

남극 남셰틀랜드군도 주변 해역의 영양염과 식물플랑크톤 생물량 분포

김동선* · 강성호 · 김동엽 · 이윤호 · 강영철

한국해양연구원 극지연구본부

Distribution of Nutrients and Phytoplankton Biomass in the Area Around the South Shetland Islands, Antarctica

Dongseon Kim*, Sung-Ho Kang, Dong Yup Kim, Youn-Ho Lee, and
Young-Chul Kang

*Polar Sciences Laboratory, KORDI
Ansan P.O. Box 29, Seoul 425-600, Korea*

Abstract : Temperature, salinity, nutrients, chlorophyll-a, and primary production were measured within the upper 200 m water column in the area around the South Shetland Islands in January, 2000. Surface temperature was relatively high in the Drake Passage north of the South Shetland Islands and low in the northeastern area of the Antarctic Peninsula. In contrast, surface salinity was low in the Drake Passage and increased toward the Antarctic Peninsula, reaching the maximum value in the northeastern area of the Antarctic Peninsula. Surface nutrients were low in the Drake Passage and high in the area near the South Shetland Islands. Surface chlorophyll-a was also low in the Drake Passage and near the Antarctic Peninsula and high in the area of the northern King George Island. The study area could be classified as four geographical zones based on the characteristic shape of the T/S diagrams; the Drake Passage, the Bransfield Strait, the mixed zone, and the Weddell Sea. Each geographical zone showed apparently different physical, chemical, and biological characteristics. Phytoplankton biomass was relatively low in the Drake Passage and the Weddell Sea and high in the Bransfield Strait and the mixed zone. The low phytoplankton biomass in the Weddell Sea could be explained by the low water temperature and deep surface mixing down to 200 m. The high grazing pressure and low availability of iron could be responsible for the low phytoplankton biomass in the Drake Passage.

Key words : 남극(Antarctica), 남셰틀랜드군도(South Shetland Islands), 영양염(nutrients), 식물플랑크톤 생물량(phytoplankton).

1. 서론

남극해는 전세계 해양의 심층수가 형성되는 주요해역이고, 용존가스들의 주요침강해역이며, 많은 양의 영양염이 표

층해수에 존재하는 지역이다(Smith 1990). 따라서 전지구 생지화학적 물질순환과 관련하여 남극해의 물질순환에 대한 많은 연구와 관심이 집중되고 있다(Huntley *et al.* 1991; Turner and Owens 1995; Smetack *et al.* 1997). 대기 이산화탄소 농도에 미치는 물리적, 생지화학적 영향을 예측하는 모델 연구에 따르면, 남극해에서는 대기 이산화탄소가 해

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

양으로 거의 유입되지 않는다(Tans *et al.* 1990). 그러나, 남극해에서 대기와 표층해수의 이산화탄소 농도를 관측한 결과, 남극해가 대기 이산화탄소의 주요 제거해역으로 작용하는 것으로 밝혀졌다(Takahashi *et al.* 1993). 베링사우전해(Bellingshausen Sea)에서도 대기와 표층해수의 이산화탄소 농도를 측정하였는데, 상당한 양의 대기중 이산화탄소가 표층해수로 유입되었다(Robertson and Watson 1995). 이처럼 다양하고 상반된 연구결과는 남극해의 해류순환과 해수구조가 매우 복잡하기 때문이다. 아직 남극해에서 물리, 화학, 생물학적 종합해양관측이 충분히 이루어지지 않아 지구 탄소순환과 대기 이산화탄소 제거해역으로서 남극해의 역할에 대한 많은 연구가 필요하다.

남극해는 표층해수에 충분한 영양염이 존재하지만 식물플랑크톤 생물량과 일차생산력이 매우 낮게 관측되어, 높은 영양염, 낮은 엽록소(High Nutrient, Low Chlorophyll)로 표현되는 해역이다(Holm-Hansen *et al.* 1977; El-Sayed 1988). 그러나, 해양관측과 인공위성 자료에 의하면, 해빙에 근접한 해역이나 연안해역에서는 일차생산력이 비교적 높게 관측되었다(Mitchell and Holm-Hansen 1991; Laubscher *et al.* 1993; Arrigo *et al.* 1998). 베링사우전해의 극전선 해역(polar frontal zone)에서도 식물플랑크톤 생물량이 높게 관측되었다(Boyd *et al.* 1995). 따라서 남극해에서 식물플랑크톤 생물량과 일차생산력을 조절하는 기작에 대한 보다 많은 연구가 필요하다.

남쉐틀랜드군도 주변 해역은 여러 수괴들의 혼합, 여러 섬들의 영향, 대륙붕에서 심해에 이르는 복잡한 지형구조 때문에 수괴구조가 매우 복잡하다. 이 해역은 베링사우전해, 브랜스필드해협, 웨델해, 드레이크해협 등 여러 해역에서 해수가 유입되기 때문에 수층의 물리적, 화학적, 생물학적 특성이 다양하게 변화한다. 또한 이 해역은 상업적으로 크릴이 풍부한 해역이기 때문에 크릴 군집을 유지할 수 있는 먹이구조를 이해하는 것이 매우 중요하다(Nicol and de la Mare 1993).

본 연구에서는 남쉐틀랜드군도 주변해역에서 표층부터 수심 200 m까지 수온, 염분, 영양염, 엽록소, 일차생산력 등을 측정하여, 해양물리 특성에 따라 남쉐틀랜드군도 주변해역을 4개의 해역으로 나누고, 각 해역의 물리, 화학, 생물 특성을 밝혔으며, 해역에 따른 식물플랑크톤 생물량과 일차생산력 차이에 영향을 미치는 요인들을 조사하였다.

2. 재료 및 방법

해수시료와 수온, 염분 자료는 2000년 1월에 남쉐틀랜드군도 주변해역에서 한국 해양연구원 연구선 "온누리"에 승선하여 얻었다. 연구 해역은 주로 남쉐틀랜드군도 북쪽 드레이크해협과 브랜스필드해협이다(Fig. 1). 조사 정점은 총 27점으로, 각 정점마다 SeaBird CTD를 이용하여 수온과 염분을 측정하였고, 정해진 수심에서 니스킨(Niskin) 채수기를 이용하여 해수를 채집하였다. 채수 수심은 0, 10, 20, 30,

50, 75, 100, 150, 200 m이다. 영양염과 엽록소를 분석하기 위해 해수 11를 0.45 μ Whatman GF/F 여과지를 이용하여 여과한 후, 여과된 해수 30 ml를 영양염 분석을 위해 냉동하였고, GF/F 여과지도 엽록소 분석을 위해 냉동하였다.

영양염 농도(질산염+아질산염, 인산염, 규산염)는 자동이온분석기(LaChat model, QuikChem AE)를 이용하여 측정하였다. 엽록소 농도는 90% 아세톤 10 ml로 24시간 동안 추출한 후에 Turner-designed fluorometer(10-006R)를 이용하여 측정하였다(Parsons *et al.* 1984).

Phaeopigment 농도는 아세톤으로 추출된 엽록소에 1 N 염산을 넣고 1분 30초 후에 Turner-designed fluorometer로 측정하였다. 본 논문에서는 엽록소 농도에서 phaeopigment 농도를 뺀 보정된 엽록소(corrected chlorophyll) 값을 이용하였다. 일차생산력은 유광층내(표층광의 1%까지) 수심에서 시료를 취하여 4 μ Ci 14 C-NaHCO₃를 주입한 다음 정온을 기준으로 3 시간 동안 배양하여 측정하였다. 일차생산력 측정을 위한 해수시료는 표층광의 100, 49, 30, 15, 3.5, 1% 광투과 수심(Light penetration depth)에서 채수하였다. 시료 배양시에 광도를 채수 수심의 광도로 맞추기 위해 250 ml 폴리카보네이트 병을 천공된 니켈 스크린(nickel screen)으로 포장하였다. 배양은 선상에서 표층해수로 냉각한 배양기에서 행하였다. 일정 시간 배양 후 25 mm Whatman GF/F 여과지로 시료를 여과한 후, 여과지를 염산증기(HCl fumes)로 처리한 다음 건조시켜, 섬광액(scintillation cocktail; Lumagel Safe) 10 ml를 가하여 섬광계수기(scintillation counter; Wallac Model#1405)를 이용하여 탄소 방사능 값을 측정, Parsons *et al.*(1984)에 따라 14 C의 흡수율을 구하였다.

3. 결과

표층해수 분포

브랜스필드해협과 남쉐틀랜드군도 북쪽 드레이크해협(Drake Passage)의 표층해수에서 수온, 염분, 질산염+아질산염, 인산염, 규산염, 엽록소 분포를 Figs. 2~7에 도시하였다. 수온은 대체로 남쉐틀랜드군도 북쪽 드레이크해협에서 높았고, 2.2 $^{\circ}$ C 이상의 수온이 엘리펀트섬(Elephant Island) 북서쪽에서 관측되었다(Fig. 2). 브랜스필드해협 남동쪽으로 갈수록 수온이 점차적으로 낮아져 -0.2 $^{\circ}$ C의 수온이 남극반도 북동쪽에서 관측되었다. 1.0 $^{\circ}$ C 등온선이 브랜스필드해협 중앙으로 길게 뻗어있어 수온전선(thermal front)이 브랜스필드해협 중앙에 존재하고 있음을 보이는데, 많은 연구자들도 이곳에 수온전선이 존재하고 있음을 보고하였다(Niiler *et al.* 1991; Capella *et al.* 1992; Garcia *et al.* 1994). Tokarczyk(1987)은 베링사우전해(Bellingshausen Sea)의 영향을 받은 수괴와 웨델해(Weddell Sea)의 영향을 받은 수괴가 1.0 $^{\circ}$ C 등온선(isotherm)을 경계로 브랜스필드해협에 존재한다고 보고하였다. 베링사우전해의 영향을 받은 수

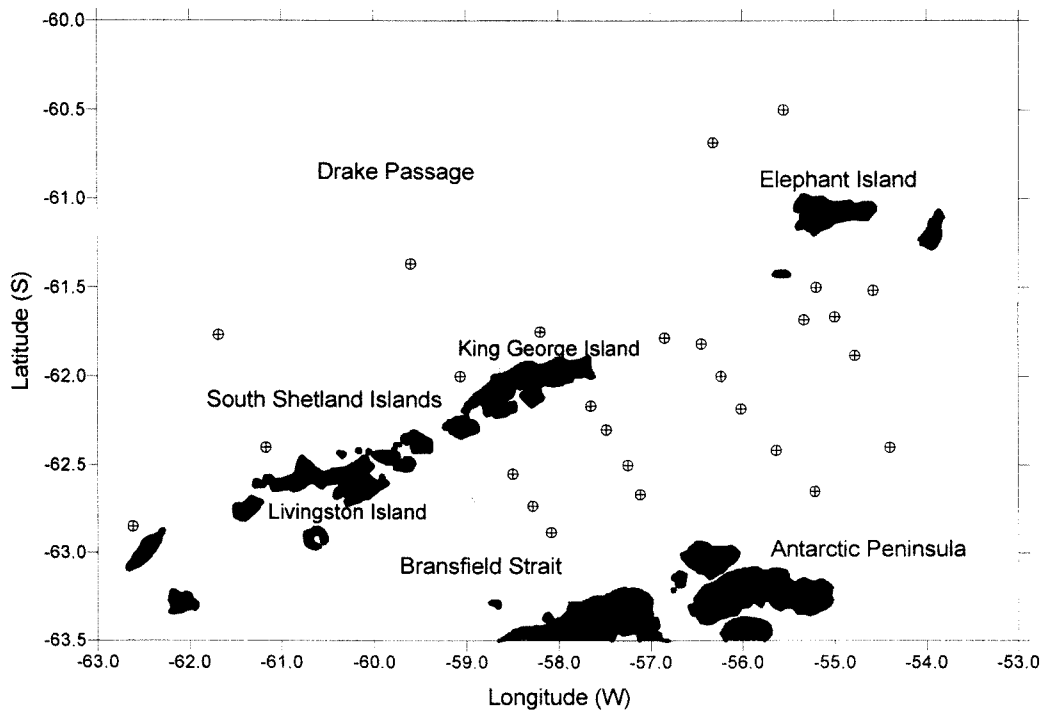


Fig. 1. Study area and sampling stations. Cross symbols indicate sampling stations.

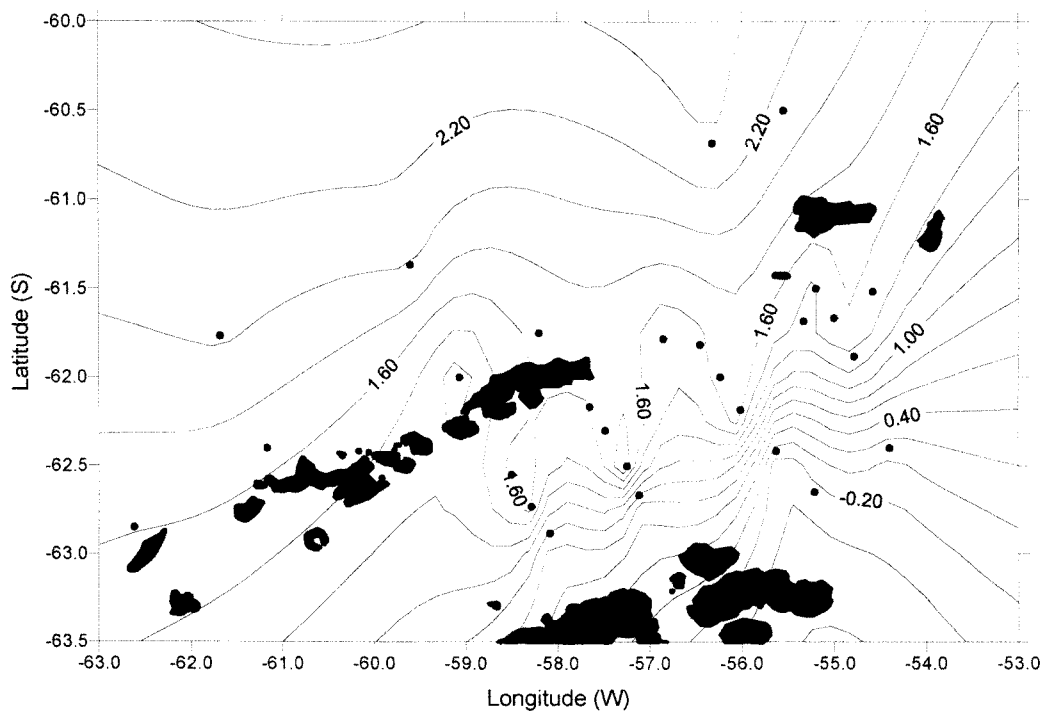


Fig. 2. Surface temperature (°C) in the study area.

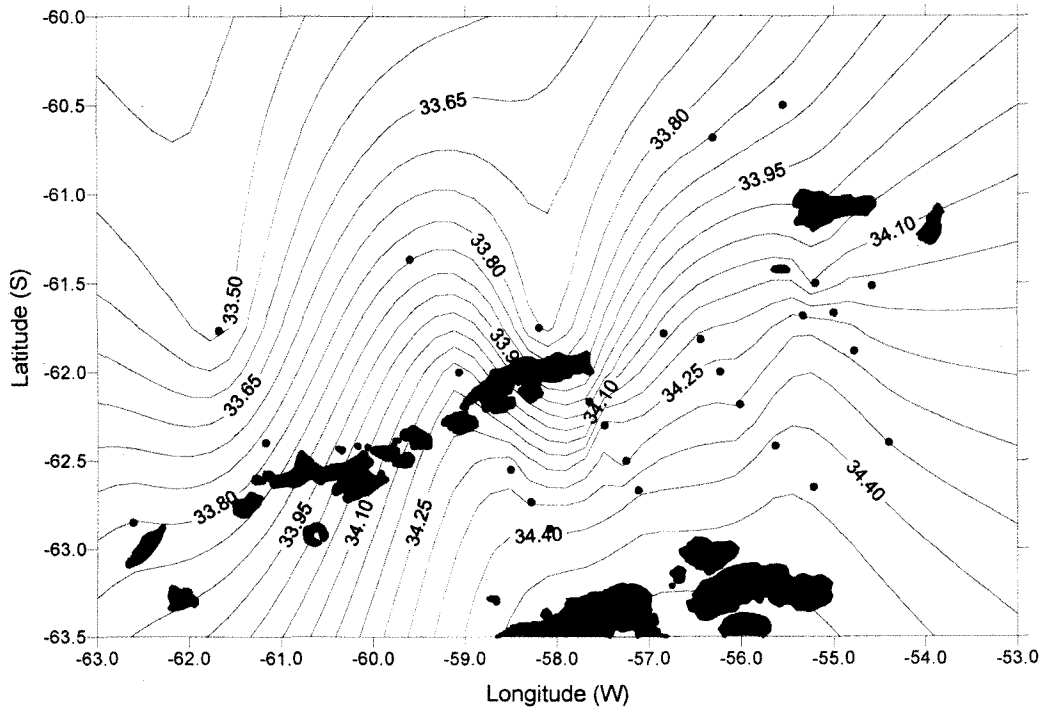


Fig. 3. Surface salinity (psu) in the study area.

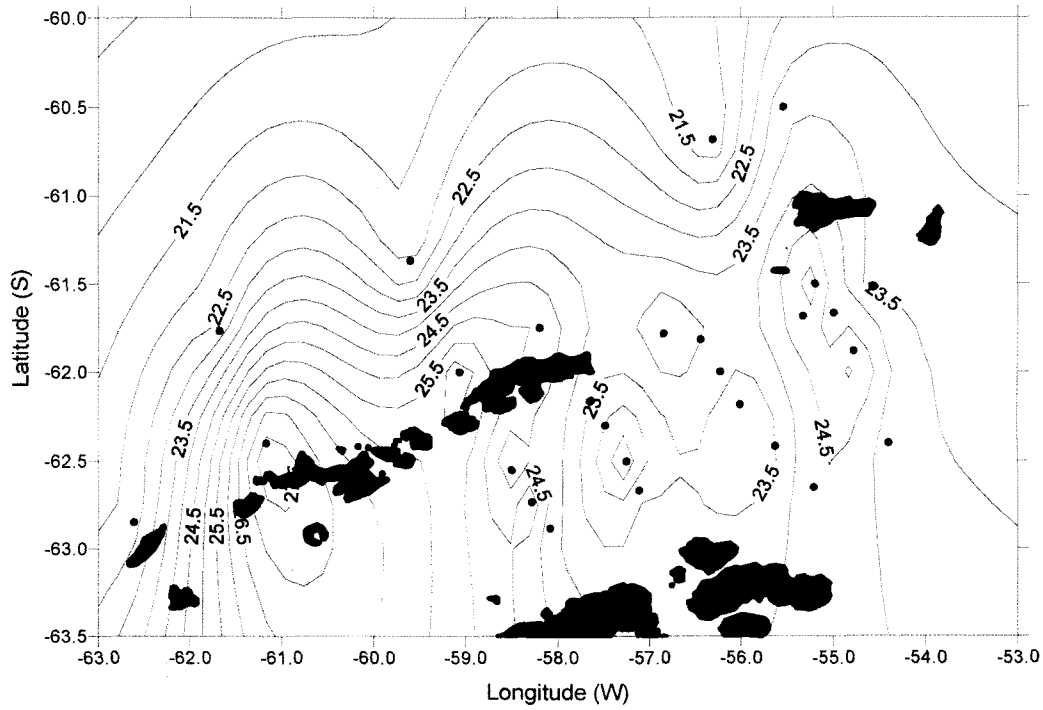


Fig. 4. Surface distribution of nitrate+nitrite (μM) in the study area.

Table 1. The 100 m-depth integrated chlorophyll-a, primary productivity and phytoplankton growth rates.

Area	Stations	Integrated chl-a (mgm ⁻²)	Productivity (mgC m ⁻² d ⁻¹)	Growth rate (d ⁻¹)
Drake Passage		51.1(average)	209(average)	0.14(average)
	8B	90.5	.*	-
	7T	32.4	-	-
	5T	39.1	141	0.11
	2T	35.9	204	0.17
	1T	57.7	281	0.14
Bransfield Strait		86.2(average)	215(average)	0.083(average)
	B	102.1	243	0.070
	1B	115.1	-	-
	2B	95.9	-	-
	C	98.2	121	0.036
	G	58.6	258	0.13
	H	58.9	-	-
	K	71.5	-	-
	L	73.8	238	0.095
	O	118.3	-	-
P	69.4	-	-	
Mixed zone		86.0(average)	277(average)	0.095(average)
	7B	83.6	341	0.12
	5B	88.2	-	-
	4B	123.5	-	-
	3B	82.6	-	-
	A	101.0	192	0.056
	I	40.2	-	-
	J	83.0	298	0.11
Weddell Sea		58.1(average)	162(average)	0.12(average)
	D	39.7	-	-
	E	41.7	165	0.12
	F	75.7	-	-
	M	38.6	158	0.12
	N	94.7	-	-

*Not Determined

괴는 웨델해의 영향을 받은 수괴보다 높은 수온과 낮은 염분에 의해 특징지어진다. 킹조오지섬(King George Island)과 엘리펀트섬 사이 해역에서 표층수온이 크게 물결치는 굴곡선 형태(meandering)의 분포를 보인다. 이것은 Circumpolar Deep Water(CDW)의 영향을 받는 드레이크해협에 따뜻한 해수가 이 두 섬들 사이로 브랜스필드해협으로 유입되고 있음을 시사하는 것이다(Lopez *et al.*, 1999).

표층해수의 염분은 남쉐틀랜드군도 북쪽 드레이크해협에서 33.50 psu 이하의 최소 값을 보이고 남극반도쪽으로 갈수록 점차적으로 증가하여 남극반도 북동해역에서 34.40 psu 이상의 최고 값을 보인다(Fig. 3). Tokarczyk(1987)은 배링사우전해의 영향을 받은 수괴와 웨델해의 영향을 받은 수괴가 34.2 psu 등염선(isohaline)을 경계로 구분되어진다고 보고했는데, 본 연구에서는 34.35 psu 등염선에 의해 구

분되는 것으로 보인다. 염분분포는 수온분포와 달리 킹조오지섬과 엘리펀트섬 사이 해역에서 굴곡선 형태를 보이지 않고 오히려 킹조오지섬 북쪽 드레이크 해협에서 굴곡선 형태를 보인다.

표층해수의 질산염+아질산염은 엘리펀트섬 북쪽 드레이크해협에서 21.5 μM 이하의 최소 농도를 보이고 리빙스톤섬 인근 해역에서 27.5 μM 이상의 최고 농도를 보인다(Fig. 4). 질산염+아질산염 농도는 브랜스필드해협에서는 남서쪽 해역에서 비교적 높은 값을 보이고 북동쪽으로 갈수록 점차적으로 감소한다. 웨델해의 영향을 받는 남극반도 북동해역에서는 질산염+아질산염 농도가 비교적 낮은 값을 보인다.

표층해수의 인산염은 질산염과 비슷한 농도분포를 보여, 드레이크해협에서 낮은 농도를 보이고 남쉐틀랜드군도 인접해역에서는 높은 농도를 보인다(Fig. 5). 그리고 브랜스필드

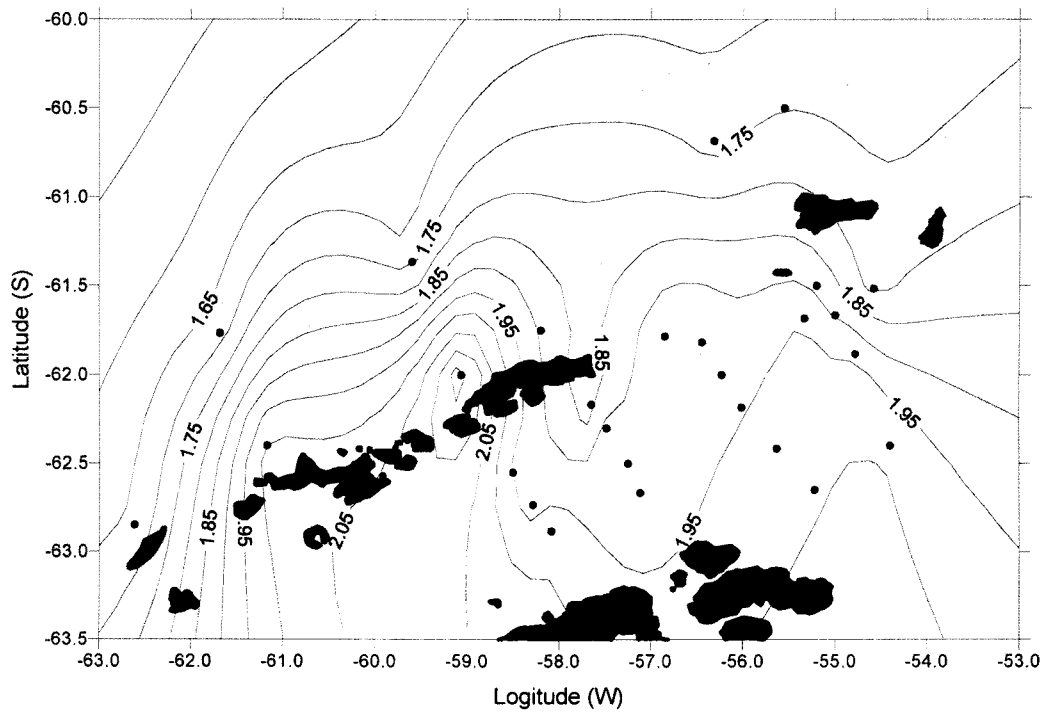


Fig. 5. Surface distribution of phosphate (μM) in the study area.

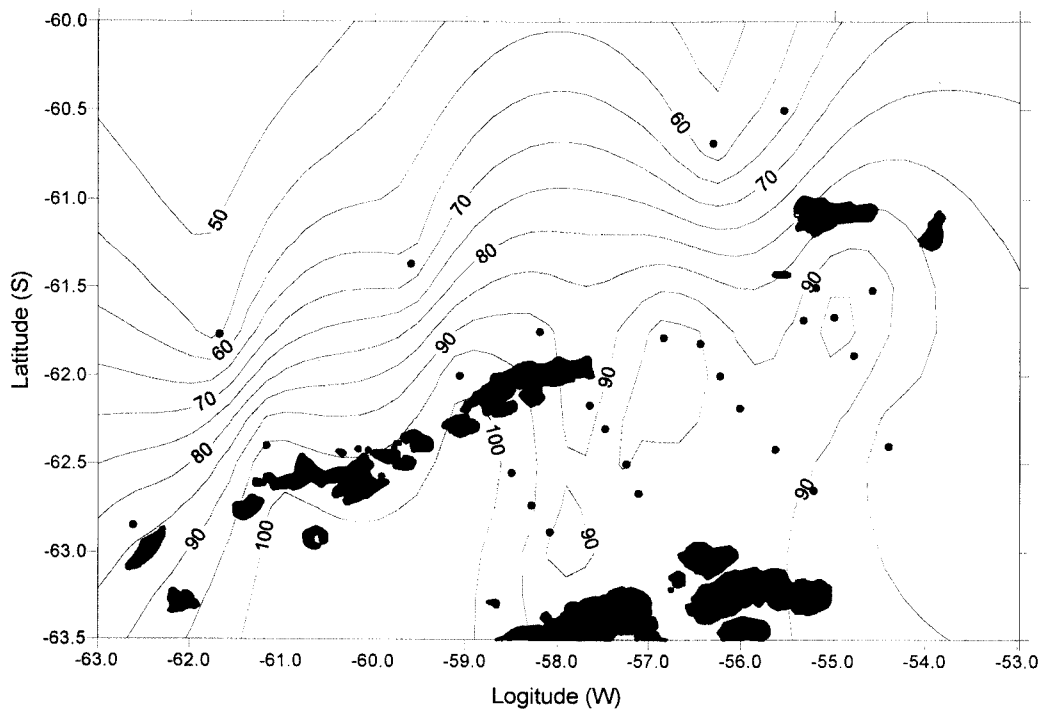


Fig. 6. Surface distribution of silicate (μM) in the study area.

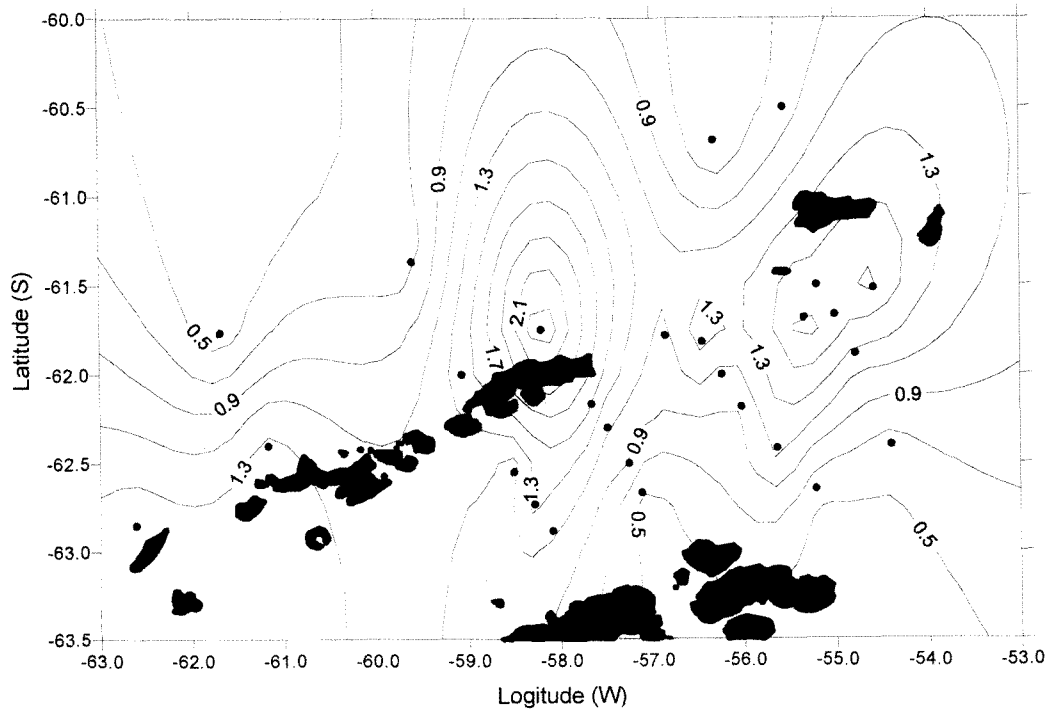


Fig. 7. Surface distribution of chlorophyll-a (mg m^{-3}) in the study area.

해협에서도 인산염 농도는 남서쪽 해역에서 높은 값을 보이고 북동쪽으로 갈수록 감소한다.

표층해수의 규산염은 해역에 따라 커다란 농도차이를 보인다 (Fig. 6). 규산염 농도는 드레이크해협에서 $60 \mu\text{M}$ 이하의 낮은 값을 보이고 브랜스필드 해협의 남서해역에서는 $100 \mu\text{M}$ 의 높은 값을 보인다. 규산염도 질산염과 인산염과 마찬가지로 남셰틀랜드 주변해역에서 비교적 높은 농도를 보이고 웨델해의 영향을 받는 남극반도 북동 해역에서는 낮은 농도를 보인다.

표층해수의 엽록소는 드레이크해협과 남극반도 주변해역에서 0.5 mg m^{-3} 이하의 최저 농도를 보이고 킹조오지섬 북쪽해역에서 2.3 mg m^{-3} 이상의 최고 농도를 보인다 (Fig. 7). 엽록소 농도는 전반적으로 킹조오지섬 북쪽, 엘리펀트섬 남쪽, 브랜스필드해협의 남서쪽에서 비교적 높은 값을 보이고 드레이크해협과 남극반도 북동해역에서 낮은 값을 보인다. 브랜스필드해협에서는 웨델해의 영향을 받는 수괴보다는 배링사우전해의 영향을 받은 수괴에서 엽록소 농도가 높게 측정되었다.

해역 구분

본 연구에서 조사된 26개 정점에서 수온과 염분분포를 분석한 결과, 연구해역이 크게 4개의 특징적인 해역으로 나뉘어진다. 각각의 해역은 특징적인 T-S diagram으로 표시되며, 각 해역의 물리적 특성은 다음과 같다:

해역 1(드레이크해협 해역): 이 해역은 드레이크해협에 위치한 정점들로 이루어졌고 표층해수에서 높은 수온과 낮은 염분, 수심 100 m에서 $-1 \text{ }^\circ\text{C}$ 정도의 수온약층, 수심 200 m에서 높은 수온과 염분 등이 특징이다 (Fig. 8a). **해역 2(브랜스필드해협 해역):** 이 구역은 브랜스필드해협 중앙에 위치한 정점들로 이루어졌으며 해역 1에 비해 표층해수의 수온은 낮고 염분은 높다 (Fig. 8b). 수온은 수심에 따라 점차적으로 감소하고 수온약층은 존재하지 않았다.

해역 3(혼합 해역): 이 해역은 남셰틀랜드군도에 바로 인접한 정점들과 킹조오지섬과 엘리펀트섬 사이에 있는 정점들로 이루어졌다 (Fig. 8c). 표층해수의 수온은 해역 2와 비슷한 값을 보이거나 염분은 낮으며, 수온과 염분은 해역 2와 비슷한 분포형태를 보이거나 기온기가 해역 2에 비해 완만하다. 이 해역의 표층해수 염분이 해역 1과 해역 2의 표층해수 염분의 중간정도를 보여, 이 해역 표층에서 드레이크해협 해수와 브랜스필드해협 해수가 혼합되는 것으로 보인다.

해역 4(웨델해 해역): 남극반도에 인접한 정점들로 이루어졌으며, 다른 해역에 비해 표층해수의 수온은 낮고 염분은 높다 (Fig. 8d). 이 해역 수층은 성층화가 다른 해역에 비해 덜 이루어졌고 수직 구조도 작다.

각 해역의 해수특성

각 해역에서 수심 200 m 까지 해수밀도($\sigma\text{-t}$)의 수직분포가 Fig. 9에 도시되었다. 드레이크해협 해역에서는

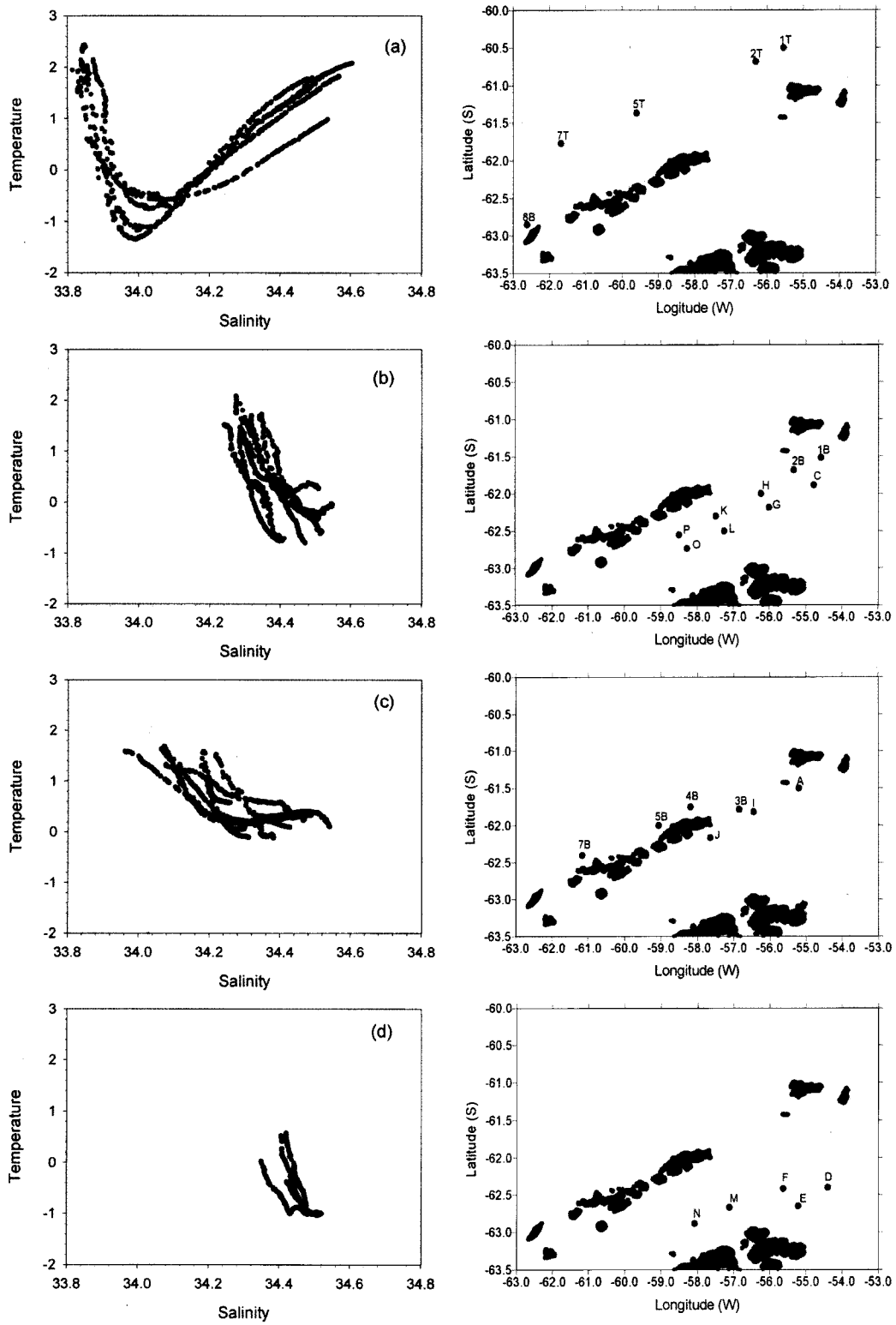


Fig. 8. T/S diagram characterizing each of water zones and station location map; (a) the Drake Passage, (b) the Bransfield Strait, (c) the mixed zone, and (d) the Weddell Sea.

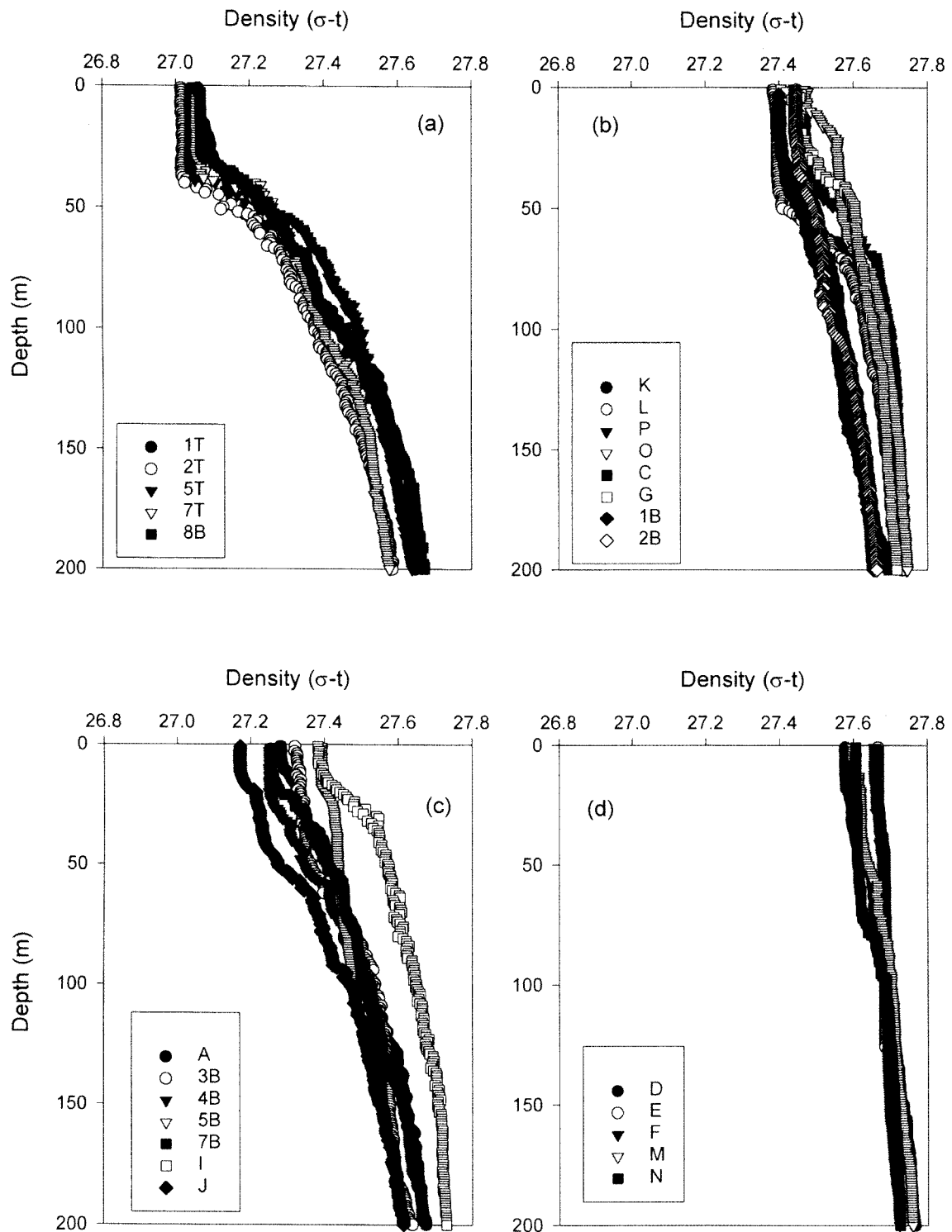


Fig. 9. Vertical profiles of seawater density in (a) the Drake Passage, (b) the Bransfield Strait, (c) the mixed zone, and (d) the Weddell Sea.

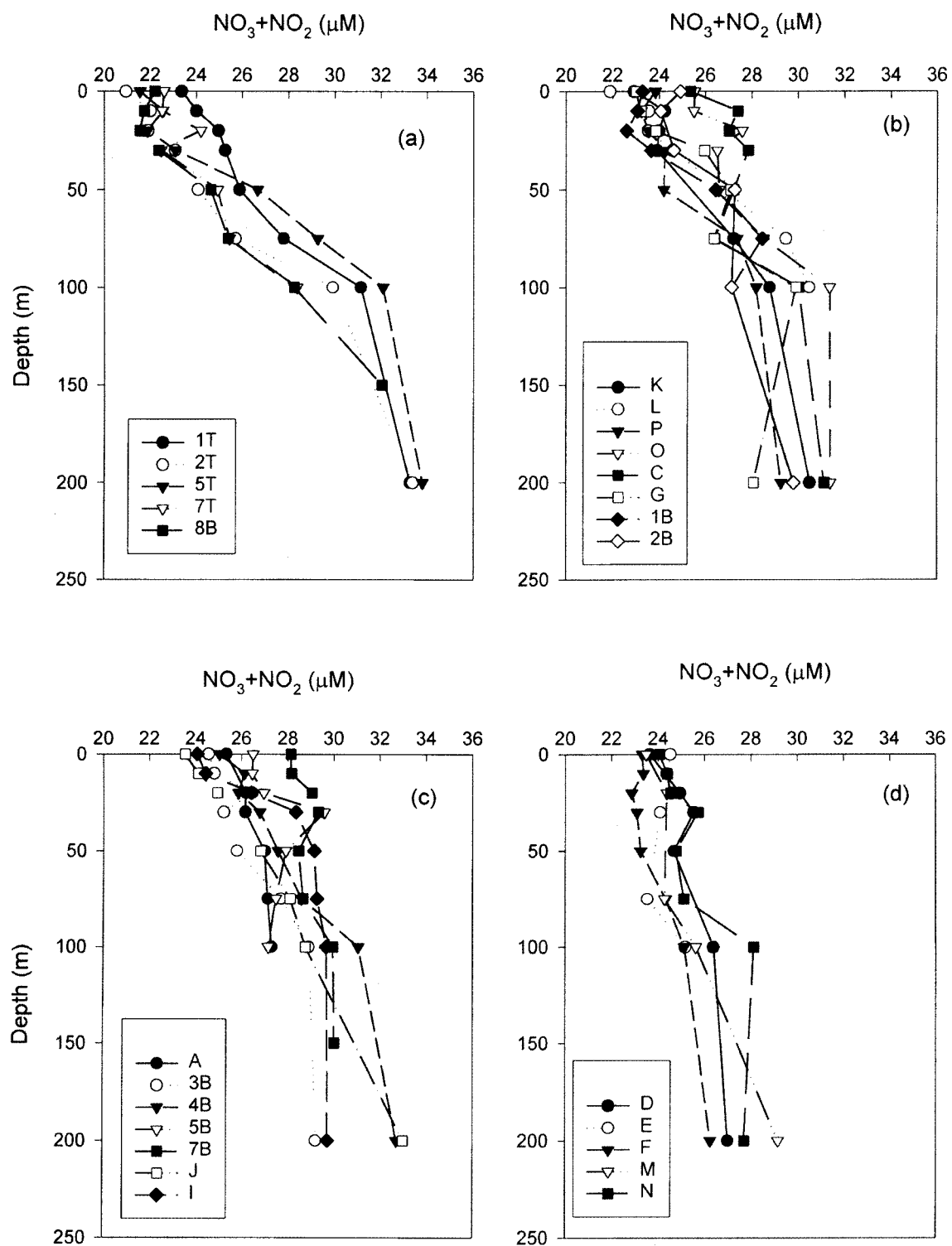


Fig. 10. Vertical profiles of nitrate+nitrite in (a) the Drake Passage, (b) the Bransfield Strait, (c) the mixed zone, and (d) the Weddell Sea.

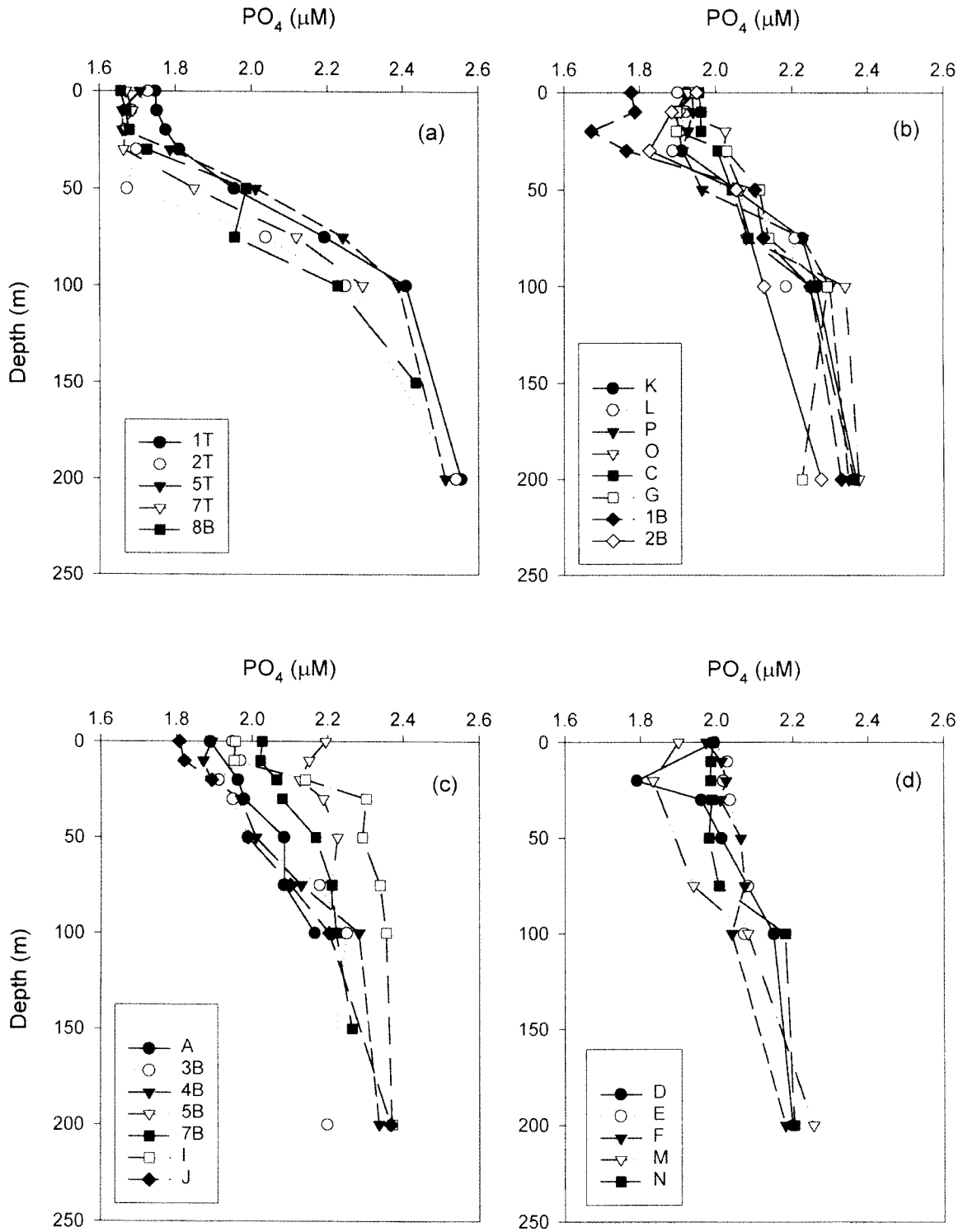


Fig. 11. Vertical profiles of phosphate in (a) the Drake Passage, (b) the Bransfield Strait, (c) the mixed zone, and (d) the Weddell Sea.

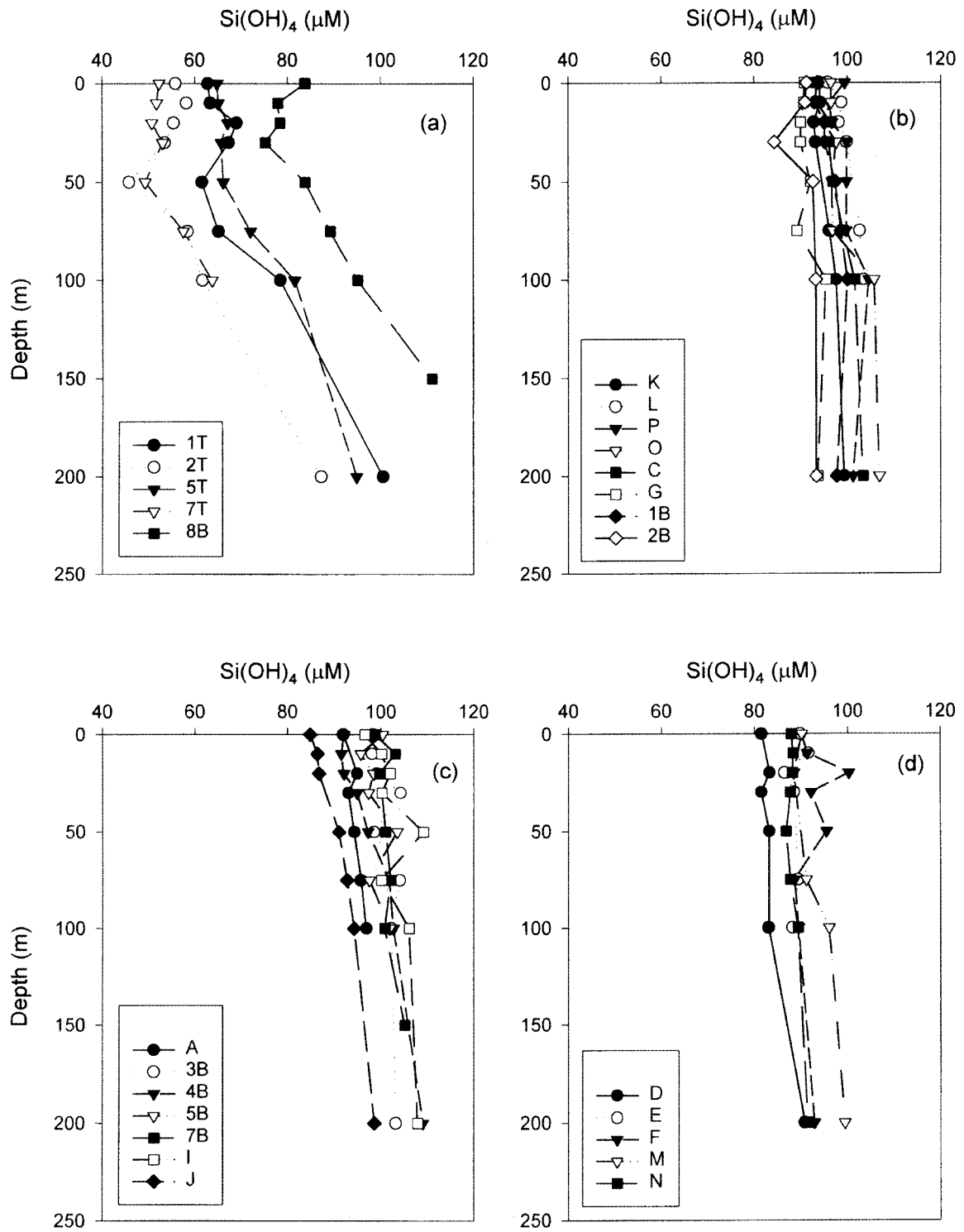


Fig. 12. Vertical profiles of silicate in (a) the Drake Passage, (b) the Bransfield Strait, (c) the mixed zone, and (d) the Weddell Sea.

해수밀도가 수심 50 m까지 거의 일정하고 그 이하에서 수심에 따라 포물선 형태로 증가한다. 따라서 이 해역에서는 표층 혼합깊이(upper mixed depth)가 40 m 정도로 뚜렷이 보여진다. 브랜스필드해협 해역에서는 표층 성층화가 드레이크해협 해역에서처럼 뚜렷하게 보이지 않지만 표층혼합깊이가 미약하게 수심 50 m 까지 존재하는 것으로 보인다. 혼합 해역에서는 해수밀도가 수심에 따라 점진적으로 증가하여 표층 혼합깊이는 존재하지 않지만, 수심에 따라 밀도가 증가함으로써 비교적 안정된 수층을 유지한다. 웨델해 해역에서는 해수밀도가 수심에 따라 큰 변화를 보이지 않아 표층혼합 깊이가 200 m 이상으로 매우 불안정한 수층구조를 보인다. 일반적으로 해수밀도가 수심에 따라 큰 변화를 보이는 해역에서 수층 안정도가 높다. 따라서 수층 안정도는 드레이크해협 해역, 혼합 해역, 브랜스필드해협 해역, 웨델해 해역 순으로 높게 나타났다.

각 해역에서 수심 200 m 까지 질산염+아질산염 수직분포가 Fig. 10에 도시되었다. 드레이크해협 해역에서 표층해수 질산염+아질산염 농도는 21~23 μM 이고 수심에 따라 점차적으로 증가하여 200 m 깊이에서 33 μM 정도를 보인다. 이 해역에서 표층해수 질산염+아질산염 농도는 다른 해역에 비해 작게 관측되었고 수심에 따른 질산염+아질산염 농도 기울기는 매우 크다. 브랜스필드해협 해역에서 표층해수 질산염+아질산염 농도는 22~26 μM 이고 수심에 따라 완만하게 증가하여 200 m 수심에서 28~32 μM 을 보인다. 혼합 해역에서는 표층해수 질산염+아질산염 농도가 브랜스필드해협 해역보다 약간 높은 24~28 μM 을 보이고 200 m 수심에서는 브랜스필드해협 해역과 거의 유사한 값을 보인다. 웨델해 해역에서 표층해수 질산염+아질산염 농도는 23~24 μM 이고 200 m 수심에서는 26~29 μM 으로 다른 해역에 비해 수심에 따른 질산염+아질산염 증가가 가장 작다.

각 해역에서 수심 200 m 까지 인산염 수직분포는 질산염과 거의 유사하게 관측되었다(Fig. 11). 드레이크해협 해역에서 표층해수 인산염 농도는 1.65~1.75 μM 이고 수심에 따라 급격히 증가하여 200 m 깊이에서 2.55 μM 정도를 보인다. 브랜스필드해협 해역에서 표층해수 인산염 농도는 1.80~1.97 μM 이고 수심에 따라 완만하게 증가하여 200 m 수심에서 2.20~2.40 μM 을 보인다. 혼합 해역에서 표층해수 인산염 농도는 1.80~2.20 μM 이고 200 m 수심에서 2.2~2.4 μM 이다. 웨델해 해역에서 표층해수 인산염 농도는 1.90~2.00 μM 이고 200 m 수심에서는 2.10~2.20 μM 으로 다른 해역에 비해 수심에 따른 인산염 증가가 가장 작다.

각 해역에서 수심 200 m 까지 규산염 수직분포는 질산염과 인산염과는 약간 다른 양상을 보인다(Fig. 12). 드레이크해협 해역에서 표층해수 규산염 농도는 50~83 μM 으로, 다른 해역에 비해 상당히 작고, 수심 50 m까지는 농도가 거의 일정하다가 그 이하 수심에서 급격히 증가하여 200 m 수심에서 85~110 μM 을 보인다. 브랜스필드해협 해역에서 표층

해수 규산염 농도는 90~100 μM 이고 수심에 따라 큰 변화를 보이지 않았다. 혼합 해역에서는 표층해수 규산염 농도가 83~100 μM 을 보이고, 수심에 따라 완만하게 증가하여 200 m에서 95~110 μM 을 보인다. 웨델해 해역에서 표층해수 규산염 농도는 80~90 μM 이고 브랜스필드해협 해역과 마찬가지로 수심에 따라 큰 변화를 보이지 않았다.

각 해역에서 수심 100 m 까지 엽록소 수직분포가 Fig. 13에 도시되었다. 드레이크해협 해역에서 표층해수 엽록소 농도는 정점 8B를 제외하고는 0.2~0.8 mg m^{-3} 으로 낮은 값을 보이고 수심에 따라 완만하게 감소한다. 정점 8B에서는 드레이크해협 해역 다른 정점들과는 달리 표층해수의 엽록소 농도가 1.4 mg m^{-3} 으로 비교적 높고 수심 20~50 m에서 급격히 감소한다. 브랜스필드해협 해역에서 표층해수 엽록소 농도는 드레이크해협 해역보다 월등히 높은 1.0~2.0 mg m^{-3} 을 보이고 수심에 따라 점차적으로 감소하여 수심 100 m에서 0.2~0.6 mg m^{-3} 을 보인다. 혼합 해역에서는 표층해수 엽록소 농도가 정점 4B를 제외하고는 1.0~1.6 mg m^{-3} 을 보이고 드레이크해협 해역과 마찬가지로 수심에 따라 완만하게 감소하여 수심 100 m에서 0.2~0.8 mg m^{-3} 을 보인다. 정점 4B에서 표층해수 엽록소 농도가 2.65 mg m^{-3} 으로 측정된 모든 정점들 중에서 가장 높은 값을 보이고 수심에 따라 급격히 감소하여 수심 100 m에서 0.2 mg m^{-3} 을 보인다. 웨델해 해역에서 엽록소 수직분포는 드레이크해협 해역과 유사하여, 표층해수 엽록소 농도는 0.4~1.2 mg m^{-3} 이고 수심에 따라 완만하게 감소한다. 결과적으로 엽록소 농도는 드레이크해협 해역과 웨델해 해에서 상대적으로 낮은 값을 보이고 브랜스필드해협 해역과 혼합 해역에서 높은 값을 보인다.

각 해역의 정점에서 표층에서 수심 100 m까지 합한 엽록소 총량을 Table 1에 표시하였다. 드레이크해협 해역에서 엽록소 총량이 정점 8B에서 90.5 mg m^{-2} 으로 제일 높고 정점 7T에서 32.4 mg m^{-2} 으로 제일 낮으며, 평균 값은 51.1 mg m^{-2} 이다. 브랜스필드해협 해역에서는 엽록소 총량이 정점 O에서 118.3 mg m^{-2} 으로 제일 높고 정점 G에서 58.6 mg m^{-2} 으로 제일 낮으며, 평균 값은 드레이크해협 해역보다 월등히 높은 86.2 mg m^{-2} 이다. 혼합 해역에서는 엽록소 총량이 정점 4B에서 123.5 mg m^{-2} 으로 제일 높고 정점 I에서 40.2 mg m^{-2} 으로 제일 낮으며, 평균 값은 브랜스필드해협 해역과 유사한 86.0 mg m^{-2} 이다. 웨델해 해역에서는 엽록소 총량이 정점 N에서 94.7 mg m^{-2} 으로 제일 높고 정점 M에서 38.6 mg m^{-2} 으로 제일 낮으며, 평균 값은 드레이크해협 해역과 유사한 58.1 mg m^{-2} 이다. 따라서 식물플랑크톤 생물량(biomass)은 브랜스필드해협 해역과 혼합 해역에서 상대적으로 높고 드레이크해협 해역과 웨델해 해역에서 낮다.

각 해역 정점에서 측정된 일차생산력을 Table 1에 표시하였다. 일차생산력은 시료를 배양할 충분한 시간적 여유가 없어 각 해역에서 2~4 정점에서만 측정되었다. 각 해역에서 평균 일차생산력은 드레이크해협 해역에서 209 $\text{mgC m}^{-2} \text{d}^{-1}$ 이고, 브랜스필드해협 해역에서 215 $\text{mgC m}^{-2} \text{d}^{-1}$ 이며, 혼합

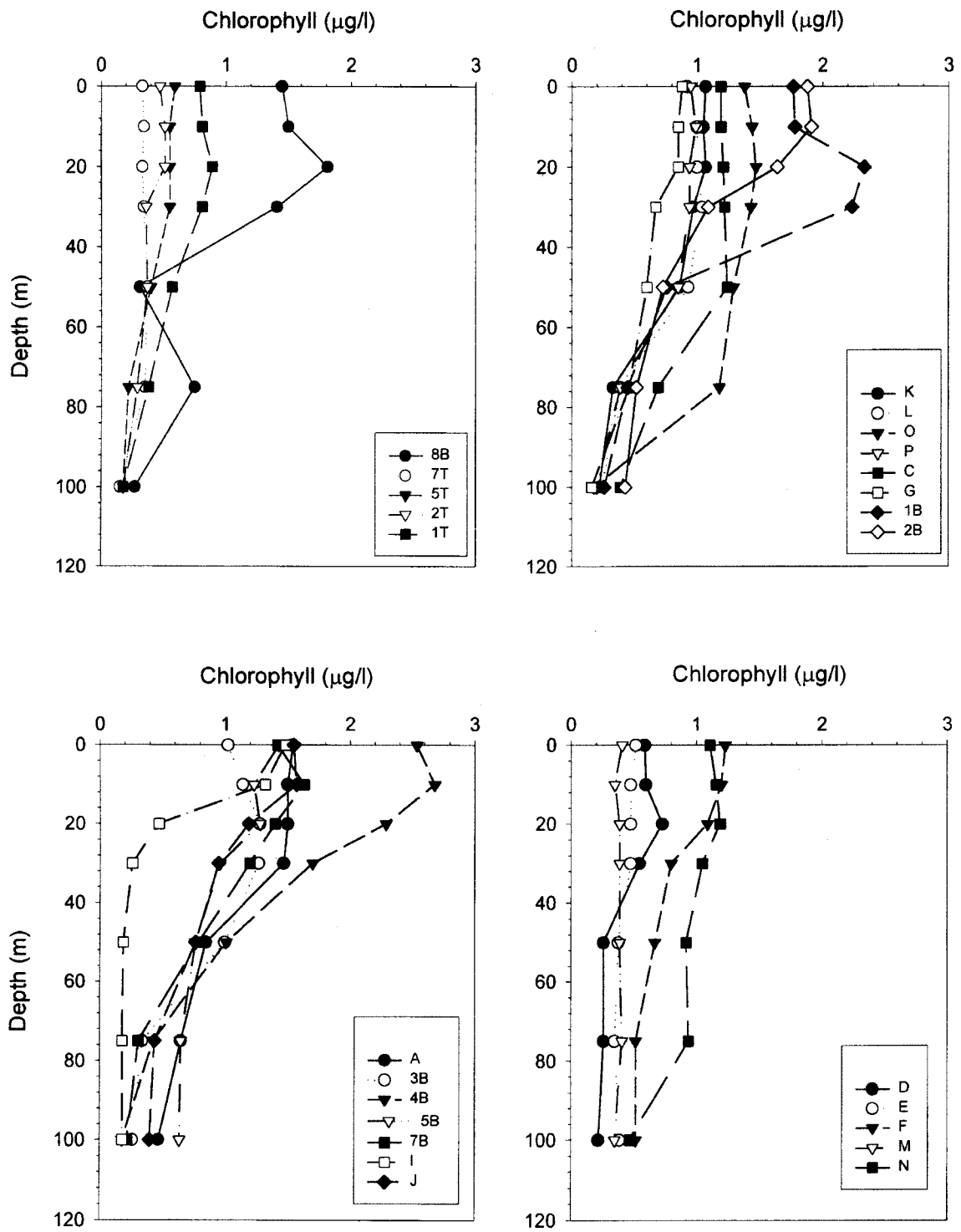


Fig. 13. Vertical profiles of chlorophyll-a in (a) the Drake Passage, (b) the Bransfield Strait, (c) the mixed zone, and (d) the Weddell Sea.

해역에서 $277 \text{ mgC m}^{-2} \text{ d}^{-1}$ 으로 4개 해역 중에서 제일 높으며, 웨델해 해역에서 $162 \text{ mgC m}^{-2} \text{ d}^{-1}$ 으로 제일 낮다. 드레이크해협 해역에서는 식물플랑크톤 생물량이 4개 해역 중에서 최저 값을 보이지만 일차생산력은 브랜스필드해협 해역과 유사한 값을 보인다. 식물플랑크톤 생물량은 브랜스필드해협과 혼합 해역에서 유사한 값을 보이지만, 일차생산력은 브랜스필드해협 해역보다 혼합 해역에서 약간 높은 값을 보인다. 웨델해 해역에서는 식물플랑크톤 생물량과 일차생산력 모두 낮은 값을 보인다.

생물량과 일차생산력 자료를 이용하여 식물플랑크톤 성장율(growth rate)을 계산하였다(Table 1). 식물플랑크톤 성장을 계산에 있어서 탄소/엽록소 비율이 필요한데, 실제 관측 자료가 없어서 Robins *et al.* (1995)이 베링사우젠해에서 측정된 비율(34)을 이용하였다. 식물플랑크톤 성장율은 드레이크해협 해역에서 평균 0.14 d^{-1} 으로 가장 높았고 브랜스필드해협 해역에서 0.083 d^{-1} 으로 가장 낮았다.

4. 토 의

남극해에서 식물플랑크톤 생물량과 일차생산력은 수온, 일사량, 영양염, 수층 안정성, 동물플랑크톤 포식압(grazing pressure), 미량영양염(철) 등 여러 가지 요인들에 의해 결정된다(Smith *et al.*, 1996). 식물플랑크톤 생물량과 일차생산력은 이들 요인들 중에서 하나의 요인에 의해 결정되기보다는 여러 요인들의 복합적인 상호작용에 의해 결정되고 지역에 따라 주요 요인들이 다르게 작용하여 식물플랑크톤 생물량과 일차생산력이 지역적 차이를 보인다.

수온

생물의 생체활동은 낮은 온도에서 느리게 일어나고 효율적인 영양염 섭취가 일어나지 않아, 식물플랑크톤 일차생산력은 낮은 수온에서 활발히 일어나지 않는다(Tilzer *et al.*, 1986). 연구해역 표층수온은 드레이크해협 해역에서 $2.0 \sim 2.5 \text{ }^{\circ}\text{C}$, 브랜스필드해협 해역에서, $1.6 \sim 2.2 \text{ }^{\circ}\text{C}$, 혼합 해역에서 $1.4 \sim 1.8 \text{ }^{\circ}\text{C}$, 웨델해에서 $-0.4 \sim 1.6 \text{ }^{\circ}\text{C}$ 으로 드레이크해협 해역에서 제일 높고 웨델해 해역에서 제일 낮다. 드레이크해협, 브랜스필드해협, 혼합 해역에서는 표층수온 차이가 크지 않아 이들 해역에서의 식물플랑크톤 생물량과 일차생산력 차이는 수온차이에 의한 것으로 볼 수 없다. 그러나 웨델해 해역은 다른 해역에 비해 최대 $2.6 \text{ }^{\circ}\text{C}$ 정도 표층수온이 낮아, 다른 해역에 비해 식물플랑크톤 생물량과 일차생산력이 작은 것은 낮은 수온 때문일 가능성이 높다.

일사량

남극해에서 일사량은 위도와 해빙(sea ice)의 영향을 크게 받는다. 연구해역은 해역에 따른 위도차이가 크지 않고 연구기간동안 4개의 해역 모두에서 해빙은 존재하지 않았기 때문

에 일사량은 모든 해역에서 거의 유사한 것으로 볼 수 있다. 따라서 각 해역에서 식물플랑크톤 생물량과 일차생산력의 차이는 일사량 차이에 의한 것이라고 볼 수 없다.

영양염

일반적으로 남극해에서는 질산염, 인산염, 규산염 등의 영양염이 표층해수 중에 풍부하여 식물플랑크톤 생물량과 일차생산력을 제한하는 요인으로 작용하지 않는다 (Jacques 1989; Martin *et al.*, 1990). 본 연구해역 중에서 드레이크해협 표층해수에서 영양염 농도가 제일 낮아, 질산염+아질산염 농도가 $21 \sim 23 \text{ } \mu\text{M}$, 인산염 농도가 $1.65 \sim 1.75 \text{ } \mu\text{M}$, 규산염 농도가 $50 \sim 83 \text{ } \mu\text{M}$ 을 보인다. 하지만 이 정도의 영양염 농도는 일차생산력을 제한할 정도로 충분히 낮지 않다. 그리고 Fig. 14에서 보이는 바와 같이 표층해수의 영양염 농도는 식물플랑크톤 생물량과 일차생산력과는 아무런 상관관계를 보이지 않는다. 따라서 본 연구해역에서는 영양염이 식물플랑크톤 생물량과 일차생산력을 결정하는 주된 요인으로는 작용하지 않는 것으로 보인다.

수층 안정도

남극해에서는 바람이 매우 강해서 표층 수층이 잘 혼합되고, 이에 따라 식물플랑크톤이 광합성을 할 수 있는 유광대(euphotic zone)에서 쉽게 벗어나 일차생산력이 제한을 받는다. 따라서 많은 연구자들이 남극해에서 수층 안정도가 일차생산력을 결정하는 가장 주된 요인이라고 주장하였다 (Bidigare *et al.*, 1986; Mitchell and Holm-Hansen 1991; Priddle *et al.*, 1994). 특히, 해빙 주변해역(Ice marginal zone)에서는 봄철에 해빙이 녹으면서 생성된 용빙수에 의해 수층 안정도가 증가하여 식물플랑크톤 대번성(bloom)이 자주 일어난다(Smith and Nelson 1986; Smith *et al.*, 1987). 4개의 해역 중에서 드레이크해협 해역이 표층혼합 깊이가 40 m로 제일 안정된 수층구조를 보인다. 혼합 해역에서는 해수밀도가 수심에 따라 점차적으로 증가하기 때문에 표층혼합 깊이는 존재하지 않지만 비교적 안정된 수층구조를 보인다. 브랜스필드해협 해역에서는 표층혼합 깊이가 미약하게 수심 50 m까지 존재하지만 수심에 따른 해수밀도 증가가 혼합 해역에 비해 작기 때문에 혼합 해역에 비해 불안정한 수층구조를 보인다. 웨델해 해역에서는 수심에 따른 해수밀도 증가가 매우 작기 때문에 상당히 불안정한 수층구조를 보인다. 기존의 현장관측과 모델 결과에 따르면, 영양염이 풍부하고 표층혼합 깊이가 40 m인 해역에서는 표층해수의 엽록소농도가 5 mg m^{-3} 에 근접하는 대번성이 일어난다고 제시하였다(Mitchell and Holm-Hansen 1991; Sakshaug *et al.*, 1991). 따라서 표층혼합 깊이가 40 m이고 영양염이 풍부한 드레이크해협 해역에서 엽록소 농도가 5 mg m^{-3} 에 근접한 값을 보여야 하지만 이 해역에서 측정된 평균 엽록소 농도는 0.8 mg m^{-3} 으로 매우 낮다. 이것은 식물플랑크톤 생물량이 다른 요인에 의해 제한을 받고 있음을

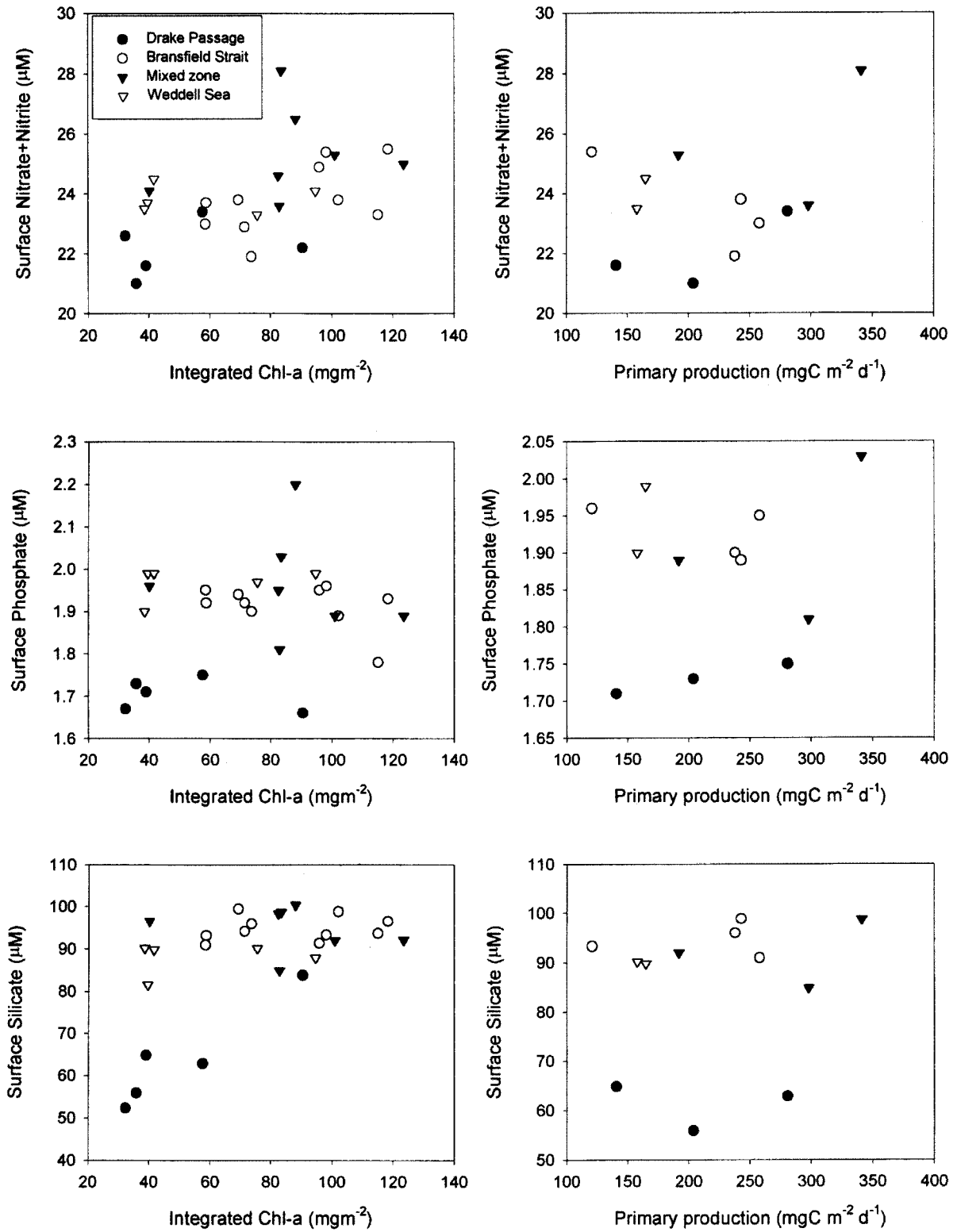


Fig. 14. Plots of surface nutrients vs. integrated chlorophyll-a and primary production.

제시해준다. 브랜스필드해협과 혼합 해역에서는 수층 안정도가 드레이크해협에 비해 상대적으로 불안정하지만 식물플랑크톤 생물량과 일차생산력은 오히려 드레이크해협 해역보다 높게 관측되었다. 4개 해역 중에서 수층 안정도가 가장 낮은 웨델해 해역에서 식물플랑크톤 생물량과 일차생산력이 가장 낮게 관측되었다. 따라서 웨델해 해역에서는 수층 안정도가 식물플랑크톤 생물량과 일차생산력을 조절하는 가장 중요한 요인으로 작용하는 것으로 보인다.

동물플랑크톤 포식압

동물플랑크톤에 의한 포식은 식물플랑크톤의 성장과 분포에 큰 영향을 미치는 것으로 알려지고 있다(Bidigare *et al.*, 1986; Jacques 1989; Jacques and Panouse 1991). 일반적으로 식물플랑크톤과 동물플랑크톤 생물량 사이에 역 상관관계가 있고, 크릴에 의한 강한 포식은 식물플랑크톤 성장을 제한한다. 동물플랑크톤에 의한 포식은 또한 식물플랑크톤 크기분포와 종조성에도 큰 영향을 미친다(Weber and El-Sayed 1987; Villafane *et al.*, 1993). 본 연구해역에서 드레이크해협 해역은 일차생산력이 브랜스필드해협 해역과 유사한 값을 보이고 식물플랑크톤 성장율이 4개 해역 중에서 제일 높지만 식물플랑크톤 생물량은 제일 낮게 관측되었다. 이것은 높은 일차생산력에도 불구하고 동물플랑크톤의 포식에 의해 식물플랑크톤 생물량이 증가하지 않았다는 것을 시사해준다. 따라서 드레이크해협 해역에서 식물플랑크톤 생물량이 낮은 것은 다른 해역에 비해 동물플랑크톤 포식압이 높기 때문인 것으로 생각된다.

미량영양염(철)

철은 주로 바람에 의해 먼지입자 형태로 해양으로 유입된다. 따라서 대양의 표층해수에서 용존철 농도는 $\text{pico-mole}(10^{-12} \text{ mole})$ 수준으로 대단히 작아, 식물플랑크톤의 충분한 성장을 유지하기에는 충분하지 않다. Martin *et al.*(1990)은 남극해와 같이 영양염은 풍부하지만 식물플랑크톤 생물량이 작은 해역에서 철이 일차생산력을 결정하는 주된 요인이라고 주장하였다. 그들의 주장이 제시된 이후에 최근까지 실험실과 실제 현장에서 철에 대한 많은 연구가 수행되고 있다(de Baar *et al.*, 1990; Banse 1991; Brandini 1993; Holm-Hansen *et al.*, 1994; Loscher *et al.*, 1997; de Jong *et al.*, 1998; de Baar *et al.*, 1999). 본 연구에서 해수의 철 농도를 직접 측정하지는 않았지만, Martin *et al.*(1990)과 de Baar *et al.*(1990)의 연구에 따르면, 드레이크해협의 철 농도는 상대적으로 낮지만 브랜스필드해협, 혼합 해역, 웨델해에서는 철 농도가 비교적 높다. 따라서 드레이크해협 해역에서 비교적 높은 수온, 충분한 영양염, 얇은 표층혼합 깊이 등과 같이 식물플랑크톤이 성장하기에 좋은 환경조건을 보이면서도 식물플랑크톤 생물량이 작은 것은 아마 표층해수의 낮은 철 농도가 식물플랑크톤 성장을 제한하기 때문일 가능성이 높다. Holm-Hansen *et al.*(1997)도 식물플랑크톤 생

물량이 드레이크해협에서 상대적으로 작은 것은 식물플랑크톤 성장에 필요한 철이 충분히 공급되지 않았기 때문이라고 주장하였다. 하지만 식물플랑크톤 성장율이 4개의 해역 중에서 드레이크해협 해역에서 가장 높은 값을 보였고 일차생산력도 브랜스필드해협 해역과 유사한 값을 보여 이 해역에서 식물플랑크톤 생물량이 작은 것이 단지 낮은 철 농도 때문이라고 단정하기 어렵다. 따라서 드레이크해협 해역에서 생물량이 낮은 이유를 규명하기 위해서는 현장 철 관측 및 식물플랑크톤에 대한 철 영향 실험, 동물플랑크톤 생물량 및 종조성 조사 등 보다 많은 연구가 필요하다.

5. 결론

연구해역은 T-S diagram의 특징적인 형태에 따라 4개의 해역(드레이크해협, 브랜스필드해협, 혼합 해역, 웨델해협)으로 구분되며, 각각 특징적인 물리, 화학, 생물학적 특성을 보인다. 드레이크해협 해역은 수층이 다른 해역에 비해 상당히 안정되어 있지만 영양염 농도와 식물플랑크톤 생물량은 상대적으로 낮고 일차생산력은 브랜스필드해협 해역과 유사한 값을 보인다. 브랜스필드해협 해역은 영양염 농도가 혼합 해역과 웨델해 해역과 유사하고 수층 안정도는 드레이크해협과 혼합 해역에 비해 낮지만, 식물플랑크톤 생물량과 일차생산력은 비교적 높게 관측되었다. 혼합 해역에서는 수층 안정도가 드레이크해협 해역에 비해 낮지만 영양염 농도, 생물량, 일차생산력 모두 상대적으로 높았다. 웨델해 해역에서는 영양염 농도가 비교적 높았지만 수층 안정도, 식물플랑크톤 생물량, 일차생산력은 상대적으로 제일 낮았다. 웨델해 해역에서 식물플랑크톤 생물량과 일차생산력이 낮은 것은 낮은 수온과 수심 200 m 이상의 깊은 표층혼합 때문이라고 생각된다. 드레이크해협 해역에서 식물플랑크톤 생물량이 낮은 것은 본 연구에서 확실히 규명하지 못하였지만 높은 동물플랑크톤 포식압과 낮은 철농도가 주요 요인으로 생각되며 이를 해결하기 위해서는 보다 많은 연구가 필요하다.

6. 요약

2000년 1월에 남극 남쉐틀랜드군도(South Shetland Islands) 주변해역에서 수심 200 m 까지 수온, 염분, 영양염, 엽록소, 일차생산력 등을 측정하였다. 표층수온은 남쉐틀랜드군도 북쪽 드레이크해협(Drake Passage)에서 높았고 남극반도 북동해역에서 낮았다. 반대로 염분은 드레이크해협에서 낮았고 남극반도쪽으로 갈수록 점차적으로 증가하여 남극반도 북동해역에서 최고 값을 보였다. 표층해수의 영양염 농도는 대체로 드레이크해협에서 낮은 값을 보였고 남쉐틀랜드군도 인접해역에서 높은 값을 보였다. 엽록소 농도는 드레이크해협과 남극반도 인접해역에서 낮았고 킹조오지섬(King George Island) 북쪽해역에서 높았다. 연구해역은 T-S diagram의 특징적인 형태에 따라 4개 해역으로 구분

된다; 드레이크해협, 브랜스필드해협 (Bransfield Strait), 혼합 해역(Mixed zone), 웨델해(Weddell Sea) 해역. 이들 4개 해역들은 각각 특징적인 물리, 화학, 생물학적 특성을 보였다. 식물플랑크톤 생물량은 드레이크해협과 웨델해 해역에서 상대적으로 낮았고 브랜스필드해협과 혼합 해역에서 높았다. 웨델해 해역에서 식물플랑크톤 생물량이 낮은 것은 낮은 수온과 수심 200 m 이상의 깊은 표층혼합 때문이라고 생각되고 드레이크해협 해역에서는 높은 동물플랑크톤 포식압과 낮은 철농도 때문인 것으로 생각된다.

사사

본 연구에 많은 도움을 주신 은누리호 선장님과 승무원 여러분께 감사드립니다. 또한 시료 채집에 많은 도움을 주신 심정희 박사, 신형철 박사, 함석현, 강돈혁, 송환석씨께도 심심한 감사를 드립니다. 본 논문이 많이 개선할 수 있도록 면밀한 심사와 적절한 조언을 해주신 인하대 최중기 교수님과 한국해양연구원 한정호 박사님께도 사의를 표합니다.

참고 문헌

- Arrigo, K.R., D. Worthen, A. Schnell, and M.P. Lizotte. 1998. Primary production in southern ocean waters. *J. Geophys. Res.*, 103, 15587-15600.
- Banse, K. 1991. Rates of phytoplankton cell division in the field and in iron enrichment experiments. *Limnol. Oceanogr.*, 36, 1886-1898.
- Bidigare, R.R., T.J. Frank, C. Zastrow, and J.M. Brooks. 1986. The distribution of algal chlorophylls and their degradation products in the southern ocean. *Deep-Sea Res.*, 33, 923-937.
- Boyd P.W., C. Robinson, G. Savidge, and P.J. leB. Williams. 1995. Water column and sea-ice primary production during Austral spring in the Bellingshausen Sea. *Deep-Sea Res. II*, 42, 1177-1200.
- Brandini, F.P. 1993. Phytoplankton biomass in an Antarctic coastal environment during stable water conditions - Implications for the iron limitation theory. *Mar. Ecol. Prog. Ser.*, 93, 267-275.
- Capella, J.E., R.M. Ross, L.B. Quetin, and E.E. Hofmann. 1992. A note on the thermal structure of the upper ocean in the Bransfield Strait - South Shetland Islands region. *Deep-Sea Res.*, 39, 1221-1229.
- de Baar, H.J.W., A.G.J. Buma, R.F. Nolting, B.C. Cadec, G. Jacques, and P.J. Treguer. 1990. On iron limitation of the southern ocean: Experimental observations in the Weddell and Scotia Seas. *Mar. Ecol. Prog. Ser.*, 65, 105-122.
- de Baar, H.J.W., de Jong, J.T.M., R.F. Nolting, K.R. Timmermans, M.A. van Leeuwe, U. Bathmann, M.R. van der Loeff, and J. Sildam. 1999. Low dissolved Fe and the absence of diatom blooms in remote Pacific waters of the Southern Ocean. *Mar. Chem.*, 66, 1-34.
- de Jong, J.T.M., J. den Das, U. Bathmann, M.H.C. Stoll, G. Kattner, R.F. Nolting, and H.J.W. de Baar. 1998. Dissolved iron at sub-nanomolar levels in the Southern Ocean as determined by ship-board analysis. *Anal. Chim. Acta.*, 377, 113-124.
- El-Sayed, S.Z. 1988. Productivity of the Southern Ocean: A closer look. *Comparative Biochem. Physiol.*, 90, 489-498.
- Garcia, M.A., O. Lopez, J. Sospedra, M. Espino, V. Gracia, G. Morrison, P. Rojas, J. Figa, J. Puigdefabregas, and A.S. Arcilla. 1994. Mesoscale variability in the Bransfield Strait region (Antarctica) during Austral summer. *Annual Geophysicae.*, 12, 856-867.
- Holm-Hansen, O., S.Z. El-Sayed, G.A. Franceschini, and R.L. Cuhel. 1977. Primary production and factors controlling phytoplankton growth in the Southern Ocean. p. 11-50. In: *Adaptations within Antarctic Ecosystem*, ed. by G.A. Land. Gulf Publishing Co., Houston.
- Holm-Hansen, O., A.F. Amos, N.S. Silva, V. Villafane, and E.W. Helbling. 1994. In situ evidence for a nutrient limitation of phytoplankton growth in pelagic Antarctic waters. *Antarctic Sci.*, 6, 315-324.
- Holm-Hansen, O., C.D. Hewes, V.E. Villafane, E.W. Helbling, N. Silva, and T. Amos. 1997. Distribution of phytoplankton and nutrients in relation to different water masses in the area around Elephant Island, Antarctica. *Polar Biol.*, 18, 145-153.
- Huntley, M., D.M. Karl, P. Niler, and O. Holm-Hansen. 1991. Research on Antarctic Coastal Ecosystem Rates(RACER): An interdisciplinary field experiment. *Deep-Sea Res.*, 38, 911-941.
- Jacques, G. 1989. Primary production in the open Antarctic ocean during the austral summer: A review. *Vie Milieu.*, 39, 1-17.
- Jacques, G. and M. Panouse. 1991. Biomass and composition of size fractionated phytoplankton in the Weddell-Scotia confluence area. *Polar Biol.*, 11, 315-328.
- Laubscher, R.K., R. Perrissinotto, and C.D. McQuaid. 1993. Phytoplankton production and biomass frontal zones in the Atlantic sector of the Southern Ocean. *Polar Biol.*, 13, 471-481.
- Lopez, O., M.A. Gracia, D. Gomis, P. Rojas, J. Sospedra, and A. Sanchez-Arcilla. 1999. Hydrographic and hydrodynamic characteristics of the eastern basin of the Bransfield Strait (Antarctica). *Deep-Sea Res. I*, 46, 1755-1778.

- Loscher, B.M., J.T.M. de Jong, H.J.W. de Baar, C. Veth, and F. Dehairs. 1997. The distribution of iron in the Antarctic Circumpolar Current. *Deep-Sea Res. II*, 44, 143-188.
- Martin, J.H., R.M. Gordon, and S.E. Fitzwater. 1990. Iron in Antarctic waters. *Nature*, 345, 156-158.
- Mitchell, B.G. and O. Holm-Hansen. 1991. Observation and modeling of the Antarctic phytoplankton crop in relation to mixing depth. *Deep-Sea Res.*, 38, 981-1007.
- Nicol, S. and W. de la Mare. 1993. Ecosystem management and the Antarctic Krill. *Am. Sci.*, 81, 36-47.
- Niiler, P.P., A. Amos, and J.H. Hu. 1991. Water masses and 200 m relative geostrophic circulation in the western Bransfield Strait region. *Deep-Sea Res.*, 38, 943-959.
- Parsons, T.R., Y. Maita, and C.M. Lalli. eds. 1984. A Manual of Chemical and Biological Methods for Seawater Analysis. Pergamon Press, Oxford, UK.
- Priddle, J., F. Brandini, M. Lipski, and M.R. Thorley. 1994. Pattern and variability of phytoplankton biomass in the Antarctic Peninsula region: An Assessment of the BIOMASS cruises. p. 49-126. In: *Southern Ocean Ecology: The BIOMASS perspective*, ed. by S.Z. El-Sayed. Cambridge Univ. Press, Cambridge, UK.
- Robertson, J.E. and A.J. Watson. 1995. A summer-time sink for atmospheric carbon dioxide in the Southern Ocean between 88°W and 80°E. *Deep-Sea Res. II*, 42, 1081-1091.
- Robin, D.B., R.P. Harris, A.W. Bedo, E. Fernandez, T.W. Fileman, D.S. Harbour, and R.N. Head. 1995. The relationship between suspended particulate material, phytoplankton and zooplankton during the retreat of the marginal ice zone in the Bellingshausen Sea. *Deep-Sea Res. II*, 42, 1137-1158.
- Sakshaug, E., D. Slagstad, and O. Holm-Hansen. 1991. Factors controlling the development of phytoplankton blooms in the Antarctic Ocean - A mathematical model. *Mar. Chem.*, 35, 259-271.
- Smetacek, V., H.J.W. de Baar, U.V. Bathmann, K. Lochte, and M.M. Rutgers van der Loeff. 1997. Ecology and biogeochemistry of the Antarctic Circumpolar Current during austral spring: A summary of Southern Ocean JGOFS cruise ANT X/6 of R.V. Polarstern. *Deep-Sea Res. II*, 44, 1-21.
- Smith, W.O. ed. 1990. Polar Oceanography Part B: Chemistry, Biology and Geology. Academic Press, San Diego.
- Smith, W.O. and D.M. Nelson. 1986. Importance of ice edge phytoplankton production in the southern ocean. *BioScience*, 36, 251-257.
- Smith, W.O., M.E.M. Baumann, D.L. Wilson, and L. Aletsee. 1987. Phytoplankton biomass and productivity in the marginal ice zone of the Fram Strait during summer 1984. *J. Geophys. Res.*, 92, 6777-6786.
- Smith, R.C., H.M. Dierssen, and M. Vernet. 1996. Phytoplankton biomass and productivity in the western Antarctic Peninsula region. p. 333-356. In: *Foundations for Ecological Research West of the Antarctic Peninsula*, eds. by R.M. Ross, E.H. Hofmann, and L.B. Quetin. Antarctic Research Series V. 70, The American Geophysical Union.
- Takahashi, T.J., J. Olafsson, J.G. Goddard, D.W. Chipman, and S.C. Sutherland. 1993. Seasonal variation of CO₂ and nutrients in the high-latitude surface oceans: A comparative study. *Global Biogeochem. Cycles*, 7, 843-878.
- Tans, P.P., I.Y. Fung, and T.J. Takahashi. 1990. Observational constraints on the global CO₂ budget. *Science*, 247, 1431-1438.
- Tilzer, M.M., M. Elbrachter, W.W. Gieskes, and B. Beese. 1986. Light-temperature interactions in the control of photosynthesis in Antarctic phytoplankton. *Polar Biol.*, 5, 105-111.
- Tokarczyk, R. 1987. Classification of water masses in the Bransfield Strait and southern part of the Drake Passage using a method of statistical multidimensional analysis. *Polish Polar Res.*, 8, 333-366.
- Turner, D.R. and N.J.P. Owens. 1995. A biogeochemical study in the Bellingshausen Sea: Overview of the STERNA 1992 expedition. *Deep-Sea Res. II*, 42, 907-932.
- Villafane, V.E., W. Helbling, and O. Holm-Hansen. 1993. Phytoplankton around Elephant Island, Antarctica - Distribution, biomass and composition. *Polar Biol.*, 13, 183-191.
- Weber, L.H. and S.Z. El-Sayed. 1987. Contributions of the net, nano and pico plankton to the phytoplankton standing crop and primary productivity in the Southern Ocean. *J. Plankton Res.*, 9, 973-994.

Received Mar. 4, 2001
Revised Apr. 2, 2001
Accepted Jun. 30, 2001