Korean Journal of Polar Research
Vol.3, Nos.1/2, p.59~70 December 1992

남극 킹죠지분지에서 함규조류층리의 퇴적작용 : 소규모 기후변화와 관련된 퇴적기록

이준재* · 오재경** · 한명우*** · 윤호일*

* 한국해양연구소 극지연구센터
** 인하대학교 해양학과, ***부산대학교 해양과학과

Depositional Processes of Diatomaceous Sediments in King George Basin, Bransfield Strait, Antarctica: Sedimentary Record of Small-Scale Climate Change

Joon-Jae Lee*, Jae-Kyung Oh**, Myung-Woo Han*** and Ho-il Yoon*

* Polar Research Center, Korea Ocean Research & Development Institute, Ansan, P.O.Box 29, Seoul 425-600, Korea
** Dept. of Oceanography, Inha University, Incheon 402-751, Korea
*** Dept. of Marine Science, Pusan National University, Pusan 609-735, Korea

요 약: 남극반도 북방 브랜스필드 해협의 북동단에 위치한 킹죠지 분지 해역에서 시추된 퇴적물의 지화학적 자료 및 퇴적상은 본 지역에서 발생했던 기후변화를 잘 반영하고 있다. 킹죠지 분지내에서 시추된 코아 KG-02의 하단부와 이 분지와 대륙사면 사이의 전이지역에서 시추된 코아 KG-04의 하단부에서 생물기원 규조류(Biogenic Silica, BSi)의 함량이 공히 높게 (최고 51%) 나타나며, 규조류와 쇄설성 퇴적물의 층리가 잘 발달한다. 이것은 다년생 海氷이 대륙사면까지 전진하였던 빙하기에 표층수의 일차생산력이 강화되면서 규조류의 퇴적작용이 가속화되었음을 시사한다.

한편 코아 KG-02 및 KG-04의 상부층은 일차생산력의 변화 및 층리가 발달되지 않으며 BSi 함량도 하부층보다 낮고 깊이에 따른 뚜렷한 변화양상을 보이지 않는다. 이것은 빙하기 이후 기온상승으로 대륙붕까지 진출했던 해빙이 남극반도 쪽으로 후퇴하면서 조사지역이 일년생 해빙이 발달하는 환경으로 전이되면서 표층수의 일차생산력이 낮아지고 빙성기원의 퇴적작용보다는 반원양성 퇴적작용이 우세하게 나타났음을 시사한다.

대륙사면과 대륙붕의 전이지역에서 시추된 코아 KG-05는 코아의 전 깊이 (270cm)를 통해 코아 KG-02와 KG-04의 하단부에서 처럼 높은 BSi 함량과 퇴적상의 변화를 보이지 않으며, 오히려 이들 두 코아의 상부층에 나타나는 특징과 유사하다. KG-05와 바로 인접한 곳에서 Singer(1987)에 의해 시추된 연장 400cm의 코아 DF 82-36은 300cm 이하에서 BSi 함량이 급격히 감소하고 육성기원의 조립질 퇴적물이 현저히 증가하는 양상을 보여준다. 따라서 코아 KG-05의 300cm 이하에서도 이와 유사한 퇴적상의 변화가 예상되며, 이것은 다년생 해빙이 대륙사면까지 진출하면서 영년해빙(永年海氷)의 영향으로 일차생산력은 급감되고 빙성기원 퇴적물의 퇴적작용이 우세하게 나타났음을 시사한다.

주요어: 기후변화, 퇴적상, 생물기원 규조류, 다년생 해빙, 일차생산력.

ABSTRACT : The geochemical data and sedimentary facies were analyzed from the core sediments, taken from the northeastern Bransfield Strait encompassing the King Gorge Basin off the Antarctic Peninsula, in order to elucidate climate change over the study area. The lower parts of the core KG−02 and KG−04, obtained within the basin and from the transition zone bewteen the basin and the continental slope off the peninsula, respectively, are characterized by high biogenic silica content (up to 51%) and the interlayering between mud and diatomaceous layers. These diatomaceous mud layers appear to be deposited during a small scale glacial period when multi-year sea ice would have advanced to the continental slope. The presence of multi-year sea ice over the slope could have enhanced the primary production of the surface water neighbouring the ice, as it promotes water column stability and supplies the nutrients to the surface water. The upper parts of KG−02 and KG−04, however, do not show any changes in the biogenic silica content and sedimentary facies, indicating that a warm climate condition similar to the present one has been recovered.

Meanwhile, the core KG−05 taken from the transition zone between the continental slope and the shelf off the Antarctic Peninsula lacks the characteristics of the lower parts of KG−02 and KG−04. The entire core KG−05 is rather similar to the upper parts of them. Taken adjacent to KG−05 by Singer (1987), the core DF 82−36 has, below the 300cm depth, markedly high content of coarse sediments of terrestrial origin with low biogenic silica; above this depth it has a similar feature to that of the entire core KG−05. Therefore, if KG−05 had been extended beyond the 300 cm subsurface, we could have observed the same characteristics as those of the Singer's. Potential enrichment of the terrigenous coarse sediments beyond the core limit of KG−05 directly relates to the advance of multi-year sea ice to the continental slope, because during this event KG−05 was very likely to be underlain by a perennial sea ice as the ice advances way off to the continental slope.

KEY WORD : climate change, sedimentary facies, biogenic silica, multi-year sea ice, primary production.

서 론

일반적으로 남극해와 같이 계절적인 해빙의 영향을 받는 지역에서 생물기원 퇴적물의 가장 중요한 공급원은 표층수에서의 왕성한 일차생산력에 의한 산물인 규조류(diatoms)와 같은 해양부유생물이다(Suess et al., 1985). 이들은 표층수로 부터 해저로 빠르게 이동하여 퇴적된다. 따라서 남극해역의 해저퇴적물내 규조류의 함량변화는 생물기원 규조류의 퇴적 당시 표층수의 일차생산력 및 기후변화 등에 대한 지질학 및 고해양학적인 정보를 제공한다(Stevenson and Cheng, 1972 ; Brewster, 1980 ; Hay and Sibret, 1982 ; Gorsline, 1984 ; Domack, 1988 ; Mix, 1989 ; Sheu and Huang, 1989 ; Berger et al., 1989 ; Barron and Baldauf, 1989). 특히 海氷(sea−ice)은 생물기원 퇴적물의 퇴적작용에 중요한 영향을 미친다(Sakshang and Holm−Hansen, 1984 ; Smith and Nelson, 1985 ; Bodungen et al., 1986). 남극해와 같이 영양염이 풍부한 지역에서의 일차생산력은 수괴의 안정성에 의해 결정적으로 영향을 받는데, 그 기작(mechanism)은 남극의 하계 동안 후퇴하는 海氷瑞(receding ice edge)으로부터 녹아 내리는 용융수에 의해 주변의 수괴가 안정되고 이러한 수괴의 안정성으로 인해 높은 일차생산력이 초래된다는 것이다(El−Sayed and Taguchi, 1981 ; Smith and Nelson, 1985 ; Hong et al., 1991). 또한 기후변화에 의한 해빙의 전진 및 후퇴는 그 해역의 생물기원 퇴적물의 공급량과 규질퇴적상 분포를 결정하는 중요한 요인으로 작용한다(Brewster, 1980 ; Domack, 1988).

본 연구는 남극반도와 남 쉐틀랜드 군도 사이에 위치한 킹죠지분지 해역에서 시추된 퇴적물의 퇴적상 변화와 규조류 함량의 변화 등을 조사하여 기후변화와 관련된 생물기원 퇴적물의 퇴적작용을 알고자 하는데 그 목적을 두었다.

지 역 개 관

브랜스필드 해협은 약 4백만년전 남쉐틀랜드 해구(trench)에서 섭입작용(subduction)이 서서히 멈추면서 생성되기 시작한 활발한 배호상 분지(actively back-arc basin)로써, 총 길이 460Km, 폭 112Km인 분지이다(Heywood, 1985 ; Arias, 1988). 브랜스필드 분지는 지형학적으로 세개의 소분지(동부, 서부 및 중앙 소분지)로 나뉘어 진다(Gordon and Nowlin, 1978). 이 중에서 본 연구지역인 킹죠지 분지는 폭 60Km, 최대 수심 2Km로서 약 500m 두께의 퇴적층이 분포하는데(Fig. 1), 이들은 주로

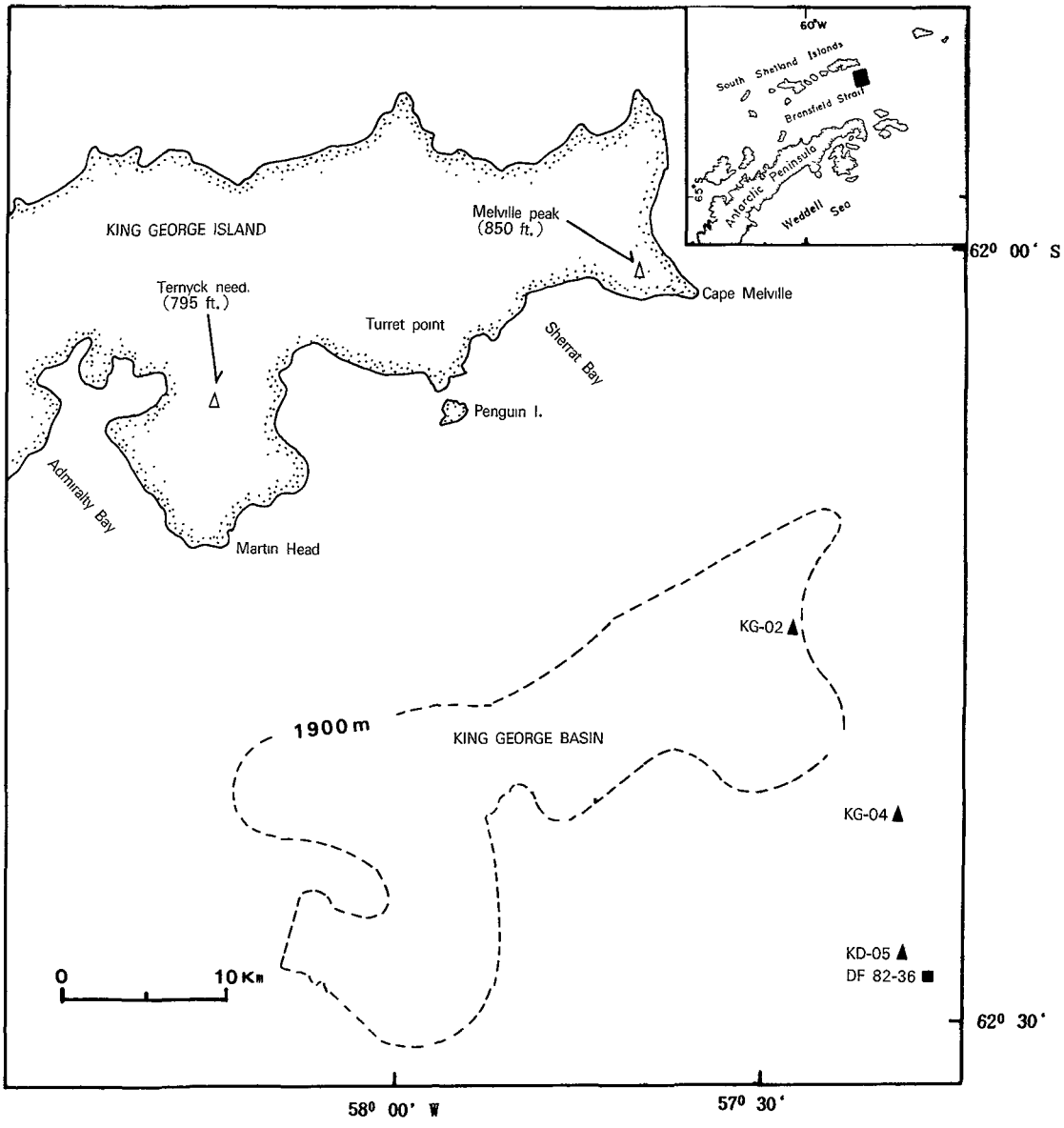


Fig. 1. Map showing study area and core locations. The ▲ mark denotes the location of the Singer's (1987) core DF 82-36.

육성기원, 화산기원 및 생물기원 퇴적물로 구성되어 있다(Jeffers and Anderson, 1986).

남극 대륙붕의 해류순환은 계절적인 結氷과 海氷으로 인해 생성되는 열염분 작용(thermohaline processes)에 의해 영향을 받으며, 표층류는 주로 이 지역에 부는 지역풍에 의해 발생된다. 브랜스필드 해협에서 표층수괴는 베링스하우젠해와 웨델해로부터 형성된 두개의 뚜렷한 수괴로 구분된다. 베링스하우젠해로부터 기원한 해수는 비교적 고온 저염의 특성을 지니고 브랜스필드 해협의 서쪽과 북쪽에서 볼 수 있다. 그리고 저온 고염의 웨델해 기원 해수는 그 일부가 남극반도 연안을 따라 남서쪽으로 흐른다(Clowes, 1934 ; Gordon and Nowlin, 1978). 킹죠지 분지의 저층수는 인근 다른 분지보다 저온, 고용존 산소함량(83% 이상 포화)을 보이고 있다(Gordon and Nowlin, 1978).

Reynolds(1981)에 의하면, 브랜스필드 해협은 온도와 강우량의 양 측면에서 볼 때 년간 뚜렷한 기후변화를 보이는 지역이다. -3℃의 연 평균 등온선을 경계로 북쪽의 남쉐틀랜드 군도는 온난·습윤한 반면 남쪽의 남극반도는 한냉·건조한 것으로 보고되고 있다(Reynolds, 1981). 미 해군 Fleet Weather Facility로부터 관측된 브랜스필드 해협의 해빙에 관한 자료(1973년에서 1978년 까지)를 근거로 할 때 브랜스필드 해협은 12월에서 4월까지 해협내의 해빙은 완전히 사라지고, 5월에서 6월사이 남극반도로부터 해빙이 얼기 시작하여 6월 중순에는 해협이 완전히 결빙된다. 그리고 10월 중순부터는 빠른 속도로 해빙이 녹기 시작한다(Singer, 1987).

재료 및 방법

본 연구는 제3차년도 남극과학기지 주변환경조사의 일환으로 1989년 12월 27일부터 1990년 1월 21일까지 행하여졌으며, 브랜스필드 해협 동북쪽에 위치한 킹죠지 분지 해역에서 길이 각각 약 3m인 시추퇴적물을 세개 획득하였다(Fig. 1). 킹죠지 분지 내에서 코아 KG-02를 (62° 14.25′S, 57° 29.2′W), 이 분지와 남극반도쪽 대륙사면 사이의 전이지역에서 코아 KG-04를 (62° 22.00′S, 57° 21.0′W), 그리고 이 대륙사면과 남극반도 대륙붕의 전이지역에서 코아 KG-05를 (62° 27.30′S, 57° 15.0′W) 각각 시추하였다.

시추퇴적물은 반으로 절개하여 약 10cm 간격으로 시료를 채취하였다. 입도분석 자료 및 퇴적구조 자료, 그리고 주사전자현미경 촬영사진은 윤 등(1991)에 의해 얻어진 자료를 기초로 하였으며, 그 분석방법은 다음과 같다. 첫째, 입도분석은 Folk(1968)의 방법을 이용하여 사질과 니질의 퇴적물을 분리한 후, 4ϕ 이상의 세립질 시료는 자동입도 분석기(auto size analyser: Sedigraph 5000D)로 분석하였다. 둘째, Softex M-1005형 X-선 촬영기를 이용하여 시추퇴적물의 퇴적구조를 분석하였다. 세째, Philips SEM 515 주사전자현미경을 이용하여 시료내의 규조류 및 구성광물을 분석하였으며 사진도 함께 촬영하였다. 생물기원 규조류(BSi) 함량은 DeMaster(1981)의 방법을 이용하였으며, 코아 KG-02와 KG-05에서 측정되었다.

결과 및 고찰

1. 시추퇴적물의 퇴적상 및 생물기원 규조류 (BSi) 함량 변화

킹죠지 분지내에서 얻어진 코아 KG-02의 경우 시추퇴적물의 퇴적구조는 크게 세 가지로 구분할 수 있는데, 이들은 상부의 괴상니질층(massive muds layer)과 하부의 laminated diatomaceous ooze(LDO), 그리고 최상부 및 중하부에 협재되어 있는 터어비다이트이다(Fig. 2). 윤 등(1991)에 의하면 시추퇴적물 하부의 LDO층(208~250cm)은 함규조류층리와 니질층리가 하나의 쌍을 이루어 반복적으로 교호한다. 이들 각 쌍의 두께는 약 0.5~1.0cm이며 평행층리가 우세하나 렌즈상 구조도 간혹 나타난다. 함규조류층리는 대부분 규조류(95% 이상)로 구성되어 있으며, 그 나머지는 주로 니질 크기의 석영입자로 구성되어 있다. 반면 니질층리는

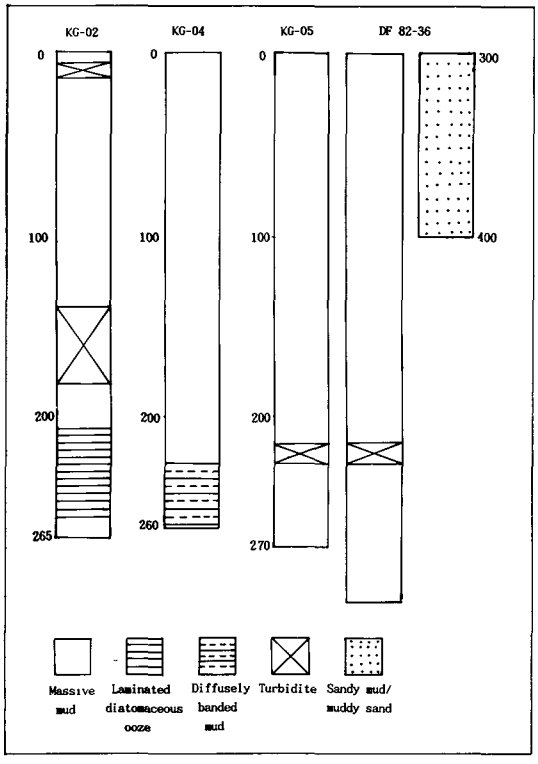


Fig. 2. Sedimentary structures as revealed by X-ray radiographs for core KG-02, KG-04, KG-05, and for core DF 82-36 taken from Singer (1987).

함규조류층리와 입자조성은 비슷하나 니질 크기의 석영입자가 훨씬 많다(윤 등, 1991). 함규조류층리와 니질층리의 경계면은 뚜렷하거나 점이적 변화를 보이면서 상향 세립화(upward fining) 현상을 보이기도 한다. 이것은 함규조류층리가 퇴적된 후 중력류의 영향을 받은 니질층리가 퇴적되었을 가능성을 시사한다(Domack, 1988).

KG-02의 BSi함량은 6.64~51.18 wt.%(평균 19.95 wt.%) 정도이다(Fig.3a). 이 값은 Dunbar et al.(1986)에 의해 조사된 브랜스필드 해협 표층 퇴적물의 BSi 함량(10~20 wt.%)과 잘 일치하고 있다. 시추퇴적물의 깊이에 따른 BSi 함량은 체계적인 변화를 보이지 않지만 각 퇴적상과 잘 일치하는 특징적인 변화 양상을 보인다. 하부에 나타나는 LDO층은 다른 퇴적상보다 높은 BSi 함량(최고51 wt.%)을 보이며(Figs.2 and 3a), 윤 등(1991)에 의해 보고된 것처럼 대부분 *Chaetocerous* sp., *Rhizosolenia* sp. 그리고 *Nitzchia* sp. 등의 규조류로 구성되어 있다(Fig.4). 특히 *Chaetocerous* sp.는 대부분 휴면포자(resting spore)(Fig.4a)로 나타나는 것으로 보아 겨울철에 해빙 밑에 부착하고 있던 종들이 여름철이 되면서 海氷의 용융으로 한꺼번에 해저로 공급된 것으로 생각된다(윤 등, 1991). 이것은 표층수의 일차생산력의 계절적인 변화가 퇴적물에 잘 보존되었음을 시사하는 것이다. 반면 상부의 괴상니질층에서 평균입도는 8~9Φ로 깊이에 따라 거의 일정하고, BSi 함량은 하부층에 비해 낮으며 깊이에 따른 특징적인 변화를 보이지 않는다(Figs.2 and 3a). 터어비다이트층(4~11cm와 145~183cm)에서 평균입도는 4~8Φ이며, BSi 함량은 다른 퇴적상과 비교해 볼 때 매우 낮게(최하 6.6 wt.%) 나타났다. 이것은 터어비다이트가 본 시추공의 다른 퇴적상과는 달리 BSi를 적게 함유한 화산기원 쇄설물로 주로 구성되어 있기 때문인 것으로 사료된다.

킹죠지 분지와 대륙사면 사이의 전이지역에서 시추된 코아 KG-04의 퇴적상은 상부의 괴상니질층리와 하부의 diffusely-banded mud (DBM)층으로 특징지워진다(윤 등, 1991)(Fig.2). 윤 등(1991)에 따르면, DBM층은 주로 코아 KG-04의 하부(233~258cm)에 나타나며, 코아 KG-02에서 나타나는 LDO층과 함규조류와 니질의 교호 층리의 경계가 뚜렷하지 않다는 점에서 서로 다르다. 또한 DBM층의 두께는 수 mm에서 5cm까지 다양하고 저서생물에 의한 교란작용을 받은 흔적도 나타나고 있다. 그리고 DBM층의 함규조류층리는 대부분 *Coscinodiscus* sp., *Nitzchia* sp. *Chaetocerous* sp. 및 *Rhizosolenia* sp.가 함께 나타나지만 간혹 KG-02에서와 같이 *Rhizosolenia* sp.나 *Chatocerous* sp.와 같은 단일종으로만 구성된 층리도 발견된다(윤 등, 1991). 니질층리는 대부분 균질(homogeneous)하게 나타나며, 화산쇄설물, 중광물과 석영과 같은 육성기원 쇄설물 그리고 상당량의 규조류도 포함하고 있다

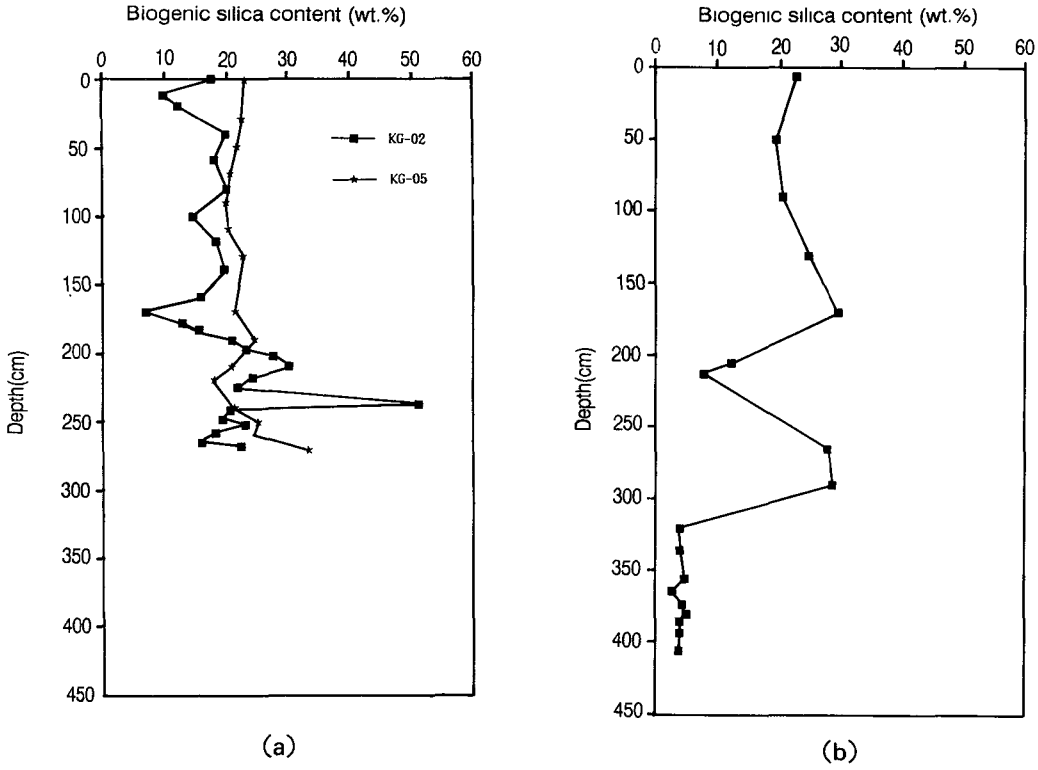
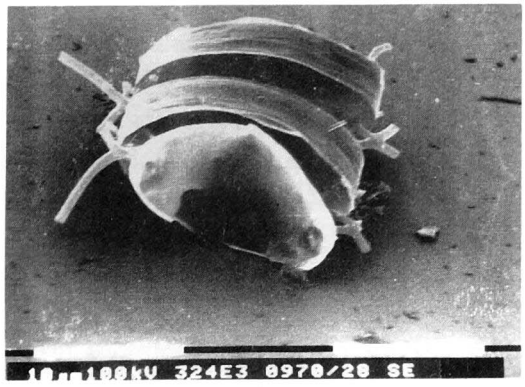


Fig. 3. Verical variations in Biogenic Silica (BSi) content in core sediments of (a) KG-02 and KG-05, and of (b) DF 82-36 taken from Singer (1987)

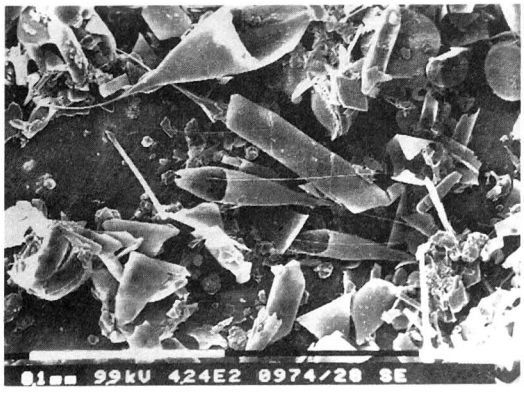
(윤 등, 1991). DBM층의 BSi 함량은 현미경 관찰결과로 미루어 볼 때 KG-02의 괴상니질층보다 높은 함량을 보일 것으로 생각된다.

남극반도의 대륙사면과 대륙붕의 전이지역에서 시추된 코아 KG-05에서는 하부에 터어비다이트층이(221~230cm) 발달할 뿐 전구간에 걸쳐 괴상의 니질이 우세하게 나타난다(윤 등, 1991). 코아 KG-05에서는 BSi의 함량이 18.08~33.19 wt.%(평균 22.76 wt.%)이며, 하부의 터어비다이트층에서 다소 감소하는 경향을 보이지만 전체적으로 깊이에 따른 특징적인 변화를 보이지 않는다.

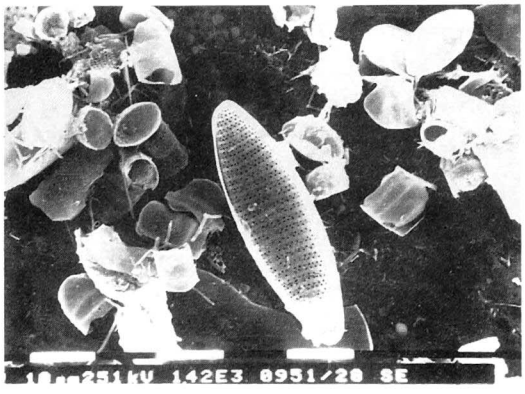
코아 KG-05의 하부층은 코아 KG-02 및 KG-04와 달리 퇴적상 및 BSi 함량의 뚜렷한 변화 양상을 보이지 않는다. 그러나 코아 KG-02와 KG-04에서의 퇴적상 및 BSi 함량변화는 분명한 퇴적환경의 변화가 있었음을 시사하고 있다. 그러므로 이들 두 코아의 하부구간이 퇴적될 당시 퇴적환경의 변화가 있었다면 이들 코아와 비교적 인접한 거리에 위치한 코아 KG-05에서도 이에 상응하는 퇴적환경 변화의 정보가 나타나야 할 것이다. 그럼에도 불구하고 코아 KG-05에서 이와 같은 변화가 나타나지 않는 것은 아마도 시추깊이의 한계(265cm) 때문으로 생각된다. 대륙사면과 대륙붕의 전이지역에서 시추된 코아 KG-05(62° 27.3′S, 57° 15.0′W)와 바로 인접한 지점에서 시추된 Singer(1987)의 코아 DF 82-36는 (62° 27.9′S, 57° 10.3′W)(Fig. 1) 시추연장이 400cm에 이른다. 따라서 Singer(1987)의 퇴적상 및 BSi 함량 분석결과를 인용하면, 코아 KG-05의 시추연장시 기대되는 퇴적상 및 BSi 함량의 변화를 유추해 볼 수 있다. Singer(1987)에



(a)



(b)



(c)

Fig. 4. SEM (Scanning Electron Microscope) micrographs: (a) *Chaetoceros* sp; (243.5 cm), (b) *Rhizosolenia* sp. (208.5 cm), and (c) *Nitzchia* sp. (222 cm) in laminated diatomaceous ooze of KG-02 (from Yoon et al., 1991).

의하면, 코아 DF 82-36은 터어비다이트층을 제외한 시추퇴적물의 상부(0~300cm)에서 니질 함량과 BSi 함량이 평균 94.63%와 20~29 wt.%(평균 23.45 wt.%)으로 각각 나타났다(Fig. 3b). 이 값은 역시 터어비다이트층을 제외한 KG-05의 니질 함량(평균 97.54 wt.%) 및 BSi 함량(평균 23.09 wt.%)과 잘 일치한다. 살펴본 바와 같이 서로 인접한 코아 KG-05의 전구간과 DF 82-36의 300cm 이상의 구간은 퇴적상 및 Bsi 함량 변화에 있어서 서로 매우 유사한 양상을 보인다. 그런데 코아 DF 82-36의 하부(300cm이하)에서는 니질 함량이 65.56%로써 조립질이 현저하게 증가하였으며, BSi 함량은 5 wt.% 이하로 극히 낮게 나타났다. 그러므로 코아 DF 82-36과 KG-05의 시추위치 그리고 상부(300cm이상)의 퇴적상 및 BSi 함량의 유사성으로 볼 때, KG-05를 400cm 이하까지 연장하여 시추한다면 DF 82-36의 하부(300cm이하)에서 나타난 것과 유사한 퇴적상 및 BSi 함량 변화를 기대할 수 있을 것이다.

상기에서 언급한 코아 KG-02, KG-04, KG-05, 그리고 DF 82-36의 퇴적상 및 BSi 함량의 변화를 토대로 본 연구 해역에서 일차생산력 및 퇴적환경의 변화를 기후변화의 측면에서 해석을 시도하였다.

2. 일차생산력 및 퇴적환경의 변화

일반적으로 시추퇴적물의 퇴적상 변화 및 각 퇴적상에 따른 BSi 함량의 변화는 서로 다른 퇴적환경에서 이들이 퇴적되었음을 시사한다(Schrader et al., 1980 ; Brewster, 1980 ; Singer, 1987 ; Sheu and Huang, 1989). 따라서 킹죠지 분지내에서 시추된 코아 KG-02, 분지와 대륙사면의 전이지역에서 시추된 코아 KG-04 및 대륙사면과 대륙붕의 전이지역에서 시추된 코아 KG-05 또는 DF 82-36의 퇴적상 및 BSi 함량의 변화는 본 연구지역에서의 뚜렷한 퇴적환경의 변화를 시사하고 있다.

코아 KG-02의 하부에 층리가 잘 발달되고 BSi 함량이 높은 LDO층이 보존되기 위해서는 저층수의 무산소환경, 생물교란작용을 능가하는 빠른 퇴적율(Arthur et al., 1984) 등이 요구된다. 그런데 일

반적으로 남극해에서는 겨울철에 해빙(海氷)이 형성되면서 밀도가 높은 해수가 심층으로 이동하는 지역적인 대류현상으로 인하여 저층수에는 용존산소의 농도가 높은 것으로 보고되고 있다(>7.0㎖/ℓ ; Gordon and Nowlin, 1978). 그러므로 LDO층에 함규조류층리가 보존된 것은 무산소환경에 의한 것이 아닌 것으로 사료된다. KG-02의 하부에 나타나는 LDO층은 상부의 괴상니질층에 비해 생물기원 퇴적물의 함량이 많고, 규조류로만 구성된 두께 약 0.5 cm의 층리가 보존되어 있다. 또한 주사전자현미경 관찰결과 용해작용에 약한 test로 구성되어 있는 *Rhizosolenia* sp.와 같은 규조류의 보존상태가 매우 양호한 것으로 보아(윤 등, 1991)(Fig.4b), 이들 규조류는 대륙붕에 퇴적된 생물기원퇴적물이 해류에 의한 재동작용(Dunbar et al., 1985 ; Anderson et al., 1984)을 받은 후 분지로 이동된 것이라기 보다는 표층수에서 강화된 일차생산이 해저로 매우 빠르게 이동 퇴적되었음을 시사하는 것이다. 그러므로 저층수에 용존산소가 풍부히 존재함에도 불구하고, BSi 함량이 높고 층리가 발달한 LDO층이 보존될 수 있었던 것은 바로 표층수에서 강화된 일차생산의 빠른 퇴적작용 때문인 것으로 생각된다.

Wefer et al.(1988)에 의하면, 브랜스필드 해협에서 연간 총 부유물질의 약 67% 이상이 생물기원 퇴적물로 구성되어 있으며, 이들은 남극의 여름에 해당하는 2개월(1월과 2월) 동안 표층수로부터 해저로 이동된다고 한다. 이같이 빠른 생물기원 퇴적물의 공급에도 불구하고 오늘날의 퇴적환경하에서 퇴적된 상부층에는 층리의 발달 및 규조류 함량의 뚜렷한 변화양상이 나타나지 않고 있다. 그러므로 시추퇴적물 하부의 함규조류층리는 오늘날 보다 훨씬 풍부한 일차생산이 생물교란작용을 능가할 정도로 빠르게 해저로 이동되었음을 시사하고 있다. 한편 코아 KG-05와 인접한 DF 82-36 시추퇴적물 하부에서는 BSi 함량이 5 wt.% 이하로 극히 낮게 나타나고 있는데(Singer, 1987), 이것은 DF 82-36의 하부가 퇴적될 당시에는 상부의 괴상니질층이 퇴적될 당시보다 일차생산력이 현저히 낮았음을 시사하고 있다.

결국 문제는 일차생산력의 강화 또는 약화가 어떻게 해서 일어났는가에 있다. 각 시추퇴적물에서 괴상니질로 구성되어 있는 층은 BSi 함량의 시·공간적 변화가 거의 비슷하다. 그러나 BSi 함량이 높게 나타나는 KG-02의 LDO층 및 KG-04의 DBM층, 그리고 이와 대조적으로 BSi 함량이 매우 낮은 DF 82-36 하부의 조립질 퇴적상은 시·공간적으로 일차생산력의 변화가 있었음을 시사한다. 일반적으로 표층수의 일차생산력 변화에 영향을 미치는 요인으로는 영양염의 농도, 광량, 수괴의 탁도, 수괴의 안정성 등을 들 수 있다(Boudungen et al., 1986). 그러나 남극해와 같이 영양염이 풍부한 지역에서의 일차생산력은 수괴의 안정성에 의해 결정적으로 영향을 받는다(El-Sayed and Taguchi, 1981 ; Smith and Nelson, 1985). 이러한 현상은 남극의 하계동안 후퇴하는 海氷瑞(receding ice edge)으로부터 녹아내리는 용융수에 의해 주변의 수괴가 안정되고 이러한 수괴의 안정성은 높은 일차생산력을 초래한다(Smith and Nelson, 1985 ; El-Sayed and Taguchi, 1981 ; Hong et al., 1991). 또한 기후변화에 의한 해빙의 전진 및 후퇴는 그 해역의 생물기원 퇴적물의 공급량과 규질퇴적상 분포를 결정하는 중요한 역할을 한다(Domack, 1988). Chapuis(1974)에 따르면 해빙이 전진함에 따라 생산력이 높은 해역은 외해쪽으로 이동하고 연안환경에는 육성기원 쇄설물이 우세하게 나타나며, 해빙이 후퇴하면 연안해역에서는 빙해양 환경(glacial-marine environment)이 약화되고 육성기원 쇄설물 대신 생물기원 퇴적물이 우세하게 나타난다.

Weaver(1973)에 의해 제시된 남대양(Southern Ocean) 해양 퇴적작용의 모델에 의하면, 기온이 하강하면 permanant pack-ice(PPI)가 전진하고 氷棚이 확장됨에 따라 남극 저층수의 생성과 수괴의 혼합이 활발해지고 영양염이 풍부한 심층수의 용승작용으로 표층수의 일차생산력이 증가된다고 한다. 즉, 활발한 용승작용으로 제한된 해역에 풍부한 영양염을 공급하는 기온하강 시기에 식물성플랑크톤의 총량이 현저하게 증가한다(Chapuis, 1974). 그래서 일차생산력이 높은 해역 아래의 해저 퇴적

물에는 BSi 함량이 높은 siliceous ooze가 분포하며, PPI 아래의 퇴적물에는 대륙붕으로부터 유래한 BSi 함량이 극히 낮은 육성기원 니질퇴적상이 나타난다. 그리고 대륙쪽의 육성기원 니질퇴적상과 siliceous ooze 중간에는 mottled siliceos mud가 나타난다 (Weaver, 1973). 본 연구에서 나타난 공간적인 퇴적상의 변화 양상은 이러한 Weaver(1973)의 모델과 유사하다.

전술한 Smith and Nelson (1985)의 일차생산모델과 Weaver(1973)의 기후변화에 따른 해빙과 퇴적상의 변화 모델을 본 연구지역에 적용시킬 경우 브랜스필드 해협에서 소규모의 기후변화와 관련된 생물기원 퇴적물의 퇴적작용을 다음과 같이 설명할 수 있을 것이다(Fig. 5). 코아 KG-05에 바로 인접한 지점에서 시추된 Singer(1987)의 코아 DF 82-36 하부의 급격한 BSi 함량의 감소와 조립질의 육성기원퇴적물(sandy mud/muddy sand)은 PPI 또는 氷棚의 아래에서 basal melting에 의해 퇴적되며 (Anderson and Molina, 1989), 다년생 해빙이 대륙사면과 대륙붕의 전이지역인 본 시추지점 부근까지 확장했음을 시사하고 있다. 그러므로 오늘날보다 기온이 하강했던 조건하에서 海氷은 남극반도에서 남쉐틀랜드군도쪽으로 더 전진하였을 것이며, 그 당시에 남극반도쪽에 발달했던 해빙은 오늘날의 기후조건에서 형성되는 일년생 해빙(annual sea ice)이 아닌 보다 두꺼운 다년생 해빙(multi-year sea ice)이 발달하였을 것으로 사료된다. 그리고 다년생 해빙의 말단부에 일년생 해빙이 발달하였을 것이다. 기온이 하강함에 따라 남극의 하계 동안 일년생 해빙의 전진 및 후퇴 이동폭은 오늘날보다 크지 않았을 것으로 생각된다. 그러므로 남극의 하계동안 KG-02 및 KG-04 근해역에 머물렀던 일년생 해빙단으로부터 유출되는 용융수는 수괴를 안정시키고 풍부한 영양염을 공급하였을 것이며, 이것은 결국 높은 일차생산력을 가져오고 이들 일차생산의 산물이 해저로 빠르게 공급되었을 것이다. 그러므로 코아 KG-02와 KG-04의 하부에서는 BSi 함량이 절대적으로 우세한 함규조류층리가 발달할 수 있었던

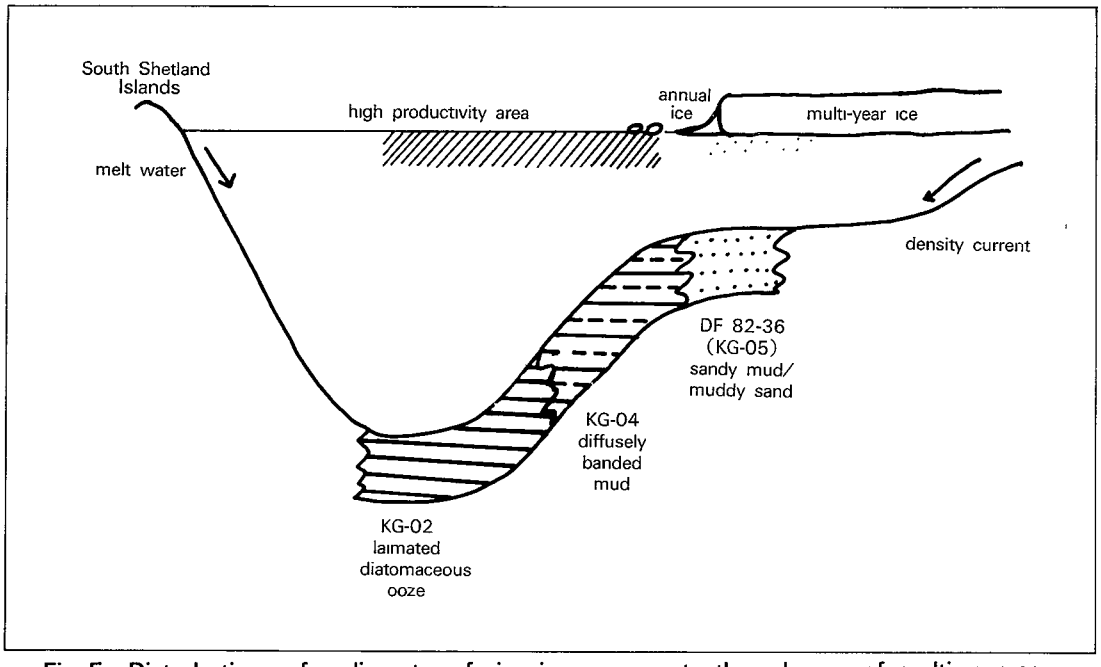


Fig. 5. Distrubutions of sedimentary facies in response to the advance of multi-year sea ices that are developed during a colder climate period than the present in and around King George Basin of Bransfield Strait, Antarctica.

것으로 사료된다.

코아 DF 82-36의 시추퇴적물 상부의 괴상니질층과 하부의 BSi 함량이 극히 낮은 육성기원 퇴적층과의 경계는 다년생 해빙 또는 빙붕 조건하의 퇴적환경에서부터 외해환경으로의 전이를 나타낸다(Singer, 1987). 그러므로 코아 KG-02와 KG-04의 상부 및 KG-05 전구간의 퇴적상은 하부의 LDO층과 DBM층이 퇴적될 당시보다 기온이 높고 브랜스필드해협의 전역에 걸쳐 일년생 해빙이 발달하는 오늘날의 기후조건(Singer, 1987)과 유사한 환경에서 형성된 것으로 사료된다. 이러한 환경에서는 계절적인 일차생산력의 차이가 퇴적물에 반영되지 않을 정도로 해빙이 빠르게 후퇴하고 따라서 생물교란작용과 남쉐틀랜드군도의 육상 빙하 용융수에 의해 브랜스필드해협으로 유입되는 육성기원 퇴적물의 증가(Anderson and Molina, 1989) 현상이 퇴적상에 반영된다. 결국 시추퇴적물의 상부 괴상니질층은 海氷瑞의 영향을 적게 받는 외해에서 빙성기원 퇴적작용 보다는 반원양성 퇴적작용(Domack, 1988)에 의해 퇴적된 것으로 사료된다.

코아의 하부층이 퇴적될 당시 기온이 오늘날보다 낮았다는 증거는 남극 주변지역과 브랜스필드해협 인접지역의 기후변화 연구에서 살펴볼 수 있다. South Georgia에서 빙하변동 및 환경변화의 연구(Clapperton et al., 1989) 및 소련의 남극연구 과학기지인 Vostok에서의 빙하시추물의 연구결과에 의하면, 홀로세 후기의 기온이 현재보다 연평균 0.5~1.0℃ 가량 낮았다. 또한 리빙스톤 섬의 Midge 호수 퇴적층에 대한 고생태학적 연구결과(Björck et al., 1991)에 의하면, 지금으로부터 약 1,500~500년전의 기후가 오늘날보다 춥고 건조했다. 이것은 홀로세 이후에도 빙하체적의 변화가 있었음을 시사하고 있다. 본 연구지역의 퇴적율(260~270cm/1000yr, Suess et al., 1985; Venkatesan and Kaplan, 1987)을 고려할 때 각 시추퇴적물의 하부에 BSi 함량이 높은 LDO층과 DBM층 그리고 BSi 함량이 극히 적은 코아 DF 82-36 하부의 육성기원 퇴적상은 Clapperton et al., (1989)와 Björck et al. (1991)에 의해 제시된 기후하강의 시기에 퇴적된 것으로 사료된다.

결 론

본 조사지역 시추퇴적물의 BSi 함량 및 퇴적상의 변화는 본 지역에서 발생했던 기후변화를 잘 반영한다. 시추코아 KG-02, KG-04 및 DF 82-36의 하부에 나타난 BSi 함량 및 퇴적양상은 하부 퇴적물의 형성 당시 기온이 오늘날 보다 낮았음(최소한 0.5~1℃)을 시사한다. 동시기에 남극대륙 북방의 대륙붕과 대륙사면 사이의 전이지역까지 다년생 해빙(海氷)이 확장되어 분포하였을 것이며, 그 말단부에는 일년생 해빙이 발달하였던 것으로 사료된다. 동시기에 이와 같은 해빙의 분포특성으로 일년생 해빙이 분포했던 킹죠지분지 및 이 분지와 대륙사면 사이의 전이지역에서는 일차생산력이 증가하였고, 다년생 해빙이 분포하였던 대륙사면과 대륙붕의 전이지역에서는 일차생산력이 둔화되고 육성기원 쇄설물의 퇴적이 현저하게 증가되었다. 남극해의 풍부한 영양염과 일년생 해빙의 용융에 의한 수괴의 안정은 일차생산의 증가를 가져다 주는데 매우 유효하였을 것이다.

한편, 코아 KG-02와 KG-04의 상부 및 KG-05 전구간의 괴상니질층은 기온 하강시기 이후 기온의 상승으로 일년생 해빙이 발달하는 환경을 본 조사지역이 갖기 시작하면서 표층수의 일차생산력이 낮아지고 반원양성 퇴적작용이 우세하게 나타났기 때문인 것으로 사료된다.

참 고 문 헌

윤호일, 장순근, 박병권, 1991, 킹죠지분지 코어 퇴적물에 나타난 퇴적상. BSPG00140-400-7, p. 331~383.

Anderson, J.B., C.F. Brake, and N.C. Myers, 1984, Sedimentation on the Ross Sea continental shelf, Antarctica. Mar. Geol., 57:295-333.

Anderson, J. B., B.F. Molina, 1989. Glacial-

marine sedimentation. Short course in geology. 9:11-57.

Arias, L.E., 1988. Investigations on the Antarctic peninsula as a Microplate. In Huh, H.T. et al., eds. Antarctic Science: Geology and Biology. KORDI, p.73-84.

Arthur, M.A., W.E. Dean, D.A.V. Stow, 1984. Models for the deposition of Mesozoic-Cenozoic fine-grained organic carbon-rich sediment in the sea: p.527-560.

Barron, J.A. and J.G. Baldauf, 1989, Tertiary cooling steps and paleoproductivity as reflected by diatoms and biosiliceous sediments. in Berger, W.H., V.S. Smetacek, and G. Wefer, eds., Productivity of the ocean; Present and past. John Wiley and Sons, p.341-354.

Berger, W.H., V.S. Smetacek, and G. Wefer, 1989. Ocean productivity and paleoproductivity - an overview. in Berger, W.H., V.S. Smetacek, and G. Wefer, eds., Productivity of the ocean: Present and past. John Wiley and Sons, p.1-34.

Björck, S., H. Hakansson, R. Zale, W. Karlen, and B.L. Jonsson, 1991. A late Holocene lake sediment sequence from Livingston Island, South Shetland Island, with plaleoclimatic implications. Antarctic Science, 3:61-72.

Bodungen, B., V. Smetacek, M.M. Tilzer, and B. Zeitzschel, 1986. Primary production and sedimentation during spring in the Antarctic Peninsula region. Deep-Sea Res., 33:177-194.

Brewster, N.A., 1980. Cenozoic biogenic silica sedimentation in the antartic ocean. Geol. Soc. Amer. Bell., 91: 337-347.

Chapuis, R.A., 1974. sediment response to climatic change as recorded in deep sea piston cores from the Southern Ocean. Sedimentology Research Laboratory, Department of Contribution No. 38, p.108.

Clapperton, C.M., D.E. Sugden, J. Birnie, and M.J. Wilson, 1989. Late glacial and Holocene galacial fluctuations and environmental change on South Georgia, South Ocean. Quaternary Research, 31: 210-228.

Clowes, A.J., 1934. Hydrology of the Bransfield Strait. Discovery Rep., 9: 1-64.

DeMaster, D.T., 1981. The supply and accumulation of silica in the marine environment. Geochim. Cosmochim. Acta, 45: 1715-1732.

Domack, E.W., 1988. Biogenic facies in the antarctic glacimarine environment: Basis for a polar glacimarine - summary -. Paleography, Paleoclimatology, Paleoecology, 63: 357-372.

Dunbar, R. B., J.B. Anderson, and E.U. Domack, 1985. Oceanographic influences on sedimantation along the Antarctic continuntal shelf. In S.S. Jocobs(ed.), Oceanology of the Antarctic shelf (Antarctic Research Series), Vol. 43, Washington, D.C., American Geophysical Union, p.291-312.

Dunbar, R. B., A.R. Leventer, and R.C. Marty, 1986. Vertical sediment flux beneath annual sea ice, McMurdo Sound, Antarctica. Antarctic Journal of U.S., p.109-110.

El-Sayed, S.Z. and S. Taguchi, 1981. Primary production and standing crop of phytoplankton along the ice-edge in the Weddell Sea. Deep-Sea Res., 28A: 1017-1032.

Folk, K.R., 1968. Petrology of sedimentary rocks Hamphill's. P.170. Gordon, A.L. and W.D. Nowlin, 1978. The Basin water of the Bransfield strait. J. Phys. Oceanogr., 8: 258-264.

Gordon, A.L. and W.D. Nowlin, 1978. The Basin water of the Bransfield strait. J. Phys. Oceanogr., 8: 258-264.

Gorsline, D.S., 1984. A review of fine-grained sediment origins, characteristics, transport and deposition. In Stow, D.A.V. and D.J.W. Piper, eds., Fine-grained sediments: Deep-water processes and facies. Geological society special

publication No. 15, p.17-34.

Hay, W.W. and J.C. Sibret, 1982. Sedimentation and accumulation of organic carbon in the Angola Basin and on Walvis ridge: Priliminary results of Deep Sea Drilling Project Log 75. Bull. Geol. Soc. Am., 93: 1983.

Heywood, R.B., 1985. Environmental conditions in the Antarctic peninsula area of the Southern Ocean during the Anglo-German Joint Biological Expedition, February, 1982. Meeresforschung, 30(4): 220-239.

Hong, G.H., D.Y. Kim, H. Chung, and S. Pae, 1991. Coastal and Inshore Water Interaction, Mixing and Primary Productivity in the Bransfield Strait, Antarctica During Austral Summer 1989/90. Korean Jour. Polar Research, 2: 43-59.

Jeffers, J.J. and J.B. Anderson, 1986. Sedimentation and tecotonics in the Bransfield Strait - a preliminary report: Submitted to Ant. Jour. of U.S. Mix, A.C., 1989.

Mix, A.C., 1989. Pleistocene Paleoproductivity: Evidence from organic carbon and foraminiferal species, in Berger, W.H., V.S. Smetacek, and G. Wefer, eds.,: Productivity of the ocean:present and past. John Wiley and Sons. p.313-340.

Pederson, T.F., 1983. Increased productivity in the estern eqatorial Pacific during the last glacial maximum(19,000 to 14,000 yr. BP) Geology, 11: 16-19.

Reynolds, J.M., 1981. Distribution of mean annual air temperatures in the Antarctic peninsula. Br. Antarct. Surv. Bull., 54: 123-133.

Sakshang, E. and O. Holm-Hansen, 1984. Factors governing pelagic production in polar oceans. In Holm-Hansen, O., L. Bolis, and R. Gilles, eds., Marine phytoplankton and productivity. Springer-Verlag, New York, p. 1-18.

Schrader, H. et al., 1980. Laminated diatomaceous sediments from the Guaymas Basin Slope (central Gulf of California): 250,000-year climate record. Science, 207: 1207-1209.

Sheu, D.D. and C.Y. Huang, 1989. Carbonate and organic carbon sedimentation of the continental margin off Southern Taiwan. Geo-Marine Letters, p.45-51.

Singer, J.K., 1987. Terrigenous, biogenic and volcaniclastic sedimentation patterns of the Bransfield Strait and bays of the northern Antarctic peninsula: Implications for Quaternary glacial history. Unpublished Ph.D. dissentation, Rice Univ., Houston, Texas.

Smith, W.O. and D.M. Nelson, 1985. Phytoplankton bloom produced receding ice-edge in the Ross Sea: Spatial coherence with the density field. Science, 227: 163-166.

Stevenson, E.T. and C.N. Cheng, 1972. Organic geochemistry of the Argentine Basin sediments: Carbon-nitrogen relationships and Quaternary correlations. Geochim. Cosmochim. Acta. 36: 653-671.

Suess, E., P.J. Muller, G. Wefer, and W. Balzer, 1985. Quaternary Sedimentary in the Bransfield Strait and Northern Weddell Sea. First draft.

Venkatesan, M.I. and I.R. Kaplan, 1987. The lipid geochemistry of Antarctic marine sediments: Bransfield Strait. Mar. Chem., 21: 347-375.

Weaver, F.M., 1973. Pliocene paleoclimatic and paleoglacial history of east Antarctica recorded in deep sea piston cores, Sedimentology Research Laboratory, Department of Geology, Florida State University Contribution No. 36, p.142.

Wefer, G., G. Fischer, D. Fuetterer, and R. Gersonde, 1988. Seasonal particle flux in the Bransfield Strait, Antarctica. Deep Sea Res., 35: 891-898.