

# 극지 해양플랜트 현장시험용 해빙의 재료특성 간이 계측장비 개발

## Design of Portable Measuring Devices Used for Field Ice Experiments

최 경 식\* · 김 정 현\*\* · 김 정 선\*\*\* · 하 정 석\*\*\*\*

Choi, Kyung-Sik · Kim, Jung-Hyun · Kim, Jeong-Seon · Ha, Jung-Seok

### 요 약

본 논문에서는 극지 빙해역을 운항하는 쇄빙선박이나 해양구조물에 작용하는 해빙의 재료특성을 계측할 수 있는 간이 실험 장비를 제작하였다. 극지 빙해역을 운항하는 쇄빙선박의 빙저항이나 해양구조물에 작용하는 빙하중을 추정하기 위해서 극지 현장에서 실규모의 시험을 수행하게 되는데, 저온과 얼음이라는 악조건을 극복하기 위한 빙역학 기술과 특수 장비가 필요하다. 국내에 한국해양연구원 MOERI 빙해수조가 완공됨에 따라 얼음의 특성을 고려한 모형빙 재료특성 시험용 계측장비가 일부 마련이 되었으나 빙해역 현장 시험에 대한 경험이 전무하며, 계측장비에 대한 지식과 기술 역시 확보되지 못한 실정이다. 본 연구에서는 차후 쇄빙연구선 ARAON호를 이용한 빙해역의 실선계측 시 해빙의 강도를 측정하기 위한 계측시스템 마련의 일환으로 시험편 획득을 위한 코어링 장비와, 해빙의 재료특성 중 1축 압축강도를 측정하기 위한 간이 압축시험기 그리고 얼음의 결정구조를 파악하기 위한 편광기를 제작하였다. 또한 극지 현장실험에 적용할 실험기법 확보를 위한 일련의 과정을 마련하기 위해 제작된 장비를 이용해 소양호에서 현장실험을 수행하였고 계측된 결과를 참고문헌과 비교해본 결과 유사한 값을 갖는 것을 확인할 수 있었다.

**keywords** : 해빙(Sea Ice), 현장계측, 재료특성치

## 1. 서 론

전 세계 매장량의 30% 정도에 해당하는 석유와 천연가스 등 각종의 천연자원이 풍부하게 매장되어 있는 북극해 지역은 70년대 이후 자원개발이 활발해짐에 따라 채굴된 자원의 수송과 저장을 위한 빙해선박과 극지용 해양구조물의 수요가 점점 증가하고 있다. 극지 빙해역을 운항하는 쇄빙선박의 빙저항이나 해양구조물에 작용하는 빙하중을 추정하기 위해서 극지 현장에서 실규모의 시험을 수행하게 되는데, 저온과 얼음이라는 악조건을 극복하기 위한 빙역학 기술과 특수 장비가 필요하다. 러시아, 캐나다, 핀란드 등 다양한 빙역학 기술과 쇄빙선박을 보유한 나라는 해빙의 재료특성 측정을 위한 현장시험용 계측기기를 독자적으로 개발하여 사용하고 있다. 해빙의 재료특성을 계측하는 장비에는 압축시험기, 굽힘시험기, 해빙의 두께 측정, 편광시험기, 탄성계수측정기, 마찰계수측정기, 밀도측정기 등이 있는데, 시험편을 획득하기 위한 코어링 장비나, 압축시험기, 굽힘시험기, 편광시험기 등은 현장에서의 다양한 빙상조건과 시간의 제약에 따라 상업용 계측기기를 국내에서 따로 구하기 어렵고, 이들 장비를 이용한 표준 실험기법도 마련되지 못한 실정이다. 따라서 본 연

\* 한국해양대학교 해양공학과 교수 kchoi@hhu.ac.kr

\*\* 한국해양대학교 해양공학과 박사과정 sy8296@hhu.ac.kr

\*\*\* 한국해양대학교 해양공학과 석사과정 jeongseon@hhu.ac.kr

\*\*\*\* 한국해양대학교 해양공학과 학부과정 js\_ha@hhu.ac.kr

구에서는 극지 빙해역에서 활동하는 빙해선박/극지용 해양구조물에 작용하는 해빙의 재료특성 및 강도특성을 파악하고 올해 국내 최초의 쇄빙연구선 ARAON을 이용한 빙해역 현장시험에서 활용할 수 있도록 가볍고 조작성이 간편한 휴대용 계측장비를 제작하여 이를 통해 표준 실험기법을 확보하고자 현장실험을 수행하였다.

## 2. 해빙(Sea Ice)의 재료특성 및 계측장비

해빙의 재료특성을 결정짓는 주요 변수들로 성장온도, 염수부피, 결정구조, 하중방향이 있는데 이들의 영향에 따라 탄성계수, 압축·굽힘·인장·전단강도, 마찰계수, 밀도등 해빙의 재료특성 값이 결정된다. 일반적으로 탄성계수는 굽힘시험을 통해 파괴가 발생하는 시점의 변위를 이용해 구할 수 있으며, 얼음의 비중은 고체와 액체의 비중을 측정할 수 있는 시중에 유통되는 비중계를 이용해 손쉽게 구할 수 있다. 그러나 코어링 장비, 압축·굽힘시험기, 편광기 등은 얼음의 재료특성에 맞는 장비가 국내에 구비되어 있지 않고 제조기술과 계측기법기 마련이 차후 빙해역 현장실험의 활용에 필요하다고 판단되어 본 연구에서는 시험편 획득을 위한 코어링 장비와 채취된 시편을 이용한 압축강도시험을 위해 현장용 간이 1축 압축시험기, 그리고 얼음 단면 결정구조 촬영을 위한 편광기를 제작하였다.

### 2.1. 해빙의 압축강도특성 및 시험법

해빙은 표면에서부터 빙판의 아랫방향으로 얼기 시작하여 결정입자가 수직방향으로 기둥형 결정구조로 성장하게 된다. 구조적으로 수직과 수평구조로 나뉘게 되고 이러한 이유로 하중방향에 따라 그 특성이 다른데 일반적으로 수직방향의 압축강도가 수평방향에 비해 약 3.6~3.9배 큰 것으로 나타나 있다(Timco, 1986). 실제 해빙을 이용해 압축강도를 구하는 경우, 원형기둥 혹은 사각기둥 형태의 시편을 사용하는데 원형기둥의 경우는 코어드릴을 이용하여 5~10cm 직경으로 가공한다. 사각기둥 시편도 크기는 원형기둥과 비슷하게 밀링머신이나 선반을 이용하여 표면을 가공한다. 압축시험에 중요한 점은 1축 압축하중이 정확히 시편의 양단 가압판(platen)에 수직하게 작용해야 한다는 점이다. 압축시험에서 사용되는 시편은 끝단 효과를 무시할 수 있는 정도의 길이를 가진 것이어야 하며 보통 시편의 길이는 직경의 약 2~2.5배 정도를 사용한다.

압축강도는 다음과 같은 식으로 정의된다.

$$\sigma_c = \frac{P}{A} \quad (1)$$

여기서 P는 peak값에 도달했을 때의 하중이고, A는 접촉 단면적을 나타낸다.

### 2.2. 간이 계측장비

#### 2.2.1 코어링 장비(Ice Corer)

원통형 얼음 시편을 추출해 내기 위한 코어용 장비는 국내에 유통되고 있지 않아 기존의 다른 재료에서 사용되고 있는 코어용 장비를 얼음의 재료특성에 맞게 재고안하는 방향으로 제작을 하였다. 첫째로, 아스팔트용 시료 채취기는 출력은 충분하나 자체 진동을 감소시키기 위한 파일링이 필수적인데 얼음에 적용되기 어렵고, 홀커터는 사용이 간편하나 5t 이하의 구멍을 내기 위한 장비로써 Ice Core용으로는 적합하지 않다. 마지막으로 지반(토질)용 오거는 개방형과 폐쇄형이 있지만 코어추출용으로 개방형이 필요하나 현재 시중에 유통되고 있는 전기 모터구동방식은 모두 폐쇄형이라 적합하지 않다. 따라서 다음 장비들의 장단점을 반영해 얼음의 재료특성에 맞는 장비를 제작해 보았다. 먼저, 추출하고자 하는 시편의 크기에 맞게 지름 50mm의 원

통형 파이프를 메인 실린더로 사용하고 비트 날은 실린더 끝 부분을 특수절연을 통해 가공하였다. 구동방식은 전동식으로 조작이 간편한 모터드릴을 연결하기 위해 메인 실린더에 건식 코아비트를 용접하고 드릴과 비트가 호환될 수 있는 어댑터를 장착하여 코어링 장비를 완성하였다.

### 2.2.2 압축시험기(Uni-axial Compression Tester)

차후 빙해역 실선 계측 시 탑재가 가능하도록 경량의 휴대용 계측장비 제작에 주안점을 두었다. Timco(1981)의 압축시험법을 응용하여 가압판이 있는 바닥에 설치된 유압실린더가 상승하면서 얼음시편이 파괴될 때까지 빠른 시간 안에 가압 후 1~2초 내에 시편이 파괴가 되어 하중의 peak값만 계측이 가능하도록 제작하였다. 또한 최대 3ton까지 들어올릴 수 있는 유압실린더와 압축시험 가용구간의 효율성을 높이기 위해 기둥을 직선 나선처리 하여 제작하였다. 압축시험기의 크기는 450×200×300mm 이며 중량은 25kg 이다. 그림 2는 완성된 압축시험기의 모습이다.

### 2.2.3 편광기(Polariscope)

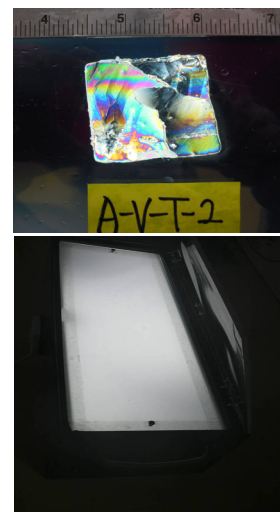
얼음단면의 결정구조를 계측할 수 있는 장비로 600x200x200mm 크기의 아크릴판으로 만든 직사각형 틀 내부에, 열 발생량이 적고 백열등보다 빛의 분산이 좋은 3과장 램프를 설치하고 효과적인 빛의 반사를 위해 하부 틀 5면에 거울을 부착하였다. 또한 편광기의 이동과 조작의 용이성을 위해 외부 손잡이와 경첩을 추가로 부착하였다.



(a) 코어링 장비



(b) 압축시험기



(c) 편광기

그림1. 완성된 간이 계측장비

## 3. 현장실험(Field Experiment)

본 연구에서 제작한 간이 계측장비의 성능시험 및 검증을 위해 실제 빙해역과 유사한 환경인 소양호 상류

얼음호수에서 현장실험을 수행하였다(그림 2). 해빙과 담수빙은 그 재료특성 값이 같지는 않지만 현장실험을 통해 표준화된 계측기법 마련을 위한 일련의 과정들을 파악하고, 실측데이터와의 상호검증을 통해 계측장비의 향후 활용 위한 데이터 확보를 목표로 하였다.

### 3.1. 소양호 현장실험 개요 및 방법

실험은 2009년 2월 8일부터 10일까지 3일간에 걸쳐 수행하였다. 먼저 실험 장소는 접근성이 용이한 인제군 남면 부평리에 있는 소양호를 선택하였다. 소양호는 약 1ton 트럭의 무게를 견딜 수 있는 30cm정도의 두께로 얼음이 형성되어 있었다.

실험순서는 예상되는 여러 변수를 고려해 정하였다. 먼저 임의의 지역 A, B, C, D 네 구역을 정해 각 구역별로 얼음시편을 25개씩 샘플링한 후 얼음의 결정구조 성분에 따라 하중방향을 고려하고, 얼음두께의 위치에 따른 Top, Middle, Bottom 세 부분으로 나누어 각각의 변수를 고려해 가로: 세로: 길이의 비가 1:1:2인 50×50×100(mm)의 크기로 가공하였다(그림 3). 각 얼음시편은 구역(A, B, C, D) -하중방향(Horizontal or Vertical) -하중방향에 대한 위치구분(Top, Middle, Bottom) -시편 no. 의 정보를 포함하고 있으며 간이 압축시험기를 이용해 1축 압축시험을 수행하였다. 압축시험 외에도 결정구조 파악을 위해 얼음 단면의 편광시험을 수행하였고, 실험의 전 과정에 필요한 사항들을 상세히 기록하고 촬영하여 얻은 데이터를 활용하여 향후 표준화된 실험기법을 제시하고자 한다.

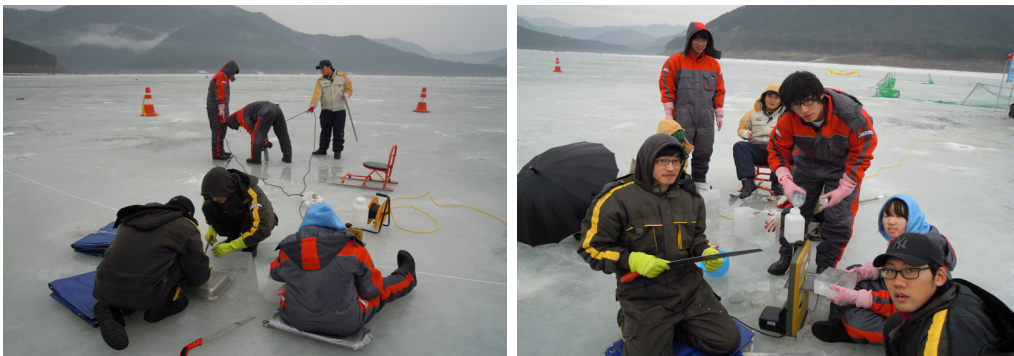


그림 2 소양호 현장실험 사진

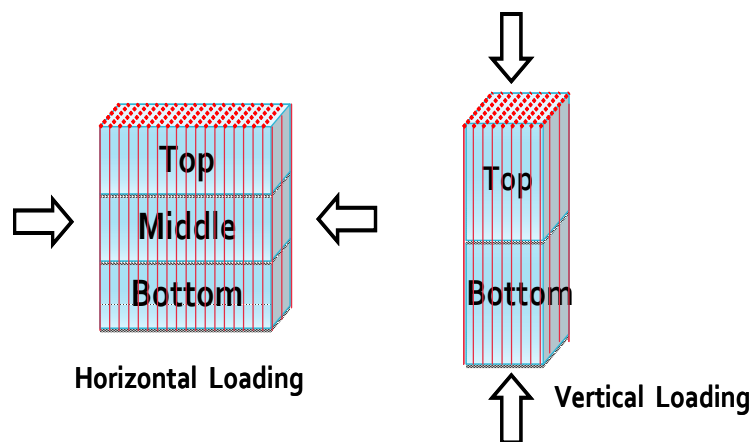


그림 3 얼음의 결정구조와 하중방향에 따른 시편위치

### 3.2. 실험결과 및 고찰

#### 3.2.1 계측데이터

본 현장실험은 계측된 재료특성 값 파악이 목적이 아니라, 제작된 간이 계측장비를 활용해 실험을 효율적으로 수행하기 위한 방법 마련과 함께 장비가 원활히 작동되는지에 대한 calibration 검증을 목적으로 진행되었다.

표 1은 간이 압축시험기를 이용한 얼음의 압축강도 결과 값을 나타내고 있다. 고려했던 여러 변수 하중방향에 대해 수직방향의 압축강도가 수평방향에 비해 약 2.5배 큰 값을 갖는 것을 확인할 수 있었는데, 이는 실험 당일 날 날씨와 온도의 영향을 받아 기존 참고문헌대로 3~3.5배의 차이는 나지 않았지만 하중방향에 대해 그 재료특성이 결정됨은 확인할 수 있었다(표 2). 얼음 두께방향의 위치에 대한 결과를 살펴보면 top 부분은 얼음과 눈이 혼합되어 있는 형태로 그 강도가 bottom 부분에 비해 낮은 값을 갖는 것을 알 수 있었다. 반면에 구역별 압축강도 특성의 변화는 없었는데, 이는 반경 50m 내의 좁은 구간에서 구역을 나누었기 때문에 큰 차이가 없었던 것으로 사료된다.

표 1 얼음(담수빙)의 압축강도 현장실험결과

Loading direction	Compressive Strength $\sigma_c$ (MPa)	
	Top	Bottom
Horizontal	0.90	1.88
Vertical	2.63	3.44

표 2 해빙과 담수빙의 재료특성 (Zufelt and Ettema, 1996)

Ice Material	Flexural Strength (kPa)	Elastic Modulus/ Flexural Strength (MPa)	Compressive Strength (MPa)	Specific gravity	Friction coefficient
Sea ice	460-940	2470-4590	4.3-7.85(V)	0.9-0.91	0.45-0.5
Freshwater ice	500-1500	1500-1600	10(V) 1.5-3(H)	0.94	0.5-0.7

#### 3.2.2 계측장비

코어링 장비의 경우 휴대와 조작이 간편한 반면 가장 많이 개선되어야 했는데, 전동 드릴을 장착해 구동한 결과 Ice Core용으로 출력은 충분하나, 어댑터와 코어 실린더가 분리형으로 구성되어 있어 진동이 심하였다. 또한 코어 실린더 내부와 외부가 단일형 구조로 되어있어 저온에서 실험할 경우 해빙(melting)과 결빙(freezing)이 반복되어 시편 추출이 어려웠고, 톱날 사이에 얼음가루가 끼는 단점도 있었다. 추후 코어링 장비의 핵심인 코어비트 날을 교정하고, 시편에 손상이 가지 않고 원활히 추출하기 위해 코어비트 내부와 외부를 이중구조로 제작함과 동시에 코어 시 얼음가루가 원활히 제거되도록 외부에 나선형 구조를 추가할 예정이다. 또한 코어링 장비의 출력을 수동식, 전동식 두 가지 방법으로 제작할 예정이다.

압축시험기는 휴대가 용이하고 현장실험의 특성에 맞게 조작이 간편하며 시험 속도가 빠른 장점이 있지만, 하중 계기판이 노출되어 시편 파괴 시 파편에 의한 손상의 우려가 있고 수동 유압실린더로 가압을 하게 되면서 하중 속력이 일정하지 않아 시편이 파괴되는 하중의 Peak값 산정이 어려웠다. 향후 시험기 경량화를

위해 지지판의 단면감소로 인한 전복의 위험성을 개선하고자 유압실린더의 위치를 변경하고, 균일한 하중을 줄 수 있는 장치로 개선할 예정이다. 또한 계기판의 파손 방지를 위해 가압판 하부에 소형 챔버를 부가 설치할 예정이다.

편광기는 양쪽에 손잡이를 설치하여 이동시 용이하며 경첩을 추가로 제작하여 편광시험을 빠르게 수행할 수 있었다. 또한 발열이 적은 3과장 램프를 설치하여 얼음이 쉽게 녹지 않고 빛의 분산에 탁월했다. 그러나 현장에서 편광시험 시에 위쪽 편광필름이 빛에 쉽게 왜곡되어 촬영에 어려움이 있었고, 추후 야외에서도 원활한 실험을 위해 편광필름 및 아크릴판을 교체하고 카메라 거치대도 추가 설치할 예정이다.

#### 4. 결 론

본 논문에서는 차후 쇄빙연구선 ARAON호를 이용한 빙해역의 실선계측 시 해빙의 강도를 측정하기 위한 계측시스템 마련의 일환으로 시험편 획득을 위한 코어링 장비와, 해빙의 재료특성 중 1축 압축강도를 측정하기 위한 간이 압축시험기 그리고 얼음의 결정구조를 파악하기 위한 편광기를 제작하였다. 또한 극지 현장실험에 적용할 실험기법 확보를 위한 일련의 과정을 마련하기 위해 제작된 장비를 이용해 소양호에서 현장실험을 수행하였고 계측된 결과를 참고문헌과 비교해본 결과 유사한 값을 갖는 것을 확인할 수 있었다. 추후 계측장비 개선과 함께 해빙의 다양한 재료특성 시험을 수행할 수 있는 장비를 추가로 제작하고 실선을 이용한 현장계측 시 효율적인 실험을 진행하기 위한 표준화된 시험기법을 마련하고자 한다.

#### 감사의 글

본 연구는 지식경제부 산업원천기술개발사업인 "빙해선박의 극지항로 안전운항기술 및 극저온 빙성능 시험평가 기법 개발" 중 "빙해선박 선체구조 안정성 평가 기술 (과제번호 10033640)" 과제의 연구비 지원과 교육과학기술부의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 광역경제권 선도산업 인재양성사업의 연구결과입니다.

#### 참고문헌

- Muspratt, M.A. (1972) Elastic design of slabs for uniformly distributed loads, *Computers & Structures*, 2(6), pp.893~895.
- Peyton, H.R. (1996) Sea Ice Strength, Geophysical Inst., University of Alaska, Report UAG-182.
- Sanderson, T. (1988) Ice Mechanics Risks to Offshore Structures, Graham Trotman.
- Schwarz, J. (1980) "Standardized Testing Methods for Measuring Mechanical Properties of Ice", *Cold Regions Science and Technology*, Vol.4, pp.245-253.
- Timci, G.W. and Frederking, R.M.Q. (1982) "Comparative Strengths of Fresh Water Ice", *Cold Regions Science and Technology*, Vol.6, pp.21-27.
- Timco, G.W. (1986) "ED/AD/S: A New Type of Model Ice for Refrigerated Towing Tanks", *Cold Regions Science and Technology*, Vol.12, pp.175-195.
- Zufelt, J.E. and Ettema, R. (1996) Model Ice Properties, Cold Regions Research and Engineering Laboratory, Hanover, New Hampshire, Report 96-1.