

# 빙해수조 모형빙판의 두께 측정과 유효탄성계수용 특성길이 연구

이 재 환<sup>1\*</sup> · 최 봉 균<sup>2</sup> · 이 춘 주<sup>3</sup>

<sup>1</sup>충남대학교 선박해양공학과, <sup>2</sup>삼성중공업 중앙연구소, <sup>3</sup>한국기계연구원 미래선박연구부

## Thickness Measure and Characteristic Length for Effective Young's Modulus of Model Ice Plate in the Ice Basin

Jae-Hwan Lee<sup>1\*</sup>, Bong-Kyun Choi<sup>2</sup> and Chun-Ju Lee<sup>3</sup>

<sup>1</sup>Dept. Naval Architecture & Ocean Engineering, Chungnam National University, Daejeon 305-764, Korea

<sup>2</sup>Samsung Heavy Industries Central Research Institute, Geoje, 656-710, Korea

<sup>3</sup>Korea Research Institute for Ships and Ocean Engineering, Advanced Ship Research Division, Daejeon, 305-343, Korea

### Abstract

The model ice is created at KRISO (Korea Research Institute for Ships and Ocean Engineering) ice basin where model ship is tested to obtain the necessary data in order to design the ice breaking vessels and ocean structures operating in the northern pole sea area. Through the model ship test, ice breaking, clearing, ice-ship and ice-propeller interaction behavior can be obtained. Since mechanical properties of ice plate are required for the model test, some tests are performed to obtain the properties in this paper. First, ultrasonic device is used to measure the thickness of the model ice plate and the results show the possibility of using ultrasonic method, yet more sophisticated device or special sensors are required to measure the ice thickness completely. And the deflection of ice plate is measured using LVDT to compute the characteristic length of ice plate on the fluid, which is used to get the effective Young's modulus of model ice.

**Keywords** : ice basin(tank), model ice effective elastic modulus, plate characteristic length, LVDT(Linear Variable Differential Transformer), ultrasonic

### 1. 서 론

북극해 자원개발과 북극항로 개발에 대한 국내외적 관심이 현실화되면서 연구와 산업계의 동정이 활발해지고 있다. 실해역 해빙(바다 얼음) 특성에 관한 연구는 여러 산업에서 필요한데 쇄빙선과 해양구조물, 연안건축과 토목관련 산업 등 극지방 진출의 기초라 할 수 있다. 해빙의 결빙특성, 구조, 강도 등을 알아야 쇄빙선의 쇄빙하중과 운항, 해양구조물의 해빙 충돌, 차량의 안전한 이동 등을 설계할 수 있다. 극지방에 위치한 캐나다, 미국, 노르웨이에서는 얼음과 관련된 연구와 해양, 토목, 운송산업이 발달하여 우리나라보다 다양한 실적을 갖고 있다. 실해빙은(Bureau Veritas, 2010) 결빙 기간에 따라 신생 빙(new ice)은 결빙 시작단계로 frazile,

grease, slus, shuge로 분류되어 두께 10cm정도인 nilas 까지, young ice는 grey, grey-white로 10~15cm이며 1년생이 되기 전이다. 1년빙은 두께 0.3~1.2m, 2년빙, 다년빙의 경우 3m 혹은 그 이상이다. 형태에 따라 brash, fast, floe, iceberg, pack, pancake, rafting, ridging 등으로 분류되는데 결빙온도, 영분, 기후에 따라 강도가 달라진다(Fig. 1). 강성특성인 Young's modulus( $E$ ), 포아송비, 마찰계수 등이 쇄빙선의 충돌하중 측정, 해양구조물의 유빙충돌 등의 구조해석에 사용된다. 국내 연구진 Jeong와 Lee(2012)는 2010년 한국의 쇄빙연구선 아라온호로 북극해 탐사에서 시추장비로 두께를 재고, EM(Electromagnetic) 장비로 해빙의 결빙 전도도를 구하고 외국에서 제안한 빙 두께 추정식(Timco *et al.*, 2010)으로 여름 단 일층 두께를 산출하였다.

\* Corresponding author:

Tel: +82-42-821-6624; E-mail: jaelee@cnu.ac.kr

Received April 8 2014; Revised May 25 2014

Accepted May 27 2014

©2014 by Computational Structural Engineering Institute of Korea

This is an Open-Access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution Non-Commercial License(<http://creativecommons.org/licenses/by-nc/3.0>) which permits unrestricted non-commercial use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.

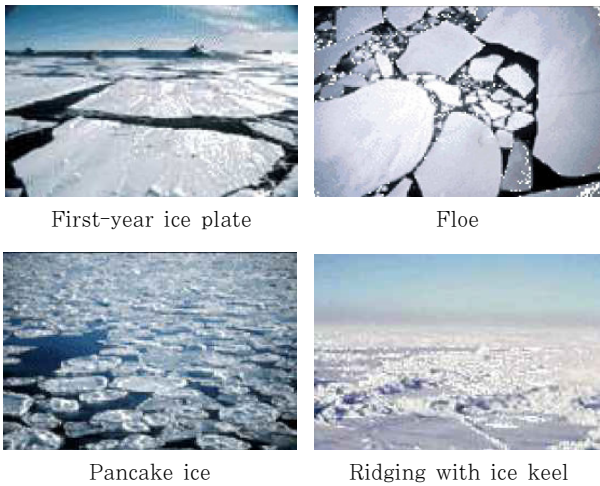
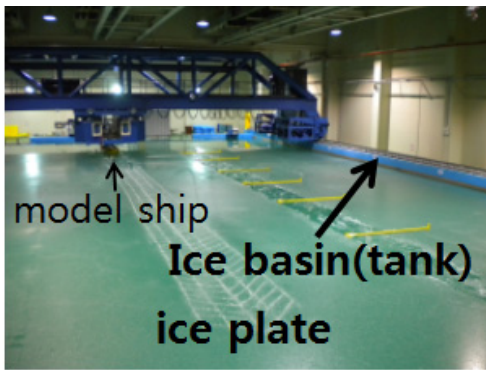
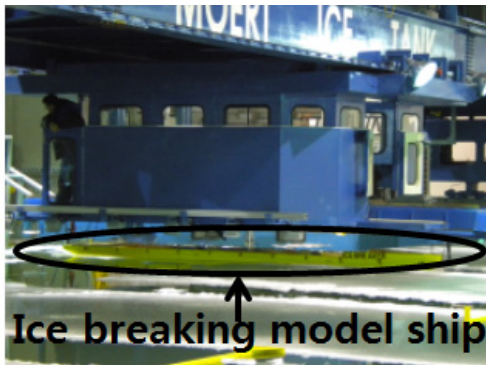


Fig. 1 Sea ice type(Bureau Veritas, 2010)

북극항로의 개발에 맞추어 해양 분야의 활성화의 예는 쇄빙선과 해양구조물의 개발이 되겠다. 과거에는 쇄빙선이 먼저 해빙을 쇄빙하여 선박의 운항 통로를 열고 그 뒤에 내빙상선이 운항하였으나 최근에는 쇄빙기능을 갖춘 쇄빙상선(LNG선)이 등장하고 있다. 쇄빙상선의 설계를 지원하기 위한 Fig. 2의 빙(해)수조(ice basin(tank))는 2010년 한국해양과학기술원 분원인 대덕연구단지 소재 선박해양플랜트연구소(KRISO)에 신축된 것으로 규모는 32m×32m×2.5m



(A) Model ice plate and ice basin(tank)



(B) Model ship's ice breaking test

Fig. 2 KRISO ice basin(tank)

이며 두께 40mm내외의 모형 빙판을 생성하여 쇄빙모형선 실험을 한다. 노르웨이 등 기술력이 앞선 나라들에서는 해빙 연구를 60여 년 전부터 해왔고, 오랜 경험으로 두께와 균질도가 일정한 빙수조 모형 빙판으로 실험을 하고 있으나 국내의 경우는 시작 단계라 외국에서 기 수행된 내용들을 파악하는 것도 중요한 일이다. 국내 빙해수조는 선박과 해양구조물의 극지방에 관한 산업적 활동을 보조하는 가장 최신의 최대 규모라 할 수 있다.

본 연구에서는 빙해수조에서 생성되는 모형 빙판의 중요한 물리적 특성에 관한 자료를 얻기 위하여 KRISO 빙해수조 모형빙(Fig. 2)의 두께 계측에 초음파를 적용하였고, 모형 빙판의 처짐 계측으로 부터 특성길이를 계산하고 그 값으로부터 유효탄성계수 값을 구하였다. 유효라는 수식어가 탄성계수에 붙는 것은 얼음의 특성이 점탄성, 이방성의 특징이 있는데 일반적으로 등방성을 가정하기 때문이다.

## 2. 초음파 적용 빙 두께 측정 실험

### 2.1 담수(일반) 빙 두께 측정

우선 초음파로 얼음의 두께 계측 가능 여부를 알기위해 초급과 고급 장비로 담수빙(일반 얼음)을 계측하였다. 초음파기는 물체의 유무를 검출할 뿐만 아니라 물체에서 반사되어 돌아오는 신호를 검출하여 그 시간차로 거리(혹은 두께)를 측정한다. 측정용 재질속의 음속은 구성성분, 조직에 따라 다르므로 대부분의 초음파 두께 측정기에서는 초음파의 음속을 조정하고 세팅하는 기능이 들어 있어 시편에 대한 음속 기준치를 먼저 정하고 사용한다. 센서는 초음파 발사(emitter)와 수신(receiver), 즉 송파기와 수파기로 분류되고, 두 센서가 하나의 유닛으로 되어 반사파를 측정하는 반사용과 두 개가 물체의 양측에 있는 투과용으로 분류된다. 초음파의 속도( $v$ )와 주파수( $f$ ), 파장( $\lambda$ )의 관계식은  $v = f \times \lambda$ 이고 측정 두께  $h$ 는 초음파가 반사되어 오는 시간을 고려하여  $h = vt/2$ 가 된다.

휴대용 초급 소형기기(반사형 센서)로 Fig. 3의 담수빙(일반 얼음), (A) 두께 2~3mm박판, (B) 모형빙과 비슷한 두께 30mm, (C) 원형 덩어리 형태에 대해 4000m/s의 초



(A) 3mm thin (B) 30mm (C) Bulk ice

Fig. 3 Fresh ice samples

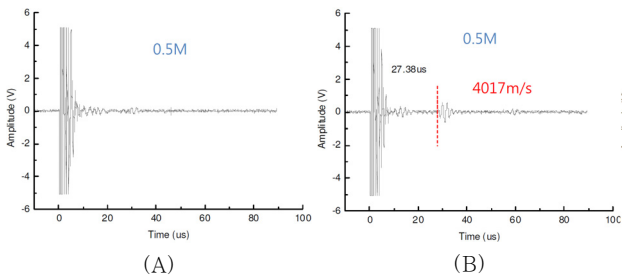


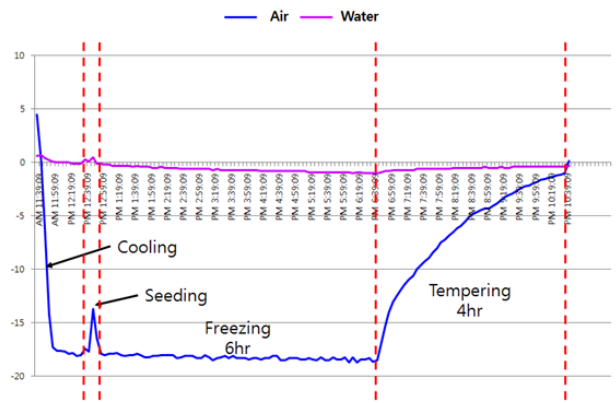
Fig. 4 Fresh ice test using 2MHz ultrasonic device

음파로 측정된 결과, (A) 박판의 경우 버니어 캘리퍼스로 측정한 두께에 비해 평균 5%의 차이로 적게 계측되었다. (B)의 경우 3~5% (C)의 경우 4.8% 차이가 있는데, 박판의 경우 장비 센서를 고착시키는 동안에 너무 얇아 상온에서 녹아 얇아졌고, 원형 덩어리의 경우 표면이 고르지 못하였고 가장 중요한 이유는 초음파 장비의 파워가 약한 때문이다. 이 휴대용 장비로 빙해수조의 모형 빙을 측정하였으나 실패하였는데 장비의 용량이 부족하여 얼음 내부의 기포를 만나 음파가 산란되거나 수신되지 못함을 의미한다.

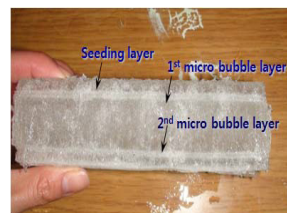
장비 성능의 연관성을 보기 위하여 고급 사양의 2MHz 반사형 초음파 센서를 사용하여 결빙 상태가 양호한 두께 55mm인 담수용 얼음을 계측한 것이 Fig. 4(A)와 (B)로서, (A) 얼음 표면에 물이 없는 경우에는 (B)와 같은 시간대에 신호가 발생하나 수신 상태가 분명하지 않아 값으로 확정하기가 어렵고 (B)처럼 얼음 표면이 물에 젖어 있는 경우에는 센서를 오래 잡고 3회 계측한 결과, 측정된 계측시간과 얼음 내 음속값 들은 1차, 27.38 $\mu$ s, 4,017m/s, 2차 26.46 $\mu$ s, 4,157m/s, 3차, 27.54 $\mu$ s, 3,994m/s로 왕복시간과 속도로 계산한 두께 값은 54.99mm로 정확한 두께가 계측되었다.

2.2 모형 빙 두께 측정

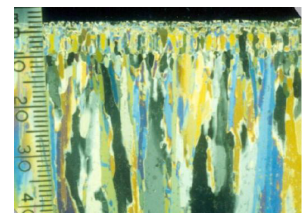
KRISO의 빙해수조에서는 EG(에틸렌글리콜)와 AD(지방성제)로 된 Fig. 5(A)의 Cooling, Seeding, Freezing, Tempering의 4 단계를 거쳐 파괴모드가 실제 해빙과 거의



(A) Process making model ice plate in the ice basin



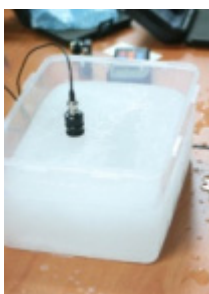
(B) Cross-section of model ice plate



(C) Polarized view of cross-section

Fig. 5 Model ice creation and its cross-section

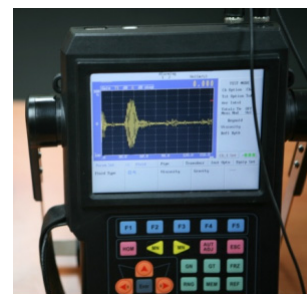
유사한 기동형 결정구조를 가지는 Fig. 5(B)의 모형빙판을 생성하는데, 생성 시 승온 시간(tempering time)을 조절하여 빙의 굽힘강도, 두께, 밀도와 같은 재료특성을 제어한다(Cho *et al.*, 2013). 얼음입자를 뿌리는 seeding 후 결빙 단계에서 마이크로 버블 장치가 수조내부에서 왕복 운동을 하며 이때의 버블 층(bubble layer)은 약 23%정도이고 밀도는 0.884g/cm<sup>3</sup>가 되고 수직 방향으로 얼음 입자가 자라는데 얼음의 결정구조가 담수 빙에 비해 일정하지 않음이 Fig. 5(C)의 일정하지 않은 빙 색깔에서 알 수 있다. 핀란드 Aalto 빙해수조에서 생성하는 모형빙의 경우 입자 크기는 0.68mm이고 1%의 공기와 4.5%의 물이 존재하여 구조해석시 이를 void 요소로 취급하고 있다(Bock und Polach *et al.*, 2013). 빙해수조에서 생성되는 모형 빙판의 경우,



(A) Reflection type



(B) Penetration type



(C) Thickness measure

Fig. 6 Thickness measure by 1MHz device

두께가 20~100mm정도이고 단면 형상과 편광사진 형상이 Fig. 5(C)에 있다. 가장 간단한 두께 측정 방법은 사람이 빙판을 깨고 버니어 캘리퍼스로 여러 곳을 측정하는데, 시간이 걸려 빙질의 변화, 오차발생 등의 문제가 있다. 따라서 정확성, 신속성, 일관성을 갖는 방법으로 초음파를 적용하는 과정이 본문에서 시도되었다.

1MHz 고주파 초음파로 두께 50mm의 모형빙 조각을 수조 수에 띄어 놓은 실험에서 Fig. 6(A)처럼 한쪽에만 반사형 송수신 센서 사용 시 초음파가 센서에 감지되지 않았으나 (B)처럼 투과형 센서를 양쪽 면에 접촉시켜 초음파 신호를 측정할 결과 두께 값이 (C)에 출력되었다. 따라서 초음파를 이용한 모형빙 두께 계측이 확인되었으나 값의 정확성이 문제가 되었다. 진동수가 고주파여서 파장이 짧고 에너지가 약해 Fig. 5(B)처럼 미세한 공간(porosity)들이 있는 모형빙 내에서 고주파가 중간에 산란하는 것으로 판단된다. 하지만 고주파 기기로 결빙이 잘된 일반 얼음(담수빙)을 같은 방식으로 실험한 위의 결과(Fig. 4)에서는 정확한 두께가 계측됨을 보아 모형 빙판의 결빙구조가 정확한 측정에 문제가 되는 것으로 보인다. 즉 얼음 사이에 미세한 기포가 있어 음파가 산란되는 것으로 보인다.

저주파용 초음파 기기사용 실험

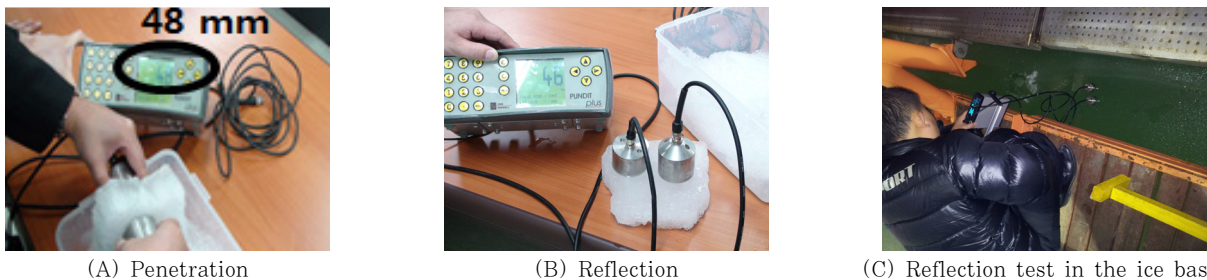
콘크리트 두께 측정용 저주파 54 kHz 투과형 송수신 센서로, 두께 50mm정도의 모형빙을 측정할 결과로 두께 값 48mm가 계측기 Fig. 7(A)에 보이고 있다. 약간의 차이가 발생하는 원인으로, 원활한 송수신을 위해 센서를 강하게 압착하는 과정과 실온에 의해 두께 변화가 발생한 것으로 보인다. 실험 전에 샘플의 두께와 음속 값을 조정하는 과정을 거쳐 찾아낸 초음파의 음속 값이 약 3,700m/s로 측정되었다. 저주파 센서를 사용하여 모형빙의 양쪽 방향에 센서를 접촉시킨 경우에는 비교적 정확한 두께 값이 측정되는 것을 확인할 수 있었다. 그러나 이 방법은 빙해수조의 수조수 위에 떠 있는 매우 큰 모형 빙판에 적용할 수가 없다. 빙판을 깨고 수신 센서를 모형빙 아래 부착할 수 없고 또 송수신센서를 강

**Table 1** Ice thickness measured by two adjacent sensors

Distance between emitting and receiving sensors(mm)		measured ice thickness(mm)
50mm thick model ice	5	20
	10	49
	15	95
	20	216
30mm thick model ice	5	29
	10	35
	15	80
	20	200

하게 압착시키는 것도 어려운 일이다. 해결책으로 수조안에 있으며 리모트 컨트롤로 대형형 센서가 빙판 아랫면과 윗면에 부착되는 시스템 특허가(Lee and Lee, 2011) 제시되었다.

빙해수조안의 모형 빙판을 깨지 않고 두께를 측정하기 위해 Fig. 7(B)와 같이 모형빙의 윗면에 송신센서와 수신센서 2개를 함께 부착하고 반사파를 사용하여 두께 근사치를 얻었으나, 문제점은 두 센서의 위치에 의해 정확도가 좌우된다는 것이다. Table 1에 있는 실험 결과를 볼 때 두 센서의 위치를 잘 파악하면 사용 가능성이 보인다. 일단(두 센서가 10mm 정도 분리되어 있는 경우) 빙두께의 근접치를 얻게 되어 사용가능성이 있다고 판단되었다. 그러나 두 센서를 수조안의 빙판위에서 실험을 하였으나(Fig. 7(C)) 만족할 만한 결과 도출이 되지 않았다. 주된 원인으로서는 실험당시의 빙판이 많이 해빙되어 결빙구조가 약해져 초음파가 발산하였고 작업 여건상 두 센서의 위치를 옮겨 가며 Fig. 7(B)처럼 최적의 간격을 찾지 못하였다. 따라서 양 센서를 모두 윗면에 접촉시켜 계측하기 위해서는 많은 실험을 통해 두 센서의 거리에 따른 상관관계를 파악하고 대응 공식을 산출하거나 아니면 송수신 센서가 반사형처럼 하나로 되어 있어 이 문제가 해결되는 것이 좋으나 기기회사에서 이런 센서를 제공하지 못하였다. 초음파의 속도(C)와 주파수(f), 파장( $\lambda$ )의 관계식에서 속도 3,700m/s, 주파수가 54 kHz일 때, 파장은 68mm이다. 가능하면 한 파장이 빙판 두께 48mm보다 짧은 주파수 기기를 사용함이 필요하다.



**Fig. 7** Thickness measure by 54kHz device

### 3. 모형 빙판의 탄성계수 산출용 특성길이

국내의 빙해수조의 모형빙 재료특성에 관한 자료(수조별 수조수의 구성성분과 특성, 굽힘강도, 탄성계수, 압축강도, 비중, 마찰계수)가 Kim 등(2008)에 소개되었고, Cho 등(2013)에 빙해수조의  $E_g/AD$  생성기법 및 굽힘강도 측정법이 소개되어 있다. 미세한 얼음알갱이가 형성되고 자라며 균일한 냉각상태가 유지되고 나중에는 tempering이라는 과정을 거쳐 강도가 약하게 된다. 두께나 균질도가 일정해야 하고 마찰계수, 탄성계수, 포아송비 등을 정확히 파악해야 모형선 시험결과를 상사 법칙으로 실제 선박(실선)에 적용할 수가 있다. 모형선의 쇄빙하중과 쇄빙후의 운항력, 프로펠러 추진성능이 실선에 적용된다(Lee *et al.*, 2011). 모형선이 모형빙판을 쇄빙할 때 하중을 분력계로 측정하여 사용하지만, 모형빙의 쇄빙현상을 수치해석 하여 실험과의 유사성을 찾는다면 실험의준도를 낮출 수 있는 방안이 되므로 신뢰성 있는 모형빙의 탄성계수와 파괴특성 등을 찾는 것이 중요하다.

모형빙의 탄성계수 외에도 용도에 따라 빙의 최종 파단 응력과 변형률, 속도변형률 등이 필요하지만 얇은 모형 빙판은 취성특성이 있어 속도변형률을 찾아내기가 매우 어렵다. 빙해수조 모형빙의 연구에서 국제수조기구인 ITTC(International Towing Tank Conference, 1999, 2002)에서는 빙강성치 산출 방법으로 빙의 연직변위(처짐)를 계측하여 그 비례상수로 결정하는 정적인 방법을 제시하고 있다.

#### 3.1 보 변위 적용 방법

보 변위의 평균값으로 얼음의 탄성계수를 구하는 방법이 있는데, (HSVA) 실험 개념도인 Fig. 8에서 D1~D5 5군데에서 변위 측정을 한다. 빙 외팔보의 끝단에 연직하중  $P$ 에 의한 변위  $\delta$ 를 사용하여 보이론으로 탄성계수가 계산되나 굽힘 파괴가 일어날 때의 정확한 변위를 계측하기가 어렵기 때

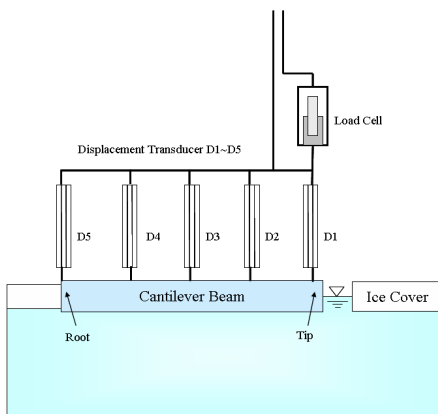


Fig. 8 Ice beam deflection measure

문에 바람직한 방법이라 보기는 어렵다. 더욱이 엄밀하게 굽힘시험을 수행하더라도 계산되는 탄성계수의 값은 판 이론에 의해 얻어지는 값보다 항상 작은 값이 얻어진다. 외팔보의 길이, 폭, 두께가 각각,  $L$ ,  $W$ ,  $H$ 인 경우, 끝단에 작용한 연직하중  $P$ 에 의한 변위  $\delta = PL^3/3EI$ 로부터 탄성계수는  $E = \frac{4P}{\delta W} \left(\frac{L}{H}\right)^3$ 로 계산된다.

#### 3.2 판 변위 적용 방법

보 이론을 대체하여 ITTC에서는 판 이론 적용 방법(Sodhi *et al.*, 1982)을 권장하고 있는데 물과 같은 탄성지위위에 놓여 있는 무한대의 원형 판 이론에 근거한다. Fig. 9에서 밀도  $\rho$ 의 해수위에 두께  $h$ , 등방성으로 설정한 무한 판에 외부하중이  $q$ 인 경우, 변위  $w$ 가 발생하고 판의 처짐에 비례하는 반력은 변위와 탄성물체의 modulus  $k$ 의 곱인  $kw$ 으로 가정하였다(Fig. 9).  $k$ 는 빙해수조의 경우 수조수의 비중이다. 이 방법의 기본은(Wyman, 1950)에 의한 변위와 특성길이 정의 식에 의한다. 식 (1)은 탄성체 위에 놓여 있는 원형 판의 4차 미분방정식이고(Timoshenko *et al.*, 1959),  $\nu$ 는 포아송비로 0.3을 가정,  $w/l_c = z$ ,  $r/l_c = x$ 인 특성길이  $l_c$ 를 사용하면 식 (2)와 (3)이 된다. 판의 굽힘강성  $D = Eh^3/12(1-\nu^2)$ 를 적용하면 특성길이와 굽힘강성의 관계는 식 (4)가 되고 4차 미분방정식 (3)의 해를 풀면 변위  $w$ 가 식 (5)의 Bessel 함수형태로 표현되고, 특성길이에 관한 식 (6)이 도출되며 식 (7)에서 탄성계수가 계산된다. 선행된 빙 연구들에서는 모형 빙해선박 저항/자항 실험시 탄성계수 대신에 특성길이를 사용을 추천하였는데, 특성길이는 이와 같은 미분방정식의 해를 구하기 위해 무차원화 개념에서 나온 것이기 때문이다,

$$\left[ \frac{d^2}{dr^2} + \frac{1}{r} \frac{d}{dr} \right] \left[ \frac{d^2 w}{dr^2} + \frac{1}{r} \frac{dw}{dr} \right] = \frac{q - kw}{D} \tag{1}$$

$$l_c^4 \left[ \frac{d^2}{dr^2} + \frac{1}{r} \frac{d}{dr} \right] \left[ \frac{d^2 w}{dr^2} + \frac{1}{r} \frac{dw}{dr} \right] + w = 0 \tag{2}$$

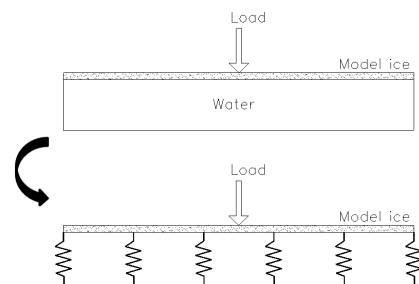


Fig. 9 Ice plate on the elastic foundation

$$\left[ \frac{d^2}{dx^2} + \frac{1}{x} \frac{d}{dx} \right] \left[ \frac{d^2 z}{dx^2} + \frac{1}{x} \frac{dz}{dx} \right] + z = 0 \quad (3)$$

$$\frac{1}{l_c^4} = \frac{k}{D} = \frac{k}{\frac{Eh^3}{12(1-\nu^2)}} \quad (4)$$

$$w = -\frac{Pl_c^2}{2\pi D} kei(x) \quad (5)$$

$$l_c^2 = \left( \frac{\Delta P}{\Delta w} \right) \frac{1}{8k} \left[ 1 + \frac{\alpha^2}{2\pi} \left( \ln \frac{\gamma\alpha}{2} - 5/4 \right) \right] \quad (6)$$

$$= \left( \frac{\Delta P}{\Delta w} \right) \frac{1}{8k} [Z]$$

$$E = \frac{12(1-\nu^2)kl_c^4}{h^3} \quad (7)$$

여기서,  $\alpha = \gamma/l_c$ 이고 Euler 상수  $\gamma$ 는 대략 0.5772157이며, 식 안의  $Z$ ,  $1 + \alpha^2/2\pi(\ln \gamma\alpha/2 - 5/4)$ 는  $\alpha$ 가 0.2 보다 작은 경우에는 1.0으로 취급한다. 모형 빙판의 처짐 량을 얻기 위해(Sodhi *et al.*, 1992)에 의한 실험은, Fig. 10(A)에서 빙판에 소성변형이 일어나지 않도록 빙판 위 반경  $R$ 의 둥근 부위에 충분히 작은 40N의 무게( $\Delta P$ ) 추를 총 3~4초 정도 가하고, LVDT(Linear Variable Differential Transformers)와 같은 정밀한 장비를 이용하여 중앙부의 연직 변위( $\Delta w$ )를 측정하였다. 빙판에 크리프 효과를 최소화하기 위해 하중을 가하고 제거하는 것을 신속히 수행하였고 변위 측정치  $\Delta w$ 로부터 탄성계수  $E = 12(1-\nu^2)kl_c^4/h^3$ 를 계산하였다. 하중이 있는 동안 초기 탄성변형 응답(변위)이 발생하여 짧은 시간에 1mm 정도의 일정한 변위가 발생한 후 얼음의 creep 현상에 의해 비선형변위가 좀 더 크게 2mm 정도 발생한 후에 변위가 소멸되는 실험 결과인 Fig. 10(B)를 발표하였다. 하중을 얼음 밑에서 올리는 방향으로 실험한 결과에서도 판의 특성 길이는 같은 결과가 도출되었다. 이 실험은 작은 하중을 짧은 시간에 주고 비탄성과 전단 변형을 작게 함으로써 선형 변위를

비탄성 변위와 분리하여 계측한 것이었다.

본 연구에서는 임시로 제작된 간이 LVDT 장비(Fig. 10(C))로 실험을 하였다, 모형 빙판두께가 50mm이고 20N 하중에서 발생한 처짐은 평균적으로 1mm였으며, 포아송비는 0.3, 수조수의 비중은 9,806N/m<sup>3</sup>이었다. 여러 곳에서 계측된 평균 변위 1mm를 적용하여 특성길이를 계산하고 식 (6)~(7)에 의해 평균 유효탄성계수를 산출한 내용이 Table 2에 있다. 탄성계수는 55.67MPa로 캐나다 빙해수조에서 산출된 평균 값 53MPa와 약간 차이가 있다. 실험 방법이 동일하다고 볼 때 실험시 정확한 하중전달과 LVDT에 의한 변위 측정이 되었다면 빙판의 유효탄성계수  $E$ 가 위의 식들에 의해 계산됨이 확인된 것이다.

본문에서는 관련된 인자들의 민감성을 분석하고 탄성계수와의 연관성을 찾아 보았다. 모형빙의 두께와 비중은 측정 가능한 값으로 신뢰성이 있으나 특히 0.3을 사용하는 포아송비  $\nu$ 의 경우 0.2에서 0.4까지도 가정하기 때문에 탄성계수의 계산에 영향을 미치게 된다. 점탄성특성의 모형빙에서 포아송비는 유효포아송비라 불리며(Timco *et al.*, 2010)  $\nu$  계측 실험시 하중속도가 빨라지면 측정 값이 작아지는 하중 속도에 의한 포아송 유도식이 보인다(Bock und Polach *et al.*, 2013). 한편 모형빙의 구조해석을 한(Bock und Polach *et al.*, 2013) 논문에는  $\nu$ 와 유효탄성계수( $E$ )의 관계에서 포아송비가 작으면 모형빙 파단이 일찍 발생함(유한요소해석한 결과) 보이고 있다. 이러한 인자의 민감성을 확인하기 위하여 Table 3에 유한차분에 의하여 포아송비 변

Table 2 Elastic modulus of model ice using deflection

$\Delta P$ (N)	20	$l_c$ (m)	0.5049
$\Delta w$ (m)	0.001	$\gamma$	0.5772
$h$ (m)	0.05	$r$ (m)	0.08
$\nu$	0.3	$\alpha = \gamma/l_c$	0.1584
$k$ (N/m <sup>2</sup> )	9806	$Z$	1
Effective elastic modulus $E$ (MPa)			55.67

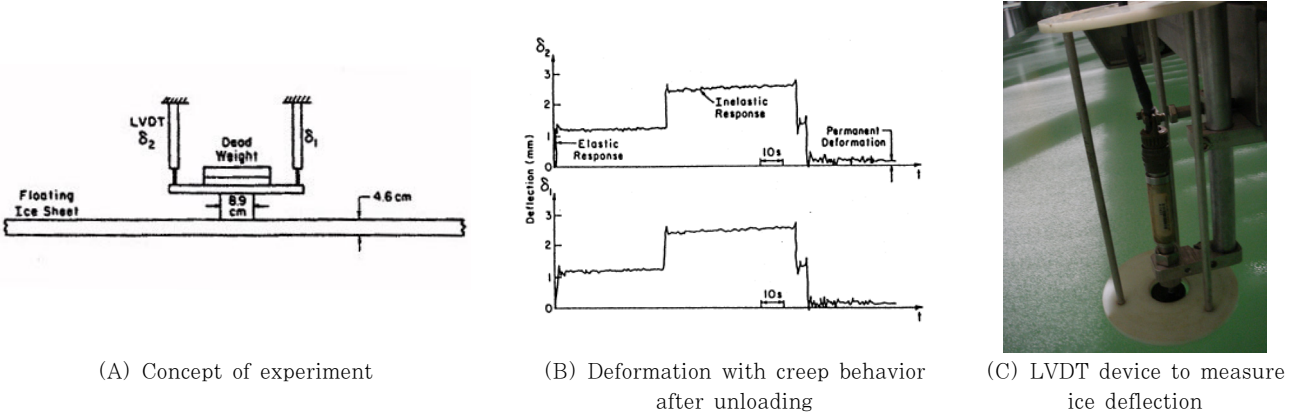


Fig. 10 Loading and deflection of ice plate(Sodhi *et al.*, 1992)

**Table 3** Effective elastic modulus( $E$ ) for different Poisson's ratio( $\nu$ )

( $\nu$ )	$\Delta\nu(\%)$	( $E$ )	$\Delta E(\%)$
0.21	-30	58.48	+5.0
0.24	-20	57.62	+3.5
0.27	-10	56.72	+1.9
0.3	0	55.67	0
0.33	+10	54.51	-2.0
0.36	+20	53.25	-4.3
0.39	+30	51.87	-6.8

화에 따른 탄성계수의 변화가 산출되었는데 변화량은 5:1 정도가 된다. 향후 유한요소법을 적용한다면 모형 빙판을 모델링하고 판을 지지하는 유체는 동등한 강성을 갖는 스프링 요소로 대체하거나 혹은 유체요소로 모델링하고 직경 166mm의 원판에 20N의 힘을 분포하중으로 하여 판의 변위를 산출하여 실험결과와 비교하며 인자들의 정확도를 향상할 수도 있다.

#### 4. 결 론

본 연구 결과를 요약하면 다음과 같다.

- 1) 고주파용 고용량 초음파 장비로 해수가 아닌 일반 담수빙의 두께는 정확하게 측정되었고, 발신 에너지가 약한 휴대용 소형 장비로는 수 %의 오차가 발생하였다.
- 2) 송수신 센서가 분리된 저주파 장비를 이용한 경우 투과형과 반사형 실험 모두 비교적 정확한 모형빙의 두께(48mm)가 측정되었다. 한편 송신과 수신 센서를 나란히 놓고 반사형으로 측정한 경우에는 두 센서의 특정 위치에서는 정확한 두께가 측정되었으나, 타 위치에서는 위치에 비례하는 측정 값이 발생하였다. 해결책으로는 많은 실험을 걸쳐 다공성 결빙 빙구조에 대한 저주파 초음파의 투과/반사시의 신뢰성을 확인하고, 또한 빙판 위의 두 센서의 위치를 파악하여 고정지그에 설치하고 사용하거나 혹은 일체형으로 된 센서를 사용하면 모형 빙판 두께 측정이 가능할 것으로 보인다. 혹은 특허에 제안된 것처럼 빙판 밑에 수신 센서를 위치시키는 장비를 개발하여 얼음판을 통과한 초음파가 수신된다면 두께 측정이 가능할 것으로 보인다.
- 3) 담수빙의 경우 얼음 통과 음속이 4,000m/s, 모형 빙판의 경우 3,700m/s인데, 두 가지 빙의 결빙구조가 다르므로 음속도 다르게 측정되었다. 저주파 초음파 기기 사용 시에는 두께보다 짧은 파장수를 방출하는 기기가 바람직하다. 빙 두께가 50mm일 때 3,700m/s 음속시, 파장이 50mm보다 작기 위해서는 74kHz이상

으로 초음파를 방출함이 추천된다.

- 4) 모형 빙판의 탄성길이를 LVDT로 측정하여 탄성계수를 산출하였다. 샘플링 개수나 실험장비의 완성도가 충분한 상태는 아니나 결과로 얻은 모형빙 탄성계수 55MPa는 외국의 결과인 53MPa와 근사한 값이어서 실험과정이 검증되었다고 볼 수 있다. 이 실험은 정속성과 안정성이 요구되므로 향후 측정자의 간섭이 최소화된 자동화된 실험 장비를 구축하여 보다 신뢰성있는 값을 도출함이 필요하다.
- 5) 또한 포아송비와 유효탄성계수의 민감성을 유한차분으로 계산한 결과로 포아송비 변화에 대한 탄성계수의 변화량은 5:1 정도로 보이고 있다. 향후 보다 정밀한 실험 장비 개발과 판 이론에 근거하여 하중과 변위의 수치해석(유한요소법)으로 실험과 비교하여 물성치 산출의 정확성을 높일 필요가 있다. 이러한 모형빙에 관한 연구는 국내에서 시작 단계이고 향후 관련 연구와 산업계에서의 활용도가 증가하리라고 기대된다.

#### 감사의 글

본 연구는 지식경제부 산업원천기술개발사업에 의한 KIOST의 빙성능 시험기법 및 최적화와 한국연구재단의 2012 지역대학우수과학자 지원으로 수행되었다.

#### Reference

- Bock und Polach, R., Ehlers, S.** (2013) Model Scale Ice-Part B: Numerical Method, *Cold Reg. Sci. & Technol.*, 94, pp.53~60.
- Bock und Polach, R., Ehlers, S., Kujala, P.** (2013) Model Scale Ice-Part A: Experiments, *Cold Reg. Sci. & Technol.*, 94, pp.94~81.
- Bureau Veritas** Ice Characteristics and Ice/structure Interactions, <http://www.veristar.com> (accessed Sep., 2010)
- Cho, S-R., Jeong, S-Y., Ha, J-s., Kang, K-J.** (2013) An Experimental Study on Generation and Measurement Method of EG/AD Model Ice at Cold Room for Improvements of Its Properties, *J. Soc. Nav. Archi. Kor.*, 50(6), pp.414~420.
- HSVA Hamburg Ship Model Basin, Ice Mechanics Lab,** <http://www.hsva.de>
- ITTC** (1999, 2002) The Special Committee, Final Report and Recommendations to the 22nd and 25th ITTC.

- Jeong, S-Y., Lee, C-J.** (2012) Measurement of Sea Ice Thickness in the Artic Ocean using an Electro-magnetic Induction Instrument, *J. Soc. Nav. Archi. Kor.* 49(2), pp.189~195.
- Kim, J.H., Choi, K-S., Jeong, S-Y., Seo, Y-K., Cho, S-R., Lee, C-J.** (2008) An Experiment Study for the Mechanical Properties of Model Ice Grwon in a Cold Room, *J. Ocean Eng. Tech.*, 2(3), pp.64~70.
- Lee, J.H., Lee, C-J.** (2011) Top and Bottom Contact Type Ultrasonic Device for Measuring the Thickness of Model Ice, Patent No.101118566.
- Lee, S-K., Kim, M-C., Lee, W-J., Kim, H-S., Lee, C-J.** (2011) Study on the Correction Method of Ice Strength and Thickness Applies to the Sea Trial Condition based on the Ice Model Test Results, *J. Soc. Nav. Archit. Kor.*, 48(5), pp. 457~464.
- Sodhi, D.S., Kato, K., Haynes, F.D., Hirayama, K.** (1982) Deflection of an Infinite Plate, *Cold Reg. Sci. & Technol.*, 6, pp.99~104.
- Timco, G.W., Weeks, W.F.** (2010) A Review of the Engineering Properties of Ice, *Cold Reg. Sci. & Technol.*, 60, pp.107~129.
- Timoshenko, S., Woinowsky-Krieger, S.** (1959) *Theory of Plates and Shells*, Mc-Graw-Hill Co.,
- Wyman, M.** (1950) Defection of an Infinite Plate, *Can. J. Res.*, A28: pp.293~302.

## 요 지

본 논문에서는 국내 선박해양플랜트연구소에 구축된 빙해수조의 빙특성 중에서 모형빙의 두께와 유효탄성계수 산출과정이 소개되었다. 수조에서 결빙되는 빙판은 크기가 가로 세로각각 30 m 정도에 두께는 40mm정도이다. 모형선의 실험결과를 쇄빙선 설계에 사용하기 위하여 빙 특성 정보가 필요하다. 사람이 빙판을 일부 절개하고 일일이 손으로 두께를 측정하는 것을 지양하기 위하여 초음파 기기를 사용하였는데 저주파 장비를 사용하여 작은 샘플 모형빙에 대한 두께는 계측되었다. 하지만 완벽한 계측을 위해서는 송수신 일체형 저주파 센서나 정확한 위치가 설정된 분리형 센서 혹은 고가의 특수 장치가 필요함을 확인하게 되었다. 한편 빙판의 처짐량을 간이식 LVDT로 계측하고 이를 탄성체 위에 놓인 무한 판의 특성길이 관계식에 대입하여 빙의 유효탄성계수를 산출하였는데 외국의 결과와 유사함이 입증되었다.

**핵심용어** : 빙해수조, 모형빙 유효탄성계수, 판특성길이, LVDT, 초음파