

Article

세종기지 주변에서 관찰된 빙벽 후퇴와 바다 결빙

정호성* · 이방용 · 장순근 · 김지희 · 김예동

한국해양연구원 극지연구소
(425-600) 경기도 안산시 안산우체국 사서함 29호

Ice cliff retreat and sea-ice formation observed around King Sejong Station in King George Island, West Antarctica

Hosung Chung*, Bang Yong Lee, Soon-Keun Chang, Ji Hee Kim, and Yeadong Kim

Korea Polar Research Institute, KORDI
Ansan P.O. Box 29, Seoul 425-600, Korea

Abstract : Ice cliff retreat and sea-ice formation around King Sejong Station in King George Island were analysed and compared with air temperature change. Analysis of 33-year (1969-2001) air temperature records at Bellingshausen Station has revealed regional atmospheric warming, and the increasing rate of air temperature is equivalent to a warming of 1°C for 27-year period. Here we present time-series of observations for the areal extent of the ice cliff and ice sheet, showing that they have retreated dramatically in the past 45 years (1956-2001). Retreat of 1,050 m in length of the ice cliff has changed the Marian Cove into a low rectangular form of 4 km in length and 1 to 1.3 km in width. The retreat rates have since increased from 6 m/yr of the primary investigated period to 54 and 81 m/yr in the recent years. Exceptionally, the ice cliff had been advanced of 21 m in length for a year between 1987 and 1988 of cold winters. Ice sheet in King George Island also shows a similar decrease, and the decreasing extent is much larger at the southern part of the Marian Cove, relatively more exposed to the sun, than at the northern part. Comparing sea-ice formation in winter with air temperature data shows a pattern starting to freeze below -5°C and to thaw over -3°C. It is conclusively estimated that the patterns and magnitudes of ice cliff retreat and sea-ice formation are consistent with fluctuations of the air temperature, and that the recent rapid retreat of ice cliff and less formation of sea-ice are caused especially by the warming trends in autumn accompanied with expansion of summer thawing period.

Key words : 남극(Antarctica), 빙벽 후퇴(ice cliff retreat), 온난화(warming), 킹조지섬(King George Island), 해빙(sea-ice)

1. 서 론

대기중 이산화탄소 급증에 따른 온실효과로 빚어지는 지구온난화는 최근 국제적으로 관심의 초점이 되고 있다(Mercer 1978; Vaughan and Doake 1996; 장 등 1998; Vaughan *et al.* 2001). 지구온난화의 가장 큰 폐해로 예상되는 해수면 상승(sea-level rise)은 극지방의 얼음이 녹음

으로써 비롯되는 현상이며, 특히 그 가운데에서도 남극권의 빙하(氷河 glacier)와 빙붕(氷棚 ice shelf)의 융해와 붕괴가 그 주된 현상으로 평가되고 있다(Vaughan and Doake 1996; Mitrovica *et al.* 2001).

얼음의 융해는 기온의 변화와 밀접한 관계를 가지고 있으므로, 남극권에서도 해양성남극역(maritime Antarctic region)에 속하는 남극반도 주변역의 빙하와 빙붕의 붕괴는 지구 기후변화의 좋은 지표로 평가되고 있다(Ward 1995; Vaughan and Doake 1996; King and Harangozo

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

1998; Park *et al.* 1998). 불과 최근인 2002년 1월 31일 남극반도의 라르센-B 빙붕이 30년만에 최대 규모로 붕괴된 사실은 이런 점에서 주목할 만한 사실이다(NSIDC 2002).

이러한 관점에서 세종기지(62°13'S, 58°47'W)가 위치한 킹조지섬 마리안소만 일대에 발달한 해안빙벽(ice cliff)과 내륙빙상(ice sheet)의 말단은 기후변화를 감지하고 예측할 수 있는 좋은 지표라 할 수 있다. 1988년 이곳에 기지를 건립한 우리 나라는 그간 자료 누적기간의 짧음으로 말미암아 이의 분석을 수행치 못하다가, 기지 설립 이전의 이 지역 항공사진을 입수한 Park *et al.*(1998)에 의해 1956년 이래 1994년까지의 마리안소해와 포터소만의 빙벽 후퇴상이 처음으로 조사된 바 있다. 그러나, 그들의 연구에서는 조사기간 중의 빙벽 후퇴면적과 해빙의 결빙 양상만이 보고되었을 뿐 환경요인과 관련한 구체적 분석은 이루어지지 못하였다.

이 연구는 그 후속으로서, Park *et al.*(1998)의 자료에 1984년의 칠레공군 항공사진과 2001년 우리 나라의 인공위성 '아리랑 1호'에서 촬영된 위성사진을 추가하고 1969년 이래 러시아 벨링스하우젠 기지에서 관측된 기온자료를 입수하여, 마리안소만 빙벽과 인근 내륙빙상의 변화 양상을 기온 변화와 관련하여 좀더 세밀히 파악하고자 시도되었다.

이러한 연구결과는 온난화가 더욱 가속화된다고 가정할 때, 남극권 전체에 파급될 수 있는 빙원의 유실 기작과 정도를 유추할 수 있는 좋은 지표가 되리라 생각된다. 또한 생물 군집 변화와 천이 양상과 같은 생태계 연구나 해양 지화학적인 연구 등 여타 자연과학 분야와 연계하여 기후 변화와 관련해 발생될 수 있는 제반 자연 현상을 예측하고, 역으로 기후변화를 감지할 수 있는 지표를 설정하는데 있어 중요한 기초자료로서 활용될 수 있으리라 기대된다.

2. 재료 및 방법

조사지의 개황

연구 대상지역인 마리안소만은 남극반도의 북쪽 끝에 위치한 남셰틀랜드군도 킹조지섬의 맥스웰만에 발달한 협만 가운데 하나로서, 폭은 1 km, 길이는 4 km에 달한다(Fig. 1).

마리안소만은 맥스웰만 내의 포터소만, 콜린스하버 등 여타 협만들과 견주어 볼 때 해안빙벽이 매우 잘 발달되어 있어서, 대기 및 수온의 상승과 관련하여 빙벽의 후퇴 양상을 관찰하기에 가장 적합한 곳으로 평가된다. 포터소만과 콜린스하버의 빙하 말단은 해안까지 뻗어 있기는 하나 그 대부분이 노출된 육지 위에 얹혀져 있는 반면, 마리안소만의 해안빙벽 하부 수심은 무려 100 m에 이른다(Fig. 1).

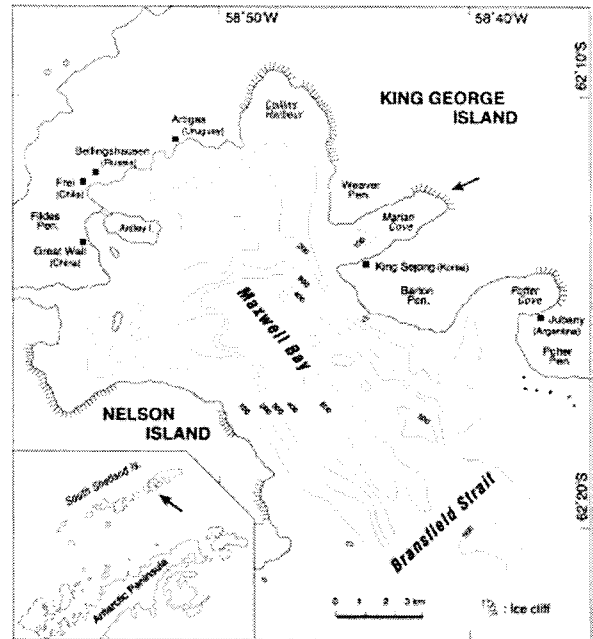


Fig. 1. Location map of study area.

기온 자료 분석

마리안소만의 빙벽 후퇴와 관련하여, 가장 큰 요인 중의 하나로 예상되는 기온 자료 분석에는 1969년부터 2001년까지 러시아 벨링스하우젠기지(62°12'S, 58°58'W)에서 관측된 자료를 활용하였으며, 세종기지의 자료는 14년이란 짧은 관측기간으로 말미암아 추세분석에 어려움이 있어 참고치로만 활용하였다.

자료 분석은 빙벽 후퇴가 관찰된 각 조사시점간의 년평균값과 계절 평균값을 산출하여 회귀분석 등을 통해 빙벽 후퇴와의 상관을 고찰하였다. 계절의 구분은 봄(9-11월), 여름(12-2월), 가을(3-5월), 겨울(6-8월)로 하였다(Marshall 2002).

해안빙벽 후퇴 분석

해안빙벽 후퇴 분석에 사용된 이미지 자료들의 목록은 Table 1과 같다. 선행 연구인 Park *et al.*(1998)에 추가된 이미지는 1984년 1월 칠레공군에 의해 촬영된 항공사진과 2001년 4월 우리 나라의 인공위성 '아리랑 1호'의 고 해상도 카메라로 촬영된 위성사진이다(Fig. 2).

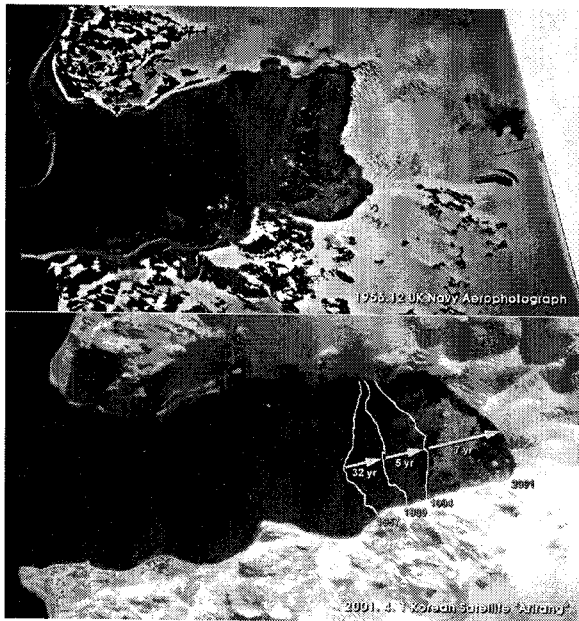
이미지들의 화상분석은 PowerMac G4 컴퓨터 상에서 이루어졌다. 우선 각각의 자료들을 스캐너를 이용해 디지털화한 후, Illustrator 프로그램으로 축척을 동일화시켜서 빙벽의 윤곽선을 벡터도로 제작했다. 제작된 벡터도를 Canvas 프로그램으로 옮겨, 이미 알고 있는 지도의 기준점을 활용하여 축척의 절대값을 정의한 후 길이와 면적을 산출하였다. 빙벽의 평균 후퇴길이는 후퇴면적을 후퇴면

Table 1. Types and sources of image data used for analysing the retreat of ice cliff in the present study.

Year	Type	Source
20 Dec. 1956	aerial photograph	Royal Navy (UK)
Jan. 1984	aerial photograph	Chilean Air Force (Chile)
21 Dec. 1986	aerial photograph	Chilean Air Force (Chile)
4 Jan. 1989	aerial photograph	Royal Navy (UK)
Jan. 1994	topographic survey	Kim and Baek (1995) KORDI* (1996) (Korea)
1 Apr. 2001	satellite photograph	KARI** (Korea)

*Korea Ocean Research and Development Institute.

**Korea Aerospace Research Institute.

**Fig. 2. Photographs shown the recent retreat of the ice cliff in Marian Cove, King George Island between December 1956 and April 2001.**

적 내에서의 평균폭으로 나누어 구하였다.

내륙빙상 감퇴 관찰

얼음의 말단이 해수와 맞닿아 있는 해안빙벽과 달리 지층에 얽혀져 있는 내륙빙상의 용해를 관찰하였다.

내륙빙상의 감퇴 양상 분석에는 1956년 12월과 1989년 1월, 그리고 2001년 4월의 사진 자료가 활용되었다. 그러나, 위성사진인 2001년 4월의 자료를 제외하고는 폭넓은 지역이 조사되지 않았고, 초여름인 12월 사진의 경우 빙상과 눈의 구분이 불명확하여 정량적 비교는 불가능했다.

해빙(sea ice) 형성 관찰

1988년 세종기지 건립 이래 2000년까지 관찰된 마리안

소만과 맥스웰만의 결빙 유무와 상태를 월평균 기온 자료와 비교해 고찰해 보았다.

3. 결 과

기온 분석 결과

벨링스하우젠기지 관측 자료(1969년-2001년)

벨링스하우젠기지에서 33년간 관측된 기온 자료를 분석해 보면, 년평균 기온의 누년 평균값은 -2.4°C 였으며, 최고 -0.7°C (1989년), 최저 -4.0°C (1980년)로서 해에 따라 불규칙한 변화를 보였다(Table 2).

년평균 기온의 변화 양상을 파악하기 위하여 선형회귀 분석을 실시한 결과 비교적 높은 신뢰도($p=0.013$)를 얻을 수 있었다(Fig. 3a). 회귀선에 따르면 기온은 매년 약 0.037°C 씩 상승하는 것으로 평가된다. 이는 알기 쉽게, 27년에 약 1°C 의 상승폭을 갖는 것을 의미한다.

이를 계절별로 구분해 살펴보면, 비록 변동폭은 컸으나 겨울의 온도 상승이 다른 계절에 비해 두드러졌다(Fig.

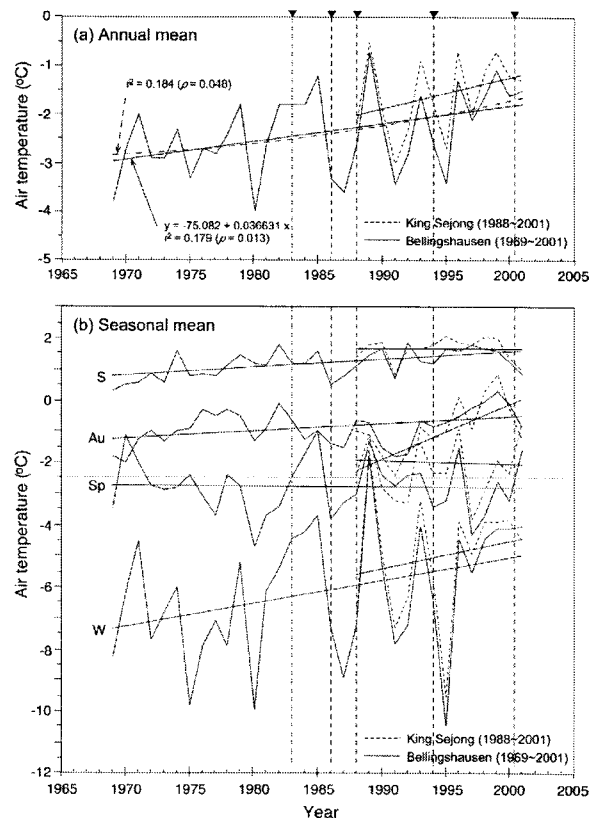
**Fig. 3. Annual variation of mean air temperature at Bellingshausen Station and King Sejong Station. Vertical dot lines indicated each point of time analysing the retreat of the ice cliff in the present study.**

Table 2. Monthly mean air temperature (°C) measured at Bellingshausen Station, King George Island.

Year	Jan	Feb	Mar	Apr	May	Jun	Jul	Aug	Sep	Oct	Nov	Dec	Annual
1969	0.5	0.3	-1.8	-3.7	-5.5	-9.6	-8.1	-7.2	-3.2	-5.1	-2.2	0.2	-3.8
1970	0.7	0.5	-1.1	-3.3	-7.5	-8.7	-3.7	-6.1	-1.5	-1.4	-0.3	0.4	-2.7
1971	1.6	1.0	0.7	-1.1	-6.6	-2.7	-4.5	-6.2	-4.3	-1.4	-0.3	-0.7	-2.0
1972	1.1	0.6	-0.3	-2.7	-3.2	-7.3	-5.7	-10.0	-4.4	-2.4	-1.3	1.0	-2.9
1973	0.1	1.2	0.2	-2.1	-5.8	-8.8	-6.8	-4.9	-5.6	-2.3	-0.8	0.5	-2.9
1974	1.4	2.2	1.3	-3.3	-3.8	-5.3	-5.0	-7.8	-5.1	-1.8	-1.4	1.1	-2.3
1975	1.3	1.0	0.6	-1.4	-4.6	-7.3	-12.0	-11.0	-4.7	-1.3	-1.3	0.2	-3.3
1976	1.0	1.9	0.8	-0.2	-2.6	-5.1	-10.0	-8.3	-6.2	-2.6	-0.6	-0.2	-2.7
1977	1.0	1.3	0.0	-0.7	-2.5	-4.8	-8.3	-8.1	-7.1	-3.4	-0.6	0.0	-2.8
1978	1.4	1.9	0.5	-0.9	-1.1	-5.0	-11.0	-7.7	-3.4	-2.0	-1.7	0.0	-2.4
1979	2.1	1.8	0.8	-0.4	-3.2	-5.2	-4.4	-5.9	-3.4	-3.0	-1.8	0.6	-1.8
1980	1.9	1.6	-0.2	-4.6	-3.0	-6.4	-12.0	-11.0	-7.9	-3.5	-2.8	0.0	-4.0
1981	0.9	1.8	-0.1	-1.0	-4.0	-4.4	-4.4	-9.5	-5.1	-4.6	-1.4	0.5	-2.6
1982	2.4	2.1	0.7	0.0	-1.2	-3.0	-7.1	-6.0	-4.9	-3.4	-2.0	0.9	-1.8
1983	1.5	1.2	0.4	-0.8	-3.4	-4.9	-5.3	-3.1	-4.3	-2.7	-0.5	0.8	-1.8
1984	1.0	1.6	0.7	-1.8	-6.2	-4.7	-4.3	-3.5	-1.4	-3.1	-0.5	1.1	-1.8
1985	2.2	1.8	-0.7	-0.9	-4.1	-4.4	-3.1	-3.7	-1.5	-1.5	0.1	0.9	-1.2
1986	1.1	1.0	1.2	-1.9	-7.7	-7.3	-7.2	-7.3	-5.8	-2.8	-2.9	-0.5	-3.3
1987	0.8	1.0	0.1	-3.2	-5.6	-7.8	-14.0	-5.2	-6.7	-2.8	-0.4	0.7	-3.6
1988	1.3	2.3	-0.2	-1.4	-2.2	-7.2	-5.6	-8.9	-3.8	-3.3	-1.9	-0.2	-2.6
1989	1.3	2.2	2.1	-4.7	-1.3	-2.1	-1.1	-2.2	-3.1	-0.8	-0.1	1.1	-0.7
1990	2.2	2.7	1.0	-4.7	-5.2	-4.8	-5.6	-5.5	-3.6	-2.4	-1.1	0.2	-2.2
1991	1.6	0.6	-0.8	-2.8	-7.4	-9.6	-6.6	-7.3	-3.3	-3.7	-1.0	-0.2	-3.4
1992	2.4	1.4	-0.8	-0.6	-8.7	-8.6	-8.0	-4.9	-2.9	-3.4	-1.0	1.8	-2.8
1993	1.6	2.1	0.1	-1.3	-2.4	-4.2	-3.5	-4.2	-3.8	-2.4	-0.7	0.1	-1.6
1994	1.7	1.3	0.6	-1.4	-4.2	-4.2	-11.0	-4.4	-3.9	-6.0	-0.3	0.7	-2.6
1995	2.3	2.0	-0.1	-1.5	-2.6	-6.8	-13.0	-12.0	-6.5	-1.9	-1.3	0.7	-3.4
1996	1.6	2.4	1.2	-1.5	-2.6	-5.1	-3.8	-4.3	-2.0	-1.9	-0.5	0.8	-1.3
1997	2.8	2.1	1.7	-1.4	-1.7	-4.6	-6.5	-5.5	-7.3	-3.2	-2.5	0.5	-2.1
1998	2.4	2.3	1.1	0.9	-1.8	-1.2	-5.1	-6.8	-8.1	-2.3	-0.7	0.3	-1.6
1999	1.9	1.9	1.7	0.8	-0.8	-3.7	-3.4	-5.3	-5.6	-2.0	-0.2	1.0	-1.1
2000	1.8	1.9	0.8	0.0	-1.5	-2.4	-3.5	-6.5	-6.0	-2.0	-1.5	0.1	-1.6
2001	1.3	0.4	-0.1	-3.1	-1.3	-1.8	-7.0	-3.1	-3.0	-1.3	-0.5	1.0	-1.5
Mean	1.5	1.6	0.4	-1.7	-3.8	-5.4	-6.7	-6.5	-4.5	-2.7	-1.1	0.5	-2.4

Months below the threshold (-2.5°C) for melting by Vaughan and Doake (1996).

3b). 여름과 가을의 온도도 비록 그 상승폭은 적으나 유사한 경향을 보인 반면, 봄의 온도는 거의 상승하지 않는 것이 특이하였다.

그러나 정작 여기서 주목할 사실은, 느린 상승세에도 불구하고 여름과 초가을(12월-이듬해 3, 4월)의 기온이 최근에 이르러 계속 영상을 기록하고 있다는 점이다(Table 2, Fig. 3). 이는 곧 빙원의 용해와 빙벽의 후퇴가 가속될 수 있음을 의미한다.

세종기지 관측 자료(1988년-2001년)

세종기지 건립 이래 14년간 관측된 기온 자료를 분석해 보면, 년평균 기온의 누년 평균값은 -1.6°C 였으며, 최고 -0.5°C (1989년), 최저 -3.0°C (1991년)를 기록하였다(Table 3).

회귀분석 결과, 관측 기간중 년평균 기온 상승폭(기울기 0.064)은 벨링스하우젠기지의 값(기울기 0.037)보다 두 배 정도 큰 것으로 나타났으나, 관측 햇수가 짧아 아직 통계

Table 3. Monthly mean air temperature (°C) measured at King Sejong Station. Sea-ice formations in Marian Cove and Maxwell Bay were also presented.

Year	Jan	Feb	Mar	Apr	May	Jun	Jul	Aug	Sep	Oct	Nov	Dec	Annual
1988	1.5	2.3	-0.1	-1.1	-1.9	-7.6	-4.8***	-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

<Melting of ice cliff>

Threshold (-2.5) for melting

Freeze/melt repeated

based on Vaughan and Doake (1996)

<Freezing of sea in Marian Cove>

Partial and temporal (few days) freezing (*)

Nearly full area and above a half month freezing (**)

Every day full area freezing (***)

cf) *, **, ***: in Maxwell Bay

적으로 신뢰할 수 있는 값은 아니었다(Fig. 3a). 그러나 이러한 경향은 벨링스하우젠기지의 기온변화 회귀분석을 2차 방정식으로 수행해보면 1989년 이후 유사한 기울기의 상승곡선을 보여주어, 최근의 온도 상승폭이 과거에 비해 커지고 있음을 감지할 수 있게 했다.

한편, 세종기지의 기온 누년 평균값 -1.6°C 는 동일기간(1988-2001) 중 벨링스하우젠기지의 -2.0°C 보다 0.4°C 높게 기록되었다(Tables 2, 3, Fig. 3a). 이는 관측소 주변 지형의 특성에 따른 것으로 판단된다(Kwon and Lee, 2002).

빙벽 후퇴 분석 결과

1956년 12월부터 2001년 4월까지 44년 동안 마리안소만의 빙벽은 $1,125,214 \text{ m}^2$ 의 면적만큼 후퇴하였다(Table 4). 후퇴 해역의 평균 폭 $1,070 \text{ m}$ 를 감안할 때 후퇴된 길이는 총 $1,052 \text{ m}$ 에 해당된다. 결과적으로 1956년 길이 2.7 km 에 불과했던 마리안소만은 2001년 4월 현재 길이 4 km , 폭 $1.0\text{-}1.3 \text{ km}$ 의 장방형의 만으로 확장되었다(Fig. 4).

초기 시점인 1956년 12월을 기준하여 다섯 차례의 기간별로 후퇴된 길이를 비교해 보면, 1956년 12월부터 1984년 1월까지의 27년 동안 169 m 가 후퇴하였으며, 1984년 1월부터 1986년 12월까지의 3년 동안에는 87 m

가 후퇴한 반면, 1986년 12월부터 1989년 1월까지의 2년 간은 오히려 42 m 를 전진하였다(Table 4). 그러나 1990년 대로 접어들면서, 1989년 1월부터 1994년 1월까지의 5년 동안 270 m 가 후퇴하였고, 이후 1994년 1월부터 2001년 4월까지의 최근 7년여 동안에는 569 m 가 후퇴하였다.

한 가지 특기할 만한 사실은 1980년대에 관찰된 빙벽의 전진 양상이다. 1984년 1월부터 1986년 12월까지 만의 북쪽 해안 근처에서 부분적이긴 하지만 $1,174 \text{ m}^2$ 의 면적이 전진하였으며, 1986년 12월부터 1989년 1월 사이에는 전체 빙벽이 $45,166 \text{ m}^2$ 의 면적만큼 고르게 전진하였다(Table 4). 이와 같은 관점에서, 조사기간 중 가장 추웠던 1980년 등의 해에도 이와 유사한 전진이 있었을 것으로 판단되나 자료 부재로 말미암아 구체적인 증거는 제시하지 못하였다(Table 2).

기간별 연평균값을 비교해 보면, 1989년 이후 빙벽의 후퇴 속도가 급속히 증가하고 있음을 알 수 있다. 조사 초기 시점인 1956년 12월부터 1984년 1월까지 6 m/yr 에 머물던 후퇴 길이가 최근에 이르러서는 1989년 1월부터 1994년 1월까지 54 m/yr , 1994년 1월부터 2001년 4월까지 81 m/yr 로 커졌다(Table 4).

한편, 바다와 맞닿아 있는 빙벽의 형성면은 1993년까지

Table 4. Recent retreat of ice cliff observed in Marian Cove, King George Island, Antarctica.

Period (yrs)	Area (m ²)			Length (m)			Annual mean	
	Retreat	Advance	Total	Min.	Max.	Mean*	Area (m ²)	Length (m)
1957-1983 (27)	180,383	0	180,383	0	292	169	6,681	6.2
1984-1986 (3)	93,849	1,174	92,675	-22	171	87	30,892	28.9
1987-1988 (2)	0	45,166	-45,166	0	-101	-42	-22,583	-21.1
1989-1993 (5)	288,848	0	288,848	74	335	270	57,770	54.0
1994-2000 (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 1,070 m in the total retreat area

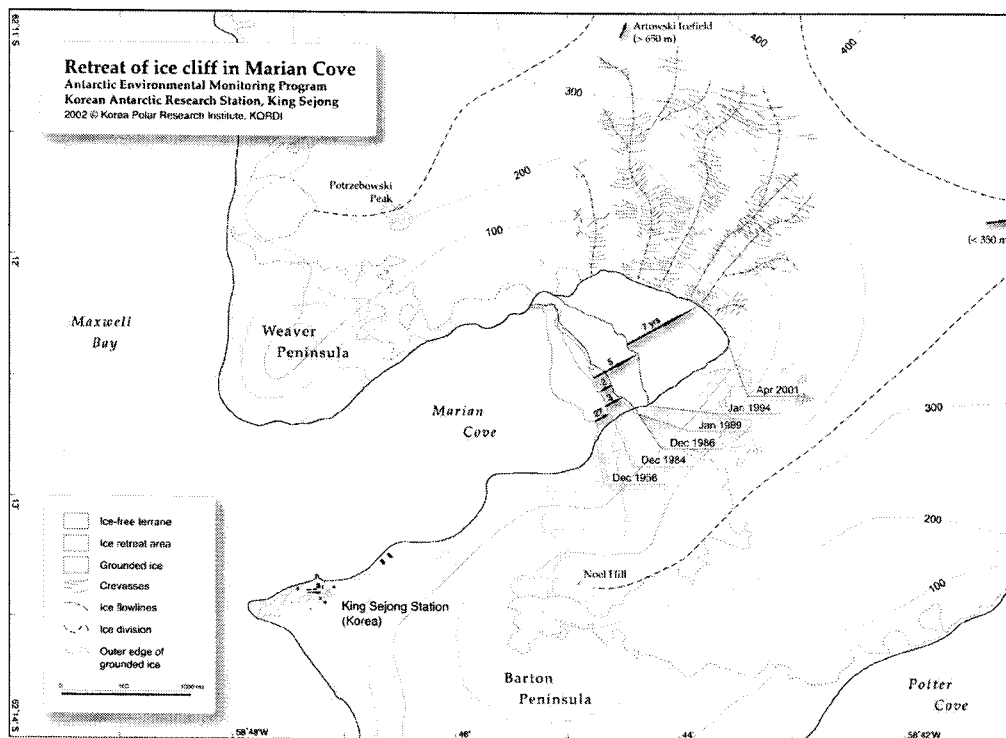


Fig. 4. Recent retreat of ice cliff and grounded ice observed around King Sejong Station in King George Island between December 1956 and April 2001.

는 만의 길이 방향에 거의 수직으로 발달해 있었으나, 최근에 이르러서는 만 중앙 남쪽면에서의 후퇴가 눈에 띄게 증가하였다(Fig. 4). 이는 마리안소만 빙벽의 후퇴를 유발시키는 빙하의 흐름이 주로 북동쪽에 위치한 높이 650 m 이상의 아르토우시키 빙원(Artowski Ice Sheet)으로부터 비롯되며, 붕괴되는 만큼 이로부터 흘러드는 양도 많기 때문인 것으로 생각된다. 이는 크리베스의 발달을 기초로 유추해 본 빙하의 흐름선을 보아도 잘 구분되었다(Fig. 4). 이에 반하여, 빙원의 최대높이가 350 m 이하에 불과한 만 남쪽면에서는 얼음의 양이 풍부하지 못하기 때문에, 이러한 후퇴 양상은 앞으로도 지속될 것으로 예상된다.

Table 5. Mean annual air temperature (°C) data at Bellingshausen Station between the points of time analysing the retreat of the ice cliff in this study.

Period (yrs)	Aut	Win	Spr	Sum	Annual
1969-1983 (15)*	-1.82	-6.88	-2.91	0.99	-2.65
1984-1986 (3)	-2.38	-5.06	-2.16	1.13	-2.10
1987-1988 (2)	-2.08	-8.08	-3.15	0.98	-3.10
1989-1993 (5)	-2.50	-5.21	-2.22	1.41	-2.14
1994-2000 (7)	-0.59	-5.65	-3.13	1.55	-1.96
Total (32)	-1.72	-6.25	-2.79	1.19	-2.40

*Bellingshausen Station was inaugurated in 1968.

빙벽 후퇴와 기온의 상관

마리안소만 빙벽의 후퇴에 미치는 기온의 영향을 파악하기 위하여, Table 5와 같이 각 조사시점 사이의 기온 년 평균값과 계절 평균값을 산출한 후 Table 4의 동일기간 중 빙벽의 후퇴길이나 비교해 보았다(Figs. 5, 6).

그 결과, 기온의 년평균값과 여름 평균값이 빙벽의 전진 및 후퇴와 유사한 경향을 보였다(Fig. 5). 겨울과 봄의 기온 평균값은 빙벽이 최대로 후퇴한 1994년부터 2001년 사이 오히려 낮아지는 양상을 띠었다.

이러한 양상은 Fig. 6의 기온 개별 항목과 빙벽 후퇴간의 회귀 분석 결과를 살펴보면 더욱 확연하여, 기온의 년평균값과 여름 평균값만이 통계학적으로 유의하였다. 또한, 이 두 항목 중에서도 여름 평균값의 유사도와 신뢰도

가 년 평균값의 그것보다 오히려 높아, 빙벽의 후퇴와 더욱 밀접한 관계가 있는 것으로 평가되었다.

한편, 계절별 기온 평균값의 년 변화와 조사기간별 계절 평균값을 비교해보면(Figs. 3b, 5), 1994년부터 2000년 동안의 최근 빚어지고 있는 대량의 빙벽 후퇴에는 과거의 양상과는 달리 가을의 온도 상승이 크게 기여하고 있음을 알 수 있다.

내륙빙상의 감퇴 양상

마리안소만 일대의 내륙빙상 감퇴 양상은 북쪽인 위버반도와 남쪽인 바톤반도가 잘 대조되어, 위버반도에 비해 바톤반도쪽 내륙빙상의 용해 면적이 매우 컸다(Fig. 4). 이는 기본적으로 기온이 내륙빙상의 용해 여부를 결정지을 것이나, 태양의 복사열을 감안할 때 태양광을 직접적으로 많이 받는 남쪽의 얼음이 빨리 녹았기 때문인 것으로 판단된다. 바톤반도의 경우 노엘봉(Noel Hill)을 기점으로 마리안소만에 평행하게 발달한 능선의 북쪽 사면 내륙빙상은 거의 대부분 용해된 반면, 남쪽 사면의 내륙빙은 비교적 그 상태를 유지하고 있었다.

해빙(sea ice)의 형성 양상

1988년 세종기지 건립 이래 2001년까지 관찰된 마리안소만의 결빙 상태와 기온을 비교해 보면(Table 3), 대체로 겨울철 월평균 기온이 -5°C 이하로 떨어졌을 때 결빙되기 시작하여, 온도가 -3°C 이상으로 상승하면 녹거나 깨어져 나가는 경향을 보여주었다. 결빙 지속기간 또한 이에 따라 결정되는 것으로 보인다. 월평균 기온이 그 이상에 머물렀던 1989년과 1996년에는 마리안소만은 거의 결

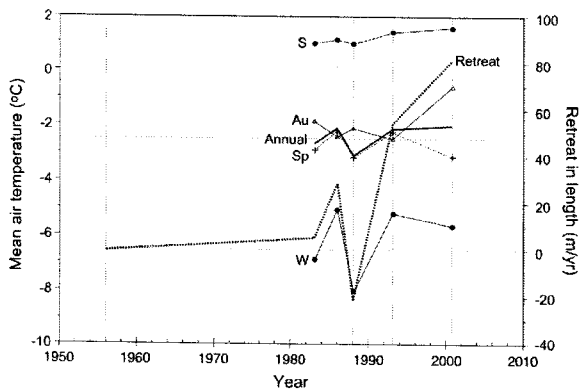


Fig. 5. Comparison of air temperature and retreat of ice cliff. Mean values during each period between image spots for analysing retreat of the ice cliff.

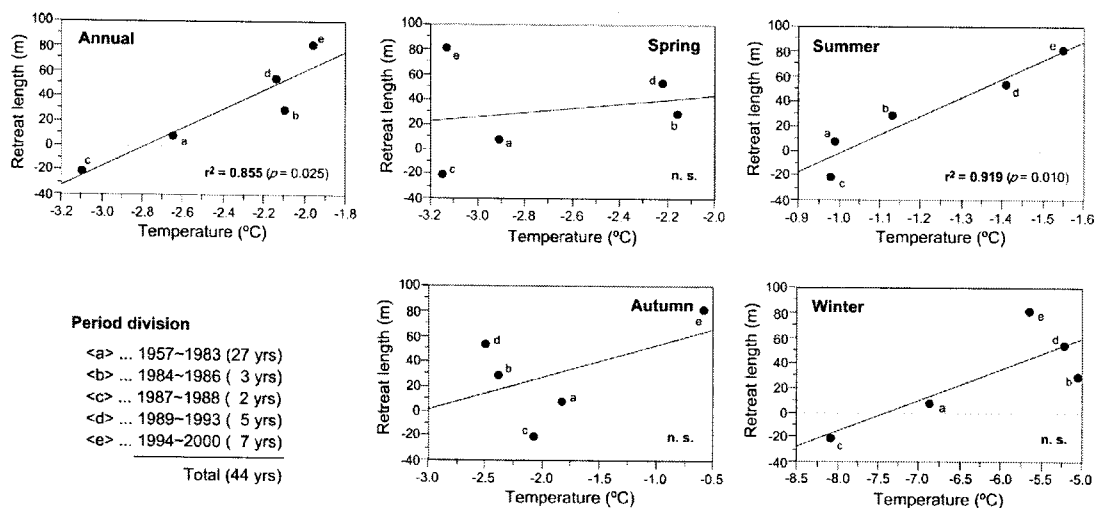


Fig. 6. Relationship between the ice cliff retreat and the air temperature. Annual mean data of the retreat length in Table 4. Annually mean data of air temperature in Table 5. Spring (S-O-N), Summer (D-J-F), Autumn (M-A-M), Winter (J-J-A) in austral. n.s., not significant ($p > 0.05$).

빙되지 않았다.

마리안소만 결빙에 이어 진행되는 맥스웰만의 결빙 또한 이와 유사한 경향을 보이며, 저온의 지속 여부에 따라 결빙 유무와 지속기간이 결정되는 것으로 보인다.

그러나, 해빙의 형성에는 기온 이외에도 표층수온, 바람과 조석 등 다른 환경요인들이 복합적으로 영향을 미치는 것으로 생각된다. 이에 대해서는 추후 자료 보안을 통하여 보다 구체적인 분석을 실시할 계획이다.

4. 고찰

기온이 상승하면 얼음 녹은 물이나 강수로 인해 얼음의 파괴강도(fracture toughness)가 약해지며(Tison *et al.* 1993), 빙하나 빙봉의 표면에 발달한 작은 틈으로 물이 스며들어 얼음이 갈라져 크리베스를 형성시킨다(Doake and Vaughan 1991). 지속적으로 물이 유입되면 크리베스는 더욱 넓고 깊어져 말단의 얼음은 결국 붕괴되어 떨어져 나간다(Sabol and Schulson 1989; Park *et al.* 1998). 이와 같이, 얼음의 용해와 붕괴가 기온 상승과 밀접한 관계가 있다는 것은 분명한 사실이다.

최근 남극반도 주변에서 관찰되고 있는 빙하와 빙봉의 급속한 붕괴 현상은 지구온난화와 관련하여 과학자와 일반인 모두에게 관심의 초점이 되고 있다. 그러나, 대기과학·빙하학 등을 연구하는 남극과학자들은 이를 지구온난화에 의한 현상이라기보다는 남극반도 주변의 지역대기온난화(regional atmospheric warming)에 기인한 것으로 보는 의견이 아직은 우세하다(Doake and Vaughan 1991; Vaughan and Doake 1996). 실제 Marshall(2002)에 의해 종합된 최근 50년간 남극의 각국 기지에서 관측된 기온 분석자료를 살펴보면, 우리의 연구지역을 포함하는 남극반도 일대에서는 년평균 기온이 뚜렷한 상승세를 보이고 있으나, 동남극 지역의 대부분은 오히려 약간 감소하는 경향을 보인다.

남극반도 일대에서의 기온 상승과 관련하여, 패러데이기지(현 우크라이나 베르나드스키기지, 65°15'S, 64°16'W)에서는 1945년 이후 매년 0.056°C씩 올라가 연평균 기온이 약 2.5°C 상승된 것으로 관측되었으며(King 1994; Vaughan and Doake 1996), 벨링스하우젠기지에서는 1969년부터 2001년까지 매년 0.037°C씩 올라가, 27년에 약 1°C 상승한 것으로 평가되었다.

남극반도 인근 지역의 온난화 현상을 일으키는 기작으로는 1) 해류 순환의 변동에 의한 온난한 순환심층수(Circumpolar Deep Water)의 유입(Hofmann *et al.* 1996), 2) 남극반도 상공 대기 순환의 거대한 변동(King and Harangozo 1998), 3) 전지구적 기후변화가 해빙(sea-ice)의 분포를 변화시킴으로써 지역적인 해수-얼음-대기간의

되먹임(feedback) 현상(Vaughan *et al.* 2001) 등이 주목되고 있다. 그러나 엄밀히 말하자면 이에 대한 명확한 결론을 내리기에는 아직 그 관측 횟수가 매우 부족하다고 볼 수 있다. 이를 위해서는 보다 장기적인 관찰과 자료의 교환 노력이 필요하다.

이러한 온난화 여부에 대한 논의와 상관없이, 최근 보여지는 남극반도 일대의 기온 상승은 빙벽과 빙봉의 후퇴에 절대적인 영향을 주고 있다. 2002년 1월말 붕괴된 라르센-B 빙봉의 면적은 3,250 km², 약 7,200억 t에 달하며, 현재 남은 빙봉의 면적은 과거의 불과 40% 미만이다(NSIDC 2002). 우리의 연구결과, 마리안소만의 해안빙벽은 지난 44년간 1 km를 후퇴하여 피요르드의 형태를 길이 4 km, 폭 1-1.3 km의 장방형으로 변모시켰다.

한편, 빙벽의 후퇴 양상은 기온의 변화폭이 큰 겨울보다는 그 폭은 작으나 여름 기온의 미세한 상승과 지속기간에 매우 민감하게 반응하였다. 그러나 정도의 차이를 고려하더라도, 빙벽의 후퇴가 여름에만 국한되는 것은 아니며, 기온 상승 이외에도 다양한 요인들의 복합 작용에 의해 조건만 형성된다면 어느 계절이던 얼음은 깨어져 나갈 수 있다고 사료된다. 이러한 요인들로는 복사열과 연관된 광도, 일조량, 바람이나 강수 등을 예로 들 수 있으며, 해안빙벽이나 빙봉의 경우 내륙빙상과 달리 해수온도와도 밀접한 관계가 있을 것이다.

Vaughan and Doake(1996)는 위성 극초단파 자료를 이용해 남극반도의 여름 해빙기간을 조사한 결과, 얼음이 녹는 기온의 저온 한계치는 월평균 -2.5°C이며, 얼음이 녹는 면적은 온도 상승과 함께 급격하게 증가한다고 보고하였다. 이런 관점에서 최근 5년간 관찰된 가을 기온의 상승과 마리안소만 빙벽의 후퇴량 급증은 주목할 필요가 있다. 즉 기온 상승은 전반적으로 여름 해빙기간을 확대시키며, 봄보다는 여름에서 가을로 이어지는 고온 환경의 지속이 이 지역의 빙벽 후퇴를 가속화시킨 것으로 생각된다. 실제 1998년부터 2000년까지의 월별 기온을 살펴보면 과거와는 달리 4월까지 영상의 온도가 기록되었으며, Vaughan and Doake(1996)가 제시한 저온 한계치를 감안한다면 7-9월을 제외하고는 지속적으로 빙벽이 붕괴되었다고 볼 수 있다(Table 2, Fig. 5). 이러한 현상은 빙벽 후퇴 뿐만 아니라 겨울 바다 결빙에도 영향을 미쳐, 과거에 비해 결빙기가 짧고 늦게 형성되며 결빙 정도 또한 미약하였다(Table 3).

한편, 온난화의 여파로 발생될 수 있는 해수면 상승 여부와 정도를 유추해 보기 위해서는 기온 상승에 따라 유실된 얼음량의 분석이 선행되어야 할 것이다. 그러나 불행히도 현재 우리의 연구결과만으로는 이에 대한 정확한 분석이 불가능하다. 마리안소만 해안빙벽의 후퇴 면적이 깨어져나간 얼음의 양을 대변해 주지는 못하기 때문이다. 이는 빙하의 흐름압이 높으면 깨어져나가는 양도 많겠으나

그만큼 흘러드는 얼음의 양 또한 많을 것이기 때문이다. 따라서, 얼음의 유실량을 보다 명확히 파악하기 위해서는 빙하 흐름의 속도에 대한 모델링 연구나 빙하 밑의 지형 연구가 수반되어야 할 것이다.

이를 위해, 현재 연구단에서는 한국항공우주연구원과의 공조 체제를 구축하여 우리나라의 인공위성 '아리랑 1호'에 탑재된 고해상도 위성 카메라로 세종기지 인근의 위성사진을 가능한 월별로 확보하기 위해 노력하고 있다. 이러한 자료가 확보된다면 좀더 심도있는 연구결과를 도출할 수 있을 것으로 기대된다. 그러나 현 시점에서는 여기서 얻어진 결과들을 해양생물학·해양퇴적학 등 여타 자연과학 분야의 연구에 집중하여 보다 종합적인 연계 분석을 수행한다면, 결과물의 질적 향상과 더불어 추후 연구방향 설정에 적지 않게 도움을 주리라 기대된다.

5. 결 론

세종기지 주변에 형성되어 있는 빙벽의 후퇴와 바다의 결빙 양상을 기온 변화와 연계하여 분석해 보았다. 이 연구에서는, 1998년 수행된 1차 조사결과에 더하여, 1984년 1월 칠레 공군의 항공사진과 2001년 4월 우리 나라의 '아리랑 1호'에서 촬영된 위성사진을 포함한 총 6개의 자료를 이용해 1956년 12월부터 2001년 4월까지 45년간의 해안빙벽 및 내륙빙의 변화 양상을 화상분석하였다. 아울러, 벨링스하우젠기지에서 관측된 1969년 이래의 기상 자료를 이용해 기온과 빙벽 후퇴의 상관을 분석하였으며, 1988년 이래 세종기지에서 관측된 기온 및 마리안소만 결빙 자료를 참고하였다. 이 연구에 의해 얻어진 결론은 다음과 같다.

1. 1969년부터 2001년까지의 33년간 이 지역의 기온은 매년 0.037°C씩 증가하여, 27년에 약 1°C가 상승한 것으로 평가되었다.

2. 마리안소만 해안빙벽은 1956년 12월부터 2001년 4월까지의 45년간 총 1,125,000 m²의 면적이 후퇴하였으며, 이는 길이로 환산할 때 약 1,050 m에 해당된다. 결국 1956년 길이 2.8 km에 불과했던 마리안소만은 길이 4 km, 폭 1.0-1.3 km의 장방형의 피요르드로 확장되었다.

3. 조사기간별 후퇴 길이를 비교한 결과, 빙벽의 후퇴속도는 초기 시점 6 m/yr에 불과하던 것이 최근에 이르러 54 m/yr, 81 m/yr로 급증하고 있음이 관찰되었다. 예외적으로, 추웠던 해로 기록된 1987년부터 1988년 사이에는 오히려 21 m/yr를 전진하는 양상을 띠었다.

4. 인근 내륙빙상의 후퇴 양상 또한 이와 유사하였으며, 마리안소만의 북쪽사면보다는 태양광을 직접적으로 받는 남쪽사면에서 빨리 진행되어 노엘봉을 기점으로 한 능선 이북의 얼음은 빙벽이 깨어져나간 부근까지 거의 모두 용해된 것으로 관찰되었다.

5. 겨울에 형성되는 마리안소만의 해빙(sea-ice)은 월평균기온이 -5°C 이하일 때 결빙되기 시작하여 -3°C 이상으로 상승할 때 해빙되는 양상을 보였다.

6. 이와 같이, 이 지역 빙벽 후퇴와 바다 결빙의 양상과 정도는 기온과 밀접한 관계를 가지고 있음이 밝혀졌다. 또한, 최근의 빙벽 후퇴 급증과 바다 결빙 감소의 원인은 지역대기온난화의 여파로 여름의 해빙기가 확장되면서, 봄보다는 가을 기온이 동반 상승하며 가속화된 결과로 평가되었다.

사 사

이 연구의 밑거름이 되었던 귀중한 항공사진들을 제공해준 영국해군(Royal Navy, UK), 칠레공군(FACH)과 위성사진을 제공해준 항공우주연구원에 감사 드린다. 기상자료를 제공해준 러시아 벨링스하우젠 기지의 2001/02년 월동대장 올렉 사하로프(Oleg Sakharov)에게도 고마움과 우정을 전한다. 이 논문을 심사하면서 좋은 의견을 주신 심사위원 두 분께 깊은 감사를 드린다. 이 연구는 한국해양연구원 "남극 세종기지 주변 인간활동으로 인한 환경변화 모니터링(PP03102)" 과제의 일환으로 수행한 결과이다.

참고문헌

- 김용권, 백원대. 1995. 세종기지 주변 수심 및 육상측량(II). p. 825-846. In: 남극 환경특성 및 보존에 관한 연구. 한국해양연구소 보고서, BSPN 00258-822-7.
- 장순근, 윤호일, 정호성. 1998. 지구온난화와 서남극 남체틀랜드군도 킹조지섬의 최근 빙벽후퇴. *한국지구과학회지*, 19(1), 101-106.
- 한국해양연구소. 1996. 남극 바톤반도의 지형도(세종기지). 축적 1:10,000.
- Doake, C.S.M. and D.G. Vaughan. 1991. Rapid disintegration of the Wordie Ice Shelf in response to atmospheric warming. *Nature*, 350(6316), 328-330.
- Hofmann, E.E., J.M. Klink, C.M. Lascara, and D.A. Smith. 1996. Water mass distribution and circulation west of the Antarctic Peninsula and including Bransfield Strait. p. 61-80. In: *Foundations for Ecological Research West of the Antarctic Peninsula. Antarctic Research Series. Vol. 70.* eds. by Ross, R.M., E.E. Hofmann, and L.B. Quetin. American Geophysical Union, Washington, D.C.
- King, J.C. 1994. Recent climate variability in the vicinity of the Antarctic Peninsula. *Inter. J. Climatol.*, 14(4), 357-369.
- King, J.C. and S.A. Harangozo. 1998. Climate change in the western Antarctic Peninsula since 1945: observations and possible causes. *Ann. Glaciol.*, 27, 571-575.

- Kwon, T.-Y. and B.Y. Lee. 2002. Precipitation anomalies around King Sejong station, Antarctica associated with El Niño/Southern Oscillation. *Ocean and Polar Res.*, 24(1), 19-31.
- Marshall, G. 2002. Antarctic near-surface temperature trends 1951-2001. Available from WWW: <<http://www.nerc-bas.ac.uk/icd/gjma>> [cited 2003-10-23].
- Mercer, J.H. 1978. West Antarctic ice sheet and CO₂ greenhouse effect: a threat of disaster. *Nature*, 271(5643), 321-325.
- Mitrovica, J.X., M.E. Tamisiea, J.L. Davis, and G.A. Milne. 2001. Recent mass balance of polar ice sheets inferred from patterns of global sea-level change. *Nature*, 409(6823), 1026-1029.
- NSIDC. 2002. Antarctic ice shelf collapses. Available from WWW: <<http://nsidc.org/iceshelves/larsenb2002>> [cited 2003-10-23].
- Park, B.-K., S.-K. Chang, H.I. Yoon, and H. Chung. 1998. Recent retreat of ice cliffs, King George Island, South Shetland Islands, Antarctic Peninsula. *Ann. Glaciol.*, 27, 633-635.
- Sabol, S.A. and E.M. Schulson. 1989. The fracture toughness of ice in contact with salt water. *J. Glaciol.*, 35(120), 191-192.
- Tison, J.L., D. Ronveaux, and R.D. Lorrain. 1993. Low salinity frazil ice generation at the base of a small Antarctic ice shelf. *Antarct. Sci.*, 5(3), 309-322.
- Vaughan, D.G. and C.S.M. Doake. 1996. Recent atmospheric warming and retreat of ice shelves on the Antarctic Peninsula. *Nature*, 379(6563), 328-331.
- Vaughan, D.G., G.J. Karshall, W.M. Connolley, J.C. King, and R. Mulvaney. 2001. Devil in the detail. *Science*, 293, 1777-1779.
- Ward, C.G. 1995. Mapping ice front changes of Müller Ice Shelf, Antarctic Peninsula. *Antarct. Sci.*, 7(2), 197-198.

Received , 2003

Accepted , 2003