

Article

남극 하계 드레이크 해협 미생물 먹이망에서 종속영양
미소형 및 소형플랑크톤의 역할

양은진^{1*} · 최중기² · 현정호³

¹한국해양연구원 부설 극지 연구소
(406-840) 인천광역시 연수구 갯벌로 12

²인하대학교 자연과학대학 해양학과
(402-751) 인천광역시 남구 용현동 253

³한양대학교 과학기술대학 해양환경과학과
(426-791) 경기도 안산시 상록구 한양대학로 55

**Trophic Role of Heterotrophic Nano- and Microplankton in the
Pelagic Microbial Food Web of Drake Passage in the Southern Ocean
during Austral Summer**

Eun Jin Yang^{1*}, Joong Ki Choi², and Jung-Ho Hyun³

¹*Korea Polar Research Institute, KORDI,
Incheon 406-840, Korea*

²*Department of Oceanography, College of Natural Science
Inha University, Incheon 402-751, Korea*

³*Department of Environmental Marine Sciences, College of Science and Technology
Hanyang University, Ansan 426-791, Korea*

Abstract : To elucidate the trophic role of heterotrophic nano- and microplankton (HNMP), we investigated their biomass, community structure, and herbivory in three different water masses, namely, south of Polar Front (SPF), Polar Front Zone (PFZ), the Sub-Antarctic Front (SAF) in the Drake Passage in the Southern Ocean, during the austral summer in 2002. We observed a spatial difference in the relative importance of the dominant HNMP community in these water masses. Ciliates accounted for 34.7% of the total biomass on an average in the SPF where the concentration of chlorophyll-*a* was low with the dominance of pico- and nanophytoplankton. Moreover, the importance of ciliates declined from the SPF to the SAF. In contrast, heterotrophic dinoflagellates (HDFs) were the most dominant grazers in the PFZ where the concentration of chlorophyll-*a* was high with the dominance of net phytoplankton. HNMP biomass ranged from 321.9 to 751.4 mgCm⁻² and was highest in the PFZ and lowest in the SPF. This result implies that the spatial dynamic of HNMP biomass and community was significantly influenced by the composition and concentration of phytoplankton as a food source. On an average, 75.6%, 94.5%, and 78.9% of the phytoplankton production were consumed by HNMP in the SPF, PFZ, and SAF, respectively. The proportion of phytoplankton grazed by HNMP was largely determined by the composition and biomass of HNMP, as well as the composition of phytoplankton. However, the herbivory of HNMP was one of the most important loss

*Corresponding author. E-mail : ejyang@kopri.re.kr

processes affecting the biomass and composition of phytoplankton, particularly in the PFZ. Our results suggest that the bulk of the photosynthetically fixed carbon was likely reprocessed by HNMP rather than contributing to the vertical flux in Drake Passage during the austral summer in 2002.

Key words : Drake Passage, polar front, nano- and microzooplankton, heterotrophic dinoflagellates, grazing impact

1. 서 론

남극의 해양환경은 여름철에 해빙이 녹으면서 식물플랑크톤의 대증식이 발생하고, 서향류인 남극 연안류(Antarctic Coastal Current)와 남극 대륙을 감싸며 동쪽으로 흐르는 남극 순환류(Antarctic Circumpolar Current)의 영향으로 연안역 부근에서는 남극 발산대(Antarctic divergence)가 형성되며, 외해역에서는 다양한 극전선 수역이 형성되는 등 해역간의 생태환경이 해수의 물리적 특성에 의해 복잡한 양상을 나타낸다(Longhurst 1998). 남극해의 드레이크 해협(Drake Passage)은 남극 순환류의 영향으로 복잡한 수괴특성을 갖으며, 대표적으로 아남극권해(sub-antarctic zone)와 남극권해(antarctic zone)를 구분하는 극전선역(polar front)이 존재한다(Orsi et al. 1995; Zhou et al. 2010). 남쪽의 차가운 남극 표층수와 북쪽의 따뜻한 아남극 표층수가 만나 극전선 수역을 경계로 표층 해수의 수온은 급격하게 변하며, 극전선 수역에서 이러한 물리적인 수괴 특성 변화는 해양의 화학적, 생물학적 특성에 시·공간적 변화를 유발시킨다(Orsi et al. 1995; Talley 1996). 특히 극전선 수역에서 영양염이 풍부한 순환심층수(circumpolar deep water)의 용승은 식물플랑크톤의 성장을 촉진시켜 극전선 주변 수역의 높은 생산력을 유지하는 중요한 기능을 담당한다(Moore and Abbott 2002; Ward et al. 2002; Holm-and Hansen et al. 2004). 그러나 극전선이 형성되는 수역의 범위는 바람과 지형의 영향으로 계절적으로 차이를 보이며, 또한 플랑크톤 생물량은 극전선 수역의 움직임에 따라 시·공간적으로 변화한다(Moore and Abbott 2002). 남극 해역이 비록 높은 영양염-낮은 엽록소(High Nutrient-Low Chlorophyll, HNLC) 해역으로 대표된다 하더라도 전선 수역의 움직임에 따라 생산성이 높은 해역부터 생산성이 낮은 HNLC 해역까지 계절적으로 다양한 영양상태의 해역으로 특징화된다(Holm-Hansen et al. 2004).

다양한 해양 환경 특성을 갖고 있는 남극해에서 탄소 플럭스는 매우 높으며, 이로 인하여 남극해는 전 지구 탄소 순환에 있어서 매우 중요한 역할을 담당하고 있다(Busalacchi 2004). 따라서 표층 해역에서 탄소의 이동은 매우 중요하며, 표층 해양으로부터 얼마나 많은 탄소가 제거되어지는가를 결정하는 중요한 요인으로 미세생물 먹이

망의 크기 및 구조 등에 대한 연구가 이루어져 왔다(Michaels and Silver 1988; Legendre and Le Fevre 1995). 해양의 탄소 순환에서 미세생물 먹이망의 역할은 플랑크톤의 군집 구조 및 해역의 영양상태에 따라 변하며(Wylie and Currie 1991), 남극해의 외해역과 북태평양과 같은 빈 영양 수역에서 미세생물 먹이망은 더욱 발달되어 있다(Brown et al. 2003; Safi et al. 2007). 미세생물 먹이망이 발달한 해역에서 대부분의 탄소는 저층으로 침강하기 보다는 표층 해양에서 빠르게 재순환되며, 이러한 해역에서 종속영양 미소형 및 소형플랑크톤은 해양생태계의 기저부인 미세생물고리(microbial loop)와 중형 동물플랑크톤 먹이망 사이를 연결하여 저차 생산자로부터 생산된 에너지를 상위 먹이망에 효율적으로 전달함으로써 유기물질 및 탄소 순환에 중요한 역할을 담당한다(Azam et al. 1983).

초기 남극해 생태계에서 먹이연쇄는 구조류에 의해 주를 이루며, ‘구조류-크릴-크릴의 포식자(고래, 물개, 펭귄)’로 이어지는 단순하고 전통적인 먹이연쇄로 생각하였다(El-Sayed 1971). 그 이후 많은 연구들을 통해 남극해에서 서식하는 플랑크톤 군집은 구조류 뿐 아니라 박테리아, 미소 식물플랑크톤과 원생동물 등의 다양한 미세생물 군집으로 구성되어 있으며, 이와 같은 생물군들은 남극해의 표층 생태계에서 중요한 역할을 할 수 있음을 시사하였다(Hewes et al. 1985; Vincent 1988). 남극해의 다양한 해양 환경에서 종속영양 미소형 및 소형플랑크톤에 대한 기존의 연구들은 미세생물 군집에서 그들의 역할을 설명하였고, 또한 식물플랑크톤의 주요 소비자로서 종속영양 미소형 및 소형플랑크톤의 중요성을 강조하였다(Burkill et al. 1995; Froneman and Perissinotto 1996; Garrison and Buck 1989; Becquevort et al. 2000; Selph et al. 2001; Safi et al. 2007; Pearce et al. 2011). 남극해의 일부해역 및 일부시기에 크릴 및 요각류 등이 식물플랑크톤의 주요 소비자로서 보고되었다 하더라도(Bernad and Froneman 2003), 해양생태계 먹이망의 에너지 흐름을 파악하기 위하여 종속영양 미소형 및 소형플랑크톤의 군집 특성 및 섭식능력을 연구하는 것은 남극해 탄소 순환을 이해하는데 매우 중요하다. 그러나 남극해에서 다양한 수괴 특성으로 인한 화학적, 생태학적 인자들의 복잡한 변화 때문에 남극해에서 종속영양 미소형 및 소형플랑크톤의 역할을 이해하는 것은 아직도 어려운 문제로 남아있다. 남극해의 서로

다른 물리적 특성을 갖는 수괴에서 종속영양 미소형 및 소형플랑크톤에 대한 연구는 웨델해(Weddell Sea), 벨링겐하우젠해(Bellingshausen Sea), 남극해의 대서양 및 인도양측 해역에서 수행되었으나, 이 연구들의 대부분은 해빙주변수역(marginal ice zone)을 중심으로 조사되었다(Klaas 1997; Froneman et al. 2004; Safi et al. 2007). 따라서 드레이크 해협에서 미세생물 군집에 관한 연구는 박테리아와 식물플랑크톤을 중심으로 몇 편의 연구가 수행되었을 뿐 미세생물 먹이망에서 식물플랑크톤과 종속영양 미소형 및 소형플랑크톤 사이의 에너지 흐름에 대한 연구는 거의 전무하다(Hanson and Lowery 1985; Pedrós-Alió et al. 1996; Sommer and Ståle 1986).

본 연구의 목적은 드레이크 해협에서 극전선을 중심으로 수괴 특성의 변화에 따른 종속영양 미소형 및 소형플랑크톤 군집의 분포 특성을 조사하고, 식물플랑크톤에 대한 종속영양 미소형 및 소형플랑크톤의 섭식압을 통하여 서로 다른 수괴의 미세생물 먹이망 내에서 종속영양 미소형 및 소형플랑크톤의 중요성에 대하여 논의하고자 한다.

2. 재료 및 방법

조사수역

본 조사는 2001년 12월 31일부터 2002년 1월에 5일까지 R/V *Yuzhmorgeologiya*를 이용하여 남극해의 드레이크 해

협에서 수행되었다. 드레이크 해협에는 수온 및 염분의 성질이 다른 해수들에 의하여 경계되는 전선들이 존재한다. 대표적으로 극전선 수역(Polar Frontal Zone: PFZ)의 북쪽 경계는 아남극 전선역(Sub-Antarctic Front: SAF)이며, 남쪽 경계는 극전선역(Polar Front: PF)이 위치한 지역으로 정의된다(Fig. 1; Orsi et al. 1995). 일반적으로 남극 극전선의 위치는 표층수온이 2°C가 되는 등온선에 의해 정해지거나 수온 최소층(Temperature minimum layer: T_{min} layer < 0)의 북쪽 끝으로 정해진다(Gordon 1967). 수온 최소층은 겨울동안에 형성된 차가운 겨울 수괴가 여름동안 일사량의 증가에 의해 표층 해수는 따뜻해지는 반면에 수심 100-200 m에 존재하는 수괴는 일사량 증가에 의해 영향을 거의 받지 않아 겨울에 형성될 당시의 수온을 그대로 유지함으로써 형성된다(Carmack 1977). 극전선 수역을 경계로 북쪽의 아남극 지역에서는 주로 남극 중층수(Antarctic Intermediate Water)가 형성되어 표층에서 중층으로 침강하고, 남쪽의 남극권 해역에서는 영양염 농도가 높은 상부순환 심층수(Upper Circumpolar Deep Water)가 표층으로 용승하는 것으로 알려져 있다(Orsi et al. 1995). 조사수역은 Orsi et al.(1995)에 의해 제시된 극전선역과 아남극 전선역을 포함하고 있으며, 남위 59°의 남쪽은 극전선 남쪽수역(정점 DP1 과 DP2), 남위 59°와 60°는 극전선 수역(정점 DP3과 DP4), 남위 57°는 아남극 전선역(정점 DP5)에 위치하고 있다(Fig. 1). 본 연구는 남극 순환류

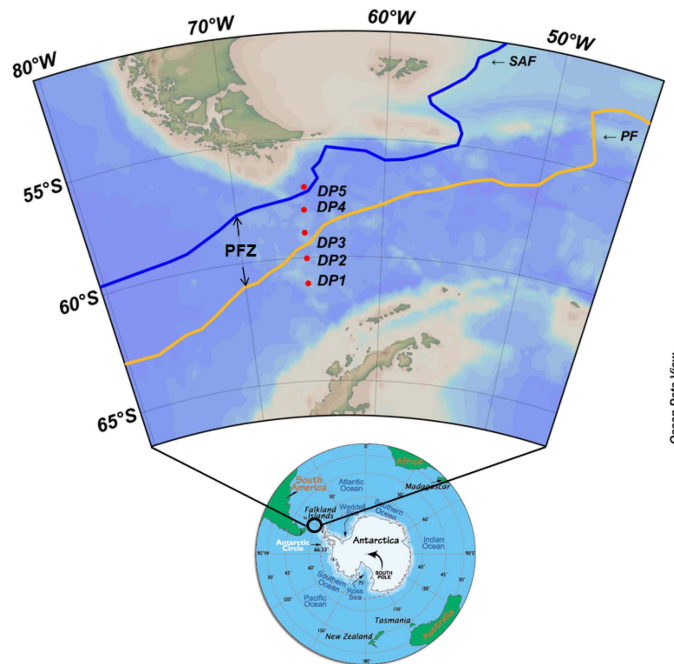


Fig. 1. Location of hydrographic stations along the 65°W transect in Drake Passage. Water mass and location of fronts are according to Orsi et al. (1995) based on the physical properties of fronts: Polar Front (PF), Sub-Antarctic Front (SAF), and Polar Front Zone (PFZ)

Table 1. Factors and formulae with their reference used to convert the biovolume of each type of plankton to the carbon mass of that type

Plakton	Conversion factor or formulae	Reference
Heterotrophic nanoflagellate	0.22 pgC cell ⁻¹	Børsheim and Bratbak (1987)
Heterotrophic dinoflagellate	C (pg) = 0.216 (V) ^{0.939}	Menden-Deuer and Lessard (2000)
Oligotrichs	0.19 pgC cell ⁻¹	Putt and stoecker (1989)
Tintinnids	C (pg) = 44.5 + 0.053 LV	Verity and Langdon (1984)
Copepod nauplii	log ₁₀ C = -4.188 + 1.451 log(BL)	Kang and Kang (1997)

V: Biovolume (in μm^3), LV: lorica volume, BL: body length.

가 강하게 발달되어 있는 드레이크 해협 서경 65°를 기준으로 하여 남위 57°에서 61°까지 1도 간격으로 조사를 수행하였다.

환경 요인 분석

조사수역에서 해수의 수온, 염분 및 밀도는 CTD (Sea-Bird 911 puls)를 이용하여 측정하였다. 총엽록소-*a* 농도는 각 정점의 0, 10, 20, 30, 50, 75, 100, 150 m에서 해수를 채수하였다. 총엽록소-*a* 농도를 측정하기 위하여 해수 1000 ml를 GF/F 여과지로 여과하였다. 크기별 엽록소-*a* 농도는 20 μm 망과 PC membrane filter paper (3 μm pore size)를 이용하여 1000 ml 해수를 걸러준 후 다시 GF/F 여과지로 여과하여 3 μm 이하(극미소), 3-20 μm (미소형), 20 μm 이상(소형)으로 크기를 구분하였다. 크기별로 여과된 각각의 여과지를 90% 아세톤에 넣고 24시간 추출하여 Turner Design Fluorometer (TD-700)를 사용하여 현장에서 엽록소- α 농도를 측정하였다.

플랑크톤의 현존량 및 탄소량

수층 내 종속영양 미소형 및 소형플랑크톤의 현존량 및 탄소량을 파악하기 위하여 0, 10, 20, 30, 50, 75, 100, 150 m에서 해수를 채수하였다. 식물플랑크톤의 군집 조성을 파악하기 위해서는 섭식을 실험이 수행된 10 m 깊이에서 채수된 해수를 이용하여 현존량을 분석하였다. 섬모충류(ciliates), 동물플랑크톤 유생(copepod nauplii) 및 규조류(diatom)를 관찰하기 위하여 1000 ml 해수를 Lugol's solution으로 최종농도 5% 되게 고정하였고, 고정된 시료는 실험실로 운반해 50 ml로 농축한 후 Utermöhl chamber 및 S-R chamber를 사용하여 도립 현미경(Olympus IX 70)으로 관찰하였다. 종속영양 미소편모류(Heterotrophic nanoflagellate, HNF), 동정 편모류(Choanoflagellates, CH),

종속영양 와편모류(Heterotrophic dinoflagellate, HDF), 극미소 플랑크톤(Eukaryotic picoplankton), 독립영양 미소편모류(Autotrophic nanoflagellates, ANF) 및 독립영양 소형편모류(Autotrophic microflagellates)의 생물량을 파악하기 위하여 500 ml의 해수를 글루타르 알데하이드로 최종농도 1%가 되게 고정하였다. 종속영양 미소편모류, 동정편모류, 극미소 플랑크톤 및 독립영양 미소편모류를 관찰하기 위하여 시료 100 ml를 0.8 nuclepore polycarbonate black filter로 여과하고, 종속영양 와편모류와 독립영양 소형편모류를 관찰하기 위하여 시료 300 ml를 5 μm nuclepore polycarbonate black filter로 여과하여 proflavin (0.33% w/v)과 DAPI(최종농도 1 $\mu\text{g ml}^{-1}$)로 염색한 후 슬라이드를 냉동 보관하였다. 냉동 보관된 시료는 실험실로 운반해 형광현미경으로 독립영양성과 종속영양성을 구분하여 계수하였다.

플랑크톤의 탄소량을 측정하기 위하여, 종속영양 미소편모류는 현미경 하에서 각 세포의 체적을 구하였고, 그의 플랑크톤들은 각 세포의 크기를 측정하고 세포 용적을 Edler (1979)의 방법에 따라 구한후에 탄소량 전환값과 전환공식을 사용하여 측정하였다(Table 1).

식물플랑크톤에 대한 종속영양 미소형 및 소형플랑크톤의 섭식압

Landry and Hasett (1982)의 해수희석 방법(Dilution method)을 사용하여 식물플랑크톤의 성장률과 종속영양 미소형 및 소형플랑크톤의 섭식율을 측정하였다. 각 정점의 10 m 수심에서 10 l의 해수를 채수하여 실험에 사용하였다. 섭식을 실험을 위해 사용된 실험용기는 사용 전에 10% 염산으로 세척한 후 3차 증류수로 세척한 1.31 PC bottle을 사용하였다. 채수한 해수는 희석수를 만들기 위하여 0.2 μm 로 실험 직전에 현장 해수를 여과하였다. 채수한 해수와 0.2 μm 로 여과된 해수의 비율을 각각 100%, 80%, 60%, 40%, 20%가 되게 희석하였다. 희석 후에 각각의 실험용기(100%, 80%, 60%, 40%, 20%)에 영양염 부족에 따른 식물플랑크톤 성장 제한을 방지하기 위하여 질산염(최종농도 10 μM)과 인산염(최종농도 1 μM)을 첨가하여 24시간 선상에서 배양하였다(Caron et al. 2000). 배양 초기와 24시간 후에 각각의 실험 용기에서 엽록소-*a* 농도 측정을 위해 배양 해수의 500 ml를 여과하여 현장에서 Turner Design Fluorometer (TD-700)를 이용하여 분석하였다. 각각의 dilution factor에서 얻은 엽록소-*a* 농도의 기울기와 절대값으로 식물플랑크톤의 성장률과 사망률을 얻었고, 이 값을 이용하여 식물플랑크톤에 대한 종속영양 미소형 및 소형플랑크톤의 섭식압을 계산하였다.

3. 결 과

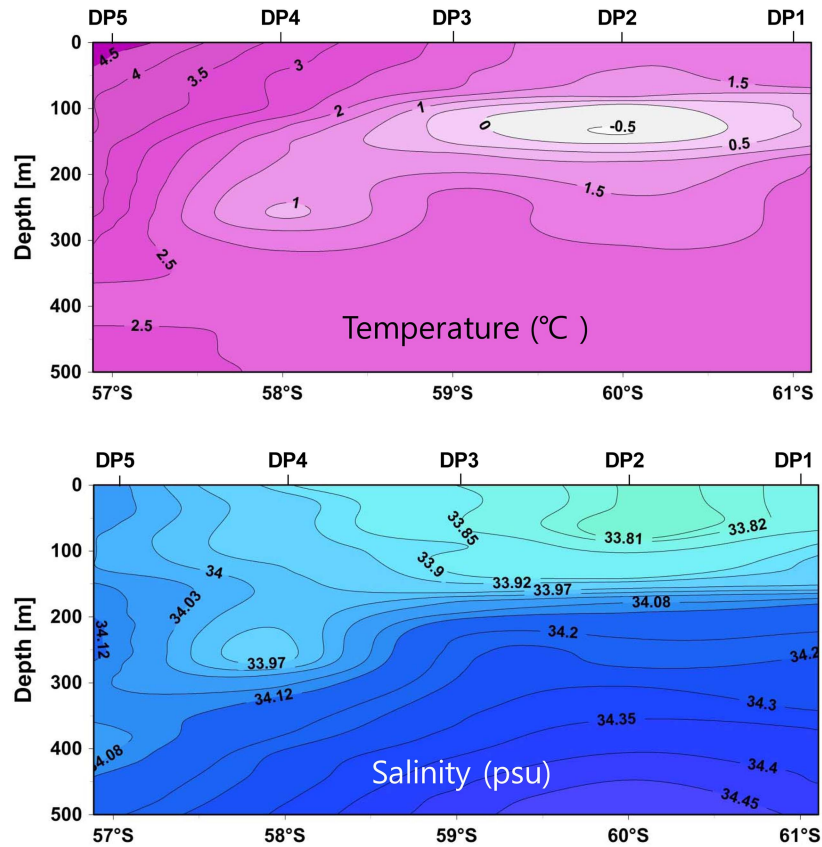


Fig. 2. Vertical section of temperature (°C) and salinity (psu) within the upper 500 m of water along the 65°W transect

수괴 분포 특성

조사수역 표층부터 500 m까지 서경 65°를 따라 남위 57°에서 61°까지 조사된 수온과 염분의 분포는 Fig. 2에 나타내었다. 표층 수온은 1.8°C에서 4.9°C까지 변화했으며, 남쪽에서 북쪽으로 갈수록 점진적으로 증가하는 양상을 보였다. 정점 DP5에서 수온의 수직 분포는 표층에서 저층으로 갈수록 점차 감소하였으며, 정점 DP4 이남의 남쪽 정점에서는 수심 100-150 m 사이에 0 이하의 수온 최소층이 존재하였다. Fig. 2에서 2의 등온선 위치와 수온 최소층의 북쪽 끝의 위치가 정점 DP2와 정점 DP3 사이에 위치해 있으며, 이 같은 결과는 Fig. 1에서 보여준 극전선 수역의 위치와 유사하였다. 염분은 남쪽에서 북쪽으로 갈수록 점차적으로 증가하였으며, 정점 DP2 남쪽에서는 33.85 psu 이하의 염분 최소층이 표층부터 수심 100 m까지 존재하였다. 또한 정점 DP4 남쪽의 표층 혼합층 부근에서는 34.0 psu 이하의 염분층이 발달되어 있었으며, 정점 DP 5의 표층 부근에는 34.0 psu 이상의 고염수가 존재하였다. 염분의 수직 분포는 정점 DP5를 제외하고는 표층에서 저층으로 갈수록 점차적으로 증가하는 양상을 보였다. 정점별 수온과 염분의 수평, 수직적 분포 특성은 Fig. 1에서 보여준 전선역을 중심으로 한 수괴의 분포 특성과 일치하였다.

엽록소-a 농도 및 식물플랑크톤 군집 조성

엽록소-a 농도는 0.05-0.41 $\mu\text{g l}^{-1}$ 로 분포하였다(Fig. 3). 표층 엽록소 농도는 남쪽에서 북쪽 수역으로 갈수록 점차 증가하였으며, 정점 DP4의 75 m에서 0.41 $\mu\text{g l}^{-1}$ 로 가장 높게 나타났다. 엽록소 최대층은 각 정점별로 차이를 보였으며, 극전선 수역인 정점 DP3의 수심 50 m에서 약간 높게 나타났다. 엽록소 최대층은 정점 DP4와 DP5에서는 수심 75 m에서 관찰되었고, 극전선 남쪽 수역에서는 100 m 깊이에서 관찰되었다. 그러나 엽록소 최대층에서 엽록소-a 농도는 두드러지게 높지 않았다. 수심 100 m까지 합산한 수괴 내 엽록소-a 농도는 정점 DP4에서 39.7 mg m^{-2} 로 가장 높았으며, 정점 DP2에서 17.7 mg m^{-2} 로 가장 낮게 나타났다. 엽록소 농도는 극전선 남쪽 수역에 비하여 극전선 수역과 아남극 전선수역에서 1.5배 이상 높은 값을 보였다. 전체 엽록소-a 농도 중에서 소형(> 20 μm) 엽록소-a가 차지하는 비율은 정점 DP4에서 45% 이상으로 가장 높았으며, 극전선 남쪽수역에서 21.1%로 낮게 나타났다. 극미소(< 3 μm) 엽록소-a는 극전선 남쪽 수역에서 평균 42.1%를 차지하였으며, 극전선 수역과 아남극 전선 수역에서는 평균 26.2%를 차지하여 극전선 남쪽 수역에서 극미소 플랑크톤이 우점하고 있음을 보였다. 미소형(3-

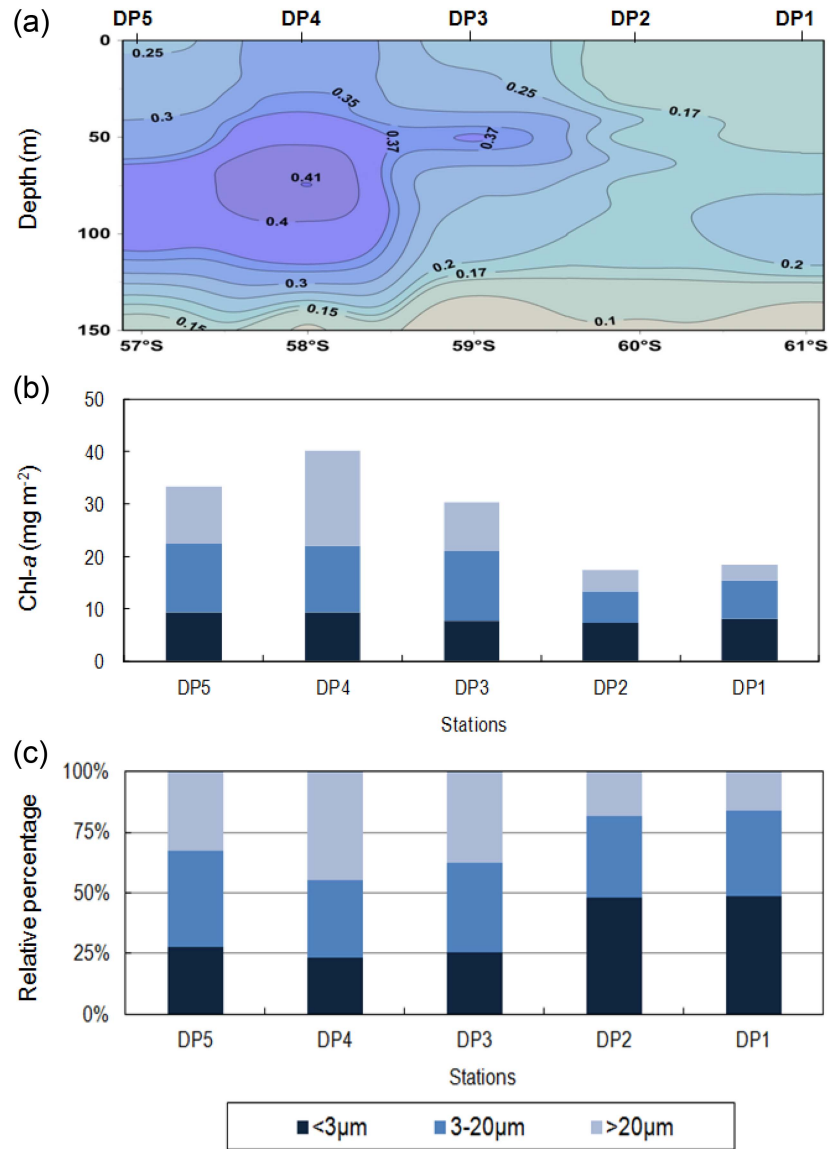


Fig. 3. Distribution of chlorophyll-*a* concentration along the 65°W transect. (a) shows the vertical section of chlorophyll-*a* concentration, (b) shows the cumulative total chlorophyll-*a* concentration (from 0 to 100 m), and (c) shows the relative percentage of size-fractionated chlorophyll-*a* concentration

20 µm) 엽록소-*a* 농도가 차지하는 비율은 모든 정점에서 약 30%를 차지하는 것으로 나타났으며, 정점 DP5에서 비교적 높게 나타났다.

식물플랑크톤 군집은 위도별로 군집 구성에 차이를 보였다(Fig. 4). 극미소 플랑크톤, 독립영양 미소편모류 및 독립영양 소형편모류는 남쪽 수역에서 북쪽 수역으로 갈수록 점진적으로 증가하는 양상을 보였다. 반면에 남극해의 춘계와 하계에 우점종으로 알려진 *Phaeocystis* sp.는 정점 DP3과 DP4에서 비교적 높은 분포를 보였으나 정점 DP5에서는 현존량이 가장 낮았다. 규조류의 현존량은 극전선 수역에서 가장 높게 분포하였으며, 극전선 남쪽 수역

에 비하여 약 2배 이상 높은 값을 보였다.

중속영양 미소형 및 소형플랑크톤의 현존량 분포

중속영양 미소형 및 소형플랑크톤 군집은 중속영양 미소편모류, 동정 편모류, 섬모충류, 중속영양 외편모류, 동물플랑크톤 유생으로 구분하였다(Fig. 5). 중속영양 미소편모류는 주로 2-5 µm 크기로, 동정 편모류는 6-10 µm 크기로 분포하였다. 중속영양 미소편모류의 현존량은 60,000-651,000 cells l⁻¹(평균 207,000 cells l⁻¹)로 분포하였으며, 정점 DP4의 표층 부근에서 가장 높게 나타났다. 동정 편모류의 현존량은 3,000-89,000 cells l⁻¹로 분포하였으며,

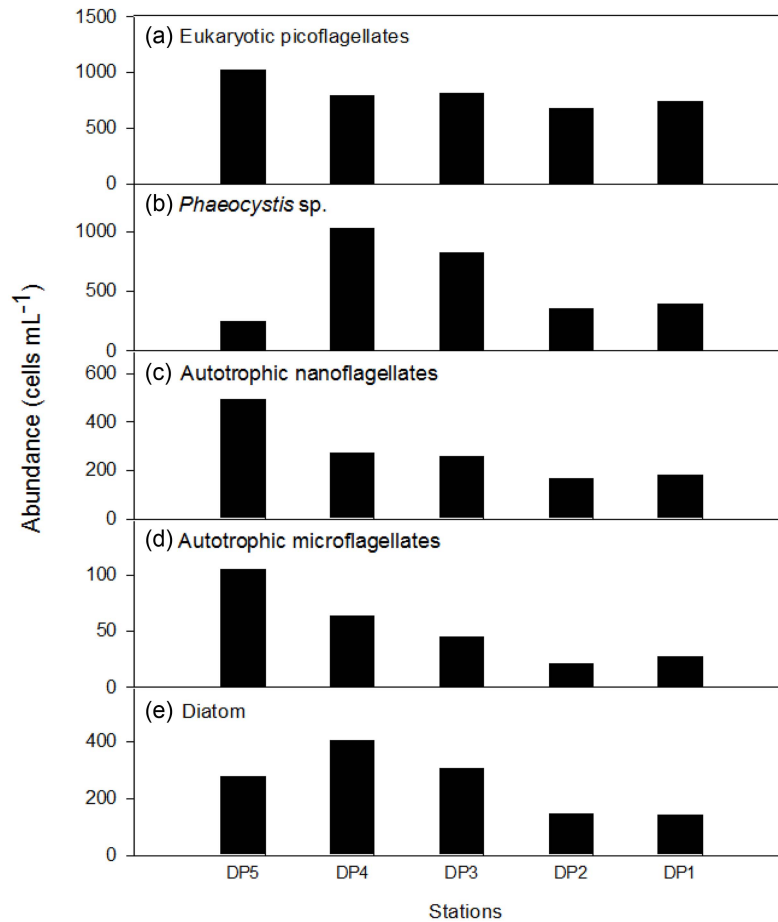


Fig. 4. Distribution of phytoplankton community at a depth of 10 m along the 65°W transect

평균 36,000 cells l^{-1} 로 나타났다. 동정 편모류는 정점 DP 4와 DP5에서 높았으며, 수직적으로는 30-50 m 깊이에서 높은 현존량이 관찰되었다. 부유 섬모충류의 현존량은 53-3,404 cells l^{-1} 로 분포하였으며, 평균 690 cells l^{-1} 로 나타났다. 부유 섬모충류의 수직 분포는 수심 50 m 이상의 혼합층에서 높게 나타났으며, 정점 DP5의 표층에서 3,000 cells l^{-1} 이상으로 가장 높았다. 정점 DP5의 표층 부근에 높게 나타난 부유 섬모충류의 대부분은 크기 15 μm 의 *Strombidium* sp. 종으로, 다른 정점에서는 높은 현존량이 관찰되지 않았다. 조사수역에서 관찰된 부유 섬모충류의 98% 이상은 빈모 섬모충류(Oligotrichs)로 구성되었으나, 극전선 수역에서 유충섬모충류(Tintinnids)의 출현비율이 비교적 높았다(자료 제시 안함). 조사수역에서 관찰된 종속영양 와편모류는 세포의 크기에 의해 미소형 와편모류 (< 20 μm)와 소형 와편모류(> 20 μm)로 구분하였다. 미소형 와편모류의 현존량은 1,560-25,400 cells l^{-1} 로 분포하였으며, 평균 9,500 cells l^{-1} 로 나타났다. 미소형 와편모류는 극전선 남쪽 수역에 비하여 극전선 수역과 아남극 전선수역에서 2배 이상 높게 분포하였으며, 정점 DP5의 표

층 혼합층 부근에서 가장 높았다. 소형 와편모류의 현존량은 75-1,410 cells l^{-1} 로 분포하였으며, 평균 600 cells l^{-1} 로 나타났다. 소형 와편모류는 미소형 와편모류와 유사한 분포양상을 보였으나, 정점 DP4의 표층 혼합층에서 가장 높았다. 조사기간 관찰된 소형 와편모류의 대부분은 *Gymnodinium* spp., *Gyrodinium* spp., *Amphidinium* spp.를 포함한 무각 와편모류와 *Protoperidinium* spp.를 포함하는 유각 와편모류로 구성되었다. 소형 와편모류의 현존량은 유각 와편모류보다 무각 와편모류에 의해 3배 이상 높은 분포를 보였으며, 두 그룹 모두 정점 DP4에서 가장 높게 나타났다(자료 제시 안함). 동물플랑크톤 유생의 현존량은 50 indiv. l^{-1} 이하로, 정점 DP4의 30 m 와 DP5의 표층에서 비교적 높은 개체수가 출현하였다.

종속영양 미소형 및 소형 플랑크톤의 탄소량

종속영양 미소형 및 소형플랑크톤 탄소량의 수직분포는 표층 혼합층 부근에서 주로 높게 분포하였다. 깊이별로는 다소 차이를 보였으나 표층 혼합층 내에서 탄소량값의 차이는 크게 나타나지 않았다(Fig. 6). 표층부터 100 m까지

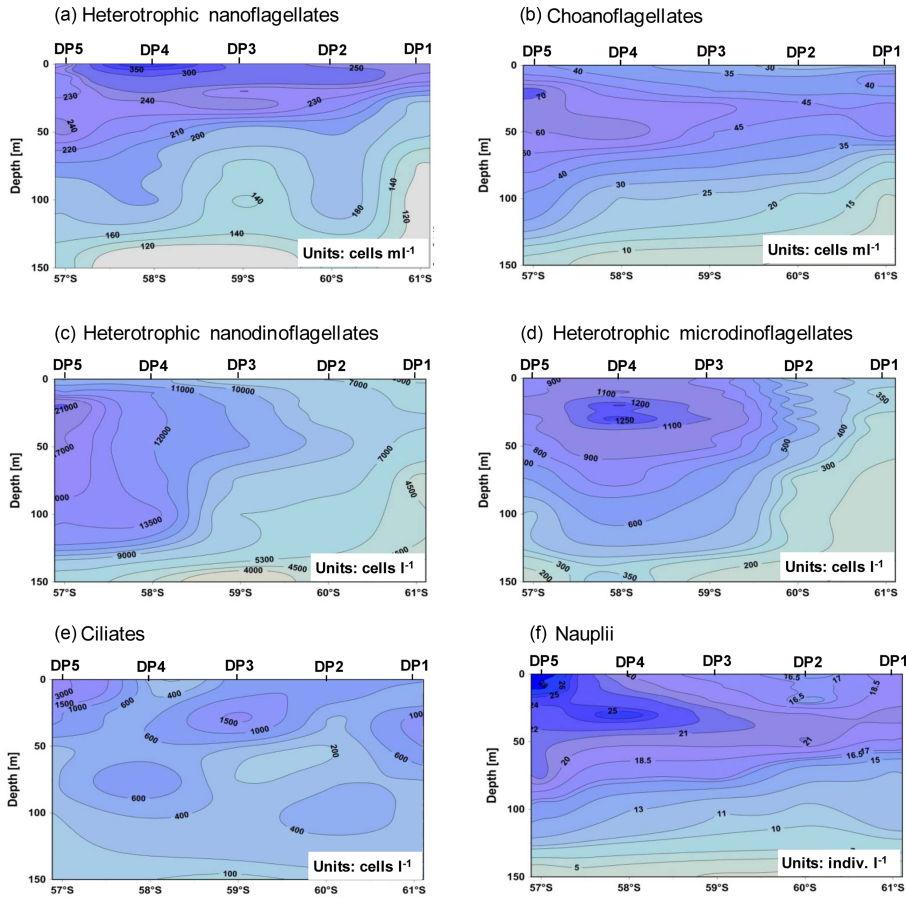


Fig. 5. Vertical section of heterotrophic nano- and microplankton community within the upper 150 m of water along the 65°W transect

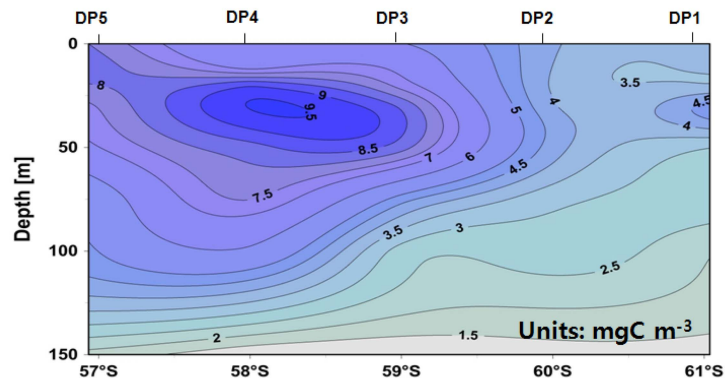


Fig. 6. Vertical section of the carbon biomass of heterotrophic nano- and microplankton along the 65°W transect

수직합산한 종속영양 미소형 및 소형플랑크톤의 탄소량은 평균 543.8 mgC m⁻²로, 극전선 남쪽수역(평균 338.3 mgC m⁻²)에 비하여 극전선 수역(평균 698.0 mgC m⁻²)과 아남극 전선수역(646.5 mgC m⁻²)에서 1.8배 높게 나타났다. 특히 식물플랑크톤 생물량이 가장 높았던 정점 DP4에서 종속영양 미소형 및 소형플랑크톤의 탄소량은 751.4 mgC m⁻²

로 가장 높았다. 종속영양 미소형 및 소형플랑크톤 중에서 종속영양 미소편모류의 탄소량은 정점별로 큰 차이를 보이지 않았으나, 극전선 남쪽 수역에 비하여 극전선 수역에서 높게 분포하였으며, 아남극 전선역에서 54.8 mgC m⁻²로 가장 높았다(Fig. 7). 모든 정점에서 종속영양 미소편모류는 종속영양 미소형 및 소형플랑크톤의 총 탄소량에

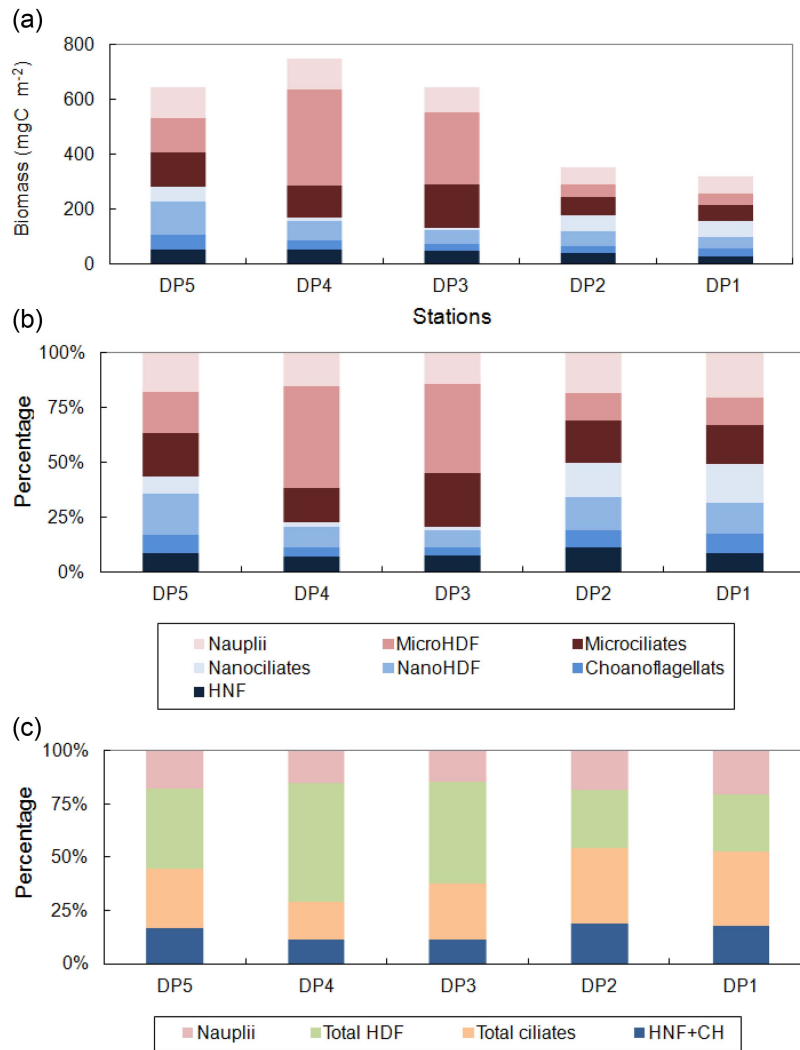


Fig. 7. Carbon biomass of heterotrophic nano- and microplankton along the 65°W transect. (a) shows the cumulative carbon biomass (from 0 to 100 m), (b) shows the relative percentage of heterotrophic nano- and microplankton size structure, (c) shows the relative percentage of heterotrophic nano- and microplankton community. HNF: Heterotrophic nanoflagellate; HDF: Heterotrophic dinoflagellate; CH: Choanoflagellate

10% 이하의 낮은 기여율을 보였다. 동정 편모류의 평균 탄소량은 33.8 mgC m⁻²로 나타났으며, 아남극 전선역에서 평균 54.9 mgC m⁻²로 다른 정점에 비하여 2배 정도 높았다. 동정 편모류의 탄소량은 종속영양 미소형 및 소형플랑크톤의 총 탄소량에 평균 6.5%를 차지하여 다른 군집에 비하여 가장 낮은 기여율을 보였다. 부유 섬모충류의 평균 탄소량은 143.8 mgC m⁻²로 극전선 남쪽수역(평균 117.4 mgC m⁻²)에 비해 극전선 수역(평균 150.5 mgC m⁻²)에서 높게 나타났으며, 아남극 전선수역에서 179.0 mgC m⁻²로 가장 높았다. 종속영양 미소형 및 소형플랑크톤의 총 탄소량에 섬모충류가 차지하는 비율은 평균 28.2%로, 극전선 남쪽수역에서 34.7%로 가장 높은 기여율을 보였다.

또한 부유 섬모충류중에서 소형 섬모충류(< 20 μm)는 섬모충류 총 탄소량의 평균 76.2%를 차지하는 것으로 나타났다. 비록 미소형 섬모충류(< 20 μm)의 현존량이 정점 DP5의 표층 부근에서 높게 분포하였지만, 상대적으로 크기가 큰 소형 섬모충류(> 20 μm)는 전체 섬모충류의 생물량에 높게 기여하였다(Fig. 6). 종속영양 외편모류의 평균 탄소량은 232.6 mgC m⁻²로, 정점 DP4에서 가장 높게 나타났다. 특히 극전선 남쪽 수역(평균 94.3 mgC m⁻²)에 비하여 극전선 수역(평균 365.3 mgC m⁻²)과 아남극 전선수역(243.6 mgC m⁻²)에서 2배 이상 높게 분포하였다. 종속영양 미소형 및 소형플랑크톤의 총 탄소량에 종속영양 외편모류의 기여율은 평균 39.5%로 극전선 수역에서 50% 이

상을 차지하였으며, 극전선 남쪽 수역에서는 평균 27.8%를 차지하였다. 따라서 극전선 수역에서 종속영양 와편모류는 다른 군집에 비하여 그 중요성이 큰 것으로 나타났다. 조사기간 동안 출현한 소형 와편모류의 탄소량은 평균 164.8 mgC m⁻²로 미소형 와편모류에 비하여 3배 이상 높았다. 총 종속영양 와편모류에 소형 와편모류가 차지하는 비율은 극전선 수역에서 평균 83.6%, 아남극 전선수역에서 62.7%, 극전선 남쪽 수역에서 48.2%를 차지하여 소형 와편모류는 극전선 수역에서 가장 우점한 그룹으로 나타났다. 동물플랑크톤 유생의 평균 탄소량은 94.0 mgC m⁻²으로 극전선 남쪽 수역(평균 75.5 mgC m⁻²)에 비하여 극전선 수역(평균 102.2 mgC m⁻²)과 아남극 전선역(114.5 mgC m⁻²)에서 높았다. 그러나 종속영양 미소형 및 소형플랑크톤에 기여하는 동물플랑크톤 유생의 상대적인 중요성은 극전선 수역과 아남극 전선수역에(평균 14.6%) 비하여 극전선 남쪽 수역(평균 19.2.2%)에서 다소 높게 나타났다. 종속영양 미소편모류, 미소형 섬모충류 및 미소형 종속영양 와편모류를 포함하는 종속영양 미소형 플랑크톤(< 20 μm)은 극전선 남쪽수역에서 평균 49.2%, 극전선 수역에서는 평균 21.6%, 아남극 전선역에서는 36.9%를 차지하여 종속영양 미소형 플랑크톤의 상대적인 중요성은 극전선 남쪽 수역에서 높았다. 반면에 종속영양 소형플랑크톤(> 20 μm)의 상대적인 중요성은 극전선 수역에서 가장 큰 것으로 나타났다.

식물플랑크톤에 대한 종속영양 미소형 및 소형플랑크톤의 섭식압

엽록소-*a* 농도의 변화로 측정된 식물플랑크톤의 성장률은 0.16 d⁻¹-0.37 d⁻¹의 범위를 갖고 평균 0.26 d⁻¹의 값을 보였다(Table 2). 극전선 수역과 아남극 전선수역에서 식물플랑크톤 성장률은 평균 0.33 d⁻¹로 극전선 남쪽 수역에서 측정된 평균 0.17 d⁻¹에 비하여 2배 이상 높았다. 종속영양 미소형 및 소형플랑크톤의 섭식율은 0.12 d⁻¹-0.29 d⁻¹

의 범위를 갖고, 평균 0.22 d⁻¹로 나타났다. 극전선 남쪽 수역에서는 평균 0.13 d⁻¹, 극전선 수역과 아남극 전선수역에서는 평균 0.28 d⁻¹로 식물플랑크톤의 성장률과 유사하게 2배 이상 차이를 보였다(Table 2). 종속영양 미소형 및 소형플랑크톤은 식물플랑크톤의 일차생산에 평균 83.8%를 제거하는 것으로 나타났다. 극전선 수역에서는 평균 94.5%, 아남극 전선수역에서는 78.9%, 극전선 남쪽 수역에서는 평균 75.6%로 극전선 수역에서 식물플랑크톤 생산력에 대한 종속영양 미소형 및 소형플랑크톤의 섭식압이 가장 높았다.

4. 토 의

남극해의 외해역에서 플랑크톤 군집구조 및 생물량은 극전선 수역 주변의 서로 다른 수괴 구조에 의해 크게 영향을 받으며, 극전선역을 경계로 남쪽의 남극권해와 북쪽의 아남극권해에서 뚜렷한 차이를 보인다(Pakhomov et al. 1994; Froneman et al. 1998). 조사기간 동안 식물플랑크톤과 종속영양 미소형 및 소형플랑크톤의 군집구조와 생물량 분포는 서경 65°를 따라 분명한 차이를 보였으며, 이러한 생태학적 변화는 서로 다른 수괴 환경 특성과 크게 연관되어 있었다. 조사기간 동안 극전선 남쪽 수역은 낮은 엽록소-*a* 농도와 극미소 및 미소 식물플랑크톤의 상대적으로 높은 우점율에 의해 특징지어진다(Fig. 3). 반면에 극전선 수역과 아남극 전선수역은 상대적으로 높은 엽록소-*a* 농도와 미소형 및 소형 식물플랑크톤의 높은 우점율에 의해 특징지어진다. 그러나 식물플랑크톤 중 조성은 극전선 수역에서는 규조류와 *Phaeocystis* sp.에 의해, 아남극 전선수역에서는 독립영양 편모류에 의해 우점하여 두 수역에서 다른 특성을 보였다(Fig. 4). 이와 같은 결과는 남극의 하계에 극전선 수역에서는 규조류에 의하여, 아남극 전선역에서는 미소형 식물플랑크톤이 우점하였음을 보고한 이전의 연구 결과와 잘 일치한다(Laubscher et al. 1993; Kopczyńska et al. 2007). 조사수역에서 측정된 영양염 자료를 제시할수는 없으나 극전선 수역에서 규조류를 포함하는 소형 식물플랑크톤의 높은 분포는 극전선 수역에서 발생하는 영양염이 높은 해수의 용승에 원인이 있었을 것으로 판단된다(Talley 1996; Veth et al. 1997). 따라서 조사기간 동안 식물플랑크톤 크기 및 군집구조는 극전선 수역을 경계로 물리적 특성에 의하여 크게 영향을 받았으며, 이러한 식물플랑크톤의 크기 및 군집분포 차이는 상위 소비자인 종속영양 미소형 및 소형플랑크톤의 분포에도 영향을 주었을 것이다.

조사 수역의 종속영양 미소형 및 소형플랑크톤 군집 중에서 섬모충류와 종속영양 와편모류는 가장 우점하는 그룹으로 나타났다(Fig. 7). 극전선 남쪽 수역은 섬모충류에

Table 2. Phytoplankton growth (k) and heterotrophic nano- and microplankton grazing coefficients (g) derived from dilution experiments. PP (%) denotes the potential phytoplankton production grazed by heterotrophic nano- and microplankton

Station	Initial Chl- <i>a</i> (μg l ⁻¹)	k (day ⁻¹)	g (day ⁻¹)	PP (%)	r ²
DP1	0.12	0.16	0.12	73.4	0.88
DP2	0.14	0.17	0.13	77.9	0.91
DP3	0.27	0.30	0.29	97.1	0.93
DP4	0.33	0.32	0.29	91.9	0.88
DP5	0.24	0.37	0.28	78.9	0.85

Table 3. Comparison of the reported abundance of heterotrophic nano- and microplankton in the Southern Ocean

Nano- and micro zooplakton	Abundance (cells l ⁻¹)	Study periods	Reference
Eastern atlantic sector			
Ciliates	525-950	1997.12-1998.1	Froneman (2004)
Heterotrophic dinoflagellates	350-750		
Heterotrophic nanoflagellates	2,050-3,350		
Atlantic sector			
Ciliates	75-1,840	1993.1-2	Froneman and Perissinotto (1996)
Heterotrophic dinoflagellates	27-669		
Heterotrophic nanoflagellates	981-2,310		
Western weddell sea			
Ciliates	~1,000	1988.10-11	Kivi and Kuosa (1994)
Heterotrophic dinoflagellates	~12,000		
Heterotrophic nanoflagellates	~1,500,000		
Choanoflagellates	~700,000		
Weddell sea (Ice-edge zone)			
Ciliates	10-1,900	1983.11 & 1986.3	Garrison and Buck (1989)
Heterotrophic dinoflagellates	6-6,400		
Heterotrophic nanoflagellates	11,000-370,000		
Choanoflagellates	1,500-270,000		
Drake passage			
Ciliates	53-3,404	2001.12-2002.1	This study
Heterotrophic dinoflagellates	1,640-26,350		
Heterotrophic nanoflagellates	60,000-651,000		
Choanoflagellates	3,000-89,000		

의해, 극전선 수역과 아남극 전선수역에서는 종속영양 와편모류에 의해 가장 우점하였다. 조사수역에서 관찰된 섬모충류의 현존량은 이전에 남극해에서 보고된 값과 유사한 범위 내에 있으나 아남극 전선수역의 표층 부근에서 섬모충류의 높은 현존량은 남극해의 다른 수역에서 조사된 값에 비하여 다소 높았다(Table 3). 아남극 전선수역에서 섬모충류의 현존량이 가장 높았지만 종속영양 미소형 및 소형플랑크톤 중에서 섬모충류의 상대적인 중요성은 극미소 및 미소형 식물플랑크톤이 우점한 극전선 남쪽 수역에서 높게 나타났다. 남극해에서 수행된 이전의 연구 결과에 의하면 섬모충류의 생물량은 수온이 차가운 수역에서 따뜻한 수역으로 갈수록 점차 증가하며, 이는 수온과 먹이의 분포와 관련이 있음을 보고하였다(Garrison and Buck 1989; Kopczyńska et al. 2007; Safi et al. 2007). 본 연구에서 섬모충류 군집은 정점 DP4를 제외하고는 차가운 남쪽 수역에서 따뜻한 북쪽 수역으로 갈수록 점차적으로 증가하였다. 특히 아남극 전선수역의 표층 부근에서 다른 수역에 비하여 2배 이상 높은 섬모충류의 현존량은 극전선 수역에 비하여 수온이 높고 작은 식물플랑크톤에 의해 우

점한 아남극 수역에서 섬모충류의 현존량이 높다고 보고한 이전의 연구결과와 잘 일치한다(Pearce et al. 2011). 종속영양 와편모류는 종속영양 미소형 및 소형플랑크톤의 총 탄소량에 평균 39.5%를 차지하여 조사수역에서 가장 중요한 그룹으로 나타났다. 종속영양 와편모류는 종속영양 미소형 및 소형플랑크톤의 중요한 구성자로서 태평양, 북극해 및 남극해의 미세생물 먹이망에서 식물플랑크톤의 가장 중요한 소비자로 간주되어 왔다(Garrison and Buck 1989; Archer et al. 1996; Sherr et al. 1997; Yang et al. 2004; Safi et al. 2007). 종속영양 와편모류는 박테리아, 미소 편모류, 규조류와 섬모충류, 그리고 후생동물까지 섭식하며, 섬모충류와는 다르게 자기 몸체보다 더 큰 입자를 섭식할 수 있는 기작을 갖고 있기 때문에(Hansen 1992), 다양한 해양 환경에서 식물플랑크톤의 섭식자로서 중요한 역할을 하는 것으로 밝혀졌다(Strom 1996; Levisen et al. 1999). 종속영양 와편모류는 열대수역뿐 아니라 남·북극과 같은 극지해역에서도 중요한 그룹으로 나타나기 때문에 종속영양 와편모류에 대한 연구는 플랑크톤 군집 변동과 미세생물 먹이망의 구조를 이해하는데 중요한 자료로

서 제공될 수 있다(Burkill et al. 1995; Sherr et al. 1997). 조사기간 동안 출현한 종속영양 와편모류의 대부분은 *Gymnodinium* spp., *Gyrodinium* spp., *Amphidinium* spp., *Protoperdinium* spp. 등으로 구성되어 있었으며, 이와 같은 군집 조성은 이전에 남극해의 외해역에서 조사된 결과와 유사하였다(Kivi and Kuosa 1994; Safi et al. 2007). 그러나 종속영양 와편모류의 현존량은 1,600-26,500 cells l⁻¹로 이전에 남극해의 외해역에서 보고된 값에 비하여 2-3배 정도 높은 값을 보였다(Table 3). 이와 같은 결과는 다음과 같은 원인에 의하여 설명되어질 수 있다. 즉, 이전의 연구들은 미소형 와편모류(< 20 µm)의 높은 개체수에도 불구하고 현미경을 통한 분석상의 어려움으로 인하여 광학현미경으로 관찰가능한 소형 와편모류만을 대상으로 분석하였기 때문에 본 연구 결과가 이전 연구 결과에 비하여 높은 값을 보인 것으로 생각된다. 종속영양 와편모류의 탄소량은 극전선 수역에서 높았으며, 식물플랑크톤 생물량이 가장 높고 소형 식물플랑크톤에 의해 우점한 정점 DP4에서 가장 높게 분포하였다. 작은 식물플랑크톤에 의해 우점한 극전선 남쪽 수역에서는 미소형과 소형 와편모류의 탄소량이 유사한 비율로 분포하였으며, 반면에 상대적으로 소형 식물플랑크톤의 기여도가 높은 극전선 수역에서는 미소형 와편모류에 비하여 소형 와편모류의 탄소량이 3배 이상 높았다(Fig. 7). 이와 같은 결과는 종속영양 와편모류의 크기별 분포 특성이 식물플랑크톤의 군집 및 크기구조의 분포와 밀접한 관련이 있음을 제시한다. 특히 극전선 수역에서 구조류로 구성되어 있는 소형 식물플랑크톤과 소형 와편모류 사이의 높은 상관관계($r = 0.66$, $p < 0.001$, $n = 40$)는 이들 사이에 강한 피식-포식의 관계가 있음을 암시한다. 조사수역에서 동물플랑크톤 유생의 현존량은 100 indiv. l⁻¹ 이하로 이들의 탄소량은 종속영양 미소형 및 소형플랑크톤 탄소량의 평균 16.7%를 차지하였다. 남극해에서 이전에 조사된 소형 동물플랑크톤 연구에 동물플랑크톤 유생이 포함된 경우는 매우 드물지만, 조사수역에서 동물플랑크톤 유생은 이전에 보고된 연구 결과와 유사하였다(Safi et al. 2007; Pearce et al. 2011). 동물플랑크톤 유생의 분포는 극전선 남쪽 수역에서 북쪽으로 갈수록 점진적으로 증가하였으며, 식물플랑크톤 생물량 분포와 유사한 분포양상을 보였다. 이 같은 결과는 동물플랑크톤 유생의 분포는 그들의 먹이원이 되는 식물플랑크톤의 분포와 관계가 있음을 제시한다. 종속영양 미소편모류와 동정 편모류는 남극해의 HNLC 해역에서 박테리아와 극미소 식물플랑크톤의 중요한 섭식자로서 극미소 플랑크톤이 우점한 해역에서 중요한 역할을 한다(Kivi and Kuosa 1994; Safi et al. 2007). 그러나 조사수역에서 종속영양 미소편모류와 동정 편모류의 현존량은 기존에 보고된 값에 비하여 낮았으며(Table 3), 총 종속영양 미소형 및 소형플랑크톤

탄소량에 15% 미만을 차지함으로써 다른 군집에 비하여 중요성은 크지 않았다.

종속영양 미소형 및 소형플랑크톤 최대 탄소량은 표층 혼합층인 30-50 m 깊이에서 비교적 높게 나타났으며, 반면에 엽록소-*a*의 최대농도는 정점 DP1를 제외하고 50-75 m 깊이에서 비교적 높았다. 그러나 표층 혼합층 내에서 두 그룹의 생물량은 깊이에 따라 큰 차이를 보이지 않았으며, 특히 깊이별 생물량의 차이는 정점별 생물량의 차이보다 크지 않았다(ANOVA, $p > 0.05$). 이전 연구 결과에 따르면, 혼합층 내에서 종속영양성과 독립영양성 생물량의 최대값이 깊이별로 약간의 불일치를 보이는 것은 부유기작과 운동성에 원인이 있을 수 있으며, 혼합층 내에서 차이가 정점별 차이보다 크지 않다면 수괴 특성에 따른 변화를 설명하는데 있어서 크게 중요하지 않음을 제시하였다(Kivi and Kuosa 1994). 표층부터 100 m 깊이까지 수직합산한 종속영양 미소형 및 소형플랑크톤의 총 탄소량은 평균 543.8 mgC m⁻²로, 본 조사와 유사한 시기에 웨델해에서 조사된 427.6 mgC m⁻²과 남극해의 서경 6° 부근의 극전선 수역에서 조사된 평균 탄소량 392.1 mgC m⁻²에 비하여 비교적 높게 나타났다(Garrison and Buck 1989; Klaas 1997). 정점별로는 극전선 남쪽 수역에 비하여 극전선 수역과 아남극 전선수역에서 2배 정도 높은 값을 보였으며, 특히 정점 DP4에서 종속영양 미소형 및 소형플랑크톤의 높은 생물량 분포는 이들의 가장 중요한 먹이원이 되는 식물플랑크톤의 높은 생물량과 관련이 있을 것이다. 또한 극전선 수역에서 종속영양 미소형 플랑크톤(총 탄소량의 21.6%)에 비하여 종속영양 소형 플랑크톤(총 탄소량의 78.4%)의 높은 기여율은 소형 식물플랑크톤의 높은 우점을 뿐 아니라 높은 구조류의 분포와도 밀접한 관련이 있는 것으로 사료된다. 반면에 극미소 및 미소형 식물플랑크톤이 우점한 극전선 남쪽수역에서는 종속영양 미소형

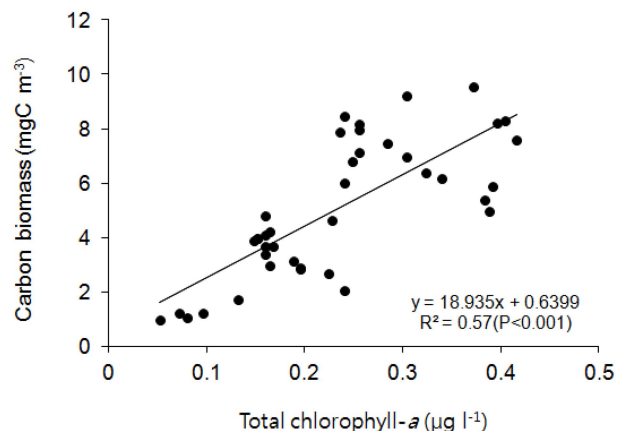


Fig. 8. Relationship between the heterotrophic nano- and microplankton carbon biomass and chlorophyll-*a* concentration

Table 4. Regional comparison of reported heterotrophic nano- and microplankton herbivory in the Southern Ocean. PP (%) denotes the potential phytoplankton production grazed. The numbers in the parentheses refer to the average values

Study area	Study periods	Chl- <i>a</i> ($\mu\text{g l}^{-1}$)	PP (%)	Reference
Eastern Atlantic sector	1997.12-1998.1	1.52-2.09	11.1-34.5 (19.3)	Froneman (2004)
Atlantic sector (35°S-70°S, 0-20°W)	1993.1-2	0.09-2.07	0-59 (24.1)	Froneman and Perissinotto (1996)
57°S-61°S, 170°W	1997.12	0.17-1.5	40-69 (56)	Selph et al. (2001)
57°S-61°S, 170°W	1997.11	0.2-0.9	60-80 (79.0)	Landry et al. (2001)
Bellingshausen sea	1992.11-12	0.05-1.4	21-271	Burkill et al. (1995)
Indo Pacific and Atlantic sector	1994.12-1995.1	0.08-2.28	0-333 (104)	Tsuba abd Kawaguchi (1997)
South of Tasmania (46°S-67°S, 140°E-145°E)	2001.11-12	0.1-0.68	45-127 (91)	Safi et al. (2007)
South of Tasmania (sub-Antarctic zone)	2007.1-2	0.28-2.21	47-82 (64.2)	Pearce et al. (2011)
Southern ocean (average)	-	0.62	59.2 (3.3)	Calbet and Landry (2004)
Drake Passage (57°S-61°S, 65°W)	2001.12-2002.1	0.12-0.33	71.1-97.1 (83.8)	This study

플랑크톤과 종속영양 소형 플랑크톤이 거의 유사한 기여도를 보였다. 이상과 같이 식물플랑크톤과 종속영양 미소형 및 소형플랑크톤의 생물량 사이의 높은 상관관계는 종속영양 미소형 및 소형플랑크톤과 식물플랑크톤 사이에 강한 피식-포식의 관계가 있음을 암시한다(Fig. 8). 이러한 추론은 해수회석법을 통해 수행된 식물플랑크톤에 대한 종속영양 미소형 및 소형플랑크톤의 섭식을 실험 결과에서도 잘 뒷받침되고 있다(Table 2).

남극해에서 식물플랑크톤의 소비자로서 종속영양 미소형 및 소형플랑크톤에 대한 연구는 해수회석법을 통하여 많이 조사되었다(Table 4). 본 조사수역에서 종속영양 미소형 및 소형플랑크톤은 식물플랑크톤의 생산력에 평균 83.8%를 제거하여 남극해의 하계에 보고된 값과 유사한 범위 내에 포함되지만(Table 3; Landry et al. 2001; Safi et al. 2007), 남극해 자료를 평균한 평균값에 비해서는 매우 높게 나타났다. 반면에 대서양 및 인도양의 남극해에서 보고된 종속영양 미소형 및 소형플랑크톤의 섭식율에 비해서는 다소 낮았다(Table 4). 식물플랑크톤에 대한 종속영양 미소형 및 소형플랑크톤의 섭식율은 일반적으로 먹이의 조성 및 먹이량과 섭식자의 생물량등과 같은 몇 가지 요인에 의하여 결정되어진다(Calbet and Landry 2004). 규조류를 포함한 소형 식물플랑크톤에 의해 우점한 극전선 수역에서 종속영양 미소형 및 소형플랑크톤은 식물플랑크톤 생산력의 90% 이상을 제거하였으며, 정점 DP3에서 가장 높은 제거율을 보였다. 이 같은 결과는 남극해의 일부 해역에서 종속영양 미소형 및 소형플랑크톤은 큰 크기의 소형 식물플랑크톤과 규조류의 성장률을 조절할 수 없다고 보고한 이전의 연구와는 상반된 결과이다(Frone

man and Perissinotto 1996; Froneman 2004). 위에서 설명한 것처럼 남극해의 일부 해역 및 일부 시기에 우점하여 나타나는 종속영양 외편모류(Klaas 1997; Becquevort et al. 2000; Pearce et al. 2011)는 그들의 강한 섭식행동 및 다양한 먹이 섭식기작으로 인하여 큰 크기의 규조류를 충분히 섭식할 수 있다(Hansen and Calado 1999). 따라서 소형 식물플랑크톤 및 규조류에 의해 우점하는 극전선 수역에서 식물플랑크톤에 대한 높은 섭식압은 종속영양 미소형 및 소형플랑크톤의 높은 생물량 뿐 아니라 섭식행동이 강한 종속영양 외편모류의 높은 우점율의 결과로서 설명될 수 있다. 또한 정점 DP5는 정점 DP3과 엽록소-*a* 농도와 미소형 식물플랑크톤의 우점율이 유사하게 분포하였음에도 불구하고 종속영양 미소형 및 소형플랑크톤의 섭식압은 정점 DP3에 비하여 낮았다. 정점 DP5의 식물플랑크톤 조성이 소형 동물플랑크톤들이 섭식하기에 용이한 편모류들로 구성되어 있었다 하더라도 정점 DP3에 비하여 정점 DP5에서 낮은 섭식압은 정점 DP5에서 종속영양 외편모류의 낮은 생물량, 특히 소형 외편모류의 낮은 우점율에 원인이 있는 것으로 판단된다. 더욱이 극전선 남쪽 수역에 종속영양 미소형 및 소형플랑크톤이 섭식하기에 용이한 작은 식물플랑크톤이 우점하였지만 이 수역에서 종속영양 외편모류보다 섬모충류의 높은 출현은 극전선 남쪽 수역에서 상대적으로 낮은 섭식압을 설명할 수 있다. 이와 같은 결과는 북극 및 태평양 수역의 플랑크톤 먹이망에서 가장 중요한 초식자로서 나타나는 종속영양 외편모류는 식물플랑크톤 생산력의 가장 많은 부분을 소비하며, 반면에 섬모충류는 종속영양 외편모류에 비하여 성장률도 낮으며, 식물플랑크톤에 대한 섭식압이 매우 낮다고

보고한 이전의 연구 결과에 의해서 잘 뒷받침되고 있다 (Verity et al. 1996; Levinsen et al. 1999).

그러나 해수희석법을 이용한 섭식율 측정방법은 실험 기간 중에 발생할 수 있는 높은 여과율(clearance rate)로 인하여 소형 동물플랑크톤의 섭식율이 과대평가될 수 있음이 제시되었다(Dolan and McKeon 2005). 그들의 연구 결과에 따르면, 엽록소-*a* 농도가 낮은 해역에서($<0.3 \mu\text{g l}^{-1}$) 수행된 실험에서 섬모충류의 최대 여과율이 $10 \mu\text{l grazer h}^{-1}$ 이상으로 나타나면 섭식율 측정값이 과대평가될 수 있다고 강조하였다. 본 조사에서 해수희석법으로 수행된 종속 영양 미소형 및 소형플랑크톤의 섭식율 실험 결과의 타당성을 파악하기 위하여 섬모충류를 대상으로 여과율을 측정하였다(Grattepanche et al. 2011). 각각의 실험에서 얻은 섭식율값과 섭식자의 현존량을 이용하여 측정된 섬모충류의 최대 여과율은 $9.5 \mu\text{L grazer h}^{-1}$ 로 나타났다. 남극해를 포함한 극지역에서 이전에 조사된 소형 동물플랑크톤의 여과율에 대한 정보가 없으며, 다른 수역에서 수행된 섬모충류 그룹만을 대상으로 비교하여 타당성을 검증하는 것은 매우 부정확할 수 있다. 그러나 비교대상으로 선택한 Dolan and McKeon(2005)의 실험과 우리의 실험기간 동안의 먹이생물 농도(식물플랑크톤의 생물량)가 거의 유사하였기 때문에 해수희석법을 통하여 측정된 본 조사 결과는 크게 과대평가되지 않았을 것으로 판단된다.

이상과 같이 종속영양 미소형 및 소형플랑크톤의 생물량, 군집구조 및 섭식압이 전선 수역을 경계로 차이를 보이는 것은 각 수역의 특성에 의해 식물플랑크톤의 생물량과 군집구조의 분포 양상이 다르게 나타났기 때문에 이들을 먹이로 이용하는 종속영양 미소형 및 소형플랑크톤의 분포 특성도 그들의 먹이 분포에 크게 반응하였을 것이다. 조사기간 동안 종속영양 미소형 및 소형플랑크톤은 일일 식물플랑크톤 생산력의 평균 83.8%를 제거하며, 이것은 10년 동안 남극해에서 보고된 평균 섭식률인 59.2%에 비하여 매우 높은 결과이다(Callbet and Landry 2004). 또한 남극해에서 중형동물플랑크톤과 식물플랑크톤의 영양관계에 대한 조사에 의하면 웨델해의 극전선 수역에서 요각류는 일일 일차생산력의 단지 1% 미만을 제거하는 것으로 보고하였다(Dubischar and Bathmann 1997). 따라서 드레이크 해협의 2002년 하계에 종속영양 미소형 및 소형플랑크톤은 식물플랑크톤 생물량 및 군집구조를 조절할 수 있는 가장 중요한 소비자로서, 식물플랑크톤에 의해 생산된 탄소가 저층으로 침강하기보다는 종속영양 미소형 및 소형플랑크톤을 통해 표층 해양의 미세생물 먹이망에서 재순환되어 상위 영양단계로 유기탄소를 전달하는 중요한 역할을 하고 있음을 시사한다.

사 사

본 연구에 도움을 주신 러시아 R/V *Yuzhmorgeologiya*의 선장님 이하 승무원 여러분께 감사드립니다. 또한 본 논문을 세밀하게 심사해주시고 성실하게 수정해주신 편집위원장님, 김영옥 박사님과 백승호 박사님께 진심으로 감사드립니다. 본 연구는 극지연구소 과제 PE11040과 PE10290, 그리고 한국과학재단(43332-01)의 지원을 받아 수행되었습니다.

참고문헌

- Archer SD, Leakey RJG, Burkill PH, Sleigh MA (1996) Microbial dynamics in coastal waters of east Antarctica: herbivory by heterotrophic dinoflagellates. *Mar Ecol Prog Ser* **139**:239-255
- Azam F, Fenchel T, Field JG, Gray JS, Meyer-Reil LA, Thingstad F (1983) The ecological role of water-column microbes in the sea. *Mar Ecol Prog Ser* **10**:257-263
- Becquevort S, Menon P, Lancelot C (2000) Differences of the protozoan biomass and grazing during Spring and Summer in the Indian sector of the Southern Ocean. *Polar Biol* **23**:309-320
- Bernard KS, Froneman PW (2003) Mesozooplankton community structure and grazing impact in the Polar Front Zone of the south Indian Ocean during austral summer 2002. *Polar Biol* **26**:268-275
- Børsheim KY, Bratbak G (1987) Cell volume to cell carbon conversion factors for a bacterivorous *Monas* sp. enriched from seawater. *Mar Ecol Prog Ser* **36**:171-175
- Brown SL, Landry MR, Neveux J, Dupouy C (2003) Microbial community abundance and biomass along a 180° transect in the equatorial Pacific during an El Niño-Southern oscillation cold phase. *J Geophys Res* **108**: 8139. doi:10.1029/2001JC000817
- Burkill PH, Edwards ES, Sleigh MA (1995) Microzooplankton and their role in controlling phytoplankton growth in the marginal ice zone of the Bellingshausen Sea. *Deep-Sea Res II* **42**:1277-1290
- Busalacchi AJ (2004) The role of the Southern ocean in global processes: an earth system science approach. *Antarctic Sci* **16**:363-368
- Callbet A, Landry MR (2004) Phytoplankton growth, microzooplankton grazing, and carbon cycling in marine system. *Limnol Oceanogr* **49**:51-57
- Carmack EC (1977) Water characteristics of the Southern Ocean south of the Polar Front. In: Angel MV (ed) *A Voyage of Discovery*. Pergamon Press, New York, pp 15-41
- Caron DA, Dennett MR, Lonsdale DJ, Moran DM, Shalapyonok L (2000) Microzooplankton herbivory in the Ross Sea, Antarctica. *Deep-Sea Res II* **47**:3249-3272

- Dolan J, McKeon K (2005) The reliability of grazing rate estimates from dilution experiments: Have we over-estimated rates of organic carbon consumption? *Ocean Sci Discuss* **1**:21-36
- Dubischar CD, Bathmann UV (1997) Grazing impact of copepods and salps on phytoplankton in the Atlantic sector of the Southern Ocean. *Deep-Sea Res II* **44**:415-433
- Edler L (1979) Phytoplankton and chlorophyll. In: Edler L (ed) Recommendations on methods for marine biological studies in the Baltic Sea. Baltic Marine Biologists Publication, pp 13-25
- El-Sayed SZ (1971) Biological aspects of the pack-ice ecosystem. In: Deacon G (ed) Symposium on Antarctic ice and water masses. Scientific communications on Antarctic Research, Tokyo, pp 35-54
- Froneman PW, Pakhomov EA (1998) Biogeographic study of the planktonic communities of the Prince Edward Islands (Southern Ocean). *J Plankton Res* **20**:653-669
- Froneman PW (2004) Protozooplankton community structure and grazing impact in the eastern Atlantic sector of the Southern Ocean in austral summer 1998. *Deep-Sea Res II* **51**:2633-2643
- Froneman PW, Perissinotto R (1996) Structure and grazing of the microzooplankton communities of the subtropical convergence and a warm-core eddy in the Atlantic sector of the Southern Ocean. *Mar Ecol Prog Ser* **135**:237-245
- Garrison DL, Buck KR (1989) Protozooplankton in the Weddell Sea, Antarctica: abundance and distribution in the ice-edge zone. *Polar Biol* **9**:341-351
- Gordon AL (1967) Structure of Antarctic waters between 20°W and 170°W. In: Bushnell VC (ed) Antarctic map folio series, vol 6. American Geography Society, pp 1-10
- Grattepanche JD, Vincent D, Breton E, Christaki U (2011) Microzooplankton herbivory during the diatom-*Phaeocystis* spring succession in the eastern English Channel. *J Exp Mar Biol Ecol* **404**:87-97
- Hansen, PJ (1992) Prey size selection, feeding rates and growth dynamics of heterotrophic dinoflagellates with special emphasis on *Gyrodinium spirale*. *Mar Biol* **114**:327-334
- Hanson RB, Lowery HK (1985) Spatial distribution, structure, biomass, and physiology of microbial assemblages across the Southern Ocean frontal zone during the late Austral winter. *Appl Environ Microbiol* **49**:1029-1039
- Hansen PJ, Calado AJ (1999) Phagotrophic mechanisms and prey selection in free-living dinoflagellates. *J Eukaryot Microbiol* **46**:382-389
- Hewes CD, Holm-Hansen O, Sakshaug E (1985) Alternative carbon pathways at lower trophic levels in the Antarctic food web. In: Siegfried WR, Condy PR, Laws RM (eds) Antarctic nutrient cycles and food webs. Springer, Berlin, pp 277-283
- Holm-Hansen O, Naganobu M, Kawaguchi S, Kameda T, Krasovski I, Tchernyshkov P, Priddle J, Korb R, Brandon M, Demer D, Hewitt RP, Kahru M, Hewes CD (2004) Factors influencing the distribution, biomass, and productivity of phytoplankton in the Scotia Sea and adjoining waters. *Deep-Sea Res II* **51**:1333-1350
- Kang H-K, Kang YJ (1997) Length and weight relationship of *Acartia steueri* (Copepoda: Calanoida) in Ilkwang Bay, Korea. *J Korean Fish Soc* **30**:906-908
- Kivi K, Kuosa H (1994) Late winter microbial communities in the western Weddell Sea (Antarctica). *Polar Biol* **14**:389-399
- Klaas C (1997) Microprotozooplankton distribution and their potential grazing impact in the Antarctic Circumpolar Current. *Deep-Sea Res II* **44**:375-393
- Kopczynska E, Savoye N, Dehairs F, Cardinal D, Elskens M (2007) Spring phytoplankton assemblages in the Southern Ocean between Australia and Antarctica. *Polar Biol* **31**:77-88
- Landry MR, Hassett RP (1982) Estimating the grazing impact of marine micro-zooplankton. *Mar Biol* **67**:283-288
- Landry MR, Brown SL, Selph KE, Abbott MR, Letelier RM, Christensen S, Bidigare RR, Casciotti, K (2001) Initiation of the spring phytoplankton increase in the Antarctic Polar Front Zone at 170°W. *J Geophys Res* **106**:13903-13915
- Laubscher RK, Perissinotto R, McQuaid CD (1993) Phytoplankton production and biomass at frontal zones in the Atlantic sector of the Southern Ocean. *Polar Biol* **13**: 471-481
- Legendre L, Le Fèvre J (1995) Microbial food webs and the export of biogenic carbon in the oceans. *Aquat Microb Ecol* **9**:69-77
- Levinsen H, Nielsen TG, Hansen BW (1999) Plankton community structure and carbon cycling on the western coast of Greenland during the stratified summer situation. Heterotrophic dinoflagellates and ciliates. *Aquat Microb Ecol* **16**:217-232
- Longhurst AR (1998) Ecological geography of the sea. Academic Press, San Diego, 398 p
- Menden-Deuer S, Lessard EJ (2000) Carbon to volume relationships for dinoflagellates, diatoms and other protist plankton. *Limnol Oceanogr* **45**:569-579
- Michaels AF, Silver MW (1988) Primary production, sinking fluxes and the microbial food web. *Deep-Sea Res I* **35**: 473-490
- Moore JK, Abbott MR (2000) Phytoplankton chlorophyll distributions and primary production in the Southern

- Ocean. *J Geophys Res* **105**:28709-28722
- Orsi AH, Whitworth T, Nowlin, WD (1995) On the meridional extent and fronts of the Antarctic Circumpolar Current. *Deep-Sea Res I* **42**:641-673
- Pakhomov EA, Perissinotto R, McQuaid CD (1994) Comparative structure of the macrozooplankton/micronekton communities of the Subtropical and Antarctic Polar Fronts. *Mar Ecol Prog Ser* **111**:155-169
- Pearce I, Davidson AT, Thomson PG, Wright S, van den Enden R (2011) Marine microbial ecology in the sub-Antarctic Zone: Rate of bacterial and phytoplankton growth and grazing by heterotrophic protists. *Deep-Sea Res II* **58**:2248-2259
- Pedrós-Alió C, Calderón-Paz JI, Guixa N, Navarrete A, Vaqué D (1996) Microbial plankton across Drake Passage. *Polar Biol* **16**:613-622
- Putt M, Stoecker DK (1989) An experimentally determined carbon: volume ratio for marine "oligotrichous" ciliates from estuarine and coastal waters. *Limnol Oceanogr* **34**:1097-1103
- Safi KA, Griffiths FB, Hall JA (2007) Microzooplankton composition, biomass and grazing rates along the WOCE SR3 line between Tasmania and Antarctica. *Deep-Sea Res II* **54**:1025-1041
- Selph KE, Landry MR, Allen CB, Calbet A, Christiansen S, Bidigare RR (2001) Microbial community composition and growth dynamics in the Antarctic Polar Front and seasonal ice zone during late spring 1997. *Deep-Sea Res II* **48**:4059-4080
- Sherr EB, Sherr BF, Fessenden L (1997) Heterotrophic protists in the central Arctic ocean. *Deep-Sea Res II* **44**:1665-1682
- Strom SL, Strom MW (1996) Microplankton growth, grazing, and community structure in the northern Gulf of Mexico. *Mar Ecol Prog Ser* **130**:229-240
- Sommer US, Stabel H (1986) Near surface nutrient and phytoplankton distribution in the Drake Passage during early December. *Polar Biol* **6**:107-110
- Talley LD (1996) Antarctic Intermediate Water in the South Atlantic. In: Wefer G, Berger WH, Siedler G, D Webb (eds) *The South Atlantic: present and past circulation*. Springer-Verlag, Berlin, pp 219-238
- Tsuda A, Kawaguchi S (1997) Microzooplankton grazing in the surface water of the Southern ocean during an austral summer. *Polar Biol* **18**:240-245
- Verity PG, Langdon C (1984) Relationships between lorica volume, carbon, nitrogen and ATP content of tintinnids in Narragansett Bay. *J Plankton Res* **6**:859-868
- Verity PG, Stoecker DK, Sieracki ME, Nelson JR (1996) Microzooplankton grazing of primary production at 140°W in the equatorial Pacific. *Deep-Sea Res II* **43**:1227-1255
- Veth C, Peeken I, Scharek R (1997) Physical anatomy of fronts and surface waters in the ACC near the 6°W meridian during austral spring 1992. *Deep-Sea Res II* **44**:23-49
- Vincent WF (1988) *Microbial ecosystems of Antarctica*. Cambridge University Press, 320 p
- Ward P, Whitehouse M, Meredith M, Murphy E, Shreeve R, Korb R, Watkins J, Thorpe S, Woodd-Walker R, Brierley A, Cunningham N, Grant S, Bone D (2002) The Southern Antarctic Circumpolar current front: physical and biological coupling at South Georgia. *Deep-Sea Res I* **49**:2183-2202
- Wylie JL, Currie DJ (1991) The relative importance of bacteria and algae as food sources for crustacean zooplankton. *Limnol Oceanogr* **36**:708-728
- Yang EJ, Choi JK, Hyun J-H (2004) Distribution and structure of heterotrophic protists communities in the northeast equatorial Pacific Ocean. *Mar Biol* **146**:1-15
- Zhou M, Zhu Y, Dorland RD, Measures CI (2010) Dynamics of the current system in the southern Drake Passage. *Deep-Sea Res I* **57**:1039-1048

Received Nov. 9, 2011

Revised Nov. 22, 2011

Accepted Dec. 6, 2011