

세종기지 주변 남극지역에 형성된 빙하의 재료 특성과 결정구조

최경식 · 윤호일*

한국해양대학교 해양공학과, *한국해양연구소 극지연구센터

Mechanical Properties and Crystallographic Structures of Glacial Ice around King Sejong Station, King George Island, Antarctica

Kyungsik Choi and Ho Il Yoon*

Department of Ocean Engineering, Korea Maritime University

*Polar Research Center, Korea Ocean Research & Development Institute,
Ansan P.O. Box 29, Seoul 425-600, Korea

요약: 남극지역에 형성된 육성빙(land-based ice)인 빙하와 그로부터 분리된 해상의 유빙에 대한 현장조사와 실험을 통하여 남극빙하 얼음의 재료특성과 결정구조에 대한 기초자료를 수집하였다. 이를 위하여, 이 연구에서는 남극 세종기지 주변에 형성된 빙하얼음과 해상의 유빙 그리고 육상에서 채취한 얼음의 시료로부터 실험실 분석을 통해 얼음의 밀도와 공기 함유량을 조사하였고 또한 현미경 관찰을 통해 얼음의 결정구조의 형태와 결정크기를 조사하였다.

주요어: 빙하얼음, 밀도, 공기함유량, 결정의 크기

Abstract: Basic information on the mechanical properties and crystallographic structures of Antarctic land-base ice is obtained from field survey and laboratory experiments at King Sejong, Korea Antarctic Station. In this study several ice samples are collected from the top layers of glacial ice, the icebergs stranded on the beach and from the first-year lake ice to compare their densities and air contents volume inside ice samples. The ice samples are also prepared to investigate their grain sizes and crystal formation pattern.

Key words: glacial ice, density, air content, grain size

서 론

양 극지방(Polar regions)은 그 가혹한 기후조건으로 인하여 오랫동안 인간의 활동이 부진했던 지역이었으나, 금세기 후반에 들면서 이들 지역의 지리적, 과학적인 중요성이 부각되고 또한 이들 지역의 천연자원 부존이 확인되면서 과학지식의 향상과 기술의 개발을 위한 각국의 노력이 두드러지고 있다.

극지공학으로 불리는 이 분야는 최초 19세기 말 빙해역으로 둘러싸인 북유럽의 핀란드 등지에서 쇄빙선을 건조하는 경험으로부터 출발하여 이제는 북극해 연안의 해저자원 개발과 더불어 극한지에 관한 종합적인 학문의 형태로 변모하고 있다. 이미 선진 제국에서는 양극지방의 환경자료와 함께 상당한 양의 극한지 실험결과를 축적하고 있으나 현재 우리나라에서는 이 분야의 연구가 초보적인 관심의 단계에 머무르고 있는 상태이다.

극지공학의 여러 분야 중 가장 특징적인 것이 바로 얼음에 관한 연구라 할 수 있는데, 극한지에 설치되는 대다수의 인공구조물이나 보급품 운송을 위한 쇄빙선박의 설계에 있어서 빙하중(ice force)의 추정치가 가장 큰 관심사라 할 수 있다. 얼음은 일반 구조용 재료와는 달리 결정입자의 크기(grain size), 결정축의 방향과 분포(c-axis orientation), 온도(temperature), 염분(brine volume) 등의 재료 내부 결정구조의 차이가 그 재료강도(material strength)에 민감한 영향을 주며 brittle에서 ductile에 걸친 아주 폭넓은 변형현상을 보여 준다(Hooke *et al.*, 1980; Duval, 1981; Jacka and Maccagnan, 1984; Cole, 1985; Poplin and Ralston, 1992).

빙구조의 복잡함은 우선 염분, 공기 등 불순물의 함유량에 따라 등방성(isotropic) 재질인 순수한 담수빙(fresh water ice) 또는 다년생 해빙(multi-year sea ice)으로부터 이방성(anisotropic) 재질인 일년생 해빙(first-year sea ice)까지 폭넓게 존재한다. 따라서 얼음의 재료특성을 이해하기 위해서는 얼음의 다양한 결정구조와 함유된 성분에 관한 연구가 우선적으로 필요하다.

북극지역에의 해빙과 빙하에 대한 연구는 북극지역의 해저 자원개발과 관련하여 상당한 조사가 이루어진바 있으나(Timco and Frederking, 1982; Poplin and Ralston, 1992), 이에 비해 남극 얼음의 재료특성과 결정구조에 관한 조사는 연구자료가 상당히 드물다(Urabe and Inoue, 1986).

이 연구는 남극지역에 형성된 육빙성(land-based ice)인 빙하와 그로부터 분리된 해상의 유빙에 대한 조사와 현장실험을 통하여 남극빙하 얼음의 재료특성과 결정구조에 대한 기초자료의 축적을 목적으로 한다. 이를 위하여 본 연구에서는 남극 세종기지(62° 13' S, 58° 47' W) 주변에 형성된 빙하와 그로부터 분리된 해상의 유빙 그리고 육상에 분포한 얼음의 시료를 채취하고 실험실 분석을 통해 그 결정구조의 형태와 크기 그리고 얼음의 밀도와 공기함유량을 조사하였다.

연구방법은 우선 세종기지 주변의 콜린스(Collins) 빙하 상부층을 2.5 m 정도 시추하여

비교적 생성연한이 짧은 담수빙의 시료를 채취하였고, 다음으로 마리안소만(Marian Cove)의 빙하 하부에서 분리된 것으로 판단되는 해상유빙과 또한 세종기지 주변 육상에 남아 있는 일년생 호수빙의 시료를 각각 채취하였다.

채취된 시료는 영하 10°C 내지 20°C 사이 온도유지를 위한 냉동실에서 얼음의 밀도와 공기함유량을 측정하였고, 또한 채취된 시료는 결정구조에 변화를 주지 않을 저온상태에서 두께 5 mm 정도의 얇은 판형태로 표면을 가공한 뒤 현미경을 통해 그 결정구조의 형태와 크기를 조사하고 사진을 촬영하였다.

시료채취 및 실험방법

이 연구는 남극지역에 형성된 육성빙(land-based ice)인 빙하와 그로부터 분리된 해상의 유빙에 대한 조사와 현장실험을 통하여 빙하를 형성하는 얼음의 재료특성과 결정구조에 대한 기초자료를 얻는 데 목적이 있다. 이를 위하여 이 연구에서는 남극 세종기지 주변에 형성된 빙하와 그로부터 분리된 해상의 유빙 그리고 육상에 잔류한 얼음을 각각 채취하고 실험실 분석을 통해 얼음의 밀도와 공기함유량을 측정하였고 또한 편광현미경을 통해 그 결정구조를 관찰하였다.

시료 채취장소

이 연구에 이용된 육성빙의 시료는 Fig. 1에

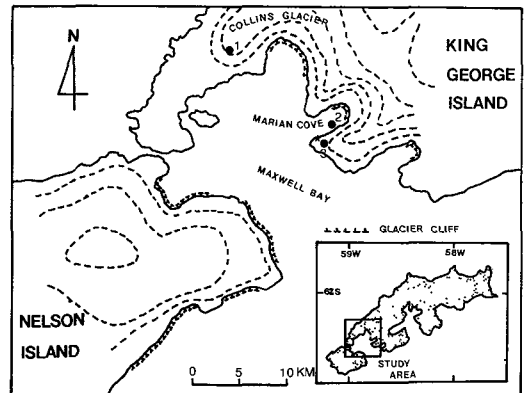


Fig. 1. A map showing the collecting location of ice samples (solid circles).

나타난 바와 같이 세 지점에서 채취되었다. 이 연구는 7차 남극 하계연구의 일환으로서 1993년 12월과 1994년 1월에 걸쳐 킹조지섬의 바톤반도 북단에 위치한 세종기지 주변 지역에서 수행되었다. 연구기간이 남반구의 하절기인 관계로 세종기지 주변의 해상에서는 동절기에 결빙되었던 일년생 해빙(first-year sea ice)이 모두 녹아버렸기 때문에 이 해역에서의 해빙에 대한 조사는 추후 동계 연구과제로 남겨야 했고, 따라서 이 연구에서는 해수염분이 포함되지 않은 담수빙만을 조사대상으로 하였다.

첫번째 시료 채취장소(Site 1)는 세종기지에서부터 15 km 정도 떨어진 콜린스 빙하(Collins glacier)의 상층부로서 우루과이의 아르티가스기지를 통해 접근이 가능한 곳이다. 빙하 상층부의 시료 채취지점은 해발 약 150 m에 위치한 곳인데 표층에서 1 m 정도는 적설층으로서, 과거 몇 번의 겨울동안 쌓인 눈이 채 얼지 않아서 쉽게 부스러지는 눈의 상태로 남아 있었으며 이 적설층을 걷어낸 뒤에 시추작업(ice coring)을 수행하였다.

사용된 시추장비는 미육군 극한지연구소(CRREL: Cold Regions Research and Engineering Lab.)가 개발한 S9020 모델로서 5마력의 가솔린 엔진에 의해 길이 1 m의 관통형 튕날을 회전시켜 얼음층을 시추하도록 되어 있다(한명우, 1990). 관통형의 튕날은 원통외벽에 부착되어 있으며 필요에 따라 다른 크기의 튕날을 갈아 끼울 수 있게 되어 있고, 원통의 내벽은 매끄러워서 튕날이 회전하면서 빙하시료가 원통내부에 채워지도록 되어 있다. 내면의 직경은 8 cm이고 연장 1 m 단위로 빙하시료가 시추되며 알루미늄 연장봉을 연결하면 최대 50 cm 까지 시추가 가능하지만 시추시료의 재동결을 막을 수 있는 전기 열선장치가 없는 관계로 실제로는 수 m 이상 시추가 매우 어렵다. Site 1에서 시추된 빙하의 최대깊이는 2.5 m였고 시추부위의 온도는 -0.5°C 이었다.

채취된 빙하시료는 깊이 수 cm 내지 수십 cm 간격으로 잘 부서지는 느슨한 얼음층과 단단한 얼음층이 교대로 출현하고 있는데, 잘 부서지는 얼음층은 수많은 공기층과 작은 얼음조

각으로 인하여 거의 백색에 가깝게 보이며 이는 적설층이 얼음화하는 초기단계인 firm 상태인 것으로 판단된다. 하절기 기후조건이 좀더 가혹한 남극대륙의 내부에서는 적설층의 압력에 의해 firm 상태에서 빙하 얼음으로 변화되는 기간이 평균 3,500년 정도에 firm의 깊이도 160 m에 이르는 것으로 보고되고 있다. 그러나 여기의 시추지역과 같이 비교적 온난한 여름을 보내는 지역에서는 이와는 달리 동절기에 내린 눈이 하절기에 완전히 녹아 차가운 빙하의 윗쪽에 일부 얼어버리는 관계로 firm에서 빙하얼음으로 천이되는 과정이 몇 년 사이에 일어나며 firm의 깊이도 아주 얇은 것으로 알려져 있다(Sugden, 1982).

채취된 빙하시료에서 보이는 비교적 단단한 얼음층은 하절기에 적설층이 녹아 빙하 상층부에 재결빙한 것으로 판단되며 상당히 많은 공기방울을 함유하고 있긴 하지만 비교적 투명한 상태로 출현한다. 얼음의 밀도를 측정하고 결정구조를 조사하는데 사용된 시료는 빙하시료 중 단단한 얼음층으로서 육안으로 관찰되는 얼음결정의 크기는 1~2 mm 정도였다. 특기할 사항은 상층부에서 50 cm 깊이에 두께 2 cm 내외의 검은 화산재층이 발견된 것이다.

빙하의 상층부 얼음을 조사시료(Site 1)로 선택한 이유는, 빙하얼음은 수천년 동안의 적설로부터 형성되는 담수빙으로서, 통상 깊은 하층부로 갈수록 막대한 내부압력으로 인해 얼음

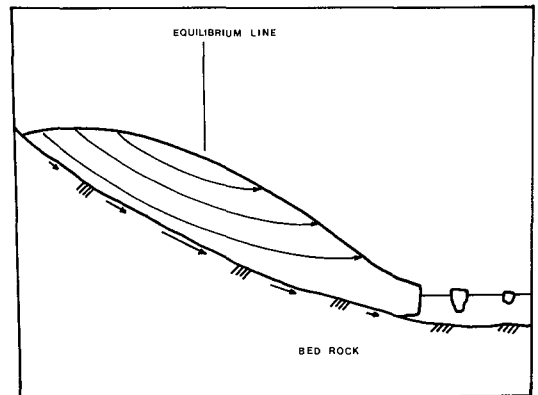


Fig. 2. Flow patterns of a valley glacier and detachment of icebergs.

의 조직이 치밀해지고, 또한 재결정(recrystallization) 과정에 의해 공기 함유량도 작아지고 결정의 크기가 커지게 된다. 그러나 빙하 상층부의 얼음은 비교적 생성년한이 짧아서 이러한 재결정 과정을 겪지 않은 상태로 볼 수 있으므로 이를 하층부의 빙하얼음, 즉 해상의 유빙(Site 2)과 비교하는데 의미를 찾을 수 있다.

두번째 시료 채취장소(Site 2)는 세종기지 주변 2 km 내의 해안가로서 마리안소만에 위치한 빙하로부터 분리되어 바다에 떠다니는 유빙을 채취하였다. 마리안소만의 빙하는 기본적으로 계곡빙하(valley glacier)이며 중력의 작용에 의해 기반암의 침식과 함께 서서히 해안가로 이동하게 되는데, 일단 해안에 이르면 적당한 크기로 깨어져 바다로 떨어진다(홍성민 외, 1991; Fig. 2). 마리안소만의 빙하는 해안가 얼음절벽의 높이가 대략 60~70 m이고 빙하의 선단부가 해저면에 grounding되어 있다고 볼 때 수면 아래쪽의 깊이가 140 m 정도로 추산된다. Fig. 2에서 알수 있듯이 빙하에서 분리되는 얼음은 주로 생성년한이 오래된 하층부로부터 기인한 것이기 때문에 포함한 공기 함유량도 비교적 작고 결정의 크기는 매우 커지는 것이 보통이다.

하절기 동안 세종기지 근처 해안가에서 발견되는 얼음은 대부분 마리안소만 빙하의 하층부에서 분리되어 조류와 바람에 의해 떠다니다가 간조시에 해안에 잔류된 것으로서, 육안으로 관찰되는 결정의 크기는 대체로 1~2 cm 이상이었는데 종종 6~7 cm 정도의 큰 것도 발견되었다. 그러나 아주 드물게도 결정크기 1 mm 정도에 기포가 거의 들어있지 않은 균질의 회색빛 얼음 덩어리를 발견할 수 있었는데, 이는 생성된지 몇 해를 넘기지 않은 것으로서 해안가 오래된 빙하의 균열(crevasse) 사이에 고인 물이 얼어서 형성된 것으로 추정된다. Site 2에서 채취한 얼음시료는 약간 푸른 빛이 나는 투명한 얼음이었다.

세번째 시료 채취장소(Site 3)는 세종기지 뒤편 자연호수에 형성된 일년생 호수빙(first-year lake ice)으로서 호수면 얼음층 위에 눈이 쌓여 얼었기 때문에 약간 푸석한 감촉을 주는 얼음

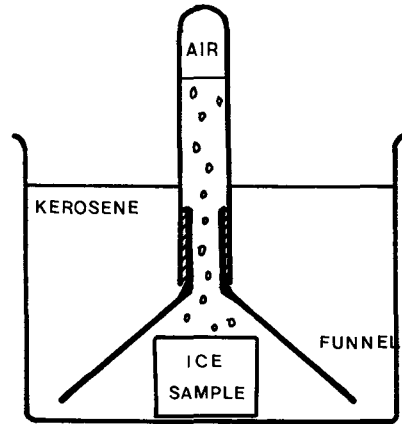


Fig. 3. Experimental set-up to measure the air content in ice samples.

이다. 생성과정으로 볼 때 Site 1 빙하 상층부 얼음시료와 유사하기 때문에 그 조성과 결정구조도 비슷할 것으로 추정할 수 있다.

얼음의 밀도 및 공기 함유량 측정

채취된 시료는 우선 영하 10°C 내지 20°C 사이에 온도를 유지하는 냉동실에 일시 보관하였고 실험장치가 준비되는 대로 얼음의 밀도와 공기 함유량을 측정하였다. Site 1의 빙하시료의 경우 시험편의 가공과 실험장치의 준비에 시간이 오래 걸려 냉동실에서 3일 이상 보관시켜야 했는데, 운반 도중에 약간 녹았던 시료 표면이 냉동실내에서 재결빙하면서 공기 함유량 등이 원래의 재료와는 약간 다른 특성을 가지게 되었다. 따라서 Site 1의 경우 시료 표면부를 제거한 새로운 시험편을 준비해야 하였고 Site 2와 Site 3의 시료는 채취한 즉시 실험에 들어가도록 준비하였다.

얼음의 밀도는 시험편의 질량과 체적을 측정하여 계산하였다. 질량의 측정은 전자식 저울을 이용하였는데 측정의 정밀도는 0.5 g 정도였다. 한편 시험편의 체적은 등유를 담은 매스실린더를 이용하여 측정하였는데, 측정의 정밀도는 질량측정에 비해 떨어지는 편으로 1 cm³ 정도이었다. 얼음의 비중이 등유의 비중보다 크기 때문에 물 대신 등유를 사용하면 얼음덩어리를 바닥에 가라앉힐 수 있다. 얼음 속에 갇

힌 공기의 함유량을 측정하기 위하여 Fig. 3과 같이 영하 5°C의 냉장실에서 차게 냉각된 등유를 비이커 속에 담은 뒤 얼음 덩어리를 넣고 삼각 플라스크를 덮은 뒤 실온에서 얼음을 완전히 녹여 이 때 빠져나오는 공기방울을 실린더로 모을 수 있도록 실험장치를 준비하였다. 이렇게 함으로써 얼음 속에 함유된 공기를 녹은 물로부터 완전히 분리해 낼 수 있다(Urabe and Inoue, 1986).

얼음의 결정구조 조사

채취된 후 냉동실에 일시 보관된 시료들은 밀도와 공기 함유량을 측정하는 실험을 수행한 뒤 또한 그 결정구조도 조사하였다. 얼음시료는 결정구조에 변화를 주지 않을 저온상태(영하 3°C 내지 6°C)에서 두께 5 mm 정도의 얇은 판형태로 표면을 가공하고 현미경을 통해 그 결정구조의 형태와 크기를 조사하고 사진을 촬영하였다. 사용된 현미경은 Zeiss사의 광학 현미경이며 얼음의 결정크기 조사에는 큰 배율이긴 하지만 현지 실험실에 보유하고 있는 접안렌즈 중 최소배율인 50배를 사용하여 관찰하였다.

시험편 가공과 결정구조 조사작업은 모두 냉장실내에서 이루어지는 것이 바람직하지만 그만큼 냉장실 작업공간이 없는 경우 일반 실험실에서의 작업도 불가능한 것은 아니다. 다만 실온에서의 관찰 도중 시료가 빠른 속도로 녹아버리기 때문에 결정크기 조사 및 사진촬영에 이르는 작업시간을 아주 빠르게 진행하지 않으면 안되고 또한 계속 녹아 흐르는 물을 처리할 수 있도록 수시로 휴지나 가제를 이용하여 물기를 흡수시켜야 하는 어려움이 있다. 그리고 시험편을 가공시 현미경 사용에 적합하도록 좀 더 얇은 판형태(두께 1 mm 이내)로 만드는 것이 좋지만 기술적으로 많은 어려움이 있다. 추후 연구과제에서는 이러한 문제점을 보완할 수 있는 방법이 충분히 고려되어야 할 것이다.

실험결과 및 토의

세종기지 주변 지역에서 채취한 빙하얼음과

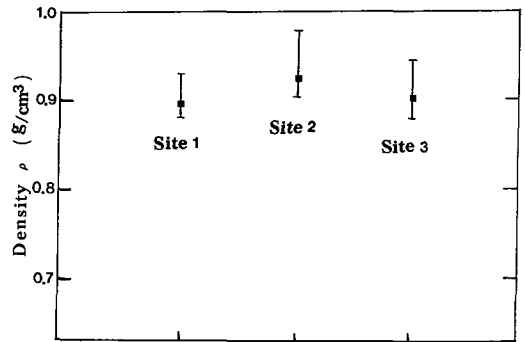


Fig. 4. Distribution of density for ice samples (averages for solid squares).

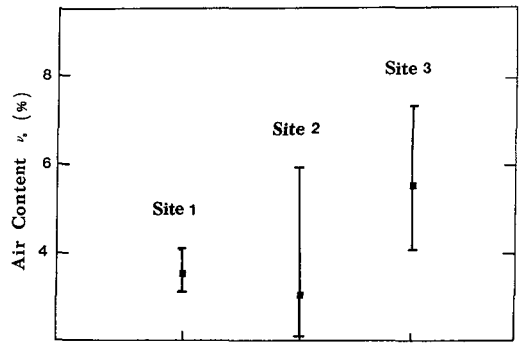


Fig. 5. Distribution of air content for ice samples (averages for solid squares).

유빙 그리고 육성빙에 대한 밀도와 공기 함유량에 대한 측정결과가 Fig. 4와 Fig. 5에 나타나 있다. 채취된 얼음시료는 50~100 g 정도의 크기로 가공된 뒤 Fig. 3에 언급한 장치를 이용하여 18회의 실험을 수행하였고 각 채취장소에 따라 그 측정치의 분포상태를 수직막대로 도시하였다.

Fig. 4는 얼음의 측정된 밀도를 나타내고 있는데, 각 채취장소에서 밀도의 평균치는 각각 0.899, 0.917, 0.898 g/cm³로 계산되었다. 이 결과에 의하면 이미 예상한 바와 같이, 빙하 상층부의 얼음과 일년생 호수빙은 거의 같은 측정결과를 보이고 있으나 빙하에서 분리된 유빙의 경우는 이보다 밀도가 높게 계산되고 있다. 이는 유빙의 대부분이 주로 공기 함유량이 적은

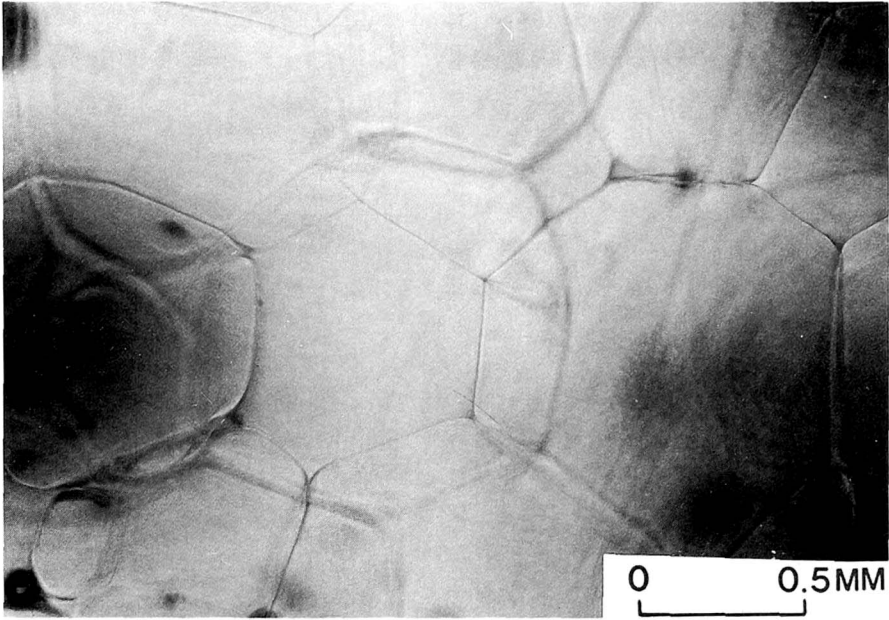


Fig. 6. Ice crystals from top layer of glacial ice (Site 1).

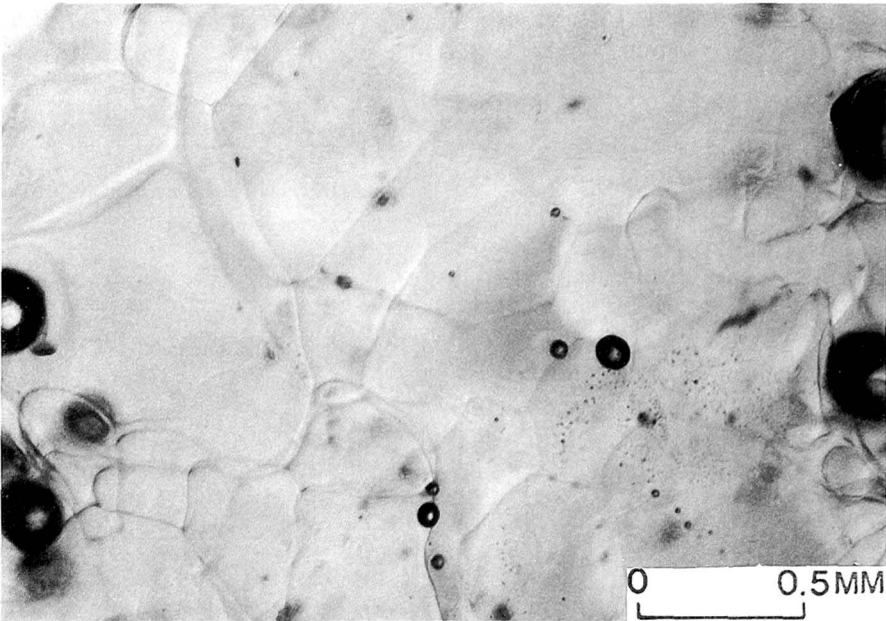


Fig. 7. Ice crystals from first-year lake ice (Site 3).

빙하의 하층부에서 분리된 것임을 시사해 주고 있다. Fig. 5는 공기 함유량을 측정한 결과를 보여주고 있는데 각 채취장소에서의 평균치는 3.55, 3.19, 5.60%로 계산되었다. 이 값을 비교

해 볼 때, 각 채취장소에 따른 차이는 역시 예상된 바와 같음을 알 수 있다.

전체적으로 볼 때 다른 연구자의 실험결과에 비하여 공기 함유량의 값이 너무 작게 측정되

었고 따라서 밀도의 값도 비교적 높게 얻어진 것을 알 수 있는데, 예를 들어 Urabe and Inoue (1986)의 경우 남위 69°에 위치한 일본의 소화기지에서 채취한 빙산의 분석을 통해 공기 함유량이 9.9%라는 비교적 높은 값을 얻은 바 있다. 이러한 차이는 주로 실험의 정밀도에 관련된 결과라고 보여진다. 특히 공기 함유량을 측정하는 경우, 얼음 덩어리가 녹으면서 발생하는 기포중 일부가 깔대기나 시험관의 벽에 붙어 있기 때문에 발생한 기포를 모두 완벽하게 모을 수 없다는 점이 제일 큰 이유라고 판단된다.

한편 편광(cross polarized light)을 통한 현미경 관찰에 의하면, 얼음의 결정형태는 모두 granular ice로서 육안으로 관측한 바와 같이 빙하 상층부와 육상 호수빙의 경우 결정입자의 크기가 1 mm 내외임을 알 수 있었고 유빙의 경우는 1 cm 이상으로서 다른 연구자의 관측결과와 동일한 것을 알 수 있었다(Kosunoki et al., 1983; Fig. 6, Fig. 7 참조). 얼음결정의 크기는 linear interception method를 사용하여 계산하였다(Cole, 1985).

결 론

이 연구는 남극지역에 형성된 담수빙인 빙하와 육성빙에 관한 문헌조사와 현장실험을 통하여 얼음의 재료특성과 결정구조에 관한 기초자료의 축적을 목적으로 하였다. 연구 방법은 우선 세종기지 주변 콜린스 빙하의 상부층을 시추하여 비교적 생성연한이 짧은 담수빙을 채취하였고, 다음으로 세종기지 주변 빙하의 하부에서 분리된 것으로 판단되는 오래된 해상유빙과 또한 세종기지 주변 육상에 남아 있는 일년생의 호수빙의 시료를 각각 채취하였다.

채취된 시료는 영하 10°C 내지 20°C 사이에 온도를 유지하는 냉동실에서 밀도와 공기 함유량을 측정하였고, 또한 결정구조에 변화를 주지 않을 저온상태에서 얇은 판형태로 표면을 가공한 뒤 현미경을 통해 그 결정구조의 형태와 크기를 조사하고 사진을 촬영하였다.

이 연구를 통해 얻어진 실험자료는 앞으로

빙해역을 운항할 쇄빙선의 설계에 필요한 빙하층을 산정하기 위한 기초자료로 이용될 수 있을 것이며, 또한 현재 국내에는 냉동실험실(cold room)이나 빙해수조(ice towing tank)와 같은 빙실험을 위한 기초 연구시설이 전무한 현실이다. 이에 이 연구는 우리 나라 유일의 극한지 실험장소로서 세종기지를 활용할 수 있는 좋은 기회가 되었다고 판단된다.

참고문헌

- Cole, D.M., 1985. *Grain Size and the Compressive Strength of Ice*. Proceedings of the 4th International Offshore Mechanics and Arctic Symposium, pp. 220-226.
- Duval, P., 1981. Creep and Fabrics of Polycrystalline Ice under Shear and Compression. *Journal of Glaciology*, Vol. 27, pp. 129-140.
- Hoke, R.L. et al., 1980. Mechanical Properties of Polycrystalline Ice: An Assessment of Current Knowledge and Priorities for Research. *Cold Regions Science and Technology*, Vol. 3, pp. 263-275.
- Jacka, T.H. and Maccagana, M., 1984. Ice Crystallographic and Strain Rate Changes with Strain in Compression and Extension. *Cold Regions Science and Technology*, Vol. 8, pp. 269-286.
- Kosunoki, K. Mae, S., and Fujii, Y., 1983. *Science in Antarctica*, Vol. 4: Ice and Snow. National Institute of Polar Research, Tokyo.
- Poplin, J.P. and Ralston, T.D., 1992. Physical and Mechanical Properties of Hobson's Choice Ice Island Cores. *Cold Regions Science and Technology*, Vol. 20, pp. 207-223.
- Sugden, D., 1982. *Arctic and Antarctic/A Modern Geographical Synthesis*. Basil Blackwell Pub. Ltd., Oxford.
- Timco, G.W. and Frederking, R.M.W., 1982. Comparative Strengths of Fresh Water Ice. *Cold Regions Science and Technology*, Vol. 6, pp. 21-27.
- Urabe, N. and Inoue, M., 1986. *Mechanical Properties of Antarctic Sea Ice*. Proceedings of the 6th International Offshore Mechanics and Arctic Symposium, Vol. IV, pp. 303-309.
- 한명우, 1990. 빙화학 연구기반 구축을 위한 빙하시료 처리기술 및 분석방법 확립. 한국해양연구소 연구보고서, BSPE00161-280-7.
- 홍성민, 박병권, 윤호일, 김예동, 오재경, 1991. 마리아나소만의 퇴적환경과 주변의 고빙하 분포상. 한국극지연구, Vol. 2, No. 2, pp. 73-85.