

## 빙해수조용 EG/AD 모형빙의 재료특성 실험

김정현\* · 최경식\*

\*한국해양대학교 해양공학과

### An Experimental Study on the Material Properties of the EG/AD Model Ice Used for Ice Model Basins

Jung-Hyun Kim\* and Kyungsik Choi\*

\*Department of Ocean Engineering, Korea Maritime University, Busan, Korea

**KEY WORDS:** Ice model basin 빙해수조, Cold room 저온실험실, Ethylene glycol/Aliphatic detergent(EG/AD) Model ice EG/AD모형빙, Mechanical properties 재료특성, Flexural strength 굽힘강도, Elastic modulus 탄성계수

**ABSTRACT:** The EG/AD/S model ice, originally developed by Timco (1986), was selected as the primary model ice material for the newly built MOERI Ice Model Basin in Korea. However, the existence of a sugar component in the EG/AD/S mixture may cause a serious maintenance problem, as described in certain references. This study focuses on the tests of the mechanical properties of the EG/AD/S and the EG/AD model ice. In order to understand the influence of sugar in the original EG/AD/S model ice and to find a possible substitute for sugar, a series of tests with the EG/AD model ice were performed, and the results were compared to those of the EG/AD/S model ice. The relatively large size of the MOERI Ice Model Basin made it difficult to control the initial strength of model ice, so it took a much longer time to achieve the target strength. In order to obtain a lower strength and stiffness for the model ice, the amount of chemical additives may be varied to achieve the desired strength level. This paper is a preliminary study aimed at seeking a possible substitute for the original EG/AD/S model ice for utilization in a large-scale ice tank. To understand the influence of sugar in the original EG/AD/S model ice, the mechanical properties of the EG/AD/S and EG/AD model ice, such as flexural strength, compressive strength, and elastic modulus, were tested in the laboratory condition and compared to each other. The warm-up procedure seems to be an important factor to reduce ice strength in the tests, so it is discussed in detail.

#### 1. 서 론

빙해역에서의 여러 가지 빙상환경을 모의적으로 재현하여 빙해용 선박의 쇄빙성능이나 해양구조물에 작용하는 빙하중 실험을 가능하게 하는 시설이 바로 빙해수조(Ice towing tank or Ice model basin)이다. 현재 한국해양연구원 해양시스템안전연구소(MOERI)에 쇄빙선박과 해양구조물의 빙해역 모형시험을 위한 국내 최초의 빙해수조(Ice model basin) 시설이 2009년 완공되어 가동 중에 있으며 이를 기반으로 하여 빙역학 관련 연구가 증가하는 추세이다. 실제 빙해역과 동일한 상사(Similitude law)를 만족하기 위해 빙해수조에서는 담수에 화합물을 첨가한 모형빙(Model ice)을 사용하게 되는데, 모형빙의 특성을 해빙(Sea ice)과 유사하게 제조하는 것이 빙해수조에서의 모형시험을 성공적으로 수행하기 위한 첫 번째 과제라 할 수 있다.

세계 주요 각국의 빙해수조에서는 최적상태의 모형빙을 제조하고자 다양한 성분과 여러 가지 제조법을 응용하여 사용 중에 있다. 모형빙은 여러 파괴모드 중 굽힘에 의한 파괴모드가 지배적이라는 가정 하에 실제 해빙보다 축소된 굽힘강도와 탄성계수

를 가지도록, 순수한 물을 얼리지 않고 특정한 첨가물을 넣어서 결빙시키는데 세계 각국의 빙해수조에서 많이 쓰이는 첨가물로는 염분(Sodium chloride), 요소(Carbamide/Urea) 그리고 다중 복합첨가물인 EG/AD/S(Ethylene glycol/Aliphatic detergent/Sugar)가 있다. 이러한 첨가물은 모형빙의 결정구조를 해빙의 결정구조와 비슷하게 생성시키는 역할도 하며 모형빙의 강도 값을 낮추는 역할도 한다(Timco, 1984).

MOERI 빙해수조에서는 빙판 파괴거동이 가장 해빙에 가까운 특징을 갖고 있는 캐나다 IOT(Institute for ocean technology) 빙해수조용 EG/AD/S(에틸렌글리콜, 지방성화합물, 설탕) 모형빙을 기초로 하여 박테리아 번식의 문제가 제기되는 S(설탕) 성분을 제거한 EG/AD 모형빙을 현재 사용 중에 있고, 이러한 배경에서 본 연구에서는 MOERI 빙해수조에 사용될 적절한 모형빙을 제안하고자 S(설탕) 성분의 유무에 따른 효과를 검증하기 위해 빙역학 실험용 Cold room 시설을 이용해 재료특성 시험을 수행하였다.

빙해수조와는 결빙 환경이 다른 Cold room을 사용하여 모형빙을 성공적으로 제조하고 실험한 결과에 대한 연구(김정현 등,

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

본 연구는 2010년 목포에서 개최된 한국해양공학회 추계 학술대회에 발표된 논문을 근간으로 하고 있음을 밝힙니다(김정현과 최경식, 2010).

2008a)와 EG/AD 모형빙의 압축강도특성에 관련된 연구(김정현과 최경식, 2009b)를 이미 수행한 바 있으며, 모형빙 생성법과 성분의 변화에 대한 재료특성을 파악하기 위해 계통적인 실험을 하고자 변수를 확장하여 좀 더 다양한 실험을 수행하였다. 또한 모형빙 제조 시 수조수에 첨가한 성분의 용해율에 따라 굽힘강도 값이 변하는 점을 착안하여 물에 쉽게 용해되는 EG를 제외하고 AD성분을 끓인 후 용해시킨 수조수를 결빙하여 완성된 모형빙으로 대표적 재료특성 값인 굽힘강도, 압축강도 그리고 탄성계수를 측정하고 실제 외국의 빙해수조에서 사용 중인 모형빙 재료시험 결과 값과 비교 분석 한 후 그 차이점에 대해 고찰하였다.

본 연구에서 중점적으로 수행한 내용은 정량적인 변화보다는 정성적인 변화를 파악하여 각 성분과 변수들이 결과에 어떠한 영향을 미치고, 최종적으로 설탕성분을 제외한 EG/AD 모형빙의 재료특성 효과를 검증하고자 하였으며 추후 MOERI 빙해수조에서 EG/AD 모형빙의 단점을 보완하고 대체할 다음 단계의 모형빙을 개발하기 위한 틀을 마련하는데 의의가 있다.

## 2. 각국 빙해수조에서 사용되는 모형빙의 특성

모형빙은 첨가물의 성분과 제조법에 따라 빙해수조에서 사용되는 종류가 다양하다. 모형빙은 크게 두 종류로 구분되는데 실제 빙해역과 역학적으로 동일한 상사를 재현하기 위해 해빙과 동일한 구조를 갖는 기동형 모형빙과 대표적인 파괴모드에 해당하는 특정 재료특성 값을 갖춘 입자형 모형빙이 있다. 본

논문에서는 각국 빙해수조에서 사용되는 모형빙과 그 특성에 대해 여러 연구자의 문헌을 바탕으로 정리해 보았다(Table 1).

### 2.1 기동형(Columnar) 구조를 갖는 모형빙

1955년 러시아의 극지연구소(AARI)에서는 3% 나트륨 화합물 포함한 염수빙을 작고 균일한 입자를 가진 결정으로 만들기 위해  $-0.1\sim-0.2^{\circ}\text{C}$ 의 냉각수를  $-10\sim-14^{\circ}\text{C}$ 의 냉각된 공기 중에서 염수에 분사시키는 Wet seeding 방법으로 제작하였다. 이러한 고온 입자들이 물 표면부터 성장하여, 실제 해빙과 유사한 기동형구조의 얼음형태를 생성시킨다. 이 방법에 의하면 결빙시에 액체상태의 진한 염수(Brine)가 얼음 속에 가두어져서 염수맥(Brine pocket)을 형성하기 때문에 굽힘강도에 대해서는 상사법칙에 맞도록 낮은 강도의 얼음을 비교적 쉽게 제조할 수 있어서 당시의 빙해수조에서는 이 방법이 주로 사용되었다. 그러나 이러한 염수빙의 가장 큰 문제점은 축적비( $\lambda$ )가 클수록 Froude와 Cauchy 법칙에 만족하기 힘들다는 점이다(Schwarz, 1977).

1971년 독일 함부르크 선박연구소(HSVA)의 빙해수조에서는 일반적인 염수빙의  $E/\sigma$  값이 200~500으로 실제 해빙의 값(2000~5000)에 비해 매우 낮고, 실험결과 잔류소성이 나타남을 알고 이를 보완하기위해 두 가지 방법을 적용하였다. 첫째는 0.67%의 저농도 식염수를 사용하는 방법과 둘째는 모형빙의 강도를 낮추고  $E/\sigma$ (탄성계수와 굽힘강도의 비율)의 값을 향상시키기 위해 약간 단단한 얼음을 만들어 필요한 얼음두께를 유지한 뒤 실온을 결빙온도보다 약간 높게 올리는 방법, 즉 승온효

Table 1 Principal characteristics of major ice model basins

Year completed	Country	Facility operator	Model ice type	Basin size (m)
1955	Russia	Arctic and antarctic research institute (AARI) - Leningrad	Saline Ice	13.5 × 1.9 × 1.7
1969	Finland	Wartsila shipyard (WARC)	Saline Ice	29 × 4.8 × 1.2
1979	U.S.A.	Cold regions research and engineering laboratory (CRREL) - New Hampshire	0.95% Urea-Doped Ice	37 × 9 × 2.4
1980	Canada	National research council, hydraulics laboratory (CHC) - Ottawa	Urea-Doped Ice	21 × 7 × 1.2
1982	U.S.A.	Iowa institute of hydraulic research (IIHR) - Iowa	Urea-Doped Ice	20 × 5 × 1.2
1983	Finland	Kvaener masa-yards arctic research center (MARC) - Helsinki	Saline Ice	77.3 × 6.5 × 2.3
1984	Germany	HSVA - Hamburg	Saline Ice	78 × 10 × 2.5
1985	Canada	NRC, Institute of ocean technology (IOT) - St. John's	EG/AD/S- CD Ice	80 × 12 × 3
1986	Russia	Krylov shipbuilding research institute (KSRI) - St. Petersburg	Saline Ice	45 × 6 × 1.75
1987	Finland	Arctic offshore research center (HUT) - Helsinki	Alcohol Doped Ice (GE Ice)	40 × 40 × 2.8
1988	Finland	Technical research center of finland (VTI) - Espoo	Saline Ice	15 × 3.2 × 1.5
2006	Finland	Aker arctic research center (AARC) - Helsinki	FGX Saline Ice	75 × 8 × 2.1
2009	South Korea	KORDI, Maritime ocean engineering research institute (MOERI) - Daejeon	EG/AD Ice	42 × 32 × 2.5

과(Tempering process or Warm-up method)를 적용하는 방법으로 모형빙을 제작하였다(Schwarz, 1975).

1981년과 1985년 캐나다 국립연구소(NRC)의 유체연구소(CHC)와 해양과학연구소(IOT)에서는 각각 빙해수조를 건설했다. 캐나다의 Timco(1980)는 얼음의 특성을 향상시키기 위해 40여 가지의 첨가물들을 바꿔가며 혼합시켜 얼음을 성장시켰는데 그 결과 요소(NH<sub>2</sub>CONH<sub>2</sub>)를 첨가물로 한 모형빙이 염수빙에 비해 강성이 높아 적합하다는 것을 발견했고 유체연구소(CHC) 빙해수조에서는 1.3% 농도의 요소 수용액을 이용해서 모형빙을 생성시켰다. 동일한 성장과정 때문에 구조적으로 염수빙(Saline ice)과 매우 비슷하며 무독성이어서 여러 빙해수조에 많이 사용되었다.

캐나다의 해양과학연구소(IOT)에서는 에틸렌글리콜(EG), 지방성 화합물(AD)와 설탕(S)용액을 혼합시켜 새로운 형태의 모형빙을 사용했는데, EG/AD/S 빙은 요소빙에 비해 거의 모든 면에서 우수한 특성을 가지고 있고, 다른 Doped model ice와 비교해 결이 고운, 단층(Single-layered) 기둥형 구조의 독특한 특징을 지니고 있다. 밀도와 마찰계수를 개선하기 위해 다양한 EG/AD/S 빙에 대해 연구를 하였는데, Correct Density-EG/AD/S 빙은 해빙과 같이 공기방울을 갇히게 해서 모형빙의 밀도를 감소시킬 수 있었고, 일반적인 EG/AD/S 빙에 비해 더 높은 E/σ 값을 가지며 마찰계수와 투명도를 개선시켰다. 현재 IOT 빙해수조에서는 CD-EG/AD/S 빙을 사용하고 있다(Spencer and Timco, 1990).

1979년과 1981년 미국 극한지공학연구소(CRREL)와 아이오와 유체연구소(IIHR)에서는 각각 빙해수조를 건설했고 1% 농도의 요소와 기포를 사용하여 요소빙을 생성시켰고, 1988년 CRREL에서는 EG/AD/S 빙 방법을 사용했는데, 요소빙에 비해 초기 변형이 발생했고 설탕으로 인한 박테리아 문제로 Filter system 이 필요한 문제를 제기했다(Borland, 1988).

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

Material	Flexural strength (σ) [kPa]	E/σ	Compressive strength (σ) [kPa]	Specific gravity
Sea ice	700~800	2500~4500	8k~12k(v)	0.91
Freshwater ice	500~1500	1500~1600	10k(v) 1.5~3k(v)	0.92
Saline	20~80	1000~1700	100~275(v) 75~180(h)	0.89
Urea	20~120	1000~2500	120~250(v) 75~160(h)	0.93 ~0.94
FGX	15~90	700~8000	15~180	0.88 ~0.91
Urea (fine-grain)	15~45	200~310	10~45	0.92
EG/AD/S	20~100	1500~2500	150~370(v) 80~280(h)	0.93
GE ice	15~90	1000~2000	15~55	NR

## 2.2 입자형(Granular) 구조를 갖는 모형빙

1983년 핀란드 극지연구소(MARC)에서는 수조 내부 공기온도가 -16~-22°C에서 2% 농도의 염수를 사용한 물에 연속적으로 분무시켜 얼음을 생성시키는 FG(Fine grained) 기법을 사용했는데, 이 방법은 하루에 최대 70mm까지 빙판을 성장시킬 수 있고 E/σ 값은 평균 1000~2000이며 최대 2480이었다(Enkvist and Makinen, 1984). 1989년 핀란드 헬싱키대학교(HUT)에서는 규모 40m×40m의 빙해수조를 건설하여 다양한 모형빙 재료(FG, EG/AD/S, EG/AD, EG solution)를 연구하였고, 부식을 방지하기 위한 방법으로 0.5% 에탄올을 첨가하는 방법을 택했다. GE(Granular ethanol) ice는 공기온도가 -10°C인 수조에서 연속적인 분사 방식으로 생산되었고 E/σ 값은 1000~2000이다.

Table 2는 모형빙의 종류에 따른 얼음의 재료특성에 대해 정리한 것이다.

## 3. 모형빙의 재료특성 및 실험방법

### 3.1 모형빙의 선택과 제조과정

본 연구에서는 캐나다 IOT(Institute for ocean technology) 빙해수조에서 사용하고 있는 EG/AD/S(에틸렌글리콜, 지방성화합물, 설탕) 모형빙이 염수빙이나 요소빙 등 다른 재료에 비해 탄성계수/굽힘강도 비율 및 빙판 파괴거동이 가장 해빙에 가까운 특징을 가지고 있기 때문에 검증시험 대상으로 EG/AD/S 모형빙을 선택하였다(Timco, 1986). 빙해수조와는 결빙 환경이 다른 Cold Room을 사용하여 여러 번 시행착오를 통해 모형빙을 성공적으로 제조하고 실험한 결과에 대한 연구를 이미 수행한 바 있으며(김정현 등, 2008a), 모형빙의 생성법과 성분의 변화에 대한 재료특성을 파악하기 위해 계통적인 실험을 수행하고자 본 연구에서는 박테리아 번식의 문제가 제기되는 S(설탕) 성분을 제거하고 제작한 동일한 비율의 EG/AD 모형빙의 특성을 알아보았다. 또한 모형빙 제조 시 수조수에 첨가한 성분의 용해율에 따라 굽힘강도 값이 변하는 점을 착안하여 물에 쉽게 용해되는 EG를 제외하고 AD성분을 끓인 후 용해시킨 수조수를 결빙하여 모형빙을 제작하였다.

모형빙을 결빙시킨 준비된 두 개의 소형수조의 규격은 500×500×1200mm, 500×750×1200mm이다. 표준화된 굽힘시험편의 크기는 가로:세로:길이의 비가 1:2:6이며 압축시험편의 크기는 가로:세로:높이의 비가 1:1:3이므로 모형빙의 평균 결빙두께가 25~30mm 일 때 1회 결빙 시 얻게 되는 시험편을 통해 확보할 수 있는 평균 데이터는 약 100개 정도이다.

### 3.2 굽힘강도(Flexural strength)

일반적으로 선수가이 작은 쇄빙선박이나 경사면을 가진 해양 구조물에서는 굽힘 파괴모드가 지배적이기 때문에 굽힘강도의 특성을 파악하는 것은 무엇보다도 중요하다.

모형빙 빙판의 굽힘강도는 일반적으로 수조 내에서 외팔보 시험을 통해 간접적으로 측정된다. 빙해수조에서의 굽힘 시험 시 외팔보의 표준화된 규격으로 폭을 두께의 2~3배, 길이는 두께의 5~7배로 할 것을 제시하고 있다(ITTC, 2005). 빙판의 굽힘

강도에 대한 시험법은 김정현 등(2009a)에 자세히 설명이 되어 있다.

Cold room을 이용한 본 연구에서는 소형 수조로는 외팔보 시험이 불가능해 단순보를 이용한 3점 굽힘시험을 수행하였다. 모형빙의 두께를 실제 빙해수조 시험에 사용되는 두께인 2.5~5cm로 성장시켰고 시편의 치수는  $h:B:L=1:2:6$ 로 맞추어 제작하였다. 3점 굽힘시험은 앞서 제작한 모형빙 시편을 지지대(Span)위에 올려놓고 5kgf 용량의 휴대용 스프링게이지(Push-pull gauge)를 이용해 중앙점에 하중을 가하여 그 변위와 파괴 시의 하중을 측정하였다.

단순보(1)와 외팔보(2)에 대한 탄성계수와 굽힘강도는 선형 탄성보 이론을 통한 다음과 같은 식으로 정의 된다.

$$\sigma_f = \frac{3PL}{2Bh^2}, E = \frac{1}{4B} \frac{P}{\delta} \left(\frac{L}{h}\right)^3 \quad (1)$$

$$\sigma_f = \frac{6PL}{Bh^2}, E = \frac{4}{B} \frac{P}{\delta} \left(\frac{L}{h}\right)^2 \quad (2)$$

여기서  $B, h, L$ 은 각각 시편의 폭, 두께, 지지대 간격을 나타내고  $P$ 는 최대 하중,  $\delta$ 는 변위를 나타낸다.

### 3.3 압축강도(Compressive strength)

모형빙의 압축강도는 특히 수평방향 하중(Horizontal loading)을 받을 때 매우 중요한데, 이 때 얼음은 구조물에 부딪히면서 분쇄(Crushing) 형태로 파괴된다. 이방성(Anisotropic)인 기동형 구조를 갖는 해빙과 동일한 결정구조로 성장시킨 EG/AD 모형빙의 경우 수평방향과 수직방향의 하중방향에 따라 그 특성이 다른데, 일반적으로 수직방향의 압축강도가 수평방향에 비해 약 3.6~3.9배 큰 것으로 나타나 있다(Timco, 1986). 해빙과 동일한 결정구조로 성장시킨 EG/AD 모형빙의 압축강도를 측정할 때 표준화된 시편의 크기는 가로:세로:길이의 비가 1:1:3이

되도록 한다. 모형빙의 평균두께가 30mm라고 할 때 길이는 약 100mm 정도가 된다. 압축강도는 변형률속도에 따라 재료특성이 바뀌므로 하중속도를 빙-구조물 상호작용의 속도에 따라 다양하게 변화시킨다.

모형빙의 1축 압축강도 측정을 위해 본 논문에서는 Timco (1980)의 압축시험법을 응용하여 규격에 맞는 시편을 꺼내어 압축시험기로 옮겨 시험하는 방법을 적용하였으며, 차후 빙해역 실선 계측 시 탑재가 가능하도록 경량의 휴대용 계측장비 제작에 주안점을 두어 압축시험기를 제작하였다. 압축시험 계측장비 제작과 실험에 관련된 자세한 사항은 김정현과 최경식(2009b)을 참고하면 된다. 본 연구에서 제작된 압축시험기는 순간적으로 하중을 가함으로써 파괴 시의 하중만 계측이 가능하므로 압축강도의 변형률속도(하중 재하속도)에 따른 재료특성 파악은 불가능하지만, 모형빙의 다양한 조건에 따른 압축강도의 특성 파악은 충분히 가능할 것으로 보인다.

### 3.4 탄성계수(Elastic modulus)

모형빙의 탄성계수를 측정하는 방법으로는 빙판의 연직변위와 하중을 계측하여 그 비례상수로 결정하는 정적인 방법과 초음파나 고주파 진동을 이용하는 동적인 방법이 있다. 정적인 측정법 중  $E = \frac{P}{\delta}$  관계식을 이용할 때 굽힘시험에서 초기 기울기를 구하는 방법과, 기울기의 평균값으로 탄성계수를 구하는 방법이 있다. 초기 기울기는 시험에 따른 오차가 많이 발생하기 때문에 기울기의 평균값으로 구하는 방법이 권장된다. 탄성계수는 다양한 온도분포와 염분, 하중률, 결정방향에 의해 좌우되므로 모형빙의 특성에 따라 측정값의 범위가 매우 넓다.

## 4. 실험결과 및 고찰

### 4.1 3점 굽힘시험 결과

낮은 굽힘강도를 얻기 위해서는 낮은 강성이 요구되는데 모형빙 제작 중 승온(Warm-up) 과정이 필수적이다. 승온 과정동

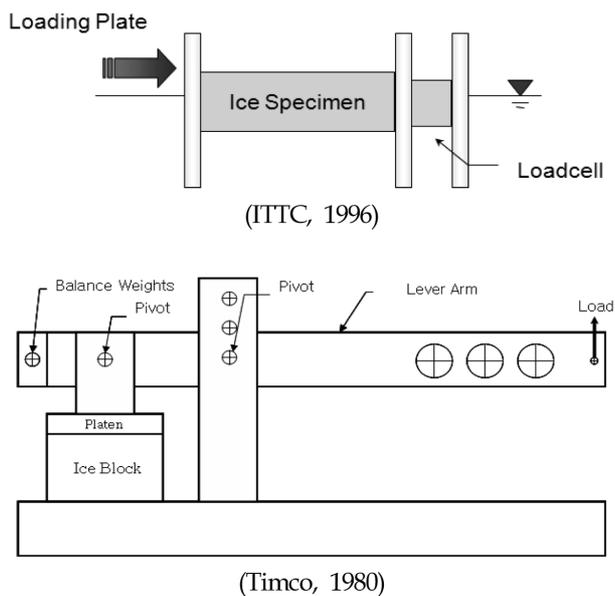


Fig. 1 Concept of the uni-axial compression test

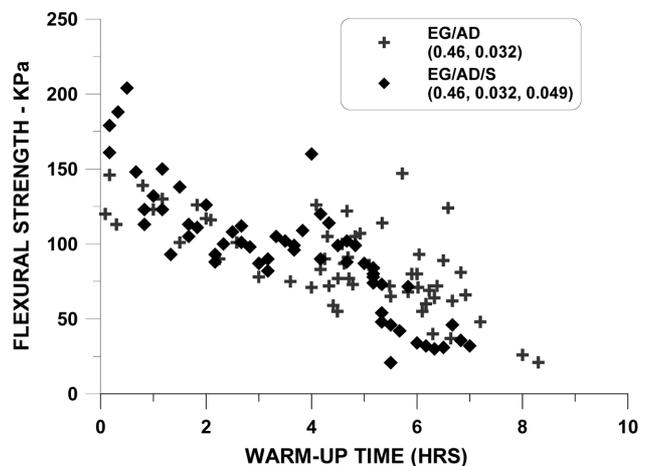


Fig. 2 Measured flexural strength of model ice specimen vs. warm-up time for EG/AD/S and EG/AD model ice

안 얼음 결정 사이에 첨가물이 완전히 결빙되지 않고 불순물 형태로 글리콜 포켓에 갇히게 되어 구조적으로 약하게 만든다. Fig. 2는 Cold room에서 생성시킨 두 가지 종류의 EG/AD/S와 EG/AD 모형빙의 승온시간에 따른 굽힘강도 변화를 나타내었는데 초기 굽힘강도가 약 150kPa에서 8시간이 경과한 후에는 25kPa로 낮아지는 것을 확인할 수 있다. 두 종류의 모형빙 모두 승온시간이 길어질수록 굽힘강도 값이 낮아지는 것을 알 수 있고, 이는 승온시간의 길이가 낮은 강도 값을 얻기 위한 필수적인 요소임을 알 수 있다.

다만, EG/AD 모형빙 테이터 값의 일부가 다소 큰 강도 값을 갖는 이유는 계면 활성제 역할을 하는 지방성 화합물 AD (Aliphatic detergent)가 5°C의 차가운 물에 충분히 용해되지 않아 모형빙 초기 생성 시 글리콜 포켓에 갇히는 역할을 제대로 못했던 것으로 보인다. 이것은 파괴단면을 통해 알 수 있었는데 실제 해빙과 유사한 형태로 제작한 모형빙의 대부분이 기둥형 (Columnar) 구조(Fig. 3)를 가지는 반면 큰 강도를 갖는 모형빙은 일정한 형태가 아니어서 굽힘시험 시 파괴면이 중앙점 부근이 아니라 결정구조 모양대로 취약한 부분을 통해 쪼개짐을 알 수 있었다(김정현 등, 2008b). Photo. 1은 Cold room에서 결빙시킨 EG/AD/S와 EG/AD 모형빙의 편광 단면 사진인데, AD 성분이 완전히 용해되지 않은 EG/AD 모형빙(b)을 제외한 나머지 두 모형빙 모두 기둥형 결정구조를 갖는 것을 알 수 있다.

빙해수조에서 제작된 모형빙은 수면에서부터 아래방향으로 성장하는 기둥형 구조를 가지고 있어 첨가했던 화합물들이 결정구조 사이에 들어가 굽힘강도를 저하시키게 된다. 더욱이 입

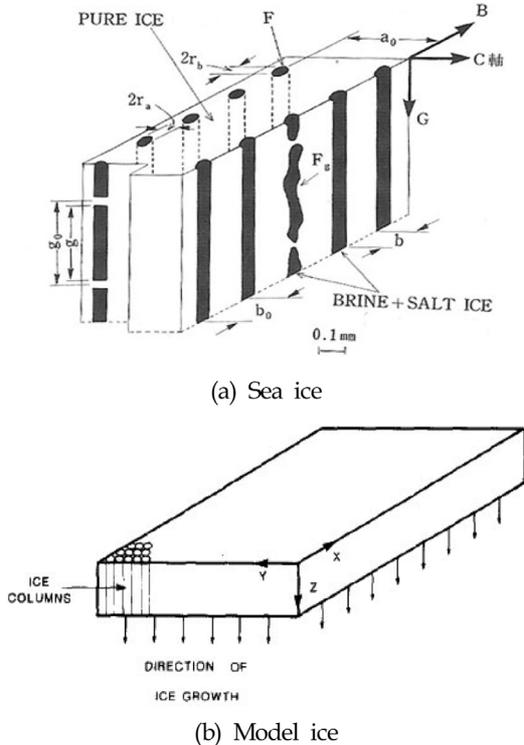


Fig. 3 Schematic showing the orientation of the ice columns (Timco, 1986)

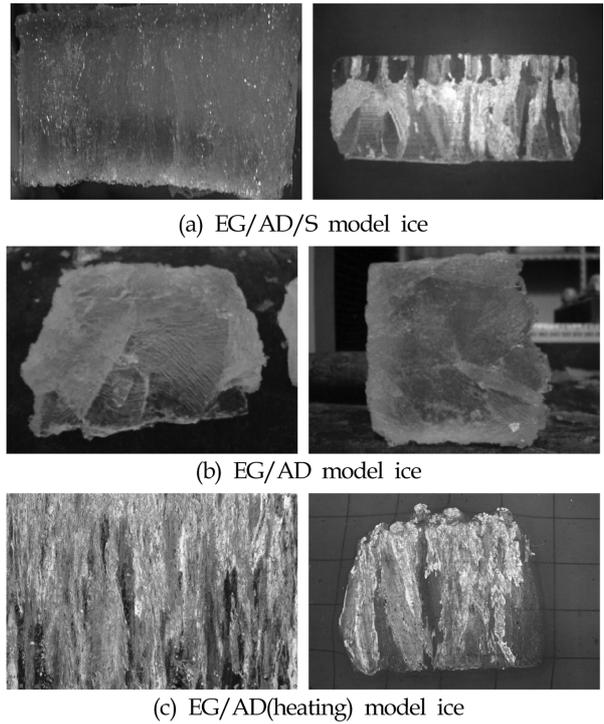


Photo. 1 Thin section photographs of model ice grown in a cold room

자형(Granular) 구조보다 기둥형(Columnar) 구조에서 굽힘강도 값이 더 작는데 그 이유는 하중을 위에서 아래로 가하게 되면 기둥형 구조를 갖는 밑 부분 쪽에 인장이 발생하면서 쉽게 파괴되기 때문이다. 일반적으로 모형빙을 기둥형 구조로 생성시키지만 초기 생성 시에는 분무형태로 입자를 생성시켜서 결빙시키게 되는데 이 때 윗면의 입자 구조 층이 두꺼울수록 하중 방향에 따른 강도의 값이 차이가 나게 된다.

Fig. 4는 cold room에서 생성시킨 EG/AD 모형빙과 Timco

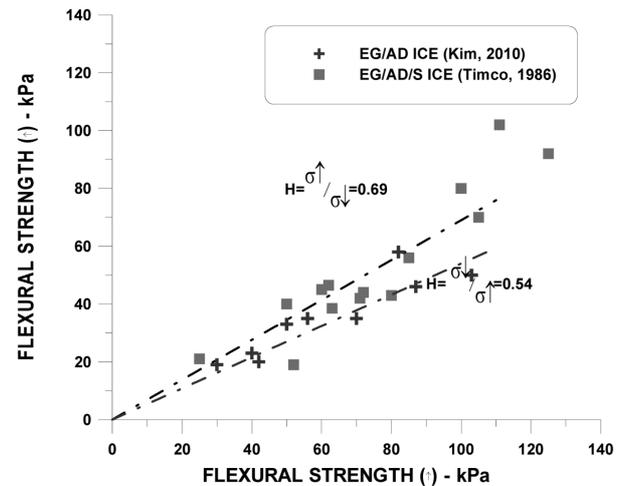


Fig. 4 Comparison of the flexural strength measured with both top and bottom in tension for EG/AD/S (Timco, 1986) and EG/AD ice measured in a cold room

(1986)의 EG/AD/S 모형빙의 하중방향에 따른 굽힘강도의 결과를 함께 그래프에 나타내었다. 본 연구에서 제작한 모형빙은 소형수조에서 단순보의 형태로 옮긴 후 3점 굽힘시험을 통해 얻은 결과로 윗면에서 하중을 가할 경우 아랫면의 인장으로 파괴가 일어나지만 외팔보 굽힘시험의 경우에는 끝단의 윗면에서 하중을 가하게 되면 반대편 끝단 윗면의 인장으로 파괴가 일어난다. 따라서 상향 굽힘강도와 하향 굽힘강도의 비는 서로 반대가 되므로 아래와 같이 표기를 하였고 그 결과 Timco(1986)의 EG/AD/S 모형빙이 실제 해빙의 값인  $H=1$ 에 더 가까운 것을 알 수 있었다. Cold room에서 생성시킨 EG/AD 모형빙의 하중방향에 따른 비가 큰 이유는 단순히 생성과정 중의 변화로 인한 차이인지 혹은 S(설탕) 성분의 유무에 따른 결과인지에 대한 판단은 추후에 계통적인 실험을 통해 파악하고자 한다.

4.2 1축 압축시험 결과

본 연구에서는 Warm-up(승온) 시간의 길이가 재료의 강도 저하에 영향을 끼침을 알고 Cold room에서 제작한 모형빙으로 승

Table 3 Measured flexural strength and compressive strength with respect to warm-up time

Warm-up time	EG/AD ICE			
	Flexural strength $\sigma_f$ [kPa]		Compressive strength $\sigma_c$ [kPa]	
	Typical value	Range	Typical value	Range
0 hr	123.5	85~150	256	150~320
2 hr	72.2	75~98	193	120~240
4 hr	61	40~82	142	110~180
6 hr	45	35~73	115	80~130
8 hr	24	20~52	75	65~120

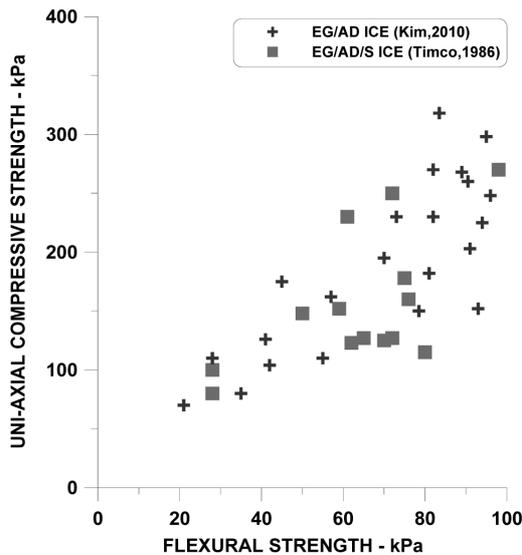


Fig. 5 Uni-axial compressive strength with horizontal loading versus flexural strength for EG/AD/S (Timco, 1986) and EG/AD model ice measured in a cold room

온시간에 대한 압축강도와 굽힘강도 값을 Table 3에 나타내었다. 승온시간이 길어질수록 굽힘강도의 값도 작아짐을 확인하였고 압축강도 역시 승온시간의 영향을 받는 것을 알 수 있었다. 수평방향에 대한 압축강도가 굽힘강도에 비해 3~4배 정도 큰 값을 갖는 것을 알 수 있었고 굽힘강도와 압축강도에 대한 EG/AD 모형빙과 참고문헌의 EG/AD/S 모형빙 실험결과를 함께 나타낸 Fig. 5를 통해 기존의 결과와 큰 차이 없이 실험결과가 비교적 잘 나옴을 확인할 수 있었다.

추후 하중재하속도(변형률속도)에 대한 압축강도의 특성을 계측할 수 있는 압축시험기로 보완할 계획이고, 하중과 변위를 동시에 계측하여 탄성계수( $E = \frac{P}{\delta}$ )도 함께 구해보고자 한다. 압축강도 이외에 여러 모형빙의 재료특성을 파악할 수 있는 장치를 마련하여 다양한 재료특성 파악을 목적으로 실험을 진행할 예정이다.

4.3 굽힘강도와 탄성계수의 관계

본 논문에서는 소형 수조 내에 결빙된 빙판 위에서 LVDT를 사용할 수 없었다. 따라서 Push-pull 스프링게이지를 이용한 굽힘하중만 측정이 가능하여 모형빙의 탄성계수를 동시에 계측하지는 못하였지만, 대략적인 값을 파악하기 위해 점탄성재료의 동탄성계수를 측정하는 방법 중 하나인 공진법을 이용하여 재료의 공진주파수를 측정하고 보이론에 따라 탄성계수를 간접적

Table 4 Average values in elastic modulus and flexural strength measured for model ice

Solution	Flexural strength [kPa] ave.	Elastic modulus [MPa] ave.	$E/\sigma_f$
EG/AD/S (EG 0.46%, AD 0.032%, S 0.049%)	65	147	2261
EG/AD (EG 0.46%, AD 0.032%)	61	128	2098

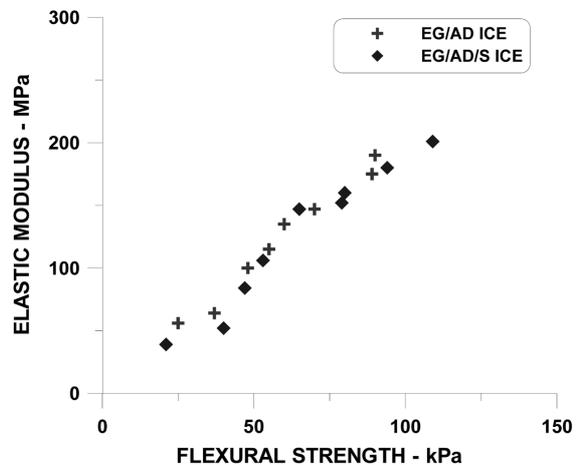


Fig. 6 Elastic modulus and flexural strength of EG/AD/S model ice and EG/AD model ice measured in a cold room

으로 계산하였다. Table 4는 Cold room에서 생성시킨 EG/AD/S와 EG/AD 모형빙의 굽힘강도와 탄성계수의 평균값에 대한 결과이며  $E/\sigma$ 의 값이 약 2000으로 실제 해빙의 2000~5000 사이에 분포함을 알 수 있었고, 전 범위에 걸쳐 잘 만족함을 알 수 있었다(Fig. 6). 이러한 방법을 통해 정확한 측정값은 아니지만 승온시간의 조절에 의해 모형빙의 굽힘강도와 탄성계수를 원하는 수준으로 낮출 수 있다는 것을 확인할 수 있었다. 차후 간접적인 방법이 아닌 굽힘강도와 탄성계수를 함께 측정 할 수 있도록 하중과 변위를 동시에 계측할 수 있는 장비를 도입하여 추가로 실험을 수행할 예정이다.

## 5. 결 론

본 논문에서는 2009년 완공된 MOERI 빙해수조에서 사용되고 있는 EG/AD 모형빙의 재료특성을 파악하고 향후 개선점을 찾기 위해 Cold room을 이용하여 박테리아 번식의 문제가 제기되는 S(설탕) 성분을 제거한 EG/AD 모형빙을 제조하여 3점 굽힘시험, 1축 압축시험 그리고 탄성계수등 재료특성시험을 수행하였다. 기존의 참고문헌 결과와 비교했을 때 승온시간은 굽힘강도, 압축강도, 탄성계수 모두 동일한 영향을 받는 것을 알 수 있었고, 압축강도의 크기가 굽힘강도에 대해 약 3배정도 큰 값을 갖는 것을 확인하였으며, 굽힘강도와 탄성계수의 비율( $E/\sigma$ ) 또한 2000으로 실제 해빙과 잘 만족함을 알 수 있었다. 모형빙 제조 시 AD(지방성 화합물)와 같은 성분을 혼합할 때 저온에서는 잘 녹지 않으므로 충분히 잘 용해가 되어 그 역할을 충실히 수행할 수 있도록 제조에 주의해야하며, 추후 하중과 변위를 동시에 계측 할 수 있는 장비를 도입하여 단계적인 실험을 추가로 수행할 예정이다.

## 후 기

본 논문은 지식경제부 산업원천기술개발사업인 “빙해선박의 극지항로 안전운항기술 및 극저온 빙성능 시험평가 기법 개발” 중 “빙해선박 선체구조 안전성 평가 기술(과제번호 10033640)” 과제의 연구비 지원과 한국과학재단 지정 첨단조선공학연구센터(ASERC R11-2002-008-01002-0)의 지원으로 수행된 연구결과임.

## 참 고 문 헌

- 김정현, 최경식, 정성엽, 서영교, 조성락, 이춘주 (2008a). “Cold Room을 이용한 모형빙의 재료특성에 관한 실험적 연구”, 한국해양공학회지, 제22권, 제3호, pp 64-70.
- 김정현, 최경식, 이춘주 (2008b). “Cold Room을 이용한 모형빙 제조 및 재료특성 실험(2)”, 한국해양공학회 추계학술대회 논문집, pp 190-194.
- 김정현, 최경식, 이춘주 (2009a). “빙해수조용 모형빙의 재료특성 조사 및 실험적 고찰”, 한국해양과학기술협의회 공동학술대회 논문집, pp 2021-2026.
- 김정현, 최경식 (2009b). “간이 계측장비를 이용한 EG/AD 모형빙의 압축강도특성에 관한 실험적 연구”, 한국해양공학회 추계학술대회 논문집, pp 540-543.
- 김정현, 최경식 (2010). “EG/AD 모형빙의 재료특성에 관한 실험적 고찰”, 한국해양공학회 추계학술대회 논문집, pp 141-145.
- Borland, S. (1988). “The Growth of EG/AD/S Model Ice in a Small Tank”, Proc. of ICOMAE, Houston, TX, Vol 4, pp 47-53.
- Enkvist, E. and Makinen, S. (1984). “A Fine-Grain Model Ice”, Proc. of the IAHR Symposium on Ice, Hamburg, Germany, Vol 2, pp 217-227.
- ITTC (1996). Report from Panel on Performance in Ice-Covered Waters Committee, The 21th ITTC Conference, Trondheim, Norway, Vol 1, pp 211-270.
- ITTC (2005). ITTC Recommended Procedures and Guidelines, Testing and Extrapolation Methods - Ice Testing Methods for Model Ice Properties, ITTC RP 7.5-02-04-02.
- Schwarz, J. (1975). “On the Flexural Strength and Elastic of Saline Ice”, Proc. of the 3rd IAHR Symposium on Ice, Hanover, N.H., USA, pp 373-386.
- Schwarz, J. (1977). “New Development in Modeling Ice Problems”, Proceedings of POAC Conference, St. John's, Canada.
- Spencer, D.S. and Timco, G.W. (1990), “CD Model Ice: A Process to Produce Correct Density (CD) Model Ice”, Proc. of the 10th IAHR Symposium on Ice, Vol 2, pp 744-755.
- 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. (1984). “Ice Forces on Structures : Physical Modelling Techniques”, Proc. of the 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.

2010년 12월 6일 원고 접수

2010년 12월 28일 심사 완료

2011년 1월 27일 게재 확정