

## 필데스 반도 빙하내 주요음이온 분포에서 나타난 해양염분의 영향 (예비조사 결과)

한명우 · 윤호일  
해양연구소 극지연구센터

### Effect of sea salts in the major anion distribution in an ice core of the Fildes Peninsula ice field : A preliminary study result

Myung Woo Han and Ho Il Yoon  
Polar Research Center, KDRDI

**요약 :** 본 논문은 남극연구사업 수행과 함께 국내 최초로 킹조지섬 필데스반도 빙원에서 시추된 연장 2m 빙하시료의 음이온 분석자료에 대한 예비조사결과를 다루고 있다. 빙하가 시추된 지역에서 하절기에 나타나는 부분해빙과 결빙으로 화학물질의 혼합이 일어날 것으로 우려되기 때문에 얻어진 자료의 연대적인 해석은 배제되었다.

황산염과 염소이온 농도의 경우 남극점에서 보고된 이들 이온들의 농도보다 약 30~40배 정도 높으며, 이들 두 이온들의 수직적 농도변화 형태가 상호간 매우 유사하다. 이와같은 음이온 자료로 볼 때 주변에 둘러싸인 바다(Drake Passage와 Maxwell Bay)로부터 유입된 해양기원 염이 조사지역의 빙하에 직접적인 영향을 준것으로 사료된다. 조사지역이 해양성 저기압권에 있어 잦은 강풍이 상존한다는 사실은 빙하내 해양성 염분의 영향을 더욱 높게 시사한다.

**주요어 :** 빙화학, 빙하시추, 황산염, 질산염, 염화이온

**Abstract :** We report a preliminary result from the anion analyses(sulfate, chloride, nitrate) of a 2m ice core which was retrieved, as a proto-sampling in the course of conducting Korea's Antarctic research, from the Fildes Peninsula ice field in King George Island. Since chemical mixing in the ice is likely to occur due to partial melting and freezing in the sampling area during austral summer season, a chronological interpretation of the anion data was not attempted.

The sulfate and chloride data are characterized as follows : concentrations of sulfate and chloride in the ice core are 30 to 40 times higher than those reported from a south pole ice core; the downcore trend in the concentration change of these anions is very similar to each other. These characteristics of sulfate and chloride strongly suggest that the Fildes Peninsula ice field is under a direct influence of sea salts originating from the surrounding seas: Drake Passage and Maxwell Bay. The influence of sea salts in the ice is further substantiated by the fact that strong winds are very common in the area as it is frequently under marine cyclones.

**Key words :** glacial chemistry, ice coring, sulfate, nitrate, chloride ion

### 서론

지구상에 자연환경변화가 인류에 미칠 영향이 심각하게 우려되면서 자연환경 변화에 대한 연구가 최근 국제적인 규모로 추진되기에 이르

렀다. 특별히 지구의 기상변화에 대한 연구는 중요한 과제로 부각되고 있으며, 빙하학은 기상변화를 연구하는데 주요분야가 되고 있다. 빙하내에는 강설 또는 강우 당시 대기중에 존재하던 각종 화학물질, 가스 등이 그대로 간직

되어 있기 때문에 빙하학은 기상변화를 연구하는데 효과적인 수단이 되고 있다.

빙하학에도 다양한 연구분야가 있겠으나 우리는 우선 빙화학적(glacio-chemical)연구에 초점을 맞추어 연구사업을 추진하기로 하고 1989년 1월 킹조지섬 필데스반도(Fildes Peninsula) 빙원에서 국내 최초로 연장 2m에 이르는 빙하시료를 시추하였다. 본격적인 빙하시추장비를 구비하지 못한 현 실정으로 빙하시추 연장에 제한이 있었다. 따라서 고기후변화에 대한 연구는 불가능하였고 우선 빙화학의 예비조사단계로 표층 2km 이내의 빙하시료에서 주요음이온(chloride, sulfate, nitrate)들의 농도 분석을 통하여, 해양으로 둘러싸인 조사지역에 나타난 해양성 염분의 영향을 평가하는데 본 논문의 목적을 두었다.

## 조사지역의 자연환경

빙하시추가 이루어진 필데스반도 빙원의 중앙부는 서쪽으로 드레이크해협(Drake Passage)과 5km 이내에, 동쪽으로 맥스웰만(Maxwell Bay)과 2km 이내에 인접하고 있다. 조사지역에서 10km 이내에 인접해있는 세종기지에서 1988년 2월부터 1989년 12월까지 700일 동안 기록된 기상자료는 평균풍속 8.0m/sec, 최대풍속 43.3m/sec에 이르는 강풍을 보여주고 있다(이방용 외, 1990). 이와같이 해양에 근접해있는 본 조사지역의 입지조건과 강풍의 상존이라는 기상조건으로 해양성 염분이 조사지역으로 유입될 가능성은 매우 높은 것으로 추정된다.

세종기지 주변의 기상자료에 의할 것 같으면 기지가 위치한 지역이 일반적으로 전선의 잦은 통과지역으로 기상상태가 급변하며 바람이 강하고 기압의 변화폭이 큰것을 보여주고 있다(이방용 외, 1990). 이방용 외(1990)가 보고한 상기 관측기간의 기상자료에 의할 것 같으면 연평균 기온  $-1.5^{\circ}\text{C}$ , 평균습도 88%, 평균기압 989mbar, 강수일수 357일로써 조사지역이 차고 습한 고위도 저압대의 해양성 기단의 지배를 받고 있는 것을 보여주고 있다. 따라서 해양성 저기압의 영향권에서 나타나는 잦은

강수와 강풍의 상존으로 조사지역의 빙하에는 해양기원의 물질들이 남극대륙내의 대륙성 고기압의 영향권내에서 형성된 빙하의 경우보다 훨씬 많이 분포할 가능성이 높다.

세종기지 주변의 얼음해황은 1988년도의 경우 7월 초순부터 9월 하순까지 약 3개월 동안 마리안소만과 맥스웰만이 결빙되었으나(장순근 외, 1990), 1989년도의 경우 이들 만에서 결빙이 나타나지 않았고(김예동, 1990), 1990년도에는 8월에서 9월에 걸쳐 다시 결빙이 나타났으나 만 전체가 동결되는 결빙은 9월에 나타났고 8월의 경우에는 결빙과 해빙이 자주 반복되는 불규칙한 얼음해황을 보여주었다(양재삼, 1991).

## 재료 및 방법

### 가. 빙하시추

연장 2m의 빙하시료가 시추된 장소는 우루파이기지 '아르티가스'가 있는 필데스반도의 빙원이었으며 빙하이동의 영향을 가장 적게 받는 곳으로 예상되는 빙원의 최정상 공지선상의 능선에서 시추작업을 수행하였다(그림 1). 시추장비는 미국 극한지역 연구소의 개발장비인 USA-CRREL S9020 모델을 사용하였다. 시추작업을 수립하면서 현장에 조달된 장비로 최소한 연장 10m의 빙하시추는 가능할 것으로 예상했으나 빙하의 조직이 예상외로 견고하여 지하 2m 이상의 시추는 불가능하였다. 실제로 지하 2m에서 3m 구간을 시추하던 중 시추기의 톱날관이 얼음에 박히면서 모터가 정지되는 사태가 일어남으로 인해 시추작업은 더 이상의 진전을 보지 못하고 박힌 톱날관을 끄집어내는 장비구조작업으로 일정을 마무리지었다.

빙하시추지역은 하절기에 부분해빙과 결빙이 반복되어 일어나는 관계로 빙하의 조직이 암석과 같이 경화된 것으로 사료되며, 연중해빙이 일어나지 않는 고위도 지역에서만 우리의 보유장비로 25m~35m 연장의 빙하를 시추할 수 있을 것으로 사료된다. 본 논문에서는 빙하시료에서 얻어진 자료로부터 어떤 연대적인 해석을 시도하는 것이 아니고 단지 빙하에 나타난



Fig. 1a. A picture showing ice core sampling in the Fildes Peninsula ice field.

해양염의 영향을 평가해보는 것이기 때문에 조사지역에서 볼 수 있는 하절기 부분해빙이 커다란 문제가 되지 않을 것이나, 전자의 목적을 갖고 연구에 임할 경우 본 조사지역은 부적합한 것으로 사료되며 연중 해빙이 일어나지 않는 고위도 지역(최소한 65° 이상)에서 빙하시추가 수행되어야 할 것이다.

**나. 빙하시료 처리 및 분석**

연장 2m의 빙하시료는 세종기지에서 5cm 간격으로 절단한 다음 도막난 5cm 얼음덩이들을 다시 종으로 양분하여 반쪽은 냉동된 상태로 국내 반입하였고 나머지 반쪽은 세종기지에서 시료처리하여 국내로 반입하였다. 이 나머지 반쪽에 대한 시료처리과정을 보면 우선 절단과정에서 오염되었을지 모르는 이물질 제거하기 위해 겉표면을 청정미세톱으로 얇게 깎아낸 다음 증류수로 씻어서 시료표면의 수분을 증발시킨 다음 냉장고(1~2°C)에 보관하였다가 익일 기지 실험실내 상온(10°C)에서 녹게 한 다음 처음 한시간 동안 녹은 물은 버리고 이후부터 녹은 얼음물의 일부를 5ml 진공채집기에 이관하여 다시 얼려서 국내로 반입하였다.

국내로 냉동 반입된 진공채집기 내의 얼음시료들은 분석 직전 다시 녹여져 주요음이온 분석에 사용되었다. 주요음이온(chloride, sulfate, nitrate) 분석은 서울시 한남동 소재 환경보건 연구소에서 Dionex Ion Chromatography 4500

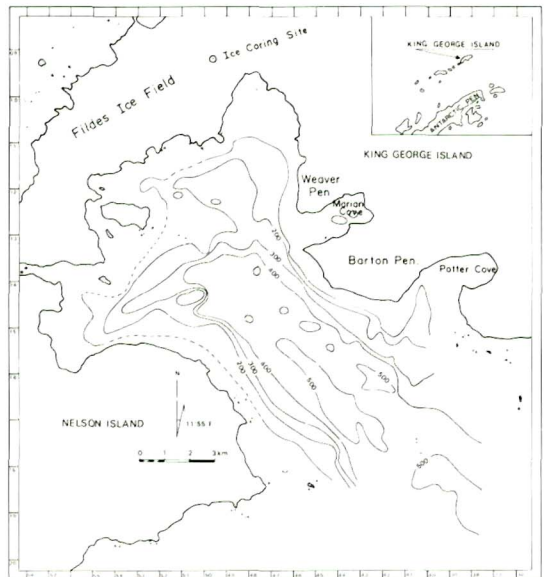


Fig. 1b. Location map of the ice-coring site.

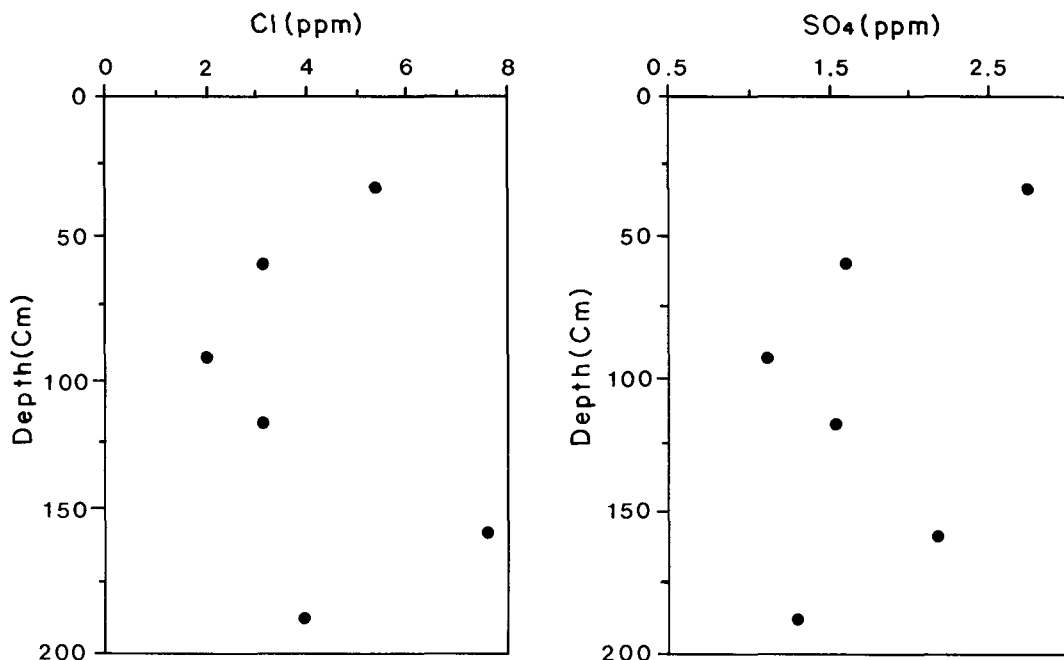


Fig. 2. Downcore concentration profiles of chloride and sulfate in the ice core.

모델을 사용하여 이루어졌다. 액상빙하시료에 첨부된 용매로는 2.2mM Na<sub>2</sub>CO<sub>3</sub>와 0.75mM NaHCO<sub>3</sub>의 혼합물이 사용되었다. IC column으로는 Dionex AG-4A-AS4A를 사용하였고 column 압력은 980PSI를 유지하였다. 화학적 Suppressor로써 AMMS(Anion Micromembrane Suppressor)를 사용하여 시료의 농축과정 없이도 전도도 검출기의 검출기능을 가능케하였고 25mM H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> 재생용액을 사용하였다. 질소 carrier gas의 압력은 5PSI, 시료의 유속은 2ml/min을 유지하였다.

### 결과 및 토의

제한된 시료를 준비한 탓으로 다량의 분석자료는 얻지 못했으나 얻어진 자료만으로도 해양성 염분의 영향을 확인하기에 충분하였다. 해수의 주요 화학조성 음이온인 황산염과 염소이온의 농도가 빙하시료의 깊이에 따라 매우 유사하게 분포하고 있음을 보여주고 있다(그림 2, 표 1). 한편 질산염의 경우는 황산염이나

염소와 연관되지 않고 비교적 독립된 농도변화를 보여주고 있다(그림 3).

본 조사에서 분석된 황산염의 평균농도 1.75ppm은 Mayewski et al.(1986)이 보고한 남극점 빙하의 황산염 농도보다 약 40배 정도 높다. 맥스웰만과 드레이크해협에 인접한 조사지역의 입지조건과 해양성 저기압권의 잦은 영향과 강풍의 상존 등으로 특징지워지는 조사지역의 기상조건을 고려할 때 이와같이 높은 황산염의 농도는 해양기원 염분의 영향으로 사료된다.

Table 1 Major anion data of an ice core from the Fildes Peninsula ice field (ppm)

Depth(cm)	chloride	sulfate	nitrate
30-35	5.37	2.74	0.77
56-61	3.18	1.60	0.48
90-95	2.04	1.12	0.83
115-120	3.15	1.55	0.39
155-160	7.60	2.18	0.51
185-190	3.96	1.31	0.39

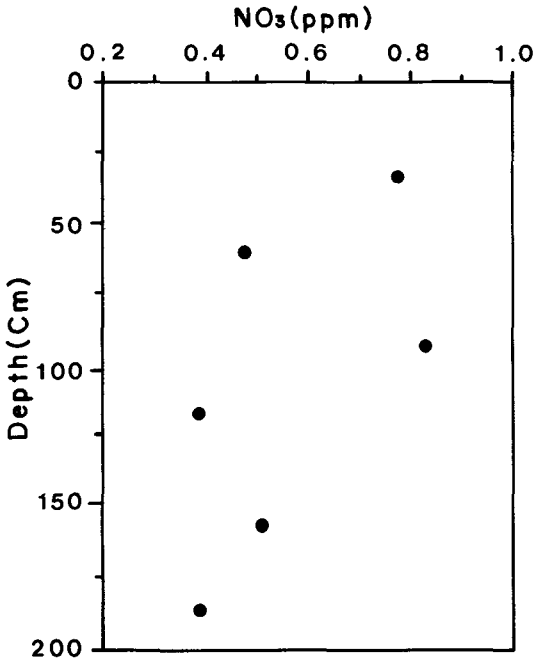


Fig. 3. Downcore concentration profile of nitrate in the ice core.

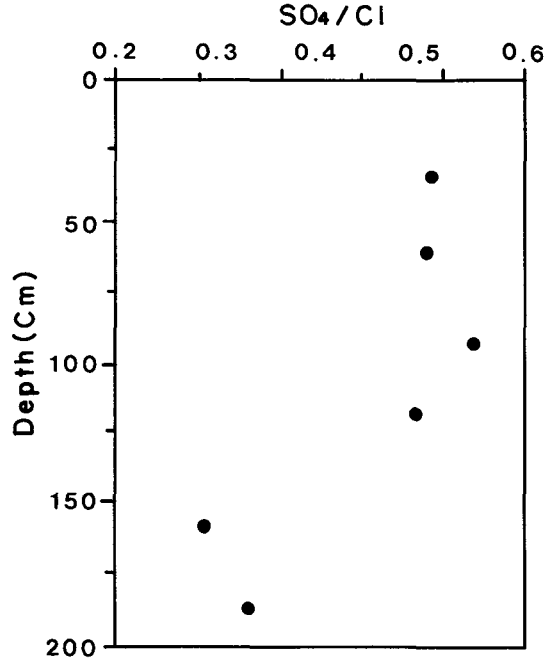


Fig. 4. Downcore trend in the concentration ratio of sulfate to chloride in the ice core.

해수의 음이온중 또 하나의 주요이온인 염화 이온의 경우도 남극점 빙하의 염소이온농도보다 30배에서 40배 정도 높은 농도분포를 보여 주고 있다. 특별히 해수의 음이온 중 최대 농도를 차지하는 염화이온과 두번째의 농도를 차지하는 황산염이 빙하시료 내에서 농도변화 형태가 거의 일치하고 있는 사실에서 볼 때 필데스반도 빙원의 빙하는 해양성 염분의 영향을 직접적으로 받은 것으로 사료된다.

그러나 황산염 농도와 염화이온 농도의 비율 변화를 보면 직접적인 해양성 염분의 주된 영향 외에도 다른 메타니즘들에 의한 부차적인 영향도 고려해볼 수 있음을 시사한다. 왜냐하면 이들 이온의 농도비율이 빙하 깊이 120cm 이하에서는 해수에서의 이들 이온의 비율과 거의 동일하나 빙하 표층에서부터 120cm 깊이까지는 그 비율이 해수보다 약 5배 정도 높게 나타나고 있기 때문이다(그림 4). 이와같이 황산염이 염화이온에 비해 상대적으로 많이 농축된 것에 대해서는 네가지의 가능한 메카니즘들

의 영향을 생각해볼 수 있다.

첫째 메카니즘은 해수의 염들이 대기중으로 방출될 때 황산염이 선택적으로 분화되었을 가능성을 고려해 볼 수 있다. 그러나 이러한 분화가능성을 확증하기 위해서는 인접해수와 강설의 비방사선 유황의 동위원소 분석이 이루어져야 하며 이러한 동위원소 자료는 기단 자체로부터 유입된 황산염과 인접 해양의 염으로부터 유입된 황산염의 양을 계산해 볼 수 있는 기회를 제공할 것이다. 물론 황산염과 염화이온의 질량만을 비교한다면 염화이온이 해수로부터 대기로 선택적으로 분화될 것이나 식물성 플랑크톤에 의해 배출되는 Di-methyl sulfate (DMS)의 방출이 질량에 의한 염화이온의 선택적인 방출을 증가할지도 모른다(Charlson et al., 1987). 한편 대류권에서 DMS는 hydroxyl radical과 반응하여 아황산염과 methane sulfonic acid(MSA)를 만들어 이들 각각의 물질로부터 산화가 더 진행되어 황산염을 만든다(Shaw, 1982; Saltzman et al., 1983).

둘째로 얼음 결정들의 삼각경계면에 집중적으로 분포하는 황산염과 이런 결정구조 경계면을 따라 이동하는 황산염의 특징적인 행태의 영향을 고려해 볼 수 있다. 이와같은 황산염의 특징적인 행태는 Mulvaney et al.(1988)에 의하여 보고되었다. 결정구조의 경계면들이 계속적으로 서로 연결되어서 하나의 통로를 형성한 경우와 구간에 따라서 연결이 끊겨서 통로가 차단된 경우에 따라서 황산염 농도가 국지적으로 각각 낮게 또는 높게 나타날 것으로 사료된다.

세째로 아남극권대인 조사지역에서 볼 수 있는 빙하의 부분적인 해빙과 결빙의 반복결과 나타날 수 있는 빙하내 화학물질의 혼합(Mixing) 메카니즘을 고려해 볼 수 있다. 본 논문에서는 해양염분의 영향만을 고찰할 뿐 연대적인 사건 변화기록을 보는 것이 아니므로 해빙으로 인한 혼합자체가 분석자료를 무용하게 만들지는 않지만, 어떤 현상의 연대적인 변화기록을 추적하는 연구일 경우 이와같은 해빙으로 인한 혼합은 연구수행에 치명적인 장애가 될 수 있을 것이다. 두 음이온의 농도비율이 일정치않고 깊이에 따른 변화를 보인 것은 혼합의 영향을 가능케 하지만, 황산염과 염화이온 각각의 농도변화는 서로 유사하다는 점에서 볼 때는 혼합의 영향이 가장 중요하게 작용하지는 않는 것으로 사료된다.

마지막으로 해양염분 외에 다른 기원으로부터 빙하내에 유입된 메카니즘을 고려해 볼 수 있다. 표층부터 120cm까지의 황산염의 농축은 화산활동의 영향으로 볼 수 있다. 표층부터 120cm까지의 황산염의 농축은 화산활동의 영향으로 볼 수도 있을 것이다. 최근 1970년까지 디셉션섬의 화산활동(Roobol, 1982)에 의한 황산염의 유입을 고려해 볼 수 있는데, 문제는 디셉션섬에서의 화산활동의 영향이 필데스반도에까지 미칠만큼 대규모의 것이었는가 하는 점이다.

Ferran(1991)은 디셉션섬에서 발생한 화산재가 킹조지섬 부근은 물론 브랜스필드해협 동단의 퇴적물에서조차 쉽게 발견된다고 보고하였다. 강한 편서풍대가 자리잡고 있는 지역적인 기상특성을 고려한다면 화산활동 규모의 대소에 관계없이 필데스반도에 영향을 주는 것은

비교적 수월했을 것으로 사료된다. 적어도 황산염의 농도가 높게 나타난 30cm 지점과 160cm 지점의 시간대에서 디셉션섬의 화산활동의 영향이 가장 극명하게 나타났을 가능성을 고려할 수 있다. 물론 이와같은 고려에는 부분해빙으로 인한 혼합의 영향이 미미했다고 하는 가정을 전제로할 때만 가능하다. 세밀한 간격으로 얻어진 산소동위원소 자료는 하절기 부분해빙으로 인한 혼합의 범위를 정량화해 줄 수 있을 것이다.

어쨌든, 30cm 깊이의 황산염 최대치를 1970년 디셉션섬의 화산활동을 시준하는 것으로 가정한다면 약 1.5cm/yr의 빙하형성 속도를 보여 주며, 혼합현상과 황산염의 얼음 결정구조내에서의 선택적인 이동현상 등을 고려할 때 이와같은 형성속도는 최소치일 것으로 사료된다.

일반적으로 질산염의 경우 남극에서보다 그린랜드에서 높은 농도를 보여주고 황산염은 일반적으로 질산염의 경우와 반대되는 농도분포를 보여준다(Mayewski et al., 1986). 그린랜드에서의 높은 질산염의 농도는 인류권과 대륙에 근접해 있다는 사실로 설명되고 남극에서 높은 황산염의 농도는 남대양의 해양성기원의 중요성 때문으로 설명되고 있다.

질산염의 농도분포의 경우 특기할 것은 깊이 100cm 근방에서 최대치를 보여주고 있는 점이다(그림 3). 한편 이 지점에서 황산염과 염화이온은 최소치를 보여주고 있다. 이들 두 이온들의 최소치를 해양성 염분의 영향이 극소화되고 대신 다른 원천으로부터의 유입이 상대적으로 중요한 역할을 한 것으로 본다면, 인류활동의 영향가능성을 고려해 볼 수 있다.

인류권과 멀리 떨어진 남극해역에서 인류활동의 영향을 주요 요인으로 볼 수 있는가에 대한 문제가 제기될 수 있으나 질산염 농도분포를 살펴볼 때 심저에서 빙하표층으로 가까이 올수록 그 농도가 증가하고 있는 경향은, 산업문명의 영향이 서서히 남극 대기권에도 미치기 시작한 것으로 보지않을 근거가 없을 것이다.

## 참고 문헌

김예동, 1990. 제2차 남극세종기지 월동보고서.(작성중)

필데스 반도 빙하내 주요음이온 분포

- 양재삼, 1991. 제3차 남극세종기지 월동보고서.(작성중)
- 이방용, 김동호, 김예동, 1990. 남극세종기지의 기상연구(1988-1989). 한국극지연구 1 : 47-57.
- 장순근, 김동엽, 이방용, 정호성, 1990. 세종기지 주변의 1988/89년 자연환경. 한국극지연구 1 : 59-65.
- Charlson, R.J., J.E. Lovelock, M.O. Andreae and S.G. Warren, 1987. Oceanic phytoplankton, atmospheric sulphur, cloud albedo and climate. *Nature* 326 : 655-661.
- Ferran, O.C., 1991. Antarctic Volcanic Hazard. Proc. 2nd Int. sym. Ant. Sci., in press.
- Mayewski, P.A., W.B. Lyons, M.J. Spencer, M. Twickler, C. Dansgaard, B. Koci, C.I. David-son and R.E. Honrath, 1986. Sulfate and nitrate concentrations from the South Greenland ice core. *Science* 232 : 975-977.
- Mulvaney, R., E.W. Wolff and K. Oates, 1988. Sulphuric acid at grain boundaries in Antarctic ice. *Nature* 331 (6153) : 247-249.
- Roobol, M.J., 1982. Volcanic hazard at Deception Island, South Shetland Islands. *British Ant. Survey Bull. No. 51* : 237-245.
- Saltzman, E.S., D.L. Savoie, R.G. Zika and J.M. Prospero, 1983. Methane sulfonic acid in the marine atmosphere. *J. Geophys. Res.* 88(C15) : 10897-10902.
- Shaw, G.E., 1982. On the residence time of the Antarctic Ice Sheet sulfate aerosol. *J. Geophys. Res.* 87(C6) : 4309-4313.