

빙해수조 모형빙판의 유효탄성계수 산출

이재환^{1,†} · 최봉균² · 김태완³ · 이춘주⁴

충남대학교 선박해양공학과¹

삼성중공업 판교R&D센터²

유니스테크놀로지³

한국해양과학기술원 선박해양플랜트연구소⁴

The Effective Young's Modulus of Model Ice Sheet in Ice Basin

Jae-Hwan Lee^{1,†} · Bong-Kyun Choi² · Tae-Wan Kim³ · Chun-Ju Lee⁴

Chungnam National University, Naval Architecture and Ocean Engineering¹

Samsung Heavy Industries²

Unison TG,³

Korea Institute of Ocean Science and Technology, KRISO⁴

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.

In this paper, the theory of rectangular plate on the elastic foundation is used to get the relation equation between the effective Young's modulus and the ice sheet deflection by applying the characteristic length concept, since the model ice sheet is rectangular shape in KRISO (Korea Research Institute for Ships and Ocean Engineering) ice basin. The obtained relation equation is equal to that of using the circular plate theory. A device is made and used to measure the deflection of ice plate using LVDT (Linear Variable Differential Transformer) for several loading cases and the procedure of experiments measuring the deflection used for getting the Young's modulus is explained. In addition, the flexural strength value obtained through flexural strength experiments is compared with that of finite element analysis using the obtained effective Young's modulus. Also, a nonlinear FEA (Finite Element Analysis) of cantilever ice beam is done with eroding effect and LS-DYNA result shows the fracture of brittle ice under 1 mm/s velocity load.

Keywords : KRISO Ice basin(크리소 빙해수조), Plate characteristic length(특성길이), Model ice effective elastic modulus and flexural strength(모형빙 유효탄성계수와 굽힘강성), Nonlinear FEA(비선형 유한요소해석), Eroding(소멸)

1. 서론

북극항로의 개발에 맞추어 해양 분야의 활성화의 예는 쇄빙선과 해양구조물의 개발이라 할 수 있다. 쇄빙선이나 내빙선은 모두 춥고 얼음이 있는 극지방 바다를 운항하기에 얼음파단을 위해 선수부위가 강하다. 이에 따라 쇄빙상선의 설계가 중요한 이슈가 되고 있고 빙의 강성특성인 Young's modulus E , 포아송비, 마찰계수 등을 정확히 알아야 빙에 관련된 구조해석, 예를 들면 쇄빙선의 충돌하중 측정, 해양구조물의 유빙충돌 등의 구조해석 정도가 높아진다. 쇄빙선 설계를 지원하기 위한 연구의 일환으로 대덕연구단지 소재 선박해양플랜트연구소 (KRISO)에 2010년 구축된 빙(해)수조의 가용규모는 32 m x 32 m x 2.5 m 이며 두께 40 mm 내외의 모형 빙판을 생성하여 쇄빙모형선 실험을 하는 곳이다. 국외의 빙에 관한 연구는 60년이 넘고 있으나 국내의

경우는 이제 시작 단계라 외국에서 기 수행된 내용들을 파악하는 것도 중요한 일이다. 국내 빙해 수조는 선박과 해양구조물의 극지방에 관한 산업적 활동을 보조하는 가장 최신의 최대 규모라 할 수 있다. 한편 짧은 역사와 아직까지는 운영에 관한 경험이나 지원이 부족한 편이고 관련된 연구도 이제 시작 단계이나 조금씩 실적이 쌓아지고 있다.

본 연구에서는 빙해수조에서 생성되는 EG/AD-CD 모형 빙판의 중요한 물리적 특성에 관한 연구 자료를 분석하고 KRISO 빙해수조 모형빙판의 유효탄성계수 E 를 산출하였는데 모형 빙판의 처짐 계측으로부터 특성길이를 계산하고 그 값과 유효탄성계수의 관계식으로부터 E 값을 구하였다. 유효라는 수식어가 탄성계수에 붙는 것은 얼음의 특성이 점탄성, 이방성의 특징이 있으나 대부분의 연구나 실험에서 등방성을 가정하기 때문이다. 빙해수조에서 쇄빙선박의 빙저항 및 빙하중을 추정하기 위한 모형쇄빙선 시험이 성공하기 위해서는 해(바다)빙과 모형빙의 역학적 상

사를 맞추는 것이 매우 중요하다. 실선과 모형선의 기하학적인 축척비가 β 일 경우, 모형빙의 유효탄성계수는 해빙의 $1/\beta$ 배를 따르고, 탄성계수와 굽힘 강도의 비율 (E/σ_f)은 해빙의 특성과 유사한 2000~5000 사이의 값을 유지해야 한다 (Timco, 1994). 모형빙의 특성에는 기본적으로 얼음의 두께, 마찰계수, 포아송 비, 굽힘강성, 인장강도, 압축강도, 유효탄성계수가 있는데, ITTC (International Towing Tank Conference)에는 빙판변위를 이용한 탄성계수 산출, 보이론의 굽힘강성, 인장강도와 압축강도 시험에 관한 제안안이 있다. 매번의 모형 시험마다 균일하게 물성치를 유지하기 위해서는 물성치를 정확히 계속하기 위한 체계적인 방법이 요구된다. 구조물과 빙충돌 해석 시에 탄성계수와 굽힘강도 값이 필요하기 때문에 빙판이 생성될 때 마다 이 값들을 얻는 실험이 수행된다. KRISO 빙해수조에서는 빙해수조에서 외팔보 굽힘시험으로 모형빙의 굽힘 강도를 얻고, 판의 처짐 변위를 측정하여 탄성계수를 산출하고 있으며, 콜드룸(cold room)에서도 3점 굽힘시험으로 탄성계수를 산출한다. 외국의 빙해수조에서는 인장강도와 압축강도 값도 실험으로 산출하고 있다.

본 연구는 빙해수조 모형빙판 처짐을 이용한 모형빙의 유효탄성계수 산출 식에서, 기존의 원형 빙판의 처짐 식 대신에 빙해수조의 형상에 맞는 직사각형 빙판의 처짐 식을 사용하여 판의 특성길이를 구하고 이를 사용하여 유효탄성계수를 계산하였으며 처짐 계속실험방법이 기술되었다. 또한 빙해수조에서 수행되는 빙판의 굽힘강도 실험값을 유한요소 방법으로 검증하였다.

2. 모형빙판의 특성길이 해석

ITTC (2002)에서는 모형빙판의 유효탄성계수 산출에 모형빙판 이론 적용 방법 (Sodhi, et al., 1982)을 권장하고 있다. 이 방법은 탄성지지 (빙해수조의 경우 수조수) 위에 놓여 있는 원형 판 이론에 적용된 변위와 특성길이 정의 식 (Wyman, 1950)에 의한다. 밀도 ρ 의 해수위에 두께 h , 등방성으로 설정한 반경 r 의 판에 외부하중 크기가 q 인 경우, 변위 w 가 발생하고 판의 처짐에 비례하는 반력은 변위와 탄성물체의 modulus k (빙해수조 수조수의 비중)의 곱인 kw 으로 가정하였다. 이 k 는 판이 탄성물체 위에 놓여있을 때 판의 처짐에 비례하는 반력으로써 빙판 아래 유체 수조수의 비중량 (ρwg)과 같다. 매우 큰 원형 평판에 하중 q 가 작용할 때, 임의 점에서의 판 처짐에 대한 미분방정식의 일반해는 수정된 Bessel 함수를 적용하여 구하게 된다. 분포 하중 q 는 나중에 집중하중 P 로 대체되는데, 식 (1)은 탄성체 위에 놓여 있는 원형 판의 4차 미분방정식이고, ν 는 0.3을 가정하고, $\frac{w}{l_c} = z$, $\frac{r}{l_c} = x$ 인 특성길이 l_c 를 사용하면 식 (2)와 (3)이 된다. 판의 굽힘강성 $D = \frac{Eh^3}{12(1-\nu^2)}$ 를 적용하면 특성길이와 굽힘강성의 관계는 식 $\frac{1}{l_c^4} = \frac{k}{D}$ 이 된다.

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

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

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

4차 미분방정식 (3)의 해를 풀어 가면 변위 w 가 식 (4)의 Bessel 함수형태로 표현되고, 특성길이에 관한 식 (5)가 도출되며 식 (6)에서 유효탄성계수가 계산된다.

$$w(x) = C_3 kei x = -\frac{P}{2\pi\rho_w g l^2} kei \frac{r}{l} \quad (4)$$

판의 최대 처짐은 $kei(0) = \pi/4$ 일 때 발생하며 다음과 같이 정리된다.

$$w_{max} = \frac{Pl^2}{8D} = P^2 \sqrt{\frac{D}{k}} / 8D = \frac{P}{8\sqrt{k}\sqrt{D}} \quad (5)$$

특성길이와 탄성계수의 관계식, $\frac{1}{l_c^4} = \frac{k}{D} = k / \frac{Eh^3}{12(1-\nu^2)}$ 로부터 유효탄성계수 E 가 산출된다.

$$E = \frac{12(1-\nu^2)kl_c^4}{h^3} \quad (6)$$

원형빙판의 미분방정식과 별개로, 빙해수조의 빙판은 직사각형이라, 본 문에서는 (Timoshenko & Woinowsky-Krieger, 1959)의 이론을 적용하여 빙해수조 빙판과 같은 직사각형 판 식을 적용하였다. 캐나다에서는 동절기 빙판을 도로로 사용하며 차량운행의 안전성을 파악하기 위하여 이 이론을 사용하였다. 빙판위에 차량 하중 P 가 한 방향으로 일정한 간격으로 위치할 때, 빙판의 처짐을 파악하고자 함이었다. 연속된 하중 중의 한 곳이 빙판의 중앙에 있는 하중과 같은 역할을 한다고 보는 가정이 적용되었다. 하중 P 사이의 간격을 a 로 하고, 2개의 좌표 x, y 가 사용된 아래의 식 (7)이 직사각형 판의 미분방정식이고 특성길이 식은 $k/D = \lambda^4$ 로 정의한다. 이제 기본 방정식은 (7)이 되고 방정식의 해를 시리즈 함수로 표현하면 식 (8)이 된다. 하중이 있는 곳과 하중 중간인 곳의 변위곡선의 변곡점에는 변위의 기울기가 0이 됨을 적용하고 경사각조건, 대칭조건을 적용하면 변위 식은 (9)가 된다. 한편 외력 P 가 작용 시에 판 내부에 발생하는 전단력과 외력 P 의 관계를 이용하여 변위 식 내부에 있는 미지수들을 정리하면 변위 식 (10)이 되며 이때 최대변위가 발생하는 위치인, 즉

P가 작용하는 곳인 $x = a/2, y = 0$ 을 적용하여 최대변위 식 (11)을 유도할 수 있다. 한편 연속된 하중 사이의 간격 a 가 매우 커져 무한대의 개념으로 보고 시리즈 함수에 대한 적분을 통하면 최대 변위 식은 최종적으로 식 (12)가 되고, 이제 특성길이를 적용하면 최대 변위는 식 (13)처럼 표현된다. 탄성체 위의 직사각형 평판의 최대 변위 식 (13)과 원형 평판의 최대 변위 식 (5)가 같아짐을 알 수 있다.

$$\frac{\partial^4 w}{\partial x^4} + 2\frac{\partial^4 w}{\partial x^2 \partial y^2} + \frac{\partial^4 w}{\partial y^4} + \frac{kw}{D} = 0 \quad (7)$$

$$w = w_o + \sum_{m=2,4,6,\dots}^{\infty} Y_m \cos \frac{m\pi x}{a}$$

$$w_o = \frac{P\lambda}{2\sqrt{2}ak} e^{-\lambda y/\sqrt{2}} \left(\cos \frac{\lambda y}{\sqrt{2}} + \sin \frac{\lambda y}{\sqrt{2}} \right) \quad (8)$$

$$w = w_o + \sum_{m=2,4,6,\dots}^{\infty} A'_m \cos \frac{m\pi x}{a} e^{-\beta_m y} (\gamma_m \cos \gamma_m y + \beta_m \sin \gamma_m y) \quad (9)$$

$$w = w_o + \frac{P\lambda^2}{ak} \sum_{m=2,4,6,\dots}^{\infty} \frac{(-1)^{m/2}}{\sqrt{\lambda^4 + \mu_m^4}} \cos \frac{m\pi x}{a} e^{-\beta_m y} (\gamma_m \cos \gamma_m y + \beta_m \sin \gamma_m y) \quad (10)$$

$$w_{\max} = \frac{P\lambda}{2\sqrt{2}ak} + \frac{P\lambda^2}{ak} \sum_{m=2,4,6,\dots}^{\infty} \frac{\gamma_m}{\sqrt{\lambda^4 + \mu_m^4}} \quad (11)$$

$$w_{\max} = \frac{P\lambda^2}{2\sqrt{2}\pi k} \int_0^{\infty} \frac{1}{\sqrt{2}} \frac{du}{1+u^2} \approx \frac{P\lambda^2}{8k} \quad (12)$$

$$w_{\max} \approx \frac{P\lambda^2}{8k} = \frac{P\sqrt{k/D}}{8k} = \frac{P}{8\sqrt{k}\sqrt{D}} \quad (13)$$

이제 $k/D = \lambda^4$, $\frac{1}{\lambda^4} = \frac{k}{D} = k/\frac{Eh^3}{12(1-\nu^2)}$ 에서 유효탄성계수가 산출된다.

$$E = \frac{12(1-\nu^2)k\lambda^4}{h^3} \quad (14)$$

따라서 원형 평판의 최대 처짐 식에서 구한 유효탄성계수 값과 직사각형 평판의 최대 처짐 식에서 구한 유효탄성계수 값이 같음이 보여 지고 있다. 모형빙과 모형선의 마찰계수 측정 기법에 관한 논문이 Cho, et al., (2011)에 발표되었다. 실 해역에서 해빙의 강도 산출을 위한 실험에 관한 논문 (Marchenko, et al.,

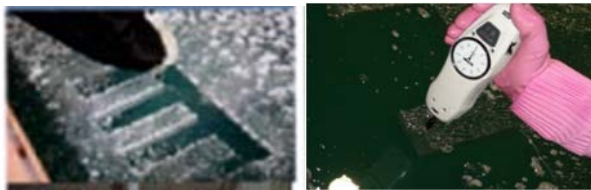
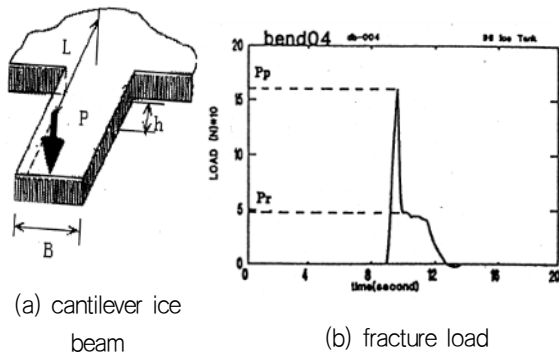
2013)에서는 빙판 밑의 해양파의 압력을 측정하여 빙판의 탄성계수를 산출하였다. Fox and Squire (1994), Fox and Chung (1998)의 논문에서는 판 이론과 수면파의 연성방정식에 특성길이와 특성시간의 개념을 도입하고 실 해역 실험의 결과와 연계하여 탄성계수를 산출하였다. Fox, et al., (2001)의 논문에서는, 두께 1.7 m 빙판에 구멍을 만들어 10초 간격으로 500초간 반복 하중을 가하여 파도를 발생시켰고, 파도가 빙판에 압력을 가해 변형된 빙판의 변형률을 취득하여 특성길이를 계산함으로써 해빙 탄성계수 2 GPa를 계산하였다. 국내에서는 남극해와 북극해에서 해빙의 재료강도를 측정 한 실험이 있다 (Choi, et al., 2011).

3. 모형빙판의 계측 실험

3.1 모형빙판의 굽힘강성 계측 실험

ITTC (2002)에서는 모형빙에 대해 폭 B, 두께 h로 B = 2h, 길이 L = (5~7)h인 외팔보 시편 (Fig. 1(a))에서 (b)와 같이 하중속도 1 mm/s로 빙 굽힘강성 계측 방법을 제시하고 있고, 이 측정된 하중을 식 $\sigma_f = 6PL/Bh^2$ 에 대입하여 굽힘강성 값 σ_f 를 구한다. 빙해수조에서는 빙판 생성시마다 여러 곳에 평균 두께 37.33 mm, 폭 70.67 mm, 길이 182.67 mm 인 4개의 빙판 외팔보를 만들고 (Fig. 1 (c)), (d)푸시풀게이지로 파단시의 하중 크기 (굽힘강도)를 측정한다. 빙판의 5곳 이상에서 2시간마다 굽힘강도를 측정하는데, 해빙과 모형빙 사이의 상사법칙을 적용하기 위해 빙의 강도를 낮추기 위한 승온(tempering) 과정에서 진행되는 실험이다. 승온 과정은 모형빙판 초기생성이 끝난 후 난방기로 수조 온도를 상승시켜 모형빙판의 강도를 낮추는 데 목적이 있다. 실험 후 오차범위 내의 적합한 굽힘강도가 확보된 후에 모형선의 빙저항 측정실험이 진행된다. 모형빙판이 생성되면 반드시 실행되는 실험이라 실험 데이터의 체계적이고 장기적인 관리가 필요하고, 푸시풀게이지, 자, 얼음 톱, 노트북, 드라이기 등이 필요하다. 하중을 알려주는 푸시풀게이지는 실험자에 따라 누르는 힘이 달라 질 수 있기 때문에, 굽힘강도 측정자는 한명으로 동일할 필요가 있다. 한 장소에서 4개의 보를 만들어 실험하는데 폭, 두께, 길이, 하중, 굽힘강성 값을 평균을 낸다. 이 모형빙의 굽힘강도 값은 데이터베이스 DB (Lee, et al., 2014)에 저장된다.

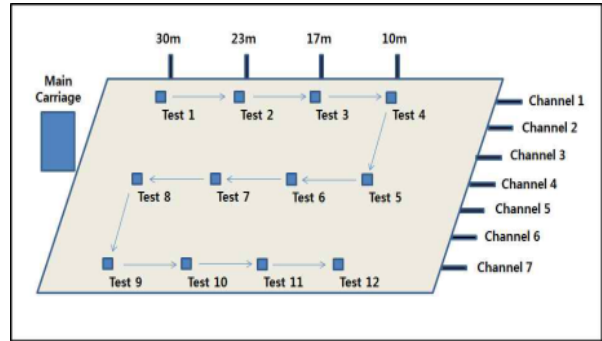
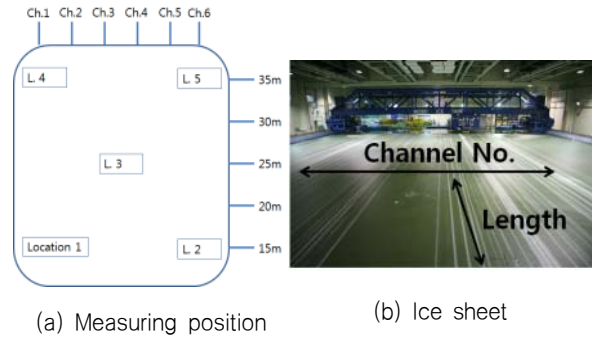
Table 1의 Cases 1 ~3은 Fig. 2 (a)의 빙판 3곳 Location1, L2, L3에서 측정된 데이터인데 4개의 외팔보의 크기, 파단시의 하중 그리고 계산된 굽힘강도 σ_f 가 있다. 빙판 두께 평균은 각 36.51, 38.95, 33.45 mm 이고 평균 하중은 3.0, 3.6, 4.7 N, 굽힘강도 값은 34.40, 35.27, 55.74 kPa 이다. 크기가 평균 범위를 벗어나는 경우인 Case 3의 2번째 외팔보 길이 L = 155.70 mm의 경우 굽힘강도 계산 값이 48.33 kPa로 다른 값들에 비해 작은 것을 알 수 있다. 따라서 엄밀한 실험값을 얻기 위해서는 샘플의 크기를 같게 해야 한다.



(c) model ice cantilever beam (d) load on beam
Fig. 1 Flexural strength experiment

Table 1 Flexural strength of model ice

Case 1	Load (N)	Dimension of the specimen (mm)			σ_f (kPa)
		h	B	L	
1	3.3	36.56	84.99	197.08	34.35
2	2.8	36.63	72.44	196.91	34.03
3	2.9	36.36	78.30	205.66	34.57
4	2.9	36.48	76.16	198.43	34.65
Avg.	3.0	36.51	77.97	199.49	34.40
Case 2	Load (N)	Dimension of the specimen (mm)			σ_f (kPa)
		h	B	L	
1	3.6	39.03	78.60	190.37	34.34
2	3.8	39.42	75.20	181.90	35.49
3	3.6	38.22	77.25	192.54	36.85
4	3.4	39.12	73.24	188.98	34.40
Avg.	3.6	38.95	76.07	188.44	35.27
Case 3	Load (N)	Dimension of the specimen (mm)			σ_f (kPa)
		h	B	L	
1	4.8	33.40	80.83	198.08	63.27
2	4.5	33.48	85.57	155.70	43.83
3	4.7	33.41	83.37	178.93	54.22
4	4.8	33.51	83.85	201.51	61.64
Avg.	4.7	33.45	83.40	183.55	55.74



(c) Measuring order
Fig. 2 Measuring positions in KIRISO model ice sheet

3.2 모형빙판 처짐 변위 계측 실험

무한 평판이론을 적용한 탄성계수 계측은 Sodhi, et al. (1982)에 의해 처음 제시되었는데 직경 8.9 cm인 원형 판을 모형빙판 위에 놓고 그 위에 일정 무게의 추를 올려 빙판 처짐을 계측하는 방식이다. 유사한 방식으로 캐나다 빙해수조 NRCC-IOT에서는 원형 판과 환봉으로 이루어진 추를 이용하여 하중을 부여한 후 원형 판 가운데 구멍에 위치한 LVDT로 평탄빙의 처짐을 계측하는 방식을 적용하였다. LVDT가 추의 중앙에 고정되어 있어 하중의 편중을 방지하며 하중 중심에 발생하는 빙판의 최대 처짐을 정확하게 계측할 수 있다.

본 연구에서 제시한 탄성계수 계측 장비는 Sodhi, et al., (1982)의 방법과 IOT 방법을 토대로 하였으며, 장비 개요도는 Figs. 3 (a) ~ (c)이다. 3개의 환봉과 직경 166 mm인 2개의 원형 판은 무게 20 N인 추가 되고, 직경 42 mm 구멍으로 LVDT가 통과하며, 고정지지 판에 의해 지지되어 상하 방향으로만 병진 운동을 할 수 있다. LVDT는 모형빙판의 처짐을 측정하고 일정한 전기 신호로 변환시키는 센서로, 최대 계측 변위는 ± 1.27 mm이며 미세한 변위 측정을 위해 진동이나 움직임이 발생하지 않도록 Fig. 3 (c)의 원형 안에처럼 단단히 주 전차(main carriage)에 장착되어 있다.

이 탄성계수 계측 장비로 KRISO 빙해수조에서 모형빙판 처짐 변위 계측을 시행할 때 유의점은 다음과 같다.

① 계측시간

모형 쇄빙선 시험 시의 빙 강도와 가장 유사한 강도를 갖는 시

간에 수행되어야 하며, 주 전차를 사용하여 시험을 수행하기 때문에 전체적인 작업 흐름을 고려한다.

단단하게 얼려진 모형빙판을 약하게 하는 승온과정이 끝나 모형 쇠빙선 시험 시의 빙 강도와 유사한 강도를 가지게 되어, 통상 모형 쇠빙선 시험 1시간 전에 계측한다.

② 계측장비 설치

LVDT를 계측장비에 설치한 후 PC와 연결하여 작동 유무를 확인한다.

계측 장비의 지그를 주 전차에 고정시키고 수동 조작 핸들로 장비를 모형빙판에 가까이 이동시키며 장비 무게 추에 의한 하중 부여 시 충격하중이 발생하지 않도록 매우 정숙히 한다.

③ 계측위치 지정 및 계측

Figs. 2(a)와 (b)에서와 같이 빙해 수조의 채널 (Ch.1 ~ Ch.5), 길이 방향으로 좌표 (L1 ~L5)를 설정한 후 주 전차를 이동시켜 수행한다.

계측은 2인 1조로 수행하며 1인은 무게 추와 LVDT 조작, 1인은 처짐 계측과 주 전차 이동을 수행한다.

주 전차 이동 후, 계측 시작 전에 계측 지점의 모형빙판 두께를 계측한다. 이 두께 정보는 나중에 모형빙판의 탄성계수를 계산할 때 사용한다.

무게 추를 하중으로 가하고, 모형빙판 발생 처짐이 Fig. 4와 같이 전압으로 출력되는데 사용된 s/w는 DAQ다. 본 연구에서는 20 N의 하중이 가해지고 모형빙의 두께는 30~40 mm 이었다.

④ 계측자료 분석 및 관리

계측된 모형빙판 처짐 값에 의해 Fig. 5와 같이 탄성계수 값이 계산되고 관리된다.

⑤ 기타 유의점

계측 수행 중에 모형빙의 강도가 변화하므로 신속히 계측을 한다.

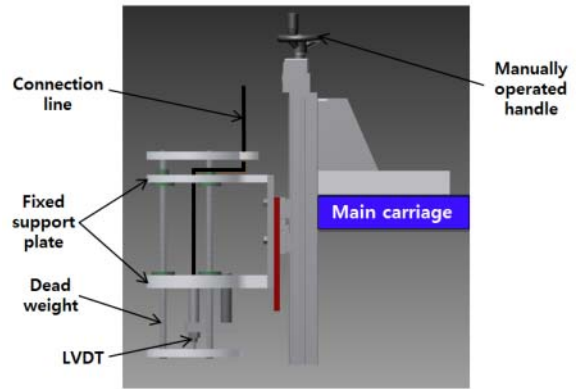
무게추가 정확히 수직으로 하강하여 하중을 가해야 하기 때문에 수평계로 계측장비의 수평도를 맞춰 고정시킨다.

처짐 측정 시, 모형빙판의 처짐 값이 미소 (0.5 ~ 1 mm) 하므로 약간의 진동만 발생해도 측정에 영향을 준다. 계측자의 경우, 주 전차에 외력에 의한 진동 발생이 없도록 조심한다.

지정된 장소에서 측정을 하되, 모형빙판 표면 거칠기 및 상태를 파악해서 상태가 양호한 지점을 선택해서 계측을 수행한다.

이전 데이터와 차이가 클 경우, 재차 계측시험을 수행한다.

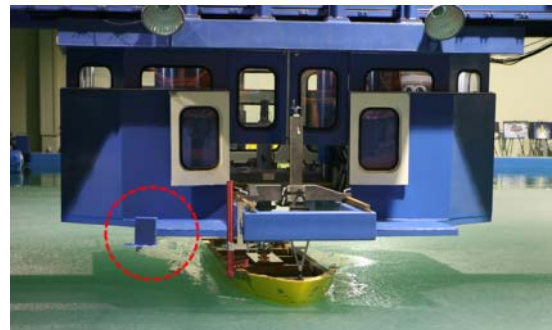
모형빙판 처짐 계측 1, 2차 계측은, 다른 날자에 모형 쇠빙선 시험 1시간여 전에 실시되었다, 1차 계측 시에 Fig. 2(c)의 Test 1과 Test 8 사이의 두 지점에서 빙판두께는 41 mm 로 측정되었고, 계산된 모형빙의 탄성계수는 각각 240, 220 MPa, E/σ_f 는 4679, 4289 으로 2000~5000 사이의 값에 부합되었다. 2차 계측은, Fig. 2 (c)의 8개 지점에서 빙판 평균 두께는 32 mm로 측정되었다. Table 2에는 계측된 LVDT 전압 (Volt)과 처짐 변위 값 (w_{max}) 이 있다. 8개 지점의 변위 측정은 되었으나 굽힘강도가 측정된 곳은 3개 지점이어서 변위 값이 있는 곳의 데이터만 수록 되었다.



(a) CAD of LVDT



(b) LVDT device



(c) LVDT in red circle at Carriage

Fig. 3 A device to measure ice sheet deflection



Fig. 4 LVDT voltage output corresponding to ice sheet deflection

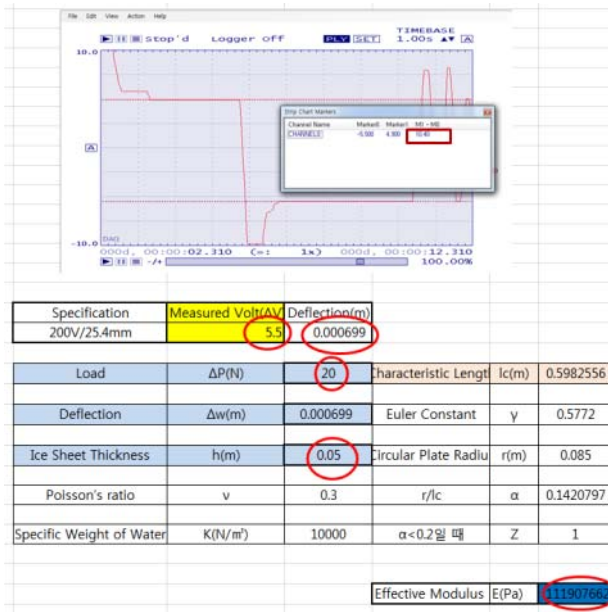


Fig. 5 Calculation of E using deflection and characteristic length

빙판 처짐 계측 시에 하중이 일정 시간 이상 지속되면 얼음의 크리프 특성 때문에 빙판의 연직방향 변위가 계속 증가하며, 하중을 제거한 후에도 영구변형이 발생하고 파단 된다. 빙판의 두께에 따라 처짐 크기가 달라지므로 소성변형이 발생하지 않도록 측정 센서의 가용 범위인 (2.54 mm) 내에서 빙판 두께에 따라 하중의 크기를 엄밀히 조절할 필요가 있다. 즉 판의 두께에 따라 하중 크기에 대한 가이드가 필요하다. 수행된 실험의 결과로 다음을 유추할 수 있다. 식 (13)에서 변위와 유효탄성계수, 두께의 관계

는 $w_{max} \approx \frac{P}{8\sqrt{k}\sqrt{D}}$ 에서, D 를 치환하면 식 (14)가 된다.

$$w_{max} = \frac{12(1-\nu^2)P}{8\sqrt{k}\sqrt{E}h\sqrt{h}} \quad (14)$$

이 식에 실험시의 하중 20 N, $\nu = 0.3$, $k = 1000 \text{ kg/m}^3$, $h = 40 \text{ mm}$ 을 대입하면 측정된 변위 $w_{max} = 0.73 \text{ mm}$ 가 되고 이 변위 값을 사용하여 유효탄성계수 $E=200 \text{ MPa}$ 가 산출된다. 모형빙판이 매우 약하고 생성시의 두께가 일정하지 않으며 센서의 측정 변위도 고려해야 하므로, 변위 측정 시에 하중의 크기를 결정하는 일이 매우 중요하다.

모형빙판 두께에 따른 측정하중 크기를 적절하게 설정하기 위한 과정을 다음과 같이 제시한다.

1. 모형빙판의 탄성계수 크기는 생선조건에 따라 다소 변하지만 일정한 범위에 있다고 본다. (예 = 200 MPa)
2. 빙판의 두께가 얇아지면 굽힘강도도 작아지고 LVDT 측정을 위한 하중도 작아진다.
3. 식 (14)에서 탄성계수 값은 일정하다고 보면 변위는 하중에 선형비례하고 두께 $h^{-3/2}$ 에 비례한다.

4. 작은 하중에도 빙판이 손상되므로 일단 측정 장비 하중의 최소값으로 장비자체의 무게인 10 N을 가정하고 몇 mm 두께까지 빙판이 비손상으로 남아있을 수 있는지 판단해야 하지만 현재는 정확한 빙판의 최소 두께 판단이 어렵다. 어느 정도의 변형률 상태에서 모형빙판이 손상을 판단할 수 있는 자료가 국내외적으로 없기 때문이다. 식 (14)를 적용하여 두께 30 mm 의 경우에는 변형이 0.62 mm 정도로 계산되나 파단의 경계치로 예상된다.

5. 빙판 두께가 40 mm 이상의 경우는, 예로 80 mm 인 경우는 하중을 2배 (40 N)로 하면 변위는 식 (14)에서 0.2 mm 가 되어 측정이 어려운 정도로 작은 값이므로 측정신뢰도를 높이기 위해 하중을 4배 (80 N)로 하여도 된다.

6. 탄성계수가 다른 경우에는 식 (14)의 탄성계수 값을 변경하여 위의 과정에 따라 하중을 예측한다.

이를 위해 40 mm 이하의 빙판 측정을 위해 상, 하판은 각 300 g, 샤프트는 400 g 으로 하여 하중의 크기가 총 10 N 정도가 되게 장비를 개선하였고, 두꺼운 빙판에 대해서는 추가로 하중 추를 상판에 올려 하중 증기를 할 수 있다 (장비 개선 전 실험시의 기본 하중 크기는 20 N으로, 상판과 하판 플라스틱 원판의 무게는 520 g, 464 g, 샤프트는 1034 g 이었음).

4 모형빙판의 유효탄성계수 산출

4.1 유효탄성계수 계산

모형빙판의 처짐 변위가 계측되면 이 변위에 의해 빙판의 유효탄성계수가 계산 된다 (Fig. 5). Table 2에서 처짐 변위로 계산된 (수록이 안 된 5곳 포함) 8개 지점의 탄성계수 평균값이 225 MPa 이 된다. σ_f 는 3.1 절의 빙판의 굽힘 실험에서 취득된 (Table 1) 굽힘강도 평균값들이다. 본 연구의 E/σ_f 값들이 KRISO 빙해수조의 빙성능을 대표한다고 보기 보다는 완벽한 값을 도출하기 위한 과정에서 발생한 값으로 인식함이 필요하다. 즉 향후 빙성능이 개선되면서 보다 엄밀한 데이터가 산출될 수 있다.

Table 2 Calculated E and E/σ_f ratio

No	1	2	3	Avg.
$E \text{ MPa}$	210	180	340	225
$\sigma_f \text{ kPa}$	34.40	35.27	55.74	41.8
E/σ_f	6105	5103	6100	5769
Volt	6.8	6.8	9.3	7.6
$w_{max} \text{ (mm)}$	0.87	0.86	1.18	0.97

4.2 유효탄성계수의 적용

3.1절에서 측정된 굽힘강성은 모형빙판에서 외팔보를 만들고 실험한 파단하중이고 4.1절의 유효탄성계수는 판의 처짐량으로

계산된 값이다. 이 파단하중과 계산된 유효탄성계수 값으로 보의 유효요소해석을 수행하여 보 파단시의 스트레인 값을 구하였다. Table 3에서 Thick 와 σ_f 값들은 굽힘강도 실험시 측정된 두께와 굽힘강도 값이고 일정 시간이 지난 후(time delay), 변위 값으로 계산된 E가 있으며, 유효요소해석(FEA) (Fig. 6)에 의해 계산된 σ 는 33.4, 33.4, 61.5 kPa 이다. 여기서 굽힘강도 값과 유효요소해석 강도 값이 유사한 점을 주시한다면 변위 계측으로 산출된 유효탄성계수 값을 어느 정도 신뢰할 수 있다. 변형률 ϵ 는 $0.16 \times 10^{-3} \sim 0.18 \times 10^{-3}$ 이다. Figs. 6 (a) 와 (b)는 모형빙판 샘플을 보로, (c)와 (d)는 판으로 해석한 결과인데 보와 판 해석 결과가 동일하였다.

Table 3 Measured flexural strength and FEA results

No	Thick (mm)	σ_f kPa	time delay min.	Thick (LVDT) mm	E MPa	FEA σ kPa	strain ϵ
1	36.5	34.4	73	35.0	210	33.3	0.16E-3
2	38.9	35.2	90	30.0	180	34.3	0.19E-3
3	33.4	55.7	117	30.0	340	54.2	0.16E-3

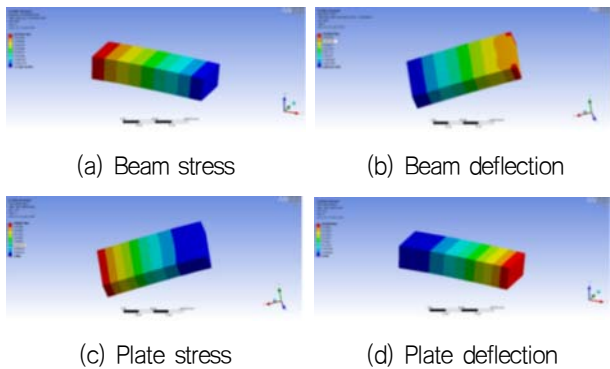


Fig. 6 Stress and deflection of model ice sample

Table 4 Properties for nonlinear FEA using LS-DYNA

Part	ρ kg/m ³	E	ν	σ_f	ϵ_f
Ice sheet	1000	200 MPa	0.33	35 kPa	0.00156
Load	7850	200 GPa	0.3	∞	-

모형빙판은 Fig. 1 (b)에서 유리처럼 취성파괴의 양상을 보이고 있다. 굽힘강도시 취득된 강도는 얇은 모형빙판을 파단 하는 강도로 볼 수 있고 이 값을 적용하면 빙의 파단현상을 탄소성 유효요소해석으로 확인할 수 있다. 굽힘강도 실험을 수치해석으로 묘사하기 위하여 Fig. 7처럼 빙판과 도출된 외팔보를 판 요소로 하고, 하중을 가하는 푸시풀게이지를 솔리드 강체로 모델링 하여 하중 속도는 1 mm/s로, Table 4의 물성치를 적용하였다.

LS-DYNA에서 유효요소가 파단 되면 사라지는 eroding 효과를 구현하는 기능용(Contact : ERODING_NODES_TO_SURFACE) 사용하여, 빙 파단응력 35 kPa에 도달하기 까지 빙판과 외팔보의 연결 부위가 점차 사라짐(eroding)이 Fig. 7에 원부분에 표현되어 있다. Eroding 이 적용된 해빙과 해양구조물의 충돌에 대한 비선형 해석은 (Hilding, et al., 2011)에 소개되어 있다.

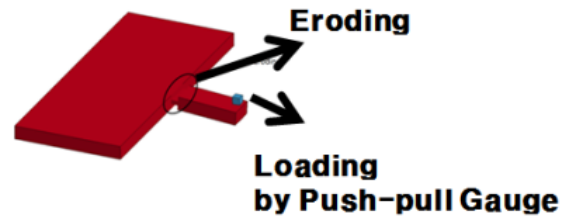


Fig. 7 Eroding at the root of cantilever model ice sample

5. 결론

1. 기존의 중앙에 집중하중이 있는 원형 판 이론에 기초한 모형 빙의 탄성계수 산출 식 대신에 사각형 빙해수조에서 생성되는 직사각형 판 이론을 적용하였는데, 같은 결과가 도출됨이 식에서 보여 지고 있다.
2. 이론을 적용하기 위해 LVDT 장비를 사용하여 모형빙판 처짐 계측실험이 수행되었고 결과로 모형빙판의 유효탄성계수가 계산되었다. 결과의 타당성은 LVDT 계측장소 근처에서 수행된 모형빙판의 외팔보 실험에서 산출된 굽힘강도의 비로 판단되는데 1차 실험에서는 E/σ 비가 4500 근처이고, 다른 날짜에 수행된 2차 실험에서는 6000 정도의 비율이 되었다. 2차에서 예상보다 탄성계수 값이 크게 나온 이유는 모형빙판의 강도가 예상보다 강하거나 빙판의 승온과정 후에도 목표치가 달성되지 않았기 때문으로 판단된다. 이 비율 값을 KRISO 빙해수조의 모형빙판 탄성계수의 평균값으로 판단하기에는 이르다. 즉 더 많은 실험으로 경험이 누적되면 원하는 강성의 빙판을 얻게 될 것으로 사료된다.
3. 실험시의 하중크기가 10 N 이 되도록 장비를 개선하였으므로 두께가 얇은 빙판 실험도 가능하고 두꺼운 모형빙판에 대해서는 하중 추를 추가 사용하면 된다. 문제는 얇은 판의 최소 두께에 따른 하중의 크기를 예측하는 것에 대한 판단 자료가 현재로서는 충분하지 않은 것이다. 보이론을 적용하여 보면, 외팔보 굽힘강도 산출 식은 $\sigma = My/I$ 이고, 이 값은 빙판의 실험에서 산출된 탄성계수를 이용한 외팔보의 굽힘강성 $\sigma = Ek = Ey \frac{d^2y}{dx^2}$ 와 동일하다. 문제는 이 외팔보 시편에 대한 스트레인 값을 빙 시편 시험에 의해 산출해야 하는데, 모형빙판이 약하고 표면에 스트레인 게이지를 붙이기가 어려워 실험이 시도되지 못하기 때문이다. 연구결과로 유효요소법으로 계산된 스트레인 값들은 Table 3에 $0.16 \times 10^{-3} \sim$

0.19x10⁻³ 정도로 되어 있다. 실험에서 계측된 탄성계수 값이 정확하다는 가정을 하면 유한요소 해석의 굽힘강도가 실험치와 비슷함이 Table 3에 보여 지고 있다.

4. 실험시 사용되는 외팔보 시편에 대해서, 취성을 고려한 LS-DYNA 비선형해석을 수행한 결과에서, 빙이 파단상태에 도달하게 되면 빙판과 외팔보의 연결부위가 점차 사라지는 eroding이 도출되었다.
5. 모형빙은 취성(brittle) 파괴 특성 때문에 변형을 정보를 사용하기가 어려워 해빙처럼 매우 엄밀한 해석은 안 되나, 해빙에 비해 비교적 간단하게 빙해석이 가능하므로 향후 쇄빙선이나 해양구조물 설계방향을 제시할 수 있는 장점도 있다.

후 기

이 논문은 2012년도 정부(교육부)의 재원으로 한국연구재단 기초연구사업의 (지역대학 우수과학자지원사업) 지원을 받아 수행된 연구임, 과제번호 : 2012 R1A1A4A 0105626). 자료제공 등 선박해양플랜트연구소 협조에 감사를 포함한다.

References

Cho, S.R. Chun, E.J. Yoo, C.S. Jeong, S.Y. & Lee, C.J., 2011. The Measuring Methodology of Friction Coefficient between Ice and Ship Hull. *Journal of the Society of Naval Architects of Korea*, 48(4), pp.363-367.

Choi, K.S. Lee, C.J. Rim, C.W. & Kim, H.S., 2011. Strength Characteristics of Arctic Ice from Ice Field Tests of the Icebreaking Research Vessel ARAON. *Journal of the Society of Naval Architects of Korea*, 48(3), pp.254-259.

Fox, C. & Chung, H., 1998. *Green's function for forcing of a thin floating plate*, Tech. Report 408. Auckland: Dept. of Mathematics, U. of Auckland, Australia.

Fox, C. Haskell, T.G. & Chung, H., 2001. Dynamic, in Situ Measurement of Sea-Ice Characteristic Length. *Annals of Glaciology*, 33, pp.339-344.

Fox, C. & Squire, V., 1994. On the Oblique Reflexion and Transmission of Ocean Waves at Shore Fast Sea Ice. *Philosophical Transactions A*, 347(A), pp.185-218.

Hilding, D. Forsberg, J. & Gurtner, A., 2011. Simulation of ice interaction on off shore structure. *8th European LS-DYNA Users Conference*, Strasbourg, 1-12 May 2011, pp.1-12.

ITTC, 2002. *The special committee, Final report and recommendations to the 22nd and 25th ITTC, recommended procedures and guidelines 7.5-02 - 04-02, testing and extrapolation methods ice testing test methods for model ice properties*. Alexandria, VA USA: ITTC.

Lee, J.H. Kim, I.S. Choi, B.K. & Lee, C.J., 2014. A Construction of the Network Type Database Management System for Model Ice. *Journal of the Society of Naval Architects of Korea*, 51(1), pp.51-57.

Marchenko, A. Morozov, E. & MUzylev, S., 2013. Measurements of Sea-Ice Flexural Stiffness by Pressure Characteristics of Flexural-Gravity Waves. *Annals of Glaciology*, 54(64), pp.51-60.

Sodhi, D.S. Kata, K. Haynes, F.D. & Hirayama K., 1982. Determining the characteristic length of model ice sheets, *Cold Regions Science and Technology*, 6, pp.99-104.

Timco, G.W. & O'Brien, S., 1994. Flexural Strength Equation for Sea Ice. *Cold Regions Science and Technology*, 22, pp.285-298.

Timoshenko, S. & Woinowsky-Krieger, S., 1959. *Theory of Plates and Shells*. McGraw-Hill Co: New York.

Wyman, M., 1950. Deflection of an Infinite Plate. *Canadian journal of research, Sec. A28*, pp.293-230.



이재환



최봉균



김태완



이춘주