한국해양공학회지 제22권 제3호, pp 64-70, 2008년 6월 (ISSN 1225-0767)

Cold Room을 이용한 모형빙의 재료특성에 관한 실험적 연구

김정현* · 최경식* · 정성엽* · 서영교* · 조성락** · 이춘주**
*한국해양대학교 해양개발공학부
**한국해양연구원 해양시스템안전연구소

An Experimental Study for the Mechanical Properties of Model Ice Grown in a Cold Room

JUNG-HYUN KIM*, KYUNGSIK CHOI*, SEONG-YEOB JEONG, YOUNG-KYO SEO*,
SEONG-RAK CHO** AND CHUN-JU LEE**
*Division of Ocean Development Engineering, Korea Maritime University, Busan, Korea
*Maritime & Ocean Engineering Research Institute, KORDI, Daejeon, Korea

KEY WORDS: Ice model basin 빙수조, Cold room 저온실험실 Model ice 모형빙 Mechanical properties 재료특성 Flexural strength 굽힘강도, Elastic modulus 탄성계수

ABSTRACT: *A full-scale field experiment is an important part in the design of ships and offshore structures. Full-scale tests in the ice-covered sea, however, are usually very expensive and difficult tasks. Model tests in a refrigerated ice tank may substitute this difficulty of full-scale field tests. One of the major tasks to perform proper model tests in an ice towing tank is to select a realistic material for model ice which shows correct similitude with natural sea ice. This study focuses on the testing material properties and the selection of model ice material which will be used in an ice model basin. The first Korean ice model basin will be constructed at the Maritime & Ocean Engineering Research Institute (MOERI) in 2009. With an application to the MOERI ice model basin, in this study the material properties of EG/AD/S model ice of IOT (Institute for Ocean Technology) Canada, were tested. Through comprehensive bending tests, the elastic modulus and the flexural strength of EG/AD/S model ice were evaluated and the results were compared with published test results from Canada. Instead of using an ice model basin, a cold room facility was used for making a model ice specimen. Since the cold room adopts a different freezing procedure to make model ice, the strength of the model ice specimen differs from the published test results. The reason for this difference is discussed and the future development for a making model ice is recommended.*

1. 서 론

극지 빙해역을 운항하는 쇄빙선박의 빙저항이나 해양구조물에 작용하는 빙하중을 추정하기 위해서 극지 현장에서 실규모의 시험이 필수적인데 대부분 어렵고 많은 예산이 소요되어 그보다는 규모는 작지만 극지환경 재현 실험시설인 빙수조에서 모형시험을 수행하는 방법이 있다. 빙수조에서의 모형시험은 모형선의 빙하중/빙저항 계측 값으로부터 실제 선박/구조물에 작용하는 빙하중/빙저항의 크기를 정확하게 추정하는 것이 목적이기 때문에, 빙/구조물 상호작용에 관련되는 여러 변수를 정확하게 파악하고, 역학적으로 동일한 모형시험을 반복 수행한 뒤 상사법칙(Similitude law)에 따라 실제 빙해역에서의 문제로 확장하는 과정을 거치게 된다.

빙수조에서 모형시험을 성공적으로 수행하기 위해서는 실제 빙해역의 빙상조건과 역학적으로 상사인 상태를 재현해야 하는데 이 때 제일 중요한 것이 상사법칙을 만족하는 얼음의 선택이다. 역학적 상사법칙을 맞추기 위해 일반 담수빙이 아닌 순수한 물에 첨가물을 넣어 모형빙(Model ice)을 제조하여 빙수조에서 사용하게 된다. 모형빙의 특성 중 특히 얼음 두께, 강도, 탄성계수 및 예상되는 파괴모드에 관련되는 재료특성 값을 상사법칙에 따라 축소하는 것이 중요하다. 일반적으로 선수각이 작은 쇄빙선박이나 경사면을 가진 해양구조물에서는 굽힘 파괴모드가 지배적이기 때문에 탄성계수와 굽힘강도의 비, E/σ_f 를 실제 해빙에서의 값인 2,000~5,000에 가깝게 유지하는 것이 빙수조 시험용 모형빙을 선택하는 기준이다(ITTC, 2002; 김정현과 최경식, 2007).

빙수조에 사용되는 모형빙은 여러 파괴모드 중 굽힘에 의한 파괴모드가 지배적이라는 가정 하에 실제 해빙보다 축소된 굽힘강도와 탄성계수를 가지도록, 순수한 물을 얼리지 않고 특정한 첨가물을 넣어서 결빙시키는데 각국의 빙수조에서 많이 쓰는 첨가물로는 염분(Sodium chloride), 요소(Carbamide/Urea) 그리고 다중 복합첨가물인 EG/AD/S(Ethylene glycol/Aliphatic detergent/Sugar)가 있다. 이러한 첨가물은 해빙의 결정구조와 비슷하게 모형빙의 결정구조를 만드는 역할도 하며 모형빙의 강도 값을 낮추는 역할도 한다(Timco, 1984).

현재 빙수조에 사용되는 모형빙 제조기술은 빙수조 시설을 보유한 핀란드, 캐나다 등 극지공학이 발달한 몇몇 선진국만이 가

교신저자: 최경식 부산광역시 영도구 동삼동 1번지
051-410-4324 kchoi@hhu.ac.kr

지고 있다. 현재 2009년 준공 예정으로 쇄빙선박과 해양구조물의 빙해역 모형시험을 위한 국내 최초의 빙수조가 한국해양연구원(KORDI) 해양시스템안전연구소(MOERI)에 건설 중에 있다. MOERI 빙수조는 사각형의 수조로 주 시험수조(32m×32m), 시험 준비용 수조(10m×32m) 그리고 사용된 얼음을 녹이는 수조로 구성된다. MOERI 빙수조에 사용될 모형빙의 선택이 빙수조 건설과 함께 중요한 과제로 대두됨에 따라 모형빙의 종류와 제조기술의 확보가 향후 MOERI 빙수조 활용에 절대적으로 중요하다고 판단된다. 이러한 배경에서 본 연구에서는 MOERI 빙수조에 사용될 적절한 모형빙을 제안하고자 빙역학 실험용 Cold room을 이용해 상사법칙을 만족하는 모형빙을 제작하여 재료특성 실험을 수행하였다.

여러 문헌에 따르면 캐나다의 IOT(Institute for Ocean Technology) 빙수조에서 사용하고 있는 EG/AD/S 모형빙이 염수빙이나 요소빙 등 다른 재료에 비해 탄성계수/굽힘강도 비율 및 빙판 파괴 이후의 거동이 가장 해수빙에 가까운 특징을 가지고 있기 때문에 1차적인 시험 대상으로 EG/AD/S 모형빙을 선택하였다. 본 연구에서는 Cold room 환경에서 여러 가지 방법으로 모형빙을 제작하였고, 3점 굽힘시험을 통하여 모형빙 시편의 굽힘강도와 탄성계수 등 재료특성 값을 파악하였다. 빙수조가 아닌 Cold room 환경조건을 이용한 독립적인 모형빙 제조사례를 통해 상사법칙을 만족하는 모형빙의 재료특성 시험법을 확보하고자 한다.

2. 쇄빙현상의 상사법칙

실선과 모형선의 기하학적인 축척비를 λ라고 하면 실제 빙판의 탄성력과 모형빙의 탄성력의 비가 λ^3이 될 때 Cauchy 상사법칙을 만족시킨다. 이 조건은 모형실험에 있어서 모형빙의 두께, 탄성계수, 모형빙의 강도를 실제 빙판의 $1/\lambda$ 로 줄이고, 얼음의 마찰계수는 실제와 동일하게 하며, 모형선의 속도 V는 실제의 $1/\sqrt{\lambda}$ (Froude 상사법칙 만족)로 줄이고, 탄성계수와 굽힘강도의 비, E/σ_f 는 실제와 모형시험에서 동일한 값을 유지해야 한다는 결론이다. Table 1은 빙수조 시험에 적용되는 상사법칙에 따른 여러 가지 변수에 대한 축척비이다.

Table 1 Similitude law for ice model basin experiments (p: prototype, m: model)

Length	$l_p = \lambda l_m$
Velocity	$V_p = \sqrt{\lambda} V_m$
Ice strength	$\sigma_p = \lambda \sigma_m$
Ice thickness	$h_p = \lambda h_m$
Elastic modulus	$E_p = \lambda E_m$
Friction coefficient	$f_p = f_m$
Poisson's ratio	$\nu_p = \nu_m$
Ice density	$\rho_p = \rho_m$

3. 모형빙의 재료특성

모형빙의 재료는 그 사용목적과 상사법칙을 만족하는 기준에 따라 구분할 수 있는데 일반적으로 빙저항/빙하중을 측정하는 모형시험에 사용되는 모형빙은 합성 모형빙(Synthetic ice)이 아닌 화학첨가물을 사용한 모형빙(Doped ice)이다.

모형빙 제조 시 특별히 고려해야 될 사항은 여러 파괴모드 중 굽힘에 의한 파괴모드가 지배적이라는 가정 하에 실제 해빙보다 $1/\lambda$ 로 축소된 굽힘강도와 탄성계수를 갖도록, 그리고 E/σ_f 값이 실제의 해빙의 값과 비슷한 2,000~5,000 범위 내에 들도록 하는 것이다. 따라서 σ_f를 모형빙 축척 수준까지 낮추기 위해 각 빙수조에서는 첨가물로 염분(Brine), 요소(Carbamide/Urea) 그리고 다중 복합첨가물인 EG/AD/S 등을 사용하고 있다. 이러한 첨가물은 모형빙의 결정구조를 해빙의 결정구조와 비슷하게 만드는 역할을 하며 모형빙의 강도를 낮추는 역할도 한다 (Schwarz, 1981: Timco, 1984).

3.1 염수빙(Saline ice)

염분이 함유된 염수빙은 결빙 시에 액체 상태의 진한 염수(Brine)가 얼음 속에 갇혀 염수맥(Brine pocket)을 형성하기 때문에 굽힘강도에 대해서는 상사법칙에 맞는 낮은 강도의 얼음을 비교적 쉽게 제조할 수 있다. 따라서 1950년대 중반 당시의 빙수조에서는 이 방법이 주로 사용되었다. 이 후 1970년대부터는 모형빙의 탄성계수값 E 를 낮추어 실제 해빙의 E/σ_f 에 가깝게 만드는 방법이 연구되었다. 독일 함부르크 선박연구소(HSVA)에서는 0.67%의 저농도 식염수를 사용해서 약간 단단한 얼음을 만들어 필요한 얼음두께를 유지한 뒤 실온을 결빙온도보다 약간 높게 올리는 승온방법(Warm-up method)을 이용하여 모형빙을 제작하였다. 얼음의 강도는 제빙 완료시점에는 꽤 큰 값을 가지고 있지만 승온효과에 의해 시간과 함께 급격히 감소하여 실제 얼음과 가까운 값을 갖는 것을 알 수 있었다 (Schwarz, 1975).

하지만 이러한 염수빙의 가장 큰 문제점은 축척비가 클수록 (λ>30) Froude와 Cauchy 법칙을 만족하기 힘들고 굽힘강성이 상사법칙에서 기대되는 값보다 상당히 작아서 E/σ_f 값이 200~500으로 실제 해빙의 값 2,000~5,000에 비해 매우 낮았다. 또한 파괴 이후의 하중-변위 곡선은 실제 해빙과는 달리 잔류소성이 남아 이 영역에 대한 특별한 보정이 필요하게 되며 또한 부식성이 강해 이것을 견딜 수 있는 수조 구조나 특수장치가 필요하다.

3.2 요소빙(Carbamide ice)

1970년대 후반부터 캐나다의 Timco(1980)는 여러 가지 무기물과 유기물을 얼음에 첨가물로 사용하여 그 성질을 조사했는데 그 결과 요소(NH_2CONH_2)를 첨가물로 한 모형빙이 염수빙에

비해 강성이 높아 적합하다는 것을 발견했다. 이 모형빙은 요소 수용액을 결빙시킨 후 승온시켜 만드는 것으로 요소빙(Urea ice) 혹은 Carbamide 모형빙이라 불리며 구조적으로 염수빙(Saline ice)과 매우 비슷하며 무독성이어서 여러 빙수조에 많이 사용되었다.

Carbamide 모형빙은 염수빙에 비해 저강도에서 높은 E/σ_f 가 유지되지만 모형시험에 대한 상사성을 살펴볼 때 σ_f 가 크면 (즉, λ가 작다면), 파괴 후의 잔류응력이 남지 않고 실제 얼음과 비슷한 하중분포가 얻어지지만 σ_f 가 작아지면 잔류응력이 커진다. 모형시험에 대응하는 축적비가 λ=20~40 (12.5~25 kPa)을 주로 사용하는 경향이므로 파괴에 필요한 에너지도 상대적으로 증가할 것으로 예상되며 파괴 직후의 잔류응력과 압축강도 그리고 밀도에 관해서 개선될 필요가 있었다(Timco, 1980).

3.3 EG/AD/S 모형빙

Timco(1986)는 요소빙의 결점을 보충하고 상사법칙을 만족시키는 모형빙으로 EG/AD/S 빙을 개발하였다. 이것은 에틸렌글리콜(EG) 0.46%, 지방성화합물(AD) 0.032%, 설탕(S) 0.049% 용액을 섞은 물질을 결빙시키고 약간 단단한 얼음을 만들어 필요한 얼음두께를 유지한 뒤 승온방법을 통해 얻는다.

EG/AD/S 모형빙은 다른 화학물질이 첨가된 얼음과 비교해 결이 고운 단층(Single layer) 기둥형 구조의 독특한 특징을 지니고 있다. 하중방향에 의해 파괴강도가 달라지는 것은 얼음의 두께방향 결정구조가 다르기 때문인데, 요소빙의 경우는 표층 부근이 강도가 높은 입자형 구조이고 하층은 대부분 기둥형 구조이기 때문에 하중방향에 따라 그 값이 달라진다. 하중을 위에서 아래로 가하게 되면 기둥형 구조를 갖는 밑 부분 쪽에 인장이 발생하면서 빙판 밑 부분이 입자형인 구조에 비해 쉽게 파괴되어 하중방향에 의한 영향이 큰 것을 알 수 있다. 하지만 단층형 구조인 EG/AD/S 모형빙은 요소빙에 비해 방향성의 영향을 덜 받게 된다.

EG/AD/S 모형빙은 에틸렌글리콜(EG)이 요소에 비해 훨씬 비싸지만 요소빙은 1년 정도 지나면 재료특성이 바뀌는 반면 EG/AD/S 모형빙은 오랫동안 사용해도 재료특성이 바뀌지 않는다. 또한 E/σ_f 는 1,500~2,500 정도이고, 요소빙에 비해 하중방향의 영향을 덜 받는데 EG/AD/S 얼음은 파괴 직후 하중이 급격히 감소하여 거의 원점으로 되돌아가는 반면 요소빙은 잔류응력이 생겨서 소성 상태를 나타내고 있는데 이것은 EG/AD/S 모형빙이 실제 해빙과 같은 취성적 특성을 가지고 있다는 것을 뜻한다(Timco, 1986).

단점으로는 설탕으로 인한 박테리아 번식 때문에 필터가 필요하다는 문제가 발생되었고 해빙에 비해 높은 값을 가지는 밀도와 마찰계수는 개선될 필요가 있다. Table 2 는 문헌에서 밝히고 있는 모형빙의 재료에 따른 얼음의 강도특성을 정리한 것이며, v와 h는 각각 빙판에 대해서 수직방향(Vertical direction)과 수평방향(Horizontal direction)으로의 압축강도를 나타낸다.

Table 2 Strength properties of various model ice material (Zufelt and Ettema, 1996)

Material	Flexural strength (kPa)	Elastic modulus/ Flexural strength (E/σ_f)	Compressive strength (kPa)	Specific gravity
Sea ice	700-800	2,500-4,500	8,000-12,000(v)	0.91
Freshwater ice	500-1500	1,500-1,600	10,000(v) 1,500-3,000(h)	0.92
Urea-doped	20-120	1,000-2,500	120-250(v) 75-160(h)	0.93 -0.94
EG/AD/S	20-100	1,500-2,500	150-370(v) 80-280(h)	0.93

4. Cold Room을 이용한 모형빙 실험

MOERI 빙수조에서 사용될 모형빙 특성을 예측하기 위해 빙역학 실험용 Cold room을 이용해 상사법칙을 만족하는 모형빙을 제작하여 탄성계수와 굽힘강도 실험을 수행하였다. 사용된 Cold room은 4m×6m×2.6m 규격의 저온챔버로 내부온도를 -30℃까지 조절할 수 있으며 내부에는 1축압축 및 3점 굽힘시험이 가능한 UTM(시험속도 0~200mm/min, 최대압축 20톤)이 설치되어 있다.

4.1 모형빙 제조과정

앞에서 알아본 바와 같이 EG/AD/S 모형빙이 염수빙이나 요소빙 등 다른 재료에 비해 탄성계수/굽힘강도 비율 및 빙판 파괴 이후의 거동이 가장 해수빙에 가까운 특징을 가지고 있기 때문에 본 연구의 1차적인 실험대상으로 EG/AD/S 모형빙을 선택하였다. EG/AD/S 모형빙의 경우 낮은 분자량 첨가물인 EG는 표면활성제 역할을 하는 AD와 함께 얼음 속에 갇혀 모형빙의 강도를 낮추는 역할을 하여 모형빙의 물리적인 상사성을 충족시킨다. S는 빙판의 얼음결정들이 수평 방향으로 성장하는 것을 억제하여 비교적 고른 기둥형 결정구조를 갖게 한다(Timco, 1986).

하지만 본 연구에서는 빙수조에서 모형빙을 결빙시키는 것과는 달리 Cold room을 이용하기 때문에, 결빙환경의 차이에 따른 여러 가지 어려움이 발생하였고 이에 따른 실험결과의 차이를 줄이기 위해 시행착오를 통해 다음의 4가지 방법으로 모형빙을 달리 제조하였다(Table 3).

Table 3 Procedures in making model ice specimen

	Solution	Warm-up	Seeding	Tester
Test 1	Original EG/AD/S (High concentration)	N	N	UTM for bending tests
Test 2	EG 0.46%, AD 0.32% S 0.49%	N	N	
Test 3	Original EG/AD/S	N	Y	
Test 4	Original EG/AD/S	Y	Y	Push-Pull gauge

Test 1~Test 3은 -18℃의 Cold foom 내에서 36~48시간 동안 모형빙을 성장시켰고, 시편의 가공은 플라스틱 용기(45cm(*L*)x25cm(*B*)x10cm(*h*))전체를 결빙시킨 후 톱으로 잘라내는 방법이 선택되었다(Photo. 1).

반면 Test 4는 빙수조에서 모형빙이 생성되는 일반적인 방법을 적용하여 별도로 제작된 소형수조(120cmx50cmx50cm) 내에서 표면으로부터 30mm 두께만큼 결빙시키는 방법을 사용하였고 이를 위해 -18℃에서 6시간동안 가량 성장시켰다 (Photo. 2). 보통 빙수조에서는 모형빙의 강도를 낮추기 위한 방법으로 필요한 얼음두께를 만든 뒤 실온을 빙점까지 서서히 올리는 승온방법을 사용하고 있는데 Test 1~Test 3은 승온방법을 적용하지 않았고 Test 4는 Cold room 내부온도가 0℃에 도달하기까지 약 6시간 동안 승온과정을 거쳤다.

Test 2를 제외하고는 나머지 3가지 모두 참고문헌의 배합비율과 동일하게 제작하였는데, Test 2는 첨가물의 농도가 진할수록 강도가 약해지는 사실을 이용하여 앞의 두 방법에서 사용한 EG/AD/S 의 혼합비율 중 상대적으로 비율이 적은 AD(지방성 화합물)와 S(설탕)의 함량을 약 10배 정도 높여 모형빙을 제작하였다. Test 3과 Test 4는 결빙을 촉진하고 균일한 결정구조를 형성하기 위해 빙수조에서 결빙온도에 가까운 온도의 수조수로 스프레이를 뿜는 Wet seeding 방법을 응용하여 Test 3의 경우 용기 내부에 물: 얼음가루의 비율을 약 1:1로 두어 Slurry 상태로 결빙시켰고, Test 4는 수조수가 결빙온도에 도달했을 때 약 400㎖의 혼합용액을 물 위쪽에 뿌리며 모형빙을 생성시켰다.

Photo. 3은 Test 3과 Test 4의 방법으로 생성된 모형빙 단면의 편광사진을 보여주고 있다. (a)는 대부분 Slurry 상태로 결빙시켜 결정이 입자형 구조임을 확인할 수 있고, (b)는 소형수조에서 위에서 아래로 기둥형 결정구조를 나타내는 것을 알 수 있다.

(a) Plastic container

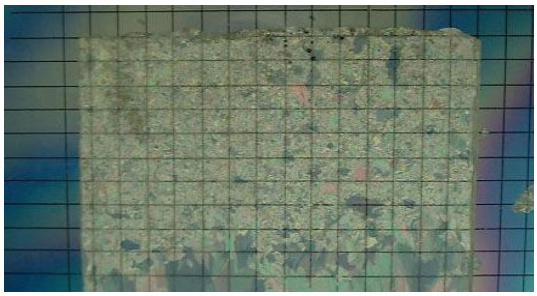
(b) Model ice specimen

Photo. 1 Containers of EG/AD/S mixture solution and the ice specimen cut from frozen model ice (Test 1-3)

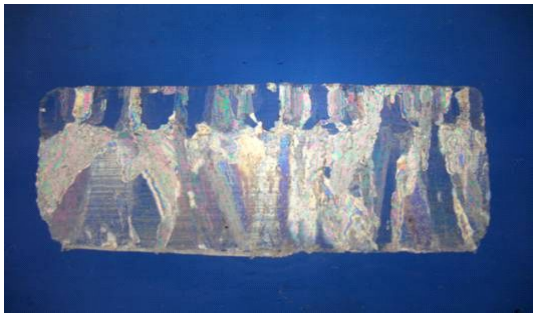
(a) Miniature ice tank

(b) Model ice

Photo. 2 Model ice sheet grown in a small ice tank (Test 4)



(a)



(b)

Photo. 3 Thin sections of model ice grown in (a) Test 3 and in (b) Test 4

4.2 3점 굽힘시험

모형빙의 굽힘강도와 탄성계수는 외팔보 시험이나 단순보를 이용한 3점 굽힘시험을 통해 측정되는데 실제 빙수조에서는 스프링게이지와 LVDT 시스템을 이용한 외팔보 시험을 하지만 Cold room 내에 설치된 소형수조에서는 외팔보 시험이 원칙적으로 불가능해 단순보를 이용한 3점 굽힘시험만을 수행하였다.

Test 1-3의 모형빙은 Cold room 내부에 설치된 UTM을 사용하였고 Test 4는 모형빙의 강도가 약하기 때문에 Push-pull 스프링게이지를 이용해 굽힘강도를 측정하였다.

모형빙의 굽힘강도는 시편의 치수에 따라 좌우되는데(Hirayama, 1983), 규격화되어 있는 표준시험편 치수는 폭(B)이 두께(h)의 두 배, 길이(L)가 두께(h)의 5~6배이다(Timco, 1981). 따라서 본 논문에서는 모형빙의 두께를 실제 빙수조에서 사용되는 2.5~5cm 정도로 성장시켰고 치수는 $h:B:L=1:2:6$으로 맞추어 제작하였다. 3점 굽힘시험은 제작한 모형빙 시편을 지지대(Span)위에 올려놓고 중앙점에서 하중을 가하며 그 변위와 파괴 시 하중을 측정한다(Fig. 1). 탄성계수와 굽힘강도는 선형탄성보 이론을 통해 다음과 같은 식으로 계산된다.

$$\sigma_f = \frac{3PL}{2Bh^2} \tag{1}$$

$$E = \frac{1}{4B}\frac{P}{\delta}\left(\frac{L}{h}\right)^3 \tag{2}$$

여기서 B, h, L은 각각 시편의 폭, 두께, 지지대 간격을 나타내고 P는 최대 하중, δ는 변위를 나타낸다.

5. 실험결과 및 고찰

Fig. 2와 Table 4는 앞의 네 가지 방법으로 제작한 약 120개 모형빙 시편의 굽힘시험 결과를 위 식을 사용해 계산한 탄성계수와 굽힘강도의 평균값을 나타내고 있다. Test 1~3 모형빙의 굽힘시험 결과를 살펴보면 굽힘강도는 600~900kPa로 담수빙의 굽힘강도 값인 1,500kPa에 비해 강도가 작지만, Table 2에서 나타낸 타 빙수조 실험 결과보다는 상당히 큰 값을 보여 주고 있다. 또한 결빙과정에 따라 탄성계수가 달라짐을 알 수 있었는데 고농도 모형빙(Test 2)이 Test 1에 비해 평균적으로 낮은 탄성계수를 갖는다. Test 3의 결과는 Timco(1986)의 결과에 근사하게 E/σ_f=2,000 비율을 가장 잘 만족하고 있으나, Fig. 3과 비교할 때 굽힘강도와 탄성계수 값이 IOT 빙수조에서 사용되는 EG/AD/S 모형빙의 값보다 상당히 큰 것으로 보아 실제 해빙과 Test 3 모형빙 사이에는 상사성이 그다지 만족스럽지 못하다.

낮은 굽힘강도 값을 얻기 위해서는 낮은 강성 또한 요구되는데 모형빙 제작 중 승온과정이 필수적임을 이 결과를 통해 알 수 있다. Test 4의 결과를 보면 굽힘강도가 100kPa 이하에 분포함을 알 수 있었는데 평균치는 65kPa 이었다. Test 1~3의 경우 굽힘하중과 처짐변위가 동시에 계측되는 UTM을 사용하였지만 Test 4의 경우에는 소형수조 내에 결빙된 빙판 위에서 LVDT를 사용할 수 없었고(수조가 소형이어서 빙판과 수조 벽 사이의 경계면에 의한 영향이 존재) 따라서 Push-pull 스프링게이지를 이용한 굽힘하중만 측정이 가능하여 Test 4 모형빙의 탄성계수나 E/σ_f값의 직접적인 측정은 불가능하였다.

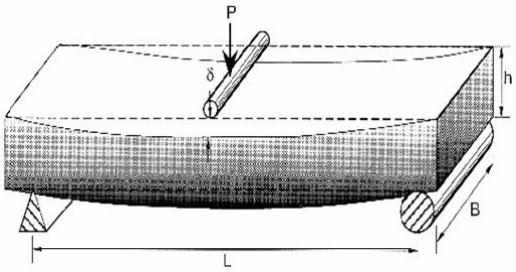


Fig. 1 Parameters in three-point bending test

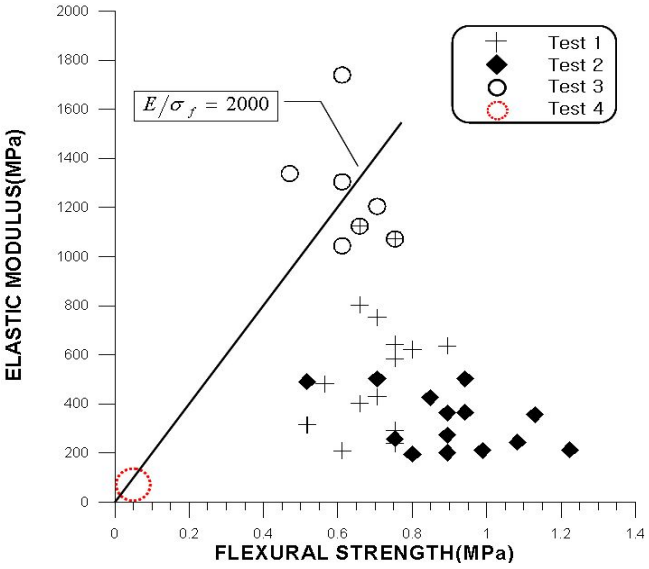


Fig. 2 Elastic modulus and flexural strength of model ice measured from beam bending tests

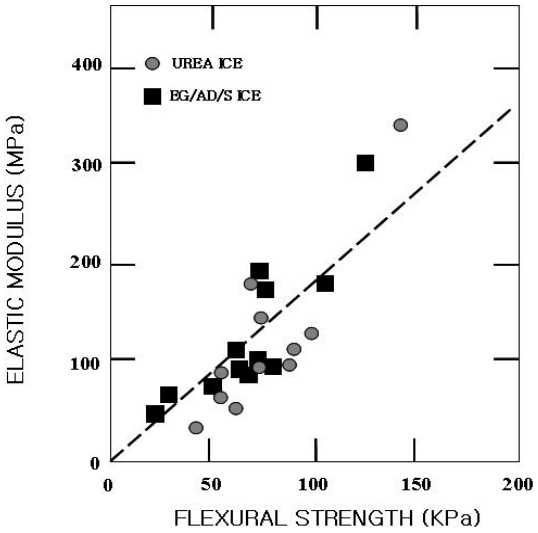


Fig. 3 Elastic modulus vs. flexural strength for urea ice and model ice (redrawn from Timco, 1986)

하지만, 대략적인 값을 파악하기 위해 점탄성재료의 동탄성계수를 측정하는 방법 중 하나인 공진법을 이용하여 재료의 공진주파수를 측정하고 오일러 보이론을 적용하여 탄성계수를 간접적으로 구하였다. 이러한 방법을 통해 Test 4 모형빙의 탄성계수나 E/σ_f값을 추정한 결과가 Fig. 2에 제시되어 있다. 정확한 계측치는 아니지만 승온시간의 조절에 의해 모형빙의 굽힘강도와 탄성계수를 원하는 수준으로 감소시킬 수 있다는 것을 확인할 수 있었다. Fig. 4는 Cold room에서 모형빙을 생성시키는 동안 공기와 수조수의 온도변화를 나타내고 Fig. 5는 승온시간에 따라 모형빙의 강도가 감소하는 것을 보여주고 있다.

Table 4 Test results of the model ice

No.	σ_f(kPa)	E(MPa)	E/σ_f
Test 1	710	578	822
Test 2	910	328	395
Test 3	620	1270	2109
Test 4	65	N/A	N/A

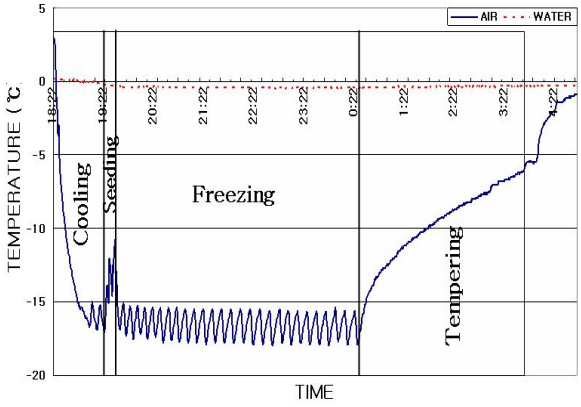


Fig. 4 Air and water temperature variation with time in the cold room (Test 4)

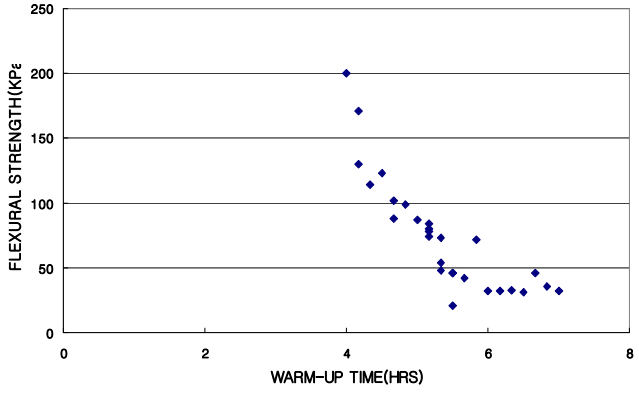


Fig. 5 Measured flexural strength of model ice specimen vs. warm-up time (Test 4)

6. 결 론

본 논문에서는 향후 건설될 MOERI 빙수조의 효율적인 활용을 위해 국외 빙수조에서 사용되고 있는 모형빙의 특성을 조사하였고, 국내 빙수조에서 사용될 모형빙의 선택을 위해 캐나다의 IOT에서 사용하고 있는 EG/AD/S 모형빙의 효용성을 검토하고 재료특성을 파악하고자 Cold room을 이용한 모형빙을 제작하였다. 굽힘강도와 탄성계수는 굽힘시험을 통해 참고문헌의 결과와 비교해 보았다.

빙수조와 다른 결빙환경에서 역학적 상사법칙에 맞는 모형빙을 제조하기가 쉽지 않았지만 승온시간이 상사법칙에 맞는 모형빙을 생성하는데 가장 중요한 요인임을 확인할 수 있었다. 모형빙 수준의 굽힘강도와 강성을 얻기 위해서는 승온시간 조절이 필수적이기 때문에 차후 승온시간과 강도/강성과의 관계를 정립하는 체계적인 실험을 현재 수행하고 있으며 아울러 다양한 첨가제 농도변화와 성분 교체에 따른 모형빙 재료특성의 변화도 파악하고자 한다.

후 기

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

참 고 문 헌

김정현, 최경식 (2007). “빙수조 시험용 모형빙의 재료특성에 관한 연구”, 한국해양공학회 춘계학술발표회논문집, pp 1713-1718.

Hirayama, K. (1983). "Experience with Urea Doped Ice in the CRREL Test Basin", Proc. of POAC Symposium, Helsinki, Finland, pp 788-801.

ITTC (2002). Testing and Extrapolation Methods - Ice Testing General Guidelines, ITTC Recommended Procedures, Ice Specialist Committee of 23rd ITTC.

Schwarz, J. (1975). "On the Flexural Strength and Elastic of Saline Ice", Proceedings of 3rd IAHR Symposium, Hanover, N.H., USA, pp 373-386.

Schwarz, J. (1981). "Standardized Testing Methods for Measuring Mechanical Properties of Ice", Cold Regions Science and Technology, Vol 4, pp 245-253.

Timco, G.W. (1980). "The Mechanical Properties of Saline -Doped and Carbamide(Urea)-Doped Model Ice", Cold Regions Science and Technology, Vol 3, pp 45-56.

Timco, G.W. (1981). Invited commentary : On the Test Methods for Model Ice, Cold Regions Science and Technology, Vol 4, pp 81-92.

Timco, G.W. (1984). "Ice Forces on Structures : Physical Modelling Techniques", Proc. of IAHR Symposium on Ice, Hamburg, Germany, Vol 4, pp 117-150.

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, N.H. USA, Report 96-1.

2008년 4월 23일 원고 접수
2008년 5월 26일 최종 수정본 채택