

工學碩士 學位論文

*Cold Room* 을 이용한  
빙역학 표준 실험기법에 관한 연구

A Study on Standardization of Ice Mechanics  
Experimental Techniques with a Cold Room

指導教授 崔 慶 植

2007年 2月

韓國海洋大學校 大學院

海洋開發工學科

金 柁 弦

本 論 文 을 金 柁 弦 의 工 學 碩 士 學 位 論 文 으 로 認 准 함 .

委 員 長 : 工 學 博 士 徐 榮 教 

委 員 : 工 學 博 士 崔 慶 植 

委 員 : 工 學 博 士 金 載 洙 

2007年 2月

韓 國 海 洋 大 學 校 大 學 院

海 洋 開 發 工 學 科

金 柁 弦

# A Study on Standardization of Ice Mechanics Experimental Techniques with a Cold Room

by

*JUNG-HYUN KIM*

Department of Ocean Development Engineering  
Graduate School of Korea Maritime University

## ABSTRACT

The cold room is an essential part of the laboratory facilities for ice research and cold regions engineering. The experiment with a cold room includes various tests of materials at low temperature, whose range is often encountered in the Arctic. As a non-arctic country, the first Korean cold room facility for ice mechanics experiments was assembled in 2004. Since then, the 4 m x 6 m cold room facility has been extensively used under various different environmental and loading conditions. After reviewing published references on cold room testing methods and also by trial and error, the standard procedures for testing and preparing laboratory ice material were established for the measurement of basic ice properties. Laboratory-grown fresh water ice was used in the cold room, especially for unconfined compressive strength tests. Preparation techniques and dimension of the specimen are the most important issues arising in cold room tests. The details of specimen preparation, testing procedure and analysis of the strength test results are discussed.

# 목 차

ABSTRACT	i
목 차	ii
그 립 목 차	iv
표 목 차	vi
I. 서 론	1
II. 얼음의 역학적 특성	4
2.1. 얼음의 생성과정	4
2.1.1. 담수빙	4
2.1.2. 해빙	5
2.2. 얼음의 재료특성	6
2.3. 얼음의 강도	10
2.3.1. 원환 압축강도	10
2.3.2. 인장강도	11
2.3.3. 굽힘강도	11
2.3.4. 압축강도	12
III. Cold Room을 이용한 담수빙 실험	13
3.1. Cold Room 실험설비의 제원과 특징	13
3.2. 시편제작과 실험준비	15
3.2.1. 시편치수결정	19
3.2.2. 시편제작과정	20
3.2.3. 실험준비	23
IV. 실험기법 및 결과	25
4.1. 담수빙 1축 압축시험	25

4.1.1. 실험방법	29
4.1.2. 실험결과	30
4.2. 병역학 표준 실험기법	41
4.2.1. 1축 압축시험용 시편제작	41
4.2.2. 실험 진행절차	42
V. 결 론	44
참 고 문 헌	45

## 그 립 목 차

Fig. 2-1 Indentation pressure-contact area data (Sanderson, 1988).....	9
Fig. 2-2 Ring tensile strength test.....	10
Fig. 2-3 Flexural strength test.....	11
Fig. 2-4 Compressive strength vs. stress-rate (Peyton, 1966).....	12
Fig. 3-1 Cold room facility for ice mechanics experiments.....	14
Fig. 3-2 The 20-ton class UTM for compression and bending tests.....	14
Fig. 3-3 Microtome for thin section photography.....	14
Fig. 3-4 Preparation of polycrystalline ice specimen in Glen(1953).....	17
Fig. 3-5 Preparation of polycrystalline ice specimen in Hawkes and Mellor(1972).....	17
Fig. 3-6 Thin section of ice between crossed polaroids showing vertical section and horizontal sections at the top and bottom of the ice sheet(Timco, 1982).....	18
Fig. 3-7 Acryl containers for making ice specimen.....	19
Fig. 3-8 Procedure of specimen preparation by trial and error.....	20
Fig. 3-9 Kit for making bubble-free transparent ice specimen.....	22
Fig. 3-10 Fresh water ice specimen prepared for the compression test.....	22
Fig. 3-11 a. Cross section of cylindrical specimen, b. Large scale same as in (a), c. Same as in (b), with the addition of side(reflected) light(Barrette and Jordaan, 2001).....	24
Fig. 3-12 Thin section photograph untested ice specimen( $d=70mm, 110mm$ ).....	24
Fig. 4-1 Schematic stress-strain curves for polycrystalline ice compressed under uniaxial loading(Schulson, 1990).....	26
Fig. 4-2 Stress-strain curves for specimen no. 127, 128 and Peak stress vs. grain size for various strain rates(Cole, 1985).....	28
Fig. 4-3 Uniaxial compression test( $-15^{\circ}C$ ).....	29
Fig. 4-4 Compressive strength 4MPa at strain-rate $4.0 \times 10^{-4}/s$ .....	31

Fig. 4-5 Typical stress-strain curves for two different failure modes.....	35
Fig. 4-6 Typical stress-strain curves for with brittle characteristics.....	36
Fig. 4-7 Failure mode with brittle characteristics.....	37
Fig. 4-8 Typical stress-strain curves for with ductile characteristics.....	38
Fig. 4-9 Failure mode with ductile characteristics.....	39
Fig. 4-10 Compressive strength(MPa) vs. strain-rate( $s^{-1}$ ) and ductile-to-brittle transition.....	40

## 표 목 차

Table. 4-1 Strength of fresh water ice as function of strain-rate.....	33
--	----

# I. 서 론

최근 중동에서 유발된 불안한 국제 정세로 인해 원유가의 상승 추세가 오래 지속되고 있다. 이러한 고유가 추세는 과거 유가가 하향 안정적이었던 시절, 경제성이 떨어져 외면해 왔던 극지에서의 자원개발을 가능케 하는 원동력이 되고 있으며 특히 고유가로 인한 러시아 경제력의 확대는 북극해에 연한 시베리아의 개발과 북극해 항로 이용에 범세계적인 적극적인 참여를 이끌어 내고 있다.

북극해 항로는 동북아시아와 유럽 간 최단거리 항로로서 러시아의 경제력 향상으로 북극해 항로를 통한 물류 이동량이 확대됨에 따라 이 항로를 운항 할 수 있는 쇄빙선박에 대한 관심도 높아지고 있다. 실제로 이 북극해 항로를 이용할 경우, 일본의 요코하마에서 독일의 함부르크까지 기존의 수에즈 운하를 경유하는 항로를 선택할 때 보다 42% 단축되고 노르웨이의 트롬소에서 캐나다 밴쿠버까지는 파나마 운하를 통과하는 항로보다 약 37% 정도의 거리가 단축이 된다. 국내 쇄빙선박 건조경험이 없고 빙역학 지식의 활용경험 또한 전무한 실정이나, 빙해역을 통한 경제성 있는 해운시장 형성과 함께 멀지 않은 지리적 이점을 활용해 앞으로 국내에서의 쇄빙선박 건조가 활발할 것으로 예상된다. 이와 같은 이유로 빙하중 산정과 빙-구조물 상호작용 등 쇄빙선박에 적용할 빙역학 지식이 우선적으로 필요하며 국내의 수준 높은 선박 건조기술과 빙역학 기술의 접목 또한 반드시 거쳐야 할 과제이다.

북극해 해저에는 세계 인구가 60년을 사용할 수 있는 원유(약 1조 5000억 배럴)와 전 세계 매장량의 절반에 해당하는 가스(약 48조 m<sup>3</sup>)가 묻혀있는데 이와 같이 극지의 자원을 개발하기 위해서는 저온과 얼음이라는 혹독한 자연조건을 이겨낼 수 있는 빙역학 기술과 특수 장비가 필요하다. 하지만 북극권 국가가 아니면 극지환경에 직접 접할 기회가 없으며 극지에 과학기지를 유지하고 있다 하여도 현장관측과 빙역학 실험을 수행하는 데는 많은 시간과 예산이 소요된다. 극지에 관심을 가진 여러 선진국에서 현장관측과는 별도로 극지환경을 재현할 수 있는 실험시설을 확보하고자 하는 이유도 이 때문이다.

극지환경 재현 실험시설로는 빙해수조(Ice Towing Tank)와 저온실험실(Cold Room)을 들 수 있다. 이중 ice towing tank는 빙판위에서 쇠빙선박이나 해양구조물의 모형시험을 수행할 수 있는 시설로 수조의 건설과 유지에 많은 예산이 소요되기 때문에 빙해수조를 보유한 대부분의 국가에서는 정부 차원에서의 예산지원 하에 운영되고 있다. 국내에서는 아직 빙해수조 시설을 보유하고 있지 못하여 쇠빙선박의 모형시험 시에는 캐나다나 핀란드의 수조시설을 임대하여 사용하고 있는 실정이다. Cold room은 빙해수조의 실험이나 현장에서 가져온 시료의 실험에 필수적인 기초 시설인데 그리 큰 규모가 아니어도 기본적인 빙역학 실험을 수행할 수 있기 때문에 선진국에서는 많은 대학과 연구기관에서 cold room 시설을 보유하고 있다. 선박/해양구조물을 포함 극지 시설물의 최저 기준 설계온도는  $-45^{\circ}\text{C}$  정도이지만 통상적으로  $-30^{\circ}\text{C}$  정도면 극지환경을 재현할 수 있다고 볼 수 있다. Cold room은 일반 냉동보관창고와는 달리 정밀한 항온항습 조절능력을 가지고 있으며 동파되거나 기능이 정지됨이 없이 저온에서 장시간 가동이 가능한 실험기기가 실내에 설치되어 얼음과 동토, 기타 저온용 소재에 대한 재료시험을 수행하게 된다.

Cold room 시설을 정상적으로 운용하고 반복 가능한 실험조건을 만들어내기 위해서는 본 시설을 이용한 표준 실험기법을 확보하여야 한다. 선진 외국에서는 빙역학 연구가 상당한 수준에 올라 있기 때문에 cold room을 활용하는 자체 기술을 확보하고 있지만 이제 막 시작한 국내에서의 빙역학 연구는 독자적인 실험기술 확보가 제일 시급하다. 이러한 배경에서 본 논문에서는 cold room 시설을 이용한 실험기법 소개와 얼음의 재료특성을 위한 표준화된 기법을 마련하고자 한다. 본 연구는 재료 특성치에 대한 정확한 값이나 양적인 비교가 목표가 아니라 본 시설을 이용하여 재료 특성치를 측정하는 표준화된 기법을 제시하여 언제라도 반복 가능한 실험조건을 만들어 낼 수 있도록 매뉴얼을 제시하는 데 목적이 있다.

본 논문에서는 불순물이 제거된 균질의 시편 제조와 가공법, cold room 내에서의 실험절차와 계측방법, 재료강도 측정을 위해 일정 변형률 상태에서의 1축

압축시험을 수행 후 계측결과를 분석하는 방법 등을 제시하였다. 시편의 준비 및 치수결정은 본 연구에서 중점적으로 진행했던 부분이며 시험의 반복성과 일정한 결과를 얻을 수 있도록 표준화된 시험절차를 마련하였다. 그리고 시험결과로 변형률 속도에 따른 담수빙의 응력-변형도 선도 그리고 압축강도 특성 등을 고찰하였다.

## II. 얼음의 역학적 특성

### 2.1 얼음의 생성과정

얼음의 재료특성을 이해하기 위해서는 얼음의 생성과정과 결정구조의 형태에 대한 지식이 요구된다. 자연에서 관측되는 얼음의 결정은 6각 입방격자 구조를 가지는 것이 보통이며, 이러한 구조상의 특징으로 인해 결정축 방향과 축에 수직인 평면 방향에 따라 재료의 강도가 다르게 된다(Michel, 1978).

#### 2.1.1 담수빙(Fresh Water Ice)

순수한 물은  $0^{\circ}\text{C}$  에서 결빙하는 것으로 알고 있으나 실제로는 온도를 점차 낮추어 빙점( $0^{\circ}\text{C}$ ) 에 도달하여도 결빙이 일어나지 않는다. 최초의 얼음결정이 생겨나기 위해서는 어느 정도의 과냉각(supercooling)이 필요하며 빙점 이하의 물속에 얼음의 결정이 성장하기 위해서는 과냉각 조건과 함께 물속에 얼음의 결정핵(nuclei)으로 사용될 미세한 입자가 많이 존재하는 것이 필요하다. 과냉각에 의해 순수한 물을 결빙시킬 수 있는 온도는  $-40^{\circ}\text{C}$  정도이지만 물속에 결정핵이 많이 존재하는 자연 상태에서의 담수의 경우  $-3.5^{\circ}\text{C}$  정도면 결빙이 된다. 즉 얼음의 형성은 순수한 물의 과냉각에 의한 결정화(nucleation) 이거나 혹은 외부에서 첨가된 결정핵의 존재에 의해 생성된다. 일반적으로 증류수가 아닌 tap water같은 담수 속에도 불순물이 존재하므로 결정핵으로 인한 결빙이 되기 쉽고 낮은 온도의 과냉각에 의한 결빙은 쉽게 일어나지 않는다.

흐름이 적고 비교적 잔잔한 수면인 경우, 강이나 호수에 형성되는 얼음은 대기의 온도와 수온과의 차이에 의해 열 교환이 일어나면서 수면에 바늘모양의 얼음결정이 형성되고, 이것들이 서로 엉키며 성장하여 원판모양의 빙판을 형성한다. 정상상태로 성장된 얼음은 비교적 미세한 결정 (grain size 2~10 mm) 으로서 결정축(c-axis)이 모든 방향으로 불규칙하게 분포되어 거의 등방성(isotropic)의 다 결정상(polycrystalline) 구조를 갖는다.

## 2.1.2 해빙(Sea Ice)

海氷(특히 일년생 해빙, first-year sea ice)은 순수 얼음에 기포(air) 그리고 brine 이라 불리는 농축된 해수를 포함하고 있는데, 이 때 해수에 포함된 염분의 평균농도는 34.5% 이며 이때 해수의 빙점은 약  $-1.9^{\circ}\text{C}$  그리고 brine 의 농도는 원래 해수의 평균농도보다 낮다. Brine의 함량은 해빙의 재료특성과 밀접한 관계를 갖고 있는데 해빙의 결빙속도 그리고 해수의 염분농도에 의해 좌우된다. 이렇게 성장한 해빙은 해면에 수직방향으로 자리 잡은 염수맥(brine pocket)의 형성으로 기둥형(columnar shape) 결정구조를 이루게 되고 이 때 결정축(c-axis)은 수평면과 평행한 면에 분포하게 되어 해면에 수직한 방향과 수평한 방향의 재질이 달라지는 이방성(anisotropic) 특성을 보이게 된다.

온도가 낮아지면 brine 에서 소금이 석출되며 염수맥이 작아지기 때문에 치밀한 얼음결정이 형성되고 반대로 온도가 높아지면 역현상이 일어나 조직이 치밀해지지 않는다. 따라서 다년생 해빙(multi-year sea ice)은 해를 거듭하면서 결빙과 해빙을 반복하는 동안 염수맥(brine pocket)은 점차 해수에 용해되어 빠져 버리고 담수빙(fresh water ice)과 유사한 등방성의 변형특성을 보이게 된다. 이러한 이유로 1년생 해빙에 비해서 다년생 해빙의 강도가 훨씬 높아지게 된다.

## 2.2 얼음의 재료특성

빙공학에 있어, 얼음은 물과 접촉하고 있기 때문에 얼음과 물의 상호작용에 대해 완전히 이해할 수 있어야 한다. 그렇기 위해서 얼음의 역학적 특성과 악이 매우 중요한데 그 중 가장 중요한 물리적인 특성은 밀도이다.

물(담수)은 4°C에서 밀도가 최대이고 4°C보다 온도가 낮아지면 밀도도 감소한다. 0°C에서 물의 밀도는 999.8kg/m<sup>3</sup>이다. 하지만 물이 결빙한 얼음은 대부분의 재료와 마찬가지로 온도가 낮아질수록 밀도가 커진다. 0°C에서 얼음의 밀도는 916.8kg/m<sup>3</sup>이고, -30°C에서 밀도는 920.6kg/m<sup>3</sup>이다. 내부에 기포가 존재하게 되면 얼음의 밀도는 감소하게 되는데 반면 내부에 얼지 않은 물이 존재하면 밀도는 커지게 된다. 자연적인 상태의 얼음에는 여러 가지 불순물이 포함되어 있기 때문에 통상 공학적으로 얼음의 밀도를 915~917kg/m<sup>3</sup>으로 사용하고 있다 (US Army, 2002).

얼음의 기계적 성질은 매우 중요한 요소이며 얼음이 어떤 하중상태에서의 변형과 구조물에 끼치는 영향 등에 대해 관점을 조절할 수 있다. 얼음을 일반 구조용 재료와는 상당히 다른 복합재료로서 이 재질적 특성에 영향을 미치는 인자가 아주 다양하고 복잡하다. 따라서 종래의 구조용 재료에 적용되어 왔던 해석방법을 그대로 얼음에 사용한다는 것은 무리한 결과를 가져올 우려가 있다. 얼음의 기계적 성질은 얼음의 성장조건, 하중이 가해진 속도, 결정구조, 온도, 염분, 결정입자 크기 등의 변화에 따라 민감하게 달라지며 하중상태의 거동 범위가 취성(brittle)에서 연성(ductile)의 전범위에 걸친 판이한 재료특성을 보여준다. 일반적으로 얼음은 콘크리트나 유리와 같이 깨지기 쉬운 취성재료로 인식되고 있으나, 변형속도가 비교적 느리고 온도가 용융점에 가까울 경우 크리프(creep)와 같은 소성(혹은 점성)적인 변형현상을 나타내기도 한다. 이러한 판이한 변형현상은 극지방에서 접하는 온도의 범위나 하중속도에서 흔히 관측된다.

현재까지 여러 현장실험을 통해 얼음의 변형특성에 관한 기본적인 지식을 얻을 수 있었으나 아직까지 그 지식을 실제 공학문제에 자유롭게 활용하기에는 상당히 미흡한 형편이다. 그 이유는 어떤 특정한 실험조건을 정확하게 구현하기도 어려울 뿐 아니라 설사 그런 조건을 만족한다 하더라도, 얼음은 size effect 라 하여 대규모 현장 실험결과와 실험실에서 소규모 실험결과에 많은 차이를 보이고 있기 때문이다(Fig. 2-1). 이는 시험편의 크기나 얼음과 구조물 사이의 접촉 면적이 클수록 측정되는 얼음의 강도가 떨어지는 현상인데 실험실에서 측정된 평균 압축파괴강도는 10MPa 정도인 반면 대규모 현장실험에서 얻어진 값은 보통 1MPa 보다 낮다. Size effect 에 대한 정확한 이유는 확인되지 않았지만 우선 얼음시편 속에 내재된 기포나 균열과 같은 자연결함에 의해 실험과정 중 뜻하지 않은 방향으로의 파괴현상이 나타나기 때문일 수도 있고, 얼음과 구조물 사이의 접촉이 균일하게 일어나지 않아서 접촉면에서의 불균일 상호작용이 강도의 저하를 가져온다고도 볼 수 있다. 현재까지 소규모 모형실험에 의한 결과를 실제 현장에서의 쓸 수 있는 유용한 결과로 확대 추정할 수 있는 방법은 완전하지 못하다(Sanderson, 1988).

얼음의 재료특성을 말할 때 탄성계수(Young's modulus)와 Poisson 비를 빼놓을 수 없는데 얼음의 변형특성이 하중을 가해진 속도에 따라 민감하게 변하기 때문에 얼음의 탄성계수 역시 기존의 응력-변형도 관계식의 초기 기울기로부터 결정하기에는 혼란이 야기된다. 느린 속도로 하중을 작용한 경우 얼음의 변형은 시간지연효과(delayed elasticity)가 나타나, 외형으로 관측되는 탄성계수의 값은 훨씬 작다. 한편 온도가 낮아지면 탄성계수의 값은 약간 증가되는 것으로 알려져 있다. 탄성계수에 대한 온도의 영향은 비교적 적은 반면 기포, 염분, 불순물 등에 의한 영향은 대단히 중요하다. 탄성계수의 측정값은 측정기법에 따라서도 달라지는데 그 결과 탄성계수 추정은 그 범위가 넓고 현장에서 가져온 담수빙의 경우 약 0.4~9.8GPa 정도, 실험실에서 제작한 담수빙의 경우는 약 4.3~8.3GPa 정도이고 일반적으로 실험실에서 제작한 작은 시편의 탄성계수 값이 더 높다(US Army, 2002). 비교적 porosity 가 낮은 담수빙의 경우 측정된 탄성계수는 온도가  $-5^{\circ}\text{C}$  와  $-10^{\circ}\text{C}$  사이에서 대략 9.0~10.0GPa 정도의 값이 사

용된다(Sinha, 1983). 또한 이 경우 Poisson 비는  $0.33 \pm 0.03$  정도이다(Weeks and Mellor, 1984).

얼음은 완전탄성도 아니고, 점성 및 소성재료도 아니므로 전통적인 공학해석으로는 쉽게 해결이 안 된다. 압축강도, 인장강도 그리고 굽힘강도 등 얼음의 재료특성을 말할 때 보통 두 가지 의미로 사용된다. 이는 완전히 다른 물리적 변화를 나타내는 것으로서 하나는 균열이 발생하는 취성 혹은 연성-취성의 복합과정을 갖는 파괴 역학적 거동(fracture behavior)을 말하며 다른 하나는 균열이나 파단이 일어나지 않는 탄성 혹은 연성 크리프 변형인 연속체적 거동(continuum behavior)이다. 재료의 취성변형은 재료가 변형을 할 때 미소한 탄성변형 후 재료 내부에 균열(crack)의 발생과 함께 이의 갑작스런 전파로 말미암아 재료가 파단에 이르게 되는 현상인데 가해진 응력수준이 충분히 크다면 재료의 변형은 거의 소성상태를 나타내지 않는다. 반면 연성변형은 재료내부에서 전위의 이동(dislocation movement)에 의해 분자간의 미끄러짐이 발생하는 현상으로 탄성변형보다 상당히 큰 소성변형을 허용하면서 하중-변위 곡선상의 최대응력에 해당하는 항복강도를 나타낸다. 얼음은 주변의 여러 조건에 따라 이런 두 가지 파괴현상이 복합적으로 나타나기 때문에 항복강도와 파단강도를 구별하기가 쉽지 않고 따라서 이 두 가지를 함께 묶어 얼음의 파괴강도(failure strength)라 부르기도 한다.

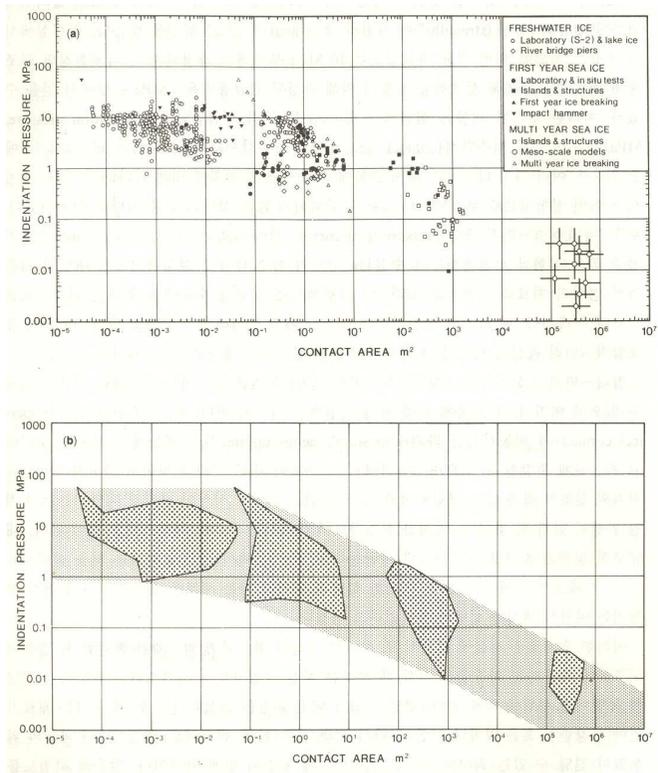


Fig. 2-1 Indentation pressure-contact area data (Sanderson, 1988)

## 2.3 얼음의 강도

얼음의 강도는 재료가 파괴되기 전까지 견딜 수 있는 최대 응력으로 정의되는데 그 크기는 굽힘(bending), 휨(flexural), 분쇄(crushing), 압축(compression), 전단(Shear) 등 하중 모드에 따라 달라진다.

### 2.3.1 원환 압축강도(Ring Tensile Strength)

압축에 의해 파괴강도를 측정하는 것으로 암석이나 콘크리트 등 취성재료의 인장강도 조사에 유리하다. 하중점에 가까운 내 원주상의 점에서 최대 인장응력이 발생하고 그 부분에서 파괴가 진행하면 측정된 값으로 인장강도를 추정한다. 이렇게 측정된 인장강도는 직접 인장시험을 통한 강도에 비해 약 반 이하의 값을 갖는다. 일반적으로 행해지는 인장시험과 비교할 때 단면 내에 응력구배(gradient)가 존재하므로 통상의 인장강도라고 할 수는 없다. 또한 취성재료의 경우 응력구배의 크기에 따라 강도가 달라진다(佐藤和郎, 1963)

$$\sigma_f = \frac{PK(r_0/r_i)}{\pi r_0 l}$$

여기서  $P$ 는 하중,  $l$ 은 원주,  $K$ 는 내외지름 비에 의해 결정되는 상수로서  $r_i = 0$ 인 경우  $K=1$ ,  $r_i/r_0 = 1/6$ 인 경우  $K=7.09$ 의 값을 취한다.

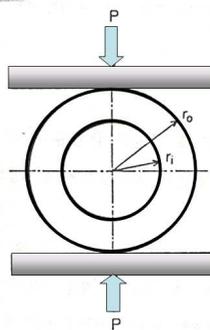


Fig. 2-2 Ring tensile strength test

### 2.3.2 인장강도(Direct Tensile Strength)

원환 압축강도의 방법과 비교해 시편제작과 시험방법이 복잡하고 현장에서 시험을 하기 어렵다. 빙판에서 수평과 수직 두 방향의 시험편을 떼어내어 인장 속도가 1.2m/min 하에서 시험을 한 바 있는데, 수직방향이 수평방향의 인장강도보다 큰 값을 갖고 얼음의 성장방향에 따라 강도가 크게 달라지는 것을 알 수 있었다(Dykins, 1970).

### 2.3.3 굽힘강도(Flexural Strength)

측정하기 어렵고 측정된 값 역시 실험조건에 따라 변화가 심한 앞의 인장강도를 사용하기 보다는 굽힘을 받는 보의 문제에 있어서는 복잡한 제 요인들을 하나로 단순화시킨 굽힘강도를 참고용의 재료 특성치로 취급하고 있다.

얼음으로 외팔보(cantilever beam)를 만들어 끝단에 하중 P를 작용할 때 파괴가 발생하면 파괴 직전까지 탄성 상태를 유지한다고 가정할 때 파괴강도는 다음과 같다.

$$\sigma_f = \frac{PL}{wh^2}$$

여기서 L은 외팔보의 길이, w와 h는 폭과 두께이다. 이와 같은 방법으로 예측할 수 있는 설계 굽힘강도는 약 0.5MPa 이하이다(Frankensteen, 1969).

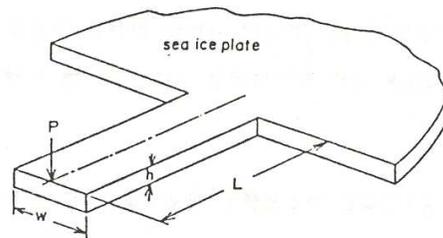


Fig. 2-3 Flexural strength test

### 2.3.4 압축강도(Compressive Strength)

압축강도는 실험시의 얼음의 시료길이, 결정에 대한 채취방향, 하중 속도 및 온도에 따라 달라진다. Peyton(1966)에 의하면 해빙에서 원통형 시험편을 채취하여 1축 압축강도를 계산했는데 방향의존성을 조사하기 위해 시료의 채취방향을 여러 가지로 변화하여 실험하였다. 그 결과 수직방향의 강도는 수평방향의 강도에 비해 약 3배 정도 큰 값을 갖고 압축강도가 하중속도에 의존한다는 것을 알 수 있었다. Fig. 2-4는 하중속도가 증가할수록 압축강도가 감소하는 결과를 보여준다. 파괴강도의 극값의 왼쪽에서 해빙은 압축에 의하여 creep-연성과 파괴를 하고 오른쪽에서는 취성파괴에 의해 부서진다고 해석하였다. 이외에도 변형률속도의 영향을 알아보기 위해 발틱해의 해빙을 사용해 실험을 한 결과 변형률속도가  $2 \times 10^{-2}/s$  부근에서 압축강도가 최대가 됨을 알 수 있었다 (Schwarz, 1978).

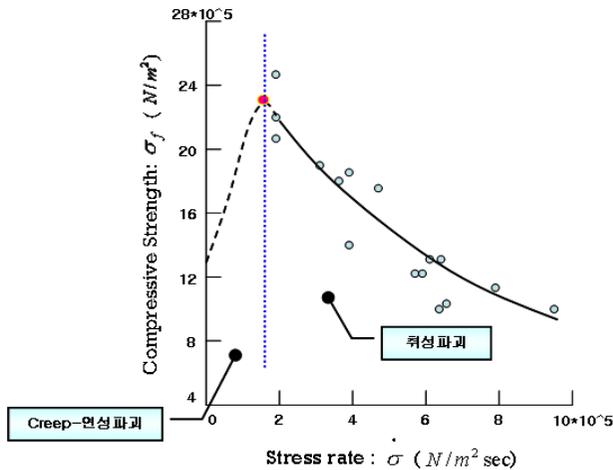


Fig. 2-4 Compressive strength vs. stress-rate (Peyton, 1966)

### Ⅲ. Cold Room을 이용한 담수빙 실험

#### 3.1 Cold Room 실험설비의 제원과 특징

실험에 사용된 cold room은 2004년 말 한국해양대학교 극지공학연구실에 설치되었으며 4m×6m×2.6m 규격의 챔버형 시설로 내부온도를 -30℃까지 조절할 수 있다(Fig. 3-1). 온도 및 습도 조절은 자동으로 이루어지며 서리를 제거하기 위한 제상(defrost)주기는 보통 1회 25분정도로 하루에 4회 작동한다.

얼음의 기계적 성질은 온도에 크게 의존하므로 반드시 온도상태를 조절하여 수행하고, 실험설비로 시편에 닿는 길이 조정이 가능하고 가압관의 속도 조절이 가능한 즉, 변형률속도가 제어되는 시스템을 갖는 기계가 필요하다. 또한 하중은 시편의 강도를 계산하기에 적합한 충분한 하중용량의 load cell로 측정될 필요가 있는데, 이를 바탕으로 cold room 내에는 UTM (universal testing machine; 경도정밀(주) 제작, 크로스헤드 시험속도 0~200mm/min, 최대 압축하중 20톤급)이 배치되어 1축 압축시험과 굽힘시험에 사용되며 챔버 외부에서 디지털제어가 가능하도록 되어있다(Fig. 3-2). 한편 시편의 가공을 위해 저온에서도 작동이 가능한 band-saw와 편광사진 촬영에 필요한 얇은 시편을 만들기 위한 microtome 및 편광사진 촬영기가 cold room 내부에 비치되어 있다(Fig. 3-3). 그리고 cold room 외부에는 제작된 시편의 보관을 위한 냉동고가 2개 준비되어 있다(-60℃~5℃).



Fig. 3-1 Cold room facility for ice mechanics experiments



Fig. 3-2 The 20-ton class UTM for compression and bending tests



Fig. 3-3 Microtome for thin section photography

### 3.2 시편 제작과 실험준비

시편제작은 본 연구에서 중점적으로 진행했던 부분으로 경험부족으로 인해 많은 시행착오를 거쳐야 했다. 얼음이 형성되는 과정 및 자세한 절차에 대한 선행연구사례가 없었기 때문에 cold room을 이용한 실험과 시편제작에 관련된 문헌을 재검토 하였다. 빙역학 실험을 위한 다결정 얼음시편의 준비 방법을 살펴보았는데 시편제조 방법은 얼음의 결정입자 크기를 조절하는 방법과 방향성, 그리고 균질의 투명시편을 제조하는 방법을 기초로 하는 여러 방법들이 있다.

Glen(1953)

오늘날 전형적인 시편 제작과정으로 사용되고 있는 이 방법은 냉각장치의 cooling coil의 결빙입자를 위와 아랫면이 막히지 않은 황동(brass)으로 만든 용기 안에 가득 채운 후 윗면을 막고 윗면의 중간지점에 진공관을 설치한다. 이 진공관을 통해 용기 내부의 기체들을 흡입한 후 진공관을 막고 용기를 0°C의 증류수로 가득 찬 수조에 넣은 후 -6°C에서 동결시킨다. 몇 분 후 동결이 진행되고 윗면의 판은 동결이 늦어진다. 동결 후 시편이 빠질 때까지 용기를 서서히 따뜻하게 하고 시편이 추출되면 윗면의 다소 불규칙한 면은 열 가압판(heated flat plate)으로 표면을 녹여 수평을 맞춘다. 이렇게 제작된 시편은 전방향성을 가지며 작은 기포로 인해 얼음이 투명하지는 않다.

Goughnour(1967)

Glen의 방법과 거의 유사하나 진공관을 사용하지 않았다. 준비된 시편크기는  $d=28.7\text{mm}$ ,  $l=57.4\text{mm}$  ( $l=2d$ ) 이며 증류수(기포와 이온이 배제된 물)를 용기에 넣고  $-18^{\circ}\text{C}\pm 2^{\circ}\text{C}$ 에서 결빙시켰다. 그 결과 재료의 밀도범위는  $0.9\sim 0.913\text{mg}/\text{m}^3$  이고 grain size는 1mm 이었다. Glen의 연구에서와 같이 방사형 구조가 나타났는데 이 방사형 구조는 전방향성을 갖는 결빙 방법을 사용할 때 공통적으로 나타난다.

Hawkes and Mellor(1972)

단일 방향성을 갖는 bubbly 얼음 시편을 제작하는 방법으로 밑면은 0°C 이하로 노출 시켜 얼음을 아래에서부터 성장시키고 단열재를 이용해 옆면과 윗면을 막는다. 이 같은 방법으로 생성된 얼음시편은 기포가 균일하게 분산되어 있고 기포의 지름은 대략 0.2mm이며 밀도는  $0.899\pm 0.002\text{mg/m}^3$ , 평균 grain size는 0.7 mm이다.

Lile(1979)

균일한 grain size를 갖는 얼음 시편을 제작하는 방법으로 기존의 방법과 다른 획기적인 방안을 제시하였는데 가장 큰 변화는 동결 전 아이스 슬러리에 관한 운용법에 대한 것이다. 아이스슬러리는 과냉각 상태의 물이나 부동액을 외력과 열전달을 적절히 조절함으로써 연속적으로 얻을 수 있고 여기에 고운 눈이나 부서진 얼음 토막으로 얻은 적절한 지름의 얼음 결정핵을 첨가한다. 이렇게 해서 만든 혼합물을 스푼을 이용해 lucite(투명합성수지)용기에 옮겨 담고, 기포가 발생하지 않게 막대로 휘저어 준 후 용기 안의 아이스 슬러리 위에 원반형태의 판을 올려놓고 손으로 돌려가며 힘주어 누른다. 압축이 충분히 되면 -10°C에서 적어도 1주일 정도 동결시킨다. 완성된 시편은 용기를 따듯하게 하여 표면이 살짝 녹으면 추출하고 원하는 길이에 맞춰 자른다. 이렇게 생산된 시편은 c-axis 방향이 균일하지 않고 밀도는  $0.917\pm 0.005\text{mg/m}^3$ , grain size는 균일하며 평균지름은 1.7mm이다.

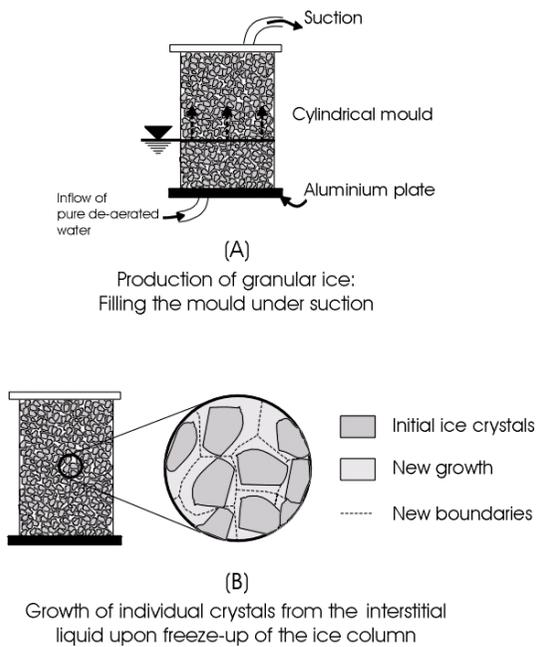


Fig. 3-4 Preparation of polycrystalline ice specimen in Glen(1953)

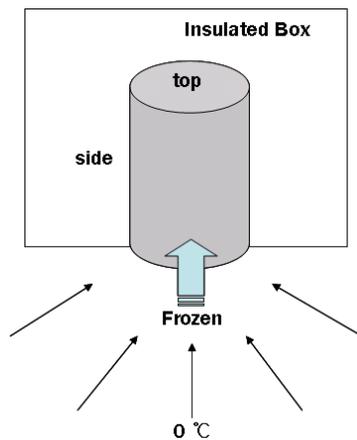


Fig. 3-5 Preparation of polycrystalline ice specimen in Hawkes and Mellor(1972)

Timco(1982)

굽힘시험을 하기 위한 시편 제조방법으로 큰 탱크( $21m \times 7m \times 1.2m$ )에 두 개의 ice sheet를 만들면 같은 조건 아래의 얼음 샘플들이 많이 만들어진다. 물은  $0.1^{\circ}C$ 의 균일한 온도에서 기포가 되고, 주변온도가  $-18^{\circ}C$ 일 때 고운 물 스프레이를 뿌려주게 되면 빙판은 평균적으로  $-12^{\circ}C$ 의 온도에서 자라게 된다. 이러한 과정은 좋은 빙질의 기둥형 얼음을 생성하게 한다. 두 개의 빙판은 grain size의 변화가 없고 샘플 두께가 6.4cm 일 때 윗부분(top)의 grain size는 약 1mm, 아랫부분(bottom)은 약 3mm인 기둥형 얼음이 생성되었다

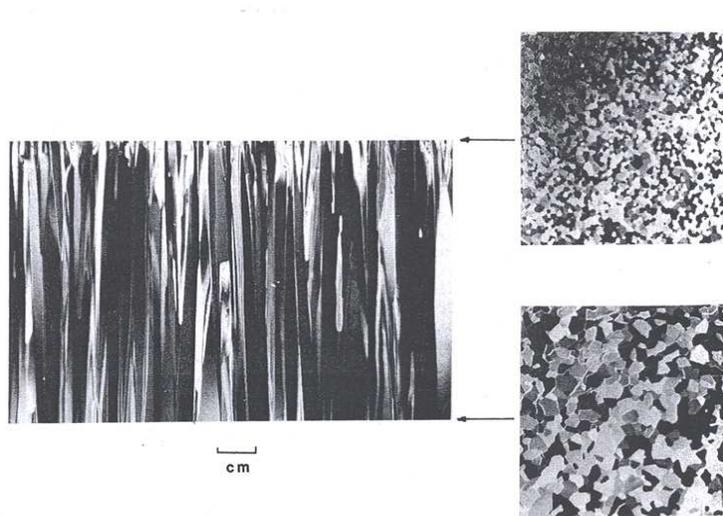


Fig. 3-6 Thin section of ice between crossed polaroids showing vertical section and horizontal sections at the top and bottom of the ice sheet(Timco, 1982)

### 3.2.1 시편 치수 결정

앞서 살펴본 선행연구에서 시편의 제작과정에 대한 기술은 마련되어있으나 시편의 치수나 방법 등 표준화된 절차가 마련되어 있지 않아 본 연구에서는 실험실에서 압축시험에 사용할 담수빙 제작에 초점을 맞추었다.

콘크리트와 같은 취성재료의 경우 시편의 길이는 압축봉 시편 직경의 약 1.5~2배 정도로 제작할 것을 권장하고 있는데 (한편 ASTM에 규정된 강재 압축봉 시편의 제원은  $L=3D$  임), 이를 바탕으로 압축시험용 담수빙 표준시편을 크기별로 지름 70mm와 100mm, 길이 110mm와 140mm로 모두 4종류 제작하였다. 원통형 시편제작을 위한 용기는 두께 5mm의 원형 실린더 형태의 아크릴을 사용하였고, 시편가공에 대비하여 실제 압축시험에 사용되는 시편의 길이보다 약 10cm 정도 길게 여유를 두었다(Fig. 3-7).



Fig. 3-7 Acryl containers for making ice specimen

### 3.2.2 시편 제작 과정

본 연구에서는 시편간의 이질성을 줄여 동일한 강도 측정결과를 얻기 위해 시편 생산의 일관성을 목표로 담수빙 시편은 온도조절에 의한 방법으로 제작하였다. 1축 압축시험을 위한 시편준비에 있어 압축강도의 값을 최대로 얻기 위해 얼음 속에 기포를 배제한 균질의 시편을 만들어야 한다. 여기서 온도조절에 의한 방법은 시편용기의 물속에 들어있는 기포를 제거하는데 효과적이고 균질의 투명한 얼음을 만들 수 있다. 이런 균질의 시편을 제작하기 위해 다음과 같이 물의 온도와 단열의 유무에 따라 4회 반복 실시하였다.



Fig. 3-8 Procedure of specimen preparation by trial and error

이상과 같은 시행착오를 거쳐 최종적으로 담수빙의 압축시험에 사용될 시편을 준비할 수 있었다.

기포의 크기, 형태 및 분포 등은 초기 용해된 가스 농도와 동결률과 관계가 깊다. 빠른 동결률에서는 기체분자가 동결 전에 과포화 상태를 막지 못해 빨리 확산되지 못하고 이로 인해 물속에 기포가 갇히게 된다. 자연적인 연못물에서는 동결률이 약  $0.28 \mu\text{m/s}$  이지만 실험실에서 동결률  $2.5 \mu\text{m/s}$  로 제작한 시편은 기포가 배제된 깨끗한 얼음을 얻을 수 있다고 하였다(Bari and Hallett, 1974). 이와 같이 물속에 불순물이 존재할 때 기포를 적출하기 위해서 낮은 동결률로

시편을 얼리는 것이 중요하다. 이러한 이유로 시편을 얼리는 용기 전체가 천천히 얼어야 하는데 윗면에서 아랫면 쪽으로 서서히 얼려 공기방울을 밑으로 밀어내기 위해서 윗면을 제외한 나머지 표면을 5겹 이상의 단열재로 용기를 감싼 형태로 제작하였다. 단열재를 사용하게 되면 얼음이 위에서 아래로 성장하여 단일한 방향의 결정을 갖게 되고 원통형 기둥이 형성되면서 부피가 팽창한다. 부피팽창으로 인한 아크릴 용기 균열을 막기 위해서, 윗면에서부터 얼음이 얼게 되어 부피는 아래쪽으로 증가하게 되므로 밑면은 탄성이 강한 랩(wrap)을 이용해 물이 새지 않게 테이프로 단단히 고정을 시킨다. 시편용기에 넣는 물은 고온과 저온의 물을 이용하였으나 물을 끓여 식힌 경우 기포를 배제하는 데는 효과적이나 시간이 너무 많이 걸리고 한편 100℃ 이상의 물은 약 80℃ 정도 밖에 못 견디는 아크릴 용기의 변형을 초래하였다. 4℃에 가깝게 물의 온도를 낮추어 냉동을 시켜보았으나 용기가 이미 차가운 상태에서 급속 냉동되었기 때문에 기포가 빠져나가는 시간이 부족해 얼음 속에는 더 많은 기포가 형성이 되었다. 냉각과정에서 밀도의 순환으로 인해 자동적으로 물 온도가 밀도가 가장 큰 4℃에 이르면 전체 온도가 내려가기 때문에 굳이 물의 온도를 낮춰줄 필요가 없다고 판단된다. 이 같은 원리는 담수 호수물이 얼 때의 현상과 비슷한데, 담수는 4℃일 때 밀도가 최대가 되기 때문에 표면의 수온이 4℃가 되면 침하와 대류를 반복하게 되고 물 전체가 같은 온도로 맞춰지면 대류가 정지한다. 물 표면이 결빙온도인 0℃가 되면 수면부터 결빙하기 시작한다. 표면에 붙은 공기방울과 물속에 있는 공기방울을 최소화하기 위해 걸러진 담수를 용기에 넣은 뒤 긴 막대로 충분히 휘저어 공기방울을 빼낸 후 -15℃의 cold room에서 시편의 크기에 따라 약 3~5일 정도 보관한다.

Cold room은 일정한 시간간격으로 냉동(freezing)과 제상(defrost)이 반복되는데 냉동할 때 송풍구의 바람에 의한 실린더 안의 물의 수면진동으로 공기방울이 간혀 이를 막기 위해 용기를 넣어둔 단열재 윗면을 얇은 수건으로 덮어 놓는다. 완성된 시편은 수조에 물을 받아 시편용기를 굴러가며 표면에 붙은 얼음을 살짝 녹인다. 이때 생긴 단면적의 오차는 아주 작으므로 무시하였다. 얼음은 부서지기 쉬운 재료이고 거칠게 다뤄 발생하는 초기 균열은 좋은 결과를 얻

지 못하므로 매우 신중히 다뤄야 한다. 시편을 꺼낸 후 기포가 밀려 아래에 갇힌 부분은 압축시험 전 원하는 길이에 맞춰 band-saw를 이용해 trimming하고 완성된 시편은 실험온도(-15℃)에 맞추어 승화를 막기 위해 비닐팩에 넣어 냉동고에 보관한다. 약 -15℃가 넘지 않는 온도에서 얼음을 보관하게 되면 결정학적 변화가 최소화 된다(Schwarz and Frederking, 1980). Fig. 3-10은 이와 같은 방법을 이용해 완성된 투명한 시편이다.

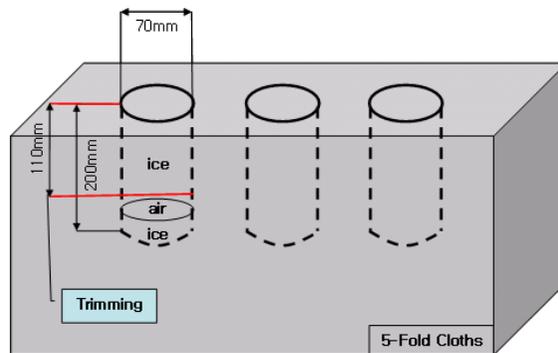


Fig. 3-9 Kit for making bubble-free transparent ice specimen



Fig. 3-10 Fresh water ice specimen prepared for the compression test

### 3.2.3 실험준비

전동 band-saw는 시편을 원하는 크기로 자르고 UTM 압축시험기의 크로스 헤드 평면에 정확하게 접촉이 되도록 시편의 양 단면을 절단하는데 사용되는 것인데  $-30^{\circ}\text{C}$ 의 cold room 안에서 작동시켜야 하므로 윤활유가 필요 없는 전기모터를 사용하는 것이 좋다. 시편의 길이에 해당하는 눈금자를 부착하고 시편을 절단할 때 나오는 얼음가루는 수시로 솔로 깨끗이 치우면서 작업을 진행해야 정확한 크기의 시편을 얻을 수 있다. Microtome은 얼음결정입자의 편광사진을 찍기 위해 시편을 얇은 판으로 가공하기 위한 도구로 저온에서 칼날의 손상이 자주 발생하므로 관리에 주의해야 한다. 칼날의 수평도도 항상 일정하게 유지시켜야 5mm의 균일한 두께의 판을 얻을 수 있다. 충분한 두께로 인해 band-saw를 사용해 절단이 가능하였고, 굳이 microtome을 사용하지 않더라도 문제는 없었다. 편광사진 촬영기는 자체 제작된 것으로서 합판으로 만든 박스 가운데 전등을 설치하고 위부분에 편광보안기를 하나 걸쳐놓고 그 위에 가로 세로 1cm의 눈금판을 부착하였다. 두께 약 5mm의 가공된 시편을 올리고 그 위에 또 하나의 편광보안기를 놓고 회전시켜가며 촬영하게 되면 시편의 결정입자 크기를 알 수 있다. 편광판 아래 전구 이외에 옆쪽에 전구를 하나 더 설치하여 반사광을 만들어주면 기포형태로 공기가 갇혀있거나 균열과 같은 내부결함도 볼 수 있다. 시편의 결정입자 크기는 얼음이 만들어지는 과정에 따라 달라지며 일반적으로 일정한 변형률 속도( $10^{-4}/\text{s}$ ) 이상에서는 grain size가 작을수록 파괴강도가 커진다(Cole, 1985). 입자의 크기는 얇은 단면의 편광 시 보이는 결정의 지름의 교차점 개수로 결정 할 수 있고, 측정된 결정입자의 평균 크기는 12.5mm 이었다.

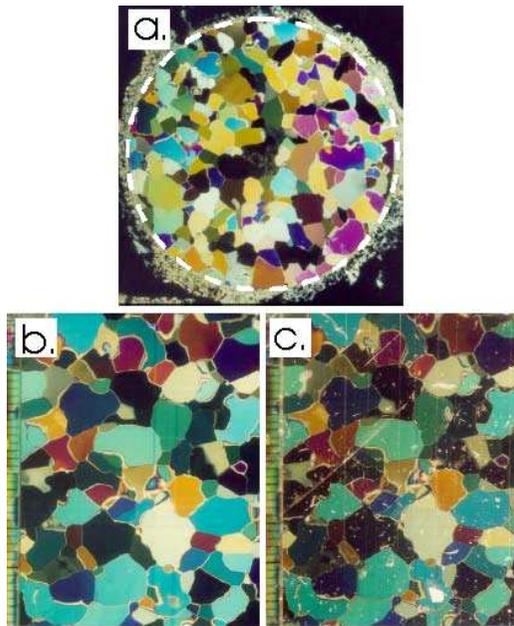


Fig. 3-11 a. Cross section of cylindrical specimen, b. Large scale same as in (a), c. Same as in (b), with the addition of side(reflected) light (Barrette and Jordaan, 2001)

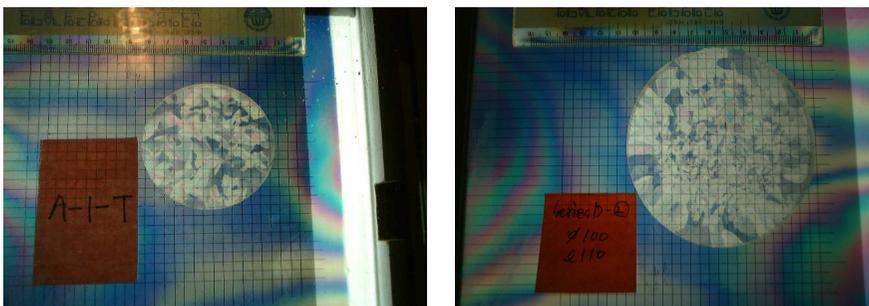


Fig. 3-12 Thin section photograph untested ice specimen ( $d= 70mm, 110mm$ )

## IV. 실험기법 및 결과

### 4.1 담수빙 1축 압축시험

얼음은 온도, 변형률속도, 결정입자 크기 등에 따라 파괴모드가 달라지는데 1축 하중에 의한 압축강도는 얼음의 재료특성에 있어서 중요한 변수이다. 얼음을 이용한 압축시험에 관한 논문들과 실험 데이터들은 매우 많으며 이와 관련된 선행연구 사례들로 Hawkes and Mellor(1972), Hooke et al.(1980), Mellor and Cole(1982, 1983), Jones(1982), Timco and Frederking(1982), Schulson and Cannon(1984), Cole(1985)이 쓴 논문 등이 있다.

Schulson(1990)

변형률속도의 차이에 의한 압축강도 특성을 나타내었고, 그 결과 얼음은 압축하중 아래서 2가지의 거동을 보임을 알 수 있었다.

첫째로, 낮은 변형률 속도에서 재료는 연성의 성질을 가지는데 축 변형(0.1을 초과하는)은 거시적 파괴 없이 나타난다. 응력-변형률 곡선은 상승과 하강으로 나누어지고 최대값(peak)과 평탄역으로 분리되는 특성이 있다. 이 구간의 범위 내에서 peak값의 응력은 온도가 감소할수록, 변형률 속도가 증가할수록 값이 커지고 grain size의 영향은 조금밖에 나타나지 않는다.

둘째로, 높은 변형률 속도에서 재료는 취성의 성질을 갖는데, 파괴는 훨씬 작은 축 변형(0.001)정도에서 발생하고 응력-변형률 곡선은 오직 상승만을 나타낸다. 이 구간에서 파괴응력(peak값)은 온도가 감소할수록 증가하고 변형률 속도가 증가할수록 peak값은 감소하거나 거의 일정하게 유지된다. 이 취성구간에서는 결정입자 크기가 작아질수록 peak값이 증가한다. 평균 압축파괴강도는 약 8MPa이다.

취성파괴의 거동을 나타낸 결과 중 시편과 가압판이 고정되어 끝 부분에 무리한 힘이 가해져서 생긴 전단균열과 끝부분이 횡 방향 구속으로부터 자유로울 때 작은 응력이 걸려 생기는 축 방향 균열 2가지 형태의 내부균열을 갖는 파괴 형상이 나타났는데 이는 응력상태의 차이로 인한 결과이다(Schulson, 1989).

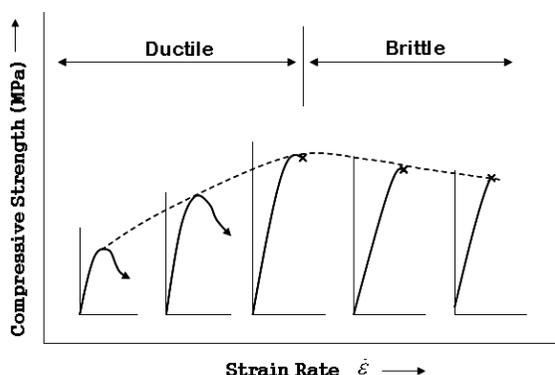


Fig. 4-1 Schematic stress-strain curves for polycrystalline ice compressed under uniaxial loading(Schulson, 1990)

Jones and Gagnon(2003)

빙산의 얼음시편으로부터 변형률속도의 차이에 의한 압축강도 특성을 알아보았는데 실험에 사용된 변형률 속도의 범위는  $10^{-8}/s \sim 10^{-1}/s$ , 온도는  $-10^{\circ}C$ 로 유지하고 지름 10cm, 길이 25cm( $l=2.5d$ )의 시편을 이용하였다.

변형률속도(strain-rate)가 빠를수록 주로 균열발생과 뚜렷한 변형이 생기기 전에 peak값에 도달 후 바로 파괴하는 취성파괴가 일어나며 여기서 나타내는 변형률 속도는 각각  $10^{-1}/s$ ,  $1/s$ 이고, 압축강도가 인장강도보다 월등히 큰 특징을 보인다. 그러나 변형률속도가 느릴 때는 천천히 최대응력 값에 도달하고 병 변형이 주로 소성유동(viscous flow)과 재결정(recrystallization)과 같은 물리현상에 의해 이루어지며 변형률속도는 각각  $10^{-7}/s$ ,  $10^{-4}/s$ 이고 이때에는 압축강도와 인장강도 사이의 차이는 그다지 크지 않다.

응력-변형률속도 그래프에서 변형률속도가  $10^{-3}/s$  이상에서 취성파괴가 나타났고,  $10^{-4}/s$  이하에서 연성파괴를 보였다. 이렇게 빙변형의 특성이 변하는 것을 ductile-to-brittle transition 이라 하고 이 때 변형률은 대략  $10^{-4}/s$  정도이다. 약  $10^{-5}/s$ 의 변형률 이하에서는 파괴강도가 변형률의 대략 1/3 승에 비례하는 power-law 크리프가 발생한다.

Cole (1985)

결정입자 크기에 의한 압축강도 특성을 알아보았는데 다결정 순수빙에 1축 압축을 가한 실험이다. 실험에 사용된 결정입자의 범위는 1.5~5mm이고 변형률속도의 범위는  $10^{-6}/s \sim 10^{-2}/s$ , 온도는  $-5^{\circ}C$  이었다. 시편의 결정입자는 얼음을 만들 때 형성과정에 따라 결정된다. Grain size effect는 변형률속도가  $10^{-5}/s$  보다 빠르거나 높은 변형률속도가 지속될 때 뚜렷이 나타나고 시각적인 crack 현상과 함께 나타난다.

응력-변형률 그래프에서 지름이 1.5mm인 결이 고운 128번 시편은  $6.6 \times 10^{-4}/s$ 에서 뚜렷이 항복점이 나타나지만, 지름이 5mm인 표면이 거친 127번 시편은 항복점이 나타나지 않고 128번 시편보다 낮은 변형률속도( $3.4 \times 10^{-3}/s$ )에서 최대강도 값을 가지고 그 크기도 작다(2.3 vs 2.56 MPa). 그리고 변형률 속도가  $5 \times 10^{-6}/s$  값일 때 실험을 하였는데, 이 값은 결정입자가 감소할 때 최대강도값의 증가를 유지하는 가장 낮은 속도이다. 응력-변형률속도 그래프에서는 peak 값에서 grain size effect를 알 수 있는데, 재료의 강도는 변형률속도가 약  $10^{-3}/s$ 일 때 최대값을 갖고 약  $10^{-2}/s$  정도로 증가하면 압축강도는 다소 떨어진다고 (Fig. 4-2).

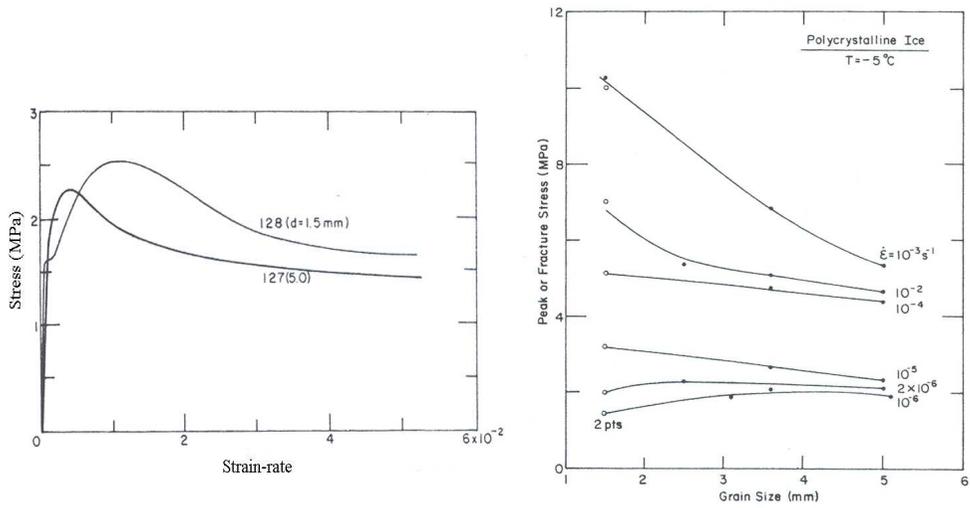


Fig.4-2 Stress-strain curves for specimen no. 127, 128 and peak stress vs. grain size for various strain rates (Cole, 1985)

#### 4.1.1 실험방법

변형률속도에 따른 1축 압축강도의 변화를 계측하고 특성을 고찰하였다. 1축 압축시험은 압축하중이 시험편의 양단에 작용하며 시험편은 옆으로 구속되지 않아서 횡 방향 변형이 자유롭다. 시험편은 미리 제작된 표준시험편을 사용하였고 cold room 내 압축시험기의 크로스헤드에 고정된 센터지점을 정확히 맞춰 편심을 받지 않게 주의하며 고정시켜야 한다. 압축하중은 시험편 양단에 접촉된 평판을 통해 전달되고 이 하중 판은 얼음과 비슷한 탄성계수를 가진 재질을 사용하는데 이것은 변형도의 연속성을 피하고 시험편 양단에서 발생하는 균열을 막아주는 역할을 한다.

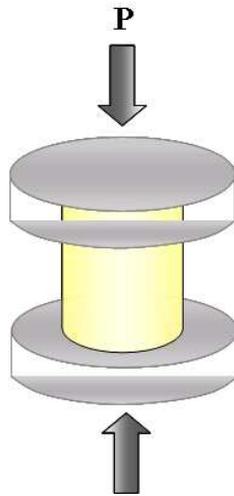


Fig. 4-3 Uniaxial compression test(-15°C)

#### 4.1.2 실험결과

시편 제작과정의 시행착오를 거치면서 압축시험도 같이 진행하였는데, 이 과정에서 실험은 시편의 가공방법 및 장비를 익히기 위한 연습시험이므로 변형률 속도나 온도 등 변수를 바꿔가면서 진행한 것이 아니라 같은 조건에서 일정한 계측 값을 얻을 수 있는지 확인하는 과정이라고 할 수 있다. 약  $10^{-1}/s$  정도의 빠른 변형률속도에서 1축 압축시험의 압축강도는 약 8~9MPa 정도였는데 타 연구자들이 수행한 실험결과 및 순수빙의 압축강도 값에 크게 다르지 않았다. 하지만 시편의 가공이 정교하지 못하면 하중을 가할 때 UTM에서 편심이 되기 때문에 충분한 강도를 보이지 못하고 비정상적인 형태로 바로 파괴되는 것을 관찰할 수 있었다(Fig. 4-4).

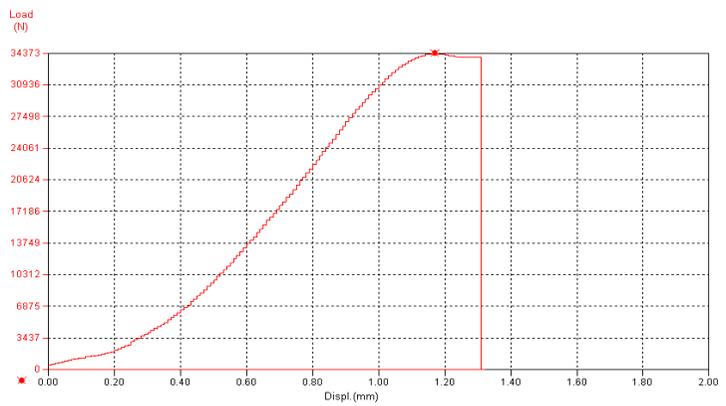
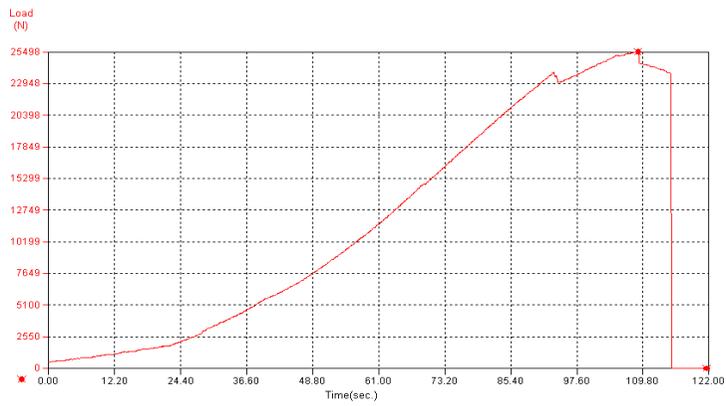
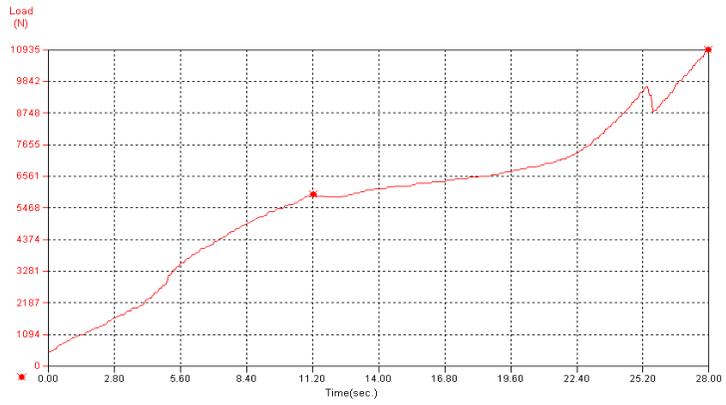


Fig. 4-4 Compressive strength 4MPa at strain-rate  $4.0 \times 10^{-4}/s$   
(specimen 1-A1, 1-B5, 2-B2)

이런 과정을 거친 후 완성된 시편으로 변형률속도를 달리하여 1축 압축시험을 수행하였다. 압축시험은 총 4회에 걸쳐 진행되었다.

Table 4-1은 재하율을 변형률속도로 변환한 후 정리한 계측된 강도의 결과값이며 평균 압축강도는 약 9MPa 이다. 압축강도( $\sigma_c$ )값에서 밑줄이 그어진 값들은 평균적인 재료시험 압축강도에 비해서 상대적으로 낮은 값들이며, 실제로 측정해본 결과 연성(ductile)의 성질을 나타내고 있었다. 이런 결과를 보이는 이유는 변형률속도에 의한 차이라고 할 수 있는데 변형률 속도는 재하속도와 시편의 길이에 의해 계산된다(변형률( $\epsilon$ )= $\frac{\text{최대변위}}{\text{전체길이}}$ , 변형률속도( $s^{-1}$ )= $\frac{\text{재하속도}}{\text{전체길이}}$ ). 변형률속도가 빠를수록 압축강도가 대체로 커지는 양상을 보이며 균열 발생과 취성파괴를 나타내지만 반대로 느린 변형률속도에서는 빙변형이 주로 소성유동(viscous flow)과 같은 현상에 의해 연성적인 특성을 보이게 된다(Jones et al., 2003).

Table 4-1 Strength of fresh water ice as function of strain-rate

<i>specimen (no.)</i>	<i>temperature (°C)</i>	<i>strain-rate (s<sup>-1</sup>)</i>	<i>σ<sub>c</sub> (MPa)</i>
4-A9	-15	3.15E-04	9.982
3-A1	-15	3.03E-04	13.862
3-D1	-15	3.03E-04	13.194
2-A6	-15	3.03E-04	11.735
5-A7	-15	3.03E-04	9.079
4-A8	-15	2.85E-04	10.831
6-A5	-15	2.75E-04	9.212
4-A7	-15	2.60E-04	9.712
6-A6	-15	2.50E-04	10.819
3-B1	-15	2.30E-04	9.441
4-B1	-15	2.30E-04	7.899
6-A7	-15	2.00E-04	10.193
6-A8	-15	2.00E-04	9.033
4-A2	-15	1.80E-04	10.065
5-A9	-15	1.80E-04	10.753
3-C1	-15	1.70E-04	11.582
2-A3	-15	1.52E-04	9.67
2-A5	-15	1.52E-04	9.161
4-A1	-15	1.50E-04	9.887
4-B2	-15	1.20E-04	9.174
4-A6	-15	1.00E-04	9.012
5-B2	-15	8.70E-05	8.519
3-D3	-15	7.58E-05	11.666
4-A3	-15	7.58E-05	10.167
5-A10	-15	7.58E-05	7.138
2-A1	-15	7.58E-05	<u>5.364</u>
2-A2	-15	7.58E-05	<u>6.358</u>
6-A1	-15	6.50E-05	<u>7.582</u>
6-A2	-15	6.50E-05	<u>5.917</u>
3-B2	-15	5.95E-05	10.932
2-B6	-15	5.95E-05	9.734
4-A5	-15	5.01E-05	<u>6.214</u>
5-A11	-15	4.50E-05	<u>6.715</u>
5-A12	-15	4.50E-05	<u>3.911</u>
5-A13	-15	4.50E-05	<u>7.589</u>
3-C2	-15	4.20E-05	9.097
6-A3	-15	3.00E-05	<u>6.571</u>
6-A4	-15	2.50E-05	<u>6.132</u>

2-B1	-15	1.21E-05	10.193
2-B2	-15	1.21E-05	9.11
2-B3	-15	1.21E-05	8.83
2-B4	-15	1.21E-05	11.059
2-B5	-15	1.21E-05	11.862
5-A14	-15	1.21E-05	<u>4.824</u>
3-A4	-15	7.58E-06	<u>6.621</u>
4-A4	-15	7.58E-06	<u>7.925</u>
5-A15	-15	7.58E-06	<u>5.379</u>
3-B3	-15	5.95E-06	<u>5.952</u>
4-B3	-15	5.90E-06	<u>7.976</u>

Fig. 4-5 에서 나타난 것처럼 취성과 연성 파괴 거동을 나타내는 특징적인 두 가지 형태의 결과 값을 얻을 수 있었는데 이는 변형률속도에 따른 전형적인 응력-변형률 속도 곡선이다. Fig. 4-7과 Fig. 4-9는 두 가지 거동에 따라 파괴되는 순간을 찍은 사진이다. 취성 파괴의 경우는 하중을 증가시키면 세로로 균열이 생기면서 바로 최고치에 도달하지만 연성 파괴의 경우는 하중이 증가되어 최고치에 도달해도 바로 깨어지지 않고 가운데 부분이 블록하게 튀어나오는 현상을 보이게 된다.

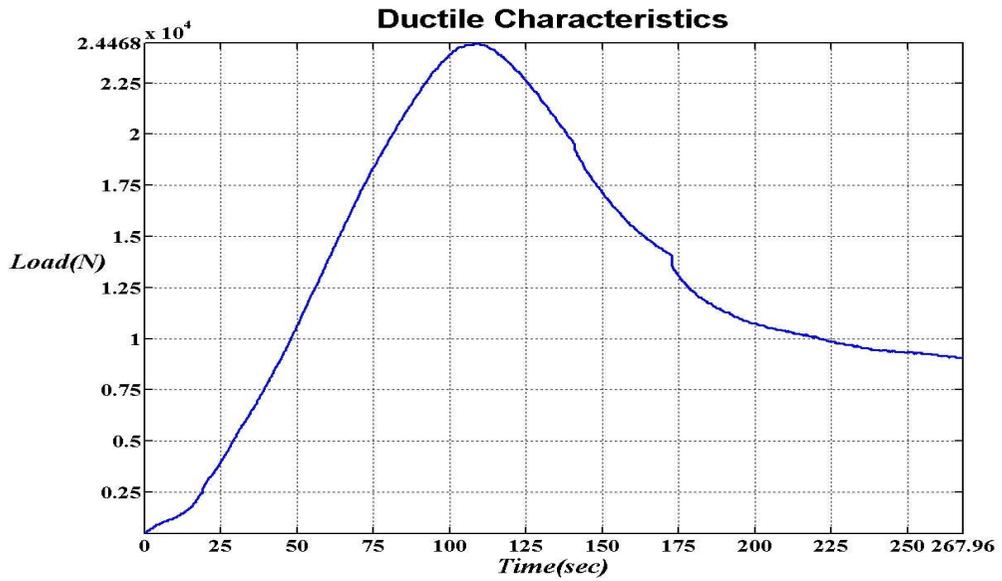
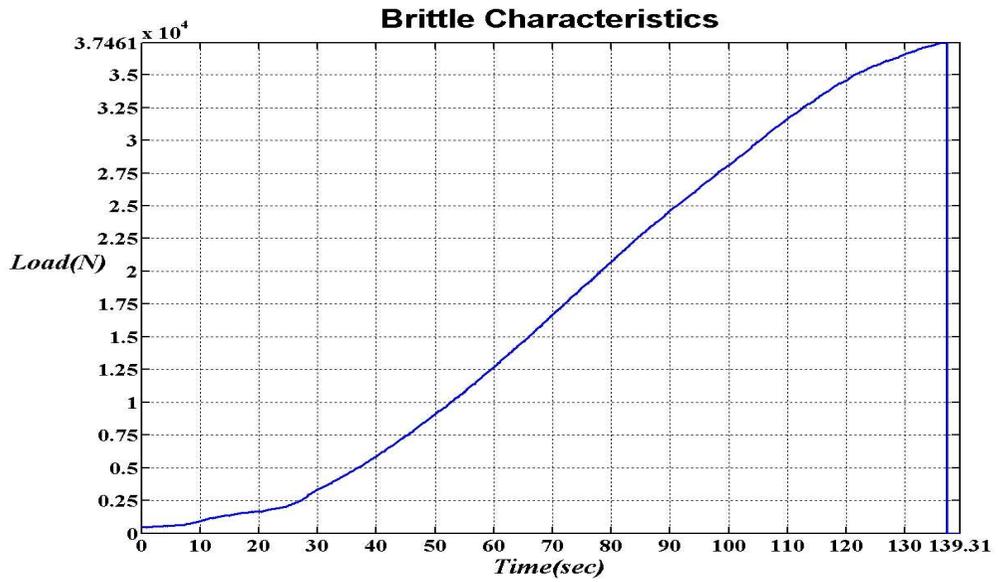
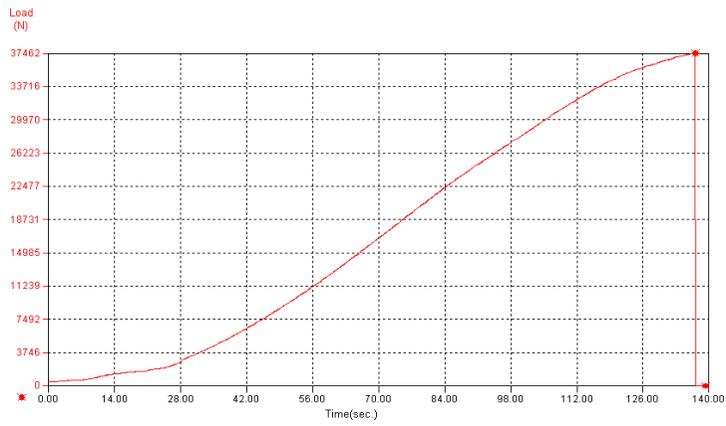
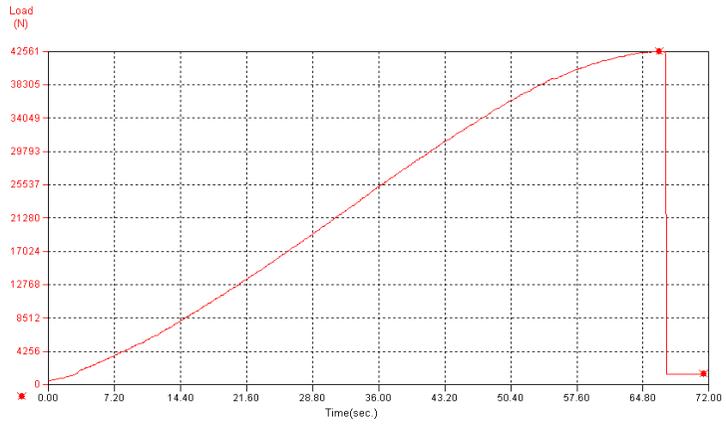
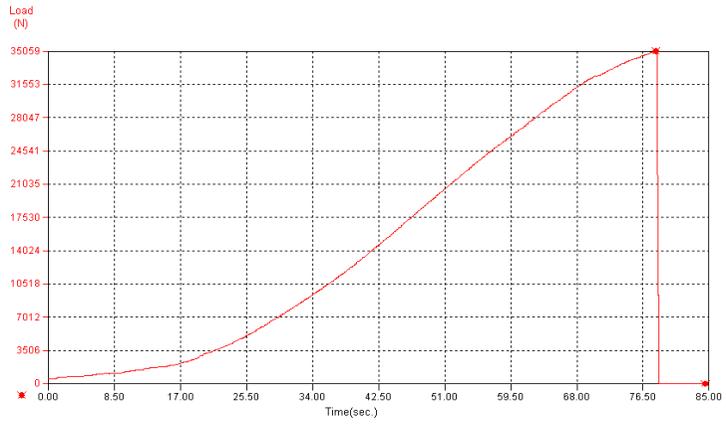


Fig. 4-5 Typical stress-strain curves for two different failure modes



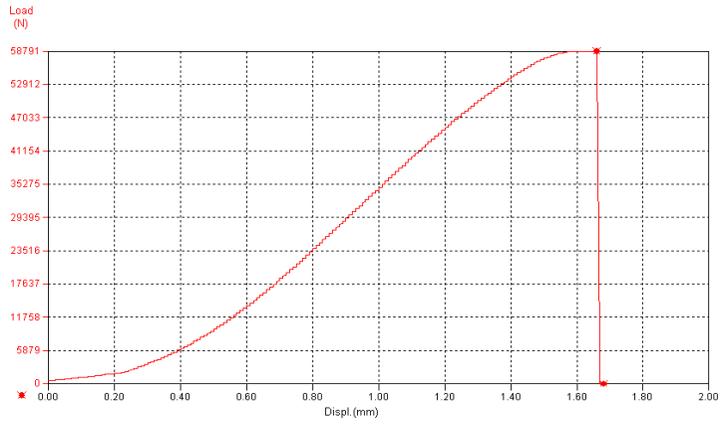


Fig. 4-6 Typical stress-strain curves for with brittle characteristics (specimen 2-B2, B4, B6 3-A3)

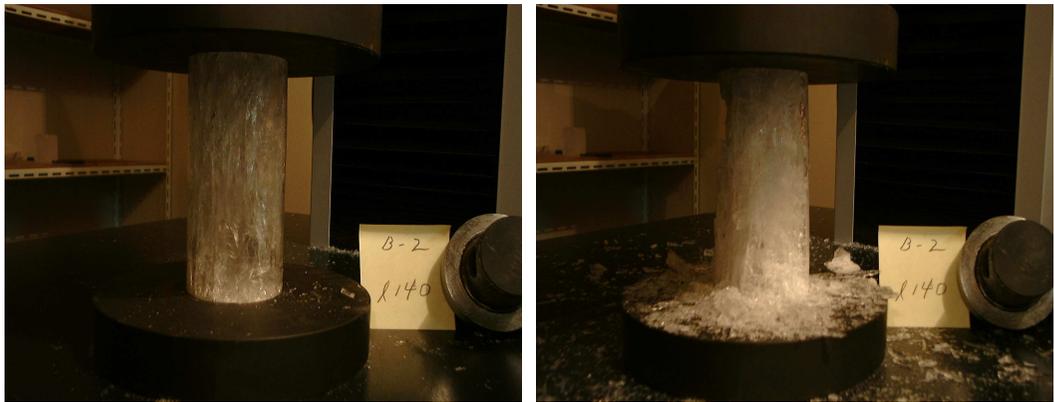
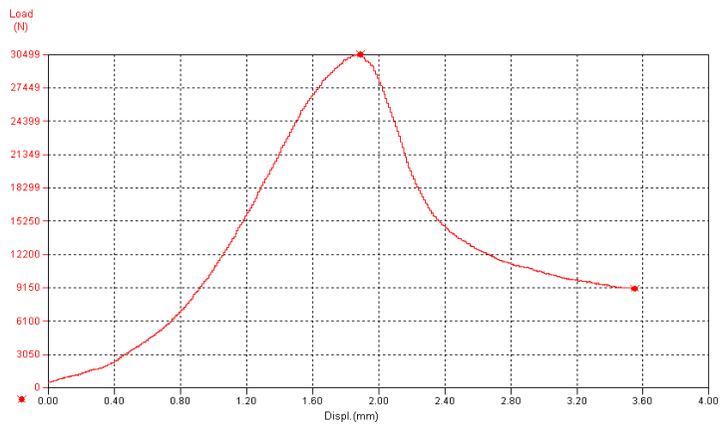
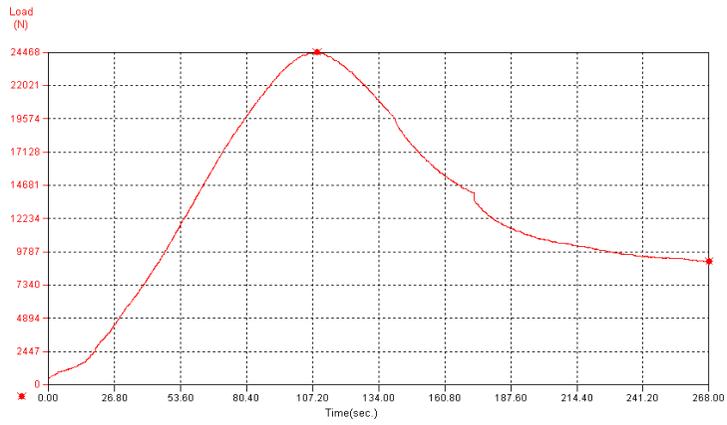
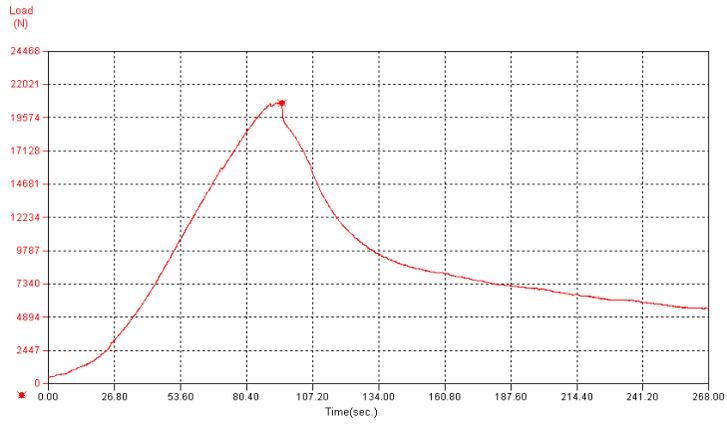


Fig. 4-7 Failure mode with brittle characteristics



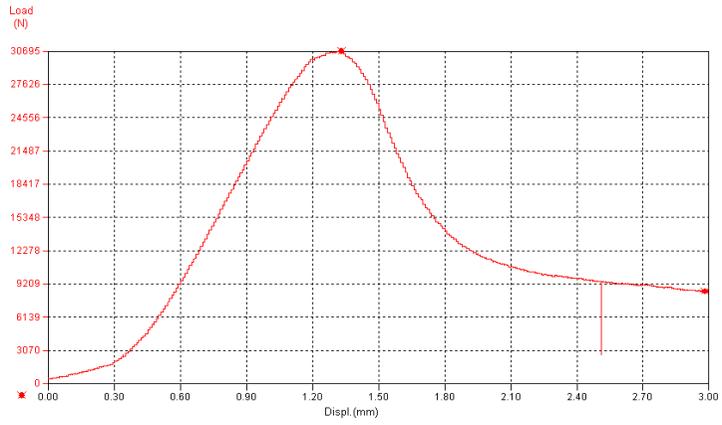


Fig. 4-8 Typical stress-strain curves for with ductile characteristics (specimen 2-A1, A2, 4-A4, B3)

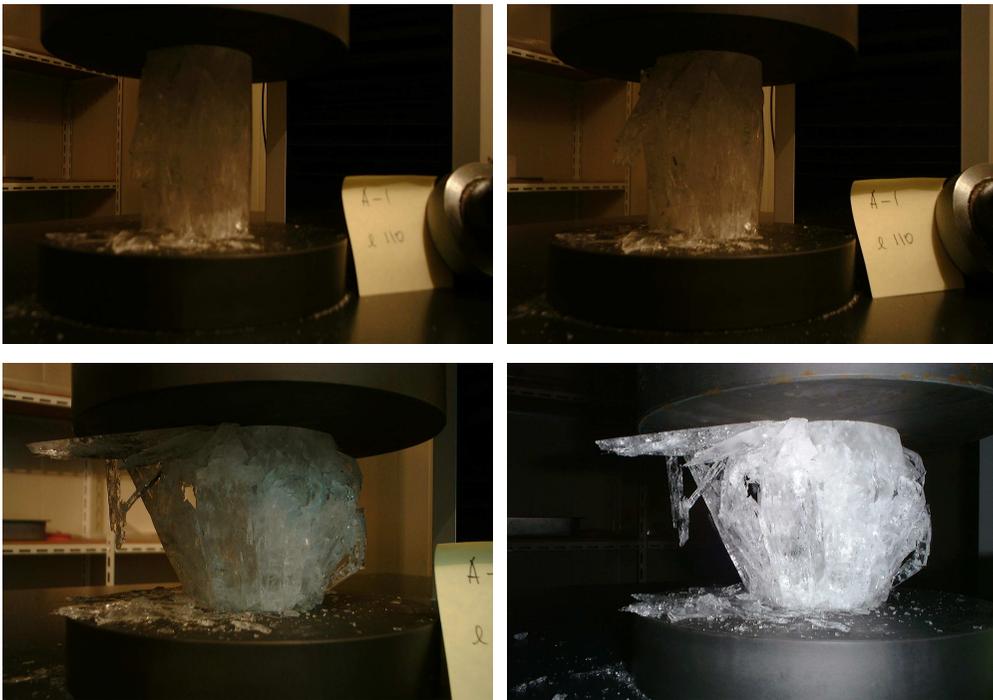


Fig. 4-9 Failure mode with ductile characteristics

Fig. 4-10 은 peak값의 응력과 변형률 속도와의 관계를 나타낸 선도인데 변형률속도가  $10^{-4}/s$  을 넘는 취성구간에서의 평균 압축강도는 대략 8~10MPa 이었으며, 반면  $10^{-5}/s$  이하의 변형률속도에서는 주로 연성과괴를 보였다. 이는 병역학에서 말하는 ductile-to-brittle transition 의 현상을 확인한 것으로 판단되며 연성과괴와 취성과괴를 하는 두 가지 형태의 변화곡선이 정확하지 않더라도 변형률속도가 이 현상에 중요한 요인으로 작용한 것을 알 수 있다.

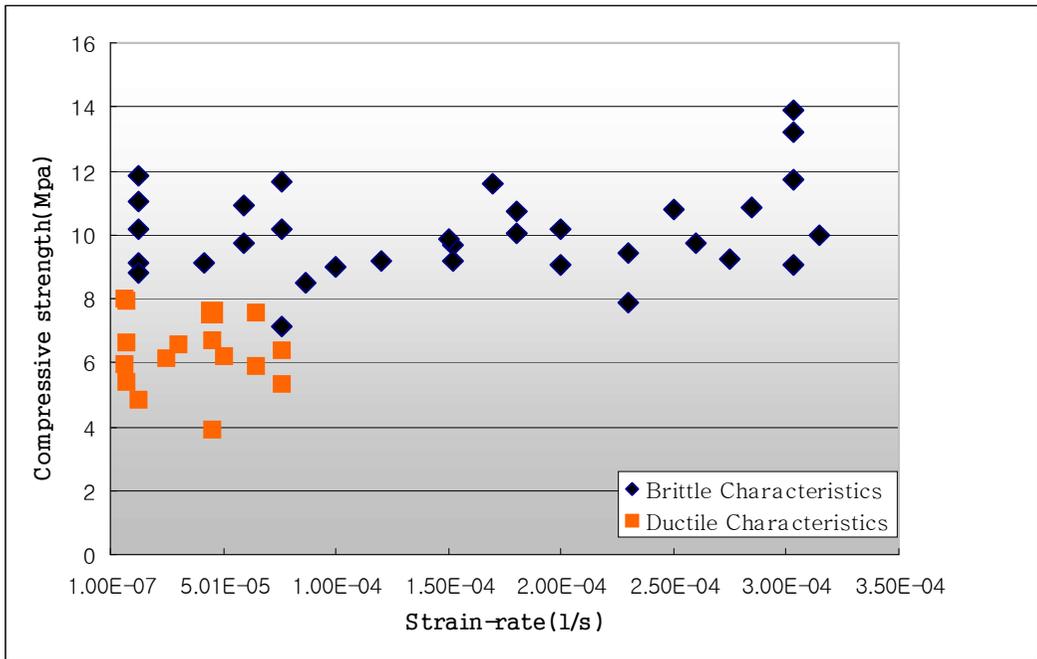


Fig. 4-10 Compressive strength(MPa) vs. strain-rate( $s^{-1}$ ) and ductile-to-brittle transition

## 4.2 빙역학 표준 실험기법

압축시험 이외에도 여러 재료시험들이 있지만 실험실에서 제조된 얼음으로 1축 압축시험을 통해 압축강도 결과를 분석하여 얼음의 특징적인 성질을 알 수 있었고 변형률속도에 따른 결과 값이 비교적 여러 참고문헌들과 같음을 알 수 있었다. 이를 통해 본 연구의 목적이기도 한 cold room을 이용해 재료 특성치를 측정하는 표준화된 기법을 제시하여 언제라도 반복 가능한 실험조건을 만들어 낼 수 있도록 매뉴얼을 제시할 수 있었다.

### 4.2.1 1축 압축시험용 시편 제작

#### [1] 시편의 규격

- 직경의 1.5~2배
- 실험에 사용한 규격;  $d = 70\text{mm}/100\text{mm}$ ,  $l = 110\text{mm}/140\text{mm}$  (4종류)

#### [2] 준비물

- 시편의 크기보다 10cm 정도 긴 두께 5mm의 실린더 형태의 아크릴 용기
- 밀면을 막기 위한 랩과 테이프
- 스티로폼을 이용한 5점 이상의 단열재

#### [3] 시편의 제작 과정

- i) 먼저 아크릴 실린더의 밀면을 랩으로 2~3번 정도 감싼 후 모서리 부분 랩이 찢어질 수도 있으므로 스펀지 소재의 종이를 덧댄 후 랩으로 한 번 더 싸고 테이프로 꼼꼼히 붙인다.
- ii) 밀면이 랩으로 막혀있는 실린더에 약 10°C의 수돗물(또는 식수) 8/10 정도 담고 물속과 표면에 붙어있는 공기방울을 제거하기 위해 긴 막대로

충분히 휘저어 공기방울을 빼낸다.

- iii) 미리 준비해 놓은 실린더의 단면적 크기만큼 구멍을 뚫어놓은 단열재에 물을 채운 실린더를 넣고 부피팽창을 고려해 단열재와 아크릴 용기 사이를 약 3cm 정도 뻗 후 실린더 입구의 물이 냉동기 바람에 의한 수면 진동을 피하기 위해 얇은 수건으로 덮어 놓는다.
- iv)  $-15^{\circ}\text{C}$ 의 cold room에서 약 3일~5일 정도 넣어두는데 크기에 따라 어는 속도가 다르기 때문에 작은 시편은 3일 큰 시편은 4일 반나절 정도 소요된다.
- v) 완성된 시편은 수조에 물을 받아 시편용기를 굴러가며 표면에 붙은 얼음을 살짝 녹인다. 이때 생긴 단면적의 오차는 아주 작으므로 무시한다.
- vi) 얼음을 꺼낸 후  $-15^{\circ}\text{C}$ 의 냉동고에 넣고 이틀 후 압축시험을 수행한다.
- vii) 시편은 얼음이 위에서 아래로 자라기 때문에 윗부분과 아랫부분을 잘 구분해서 보관한다.

#### 4.2.2 실험 진행절차

##### [1] Cold Room

- i) 실험에 앞서 보정온도는 반드시  $-15^{\circ}\text{C}$ 로 유지하고 열손실을 방지하기 위해 cold room 내에서 작업하는 실험인원은 2명으로 제한한다.
- ii) Motor band saw는 실험 전에 반드시 전원을 켜놓은 후 칼날의 상태와 작동이 원활히 되는지 살핀다. 주변의 얼음가루도 깨끗이 치운다.
- iii) 냉동고에서 cold room으로 한 시간 전에 미리 옮겨놓은 시편은 band saw를 이용해 규격에 맞게 절단한 후 편광사진 촬영을 위해 두께 약 0.5cm 정도를 윗면에서 잘라낸다.
- iv) 시편의 분류를 한 뒤 얇은 단면을 이용해 편광사진 촬영을 하는데 이때 해상도 조절로 결정입자 크기의 형태가 뚜렷하게 보이도록 수직방향에서 촬영을 한다.

## [2] 1축 압축시험

- i) 가공한 시편을 crosshead에 고정된 jig center에 정확히 맞춰 편심을 받지 않게 주의하며 고정한다.
- ii) 스펙을 적어놓은 메모지와 함께 시험과정을 촬영하며 변형률 속도를 고려 하면서 압축시험을 진행한다.

## [3] 측정치의 환산

$$\text{변형률}(\epsilon) = \frac{\text{최대변위}}{\text{전체길이}}, \quad \text{변형률속도}(s^{-1}) = \frac{\text{재하속도}}{\text{전체길이}}$$

## V. 결 론

본 논문에서는 실험실에서 제작된 담수빙의 1축 압축시험을 통해 강도를 측정하고 시편제작 및 치수결정을 중점적으로 연구하였다. 이를 통해 cold room 실험을 통한 반복적인 환경상태에서 표준화된 기법을 마련할 수 있었다.

1) 담수빙의 강도 측정 시 최적의 값을 얻기 위해 균질의 투명한 시편을 제작하였다. 기포가 얼음 속에 갇히지 않아야 깨끗이 결빙되는데 천천히 얼려 기포를 위에서 아래로 밀어내기 위해 윗면을 제외한 나머지 용기 표면을 5겹 이상의 단열재를 사용하였고 cold room 의  $-15^{\circ}\text{C}$ 에서 약 3~5일 정도 소요되었다. 시편의 규격은 직경의 약 1~1.5배 정도로 제작하였고 사용한 시편의 크기는  $d = 70\text{mm}/100\text{mm}$ ,  $l = 110\text{mm}/140\text{mm}$  로 모두 4종류의 시편으로 실험을 수행하였다.

2) 재료특성 연구의 하나로 앞서 제작한 담수빙을 이용해 cold room에서 1축 압축시험을 수행하였다. 담수빙의 재료적 특성을 결정하는 여러 가지 요인 중 변형률속도를 달리하여 압축강도를 측정하였고, 특징적인 두 가지 형태의 결과 값을 얻을 수 있었다. 담수빙의 응력-변형도 선도에서 변형률속도가  $10^{-4}/\text{s}$ 를 넘는 구간에서는 취성파괴,  $10^{-5}/\text{s}$  이하의 변형률속도에서는 주로 연성파괴를 보였으며 이러한 특징적인 두 가지 형태의 변화점이 정확하지 않더라도 변형률속도가 ductile-to-brittle transition의 현상에 중요한 요인으로 작용한 것을 알 수 있었다.

향후 변형률속도 이외에 온도와 결정입자 크기(grain size)에 따른 담수빙의 재료특성의 변화를 cold room을 이용하여 실험할 수 있도록 표준화된 실험기법을 보완할 필요가 있으며 해빙(sea ice) 및 염수(brine water)를 이용한 강도시험과 굽힘 및 전단강도 실험기법에 대한 절차에 대한 연구도 지속적으로 수행할 필요가 있다.

## 참 고 문 헌

- [1] Bari, S.A. and Hallett, J. (1974), "Nucleation and Growth of Bubbles at an Ice-Water Interface", *Journal of Glaciology*, Vol.13, pp.489-520.
- [2] Barrette, P.D. and Jordaan, I.J. (2001), *Compressive Behaviour of Confined Polycrystalline Ice*, NRC PERD Report 4-77.
- [3] Cole, D.M. (1979), "Preparation of Polycrystalline Ice Specimens for Laboratory Experiments", *Cold Regions Science and Technology*, Vol.1, pp.153-159.
- [4] Cole, D.M. (1985), "Grain Size and the Compressive Strength of Ice", *Proceedings 4th International Offshore Mechanics and Arctic Engineering Symposium*, Dallas, Texas, Vol.2, pp.220-226.
- [5] Dykins, J.E. (1970), *Ice Engineering-Tensile Properties of Sea Ice Grown in a Confined System*, Naval Civil Eng. Lab., Tech. Report R-689.
- [6] Frankenstein, G. (1969), *Ring Tensile Strength Studies of Ice*, CRREL, Tech. Report 172.
- [7] Freitag, D.R. and Mcfadden, T.T. (1997), *Introduction to Cold Regions Engineering*, ASCE Press.
- [8] Glen, J.W. (1953), *Mechanical Properties of Ice and Their Relation to Glacier Flow*, Ph.D. Thesis, University of Cambridge.
- [9] Goughnour, R. (1967), *The Soil-Ice System and the Shear Strength of Frozen Soils*, Ph.D. Thesis, Michigan State University.

- [10] Hawkes, I. and Mellor, M. (1972), "Deformation and Fracture of Ice under Uniaxial Stress", *Journal of Glaciology*, Vol.11, pp.103-131.
- [11] Hooke, 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.
- [12] Jones, S.J. and Glen, J.W. (1969), "The Mechanical Properties of Single Crystals of Pure Ice", *Journal of Glaciology*, Vol.8, pp.463-473.
- [13] Jones, S.J. (1982), "The Confined Compressive Strength of Polycrystalline Ice", *Journal of Glaciology*, Vol.28, pp.171-176.
- [14] Jones, S.J., Gagnon, R.E., Derradji, A. and Bugden, A. (2003), "Compressive Strength of Iceberg Ice", *Canadian Journal of Physics*, Vol.81, pp.191-200.
- [15] Lile, R.C. (1979), *Rheology of Polycrystalline in Ice*, Ph.D. Thesis, University of Melbourne.
- [16] Masterson, D.M., Graham, W.P and Childs, G.R. (1997), "A Comparison of Uniaxial and Borehole Jack Tests at Fort Providence Ice Crossing, 1995", *Canadian Geotechnical Journal*, Vol.34, pp.471-475.
- [17] Mellor, M and Cole, D.M. (1982), "Deformation and Failure of Ice under Constant Stress of Constant Strain-rate", *Cold Regions Science and Technology*, Vol.5, pp.201-219.
- [18] Mellor, M and Cole, D.M. (1983), "Stress/Strain/Time Relations for Ice under Uniaxial Compression", *Cold Regions Science and Technology*, Vol.6,

pp.207-230.

- [19] Michel, B. (1978), "A Mechanical Model for Creep of Polycrystalline Ice" Canadian Geotechnical Journal, Vol.15, pp.155-170.
- [20] Peyton, H.R. (1966), Sea Ice Strength, Geophysical Inst., University of Alaska, Report UAG-182.
- [21] Sanderson, T. (1988), Ice Mechanics Risks to Offshore Structures, Graham Trotman.
- [22] Schulson, E.M. and Cannon, N.P. (1984), "The Effect of Grain Size on the Compressive Strength of Ice", Proceedings of the IAHR Symposium on Ice, Hamburg, Germany, pp.9-38.
- [23] Schulson, E.M. (1990), "The Brittle Compressive Fracture of Ice", Acta Metall. Mat., Vol.38, pp.1963-1979.
- [24] Schwarz, J. (1978), "碎氷摸型工學 の 新發展", 日本造船學會誌, No.587, p.236.
- [25] Schwarz, J. (1980), "Standardized Testing Methods for Measuring Mechanical Properties of Ice", Cold Regions Science and Technology, Vol.4, pp.245-253.
- [26] Sinha, N.K. (1983), "Creep Model of Ice for Monotonically Increasing Stress", Cold Regions Science and Technology, Vol.8, pp.25-33.
- [27] 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.

- [28] Timco, G.W. and Frederking, R.M.W. (1984), "An Investigation of the Failure Envelopes of Granular/ Discontinuous Columnar Sea Ice", Cold Regions Science and Technology, Vol.9, pp.17-27.
- [29] 佐藤和郎, 永井文雄 (1963), 鑄鐵のような脆性材料からなる円板の回轉速度, 航空技術研究所報告, TR-38.
- [30] U.S Army (2002), Engineering and Design Ice Engineering, Department of the Army, U.S Army Corps of Engineers, Washington DC, Manual No. 1110-2-1612.