(convergence)과 발산(divergence)에 의해 영향을 받는다(Pickard and Emery 1982).

북동적도 태평양에서 나타나는 이 같은 물리·화학적 특성들은 계절 및 연간적인 변이를 나타내며, 결과적으로 엽록소 농도, 일차생산력 및 중형동물플랑크톤 생물량의 위도별 차이를 나타낸다(Vinogradov 1981; White *et al.* 1995; Roman *et al.* 2002; Le Borgne *et al.* 2003). 이와 같은 플랑크톤의 위도별 분포 양상 및 연간 변화량에 대한 자료는 인위적 심해자원채광 작업 시 발생할 현상들에 의한 플랑크톤 변화량과 구별할 수 있는 단초가 된다. 그 변화량에 영향을 주는 것으로 기후변동이 있으며, El Niño와 La Niña와 관련한 위도별 분포에 대한 연구가 미국과 프랑스 그리고 대한민국에 의해 수행되었다. 경도 140°W와 180°W에서 수행된 미국의 JGOFS(Joint Global Ocean Flux Study) EqPac(Equatorial Pacific) study와 프랑스의 EBENE(Etude du Broutage en Zone Equatoriale) cruise가 대표적인 예이며, 기후변동과 관련된 플랑크톤의 위도별 분포연구에 초점이 맞추어져 있다(White *et al.* 1995; Le Borgne *et al.* 2003). 대한민국의 경우는 130.5°W의 5°-17°N 범위에서 KODOS 연구의 일환으로 지속적으로 수행되었고, El Niño(1998년)와 La Niña(1999년) 현상에 의한 동물플랑크톤 위도별 분포의 연간 변이가 크게 나타났다고(Kang 2004).

동물플랑크톤 연구가 군집수준까지 이루어졌던 위도별 분포 연구와 달리(Kang *et al.* 2004a; MOMAF 1998, 1999, 2004), 경도별 분포에 관한 연구는 방산층류와 요각류에 국한되어 일부 수행된 것이 전부이다(Guérédrat 1971; Shih 1986; Le Borgne *et al.* 1999; Yamashita *et al.* 2002). 경도별 분포연구가 상대적으로 주목을 받지 못했던 까닭은 북동태평양을 가로지르는 해류에 기인한다. 이론적으로 한 방향으로 흐르는 해류를 따라 나타나는 환경은 동일한 조건하에 놓여 있게 되므로, 상대적인 차이를 기대하기가 쉽지 않다. 이에 반해 위도별 분포는 서로 다른 방향의 해류가 교차되어 나타나는 물리적 특성들을 가로지르게 되므로 상대적으로 분명한 구배를 기대할 수 있다

(Kang *et al.* 2004a; Yang *et al.* 2004). 동물플랑크톤의 경도별 분포의 이해는 해저 광물 채광 작업 시 표층으로 유입된 고농도의 부유물질이 생물상에 미치는 영향에 예측할 수 있는 기초 자료가 된다는 점에서 중요하다. 표층에 유입된 부유물질은 동쪽, 혹은 서쪽으로 가로지르는 여러 해류에 편승해 해류의 속도 및 수송량에 관련하여 확산될 것이기 때문이다. 따라서 본 연구에서는 장기 모니터링 정점(10.5°N, 130.5°W)을 기준으로 128°W부터 136°W까지 1° 간격으로 환경요인과 식물플랑크톤의 엽록소-*a* 농도 그리고 동물플랑크톤 채집결과를 통해 동물플랑크톤 경도별 분포유형에 미치는 물리·화학적 및 생물학적인 특성을 이해하고자 하였다.

2. 재료 및 방법

채집 및 분석

본 연구는 2004년 8월 2일부터 29일까지 27일간 북동태평양 클라리온-클리퍼톤 균열대내의 10.5°N 선상의 128°~136°W 범위에서 수행되었다(Fig. 1). 조사정점은 1° 간격으로 총 9곳에서 수행되었다.

수온과 염분의 수직 분포는 CTD meter(Sea Bird 911 Plus)를 이용하여 얻었고, 해수 시료는 Rosette에 장착된 니스킨 채수기를 이용하여 표층부터 수심 200 m내의 총 9개의 수심에서 채수되었다.

무기 영양염(질산염+아질산염, 인산염, 규산염) 분석을 위한 시료는 GF/F 여과지로 거른 해수를 급속 냉동하여 실험실로 옮긴 뒤, 실험실에서 영양염 자동분석기(EVOLUTION II, Alliance)로 분석하였다(Parsons *et al.* 1984). 엽록소-*a* 농도는 2 l의 해수를 0.45 µm membrane filter(25 mm diameter, Whatman)로 거른 후, 90% 아세톤 용액에 24시간동안 4°C에서 용출시킨 후, 형광측정기(Turner Designs 10-AU)로 측정하였다. 이에 더하여 염산(10%)을 첨가한 후 형광값을 측정하여 phaeopigment 값을 보정하였다(Parsons *et al.* 1984).

동물플랑크톤 군집 분석을 위한 채집은 개폐식 네트(opening-closing net)(망구 직경 100 cm, 망목크기 300 µm)를 사용하여 수온약층을 경계로 표면 혼합층과 저층(수온 약층~200 m)을 층별 채집하였다. 채집 수심은 선상에서 CTD를 내려 읽어낸 수온 수직분포를 토대로 결정되었다. 정점 136°W와 135°W를 제외한 정점에서는 표층에서 수심 40 m까지 채집하였고, 다음으로 40 m에서 200 m까지 층별로 채집하였다. 정점 136°W와 135°W에서는 표면 혼합층은 표층에서 수심 30 m까지, 저층은 수심 30 m에서 200 m까지 채집하였다. 네트 여과량은 네트 입구에 부착된 유량계(Hydro-Bios flowmeter)를 근거로 계산하였다. 모든 시료는 두 번 반복 채집하였고, 즉시 시료병(1 l)에

Fig. 1. Map showing the survey stations during 2004 cruise along the longitudinal line of 10.5°N in the northeastern equatorial Pacific Ocean.

옉겨 담은 후 중성포르말린으로 최종 농도가 약 5%가 되도록 고정시켰다. 실험실에서 동물플랑크톤 시료를 균등하게 섞은 후 부표품을 뽑아내어 Bogorov-type의 계수판에 옉긴 후 해부현미경(Ziess, Stemi 2000-C)을 이용하여 최대 100배의 배율 하에서 분석하였다. 동물플랑크톤의 동정은 요각류의 경우 속 수준까지 하였고, 그 외의 생물군은 보다 광범위한 분류군으로 구분하였으며, 분석된 동물플랑크톤은 최종적으로 단위체적당 개체수(개체/m³)로 환산하였다.

자료 분석

지형류의 속도는 세 정점(131, 132, 133°W)에서 수심 1,000 m의 수온 및 염분을 토대로 계산되었다(MOMAF 2005). 동물플랑크톤이 채집된 수심을 고려하여 표면 혼합층과 저층(수온약층~200 m)을 대상으로 각 수층별로 수온, 염분 및 영양염은 평균하였고, 엽록소-*a* 농도는 적분하였다. SPSS 10.0 통계 패키지를 이용하여 동물플랑크톤 분류군의 분포유형과 환경요인간의 관계를 요인분석으로 확인하였다. 동물플랑크톤 분류군의 경도별 분포에 영향을 줄 수 있는 요인으로 수온, 염분, 영양염 그리고 엽록소-*a* 농도를 고려하였다. 군집분석(cluster analysis)은 동물플랑크톤 군집의 종 조성 및 개체수 자료를 토대로 전

체 동물플랑크톤 군집의 1% 이상 점유하는 분류군을 대상으로 수행하였고, 정점 간 비유사도 지수(Bray-Curtis dissimilarity index)를 토대로 결과를 수상도(dendrogram)로 표시하였다. 군집분석은 MVSP version 3.13b를 이용하였다. 생물 분류군별 개체수 간의 상관성 분석은 피어슨 상관계수를 근간으로 통계 패키지(SPSS 10.0)에서 수행하였다.

3. 결 과

물리·화학적 특성

본 조사해역(10.5°N, 128°~136°W)은 서향류인 북적도 해류역에 해당되는 것으로 나타났으며 세 곳의 정점에서 CTD 결과를 토대로 지형류를 측정된 결과 동쪽에 위치한 곳의 해류속도가 상대적으로 높게 나타났다. 북적도 해류는 표층에서 속도가 높고 100 m 이내의 깊이에서 주로 영향을 끼쳐 저층(수온약층~200 m)보다 표면 혼합층의 물리·화학적 분포유형이 해류와 연관성이 높았다(Fig. 2).

표층 수온은 28.32~28.66°C의 범위에서 변이를 나타냈고, 정점 132°W를 기준으로 서쪽의 수온이 동쪽에 비해 다소 낮은 경향을 나타냈다. 수온약층은 수심 30~50 m 범위에서 형성되어 있고, 그 수심은 동서 방향으로 큰 차이

Fig. 2. Vertical profiles of zonal geostrophic currents relative to 1000 m for stations pairs 133°W, 132°W, and 131°W from the left. Negative U denotes the westward flow (cited from MOMAF 2005).

Fig. 3. Vertical profiles of temperature, salinity, chlorophyll-a and inorganic nutrients (nitrate+nitrite, phosphate and silicate) in the northeastern Pacific during the study period.

없는 분포를 나타냈다(Fig. 3). 이에 비해 수온약층 아래로는 급격한 수온감소를 나타냈다. 표층 염분은 33.55~33.81 psu의 범위에서 가장 동쪽인 128°~129°W에서 33.55~33.58 psu의 범위로 가장 낮았고, 서쪽으로 가면서 높아지는 경향을 나타냈다. 염분약층은 10~30 m 범위에서 형성되어 있고, 그 수심은 가장 동쪽인 정점 128°W를 제외하고 동서 방향으로 큰 차이가 없었다(Fig. 3).

표층 질산염농도는 모든 정점에서 N.D.(not detected) ~0.12 μM 의 범위를 나타냈고, 다른 정점에 비해 높은 농

도의 질산염을 포함한 수괴가 정점 128°~130°W 범위의 표층으로 용승한 것이 관찰되었다(Fig. 3). 인산염 또한 정점 128°~130°W 범위에서 표층으로 용승된 현상이 관찰되었고, 농도범위는 N.D.~0.12 μM 을 나타냈다. 이와 반대로 가장 서쪽인 정점 135°~136°W에서는 0.12 μM 보다 높은 농도(0.36, 0.29 μM)가 표층에서 관측되었는데, 특히 정점 136°W에서는 동쪽 정점(128°~130°W)보다 높은 영양염 농도가 나타났고, 동시에 낮은 수온이 관측되었다. 규산염도 0.81~3.93 μM 의 범위 내에서 인산염과 유사한 분포유

형을 나타냈다. 표층 규산염 농도가 가장 동쪽인 정점 128°~130°W에서 1.30~1.51 μM 을 나타낸 반면, 서쪽 끝 정점 136°W에서는 3.93 μM 으로 높게 나타났다(Fig. 3).

질산염은 모든 정점의 전 수층에서 N.D.~49.18 μM 의 범위를, 인산염은 N.D.~3.47 μM , 그리고 규산염은 0.78~138.80 μM 을 나타냈다(Fig. 3). 이들 영양염의 농도는 표층에서 최저였고, 수온약층으로부터 수심이 깊어지면서 영양염 농도가 급격히 증가하였다(Fig. 3).

표층 엽록소-*a* 농도는 정점 128°~130°W에서 가장 높았고(0.118~0.159 $\mu\text{g/l}$), 서쪽 정점(133°~135°W)에서 가장 낮게(0.090~0.099 $\mu\text{g/l}$) 나타났다(Fig. 3). 엽록소 농도 최대 수층(Subsurface chlorophyll maximum)은 수심 50 m 전후에서 나타났으며, 정점 128°W에서 가장 높은 농도를(0.368 $\mu\text{g/l}$) 나타냈고, 정점 132°W에서 다음으로 높았다(0.326 $\mu\text{g/l}$)(Fig. 3).

수층 별 환경 및 동물플랑크톤 분류군별 분포 표면 혼합층

표면 혼합층에서 정점별 평균 수온은 25.99(129°W)~28.13°C(128°W)의 범위를, 평균 염분은 33.61(128°W)~34.07 psu(132°W)의 범위를 나타냈다(Fig. 4). 평균 질산염 농도는 0.93(132°W)~4.27 μM (129°W), 인산염은 0.10(131°W)~0.49 μM (136°W), 규산염은 136°W에서 4.95 μM 로 다른 정점에 비해 높았고, 다른 정점은 3.20 μM 이하의 값을 나타냈다. 적분 엽록소-*a*의 농도는 3.33(136°W)~8.74 mg/m^2 (129°W)의 범위를 보였고, 동쪽의 농도가 서쪽에 비해 6.5 mg/m^2 이상 높았다(Fig. 4).

동물플랑크톤 군집의 전체 개체수는 정점 133°W(1,365 개체/ m^3)에서 가장 높았고, 그 다음으로 정점 129°W와 128°W에서 높았다(995개체/ m^3 , 872개체/ m^3)(Fig. 4). 정점 128°W의 수온은 28.13°C로 가장 높았으나, 염분은 33.61 psu로 가장 낮았다. 반면 정점 129°W에서는 수온이 급감하여 25.99°C를 나타냈고, 염분은 33.94 psu로 높게 나타났다. 이는 저층수가 표층으로 용승하여 발생한 것으로 여겨지며, 높은 값을 나타낸 질산염과 인산염 농도는 엽록소-*a* 농도 증가 및 동물플랑크톤 개체수 증가를 설명해 주었다(Fig. 4). 이와 반면 정점 129°W에 비해 상대적으로 낮은 농도의 영양염 및 엽록소-*a*를 나타낸 정점 128°W에서 동물플랑크톤 개체수는 상대적으로 낮았다. 그런데 정점 133°W에서 관측된 수온을 보면, 표층으로의 저층수의 용승가능성은 없는 것으로 판단되나, 질산염과 인산염의 증가가 관측되었다. 이는 정점 129°W의 양상과 유사하였다. 정점 133°W의 엽록소-*a* 농도는 정점 128°W와 129°W의 값에 미치지 못하였고, 정점 130°~132°W와 차이가 없었으나, 동물플랑크톤의 출현 개체수는 가장 높게 나타난 것이 특징이다. 본 연구지역에서 가장 낮은 엽

Fig. 4. Longitudinal distribution in mean temperature, mean salinity, mean nutrients, depth integrated chl-*a* concentration and zooplankton abundances at two depths of surface mixed (A) and lower layers (thermocline~200 m) (B).

록소-*a* 농도(3.32 mg/m^2)를 나타낸 정점 136°W에서 관측된 수온 및 염분은 엽록소-*a* 농도가 가장 높게(8.74 mg/m^2) 나타났던 정점 129°W와 큰 차이가 없었다.

대조적으로, 다른 정점과 달리 수온약층이 표층에 가까이 분포해 있는 정점 136°W에서는 연구지역에서 가장 높은 질산염(4.19 μM), 인산염(0.49 μM) 및 규산염(4.95 μM) 농도를 나타냈고, 수온도 26.37°C로 정점 129°W와 흡사하였다. 그러나 엽록소-*a* 농도와 동물플랑크톤 개체수는 정점 129°W와 정반대의 패턴을 나타냈다(Fig. 4).

정점 128°W와 129°W 그리고 정점 133°W에서 나타난 동물플랑크톤 개체수의 최대값들을 잘 대변해주는 분류군들은 세 가지 유형으로 구분된다. 정점 128°W나 129°W보다 133°W에 더 많은 기여를 하는 분류군으로서, 패충류, 요각류 미성숙체 및 싸이클로프스류가 이에 해당한다(Fig. 5). 대조적으로 정점 128°W와 129°W에 더 많은 기여를 하는 분류군은 방산충류와 유형류가 이에 속한다(Fig. 5). 그리고 유공충류, 모악류 및 칼라노이드류가 두

Fig. 5. The longitudinal distribution in abundances of major zooplankton groups in the surface mixed layer.

최대값에 고르게 기여하는 분류군으로 나타났다(Fig. 5).

저층(수온약층~200 m)

저층에서 관측된 환경 및 생물요인들의 경도별 분포 유형은 표면 혼합층과 독립된 경향을 나타냈으며, 예외적으로 정점 129°W와 128°W에서만 수온, 영양염 농도 및 동물플랑크톤 개체수의 변화가 유사하였다. 그러나 표면 혼합층의 정점 133°W에서 관측되었던 동물플랑크톤 개체수 증가는 없었고, 서쪽 방향에 있는 정점 135°W에서 증가된 값이 관찰되었다(Fig. 4).

정점별 평균 수온은 12.46~13.82°C의 범위 내에서 변이를 나타냈고, 정점 128°W(13.64°C)와 132°W(13.82°C)에서 높게 나타났다(Fig. 4). 평균 염분은 34.60(136°W)~34.73 psu(133°W) 범위 내에서 변이를 나타냈고, 정점 128°W(34.72 psu)와 정점 133°W(34.73 psu)에서 가장 높았다(Fig. 4). 평균 질산염 농도는 23.59(133°W)~31.28 μM (128°W)의 범위를, 평균 인산염 농도는 1.55(130°W)~2.07 μM (128°W)의 범위를, 평균 규산염 농도는 18.95 (130°W)~23.97 μM (129°W)의 범위를 나타내 정점 간 차이가 크지 않았다(Fig. 4).

적분 엽록소-a의 농도는 7.37(129°W)~11.61 mg/m² (132°W)의 범위에서 변이를 나타냈고, 표면 혼합층과 달리 정점 128°~131°W보다 132°~135°W 지역의 농도가 상대적으로 높았다(Fig. 4).

동물플랑크톤 개체수는 39(132°W)~120 개체/m³(130°W)

Fig. 6. The longitudinal distribution in abundances of major zooplankton groups in the lower layer (thermocline~200 m).

의 범위를 나타냈으며, 정점 132°W를 기준으로 서쪽의 정점 135°W에서 최대(101개체/m³)를, 동쪽으로는 정점 130°W와 129°W에서 최대(120개체/m³, 118개체/m³)를 나타냈다(Fig. 4).

연구 정점 중 동물플랑크톤 개체수의 최대값이 나타난 곳인 동쪽에 위치한 정점 129°W와 130°W 그리고 서쪽에 위치한 정점 135°W를 잘 대변해주는 분류군들은 세 가지 유형으로 구분된다. 정점 129°W와 130°W에 더 많은 기여를 하는 분류군은 방산충류와 유형류 그리고 칼라노이드류가 이에 속한다(Fig. 6). 정점 135°W에 더 많은 기여를 한 것은 유공충류가 대표적이며, 모악류와 요각류 미성숙체가 두 최대값에 고르게 기여한 분류군이였다(Fig. 6).

분류군별 점유율

표면 혼합층에서 동물플랑크톤 군집 중 우점한 분류군은 요각류이고, 이는 다시 칼라노이드류(11.8~27.0%), 싸이클로프스류(12.7~37.9%), 요각류 미성숙체(6.8~23.0%)로 나눌 수 있다. 그 다음으로 방산충류(1.0~31.8%)와 유공충류(0.8~13.9%)가 우점하였다(Fig. 7). 정점 129°W에서 방산충류는 31.8%로 가장 높았으며, 저층수의 표층 유입과 관련한 패턴과 일치하였다. 그러나 저층수의 표층 유입이 상대적으로 약했던 정점 128°W에서는 방산충류의 점유율이 1.0%로 급감하였다(Fig. 7). 반면 정점 129°W에서 요각류 미성숙체의 점유율은 6.8%에 그쳤고, 주변 정점으로 증가하여 정점 130°W에는 13.5%, 정점

Fig. 7. Longitudinal percentage of major taxonomic groups in zooplankton community at two depths of surface mixed and lower layers (thermocline~200 m).

128°W에서는 18.5%를 나타냈다. 칼라노이드류 또한 미성숙체의 점유율과 유사하게 나타나 정점 129°W에서 11.8%를, 주변으로 20.3%(128°W)와 23.1%(130°W)를 나타냈다. 이 양상은 정점 129°W의 저층(수온약층~200 m)에서도 나타나 방산충류의 점유율이 24.9%로 가장 높았다(Fig. 7).

표면 혼합층의 서쪽에서 최대 개체수를 나타낸 정점 133°W에서 방산충류의 비율이 정점 129°W에 비해 감소하였고, 유공충류, 패충류, 요각류 미성숙체, 싸이클로포스류가 상대적으로 증가하였다. 이러한 변화패턴은 저층에서 최대 개체수를 나타낸 정점 129°W와 135°W에서도 유사하게 나타났다(Fig. 7).

군집 분석

표면 혼합층에서 채집된 동물플랑크톤 군집의 구조는 25%의 비유사도 지수를 기준으로 세 그룹(A, B, C)으로 나뉘어 졌다(Fig. 8a). 정점 133°W와 134°W가 그룹 'A'로 분류되었고, 정점 128°~130°W, 132°W, 135°W가 그룹 'B'로 분류되었으며, 정점 136°W가 그룹 'C'로 구분되었다(Fig. 8a).

'A' 그룹은 서쪽에서 최대 개체수를 나타낸 정점으로

Fig. 8. Dendrogram of clustered groups by the Bray-Curtis dissimilarity based on zooplankton abundance at two depths of surface mixed (a) and lower layers (thermocline~200 m) (b).

서, 동쪽의 최대 개체수를 나타낸 정점 128°W와 129°W가 속한 'B' 그룹과는 구별되었다. 그리고 모든 종류의 영양염 농도가 높게 나타났으나, 엽록소-a 농도와 동물플랑크톤 개체수가 반응을 나타내지 않은 정점 136°W가 'C' 그룹으로 다른 그룹들과 구분되었다(Fig. 8a).

'A' 그룹에 기여도가 높은 순으로 보면 요각류 미성숙체가 16.8%의 점유율을 나타냈고, *Oncaea* spp.가 13.6%, 방산충류가 12.8%, 유공충류가 10.3%, 그리고 패충류가 6.7%로 나타났다. 그룹 'B'도 요각류 미성숙체의 기여도가 14.3%로 가장 높았고, 방산충류가 13.4%로서 두 번째로 높았으며, *Oncaea* spp.가 11.3%, *Clausocalanus* spp.가 8.7%, 그리고 유형류가 7.3%로 나타났다. 반면에 그룹 'C'에서는 *Oncaea* spp.의 기여도가 27.5%로 가장 높았으며, 요각류 미성숙체가 17.3%로 두 번째로 높았고, *Oithona* spp.가 5.9%, 방산충류가 5.5%, 유형류가 4.9%로 나타났다(Table 1).

저층에서 채집된 동물플랑크톤 군집 구조도 25%의 비유사도를 기준으로 세 그룹(a, b, c)으로 나뉘어 졌다(Fig. 8b). 그러나 각 그룹을 구성하는 정점들은 표면 혼합층과 상이하게 나타나 전혀 다른 분포를 나타냈다. 그룹 'a'에는 정점 133°W가 속하였고, 같은 정점의 표면 혼합층에서는 최대 개체수를 나타냈던 곳이기도 하다. 그룹 'a'에 높은 기여도를 나타낸 분류군은 요각류 미성숙체로서

Table 1. Contribution of average abundance in the zooplankton groups divided by the cluster analysis at two depths of surface mixed and lower layers (thermocline~200 m). (Unit: %)

Surface mixed layer				Lower layer (thermocline~200 m)			
Species	A	B	C	Species	a	b	c
Foraminiferans	10.34	6.22	5.51	Foraminiferans	5.22	9.35	11.57
Radiolarians	12.76	13.39	4.41	Radiolarians	4.01	13.53	4.14
Hydromedusae	2.10	1.80	1.80	Hydromedusae	-	1.16	0.67
Siphonophores	1.64	2.07	2.02	Siphonophores	4.19	1.98	1.95
<i>Sagitta</i> spp.	2.25	2.60	1.51	<i>Sagitta</i> spp.	2.81	2.34	3.42
Ostracods	6.67	2.66	-	Ostracods	8.20	3.60	0.55
<i>Nannocalanus</i> sp.	0.82	0.87	2.20	<i>Nannocalanus</i> sp.	2.17	0.73	0.76
<i>Cosmocalanus</i> sp.	1.26	1.06	1.16	<i>Cosmocalanus</i> sp.	2.20	1.11	1.27
<i>Calocalanus</i> spp.	1.39	1.19	1.27	<i>Calocalanus</i> spp.	0.60	0.56	0.58
<i>Clausocalanus</i> spp.	3.55	8.68	4.40	<i>Clausocalanus</i> spp.	3.62	7.58	7.62
<i>Paracalanus</i> spp.	0.90	1.09	-	<i>Eucalanus</i> spp.	1.60	2.07	1.82
<i>Acrocalanus</i> spp.	0.62	1.81	0.93	<i>Paracalanus</i> spp.	1.21	1.08	1.76
<i>Euchaeta</i> spp.	0.42	0.79	0.35	<i>Acrocalanus</i> spp.	-	1.68	0.79
<i>Lucicutia</i> spp.	1.15	0.82	0.58	<i>Euchaeta</i> spp.	-	1.17	1.53
<i>Oithona</i> spp.	3.68	4.52	5.86	<i>Pleuromamma</i> spp.	0.60	0.54	0.69
<i>Oncaea</i> spp.	13.55	11.26	27.48	<i>Lucicutia</i> spp.	1.99	1.83	1.99
<i>Corycaeus</i> spp.	2.51	2.30	2.60	<i>Haloptilus</i> spp.	-	1.18	-
Copepodite	16.80	14.34	17.31	<i>Oithona</i> spp.	2.41	2.07	0.94
Euphausiids	0.23	0.65	0.64	<i>Oncaea</i> spp.	22.66	10.07	18.83
Gastropods	0.99	1.06	1.91	<i>Corycaeus</i> spp.	2.81	1.73	3.23
Appendicularians	4.51	7.34	4.92	Copepodite	24.29	18.03	20.78
Thaliaceans	2.12	4.59	3.65	Amphipods	-	1.06	0.86
Calyptosis larvae	0.71	2.88	3.47	Euphausiids	0.60	0.43	1.37
Echinoderm larvae	1.60	-	0.29	Appendicularians	2.20	3.43	0.92
Fish egg	2.56	0.68	-	Thaliaceans	1.60	3.81	1.64
				Calyptosis larvae	0.60	1.77	2.99
				Fish egg	-	0.87	0.55

24.3%를 나타내 표면 혼합층의 경우와 유사하였다. 다음으로 *Oncaea* spp.가 22.7%를 나타냈으며, 다음으로 패충류가 8.2%를, 유공충류가 5.2%를 나타냈다(Table 1).

그룹 'b'는 128°~131°W, 134°~135°W가 속한 그룹으로 요각류 미성숙체가 18.0%, 방산충류가 13.5%, *Oncaea* spp.가 10.1%, 유공충류가 9.4%, 그리고 *Clausocalanus* spp.가 7.6%로 나타났다. 그룹 'c'는 정점 간의 거리가 먼 정점 132°W와 136°W가 속하며 기여도가 가장 높은 분류군은 요각류 미성숙체로 20.8%를 나타냈다. 다음으로 *Oncaea* spp.가 18.8%를, 유공충류가 11.6%, 그리고 *Clausocalanus* spp.가 7.6%를 나타냈다(Table 1).

동물플랑크톤 분포와 환경요인간의 관계

주요 동물플랑크톤 분류군의 분포와 상관성이 높은 환경 및 생물요인들을 결정하기 위해 요인분석을 수행하였다. 표면 혼합층에서 제 1 성분(Z1)은 경도별 분포의

42.5%를 설명하고, 제 2 성분(Z2)은 25.2%를 차지하여, 전체 분포의 67.7%를 설명하는 것으로 나타났다. 저층에서는 제 1 성분(Z1)이 경도별 분포의 35.0%를 설명하고, 제 2 성분(Z2)은 31.0%를 차지하여 전체 분포의 66.0%를 설명하는 것으로 나타났다. 제 1 성분과 2 성분의 요인 가중치(factor loading)의 분포를 산포도로 그린 결과, 분류군들은 각 수층에서 두 개의 타입으로 묶였다(Fig. 9). 표면 혼합층에서 상관계수를 근거로 두 가지 타입의 그룹이 생성되었는데, 환경요인(염분, 영양염, 엽록소-*a* 농도)의 영향을 받은 유형류와 방산충류의 한 그룹(type I)과 환경요인과 상관없이 묶인 생물그룹(type II)이다. 이 생물그룹은 요각류 미성숙체, 요각류(칼라노이드류, 싸이클로프스류), 유공충류, 패충류, 모악류가 구성되었다. 저층에서는 패충류가 수온, 염분 및 엽록소-*a* 농도와 같이 한 그룹(type I)으로 묶였고, 나머지 동물 플랑크톤 분류군들이 한 그룹(type II)으로 묶였다(Fig. 9).

Fig. 9. Factor loading results for the first and second principal components based on the selected environmental factors and major taxonomic groups at two depths of surface mixed and lower layers (thermocline~200 m) in the northeastern Pacific in summer 2004.

4. 토 의

북동적도태평양의 표층수괴에 나타난 동물플랑크톤의 분포패턴은 해류가 교차하는 경계에서 형성된 발산 혹은 수렴대(divergence or convergence zone)와 적도용승(equatorial upwelling)에 의해 표층으로 유입된 영양염류에 영향을 받는다(Roman *et al.* 1995; White *et al.* 1995; Kang *et al.* 2004a). 특히 적도에서 북위도로 갈수록 동물플랑크톤 생물량이 감소하는 분포유형의 연간변이는 La Niña에 의한 대규모 용승(upwelling)과 소규모 발산대에서 관찰되는 용승에 의한 영양염류의 표층유입에 영향을 받아 뚜렷한 차이를 나타냈다(Kang 2004). 이처럼 연강 위도별 분포가 상향조절(영양염→식물플랑크톤→동물플랑크톤)에 의해 뚜렷한 특성을 나타낸 경우와 달리, 경도별 동물플랑크톤 분포는 제한된 해역(정점 129°W의 표면 혼

합층)에서 상향조절과 이와 독립적으로 해류의 유속이 급격히 감소된 해역(133°W)의 축적(accumulation)에 기인한 것으로 판단되는 높은 개체수의 특징을 보였다(Fig. 4).

표면 혼합층에서 가장 높은 개체수를 나타낸 두 정점(129°W와 133°W)은 서로 다른 기여도를 나타낸 분류군별 분포와 관련이 있었다. 요인분석결과는 방산충류와 유형류가 상향조절에 잘 반응한 분류군임을 보여주었고, 이 두 분류군의 개체수가 정점 129°W에서 가장 높게, 정점 133°W에서 가장 낮게 나타났다(Fig. 4). 두 분류군의 먹이 선택성을 고려했을 때, 정점 129°W에서 높게 나타난 엽록소-*a* 농도(8.74 mg/m²)는 20 μ m 이상의 미소플랑크톤(주로 규조류)과 초미세 플랑크톤(<3 μ m)의 증가에 기인한 것으로 여겨진다. 방산충류는 박테리아, 미세조류, 원생생물, 요각류, 유형류 그리고 작은 동물플랑크톤 등을 섭식하는 잡식성으로 알려져 있고(Laybourn-Parry 1992; Boltovskoy 1999; Kling and Boltovskoy 1999), 특히 중앙태평양 지역에서 La Niña 시기에 증가된 영양염과, 엽록소 농도의 증가 특히 규조류의 증가에 반응하여 높은 개체수를 나타낸 분류군이다(Yamashita *et al.* 2002).

북동 태평양에서 출현하는 식물플랑크톤의 평균 70%가 초미세플랑크톤으로 알려져 있다(MOMAF 1999; 노 등 2004). 유형류는 점액질의 집(house)에 미세 여과망을 가지고 있어 미소플랑크톤에서부터 초미세플랑크톤 그리고 용존 유기물까지 여과 섭식할 수 있는 능력이 있다(Flood *et al.* 1992; Raymont 1983). 정점 129°W의 표면 혼합층에서 유형류의 개체수가 가장 높게(98개체/m³) 나타난 것으로 보아 전체 적분 엽록소-*a* 농도 중에서 초미세플랑크톤이 차지하는 비율이 낮지 않음을 의미한다.

정점 129°W에서 관찰된 영양염의 표층유입은 2003년에 동일 위도(10.5°N)상의 130.5°W에서 형성된 발산대의 용승기작(Kang *et al.* 2004a)과 흡사하다. 서로 다른 방향의 해류(북적도 해류, 북적도 반류)가 교차하여 형성된 발산대(Pickard and Emery 1982)에서 용승은, 영양염을 표층으로 유입시켜 엽록소 농도와 동물플랑크톤 개체수의 증가를 야기한다. 정점 129°W에서 표면 혼합층과 저층에서 수온이 인근 정점(130°W, 128°W)보다 낮았으며, 높은 영양염, 엽록소-*a* 농도 및 동물플랑크톤 개체수가 나타나 발산에 의한 용승을 반증하였다(Fig. 4). 뿐만 아니라, 용승의 규모도 동물플랑크톤 개체수에 영향을 끼친다. La Niña 시기인 1999년에 대단위 규모의 용승이 동일한 위치(10.5°N, 130.5°W)에서 나타났을 때 관찰된 개체수가 평년기인 2003년에 나타난 일반적인 규모의 용승에서보다 10배 높게 나타났다. 이때 표층에서 나타난 질산염은 1999년과 2003년에 각각 2.42 μ M과 0.001 μ M이었고, 표면 혼합층에서 적분 엽록소-*a* 농도는 각각 34.6 mg/m², 10.4 mg/m²로 나타나 용승의 규모와 상향조절의 전달정도

는 비례했던 것으로 나타났다.

정점 129°W에서 용승에 의한 낮은 수온이 관찰된 것과 달리, 128°W에서는 낮은 염분이 특징적이었다. 표층 염분이 단면 동쪽에서 가장 낮고, 서쪽으로 갈수록 증가한 패턴은 저염수의 기원이 동쪽임을 의미한다. 열대 태평양 해역의 평균적인 표층 염분에 의하면, Gulf of Panama 인근 해역에서 33.2 psu 미만의 낮은 염분의 해수가 분포한다. 이러한 저염수의 기원은 집중 강우역인 ITCZ(Intertropical convergence zone)를 따라 북적도 반류(North Equatorial Counter Current)를 타고 태평양을 횡단하면서 저염화된 해수이며, 태평양의 동편에 도달한 해수는 Gulf of Panama 인근의 약한 해류로 인해 집중 강우의 영향을 더욱 받게 되어 염분은 더욱 감소한다(MOMAF 2005). 이렇게 저염화된 해수가 북적도해류를 따라 서쪽으로 이동하면서 점차적으로 염분이 증가한 것으로 보인다. 지형류의 방향은 본 연구수역이 서향류인 북적도 해류역에 해당함을 보여주며, 동쪽에 해당하는 정점 131°W에서 46 cm/s의 유속으로 가장 빨랐고, 서쪽에 위치한 정점 133°W에서 13 cm/s로 상대적으로 느렸다(Fig. 2). 본 연구해역에서 북적도 해류는 저염분수를 동쪽에서 서쪽으로 이동시켜 표층에서 수심 100 m까지의 표면 혼합층 내의 염분 환경에 영향을 끼쳤을 뿐만 아니라, 높은 개체수를 나타낸 정점 129°W의 다양한 분류군들을 서쪽으로 이동시킨 것으로 여겨진다. 정점 128°W에서 132°W까지의 동물플랑크톤 군집이 같은 그룹(그룹 B)으로 묶였고, 최대 개체수를 나타낸 정점(129°W)의 종조성과 유사하게 나타난 분석 결과가 이를 잘 대변해주었다. 또한 가장 낮은 염분(33.6 psu)을 나타낸 동쪽의 표면 혼합층 수위가 서쪽으로 갈수록 점차 증가하여 나타난 경계가 그룹 B의 유형과 유사하였다. 그룹 B의 대표적 분류군은 요각류 미성숙체와 방산충류, 그리고 싸이클로프스류인 *Oncaea* spp.이다. 이들 분류군은 모두 정점 129°W에서 높은 개체수를 나타냈고, 지형류의 흐름과 함께 서쪽으로 가면서 점차 감소하는 양상을 나타냈다. *Oncaea* spp.는 용승이 일어난 곳에서 저층으로부터 유입되어 표층에서 높은 개체수를 나타낸 종이며(Kang 2004), 용승에 의한 상향조절에 잘 반응한 방산충류와 함께 서향류에 의해 서쪽으로 이송된 양상을 잘 나타냈다.

이러한 양상은 저염분수의 징후가 보이지 않은 서쪽 정점인 133°W와 134°W(그룹 A)에서 더 이상 나타나지 않았다. 정점 133°W와 134°W에서 우점하고 정점 129°W에서 낮은 개체수를 나타낸 요각류 미성숙체, 칼라노이드류, 싸이클로프스류, 유공충류, 모악류 및 패충류는 동일한 조절요인에 의해 영향을 받는 type I으로 분류되었다(Fig. 9). 이 분류군들은 상향조절에 의한 영향보다는 서향류의 유속감소에 의한 마찰력 증가에 의해 누적되어 높은

개체수를 나타낸 것으로 보인다. 그룹 B에 속하는 정점 132°W와 그룹 A에 속하는 정점 133°W간의 경계를 기준으로 나타난 질산염과 인산염의 증가폭은 컸으나, 수온의 변화가 없는 것으로 보아 저층수의 유입과는 관련이 없는 것으로 보인다. 영양염의 변화폭에 비해 적분 엽록소-*a* 농도의 차이는 매우 작았으며, 이때 관찰된 동물플랑크톤 전체 개체수의 증가폭을 적분 엽록소 농도 차이만으로 설명하기에는 무리가 있고, 지형류의 유속 변화로 설명하는 것이 의미 있는 것으로 판단된다. 빠른 해류속도는 해수의 체류시간을 감소시키고, 반대로 느려진 해류 속도는 마찰력의 증가를 가져와 체류를 증가시키는데, 체류시간이 증가된 곳에서 식물플랑크톤의 엽록소-*a* 농도와 동물플랑크톤의 개체수 증가가 관찰 된다(Hunt et al. 2001). 이를 토대로 엽록소 농도 증가폭에 비해 크게 증가한 동물플랑크톤 개체수(정점 133°W)를 어느 정도 설명할 수 있다. 이러한 양상은 동해 남부해역에서 관찰된 난수성 소용돌이(warm eddy) 구조의 남쪽에 위치한 전선역(frontal zone)에서 관찰된 동물플랑크톤 개체수 증가현상에서도 관찰되었다(Kang et al. 2004b). 뿐만 아니라, 정점 133°W와 134°W에서 높은 동물플랑크톤 개체수에 영향을 미치는 요인으로 분류군별 상호 작용을 들 수 있다.

정점 133°W와 134°W에서 공통적으로 높은 개체수를 나타낸 요각류 미성숙체, 칼라노이드류, 싸이클로프스류, 유공충류와 모악류는 서로 상관성이 높은 경도별 분포를 나타냈다($p < 0.05$). 싸이클로프스류인 *Oncaea* spp.와 *Oithona* spp.는 요각류 유생의 개체수 변화와 높은 상관성을 나타내며(Paffenhöfer et al. 1987), 본 연구에서는 요각류의 미성숙체의 분포패턴이 싸이클로프스류와 가장 상관성이 높았고($r = 0.842$, $p < 0.01$), 모악류는 칼라노이드류와의 상관성이 높았다($r = 0.93$, $p < 0.01$). 칼라노이드류에서 *Clausocalanus* spp.가 우점 하였으며, 빈 영양 환경에서 출현하는 요각류 군집의 중요한 구성종이다(Mazzocchi and Paffenhöfer 1999). 빈 영양상태인 본 연구수역에서 관측되는 낮은 농도의 식물플랑크톤 조건에 잘 적응하여 생활하며, 작은 지역에서 계속적으로 빠르게 움직이면서 먹이를 찾아다니는 습성을 보인다(Mazzocchi and Paffenhöfer 1999). 따라서 본 연구해역에서 다른 칼라노이드류에 비해 *Clausocalanus*속의 종들이 우점한 이유가 낮은 농도의 먹이조건에도 잘 적응하는 습성에 기인한 것으로 판단된다. 그리고 요각류 미성숙체는 모악류의 분포패턴과 유사하였고($r = 0.69$, $p < 0.05$), 유공충의 분포패턴과도 유사하였다($r = 0.858$, $p < 0.01$). 이는 요각류 미성숙체와 칼라노이드류가 싸이클로프스류와 모악류의 피식자일 가능성이 높음을 지시하며, 이러한 상호관계가 물리적으로 수송된 요각류 미성숙체와 칼라노이드류를 먹이로 하는 포식자가 먹이 개체수에 따라 비례적으로 변동한 것으로 여겨졌다.

그룹 'A'에서 높은 비율을 나타낸 분류군은 요각류 미성숙체, 유공충류, 패충류 및 요각류인 *Oncaea* spp.이며, 그룹 'B'와는 중 조성 보다는 개체수 차이에 의해 구분되었다(Table 1). 반면 그룹 'C'(정점 136°W)가 독립적으로 묶인 것은, 여기에서 관측된 수온감소와 함께 나타난 영양염 증가양상이 정점 129°W와 흡사하나, 이와 비례하여 엽록소-*a* 농도와 동물플랑크톤 개체수가 증가하지 않았기 때문이다. 이처럼 정점 129°W와 달리 식물플랑크톤이 높은 영양염 유입에 반응하지 않는 특성을 나타낸 정점 136°W의 경우를 HNLC(high-nutrient low-chlorophyll) 지역이라 볼 수 있다(Minas *et al.* 1986). 이 지역의 특성은 영양염은 높게 나타나나 예견된 식물플랑크톤 생물량의 증가가 나타나지 않는 것으로, 이는 철과 같은 미량원소의 부족에 의한 식물플랑크톤의 성장제한(Barber and Ryther 1969) 혹은 규조류 대발생을 일으키는 seed 개체군이 없기 때문이다(Chavez 1989).

본 조사해역은 전반적으로 빈영양 수역으로 극미소플랑크톤이 차지하는 비율이 높은 지역이며(Partensky *et al.* 1999; 노 등 2004), 영양염에 보다 즉각적으로 반응하는 플랑크톤의 비율이 낮은 것으로 여겨졌다. 또한 극미소플랑크톤의 현존량이 높아, 중형동물플랑크톤이 직접 먹이로 이용하기 어려운 것으로 판단된다. 이로 인해 엽록소-*a*의 농도가 높았던 곳에서 동물플랑크톤 개체수가 증가하지 않은 것으로 보인다. 한편 이 지역에서 높은 개체수의 동물플랑크톤이 관측되지 않은 이유로 상위 영양자의 활발한 포식으로 인한 가능성을 들 수 있으나 증빙자료의 부재로 향후 수행될 연구에서 확인되어야 할 부분으로 나타났다. 이는 동일한 해역에 놓여있는 연구수역에서 관찰된 동물플랑크톤 개체수 분포유형이 다양했던 이유가 하나 이상의 조절기작 및 생태계 특성에 의한 것임을 의미한다.

현재까지 수행된 동물플랑크톤의 경도별 분포연구는 본 연구해역보다 큰 범위에서 수행되었고, 각 연구의 대상 동물플랑크톤 분류군별 경도분포의 조절요인이 다양하였다(Guérdrat 1971; Vinogradov 1981; Shih 1986; Le Borgne and Rodier 1997; Le Borgne *et al.* 1999; Yamashita *et al.* 2002). 동물플랑크톤의 경도별 분포유형이 해류에 의해 영향을 받으며, 요각류인 *Pontellina morii*, *P. sobrina*, *Clausocalanus jobei*, 그리고 *C. farrani*가 해당되었다(Shih 1986). Guérdrat(1971)는 조사한 시기(Alizé 1 cruise)에 나타난 요각류의 총 개체수가 동쪽에서 서쪽으로 점차 감소하였음을 보고하였고, 이는 동쪽 끝 쪽에서(120°W) 높은 개체수가 출현한 것에 기인하였다. 그러나 120°W와 169°E의 범위 내에서는 큰 차이가 없었다. 122°W와 155°W의 범위에서 나타난 동물플랑크톤의 습중량의 경도별 분포 변이는 뚜렷하지 않았고(Vinogradov

1981), HNLC 지역에 해당하는 150°W와 172°W 범위에서도 유사하였다(Le Borgne and Rodier 1997). Guérdrat (1971)의 경우와 유사하게, 서쪽(140°E)에서 동쪽(170°W)으로 진행할수록 방산충류(radiolarians)의 개체수가 증가하였다(Yamashita *et al.* 2002). 이와 같은 패턴은 연구수역 동쪽에서 용승과 함께 상대적으로 낮은 수온과 높은 염분이 관측되었고, 서쪽에서는 상대적으로 높은 수온과 낮은 염분의 뚜렷한 동-서간의 차이와 일치하였다. 그러나 150°W-165°E 범위에서는 수문학적인 자료, 즉 수온과 영양염의 경도별 분포특성은 차이가 있었으나, 식물플랑크톤과 동물플랑크톤의 생물량은 그와 상응하는 패턴을 보이지 않았다(Le Borgne *et al.* 1999). 오히려 동쪽에서 서쪽으로 가면서 식물플랑크톤과 동물플랑크톤의 생물량은 점차 증가하는 경향을 나타냈다. 그에 대해 제시된 가설들로서, 첫째로 서쪽으로 가면서 생태계 구역별 진화패턴(zonal evolution)이 이종적(heterotrophy)으로 나타났기 때문이며, 둘째로 일차생산을 제한하는 요인들이 구역별로 다른 분포를 나타내는 것에 기인한 것으로 제안하였다. 그러나 실제로 식물플랑크톤과 동물플랑크톤의 변화는 평행한 유형을 보였고, 제한요인의 동-서 간의 명확한 구배가 나타나지 않았기에 적절한 설명이 되지 않았고, 오히려 중 규모 이상의 큰 범위에서 일반적으로 나타나는 유형이라 결론을 내렸을 뿐이다(Le Borgne *et al.* 1999).

이에 비해 본 연구에서 나타난 동물플랑크톤의 분포는 상대적으로 그 조절요인의 설명이 가능하였다. 본 연구수역을 지배하는 물리적 환경인 서향의 지형류가 수심 100 m 상부의 표면 혼합층의 물리, 화학 및 생물학적 특성에 영향을 끼쳤다. 유속이 상대적으로 강했던 연구수역의 동쪽에서 서쪽으로 흐르는 지형류는 저염분수를 서쪽으로 확장시켰다. 또한 정점 129°W에서 높게 나타난 동물플랑크톤 개체수는 강한 흐름의 서향류에 의해 이동되어 정점 132°W까지 분포하였다.

이는 심해저 광구에서 망간단괴의 채광이 본격화되어 저층 퇴적물에서 용출된 flume이 표층 혹은 표층에 가까운 수심으로 유입되면, 표층을 지배하는 해류의 영향을 받게 될 것은 자명하다. 즉 채광지역에서 용출된 flume은 표층 환경특성에 따라 이동하며 농도 구배를 나타낼 것이며, 그에 대한 환경영향 범위 및 패턴은 본 연구결과에서 나타난 유형과 크게 다르지 않을 것이다. 향후 해류에 의해 이동된 퇴적물이 생태계에 미치게 될 영향을 심층 연구 하여야 할 것이며, 실험조건은 다양한 조성 및 규모의 해류에 의해 형성될 현장조건을 반영하여야 할 것이다. 특히 채광지역에서 용출된 flume에 의한 생태계 반응 확인 시 고려되어야 할 부분은 동물플랑크톤의 주·야 수직이동에 의한 채집결과와 차이이다. 주간과 야간이 고려되지 않은 채집결과와 퇴적물에서 용출된 flume의 농도구배에

의한 동물플랑크톤 개체수 변화와 구분하기가 어렵게 될 것이다. 따라서 동물플랑크톤 개체수에 미치는 퇴적물의 영향을 올바르게 구분하기 위해서 반드시 수직이동 패턴을 고려하여 주간 혹은 야간을 선정하여 통일된 시간대에 채집된 결과로 해석되어야 한다.

사 사

본 논문은 한국해양연구원의 “태평양 심해저 광물자원 개발-생태환경특성(PM26803)” 사업의 지원으로 작성되었습니다.

참고문헌

- 노재훈, 유신재, 이미진, 손승규, 김웅서. 2004. Flow cytometer를 이용한 열대 동태평양의 독립영양 극미소 플랑크톤 연구. *Ocean and Polar Res.*, 26, 273-286.
- Barber, R.T. and J.H. Ryther. 1969. Organic chelators: Factors affecting primary production in the Cromwell Current upwelling. *J. Exp. Mar. Biol. Ecol.*, 3, 191-199.
- Barber, R.T., M.P. Sanderson, S.T. Lindley, F. Chai, J. Newton, C.C. Trees, D.G. Foley, and F.P. Chavez. 1996. Primary production and its regulation in the equatorial Pacific during and following the 1991-92 El Niño. *Deep-Sea Res. II*, 43, 970-993.
- Blackburn, M., R.M. Laurs, R.W. Owen, and B. Zeitzschel. 1970. Seasonal and areal changes in standing stocks of phytoplankton, zooplankton and micronekton in the eastern tropical Pacific. *Mar. Biol.*, 7, 14-31.
- Boltovskoy, D. 1999. Radiolarian Polycystina. p. 149-212. In: *South atlantic zooplankton*. ed. by D. Boltovskoy. Backhuys Publishers, Leiden, The Netherlands.
- Chavez, F.P. 1989. Size distribution of phytoplankton in the central and eastern tropical Pacific. *Global Biogeochem. Cy.*, 3, 27-35.
- Flood, P.R., D. Deibel, and C.C. Morris. 1992. Filtration of colloidal melanin from sea water by planktonic tunicates. *Nature*, 355, 630-632.
- Guérédrat, J.A. 1971. Évolution d'une population de copépodes dans le système des courants équatoriaux de l'océan Pacifique, zoogéographie, écologie et diversité spécifique. *Mar. Biol.*, 9, 300-314.
- Hunt, B.P.V., E.A. Pakhomov, and C.D. McQuaid. 2001. Short-term variation and long-term changes in the oceanographic environment and zooplankton community in the vicinity of a sub-Antarctic archipelago. *Mar. Biol.*, 138, 369-381.
- Kang, J.H. 2004. The ecology of mesozooplankton in the Yellow Sea, the East Sea, and the northeastern Equatorial Pacific. Ph.D. Thesis, Seoul National University. 160 p.
- Kang, J.H., W.-S. Kim, and S.K. Son. 2004a. Latitudinal differences in the distribution of mesozooplankton in the Northeastern Equatorial Pacific. *Ocean and Polar Res.*, 26, 351-360.
- Kang, J.H., W.-S. Kim, K.I. Chang, and J.H. Noh. 2004b. Distribution of plankton related to the mesoscale physical structure within the surface mixed layer in the southwestern East Sea. *J. Plankton Res.*, 26, 1515-1528.
- Kling, S.A. and D. Boltovskoy. 1999. Radiolarian Phaeodaria. p. 213-264. In: *South atlantic zooplankton*. ed. by D. Boltovskoy. Backhuys Publishers, Leiden, The Netherlands.
- Laybourn-Parry, J. 1992. Protozoan plankton ecology. Chapman & Hall, London, 231 p.
- Le Borgne, R., G. Champalbert, and R. Gaudy. 2003. Mesozooplankton biomass and composition in the equatorial Pacific along 180°. *J. Geophys. Res.*, 108(C12), 8143, doi:10.1029/2000JC000745.
- Le Borgne, R. and M. Rodier. 1997. Net zooplankton and the biological pump: A comparison between the oligotrophic and mesotrophic equatorial Pacific. *Deep-Sea Res. II*, 44, 2003-2023.
- Le Borgne, R., M. Rodier, A. Le Bouteiller, and J.W. Murray. 1999. Zonal variability of plankton and particle export flux in the Equatorial Pacific upwelling between 165°E and 150°W. *Oceanol. Acta*, 22, 57-66.
- Mazzocchi, M.G. and G.-A. Paffenhöfer. 1999. Swimming and feeding behaviour of the planktonic copepod *Clausocalanus furcatus*. *J. Plankton Res.*, 21, 1501-1518.
- Minas, H.J., M. Minas, and T.T. Packard. 1986. Productivity in upwelling areas deduced from hydrographic and chemical fields. *Limnol. Oceanogr.*, 31, 1182-1206.
- Ministry of Maritime Affairs and Fisheries. 1998. A report on '98 Deep Sea Bed Mineral Resources Exploration. MOMAF. 1209 p.
- Ministry of Maritime Affairs and Fisheries. 1999. A report on '99 Deep Sea Bed Mineral Resources Exploration. MOMAF. CRPM 99019-00-1201-7. 780 p.
- Ministry of Maritime Affairs and Fisheries. 2004. A report on '03 Deep Sea Bed Mineral Resources Exploration. MOMAF. CRPM 197-00-1582-5. 770 p.
- Ministry of Maritime Affairs and Fisheries. 2005. A report on '04 Deep Sea Bed Mineral Resources Exploration. MOMAF. CRPM 26800-1685-5. 645 p.
- Paffenhöfer, G.-A., B.K. Sherman, and T.N. Lee. 1987. Summer upwelling on the southeastern continental shelf of the U.S.A. during 1981: Abundance, distribution and patch formation of zooplankton. *Prog. Oceanogr.*, 19,

- 403-436.
- Parsons, T.R., Y. Maita, and C.M. Lalli. 1984. A Manual of chemical and biological methods for seawater analysis. Pergamon Press, New York, 173 p.
- Partensky, F., J. Blanchot, and D. Vaulot. 1999. Differential distribution of *Prochlorococcus* and *Synechococcus* in oceanic waters; A review. p. 457-475. In: *Marine cyanobacteria*. ed. by L. Charpy and A.W.D. Larkum. Bull. L'Institut. Oceanogr, Monaco.
- Pickard, G.L. and W.J. Emery. 1982. Descriptive physical oceanography, 4th ed. Pergamon Press, Oxford. 249 p.
- Raymont, J.E.G. 1983. Plankton and productivity in the oceans. Pergamon Press, Oxford. 824 p.
- Roman, M.R., H.G. Dam, A.L. Gauzens, J. Urban-Rich, D.G. Foley, and T.D. Dickey. 1995. Zooplankton variability on the equator at 140°W during the JGOFS EqPac study. *Deep-Sea Res. II*, 42, 673-693.
- Roman, M.R., H.G. Dam, R. Le Borgne, and X. Zhang. 2002. Latitudinal comparisons of equatorial Pacific zooplankton. *Deep-Sea Res. II*, 49, 2695-2711.
- Shih, C.-T. 1986. Longitudinal distribution of oceanic calanoids (Crustacea: copepoda): An example of marine biogeography. *Syllogeus*, 58, 105-114.
- Vinogradov, M.E. 1981. Ecosystems of equatorial upwellings. p. 69-90. In: *Analysis of Marine Ecosystems*. ed. by A.R. Longhurst. Academic Press, New York.
- White, J.R., X. Zhang, L.A. Welling, M.R. Roman, and H.G. Dam. 1995. Latitudinal gradients in zooplankton biomass in the tropical Pacific at 140°W during the JGOFS EqPac study : Effects of El Niño. *Deep-Sea Res. II*, 42, 715-733.
- Yamashita, H., K. Takahashi, and N. Fujitani. 2002. Zonal and vertical distribution of radiolarians in the western and central Equatorial Pacific in January 1999. *Deep-Sea Res. II*, 49, 2823-2862.
- Yang, E.J., J.K. Choi, and J.H. Hyun. 2004. Distribution and structure of heterotrophic protist communities in the northeast equatorial Pacific Ocean. *Mar. Biol.*, 146, 1-15.

Received Aug. 31, 2007

Accepted Dec. 7, 2007