

[해설]

지구환경변화와 남극

장순근* · 이방용 · 정호성 · 강성호

한국해양연구원 극지연구소, 425-600, 경기도 안산시 우체국 사서함 29호

Global Environmental Changes and the Antarctic

Soon-Keun Chang* · Bang Yong Lee · Hosung Chung · Sung-Ho Kang

Polar Sciences Laboratory, Korea Ocean Research and Development Institute,
Ansan P. O. Box 29, Seoul 425-600, Korea

Abstract: This study delineates the phenomena related with global environmental changes such as global warming, ozone depletion, and El Niño/Southern Oscillation (ENSO) noted in the Antarctic. Retreat of ice cliffs, glaciers, and calving of ice shelves indicate the effects of recently aggravated global warming. The ice cliff located at Marian Cove, King George Island, South Shetland Islands off the Antarctic Peninsula has been observed to be retreating faster in the last 7 years than in the previous 38 years since 1956. There are some indications of temperature and precipitation changes associated with ENSO around King Sejong Station. The regression analyses indicate significant trends such as a decrease in the total amount of ozone and an increase in ultraviolet radiation which was seen by a satellite (TOMS-EUV) in September and October which correspond to ozone-hole season over King Sejong Station. Increase of UV radiation due to the ozone depletion in the Antarctic has changed the growth rate of marine organisms. It may also result in changes to the productivity, biomass, and species composition of marine organisms which can affect the whole marine ecosystem. The recent ice-core drilling over Lake Vostok has been reviewed with emphasis on the four cycles of glacial stages over the past 420,000 years. It is time to show more interest in mainland Antarctica through investigations of the coring and vast ice sheet, terrestrial geology, and upper atmospheric sciences in order to understand the past environmental changes and to predict possible changes to the environment in the future.

Keywords: global warming, ice cliff retreat, King Sejong Station, Lake Vostok, ozone depletion

요약: 이 연구는 남극에서 일어나는 지구온난현상, 오존층 파괴, 엘니뇨-남방진동 같은 지구의 환경변화와 관련이 있는 현상들을 정리한 것이다. 빙벽이 후퇴하고 빙붕이 갈라지는 현상은 지구환경변화, 그 가운데서도 최근 들어 심해진 지구온난현상을 반영한다. 또 서남극 남극반도에서 떨어진 남쉐틀랜드군도 킹조지 섬의 마리안 소만의 빙벽이 1956년부터 38년 동안에 후퇴한 것보다 최근 1994년부터 7년 동안에 더 많이 후퇴했다. 또한 세종기지에서 엘니뇨-남방진동과 관련된 기온과 강수량의 변화가 나타났다. 나아가 인공위성 자료 분석 결과, 세종기지가 있는 지역에서도 성층권의 오존층 파괴가 심한 남극 9월과 10월에 평균 오존전량이 감소하고 지상에 도달하는 자외선이 증가하였음을 확인하였다. 남극 오존층 파괴로 인한 자외선의 증가는 해양생물의 성장 환경을 변화시킨다. 또 남극생물의 생산력, 생물량, 종 조성의 변화를 일으키며, 자외선은 일차생산자인 식물플랑크톤 세포의 생리, 유전, 생태변화를 일으켜 남극 해양생태계 전체를 변화시킨다. 현재부터 42만 년 전까지 네 번의 빙하계(氷河階)를 밝힌 보스토크호수의 얼음연구 결과를 훑어보았다. 우리나라는 남극대륙을 덮는 빙원의 굴착과 해석, 빙원 아래에 있는 지역의 지질연구 같은 남극본연의 연구를 하기 위하여 남극대륙을 연구해야겠다. 고층대기과학을 포함한 대기과학도 당연히 연구해야 한다.

주요어: 보스토크호수, 빙벽후퇴, 세종기지, 오존층 파괴, 지구온난현상

*Corresponding author: skchang@kordi.re.kr

Tel: 82-31-400-6443

Fax: 82-31-408-5825

서론

이 연구의 목적은 남극대륙과 남극 세종기지 부근에서 관찰되고 발견되는 지구의 환경변화 현상들을 정리하는 데에 있다. 이 논문은 필자의 한 사람이 2002년 9월 6-7일 한국해양연구원에서 있었던 한국지구과학회 2002년도 정기총회와 추계학술발표회에서 강연했던 “지구 환경변화와 남극”에 관한 내용을 바탕으로 다른 필자들과 함께 보완해서 정리한 것이다.

지구의 환경은 지질시대에도 변했으며 지금도 변하고 있다. 우리는 지질학의 속성대로 아주 긴 시간에 걸쳐 일어난 지질시대에 걸쳐 일어난 지구환경의 변화를 지층에 보존된 화석과 지층의 변화에서 이해할 수 있다. 물론 현재에 가까워 지층의 절대연령이 짧아지면서 그 정밀도는 높아져 꽤 짧은 시기에 걸쳐 일어난 변화도 파악하는 것이 가능하다.

현재 지구의 환경이 변화하면서 나타나는 현상으로 지구온난현상, 오존층 파괴, 해양환경변화, 사막현상과 이들이 복합된 기후변화, 생태계변화, 산성비 현상들을 들 수 있다. 예를 들면, 20세기 들어 지구전체의 기온상승이 두드러지는데, 가장 많이 올라간 1925-1944년, 1978-97년 동안, 각각 0.37°C, 0.32°C가 올라갔으며, 주로 북극지방의 육지 온도가 많이 올라갔다(Jones *et al.*, 1999). 반면 남극대륙에는 기온관측자료가 거의 없거나(1925-1944년) 너무 멀리 흩어져 있다(1978-97년) (Jones *et al.*, 1999). 바닷물 수온도 올라가 1950년대부터 1990년대 동안에 수심 3,000m까지 0.06°C가 올라갔으며, 같은 기간 동안 수심 300m까지 온도는 0.31°C 높아졌다(Levitus *et al.*, 2000). 기온이 올라가면서 극지방의 얼음이 녹아 해수면이 높아져 최근 인도양 말디브(Maldives)군도와 적도 중부 태평양의 키리바티(Kiribati)공화국을 포함해서 남태평양에 있는 환초(環礁)의 일부가 물에 잠겼거나 잠길 정도가 되었다(Revkin, 1992).

이런 현상들은 태양-대양-대기-육지-인간의 활동이 서로 복합되어 진행된다. 어느 한 분야가 더 중요한 인자로 작용하는 수도 있겠으나, 기본원칙은 이들이 복합된 것이다. 대양과 대기와 육지의 물리상태가 서로 다르고 태양에너지에 대한 이들의 움직임과 반응이 다르며 인간의 활동이 이 세 물질의 상태와 조성 과 움직임에 영향을 미친다. 그 결과가 다시 새로운 원인이 되어 새로운 결과를 만드는 되먹임(feedback) 과정이 되풀이된다. 더구나 시간이 가면서 이런 현상

에 기인된 부정영향이 남극대륙을 포함해 지구전체로 나타나기 시작하였고 인류의 생활에 직접 영향을 미치게 되었다.

남극대륙은 대륙 가운데 가장 늦게 19세기 전반에 발견되었으며, 남빙양은 물개나 고래를 잡는 사람들의 터전이 되었다. 그러나 문명세계에서 너무 멀고 자연환경이 가혹해, 몇몇 탐험가들만이 찾아갈 정도였다. 마침내 1957/58년에 걸친 국제 지구물리 관측년(IGY)이 되어서야 남극의 자연환경이 제대로 알려지기 시작했다. 남극대륙은 대륙자체가 거의 알려지지 않았으며 지구환경변화에 관련된 변화들이 남극대륙에서도 나타나므로 자연과학의 면에서 중요하고 연구해야할 가치가 높다. 예를 들면, 최대 4,800m 정도의 두께를 가진 남극 빙상(氷床 ice sheet)의 기포에는 과거 지질시대의 지구의 대기환경을 설명할 수 있는 단서가 보존되어 있다. 또 우리는 20세기에 들어와 산업이 발달하면서 야기된 오존층 파괴 같은 현상을 더 세밀하게 설명할 수 있는 남극의 대기성분변화에서 찾아낼 수 있다. 그러므로 현재는 우리나라를 비롯해 18개국이 남위 60° 이남에 36개의 상주 기지를 운영하면서 남극대륙과 남빙양의 자연현상을 주로 연구한다(SCAR, 2002).

한편 20세기에 접어들어 문명세계에서 야기된 지구환경변화는 남극대륙과 남빙양에도 영향을 미친다. 남극수렴선(南極收斂線)의 남쪽 해역으로 경계가 지워진 남빙양(南氷洋)은 그 지역을 대표하는 동식물로 구성된 독특하고 유일한 해양생태계를 형성한다. 지구환경변화에 따라 기온이 올라가고 얼음이 녹으며 오존층이 파괴되면서 유해한 자외선이 남빙양을 강하게 비춘다. 따라서 그 곳을 중심으로 성장하는 식물들과 서식하는 동물들에게도 바람직하지 않은 영향을 미치게 되었다. 또 최근에는 과학의 발달로 남극대륙 안쪽의 두꺼운 빙원 아래에 호수가 있다는 것이 밝혀졌다. 또 얼음을 굴착해, 얼음을 만든 눈이 쌓였던 시기, 곧 수십만 년 전의 기후변화를 유추하게 되었다. 한편 남극반도에서 떨어진 섬에 있는 우리나라의 남극 연구기지인 세종기지에서 지구환경변화의 일면이 확인되고 있다.

남극의 자연환경

남극대륙은 남극점(남위 90°)을 중심으로 한 지구 육지면적의 9.2%를 점유하는 거대한 대륙을 형성한

다. 먼저 남극대륙의 98%가 평균두께 2,160m의 얼음으로 덮여있고, 연중평균온도가 -23°C 로 저온이고 평균고도가 2,300m로 아주 높으며, 남빙양에 둘러싸여 있다. 또 주로 벨링스하우젠 해(Bellingshausen Sea), 웨델 해(Weddell Sea), 로스 해(Ross Sea)와 프리즈 만(Prydz Bay)을 발생지로 하는 4~5개의 저기압이 항상 남극대륙 주변을 시계방향으로 회전하며, 극 소용돌이(polar vortex)의 강약에 따라 남극대륙의 대기권이 중위도의 공기와 고립된 독특한 극한환경을 갖고 있다. 해안지방은 바람이 아주 강하며 때에 따라 앞을 구분하기가 곤란할 정도의 눈보라가 몰아친다. 해안의 강수량은 연 500mm 정도가 되나 내륙고원지대의 강수량은 50mm도 되지 않아 사하라사막보다 더 건조하다. 얼음은 낮은 곳으로 천천히 흘러내려 오며, 이때 얼음의 밀도, 흐르는 속도, 얼음 아래 지형의 복합영향으로 크레바스가 생겨 험한 장애물이 형성된다. 남극대륙의 둘레를 따라 얇은 바다는 연중 300에서 900m 두께의 얼음층을 형성하므로, 얼음대륙붕, 곧 빙붕(氷棚 ice shelf)이 된다. 위가 평탄한 빙붕은 갈라져 탁상형 빙산이 되어 북쪽으로 떠다니게 된다.

남극의 육지에는 나무가 없으며 두 종류의 유관속(維管束) 식물이 알려졌다(Greene, 1964, 1970). 식물의 대부분은 바위표면이나 펭귄 군서지(群棲地)에서 성장하는 지의류와 선태식물과 조류(藻類)이다. 또 여름에는 눈조류(雪藻類)가 눈에서 성장하며 겨울에 바다가 얼면 해빙(海水) 아래에서 얼음조류(氷藻類)가 성장한다.

남극대륙의 육상에는 어떤 종류의 포유류도 없으며 흙 속이나 고래뼈에는 아주 작은 벌레들이 살고있다. 해안에는 기각류(鰓脚類 Pinnipedia)에 속하는 물개류(Otariidae)와 해표류(Phocidae)가 있으며 바다에는 고래류(Cetacea)가 있다. 남극수렵선 남쪽에는 임금펭귄(*Aptenodytes patagonicus*)을 포함한 일곱 종류의 펭귄을 포함해 50종류가 넘는 새가 있다(Watson, 1975; Siegfried, 1985). 남극대륙의 해안에서는 임금펭귄과 다른 펭귄 한 종류를 제외한 다섯 종류의 펭귄이 산란하고 부화하는데, 이에는 황제펭귄(*Aptenodytes forsteri*)과 아델리 펭귄(*Pygoscelis adeliae*)이 포함된다(Watson, 1975; Siegfried, 1985). 남극대륙은 얼음으로 덮여있으며 밤과 낮이 오래 계속되며 저위도지방과는 격리되어 특이한 자연환경을 이룬다. 또 남극은 온도가 낮고 건조해 물질의 순환

이 아주 느리게 이루어진다.

남빙양에는 엄청난 양의 구조가 성장하며 동물플랑크톤인 난바다곤쟁이 계통인 크릴(*Euphausia superba*)을 비롯해 남극대구, 빙어, 극피동물, 절지동물, 연체동물들이 서식한다. 단세포식물인 구조는 크릴의 먹이가 되고 크릴은 어류와 해표와 수염고래와 연체동물과 펭귄의 먹이가 된다는 점에서 구조와 크릴은 남극해양생태계의 기본이 된다고 할 수 있다.

남극에서 나타나는 지구환경변화 현상들

지구온난현상

인간이 사용하는 화석연료에서 배출된 이산화탄소 같은 온실가스의 배출이 증가돼 지구의 온도가 올라가리라는 것은 이미 19세기말에 예견되었다(Revkin, 1992). 실제 국제지구물리 관측년 동안에 하와이섬에서 관측된 대기중의 이산화탄소의 양은 해마다 증가하였다(Revkin, 1992). 대기중에 이산화탄소와 메탄가스와 염화불화탄소 같은 온실가스들이 증가하면서 서남극의 빙상이 녹으리라는 것은 1970년대 말에 예언되었다(Mercer, 1978). 이후 남극대륙둘레를 따라 여러 곳에서 빙붕이 작아지고 빙하가 후퇴하는 현상이 관찰되었다. 예를 들면, 서남극 워디(Wordie) 빙붕은 1970년대 중반에 2,000km²의 면적이 1980년대 말에는 1/3로 줄어 700km²만 남게 되었다(Doake and Vaughan, 1991; Vaughan and Doake, 1996). 또 다른 빙붕들의 북쪽 변두리가 갈라져 거대한 탁상형 빙산이 되어 북쪽으로 떠다니게 되었다.

남극으로서는 상당히 북쪽에 있는 세종기지($62^{\circ} 13' \text{ S}, 58^{\circ} 47' \text{ W}$) 부근에서도 지구온난 현상이 확인된다(Fig. 1). 예를 들면, 기지 앞 바다이자 피오르드인 마리안 소만(Marian 小灣)의 동쪽에 있는 빙벽도 항공사진과 측량과 인공위성사진으로 관찰한 결과를 따르면, 아주 추웠던 해를 제외하고는, 꾸준히 후퇴해 과거 44년 동안에 후퇴한 규모가 면적으로 1,125,000m², 거리로 640-1,350m, (평균 1,050m) 수준인 것으로 밝혀지고 있다(장순근 외, 1998; Park et al., 1998; 정호성 외, 2002). 그 결과 1956년에 길이 2.7km에 지나지 않았던 마리안소만은 2001년 4월 길이 4km, 폭 1.0-1.3km의 장방형의 만으로 확장되었다(Fig. 2). 더구나 그 후퇴하는 정도가 최근 들어 더욱 빨라져, 과거 38년(1956-1994) 동안 후퇴한 수준

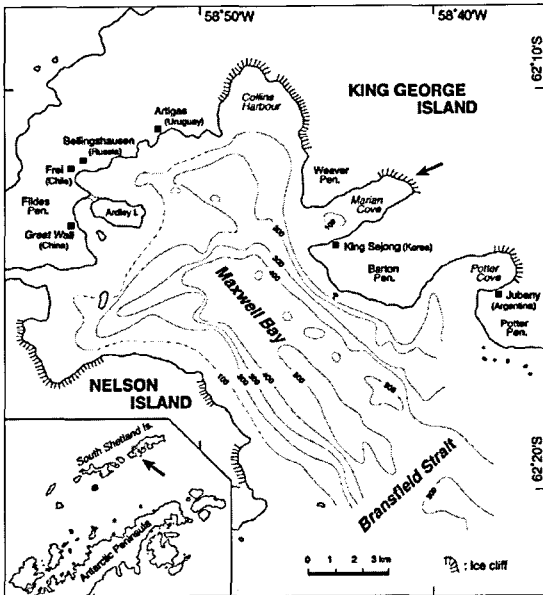


Fig. 1. King Sejong Station and its adjacent area. The arrow indicates the ice cliff of Marian Cove discussed in the text.

이 최근 7년(1994-2001) 동안의 후퇴한 수준보다 작다(Table 1). 그러나 1987-88년 아주 추웠던 두 해에는 빙벽이 전진하였다. 또 1984년 1월부터 1986년 12월까지도 빙벽의 일부분이 전진했다. 그런 것을 보면 빙벽의 후퇴/전진은 기온에 상당히 민감한 것으로 생각된다.

빙벽후퇴를 좀 더 상세하게 살펴보면, 관찰초기인 1956년 12월부터 1984년 1월까지 27년 동안 170m 가까이 후퇴하였다. 1984년 1월부터 1986년 12월까지 3년 동안에는 87m가 후퇴한 반면, 1986년 12월부터 1989년 1월까지 2년 동안 오히려 42m를 전진하였다(Table 1). 그러나 1989년 1월부터 1994년 1월

까지 5년 동안 270m가 후퇴하였고, 이후 1994년 1월부터 2001년 4월까지 최근 7년 여 동안에는 570m 가까이 후퇴하였다.

한 가지 특기할 만한 사실은 1980년대에 관찰된 빙벽의 전진 양상이다. 1984년 1월부터 1986년 12월까지 빙벽이 후퇴도 하였지만 만의 북쪽 해안 근처에서 부분이기는 하지만 1,170m² 정도의 면적이 늘어났다. 물론 전진한 면적이 후퇴한 면적 94,000m²에 견주면 아주 작다. 1986년 12월부터 1989년 1월 사이에는 전체 빙벽이 45,000m² 정도를 고르게 전진하였다. 이와 같은 관점에서, 조사기간 중 기온이 가장 낮았던 1980년대 초나 상당히 낮았던 1970년대 중반 같은 해에도 이와 비슷한 전진이 있었을 것으로 판단되나 구체자료가 없다.

기간별 연평균값을 비교해 보면, 1989년 이후 빙벽의 후퇴 속도가 급속히 증가하고 있음을 알 수 있다. 조사 초기 시점인 1956년 12월부터 1984년 1월까지 6m/년에 머물던 후퇴 속도가 최근에 이르러서는 1989년 1월부터 1994년 1월까지 54m/년, 1994년 1월부터 2001년 4월까지 81m/yr로 커졌다. 한편 세종기지둘레의 지면도 과거보다는 더 많이 노출되었으나 수치를 비교할 확실한 자료는 없다(Fig. 2의 점선부분). 기지 남쪽에 있는 다른 피오르드의 빙벽도 마찬가지로 후퇴한다는 사실이 확인된다(Park *et al.*, 1998).

한편, 바다와 맞닿아 있는 빙벽은 1993년까지는 만의 길이 방향에 거의 수직으로 발달해 있었으나, 최근에 이르러서는 만 중앙 남쪽면에서 눈에 띄게 많이 후퇴하였다(Fig. 2). 이는 마리아나소만으로 얼음을 공급하는 빙하의 흐름이 주로 북동쪽에 있는 높이 650m 이상의 아르토우스키 빙모(Arcowski 氷帽 ice cap)에서 기원하여 흘러드는 양이 많기 때문인 것

Table 1. Recent retreat of ice cliff observed in Marian Cove, King George Island, the South Shetland Islands off the Antarctic Peninsula, West Antarctica (after Chung *et al.*, 2002).

Period (yrs)	Area (m ²)			Length (m)			Annual Mean	
	Retreat	Advance	Total	Min.	Max.	Mean*	Area (m ²)	Length (m)
Dec. 1956-Jan. 1984 (27)	180,383	0	180,383	0	292	169	6,681	6.2
Jan. 1984-Dec. 1986 (3)	93,849	1,174	92,675	-22	171	87	30,892	28.9
Dec. 1986-Jan. 1989 (2)	0	45,166	-45,166	0	-101	-42	-22,583	-21.1
Jan. 1989-Jan. 1994 (5)	288,848	0	288,848	74	335	270	57,770	54.0
Jan. 1994-Apr. 2001 (7)	608,474	0	608,474	371	760	569	86,925	81.2
Total (44)	1,171,554	46,340	1,125,214	636	1,346	1,052	25,573	23.9

*Mean length calculated by dividing each area by an average width of 1,070m in the total retreat area.

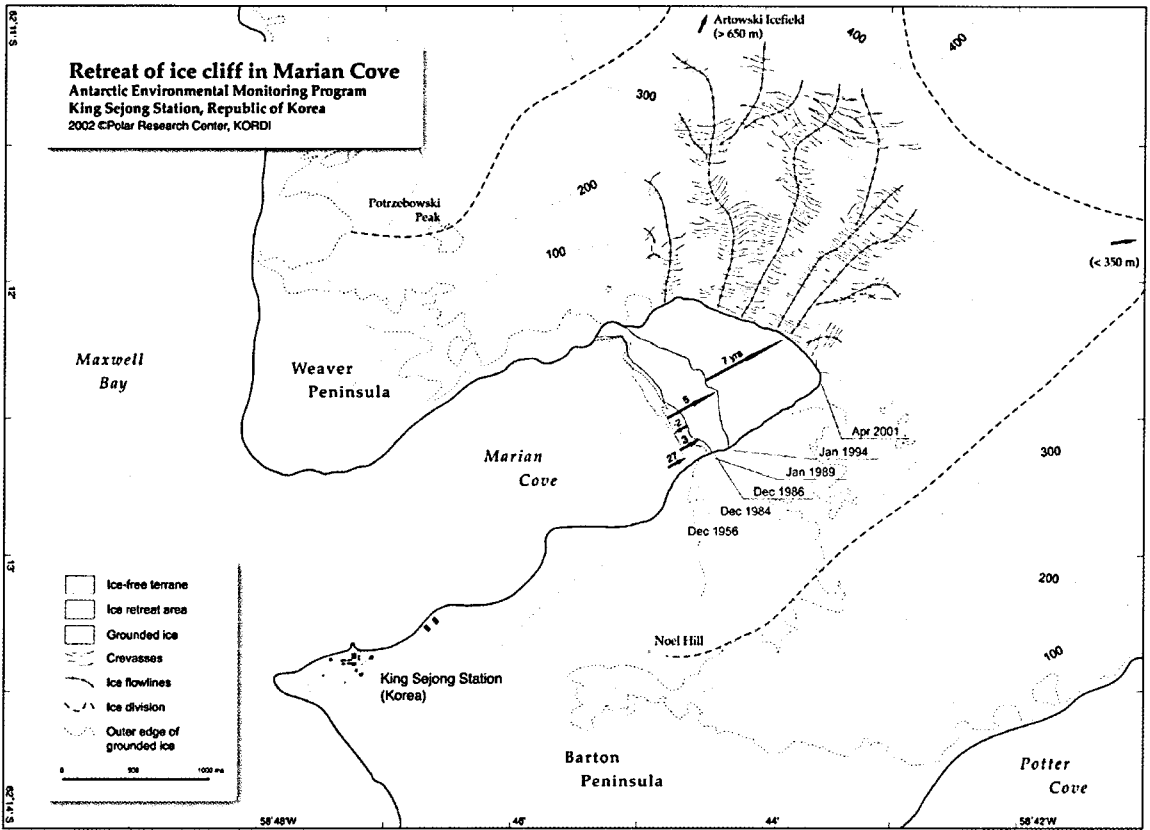


Fig 2. Change of the ice cliff of Marian Cove between December 1956 and April 2001(after Chung *et al.*, 2002). Note the big retreat in recent years since January 1994. The retreat in these years is bigger than that of the past between December 1956 and January 1994. The ice cliff advanced between December 1986 and January 1989. See the Table 1 for the quantitative retreat or advance.

로 생각한다. 이는 크레바스의 발달을 바탕으로 유추해 본 빙하의 흐름선을 보아도 잘 구분된다. 반면, 빙원의 최대높이가 350m가 되지 않는 만 남쪽면에서는 흘러드는 얼음이 많지 않아 많이 후퇴하였다(정호성 외, 2002). 이러한 후퇴 양상은 앞으로도 계속될 것으로 생각된다. 흘러드는 얼음의 양은 강수량보다는 지면의 넓이, 곧 집수역(集水域 watershed)과 바다지형, 곧 바다지면의 경사와 관계가 있다고 생각된다.

세종기지가 1988년 2월에 준공되었으므로 아직까지 자세한 기후변화를 분석할 만큼 실제기상자료가 많이 축적되지 않았다. 그렇지만 현재의 분석에 따르면 평균기온이 10년 동안에 0.6°C가 상승한 것으로 나타났으며, 1988년, 1991-92년, 1995년에 결빙되던 기지 주변의 바다도 이제는 거의 결빙되지 않는다(Table 2). 한편 세종기지의 북서쪽 10km 정도 떨어진 곳에 있는, 1968년에 준공된 러시아 벨링스하우

젠(Bellingshausen) 기지에서 33년 동안 측정된 기상 자료를 보면 기온은 27년 동안에 1°C 정도 상승했다(Fig. 3).

오존층 파괴

남극에서 관측되는 지구환경의 변화와 관련된 가장 민감한 현상으로 오존층의 파괴(Ozone depletion)를 들 수 있다. 오존층의 파괴는 인간의 지식과 관계가 있다고 말할 수 있다. 곧 미국 GM 자동차회사가 염화불화탄소(CFCs)를 개발한 1930년에는 염화불화탄소(CFCs)가, 100년이 지나야 오존층의 2% 정도를 파괴한다고 예측하였다(Revkin, 1992). 그러나 실제로는 남극의 봄에 해당하는 9-10월에 걸쳐 남극상공 오존층의 60% 정도가 파괴되어 그 면적이 남극대륙을 다 덮을 만큼 크게 나타난다(Fig. 4). 또 반드시 남극의 오존층만 파괴되는 것은 아니어서 북반구 고

Table 2. Monthly air temperature of King Sejong Station associated with the freezing of Marian Cove and Maxwell Bay since 1988 (after Chung *et al.*, 2002).

Year	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	Annual
1988	1.5	2.3	-0.1	-1.1	-1.9	-7.6	-1.8***	-8.4**	-3.2**	-2.6	-1.1	0.5	-2.2
1989	1.5	2.4	2.3	-4.8	-0.9	-2.0	-0.7	-2.1	-3.0	-0.6	0.2	1.4	-0.5
1990	2.3	2.7	1.2	-4.8	-4.9	-4.2	-5.3	-5.3*	-2.7**	-1.9	-0.8	0.7	-1.9
1991	2.2	0.8	-0.2	-2.3	-7.2	-8.8*	-6.5**	-6.6***	-2.9*	-3.5	-0.8	-0.2	-3.0
1992	1.8	0.8	-1.1	-0.7	-8.0*	-7.7**	-7.2***	-4.1***	-2.1*	-2.5	-0.1	2.6	-2.3
1993	2.0	2.2	0.4	-0.8	-2.1	-3.6	-2.8	-3.2	-3.0	-1.4	0.2	0.8	-0.9
1994	2.2	1.6	1.1	-1.0	-3.6	-3.4	-10.3	-3.3*	-2.9	-5.0	1.0	1.5	-1.8
1995	2.6	2.3	0.3	-1.2	-2.1	-6.2	-12.0**	-10.3***	-5.6***	-0.8*	-0.5	1.3	-2.7
1996	2.0	2.7	1.5	1.0	-2.1	-4.8	-3.4	-3.6	-1.4	-1.3	-0.1	1.1	-0.7
1997	1.9	2.2	-0.3	-1.3	-1.1	-4.4	-5.9	-4.4	-6.6	-2.7	-2.0	1.2	-2.0
1998	2.8	2.4	1.3	1.1	-1.4	-0.4	-4.9	-6.5*	-7.3**	-1.4	0.0	1.0	-1.1
1999	2.2	2.2	1.8	1.1	-0.3	-3.5	-3.1	-5.0*	-5.0*	-1.3	0.5	1.5	-0.7
2000	1.6	1.9	0.8	0.0	-1.5	-2.0	-3.0	-6.4*	-5.8	-1.5	0.5	0.6	-1.2
2001	1.8	0.7	0.2	-2.8	-0.9	-5.0	-6.1	-2.3	-2.0	-0.4	0.3	0.6	-1.3
Mean	2.0	1.9	0.7	-1.3	-2.7	-4.5	-5.4	-5.1	-3.8	-1.9	-1.2	1.0	-1.6

<p><Melting of ice cliff></p> <p> Threshold (-2.5°C) for melting</p> <p> Freeze/melt repeated</p> <p>based on Vaughan and Doake (1996)</p>	<p><Freezing of sea in Marian Cove></p> <p> Partial and temporal (few days) freezing (*)</p> <p> Nearly full area and above a half month freezing (**)</p> <p> Every day full area freezing (***)</p> <p>cf) *, **, ***: in Maxwell Bay</p>
--	---

위도와 중위도 지역의 오존층도 파괴되어, 1978년부터 1997년까지 남위 65°에서 북위 65°에 이르는 지역의 오존의 6-8%가 파괴되었다는 주장이 있다 (Wessel *et al.*, 1998).

오존구멍은 최근 들어서 점차 확대되어 그 크기는 유럽 면적(약 9백만 km²)의 2 배가 넘는다. 그 중에서도 1980년과 1992년 사이에 오존이 상당히 크게 감소했다(WMO, 1998). 미국 해양대기국(NOAA)의 기후감시 진단연구소(CDML)가 극궤도 인공위성 NOAA-14에 탑재한 SBUV/2(Solar backscatter ultraviolet instrument)로 측정한 자료와 지상 오존존데 관측자료(Lawrimore *et al.*, 2001)와 WMO/GAW 오존관측자료(WMO, 2000)에 따르면 오존 농도는 남극에서 꾸준히 감소하는 것이 확인된다(Fig. 5). Fig.

6은 인공위성 TOMS로 관측한 1979년부터 1992년까지와 2001년 8월부터 다음 해 1월 사이의 자료는 남반구 오존구멍의 변화를 보여준다(NASA, 2002). 여기에서 오존전량의 최저값과 오존구멍의 최대 영역이 대개 9월말에서 10월초에 나타남을 알 수 있으며, 2001년의 파괴지역이 가장 큰 것을 알 수 있다. 또 남극대륙을 덮는 상공의 오존층파괴는 점점 심해져 남반구의 여름인 1-2월에도 지속된다(Jones and Shanklin, 1995).

영국 헬리(75° 34' S, 26° 32' W)기지에서 과거에 측정한 오존량 자료를 보면, 10월 평균 오존전량은 1975년경부터 급속히 줄어들어 1994년까지 10월의 평균 오존전량은 1970년대 이전 20년 동안의 값에 비해 절반도 되지 않는다(Center for Atmospheric

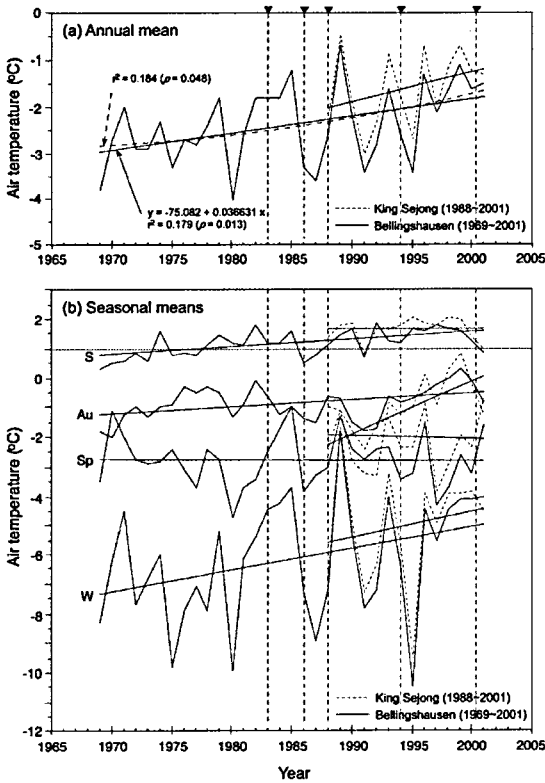


Fig. 3. Annual variation of the monthly mean air temperature associated with the seasonal mean air temperature changes of King Sejong and Bellingshausen Stations. Note the invariable increase of the temperatures. S means summer, Au autumn, Sp spring, and W winter (after Chung *et al.*, 2002).

Science, 2002). 한편 오존구멍은 보통 남극 웨델해 상공에 발달하는 극 소용돌이의 규모에 따라 위치가 달라진다(Turner *et al.*, 1993).

세종기지가 있는 남극반도 북쪽 지역은 이러한 오존구멍의 주 발생 지역의 외곽 경계에 해당한다(Schoeberl and Hartmann, 1991). 그런데도 지난 1978년 말부터 1994년까지 인공위성으로 측정된 자료를 최소자승법(最小自乘法)으로 처리해 그 추세를 분석하면, 평균 11%가 감소되었음이 밝혀졌다. 또 1979년부터 2000년까지 세종기지 상공의 평균 오존전량은 10년마다 7.1% 적어졌다(한국해양연구원, 2002). 반면 홍반(紅斑; erythema; 자외선에 노출돼 생기는 붉은 반점)을 일으키는 자외선 복사량(Total Ozone Mapping Spectrometer-Erythema Ultraviolet TOMS-EUV, 280-400nm)은 10년마다 18.2% 늘어났

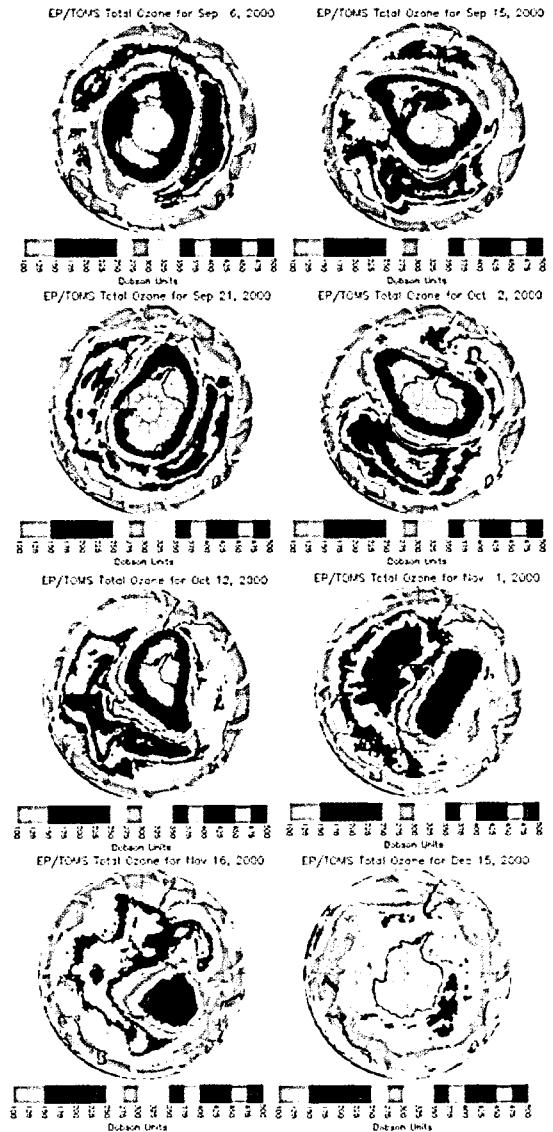


Fig. 4. Dynamics of ozone hole formed in 2000 (source: NASA, EP/TOMS).

다. 또 9월과 10월에 세종기지 상공의 평균 오존전량 변화경향이 10년마다 14.3% 적어지고 지표 TOMS-EUV 복사가 같은 기간마다 23.4% 증가한다(Fig. 7). 더욱이 1986년 봄부터 매년 200D.U.(Dobson Units) 미만인 매우 적은 오존전량이 기록되고 있다. 위의 사실들은 세종기지가 있는 지역도 짧은 기간 동안이지만, 더 고위도에서 발생하는 봄철 오존구멍의 영향권에 있다는 것을 보여준다. 한편 세종기지에서 매년 오존전량의 최대값과 최소값은 각각 12월과 9월에

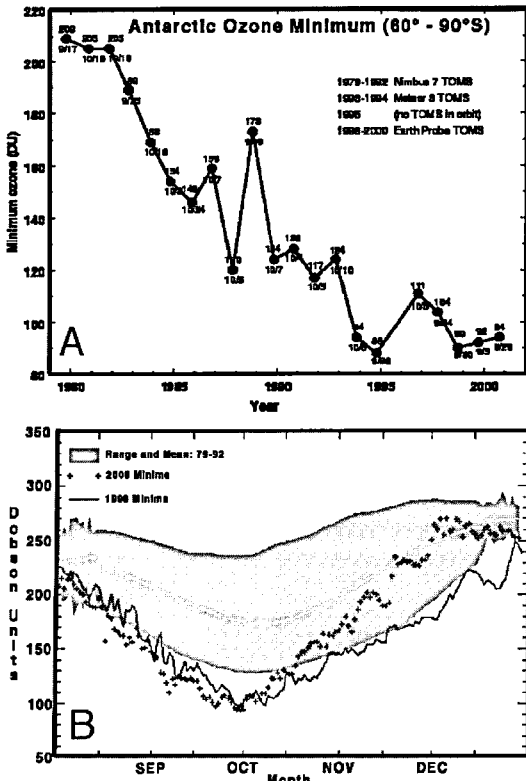


Fig. 5. A, Trend of Antarctic ozone depletion (Antarctic ozone minimum, 60 90S) since 1979; B, Recent (2000) ozone concentration compared with past ozone concentrations (source: NASA, 2002).

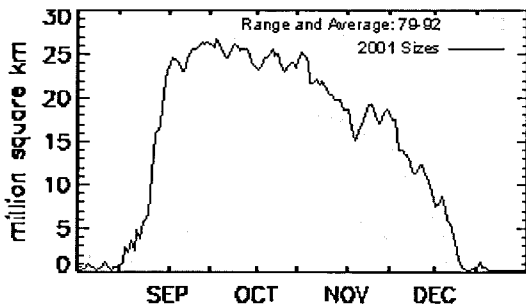


Fig. 6. Average values of daily estimates of ozone hole area in Southern Hemisphere during austral summer from 1979 to 1992, and 2001, respectively (after NASA, 2002).

나타났다(한국해양연구원, 2002).

인간이 사용한 염화불화탄소는 대류권 상공으로 올라가 대기대순환과 지구자전 때문에 극지방으로 모인다. 염화불화탄소의 염소이온은, 온도가 -80°C 이하

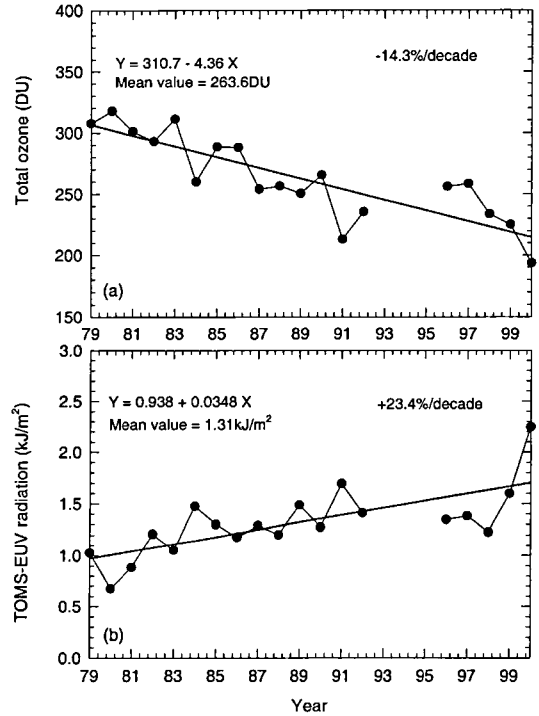


Fig. 7. Variations of averaged total ozone (a) and erythemal UV(EUV) (b) for September and October obtained from EP TOMS over King Sejong Station in Jan. 1979~Dec. 2000. (after KORDI, 2002).

로 내려간 극 성층권 겨울에 만들어진 구름 표면에 얼어붙어 있다가 봄이 시작되면 강한 자외선 때문에 분해된다. 이렇게 광분해(光分解)된 염소원자가 오존층에 모여있는 오존분자를 파괴한다. 또 염소분자 뿐만 아니라 1970년대 중반부터 소화기에 많이 쓰이기 시작한 헤일론(halon) 가스에 들어있는 브롬(Br)과 불소(F)도 오존층을 파괴에 중요한 구실을 한다(Hamill and Toon, 1991; Revkin, 1992).

한편 오존층이 해로운 자외선을 막아 지상의 생물들이 안전하게 살아가는 데 절대로 중요한 구실을 한다는 것은 익히 알려졌다. 예를 들면 자외선이 강해지면 육상에서 재배하는 농작물의 생장에 나쁜 영향을 주고, 지표오존이 많이 생겨 스모그를 형성하며 인체의 면역기능을 떨어뜨려 피부암과 백내장을 유발한다.

원래 대기 중 오존은 광화학(光化學) 반응으로 자연히 생기고 없어져 그 평형이 유지된다. 반면 최근 극지 상공의 오존층이 갑자기 줄어든 것은 완전히 인류가 환경을 오염시킨 결과로 볼 수 있다. 실제 염

화불화탄소는 발명된 다음 60년 동안에 1,600만 톤이나 쓰여, 모두 대기권으로 들어갔다. 그러나 1987년 몬트리얼 규약(Montreal Protocol)으로 염화불화탄소를 쓰지 못하게 하고 대체물질들을 개발하면서 오존층은 시간이 걸리더라도 상당히 회복되리라고 생각된다. 그러나 그 시간은 상당히 길어, 앞으로 수십 년에서 100년 정도의 시간이 흐른 이후에나 가능해질 것이다. 남극 성층권 오존층의 파괴와 오존구멍의 형성은, 서남극에 있는 영국 헬리기지에서 관측한 결과를 바탕으로 영국 남극연구소(BAS)의 연구원들이 1985년에 처음 발표했다(Farman *et al.*, 1985).

오존층 파괴가 남빙양에 미치는 영향

식물플랑크톤의 일차생산력 저하: 최근의 오존층 파괴는 빛을 에너지원으로 하고 빠르게 성장하는 남극 해양생태계의 일차생산자인 식물플랑크톤의 일차생산력에 직접 영향을 미친다. 그 결과 식물플랑크톤의 생산력과 조성의 변화는 크릴과 같은 다음 먹이 단계의 생물들에게 영향을 주어 남극의 생물 자원량 뿐 아니라 전체 남극의 해양생태계에도 영향을 줄 것이다(Kang *et al.*, 2000; 강성호 외, 2001). 남빙양의 식물플랑크톤은 적도의 열대 우림과 같이 지구전체의 탄소 순환을 조절하는 중요한 구실을 하기 때문에, 이들의 변화는 결국 지구전체의 환경변화에 영향을 미친다고 말할 수 있다.

오존층이 파괴되면서 남빙양 해양생물들에게 나타나는 영향을 연구하기 위하여 학자들은 주로 인공광원을 이용하여 실험실에서 배양연구를 하였다(Karentz, 1991). 드디어 미국학자들은 1990년 봄에는 벨링스하우젠해(海)에서 연구재료를 채집하여 직접 실험했다(Smith *et al.*, 1992). Iccolors라고 부르는 이 조사가 남극의 오존층이 최대로 형성되는 남극의 봄에 측정된 최초의 현장 실험이다. 이 실험에서는 수심별로 채수된 해수를 그 깊이에 설치된 배양 장치에 넣고 현장에서 자외선 조사량에 따른 식물플랑크톤의 광합성과 자외선이 일차생산력에 미치는 영향을 직접 측정했다. 그 결과 봄철 동안 벨링스하우젠해 해빙주변에서 성장하는 식물플랑크톤의 생산력이 오존 구멍 때문에 전체로 6%에서 12% 감소한 것으로 추정되었다(Smith *et al.*, 1992). 또 남빙양의 일차생산력은 수심 10-20m에서 25% 정도가 감소하는 것으로 보고된 바도 있다(Bidigare *et al.*, 1996).

식물플랑크톤의 유전 형질 변화: 생물의 진화와 함께 평형 상태를 유지하고 있던 식물의 광합성 시스템이 최근 자외선 증가로 인해 일부가 파괴되고 그 효율성이 감소되고 있다. 나아가 자외선의 증가는 식물 세포 조직뿐만 아니라 세포의 유전 형질에도 영향을 주어 유전 정보를 포함하고 있는 DNA분자를 훼손할 뿐만 아니라, 유전 정보를 전달하는데 매우 중요한 RNA분자를 훼손할 수 있다(Noonan and Lewis, 1995). 세포들은 훼손된 부분을 잘라내고 이어줌으로써 이러한 손상을 복구할 수 있는 능력을 가지고 있지만, 그 훼손 정도가 심한 경우 복구가 불가능하다. 그 결과 다음 세대로 전해지는 유전정보에 혼선이 생기고 생명체가 자신을 복제할 수 있는 능력을 상실할 수도 있다(Johanson *et al.*, 1995).

자외선 증가로 인한 해수의 화학성분변화: 자외선의 증가는 해수의 화학변화에도 긍정적인 변화와 부정적인 변화를 동시에 일으킨다. 전자로는 태양 복사로 해수 중에 자유 래디칼(Free radical)이라 부르는 화학 반응 복합물이 만들어지는 것이다(Zepp *et al.*, 1995). 자유 래디칼은 해수 중의 복잡한 탄소 복합물을 박테리아가 쉽게 이용할 수 있는 작은 단위로 분해한다. 또한 자유 래디칼은 철분과 마그네슘의 산화 상태를 변화시켜 비수용성(非水溶性)인 금속의 산화물과 수산화물을 식물플랑크톤이 이용할 수 있는 상태로 만들어 준다(Zepp *et al.*, 1995). 철분의 경우, 남빙양 식물플랑크톤의 광합성 작용을 위해 미량이지만 절대로 필요한 영양염이다. 해양으로 유입되는 대부분의 철분은 대기를 통해 유입되므로 남빙양과 같이 고립된 해양에서는 다른 대륙에서 유입되는 철분이 아주 적다(Martin *et al.*, 1990). 그러므로 식물플랑크톤의 광합성 작용을 위한 철분은 항상 부족하다. 따라서 자외선의 유입증가에 따른 해수의 철분의 증가는 남빙양 식물플랑크톤의 성장을 촉진하여 생산력의 증가를 야기시킬 수도 있을 것이다.

부정 변화로는 빛이 물분자와 충돌하면 활발한 화학반응을 일으키는 수산기(OH hydroxyl radical)가 생긴다는 것이다. 수산기는 해수 중 식물플랑크톤 세포 표면의 생화학 분자들과 심한 반응을 일으켜 세포의 화학성분과 구조의 변형을 초래해 세포 표면의 손상을 가져온다(Zepp *et al.*, 1995). 또한 수산기들은 해수 중의 다른 원소들과 반응하여 브롬화 이온과 탄산염 이온 같은 해로운 여러 가지의 2차기(二次

기)가 된다. 이런 이온들한테서 자신을 보호하기 위한 점액물질을 생산하는 식물플랑크톤들은 성장과 재생산에 이용되어야 할 에너지를 사용하기 때문에 이 플랑크톤들의 생산력이 저하되기도 한다.

남극 해양생태계에 미치는 영향: 오존층의 파괴는 남빙양 식물플랑크톤의 생물량과 조성을 변화시키는 원인이 되어, 남극 해양생태계 전체에 영향을 주게 된다. 예를 들어, 자외선의 영향으로 남빙양에 서식하는 동물들의 주요 탄소원인 식물플랑크톤 가운데 우점종이 감소하고, 크릴과 살파(Salpa) 같은 소비자의 먹이로 적당하지 않고 출현빈도가 낮은 식물플랑크톤이 증가하면 해양생태계 전체의 균형이 깨질 것이다. 곧 남극 식물플랑크톤들은 오랜 세월 동안 광조명과 온도가 낮은 환경에서 각각의 생태 지위(ecological niche)를 유지하면서 적응하여 왔기 때문에 미세한 환경 변화에도 생태계 전체가 영향을 받을 수도 있다.

남빙양 식물플랑크톤은 종류와 각 종류에 따라 자외선-B(파장 280-320nm)에 대한 성장률이나 생존전략이 서로 다르게 나타난다. 자외선-B 증가로 인해 종 수준에서 야기될 수 있는 현상에 대한 여러 가지 가설들이 제안되었다(Kang *et al.*, 2000). 그중 기존에 우점하던 종류들이 자외선-B 증가에 잘 적응하는 새 우점종이 출현하면서 생태계의 구조양상이 변할 것이라는 예측이 가장 널리 받아들여진다(Kang *et al.*, 2000). 자외선-B 증가에 따라 각각 다르게 반응하는 식물플랑크톤 종조성, 생물량, 생산력의 변화를 예측하고 이들이 남극 해양생태계에 미치는 영향을 이해하려면, 주요 우점종에 대한 자외선-B의 광생물 반응, 적응전략과 생산력에 영향을 미치는 기작에 관한 연구가 반드시 이루어져야만 한다(Kang and Kang 1998; Kang *et al.*, 1999b). 지금까지 자외선 증가에 따른 남극 식물플랑크톤의 영향에 대한 연구가 많지만, 종수준에서 자외선이 미치는 영향을 연구한 결과는 많지 않다(Kang *et al.*, 1999a).

엘니뇨와 남방 진동

1990년대 들어 우리의 관심을 끄는 엘니뇨(El Niño)와 라니냐(La Niña)도 육지와 대기와 해양이 복합된 해양의 이상변화라는 점에서는 남빙양의 환경변화와도 관계가 있다. 나아가 그 현상들이 남극대륙과 남극대기의 순환에 영향을 미친다고 보아야 한다. 실제

남빙양에 서식하는 물새들과 남극물개들의 번식이 엘니뇨-남방진동(El Niño-Southern Oscillation; ENSO)과 관계가 있다는 연구가 있다(Guinet *et al.*, 1994, 1998). 그 연구에 따르면 동물들은 엘니뇨-남방진동에 따라 번식지의 수온이 올라가면 번식이 잘 되지 않는 것으로 보인다. 또 엘니뇨-남방진동이 지나간 다음해에는 남빙양에 서식하는 물새들이 보통과 달리 갑자기 북쪽으로 이동해 죽는 현상도 여러 지역에서 관찰되었다(Ryan *et al.*, 1989).

한편, 엘니뇨-남방진동은 적도 태평양의 대기와 해양의 상호 작용으로 나타나는 복잡한 현상으로 지구 기후변동의 원인 가운데 하나로 알려졌다. ENSO와 관련된 기후 변화는 저위도뿐만 아니라 고위도에서도 나타나며, 그 중에서도 남극반도에 가까운 남미 지역(브라질, 아르헨티나, 우루과이)에서도 보고되었다(Ropelewski and Halpert, 1996; Pisciotano *et al.*, 1994). 따라서 남극 지역의 ENSO와 관련된 기후변화 조사는 ENSO와 지구전체 기후 사이의 긴밀한 관계를 이해하는 데도 도움이 될 것이다. 세종기지는 남극 지역에 있으므로 기후변화에 더 민감한 지역에 있으며, 지구온난현상과 ENSO와 관련된 남극지역의 기후변화를 더 일찍 감지할 수 있는 곳이다.

세종기지 주변의 기후 변동을 조사하려고 킹조지섬에 있는 칠레의 프레이기지(Frei Base, 62°12' S, 58°58' W)에서 1970년부터 1987년까지 관측한 자료와 세종기지에서 1988년부터 1998년까지 관측한 자료를 결합한 29년 동안의 월 평균기온과 월 총강수량을 분석하였다(Fig. 8). 기후의 경년변화(經年變化 secular change)는 크게 두 가지 원인, 곧 지구온난현상과 ENSO에 기인한다고 가정하였다. 여기에서는 ENSO를 남방진동지수(南方振動指數 southern oscillation index)와 적도 태평양 Nio 3.4 지역(5°N~5°S, 120°~170°W)의 해수면 수온의 편차를 이용하여 엘니뇨와 라니냐 혹은 “warm event”와 “cold event”로 분류하였다. 그 결과, 월평균 기온은 연교차가 약 8.5°C인 뚜렷한 연변화를 보이고, 월별 표준편차로 표현되는 경년변화는 겨울철에 3.2°C로 더 크게 나타났다. 이는 보통 나타나는 기온의 변화수준과 유사하다. 또 기온은 올라가며, 올라가는 정도가 겨울에는 10년에 0.7°C로 크고, 봄에는 10년에 0.1°C로 작다. 그리고 그 신뢰도는 여름에 높고, 봄에 낮게 나타난다(Kwon and Lee, 2002). 월 총강수량은 3월과 4월을 제외하고 전체로 연변화가 작고, 강수량의 경년변화는 25-

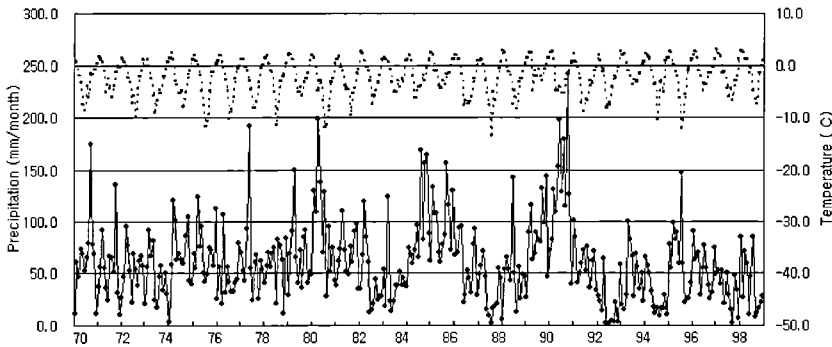


Fig. 8. Time series of the monthly mean temperature and the monthly total precipitation at Chilean Frei Base from 1970 to 1987, and King Sejong Station since 1988).

50 mm로 크다. 강수량의 변화는, 기온 변화와 다르게, 연변화가 작고 경년변화가 크다. ENSO와 관련된 기온변화를 보면, 엘니뇨(“warm event”) 기간에는 전체로 기온이 약간 낮아지며, 그 중에서도 겨울철에 상당히 크게(7월의 경우 약 0.7°C 감소) 낮아진다. 라니냐(“cold event”)와 관련된 기온변화는 약 반 년 정도 지연되어 기온이 약간 증가하면서도 겨울철에는 상당히 크게(7월의 경우 약 1.2°C 증가) 증가한다. 또한 ENSO와 관련한 강수량 분석에서 엘니뇨(“warm event”) 기간에는 전체로 강수량이 많이(30%) 감소하며, 다른 철에 견주어 겨울과 가을에 유난히 크게 감소한 반면 라니냐(“cold event”) 기간에는 강수량과 평균강수량 사이에 큰 관계가 없는 것으로 나타났다(Kwon and Lee, 2002).

보스토크 호수

남극대륙 안쪽 고원지대에 건설된 러시아 보스토크(Vostok) 기지(남위 78° 28', 동경 106° 48', 높이 3,488m)는 1983년 7월에 남극에서 측정된 최저온도인 -89.6°C가 기록된 기지이다. 1957년 12월 16일 지자기 남극점(地磁氣 南極點 남위 80° 06', 동경 108° 30' Geomagnetic South Pole) 부근에 준공된 이 기지의 연평균온도는 -55.4°C이다. 이 기지는 두께 3,750m의 얼음 위에 지어졌으며 얼음을 굴착하고 오로라를 관측하는 것이 그 기지의 주요한 연구과제였다.

1970년대에 그 기지 아래에는 상당히 넓은 호수가 있다는 것이 밝혀졌다. 1990년대 들어 초단파를 이용한 전파음향 측심의 결과 호수와 관련된 더 정확한 내용이 알려지기 시작했다. 그 결과 보스토크 호수(Lake Vostok)라 부르는 그 호수의 크기는 230×50 km이며 호수깊이는 500m 정도에 퇴적물 두께는 90-

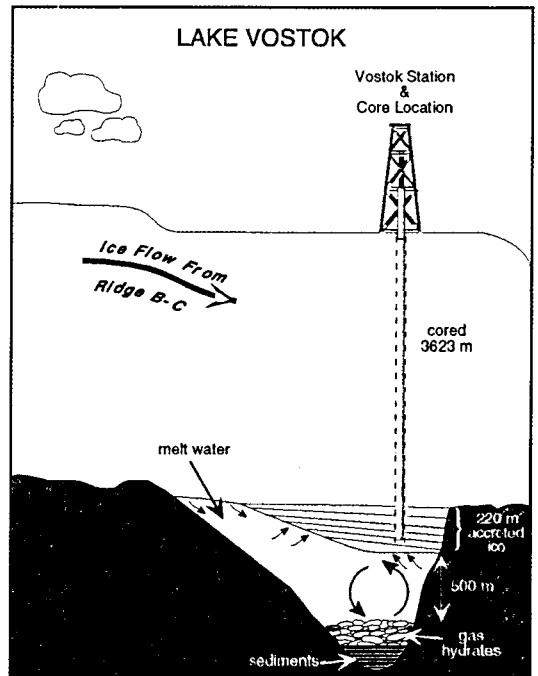


Fig. 9. Cartoon of Lake Vostok indicating the ice flow over the Lake near Vostok Station. The melting and accreting processes are indicated at the base of the ice sheet. Arrows also indicate the potential circulation within the lake. The accretion ice is the light blue layered material at the base of the ice sheet. The sediments (orange lined pattern) and hypothesized gas hydrates (pebble pattern) on the lake floor are shown (after Bell, 1998).

300m 정도라는 것이 밝혀졌다(Kapitsa et al., 1996; Ellis-Evans and Wynn-Williams, 1996). 퇴적물이 없는 곳도 있지만, 호수 중앙부분의 퇴적물 두께는 4-5 km라는 의견도 있다(Bell, 1998). 현재까지 남극대륙

에서 보스토크 호수 같은 빙원하 호수(氷原下 湖水 subglacial lake)가 70곳이 넘는 것으로 밝혀졌다 (Siegert *et al.*, 1996).

1998년 1월 3,623m까지 굴착해 호수면 위 120m 정도에 도달했다(Fig. 9)(Bell, 1998). 얼음의 상태는 깊이에 따라 다르다. 이를 좀 더 정확하게 알아보면, 윗부분은 단단한 얼음이지만 3,311m부터 3,538m까지는 얼음층이 기울어지고 뒤섞여 화학성분을 분석한 결과를 제대로 해석하기 힘들어진다. 이는 원래는 얼음층이나 기반암 위를 흘러가면서 교란되기 때문인 것으로 해석된다. 이 아래부터는 얼음결정이 10-100cm 크기로 갑자기 커지며, 전기전도도와 안정동위원소의 양과 포함된 기체의 양이 1/100로 적어진다. 이런 현상은 3,623m까지 계속되며 얼음이 빙상 바닥에 부착한 결과로 해석된다. 얼음 결정이 아주 큰 윗부분 70m에는 1mm 크기의 모래입자가 많으며, 그 이유는 얼음이 호수둘레에서 되풀이해서 얼고 녹으면서 모래가 섞이고 얼음 결정이 커졌기 때문인 것으로 보인다. 그 아래, 곧 깊이 3,608m보다 더 깊은 얼음은 아주 맑으며 빙상이 호수 위에 떠있어 얼음 결정이 맑은 것으로 보인다. 이런 상태는 150m를 계속해 3,758m에서 호수면에 이른다(해석된다. 한편 아래쪽 두께 220m 정도의 교란된 얼음층은 북동쪽으로 가면서 얇아지고 지형이 기울어져 흘러드는 물의 수면이 높아지는 것으로 보인다. 북쪽으로는 수심도 670m 정도로 깊어지며 호수바닥은 해수면보다 710m 낮다(Bell, 1998).

그 얼음에서 채집한 공기성분 가운데 중수소(重水素), 산소동위원소, 메탄가스(CH₄), 이산화탄소가스(CO₂)를 분석한 결과, 현재부터 42만 년 전까지 기후가 크게 네 번 변했다는 것을 알게 되었다(Petit *et al.*, 1997, 1999). 또 이 온실기체성분들과 온도 사이에는 아주 깊은 상관관계가 있다는 것이 확인되었다. 나아가 각각의 기체성분에서 유추한 최고기온들끼리는 아주 비슷했으며 최저기온들끼리도 마찬가지로이다. 그러나 자세히 보면 홀로세와 간빙기(~240ka)보다 기온이 더 높았던 간빙기가 두 차례(~125ka, ~330ka)나 있었다. 또 홀로세를 빼고는 기온이 변화하는 양상도 비슷해, 짧은 시간에 걸쳐 갑자기 최고온도로 높아진 다음 즉시 낮아지기 시작해 기복을 가지고 긴 시간에 걸쳐 천천히 낮아진다. 반면 홀로세 1만 년 동안은 과거 42만 년 동안에 유일하게도 기온이 상당히 안정되어 인류문화 발달에 큰 영향을 미친

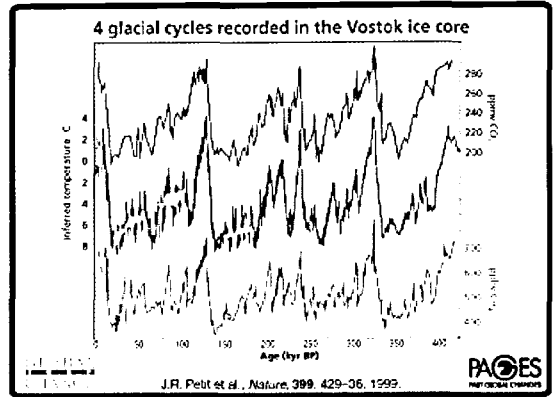


Fig. 10. The sequence of changes in atmospheric CO₂ in ppmv, isotopically inferred temperature in and CH₄ in ppbv recorded in the Vostok ice core. Note the four cycles of glacial and interglacial stages in 420,000 years long (after PAGES 1999, based on Petit *et al.*, 1999).

것으로 보인다(Fig. 10). 그러나 홀로세를 빼고는 지구의 기온은 한 번 최고로 높아지면 곧 오르락내리락 거리며 계속해서 낮아진다는 점에서 유의할 필요가 있다고 생각된다.

보스토크호수는 동아프리카 탕카니카 호수나 러시아 바이칼 호수처럼 열곡(裂谷 rift valley)에 있는 것으로 보인다. 또는 빙상자체의 침식이라거나 그 지역에 있는 지열이나 운석의 충돌 같은 이유가 있을 것으로 보인다(Dalziel, 1998). 물은 담수이며 남극대륙이 얼음으로 덮이기 시작하면서 생긴 것으로 생각된다. 호수 자체는 1,500만 년이 되었을지라도, 물은 그 보다는 젊다고 유추되지만 아직 정확하게 확인할 자료가 없다.

그 호수 위의 얼음 속에서는 박테리아, 이스트, 곰팡이, 미세조류(微細藻類)와 화분(花粉)들의 화석이 발견되었다. 이들은 깊이 1,500-2,750m 사이에 많으며 숫자는 1ml에 800-10,800 개에 이르며 기후변화와 관계가 있는 것으로 보인다(Abyzov *et al.*, 1998). 더 깊은 곳에 있는 얼음(깊이 3,538-3,743m)은 보스토크 호수 물이 언 것으로 생각된다. 3,603m에 있는 얼음 1ml에는 200-300개의 박테리아가 있고 3°C, 1기압에서 배양한 결과 적어도 일부는 살아있었다(Karl *et al.*, 1999).

보스토크 기지와 도움(Dome) C(남위 74° 39', 동경 124° 10', 높이 3,240m)에서 굴착한 얼음에 함유된 먼지들의 Sr(⁸⁷Sr/⁸⁶Sr)과 Nd(¹⁴³Nd/¹⁴⁴Nd) 동위원소의

조성을 분석한 결과, 그 먼지들이 남아메리카 파타고니아(Patagonia)에서 기원했다는 것이 밝혀졌다(Grousset *et al.*, 1992; Basile *et al.*, 1997). 먼지가 빙하 2계(階 stage)(최종 빙하최고기 Last Glacial Maximum LGM, ~18ka)와 빙하 4계(~60ka)와 빙하 6계(~160ka), 곧 기온이 낮았을 때에 아주 많은 것으로 나타났다(Basile *et al.*, 1997). 이런 것을 보면 기온이 낮았을 때에는 남아프리카나 오스트레일리아에서 바람이 부는 지역보다는 조금 남쪽인 남위 40-50도 지역의 편서풍(偏西風)의 영향이 더욱 강해, 파타고니아지역에서 먼지가 날아왔던 것으로 보인다. 또 적어도 빙하 6계까지는 기온이 낮았을 때, 남극대륙을 둘러싼 지역의 풍계(風系)는 같거나 비슷했던 것으로 보인다. 기온이 낮았을 때 먼지가 많은 것은, 큰 화산폭발이 없었고 대기의 순환이 강해 바람이 세고 더 건조했기 때문인 것으로 풀이된다(Petit *et al.*, 1981). 또 해수면이 낮아 노출된 해저(대륙붕)가 넓어 먼지가 더 많이 날렸던 것도 이유가 될 것이다. 실제 최종 빙하최고기(LGM)에는 사막의 면적이 현재의 두 배 수준이었다는 보고가 있다(Friedlingstein *et al.*, 1995). 먼지는 주로 사막이나 건조한 지역에서 공급된다. 또 물(얼음-수증기-구름-비(눈)의 수문순환(水文循環 hydrologic cycle)이 약해져, 먼지가 남극대륙에 많이 쌓이기 때문이라는 의견도 있다(Yung *et al.*, 1996). 실제 수문 순환이 현재순환의 반 수준으로 약해지면 절대량으로는 5배, 상대량으로는 10배 정도의 먼지가 남극대륙에 퇴적된다는 주장이 있다(Yung *et al.*, 1996).

보스토크 기지에서 굴착한 얼음의 ^{10}Be 을 연구한 결과를 보면 빙하기에는 강수량이 현재의 반 정도 밖에 되지 않았다(Jouzel *et al.*, 1989). 대기온도가 낮아지면서 바다의 온도도 낮아지고 수분의 증발량이 적어져 구름이 덜 생기고 그 결과 강수량이 작아졌다는 것이 가능하다. 실제 최종 빙하최고기(LGM) 때에는 적도에 있는 바다의 해수면 온도가 지금보다 5°C 정도 더 낮았다는 연구가 있다(Guilderson *et al.*, 1994). 강수량이 적어지면 쌓이는 먼지는 얼음의 양에 비해 증가한다. 먼지의 양은 위에서 이야기한 물의 수문순환에 따라 얼음의 양과 바람의 속도 뿐 아니라 먼지를 일으키는 지역과 먼지 자체의 복합영향을 받는다고 생각된다. 공기 중에 먼지가 많아지면 먼지 자체가 기온을 떨어뜨릴 가능성이 있기 때문이다. 현재 지구는 대기 내에서 부유하는 입자 때문에

대기온이 $2-3^{\circ}\text{C}$ 가 낮아진다는 보고가 있으며 부유하는 입자들이 최종 빙하최고기 때에도 기온을 $2-3^{\circ}\text{C}$ 를 더 낮추었다는 연구결과가 있다(Harvey, 1988). 남극대륙에서 먼지는 주로 눈결정의 핵이 되어 떨어진다.

논 의

빙벽의 후퇴는 기온뿐 아니라 수온, 강수량, 풍향과 같은 다른 환경인자와 관계가 있다고 생각된다. 그러나 더 많은 인자와 관련성을 찾는 것이 현재의 과제이다. 시간이 가면서 그런 자료들이 더 모이겠지만 신뢰도가 높은 자료를 모으기는 쉽지 않으리라 생각된다.

한편 남극에서 얼음이 녹는 현상이 과연 지구가 더워지는 지구온난현상과 관계가 있는지를 더 지켜보는 뜻으로 지구온난(global warming)이라는 용어를 쓰지 않고 “지역규모의 대기온난(regional atmospheric warming)”이라는 용어를 쓰는 학자들도 있다(Doake and Vaughan, 1991; Vaughan and Doake, 1996). 한편 세종기지에서 400km 정도 남서쪽으로 떨어진 영국 파라데이기지(현재는 우크라이나의 베르나드스키 기지)는 1945년 이후 기온이 매년 0.056°C 씩 약 2.5°C 상승했다(King, 1994). 실제 Marshall(2002)이 종합한 최근 50년 간 남극의 각국 기지에서 관측된 기온 분석자료는, 우리의 연구지역을 포함하는 남극 반도 일대에서는 연 평균 기온이 뚜렷이 올라가는 반면, 동남극 지역의 대부분은 오히려 약간 내려가는 경향을 보인다. 또 최근에는 서남극의 빙상이 얇아지지 않고 두꺼워진다는 연구가 있는 바(Smith *et al.*, 1998), 그 연구결과가 서남극 전체에 해당된다면, 빙벽과 빙하가 후퇴하는 현상은 서남극둘레에 국한된 현상일지도 모른다고 생각된다. 실제 남극반도를 제외하고는 남극이 북극보다 평균기온이 덜 올라가는 것으로 보인다. 기후 모형연구(modeling)의 결과를 따르면 극지방이 다른 지역보다 온도가 많이 올라간다(Watson *et al.*, 1997).

지구전체의 평균기온은 1860년 이후 140년 동안에 $0.6 \pm 0.2^{\circ}\text{C}$ 올라갔고 서기 2100년까지는 지구전체가 최소 1.4°C 에서 최대 5.8°C 정도 올라가리라 예상된다(IPCC, 2001). 이런 상승은 과거 100년 동안을 포함해 1만 년 동안에 유례가 없는 큰 상승으로 생각된다. 지구전체의 기온이 올라간다고 보면 남극반도

는 말할 것도 없고 남극대륙 자체의 기온도 올라갈 수 있을 것이다. 기온이 올라감에 따라 해수면도 높아질 것이며, 서기 2100년까지 그 양은 최소 9cm에서 최대 88cm 정도가 되리라 예상된다(Houghton *et al.*, 2001). 그러나 주로 남극대륙, 그 가운데서도 서남극의 빙상이 녹아 해수면이 높아진다면, 남빙양의 해수면은 이 보다는 더 높아질 것이다. 그린랜드 빙하의 영향은 서남극 빙하만큼 크지 않으나 어느 정도의 영향을 미칠 것이다(Hvidberg, 2000). 해수면이 올라가는 데 따라 낮은 곳이 침수되는 현상은 지금보다 더 심각해질 것이다.

세종기지는 그간의 연구결과를 볼 때, 남극 오존구멍의 영역의 크기에 따라 그 영역에 속하거나 또는 연변에 놓였다는 것이 밝혀졌다(Lee *et al.*, 1999). 따라서 세종기지 상공 성층권의 오존량과 유해 자외선의 변동을 연구하는 대기과학 분야의 연구도 중요하며 이들 변동에 따르는 생태계의 특성을 밝히는 생물학 분야의 연구도 중요하다. 또 이와 관련된 기후 변화와 환경변화도 중요한 관심사라 하겠다. 이는 세종기지 주변의 생태계가 오존구멍과 관련된 지표 자외선의 복사량에 따라 당연히 특정한 계절을 따라 적응하려는 어떤 기작에 영향을 받을 것이며, 자외선 복사량의 변동에 따라 나타나는 기후의 변화도 특성이 있을 것이라고 보기 때문이다. 그러나 이런 현상들에 대한 더 세밀하고 깊은 변동 특성을 파악하기 위해서는, 좀더 장기간에 걸쳐 관련분야(대기화학이나 구름물리학 분야)에 대한 연구가 필요하다. 또한 자외선 복사량의 세기와 변동에 대한 생태계 변화를 이해하려면 더 깊은 연구가 필요하다.

지구기온의 상승은 주로 이산화탄소, 메탄가스, 질소산화물, 염화불화탄소를 위시한 온실가스들의 증가를 주요한 원인으로 간주하여야 할 것이다. 그러므로 인간의 노력으로 이런 기체들의 배출량을 저감시킬 수 있다면 지구의 기온상승을 완화시킬 있을 것이며 바닷물이 높아지는 현상도 완화될 것이다. 한편 최근의 연구결과를 보면 남극대륙 상공의 오존층이 파괴되어 성층권이 차가워지고 대류권마저 차게 만들어 남극대륙내부의 기온을 상당기간 동안 떨어뜨리는 주요한 원인으로 작용할 수 있다는 연구가 있다(Thompson and Solomon, 2002, submitted). 반면 남극반도 같은 남극대륙 변두리의 기온은, 위에서 말했듯이, 꾸준히 높아진다. 21세기 동안 오존층 회복 정도에 따라 육지-해양-대기 시스템에서 에너지 균형

을 변화시키는 영향의 정도가 달라질 수 있으므로 시간이 가면서 남극의 기후도 변하리라고 보아야 한다(Simpson, 2002).

자외선이 증가된 현재의 환경에 존재하는 식물플랑크톤들의 생존율, 자외선 흡수 물질 농도, 광합성 비율, 성장 양상의 변화는 분명히 지난 20년 동안 우점종의 생물지위에 변화를 야기시켰다고 생각된다. 그 결과 자외선이 전체 해양생태계에게 영향을 미치는 주요한 하나의 요인으로 작용할 수 있을 것이라 생각한다(Kang *et al.*, 2000; 강성호 외, 2001). 환경오염에서 벗어나려는 인류의 노력이 지속되더라도 남극 성층권 오존이 원래 상태로 회복되기까지는 앞으로도 몇십 년 이상의 기간이 걸릴 것이다. 그러므로 변화양상을 더 체계 있게 조사하기 위해서는 현재 종류에 따라 차이가 큰 식물플랑크톤의 구조양상과 생리, 생화학 반응기작에 대한 기본 연구가 확충되어야 할 것이다. 그런데 실제로 자연 상태에 존재하는 우점종을 찾아내기 위한 작업은 쉽지가 않다. 게다가 대부분의 연구가 식물플랑크톤에 국한되었으며, 실제로 연안의 조간대에 성장하면서 자외선에 가장 직접 노출되어 있는 저서성 미세조류에 대한 연구는 발견하기 어렵다. 그 가운데서도 식물플랑크톤의 계절에 따라 나타나는 종류와 생물량과 천이과정에 대한 연구는 대단히 빈약하다. 게다가 이들의 구조를 결정하는 환경 요인(일조량의 변화, 자외선, 바람, 조석간만의 차, 주변 빙산이 녹아 형성된 담수의 유입)의 구실을 체계 있게 규명한 연구가 부족하여 남극 해양생태계의 변화를 예측하는 데 어려움이 많다.

이 연구에서는 세종기지에서 관측한 자료가 부족해, 세종기지 관측자료와 칠레 프레이 기지 관측자료를 결합한 연장된 시계열 자료를 사용하였다. 이러한 연장된 시계열 자료를 분석할 때는 다른 두 지점의 관측자료가 한 자료로 결합되어 있다는 점이 특별히 고려되어야 한다. 비록 세종기지와 프레이 기지가 가까운 관측지점일지라도 두 지점의 기온과 강수량은 서로 상당한 차이를 보일 수 있기 때문이다. 그 가운데서도 강수량은 극지환경에서 관측하기가 더욱 어려워 관측 방법과 관측 환경에 따라 커다란 차이를 보일 것이다. 그러므로 더 장기간에 걸친 많은 관측자료를 이용한 추가연구가 필요하다고 생각한다.

위에서 이야기한대로 시간이 가면서 오존층이 회복되면 현재 자외선의 증가에 영향을 받고 있거나 적응하고 있는 남빙양 해양생물들의 성장환경에 변화가

생길 것이다. 그렇게 되면 새로운 우점종이 출현하고 이로 인한 새로운 남빙양 해양생태계가 형성될 것으로 생각된다.

현재 인간이 가진 기술로는 빙원 아래에 있는 호수 물을 오염시키지 않고 채집할 방법이 없다. 그러므로 미국 항공우주국(NASA)을 비롯해 유명한 연구기관에서 보스토크 호수 물을 오염시키지 않고 채집할 방법을 찾는 중이다(Bell, 1998). 만약 그 호수 물과 퇴적물이 채집된다면 지금까지 상상만 했던 새로운 지구과학과 생물과학에 관련된 현상들이 밝혀질 것이다(Karl *et al.*, 1999; Priscu *et al.*, 1999; Siegert *et al.*, 2001).

중국에서만 매년 서울면적의 5배 정도인 3,000km²가 사막으로 변한다는 것은 익히 알려진 사실이다. 무분별한 개발로 야기된 '사막이 되는 현상(desertification)'은 아시아뿐 아니고 문명세계의 모든 대륙에서 일어난다. 그러므로 남극대륙도 예외가 아닐 것이라 생각된다. 관측자료와 분석자료는 없지만 산성비 현상도 마찬가지일 것이다.

현재 남극대륙을 포함하여 지구전체에 걸쳐 나타나는 지구환경변화의 대부분은 인간이 일으킨 현상으로 국가간의 이해와 소득수준과 의식이 얽혀 풀기 어려우리라는 느낌이 든다. 한편 남극은, 심해저에 있는 망간단괴(團塊)와 달리, 인류전체를 위한 대륙, 이른바, "인류 공동의 유산(遺産)"이 아니다. 그러므로 남극을 국제연합(國際聯合 United Nations)이 관장하지 않고, 남극조약의 이사국(理事國)적인 남극조약 협의 당사국(南極條約 協議當事國 Antarctic Treaty Consultative Parties)들이 관장한다. 이런 체제는 그대로 유지되리라 믿는다. 그런 점에서 우리나라를 비롯한 남극에 진출한 국가들은 남극환경보존과 연구에 더욱 큰 관심을 가져야 할 것이다.

결 론

남극대륙과 남빙양은 지구환경과 밀접한 관련이 있다. 먼저 지구의 환경변화가운데서도 지구온난 현상과 성층권 오존층 파괴와 엘니뇨-남방진동에 관련된 변화가 남극대륙과 남빙양에 직접 나타난다. 나아가 그 곳에서 성장하거나 서식하는 생물들이 영향을 입는다. 또 남극대륙을 덮는 빙원은 과거 지구의 환경변화를 기록한다는 점에서 아주 중요한 연구지역이고 연구재료이다.

우리가 남극연구를 소홀히 생각할 수 없는 이유가 바로 여기에 있다. 먼저 남극에 나타나는 대기현상과 해양환경을 관측해야 하며 환경변화를 예의 주시해야 한다. 빙원과 빙벽을 포함한 얼음의 상태변화를 관찰해야 한다. 또 남빙양의 생물들과 생태계의 변화를 조사해야 한다.

인간생활의 질(質)이 중요하게 생각되는 지금, 우리나라는 남극대륙에 진출해 지구의 환경변화와 깊은 관계에 있는 남극대륙의 빙상과 그 아래에 있는 지역의 지질연구 같은 남극본연의 연구를 해야 할 것이다. 또 21세기 우주를 연구하는 시대를 맞이하여 남극대륙의 기상과 고층대기현상 같은 우주연구에 직접 필요한 남극대륙의 자연현상들에 큰 관심을 가져야 할 것이다.

감사의 글

한국지구과학회(회장 조주환 조선대학교 교수)가 필자의 한 사람에게 강연을 하게 한 것이 이 논문을 쓰게 된 직접 동기가 되었다. 마리안소만의 빙벽이 후퇴하는 사진들은 영국해군(Royal Navy)과 칠레공군(Fuerza Aerea de Chile FACH)과 한국항공우주연구원이 제공했다. 벨링스하우젠 기지의 2001/02년 월 동대장인 올렉 사하로프(Oleg Sakharov)가 벨링스하우젠 기지에서 1969년부터 2001년까지 관측한 기온 자료를 제공했다. 칠레 프레이 공군기지의 기상자료(1970~1987)는 칠레 기상청(Direccion Meteorologica de Chile)의 엑토르 마르티네스 비큐냐(Hector Martinez Vicuña)에게서 받았다. 한국해양연구원의 홍성민 박사는 빙하기와 얼음에 관한 좋은 의견을 내었다. 이름을 밝히지 않은 심사위원들이 이 논문을 더 낮게 만들려고 힘썼다. 이 논문의 필자들은 위의 모든 기관과 개인에게 깊은 고마움을 표한다.

참고문헌

- 강성호, 강제신, 이상훈, 이윤호, 2001, 남극 오존층 파괴가 식물플랑크톤에 미치는 영향. *Algae*, 16(3), 303-314.
- 장순근, 윤호일, 정호성, 1998, 지구온난화와 서남극 남쉐틀랜드군도 킹조지섬의 최근 빙벽후퇴. *한국지구과학회지* 19(1), 101-106.
- 정호성, 이방용, 장순근, 2002, 세종기지 주변에서 관찰된 최근의 빙벽후퇴와 바다 결빙, 남극 세종기지 주변 인간 활동으로 인한 환경변화 모니터링. *한국해양연구원, EC PP 01 001-B2*, 39-63.

- 한국해양연구원, 2002, 극지오존층 변동과 관련한 지구환경 변화 및 생태계 변화 연구. BSPP 001-B5-1402-7, 205 p.
- Abyzov, S.S., Mitskevich, I.N. and Poglazova, M.N., 1998, Microflora of the deep glacier horizons of central Antarctica. *Microbiology*, 67(4), 451-458.
- Basile, I., Grousset, F.E., Revel, M., Petit, J.R., Biscaye, P.E., Barkov, N.I., 1997, Patagonian origin of glacial dust deposited in East Antarctica (Vostok and Dome C) during glacial stages 2, 4 and 6. *Earth and Planetary Science Letters* 146, 573-589.
- Bell, R.E., 1998, Review of Lake Vostok studies. Lake Vostok Workshop Final Report, 9-11.
- Bidigare R.R., Iriarte J.L., Kang S.-H., Karentz D., Ondrusek M.E. and Fryxell G.A. 1996. Phytoplankton: Quantitative and qualitative assessments, foundation for ecological research of the Antarctic Peninsula. *Antarctic Research Series*, 70, 173-198.
- Center for Atmospheric Science, 2002, The ozone hole tour. <<http://www.atm.ch.cam.ac.uk>>.
- Dalziel I., 1998, Tectonic setting of Lake Vostok. Lake Vostok Workshop Final Report, 17-19.
- Doake, C.S.M. and Vaughan, D.G., 1991, Rapid disintegration of the Wordie Ice Shelf in response to atmospheric warming. *Nature*, 350(6316), 328-330.
- Ellis-Evans, J.C. and Wynn-Williams, D., 1996, A great lake under ice. *Nature*, 381, 644-646.
- Farman, J.C., Gardiner, B.G. and Shanklin, J.D., 1985, Large losses of total ozone in Antarctica reveal seasonal ClOx/NOx interaction. *Nature*, 315, 207-210.
- Friedlingstein, P., Prentice, K.C., Fung, I.Y., John, J.G. and Brasseur, G.P., 1995, Carbon-biosphere-climate interactions in the last glacial maximum climate, *Journal of Geophysical Research*, 100(D4), 7,203-7,221.
- Greene, S. W., 1964, Plants of the land. in (eds.) Priestley, R. E., Adie, R. J., and Robin, G. de Q., *Antarctic Research*, London, Butterworth and Co., 240-53.
- Greene, S. W., 1970, Studies in *Colobanthus quitensis* (Kunth) Bartl. and *Deschampsia antarctica* Desv.: 1. Introduction. *British Antarctic Survey Bulletin*, 23, 19-24.
- Grousset, F.E., Biscaye, P.E., Revel, M., Petit, J.R., Pye, K., Joussame, S. and Jouzel, J., 1992, Antarctic(Dome C) ice-core dust at 18 k.y. B.P., Isotope constraints on origins. *Earth and Planetary Science Letters* 111, 175-182.
- Guilderson, T.P., Fairbanks, R.G., Rubenstone, J.L., 1994, Tropical temperature variations since 20,000 years ago: Modulating interhemispheric climate change. *Science*, 263, 663-665.
- Guinet, C., Chastel, O., Koudil, M., Durbec, J.P. and Jouventin, P., 1998, Effects of warm sea-surface temperature anomalies on the blue petrel at the Kerguelen Islands. *Proceedings of the Royal Society of London, Series B: Biological Sciences*, 265(1400), 1,001-1,006.
- Guinet, C., Jouventin, P. and Georges, J.-Y., 1994, Long term population changes of fur seals *Arctocephalus gazella* and *Arctocephalus tropicalis* on subantarctic (Crozet) and subtropical (St. Paul and Amsterdam) islands and their possible relationship to El-Nio Southern Oscillation. *Antarctic Science* 6(4), 473-478.
- Hamill, P. and O.B. Toon, 1991. Polar stratospheric clouds and the ozone hole. *Physics Today*, 44(1), 34-42.
- Harvey, L.D.D., 1988, Climatic impact of ice-age aerosols. *Nature*, 334, 333-335. Houghton, J.T., Ding, Y., Griggs, D.J., Noguer, M., van der Linden, P.J. and Xiaosu, D. (eds.), 2001. *Climate Change 2001. The Scientific Basis, Contribution of Working Group I to the third assessment report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*. Cambridge University Press, Cambridge, 944 p.
- Hvidberg, C.S., 2000, When Greenland ice melts. *Nature*, 404, 551-552.
- IPCC, 2001. *Climate Change 2001*. Cambridge University Press, 752 p.
- Johanson U., Gehrke C., Björn L.O., Callaghan T.V. and Sonesson M., 1995, The effects of enhanced UV-B radiation on the subarctic heath ecosystem. *Ambio* 24(3), 106-111.
- Jones, P.D., New, M., Parker, D.E., Martin, S. and Rigor, I.G., 1999, *Surface air temperature and its changes over the past 150 years*. *Review of Geophysics*, 37(2), 173-199.
- Jones, A.E. and Shanklin, J.D., 1995, Continued decline of total ozone over Halley, Antarctica, since 1985. *Nature*, 376, 409-411.
- Jouzel, J., Raisbeck, G., Benoist, J.P., Yiou, F., Lorius, C., Raynaud, D., Petit, J.R., Barkov, N.I., Korotkevitch, Y.S. and Kotlyakov, V.M., 1989, A comparison of deep Antarctic ice cores and their implications for climate between 65,000 and 15,000 years ago. *Quaternary Research*, 31, 135-150.
- Kang S.-H. and Kang J.-S., 1998, *Phaeocystis antarctica* Karsten as an indicator species of environmental changes in the Antarctic. *Korean Journal of Polar Research*. 9, 17-35.
- Kang J.-S., Kang S.-H. and Lee J.H., 1999a, UV Effect of the Antarctic diatoms under culture condition. *Algae*, 14, 117-126.
- Kang J.-S., Kang S.-H. and Lee J.H., 1999b, Cryophilic diatoms *Navicula glaciei*/perminuta in Antarctic coastal environment. I. Morphology and Ecology, *Algae*, 14, 169-179.
- Kang S.-H, Kang J.-S, Lee S., Kim D.K. and Kim D.Y., 2000, Importance of polar phytoplankton for the global environmental change. *Korean Journal of Environment*

- tal Biology 18(1), 1-20.
- Kapitsa, A.P., Ridley, J.K., Robin, G. de Q., Siegert, M. J. and Zotikov, I. A., 1996, A large deep freshwater lake beneath the ice of central East Antarctica. *Nature*, 381, 684-686.
- Karentz, D., 1991, Ecological consideration of Antarctic ozone depletion. *Antarctic Science*, 3, 3-11.
- Karl, D. M., Bird, D. F., Bjoerkman, K., Houlihan, T., Shackelford, R., and Tupas, L., 1999, Microorganisms in the accreted ice of Lake Vostok. *Science*, 1999, 286, 2144-2147.
- King, J.C., 1994, Recent climate variability in the vicinity of the Antarctic Peninsula. *International Journal of Climatology*, 27, 14(4), 357-369.
- Kwon, T.-Y. and Lee, B.Y., 2002, Precipitation anomalies around King Sejong Station, Antarctica associated with El Nio/Southern Oscillation. *Ocean and Polar Research*, 24(1), 19-31.
- Lawrimore, J.H., Halpert, M.S., Bell, G.D., Menne, M.J., Lyon, B., Schnell, R.C., Gleason, K.L., Easterling, D.R., Thiaw, W., Wright, W.J., Heim Jr., R.R., Robinson, D.A., and Alexander, L., 2001, Climate assesment for 2000. *Bulletin of the American Meteorological Society*, 82(6), S1-S55.
- Lee, B. Y., Cho, H.-K., Oh, S.-N., Jeong, M. J., and Won, Y.-I., 1999, Effects of total ozone decrease on the solar radiation and their variations at King Sejong Station in King George Island, West Antarctica. *Korean Journal of Polar Research*, 10(1), 9-16.
- Levitus, S., Antonov, J.I., Boyer, T.P., Stephens, C., 2000, Warming of the world oceans. *Nature*, 287, 2,225-2,229.
- Marshall, G.J., 2002, Antarctic near-surface temperature trends 1951-2001. <http://www.nerc-bas.ac.uk/icd/gjma>. British Antarctic Survey.
- Martin, J. H., Fitzwater, S. E., and Gordon, R. M., 1990, Iron deficiency limits phytoplankton growth in Antarctic waters. *Global Biogeochemical Cycles*, 4, 5-12.
- Mercer, J.H., 1978, West Antarctic ice sheet and CO₂ greenhouse effect: a threat of disaster. *Nature* 271(5643), 321-325.
- NASA, 2002, Total ozone mapping spectrometer; Ozone hole monitoring (1979- August 2002). <<http://toms.gsfc.nasa.gov/eptoms/dataqual/ozone.html>>.
- Noonan, F. and Lewis, F., 1995, UVB-induced immune suppression and infection with *Schistosoma mansoni*. *Photochemistry and Photobiology*, 61, 45-67.
- PAGES, 1999, PAGES Timestream 2-Long Records, 7(3), 1-2.
- Park, B.-K., Chang, S.-K., Yoon, H.I. and Chung, H., 1998, Recent retreat of ice cliffs, King George Island, South Shetland Islands, Antarctic Peninsula. *Annals of Glaciology*. 27, 633-635.
- Petit, J.R., Basile, I., Leruyet, A., Raynaud, D., Lorius, C., Jouzel, J., Stievenard, M., Lipenkov, V.Y., Barkov, N.I., Kudryashov, B.B., Davis, M., Saltzman, E., Kotlyakov, V., 1997, Four climate cycles in Vostok ice core. *Nature* 387, 359-360.
- Petit, J.R., Briat, M. and Royer, A., 1981, Ice age aerosol content from East Antarctic ice core samples and past wind strength. *Nature* 293, 391-394.
- Petit, J.R., Jouzel, J., Raynaud, D., Barkov, N.I., Barnola, J.-M., Basile, I., Benders, M., Chappellaz, J., Davis, M., Delaygue, G., Delmotte, M., Kotlyakov, V.M., Legrand, M., Lipenkov, V.Y., Laurius, C., Pepin, L., Ritz, C., Saltzman, E. and Stievenard, M., 1999, Climate and atmospheric history of the past 420,000 years from the Vostok ice core, Antarctica. *Nature*, 399, 429-436.
- Priscu, J. C., Adams, E. E., Lyons, W. B., Voytek, M. A., Mogk, D. W., Brown, R. L., McKay, C. P., Takacs, C. D., Welch, K. A., Wolf, C. F., Krishtein, J. D., and Avcı, R., 1999, Geomicrobiology of subglacial ice above Lake Vostok, Antarctica. *Science*, 286, 2141-2144.
- Pisciottano, G., Diaz, A., Cazes, G. and Carlos, M.R., 1994, El Nio- Southern Oscillation impact on rainfall in Uruguay. *Journal of Climate*, 7(8), 1,286-1,302.
- Revkin, A., 1992, *Global warming: Understanding the forecast*. Abbeville Press, New York, 180 p.
- Ropelewski, C.F. and Halpert, M.S., 1996, Quantifying Southern Oscillation -precipitation relationships. *Journal of Climate*, 9(5), 1,043-1,059.
- Ryan, P.G., Avery, G., Rose, B., Ross, G.J.B, Sinclair, J.C. and Vernon, C.J., 1989, The Southern Ocean seabird irruption to South African waters during winter 1984. *Cormorant*, 17(1-2), 41-55.
- SCAR bulletin 145, 2002, Stations of SCAR Nations operating in the Antarctic Winter 2001. 12 p.
- Schoeberl, M.R., and Hartmann, D.L., 1991, The dynamics of the strato- spheric polar vortex and its relation to springtime ozone depletions. *Science*, 251, 46-52.
- Siegert, M.J., Dowdeswell, J.A., Gorman, M.R. and McIntyre, N.F., 1996, An inventory of Antarctic sub-glacial lakes. *Antarctic Science*, 8(3), 281-286.
- Siegert, M.J., Cynan Ellis-Evans, J., Tranter, M., Mayer, C., Petit, J.-R., Salamantin, A., and Priscu, J. C., 2001, Physical, chemical and biological processes in Lake Vostok and other Antarctic subglacial lakes. *Nature*, 414, 603-609.
- Siegfried, W. R., 1985, Birds and mammals-Oceanic birds of the Antarctic. in (eds.) Bonner, W. N. and W. H. Walton, *Key Environments-Antarctica*, Pergamon Press, 242-265.
- Simpson, S., 2002, A Push from Above, *Scientific American*, 287(2), 9-10.
- Smith, I.N., Budd, W.F., and Reid, P., 1998, Model estimates of Antarctic accumulation rates and their relation-

- ship to temperature changes. *Annals of Glaciology*. 27, 246-250.
- Smith, R.C., Pr zelin, B.B., Baker, K.S., Bidigare, R.R., Boucher, N.P., Coley, T., Karentz, D., McIntyre, S., Matlick, H.A., Menzies, D., Ondrusek, M., Wan, Z., and Waters, K.J., 1992, Ozone depletion: Ultraviolet radiation and phytoplankton biology in Antarctic waters. *Science*, 255, 952-959.
- Thompson, D. W. J., and Solomon, S., 2002, Interpretation of recent southern hemisphere climate change, submitted to *Science*.
- Turner, J., Lachlan-Cope, T.A., Warren, D.E., and Duncan, C.N., 1993, A mesoscale vortex over Halley Station, Antarctica. *Monthly Weather Review*, 121(5), 1,317-1,336.
- Vaughan, D.G. and Doake, C.S.M., 1996, Recent atmospheric warming and retreat of ice shelves on the Antarctic Peninsula. *Nature* 379(6563), 328-331.
- Watson, G. E., 1975, *Birds of the Antarctic and Sub-Antarctic*. AGU, 350 p.
- Watson, R.T., Zinyowera, M.C. and Moss, R.H., 1997, The regional impacts of climate change: An assessment of vulnerability, Cambridge University Press, New York, 517 p.
- Wessel, S., Aoki, S., Winkler, P., Weller, R., Herber, A., Gernandt, H. and Schrems, O., 1998, Tropospheric ozone depletion in polar regions: A comparison of observations in the Arctic and Antarctic. *Tellus* 50B, 34-50.
- WMO, 1998, Scientific assesment of ozone depletion: 1998, Executive summary, NOAA/NASA/UNEP/WMO. WMO Global Ozone Research and Monitoring, Project-Report 44, 43 p.
- WMO, 2000, WMO Antarctic Ozone Bulletins # 1/2000-8/2000.
- Yung, Y.L., Lee, T., Wang, C.-H., Shieh, Y.-T., 1996, Dust: A Diagnostic of the Hydrologic Cycle During the Last Glacial Maximum. *Science*, 271, 962-963.
- Zepp G.R., Callaghan T.V. and Erickson D.J., 1995, Effects of increased solar ultraviolet radiation on biogeochemical cycles. *Ambio* 24(3), 181-187.

2002년 10월 4일 원고 접수
 2003년 3월 17일 수정원고 접수
 2003년 3월 22일 원고 채택