

# Cold Room을 이용한 얼음 및 동토의 재료특성 계측 실험기법의 표준화

김정현\* · 최경식\* · 서영교\*

\*한국해양대학교 해양개발공학부

## Standardization of Ice Mechanics Experimental Procedures in a Cold Room

JUNG-HYUN KIM\*, KYUNG-SIK CHOI\* AND YOUNG-KYO SEO\*

\*Division of Ocean Development Engineering, Korea Maritime University, Busan, Korea

**KEY WORDS:** Cold room 저온실험실, Standard experimental procedures 표준 실험기법, Fresh water ice 담수빙, Frozen soil 동토, Uniaxial compression strength 1축 압축강도

**ABSTRACT:** 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 used, extensively under various 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. In this paper, laboratory experimental techniques with the cold room facility and standard procedures established for ice material properties are introduced. Test specimens include laboratory-grown fresh water ice and frozen soils. Tests are carried out for unconfined compressive strength. Preparation and dimension of the specimen are the most important issues arising in cold room tests. The details of specimen preparation, testing procedure and strength test results are also discussed.

### 1. 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.

극지 자원개발에는 저온과 얼음이라는 혹독한 자연조건을 이겨낼 수 있는 빙역학 기술과 특수 장비가 필요하다. 하지만 북극권 국가가 아니면 극지환경에 직접 접할 기회가 없으며 극지에 과학기지를 유지하고 있다하여도 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 하

에 운영되고 있다. 국내에서는 아직 빙해수조 시설을 보유하고 있지 못하여 쇠빙선박의 모형실험 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 최저기준 설계온도는 -45℃정도이지만 통상적으로 -30℃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 되는데 2004년 말 국내에서는 처음으로 빙역학 실험용 Cold Room이 한국해양대학교에 건설된 바 있다. 4m×6m 규모인 이 시설은 설치 이후 많은 시행착오와 다양한 조건에서의 가동시험을 통해 거의 정상적인 활용 단계에 이르렀고 현재는 얼음 및 동토에 대한 실험을 수행하고 있다.

얼음을 비롯한 저온에서의 재료는 상온에서의 특성과는 많은 차이가 있어서 온도, 하중속도>Loading rate), 결정입자의 크기와 방향에 따라 취성(Brittle)에서 연성(Ductile)의 전 범위에 걸쳐 다양한 특성을 보여주는데 이러한 현상은 극지방에서 접하게 되는 온도나 하중속도의 범위에서 흔히 관측된다. 극지에서 구조물과의 상호작용에서 발생하는 빙하중과 재료거동을 이해하

교신저자 김정현 : 부산광역시 영도구 동삼동 1번지  
051-410-4951 sy8296@bada.hhu.ac.kr

는 것이 아주 중요한 과제이기 때문에 Cold Room을 이용한 빙역학 실험이 중요한 연구 수단이 된다.

Cold Room에서의 빙역학 실험은 인공으로 제조된 다결정 순수빙(Polycrystalline fresh water ice)이나 염수빙(Brine ice)에 압축 및 인장시험을 수행하여 재료강도와 탄성계수 등을 파악하고, 굽힘시험을 통해 균열발생과 재료의 파괴거동을 파악하는 일이 주요한 사항이다. 한편으로는 Ice Towing Tank에서 사용되는 모형빙(Model ice)의 재료특성을 계측하거나 극지현장에서 수집해 온 얼음의 재료특성을 파악하는 역할도 수행한다. Cold Room을 활용하는 연구로 동토(Frozen soil)나 콘크리트, 강재 등의 저온에서의 재료특성을 관측하거나 저온에서의 기계성능 파악, 저온에서의 인체반응 등 다양한 용도로 응용할 수 있다.

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 시급하다고 하겠다. 선행연구의 여러 방법들을 알고 응용하여 본 시설을 이용해 자체적인 제조, 실험 기술을 획득하고 결과의 비교분석을 통해 실험기법의 표준화에 대한 타당성을 제시할 수 있다.

이러한 배경에서 본 논문에서는 지난 1년 간 가동해 온 Cold Room 시설을 이용하는 빙역학 표준 실험기법을 다루고자 한다. 본 연구에서 다루고 있는 담수빙이나 동토의 재료 특성치에 대한 정확한 값 자체가 목표가 아니라 본 시설을 이용하여 재료 특성치를 측정하는 시편제작과정 및 실험방법의 표준화된 실험기법을 통해 Cold Room 시설 활용능력을 향상시킬 수 있고 언제라도 반복 가능한 실험조건을 만들어 낼 수 있도록 매뉴얼을 제시하는 데 목적이 있다. 이러한 연구는 국내에서는 최초로 시도되는 것으로서 중요한 의미가 있다.

본 논문에서는 불순물이 제거된 균질의 시편 제조와 가공, Cold Room 내에서의 실험절차와 계측방법, 재료강도에 대한 계측결과를 분석하는 방법 등을 제시하였다. 실험의 반복성과 일정한 결과를 얻을 수 있도록 표준화된 실험절차를 마련하였고 아울러 실험결과로 변형률속도에 따른 담수빙과 동토의 응력-변형도 선도 그리고 압축강도 특성 등을 고찰하였다.

## 2. 실험 설비 및 시편제작

### 2.1 Cold Room 실험설비

실험에 사용된 Cold Room은 2004년 말 설치되었으며 4m×6m×2.6m 규격의 챔버형 시설로 내부온도를 -30℃까지 조절할 수 있다. 온도 및 습도 조절은 자동으로 이루어진다. Cold Room 내에는 UTM(Universal testing machine; 경도정밀 제작, 시험 속도 0~200mm/min, 최대 압축하중 20톤급)이 배치되어 1축 압축시험과 굽힘 시험에 사용되며 챔버 외부에서 디지털 제어 가능하도록 되어 있다(Photo. 1). 한편 시편의 가공을 위해 저온에서도 작동이 가능한 Motor-band-saw와 편광사진 촬영에 필요한 얇은 시편을 만들기 위한 Microtome 및 편광사진촬영

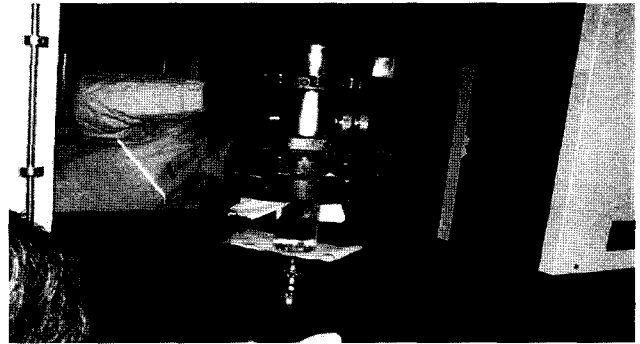


Photo. 1 UTM for compression and bending tests

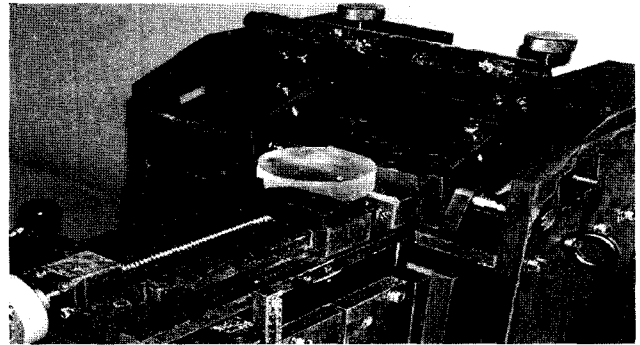


Photo. 2 Microtome for thin section photography

기가 Cold Room 내부에 비치되어 있다(Photo. 2).

### 2.2 시편제작

시편제작은 본 연구에서 중점적으로 진행했던 부분으로 경험 부족으로 인해 많은 시행착오를 거쳐야 했다.

많은 참고문헌에서 취성재료인 담수빙에 대하여 시편의 길이는 직경의 약 1~1.5배 정도로 제작할 것을 권장하고 있는데, (한편 ASTM에 규정된 강재 압축 봉 시편의 제원은  $L=3D$ 임) 이를 바탕으로 담수빙 시편을 크기별로 지름 70mm와 100mm, 길이 110mm와 140mm로 모두 4종류의 시편을 제작하였다. 원통형 시편제작을 위한 용기는 두께 5mm의 원형 실린더 형태의 아크릴을 사용하였고, 시편가공에 대비하여 실제 압축시험에 사용되는 시편의 길이보다 약 10cm정도 길게 여유를 두었다.

시편제조 방법에는 얼음의 결정입자 크기를 조절하는 방법(Timco and Frederking, 1982)과 방향성을 중점적으로 본 방법(Hawkes and Mellor, 1972), 그리고 균질의 투명시편을 제조하는 방법을 기초로 하는 여러 방법들이 있다. 본 논문에서는 담수빙 시편을 온도조절에 의한 방법으로 제작하였는데 이와 같은 방법은 시편 용기의 물속에 들어있는 기포를 제거하는 데 효과적이고 물속에 불순물이 존재할 때 기포를 적출하기 위해서는 낮은 동결률(약 2.5 $\mu$ m/s)로 시편을 얼리게 되면 균질의 투명한 얼음을 만들 수 있다(Bari and Hallett, 1974). 기포는 물이 빨리 얼수록 얼음 속에 갇히기 쉽기 때문에 용기 전체를 천천히 얼려야 하는데 윗면에서 아래쪽 방향으로 서서히 얼려 기포를 밀어서 밀어낼 수 있게 윗면을 제외한 나머지 표면을 5겹 이상의 단열재로 용기를 감싼 형태로 제작하였다(Fig. 1). 이 같은 원리는

담수 호수물이 얼 때의 현상과 비슷한데, 담수는 4°C일 때 밀도가 최대가 되기 때문에 표면의 수온이 4°C가 되면 침하와 대류를 반복하게 되고 물 전체가 같은 온도로 맞춰지면 대류가 정지한다. 물 표면이 결빙온도인 0°C가 되면 수면부터 결빙하기 시작한다.

시편 제작은 걸러진 담수를 용기에 넣고 표면에 붙은 공기방울과 물속에 있는 기포를 최소화하기 위해 막대로 충분히 휘저어 공기방울을 빼낸 후 결정학적 변화가 최소화 되는 -15°C온도의 Cold Room에서 길이에 따라 3~5일 정도 보관한다(Schwarz, 1980). 얼음은 위에서 아래로 단일한 방향의 결정을 갖게 되고 기포가 밀려 아래에 갇힌 부분은 압축시험 전 원하는 길이에 맞춰 잘라내고 완성된 시편은 실험온도에 맞추어 냉동고에 보관한다. 시편이 완성되기까지 평균 3일 반나절 정도 소요가 되었는데 약 110~140mm가 얼어 있었고 이는 1.3~1.6mm/hour의 결빙속도를 갖는 것을 알 수 있다. Photo. 3은 다음과 같은 과정을 거친 완성된 시편을 보여준다.

이와 같은 방법은 전형적인 시편제작과정으로 사용되고 있는 Glen(1953)의 연구방법에서 소개된 진공관과 열 가압판, 냉각장치 등의 특수 장비 사용이 불필요하며, 얼음이 생성되는 원리를 이용해 방향성과 균질성을 만족하는 자체적인 기술을 확보할 수 있었다.

Cold Room을 활용하는 연구로 동토(Frozen soil)의 재료특성 파악도 중요하다. 동토 시편은 담수빙 시편제조 방법과는 다른데 동토의 경우 시편제작에 필요한 흙은 표준사와 점토성분인 카올리나이트(Kaolinite)를 사용하였고 각각의 성분비와 함수비를

달리하여 제작하였다. 먼저 표준사와 카올리나이트 비율을 10%, 20%, 30% 차례대로 섞고 각각의 비율에 대해 함수비 7%, 15%, 20%에 해당하는 물을 넣어 섞어서 총 9개의 시편을 제작하였다. 공시체의 크기는  $\phi=100\text{mm}$ ,  $l=200\text{mm}$ 이며 이와 같은 크기에 해당하는 아크릴 실린더에 각각 섞은 흙을 먼저 1/3넣고 2.5kg 해머를 이용해 30cm 높이에서 25회씩 3번 다지는 표준다짐을 한다. 이렇게 준비된 시료는 Cold Room 내에서 -15°C상태에서 약 1주일간 동결시킨다. 완성된 시편은 유압식 시료추출기를 사용해 실린더에서 추출한 후 냉동고에 넣고 이틀 후 압축시험을 시행한다.

### 3. 실험방법 및 결과

#### 3.1 담수빙 1축 압축시험

1축 하중에 의한 압축강도는 얼음의 재료특성에 있어 중요한 변수이다. 얼음은 일반 구조용 재료와는 달리 온도, 염분, 결정입자의 크기(Grain size), 결정축의 방향과 분포(C-axis orientation), 변형률속도(Strain-rate) 등에 따라 파괴모드가 달라지는데 변형률속도가  $10^{-4}/\text{s}$  보다 클 때 균열이 발생하는 현상이 뚜렷이 나타난다고 보고된 바 있다 (Cole, 1985).

담수빙의 압축시험에 대해서 현재까지 많은 실험자료와 데이터가 공개되어 있다. 이들 선행 연구사례들에는 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) 등이 있다.

본 연구에서는 앞서 제작한 시편을 이용해 횡방향이 구속되지 않은 1축 압축시험만을 고려하였고 압축시험이 진행되는 동안 Peak stress 값을 측정하였다. Table 1은 재하속도를 변형률속도로 변환한 후 정리한 계측된 강도의 결과이며 평균 압축강도는 약 8.9MPa 이었으며 이 수치는 타 연구자들이 얻은 담수빙의 1축 압축강도 실험결과 범위 내에 있는 값이다. 압축강도( $\sigma_c$ )에서 이탤릭체로 표시된 것은 평균적인 압축강도에 비해서 상대적으로 낮은 값들이며, 실제로 연성(Ductile)의 변형특성에서 얻어진 것이었다. 이런 결과는 변형률속도에 의한 차이라고 할 수 있는데 변형률속도는 재하속도와 시편의 길이에 의해 계산되는데 (변형률=최대변위/전체길이, 변형률속도=재하속도/전체길이), 변형률속도가 빠를수록 압축강도가 대체로 커지는 양상을 보이며 균열 발생과 취성파단을 나타내지만, 반대로 느린 변형률속도에서는 빙변형이 주로 소성유동과 같은 현상에 의해 연성적인 특성을 보이게 된다(Jones et al., 2003).

Fig. 2에서 나타난 것처럼 특징적인 두 가지 형태의 결과 값을 얻을 수 있었는데 이는 변형률속도에 따른 전형적인 응력-변형률속도 곡선이다. 낮은 변형률속도에서 재료는 연성의 성질을 가지는데 축 변형이 거시적 파괴 없이 일어나며, 응력-변형률속도 곡선은 상승과 하강, 최대값과 평탄역으로 분리되는 특성이 있는 반면 높은 변형률속도에서는 취성의 성질을 가지며 파괴는 훨씬 작은 축 변형(약 0.001)에서 발생한다(Schulson, 1990).

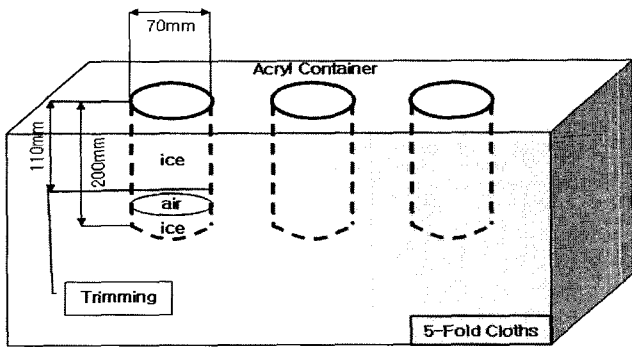


Fig. 1 Kit for making bubble-free transparent ice specimen



Photo. 3 Ice specimen for compression tests

Table 1 Test results of the fresh water ice strength

Specimen [no.]	Temperature [°C]	Strain-rate [s <sup>-1</sup> ]	Strength [MPa]
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	5.364
2-A2	-15	7.58E-05	6.358
6-A1	-15	6.50E-05	7.582
6-A2	-15	6.50E-05	5.917
3-B2	-15	5.95E-05	10.932
2-B6	-15	5.95E-05	9.734
4-A5	-15	5.01E-05	6.214
5-A11	-15	4.50E-05	6.715
5-A12	-15	4.50E-05	3.911
5-A13	-15	4.50E-05	7.589
3-C2	-15	4.20E-05	9.097
6-A3	-15	3.00E-05	6.571
6-A4	-15	2.50E-05	6.132
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	4.824
3-A4	-15	7.58E-06	6.621
4-A4	-15	7.58E-06	7.925
5-A15	-15	7.58E-06	5.379
3-B3	-15	5.95E-06	5.952
4-B3	-15	5.90E-06	7.976

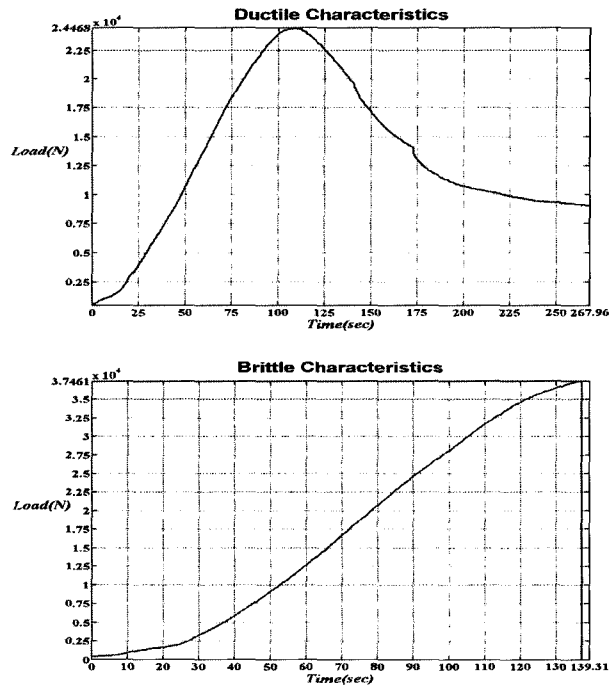


Fig. 2 Typical stress-strain curves for brittle and ductile failure modes

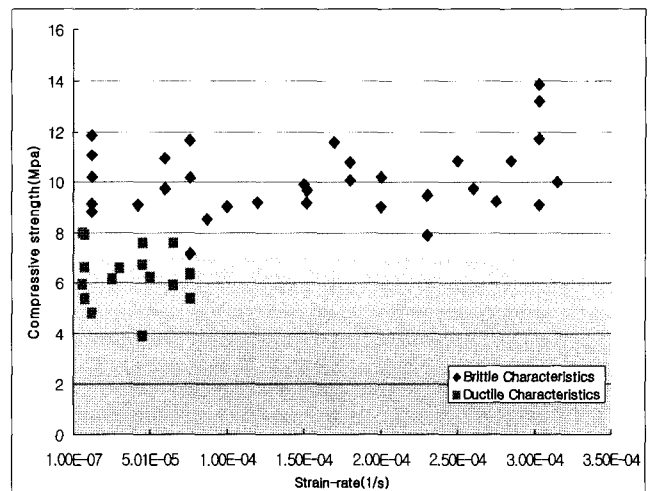
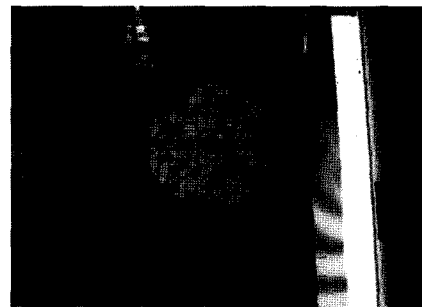
Fig. 3 Compressive strength (MPa) versus strain-rates (s<sup>-1</sup>)Photo. 4 Thin section photograph of untested ice specimen (d = 15.31 mm,  $\sigma_c = 9.607$  MPa)

Fig. 3은 Peak stress와 변형률속도와의 관계를 나타낸 자료로서, 변형률속도가 재료의 특성에 어떠한 영향을 미치는지에 대한 경향을 파악하는 그래프인데, 이 때 변형률속도의 값이 작을수록 상대적으로 압축강도의 값도 작은 값을 보여주고 있는 것을 알 수 있다. 이는 빙역학에서 말하는 Ductile-to-brittle transition의 현상을 확인한 것으로 판단되며 연성파괴와 취성파괴를 하는 두 가지 형태의 변화곡선이 정확하지 않더라도 변형률속도가 이 현상에 중요한 요인으로 작용한 것을 알 수 있다. 이 그래프에 대한 신뢰성을 높이기 위해 앞으로 많은 데이터 값의 확보가 필요하고, 보다 넓은 범위에 걸쳐 x축의 변형률속도를 조절해 Log-scale로 바꿔준다면, 경향을 파악하는 데에 대한 편차가 줄어들 것으로 예상된다.

Microtome을 이용해 시편을 약 5mm의 두께로 잘라 이 얇은 단면을 편광촬영하게 되면 시편의 결정입자 크기를 알 수 있다. 시편의 결정입자 크기는 얼음이 만들어지는 과정에 따라 달라지며 일반적으로 일정한 변형률속도( $10^{-4}/s$ ) 이상에서는 Grain size가 작을수록 파괴강도가 커진다(Cole, 1985). 측정된 결정입자의 평균 크기는 12.5mm이고 Photo. 4는 얇은 단면을 촬영한 편광사진이다. Grain size가 작을수록 압축강도가 크게 측정된 것을 확인할 수 있었다.

Photo. 5는 두 가지 거동에 따라 파괴되는 순간을 찍은 사진이다. 취성파괴의 경우는 하중을 증가시키면 세로로 균열이 생기면서 최고치에 도달하면 하중을 더 이상 견디지 못하고 깨어지지만 연성파괴의 경우는 하중이 증가되어 최고치에 도달해도 바로 깨어지지 않고 가운데 부분이 볼록하게 튀어나오는 현상을 보이게 된다.

3.2 동토 1축 압축시험

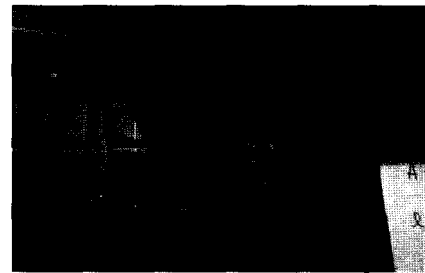
동토(Frozen soil)의 실험은 빙역학 실험의 응용 측면에서 중요하다. 동토 내의 공극에 물이 포함되어 있을 경우 토질은 얼음과 비슷한 성질을 가지게 되며 이 영향은 토질 내에 포함된 물의 양과 밀접한 관계가 있다. 굵은 자갈 내 공극수가 동결된 경우는 강도가 매우 커지는 현상이 나타나게 되며 거의 저장도 콘크리트의 강도에 이른다. 공극수의 동결 정도와 강도는 토질의 종류와 온도에 연관되며 저중량, 고공극의 토질이 동결된 경우는 얼음의 강도와 크게 다르지 않다고 보고되었다 (Freitag and Mcfadden, 1997).

Cold Room을 이용한 동토의 포준 실험기법 연구를 통해 실험실에서 입자의 크기, 함수량 등 동토의 성분에 따라 인공적으로 결빙시켜 시편을 만들어 압축시험과 인장시험을 통해 온도 및 결정입자, 변형률속도에 따른 동토의 강도 및 탄성계수 등 제반 특성을 파악할 수 있다. 본 실험에서는 함수량과 동토의 성분에 따른 1축 압축시험만을 수행하였다.

Cold Room 내 압축시험기를 이용하여 미리 제작된 동토 시편을 시편 길이의 2% 정도인 4mm/min의 재하속도로 실험하였다. Table 2는 3차례의 압축시험에서 사용된 표준사와 카오리나이트 함유율에 따른 중량과 함수비 그리고 간극비의 결과이다. 동결토의 응력-변위 거동은 흙의 다짐상태에도 영향을 받으므로 간극비의 값을 일정하게 유지하는 것이 중요하다.



(a) Brittle characteristics



(b) Ductile characteristics

Photo. 5 Two different failure modes for compression tests of ice specimen

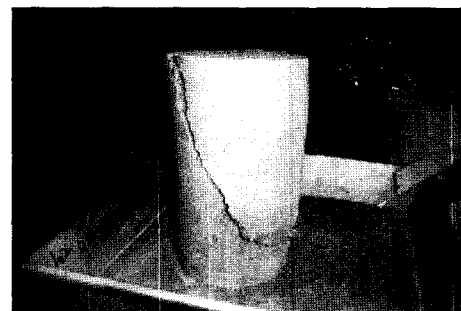


Photo. 6 An example of the failure mode of frozen soil

Table 2 Mixing and water content conditions

Standard sand (g)	Kaolinite (%)	Water (g)	Water content(%)		Void ratio (e)	
			Before	After		
3500	10 (350g)	269.5	7%	7%	0.597	
		577.5	15%	15%	0.546	
		770	20%	18%	0.579	
		770	20%	18%	0.57	
		770	20%	18%	0.562	
		294	7%	7%	0.514	
	20 (700g)	630	15%	14%	0.46	
		840	20%	15%	0.55	
		30 (1050g)	318.5	7%	7%	0.498
			682.5	15%	15%	0.444
		910	20%	19%	0.538	

Photo. 6은 1축 압축시험을 한 후 동토 시편의 파괴된 모습을 보여주고 있고 동토의 응력-변형도 선도를 Fig. 4에 나타내었다. Fig. 4의 결과를 보면 (a)는 카오리나이트 함유율이 각각 10%, 20%, 30%로 일정할 때 함수비의 변화에 따른 곡선으로서 함수

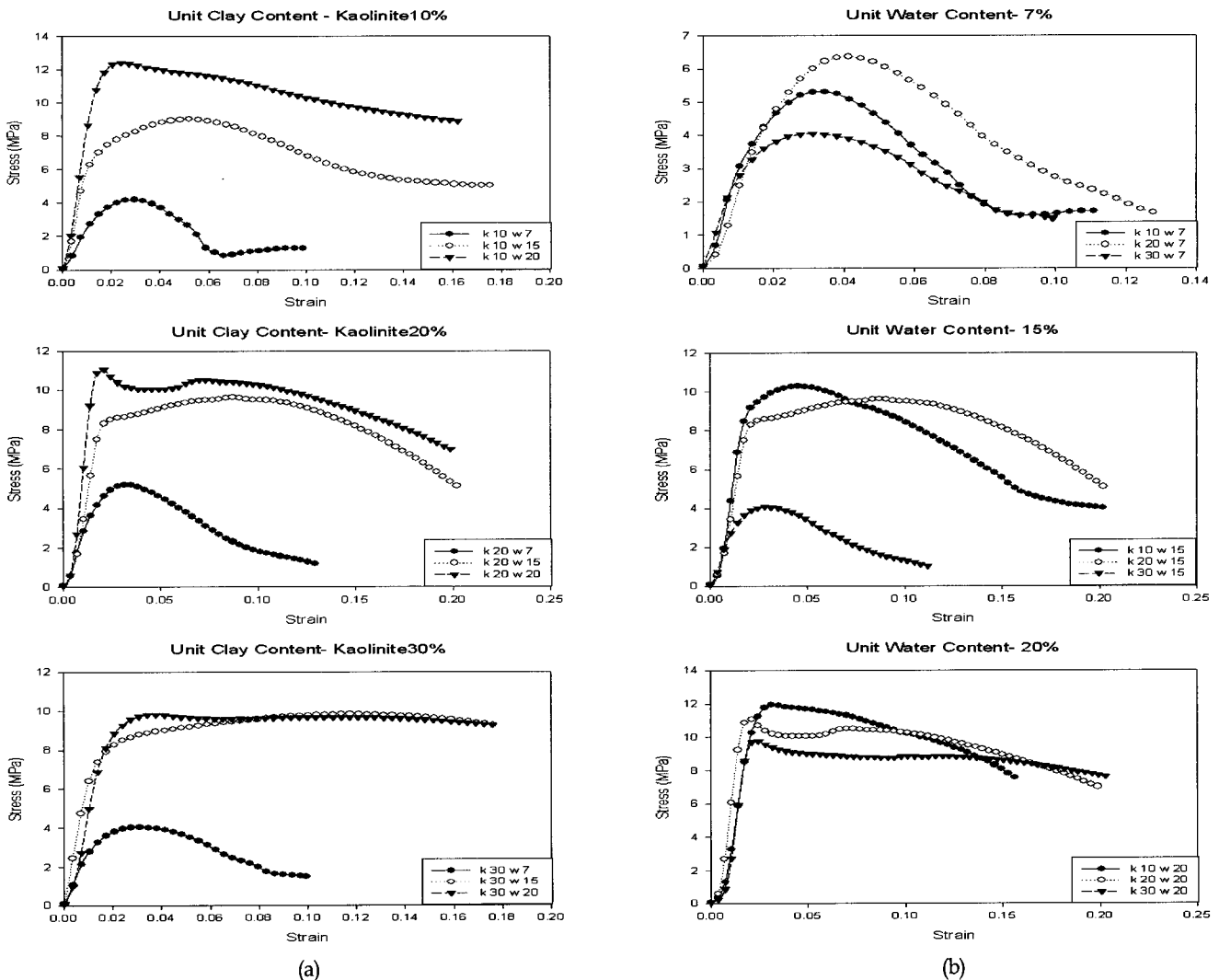


Fig. 4 Stress-strain curves for frozen soil (a) Unit clay contents, (b) Unit water contents

비가 증가할 때 압축강도도 증가하는데 7%에서 15%로 증가할 때는 약 2배의 강도 증가가 있었지만 15%에서 20%로 증가할 때는 강도 증가가 미소하였다. 이는 동토의 함수비가 증가함에 따라 압축강도가 증가하지만, 포화 이후부터는 함수비가 증가함에 따라 강도가 감소하기 때문으로 분석된다(조천환과 손준익, 1993). 측정된 압축강도는 평균 4~11 MPa 정도의 값이었다. (b)는 함수비가 각각 7%, 15%, 20%로 일정할 때 카오리나이트 함유율에 따른 곡선으로서 함유율이 작을수록 압축강도가 증가하는 것을 알 수 있다. 하지만 함수비가 7%일 때에는 카오리나이트 함유율 20% 값이 최대 강도를 갖는데 이는 7% 함수비와 카오리나이트 20% 때의 조건이 완전포화상태이기 때문이다.

이와 같이, 동토의 압축강도는 성분비와 함수비 같은 각각의 구성요소에 크게 의존함을 알 수 있다. 그리고 파괴 현상은 얼음의 압축시험 때의 결과와는 달리 모두 creep와 같은 소성변형을 나타내었다. 파괴형상의 비교를 위해서 향후 온도 및 재하속도 등 보다 많은 조건에서 실험이 수행될 필요가 있다고

사료된다.

## 4. 결 론

본 논문에서는 Cold Room을 이용한 재료특성 연구의 하나로 빙역학 표준 실험기법을 개발하였고 이를 위해 담수빙과 동토의 1축압축 강도시험을 실시함으로써 이들 재료의 응력-변형도 거동 및 압축강도 특성을 분석하였다.

(1) 담수빙의 응력-변형도 선도에서는 변형률속도가  $10^{-4}/s$ 를 넘는 구간에서는 취성파괴가,  $10^{-4}/s$  이하의 변형률속도에서는 주로 연성파괴를 보였으며 Ductile-to-brittle transition 현상을 확인할 수 있었다. 압축강도가 평균보다 높은 시편이 몇 개가 있었는데 이는 시편 제작과 보관 과정에서 내부에 재결정과 같은 현상이 일어나 압축강도가 변한 것으로 추정된다.

(2) 동토에서는 함수비와 점토(카오리나이트)의 비율을 달리 한 결과, 함수비가 일정할 때 카오리나이트의 비율이 작을수록

높은 강도를 갖고 함수비가 증가할수록 강도의 값이 커짐을 알 수 있었다. 또한 완전 포화상태일 때 최대 강도가 되고 포화이후 단계인 과포화상태에서는 강도가 감소한다.

(3) 담수빙과 동토의 압축시험을 통해 취성재료의 특성을 파악할 수 있었고, 담수빙의 균일한 결과 값을 바탕으로 Cold Room에서의 시편제작과 시험절차의 표준화 기법을 마련할 수 있었다.

향후 변형률속도 이외에 온도와 결정입자 크기(Grain size)에 따른 재료특성의 변화를 Cold Room을 이용하여 시험할 수 있도록 표준화된 시험기법을 보완할 필요가 있으며 해빙(Sea water) 및 염수(Brine water)를 이용한 강도시험과 굽힘 및 전단강도 시험기법에 대한 절차에 대한 연구도 지속적으로 수행할 예정이다.

## 후 기

본 논문은 한국과학재단 지정 첨단조선공학 연구센터(ASERC R11-2002-008-01002-0)의 연구비 지원으로 수행된 연구결과임.

## 참 고 문 헌

- 김영진 (2003). 동결토의 일축압축강도와 부동수분, 초음파 속도와의 관계, 한국건설기술연구원보고서.
- 조천환, 손준익 (1993). A Study on the Properties of Frozen Soil and Pile Foundation in Frozen Ground, 한국건설기술연구원보고서.
- Bari, S.A. and Hallett, J. (1974). "Nucleation and Growth of Bubble at an Ice-Water Interface", *Journal of Glaciology*, Vol 13, pp 489-520.
- Cole, D.M. (1979). "Preparation of Polycrystalline Ice Specimens for Laboratory Experiments" *Cold Regions Science and Technology*, Vol 1, pp 153-159.
- 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.
- Freitag, D.R. and Mcfadden, T.T. (1997). *Introduction to Cold Regions Engineering*, ASCE Press.
- Glen, J.W. (1953). *Mechanical Properties of Ice and Their Relation to Glacier Flow*, Ph.D. Thesis, University of Cambridge.
- Hawkes, I. and Mellor, M. (1972). "Deformation and Fracture of Ice under Uniaxial Stress," *Journal of Glaciology*, Vol 11, pp 103-131.
- 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.
- Jones, S.J. (1982). "The Confined Compressive Strength of Polycrystalline Ice," *Journal of Glaciology*, Vol 28, pp 171-176.
- 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.
- 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.
- Mellor, M., and Cole, D.M. (1982). "Deformation and Failure of Ice under Constant Stress or Constant Strain-rate" *Cold Regions Science and Technology*, Vol 5, pp 201-219.
- 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.
- Michel, B. (1978). "A Mechanical Model for Creep of Polycrystalline Ice" *Canadian Geotechnical Journal*, Vol 15, pp 155-170.
- Schulson, E.M. and Cannon, N.P. (1984). "The Effect of Grain Size on the Compressive Strength of Ice," *Proc. of the IAHR Symposium on Ice*, Hamburg, Germany, pp 29-38.
- Schulson, E.M. (1990). "The Brittle Compressive Fracture of Ice", *Acta Metall. Mat.*, Vol 38, pp 1963-1979.
- Schwarz, J. (1980). "Standardized Testing Methods for Measuring Mechanical Properties of Ice", *Cold Regions Science and Technology*, Vol 4, pp 245-253.
- 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.
- 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.

2006년 12월 7일 원고 접수

2007년 3월 9일 최종 수정본 채택