

모형빙 생성 시 승온 시간에 따른 모형빙의 강도 특성 연구

정성엽[†]·하정석
한국해양과학기술원 부설 선박해양플랜트연구소 빙해수조

A Study on the Strength Characteristics of Model Ice for Warm-up Time during Model Ice Preparation

Seong-Yeob Jeong[†]·Jung-Seok Ha
Korea Research Institute of Ships and Ocean Engineering, Ice Model Basin

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.

Understanding the strength characteristics of model ice is an important issue for model testing in an ice model basin to estimate the ship performance in ice. In particular, the mechanical properties of the model ice including elastic modulus, flexural strength and compressive strength are key consideration factors. In order to understand the characteristics of the model ice during warm-up phase at KRISO's ice model basin, the strength properties are tested in this study. The infinite plate-bending method, in-situ cantilever beam test and ex-situ uniaxial compressive test are conducted to determine the strength properties of model ice. The strength characteristics of the model ice are then analyzed in terms of the warm-up phase and seasonality. These results could be valuable to quality control of the model ice characteristics in KRISO's ice model basin and to better understand the variations in strength properties during the ice model tests.

Keywords : Strength characteristics of model ice(모형빙 강도 특성), Warm-up phase(승온 과정), Ice model test(빙 모형시험)

1. 서론

최근 수치 시뮬레이션 모델의 발달로 빙해선박과 극지 해양 구조물에 대한 빙성능 평가 연구가 활발히 수행되고 있는데, 개발된 모델을 검증하기 위해서는 빙해수조의 모형시험 결과가 필요하다(Su et al., 2010; Tan et al., 2013; Zhou et al., 2016). 따라서 모형시험 결과는 빙성능 평가 시뮬레이션 기법의 계산 정확도를 향상시키는데 기여할 수 있으므로 이러한 관점에서 모형시험의 중요성은 매우 크다고 할 수 있다.

빙해수조(Ice model basin or Ice tank)는 모형빙(model ice)을 생성하여 빙해선박과 극한지 해양구조물 등에 대한 모형시험을 수행할 수 있는 시설로서 상사법칙(Law of Similarity)에 따라 모형시험 환경을 실제 극지환경과 유사하도록 재현하게 된다. 모형시험에서는 주로 Froude 상사법칙을 따르게 되는데, 점성력을 상사법칙에 맞추기 위해서는 Reynolds 수를 동일하게 해야 할 필요가 있지만, 실제 값으로의 확장 시 점성유동에서

발생하는 힘의 성분들이 왜곡될 수 있기 때문에 Froude 수와 Reynolds 수를 모두 충족시키는 것은 불가능하다. 다만, 쇄빙과정 시 선박의 속도가 매우 느리기 때문에 점성력은 충분히 작아 지므로 모형시험에서 Reynolds 수는 무시할 수 있다.

빙 모형시험에 사용되는 얼음은 실제 해빙(sea ice)과 유사한 재료특성을 나타내는 모형빙을 사용하는데, 선박해양플랜트연구소(Korea Research Institute of Ships and Ocean Engineering, KRISO)의 빙해수조에서는 캐나다(National Research Council-Ocean, Coastal and River Engineering, NRC-OCRE) 빙해수조에서 사용하고 있는 CD(Correct Density)-EG/AD/S 모형빙에서 설장 성분이 제외된 CD-EG/AD 모형빙을 사용하고 있으며, 여기에 밀도제어 기술도 함께 적용되어 있다(Jeong et al., 2017a).

모형빙 생성 시 수조수 전체 표면에 균일한 얼음 핵을 생성하기 위한 시딩(seeding) 과정에서 담수(fresh water)가 사용되고 있는데, 이로 인해 수조수에 용해된 각 화합물의 농도가 변하게

되므로 주기적인 농도분석을 통해 부족분을 추가하여 일정 농도를 유지하고 있다. 최근에는 에틸렌글리콜(Ethylene Glycol, EG)을 친환경적이고 인체에 무해한 성분으로 대체하기 위해 동일한 화학적 성질을 가지는 프로필렌글리콜(Propylene Glycol, PG)로 대체하는 과정을 거치고 있으므로 현재 KRISO 빙해수조에서 사용 중인 모형빙의 명칭은 CD-PG/EG/AD 모형빙이다. 또한 모형시험 시 적용되는 상사법칙을 정리하면 Table 1과 같다.

빙해수조에서의 모형시험 시 중요한 사항 중 하나는 실제강도(actual strength)가 목표강도(target strength)와 유사한 조건에서 모형시험을 수행하는 것이다. 따라서 각국의 빙해수조에서는 강도를 제어하기 위한 다양한 방법이 사용되고 있는데, 주로 승온 과정(warm-up phase)을 통해 강도를 제어하게 된다. 따라서 본 연구에서는 KRISO 빙해수조에서 사용 중인 CD-PG/EG/AD 모형빙의 계절별 승온 과정에 따른 탄성계수와 굽힘강도, 압축강도의 특성을 평가하였고 이러한 특성 파악을 통해 모형시험을 위한 준비시간과 본격적인 시험시작 시간 예측에 활용하고 모형시험 과정 동안 모형빙의 강도 변화 특성을 파악하는데 활용하고자 한다.

Table 1 Summary of similitude laws for model test in an ice tank facility

Variable	Scaling
Length	$l_p = \lambda l_m$
Velocity	$v_p = \sqrt{\lambda} v_m$
Ice thickness	$h_p = \lambda h_m$
Compressive strength	$\sigma_{cp} = \lambda \sigma_{cm}$
Flexural strength	$\sigma_{fp} = \lambda \sigma_{fm}$
Elastic modulus	$E_p = \lambda E_m$
Frictional coefficient	$\mu_p = \mu_m$
Density	$\rho_{ip} = \rho_{im}$
Poisson ratio	$\nu_p = \nu_m$
Time	$T_p = \sqrt{\lambda} T_m$
Force	$F_p = \lambda^3 F_m$
Mass	$M_p = \lambda^3 M_m$

where p and m refer to prototype and model, and λ denotes scale ratio, respectively

2. 모형빙 종류와 강도 특성

2.1 각국 빙해수조의 모형빙 종류와 강도 특성

빙해수조는 선박과 해양구조물의 빙 모형시험을 수행할 수 있는 시설로서 극지 자원개발 및 수송을 위한 빙해선박과 해양플랜트의 설계 성능을 평가하기 위한 목적으로 건설되었다. 아래 Fig. 1과 같이 세계 최초의 빙해수조는 1955년 러시아 상트페테르부르크에 위치한 북극·남극연구소(Arctic and Antarctic

Research Institute, AARI)에서 건설되었는데, 현재까지도 빙해역에서 운용되는 선박과 잠수체 및 해양구조물에 작용하는 빙저항/빙하중 평가 연구를 수행하고 있으며, 그 결과를 러시아 선급 규정(Russian Maritime Register of Shipping, RMRS) 제정을 위한 기반 자료에 활용하고 있다. 또한 북극항로(Northern Sea Route, NSR)를 통항하는 선박의 안전운항을 위한 “Ice Passport”를 발행하고 있는데, 이는 선박의 운항가능 여부를 판단하는 기준을 제공한다.



Fig. 1 The first ice model basin at the Arctic and Antarctic Research Institute in Russia (Photograph by Author)

빙해수조를 이용한 모형시험은 빙-선체 또는 빙-구조물 상호작용과 같은 물리적 현상을 보다 쉽게 이해하고 모형-실선 상관관계를 정립하기 위한 중요한 기반 자료를 제공한다. 국외 빙해수조에서는 다양한 종류의 모형빙이 사용되고 있는데, 각국의 빙해수조에서 사용 중인 모형빙 종류와 결정구조(crystal structure)에 관한 내용이 Table 2에 정리되어 있다. 또한 모형빙의 강도 특성은 선박과 구조물에 작용하는 빙저항/빙하중 특성에 결정적인 영향을 미치게 되는데, 주로 탄성계수와 굽힘강도, 압축강도가 주요한 변수들이다. 따라서 모형빙 종류에 따른 각각의 강도 특성들이 Fig. 2~4에 도시되어 있다.

Fig. 2는 모형빙의 종류에 따른 굽힘강도 특성을 보여주고 있다. 굽힘강도의 경우 Table 1과 같이 모형선의 축척비에 비례하여 굽힘강도 또한 줄어들게 되는데, 굽힘강도 값이 너무 작은 경우 얼음의 파괴 시 잔류강도가 발생하여 파괴양식에 영향을 미치게 되므로 최소 굽힘강도는 10 kPa 이상의 값을 가져야 한다.

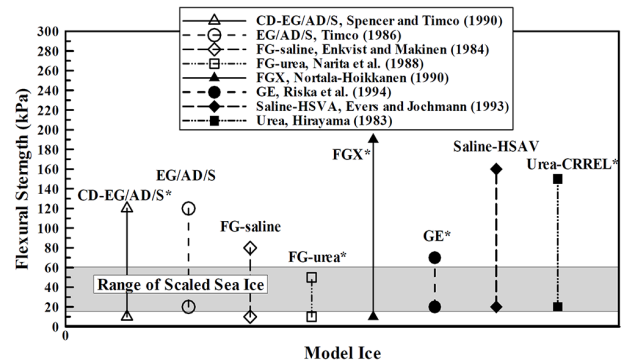


Fig. 2 Flexural strength characteristics for different types of model ice (Wang & Lau, 2007)

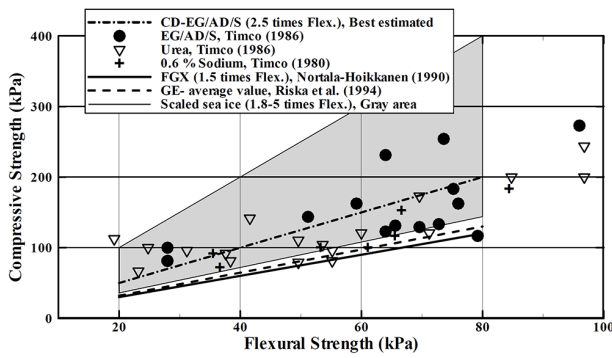


Fig. 3 Relationship between compressive and flexural strength for different types of model ice (Wang & Lau, 2007)

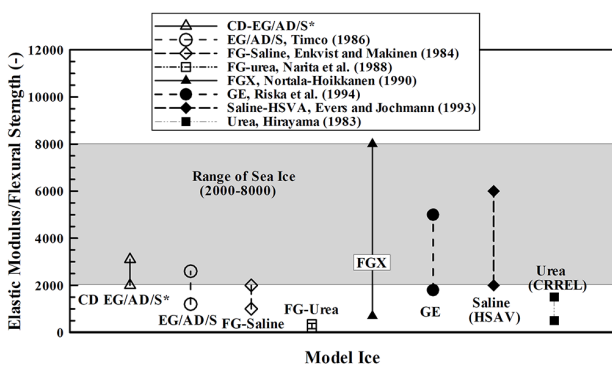


Fig. 4 Ratio of elastic modulus and flexural strength for different types of model ice (Wang & Lau, 2007)

또한 모형빙의 결정구조에 따라 굽힘강도 계측 시 위쪽 방향과 아래쪽 방향으로의 하중 재하 시 계측되는 결과도 영향을 받게 되는데, 입자형(granular type) 모형빙의 경우 하중 재하에 따른 방향성은 없으나, 기둥형(columnar type) 모형빙의 경우 아래쪽 방향이 위쪽 방향 보다 약간 큰 값을 가지며, 그 비율은 0.4~0.7 정도이다. 그리고 결정구조가 Fine-grained 타입의

FG 모형빙 중 하나인 FGX 모형빙의 경우 최대 굽힘강도의 크기는 대략 200 kPa 정도이고 이러한 모형빙은 모두 승온 과정을 통해 목표강도까지 굽힘강도를 제어하게 된다. Fig. 3에는 모형빙의 압축강도와 굽힘강도의 비율이 도시되어 있는데, 모형빙 종류에 따라 압축강도가 굽힘강도 보다 1.8배에서 5배 정도 큰 것을 알 수 있다. 또한 FGX 모형빙의 경우 압축강도가 굽힘강도에 비해 약 1배에서 2배 정도의 큰 경향을 가지고 있는데, 이는 결정구조가 입자형으로 등방성(isotropic) 특징을 가지기 때문으로 판단된다. Fig. 4에는 모형빙의 종류에 따른 탄성계수와 굽힘강도의 비율이 도시되어 있다. 일반적으로 탄성계수와 굽힘강도의 비율이 큰 경우 얼음의 주된 파괴 양식은 취성파괴(brittle failure)에 가깝게 되고 작은 경우에는 연성파괴(ductile failure)에 가깝는데, 실제 해빙은 대략 2,000~8,000 정도의 범위를 가지고 있다(Riska et al., 1994). 따라서 모형시험에서는 이들 비율을 실제 현상과 유사하게 모사하는 것이 좋은데, Fig. 4에서 보면 FGX 모형빙의 경우 그 범위는 700~8,000 정도로써 범위가 가장 큰 특징을 가지는 것을 알 수 있고 그 외의 모형빙들은 이보다 작은 범위를 가지고 있으며, EG/AD/S 또는 CD-EG/AD/S, FG-Saline 모형빙의 경우 그 값은 1,000~2,500 정도임을 알 수 있다.

2.2 모형빙의 강도 특성과 모형시험과의 관계

모형시험을 통한 선박의 빙성능 해석 시 모형빙의 강도 특성은 결과 보정과 실선 확장 시 사용되기 때문에 승온 과정에 따른 모형빙의 강도 특성 파악은 매우 중요하다. 특히 모형시험 결과 보정 관련하여 얼음의 두께와 강도 특성 및 선체 표면과 깨진 빙편(broken ice pieces)과의 마찰계수가 주요 변수이므로 모형시험 시 목표조건(target condition)과 실제조건(actual condition)에 대한 계측 결과의 보정을 통해 최종적으로 선박의 빙성능을 추정하게 된다(Jeong et al., 2017a). 식(1)과 (2)에는 현재

Table 2. Model ice type and generation methods in various ice tank facilities (ITTC, 2017)

Ice tank facility	Grain structure	Chemical composition
Aalto University, Finland	Fine-grained	Ethanol
Aker Arctic, Finland	Fine-grained	Sodium chloride
Japan Marine United (former Universal Shipbuilding Corporation (former NKK), Japan	Fine-grained	Urea
Krylov State Research Center (KSRC), Russia	Columnar and fine-grained	Sodium chloride
National Research Council Canada, Ocean, Coastal and River Engineering (NRC-OCRE, formerly the Institute for Ocean Technology and Canadian Hydraulic Laboratory), Canada	Columnar	CD-EG/AD/S EG = Ethylene glycol AD = Aliphatic detergent S = Sugar
Korea Research Institute of Ships and Ocean Engineering (KRISO), Korea	Columnar	CD-PG/EG/AD PG=Propylene glycol* *Recently added chemical component
National Maritime Research Institute of Japan (NMRI), Japan	Columnar	Polypropylene glycol
The Hamburg Ship Model Basin (HSVA), Germany	Columnar	Sodium chloride
Tianjin University, China	Columnar	Urea

KRISO 빙해수조에서 사용 중인 선박의 빙저항 결과에 대한 빙 두께 및 강도와 마찰계수에 대한 표준 보정식이 정리되어 있다.

$$R_{I,corr} = \left(aR_{I,meas} + b \frac{\sigma_{f,target}}{\sigma_{f,actual}} R_{I,meas} \right) \left(\frac{H_{I,target}}{H_{I,actual}} \right)^x \quad (1)$$

$$R_{I,corr} = \left(\frac{0.6 + 4\mu_{target}}{0.6 + 4\mu_{actual}} \right) \quad (2)$$

여기서 $R_{I,corr}$ 와 $R_{I,meas}$ 는 보정된 빙저항과 모형시험에서 계측된 빙저항을 나타내며, $\sigma_{f,target}$ 와 $\sigma_{f,actual}$ 는 시험 시 목표 굽힘강도와 실제 굽힘강도를 $H_{I,target}$ 와 $H_{I,actual}$ 는 목표 빙두께와 실제 빙두께를 나타내고 μ_{target} 와 μ_{actual} 는 목표 마찰계수와 실제 마찰계수를 의미하는데, 목표 마찰계수의 경우 0.1을 사용하고 있다. 또한 a 와 b 는 가중 계수(weight coefficient)를 나타내며, 지수 x 는 두께와 관련된 계수로써 1.0에서 2.0의 범위의 값으로 이 계수들 모두 모형시험을 통해 결정된다.

실제 모형시험에서는 모형빙 생성계획에 따라 수조수 온도와 수조 내부온도, 외기온도 등을 고려하여 모형빙 생성 시간을 결정하게 되고 모형빙의 두께가 목표 두께에 도달하면 본격적으로 승온 과정을 통해 모형빙의 강도를 제어하게 된다. 이 과정에서 모형빙의 두께도 일부 성장하게 되지만 성장률은 크지 않기 때문에 승온 과정에서는 주로 모형빙의 강도 제어에 초점을 두게 된다(Jeong et al., 2017a). 따라서 승온 과정에 따른 모형빙의 강도 특성 파악은 모형시험을 위한 준비시간 및 본격적인 시험시작 시간 예측에 활용이 가능하다.

KRISO 빙해수조는 사각형 수조로써 모형빙판 생성 후 모형시험은 채널 폭을 따라 수행하게 되는데, 각 채널별 시험 전과 후로 나누어 모형빙의 강도를 계측하고 있으므로 모형시험 시 강도 변화 특성을 파악하는 데에도 활용된다. 각국의 빙해수조에서는 오랜 시간동안 축적된 모형빙 생성 자료를 바탕으로 승온 시간에 따른 모형빙의 강도 특성을 파악하고 있다. 러시아 KSRC와 핀란드 Aker Arctic 빙해수조의 경우 모형시험 전 모형빙의 강도 특성을 계측하고 있으며, 현재까지 축적된 자료에 기반을 두어 모형시험 과정 동안 강도 특성에는 큰 변화가 없다고 가정하고 있다. 캐나다 NRC-OCRE 빙해수조의 경우 모형시험 전과 후로 구분하여 모형빙의 특성을 계측하고 있으며, KRISO 빙해수조에서도 모형시험 전과 후로 구분하여 모형빙의 강도 특성을 계측하고 있고 현재까지 274판의 모형빙판을 생성하여 그 자료를 바탕으로 모형빙의 강도 특성을 파악하고 있다.

3. 모형빙 강도 특성 결과분석

3.1 계절별 승온 과정에 따른 온도 변화 특성

KRISO 빙해수조는 우리나라의 계절적 특징을 고려하여 6월부터 9월까지의 시설 및 계측장비의 유지보수 기간으로 활용하고 있고 그 외의 기간 동안 모형빙을 생성해 모형시험을 수행하고 있

다. 특히 유지보수 기간 전, 후로 여름철 계절적 영향으로 인해 모형빙 생성 시 빙해수조 내부 온도와 승온 과정에서 온도의 상승 특성에 영향을 미치게 되는데, 11월에서 3월 사이 승온 시간에 따른 온도 변화는 시간당 평균 5°C 정도 상승하는 특징을 가지고 있고 4월, 5월, 10월 사이에는 평균 7°C 정도 상승하는 특징을 가지고 있다. 따라서, 승온 시간에 따른 온도 상승의 특성은 모형빙의 강도 특성에도 결정적인 영향을 미치게 되는데, 여름철 모형빙의 강도가 겨울철 보다 낮은 이유가 이러한 영향에 의한 것이다.

3.2 승온 과정에 따른 탄성계수 특성

재료의 탄성계수는 응력과 변형률의 관계를 정의하는데 활용되는데, 모형빙의 경우 탄성계수는 빙-선체 또는 빙-구조물 상호작용 과정에서 빙판의 쏘빙 또는 파쇄 현상을 이해하는데 필수적이다. 특히 이러한 상호작용 과정에서 얼음에 변형(deformation)이 발생하게 되는 경우 재료의 거동특성을 모사하는데 탄성계수가 중요한 역할을 하게 된다. 모형빙의 탄성계수를 측정하기 위해서는 판(plate) 또는 외팔보(cantilever beam)나 단순지지 보(simply supported beam)에서 하중-변위 관계를 이용하게 되는데, 이때 하중률(loading-rate)은 얼음의 크리프 변형(creep deformation)을 무시할 수 있을 정도로 충분히 높거나, 크리프 변형이 발생하지 않는 조건에서 계측을 해야 한다. 또한 고주파 펄스나 진동을 이용해 얼음의 탄성계수를 측정하는 방법도 이용되고 있으나, 모형시험에서는 주로 전자의 방법을 통해 탄성계수를 측정하고 있다.

국제수조협회(International Towing Tank Conference, ITTC)의 빙 분과(ice committee)에서는 Sohdi et al.(1982)와 Kato et al.(1999)가 제안한 판 이론을 적용하여 물과 같은 탄성지지기반 위에 놓인 무한대의 원형 판 이론에 근거한 탄성계수 측정 방법을 권고하고 있는데, 식 (3)과 같이 정의하였고 KRISO 빙해수조에서도 이 방법에 따라 탄성계수를 측정하고 있다(ITTC, 2014). 특히 탄성계수를 구하는 과정에서는 무차원 개념인 얼음의 특성 길이(characteristic length, l_c)가 사용되는데, 이는 탄성지지기반 위에 놓인 평판에 수직하중이 작용할 때 변형에 직접적인 영향을 주는 범위를 정의한 것으로 수직하중에 의해 빙판의 파쇄 시 빙판의 크기를 예측하는데 활용할 수 있다. 또한 ITTC 빙 분과에서는 모형시험 시 수조의 벽면 효과(wall effect)를 최소화시키기 위해 특성 길이의 약 3배 정도 거리를 둘 것을 권고하고 있다. 아래 Fig. 5는 KRISO 빙해수조에서 모형빙의 탄성계수 측정 모습을 보여주고 있으며, Fig. 6에는 승온 과정에 따른 탄성계수의 변화 특성이 도시되어 있다.

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

$$l_c^2 = \frac{\Delta F}{\Delta \delta} \frac{1}{8k} Z, \quad Z = 1 + \frac{\alpha^2}{2\pi} \left(\ln \frac{\gamma\alpha}{2} - \frac{5}{4} \right) \quad (3)$$

$$\alpha = \frac{\gamma}{l_c}$$

여기서 ν 는 포아송 비, k 는 수조수의 비중, l_c 는 얼음의 특성 길이, h 는 얼음의 두께를 나타내며, ΔF 는 하중 증가량, $\Delta\delta$ 는 변위 증가량, γ 은 Euler 상수를 나타내는데, α 가 0.2보다 작은 경우 Z 는 1.0로 가정한다.

Fig. 6에서 보면 승온 과정에 따라 모형빙의 탄성계수 또한 작아지는 것을 알 수 있는데, 초기 모형빙의 탄성계수는 평균적으로 208 MPa 정도이지만 24시간 이후에는 20 MPa 정도에 이르는 것을 알 수 있다. 특히 모형시험에서는 모형빙의 직접적인 탄성계수 값보다는 탄성계수와 굽힘강도의 비율이 실제 해빙과 유사한 조건인 2,000~8,000 사이가 될 것을 권고하고 있으나, 각각 빙해수조의 경우 이 범위는 대략 500~2,000 사이 정도를 유지하고 있다.



Fig. 5 In-situ elastic modulus measurement process in KRISO

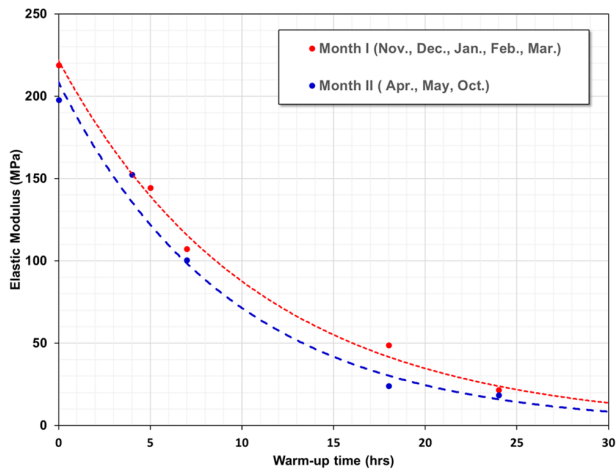


Fig. 6 Characteristics of elastic modulus of model ice during warm-up phase

3.3 승온 과정에 따른 굽힘강도 특성

빙해역에서 선박의 쇄빙과정을 살펴보면 초기에 빙판과 선수부의 접촉 시 침투과정에서 압축파괴가 발생하게 되고 점차 접촉 면적이 증가함에 따라 빙판의 파괴양식은 압축파괴에서 굽힘파괴로 변화하게 된다. 따라서 빙판에 작용하는 수직력 성분의 힘이 빙판의 굽힘강도 보다 큰 경우 빙판에 굽힘파괴가 발생

하게 된다(Jeong et al., 2017b). 따라서 모형시험에서는 상사 법칙을 통해 얼음의 굽힘강도를 실제 설계조건으로 모사하여 수행하게 된다. 현재 KRISO 빙해수조에서는 ITTC 빙 분과에서 권고하는 절차에 따라 외팔보 시험을 통해 모형빙의 굽힘강도를 측정하고 있는데, 모형빙판에서 외팔보를 만든 후 푸시포레이저를 통해 계측된 파괴 시 최대 하중과 외팔보 제원을 바탕으로 식 (4)를 통해 계산하게 된다(ITTC, 2014).

빙해수조에는 일반적으로 Fig. 7과 같이 모형빙판에서 외팔보를 만든 후 모형빙의 굽힘강도를 계측하고 있으며, 외팔보 끝단에 하중 재하 시 시편이 부력의 영향을 받지 않도록 하기 위해 하중의 재하속도는 대략 2~4 mm/s 정도를 사용하고 있다. 아울러, 최근에는 작업 발판에 탈부착이 가능한 굽힘강도 계측 장비를 개발 중에 있다.

$$\sigma_f = \frac{6PL}{wh^2} \tag{4}$$

여기서 P 는 외팔보의 파괴하중, L 은 외팔보의 길이, w 는 외팔보의 폭, h 는 외팔보의 두께를 나타내며, 외팔보의 두께×폭×길이 비율은 1×2×5를 사용한다.



Fig. 7 Flexural strength measurement process by cantilever beam test(Jeong, 2016)

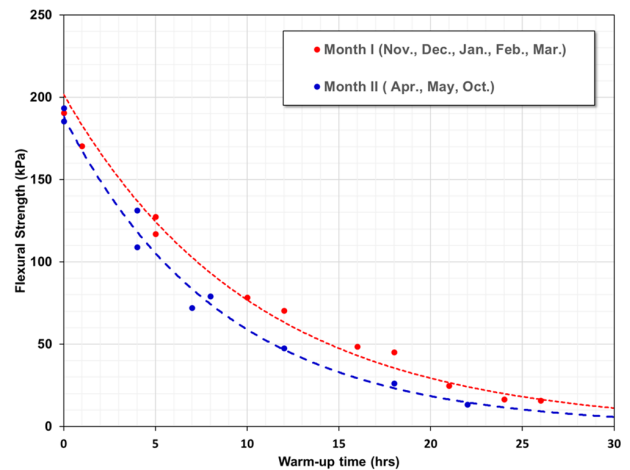


Fig. 8 Characteristics of flexural strength of model ice during warm-up phase

Fig. 8에는 승온 과정에 따른 굽힘강도 변화 특성이 도시되어 있는데, KRISO 빙해수조에서 사용 중인 모형빙의 경우 초기 강도는 190~200 kPa 정도이지만 승온 과정을 통해 강도를 낮추게 된다. 특히 동절기의 경우 대략 30 kPa 목표 강도까지 낮추기 위해 대략 21시간 정도가 소요되고 하절기의 경우 16시간 정도가 소요되는데 주된 요인은 계절적 특성 상 여름철 외기온도와 지열에 따라 하절기에는 목표강도까지 낮추는데 보다 짧은 시간이 소요됨을 알 수 있다.

3.4 승온 과정에 따른 압축강도 특성

일반적으로 선박의 초기 진입 시 선체에 작용하는 최대 하중은 얼음의 압축강도와 관련이 있는데, 충격 쇄빙(ramming) 또는 빙 선회(turning in ice) 시 큰 영향을 미치게 되므로 압축강도 특성 파악이 중요하다. 모형시험에서는 압축강도 측정을 위하여 만능재료시험기(Universal Testing Machine, UTM)를 이용해 일축 압축시험을 수행한다. 또한 압축시편 크기는 두께×폭×길이의 비율을 1×1×1 또는 1×2×4를 사용하는데, KRISO 빙해수조의 경우 후자의 크기를 이용해 압축시편을 제작하고 있으며, 압축강도 측정 시 하중 재하 방향은 시편을 수직으로 세워 힘을 가하고 식 (5)를 통해 모형빙의 압축강도를 측정하고 있다. 또한 얼음의 압축강도는 변형률에 의해 영향을 받게 되는데,

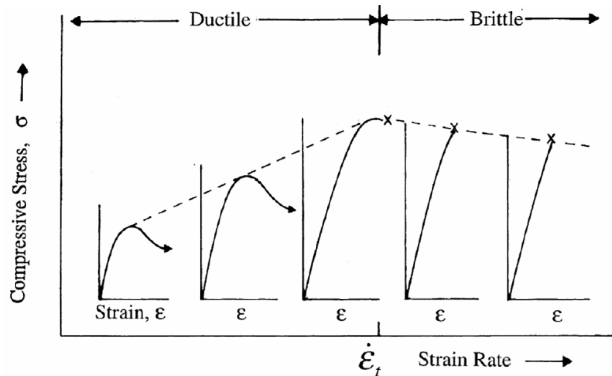


Fig. 9 Compressive stress-strain relations of ice for different strain rates(Schulson, 2001)

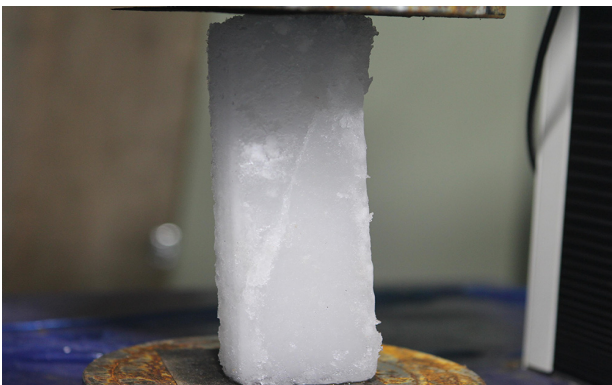


Fig. 10 Compressive strength measurement process in KRISO's cold room facility

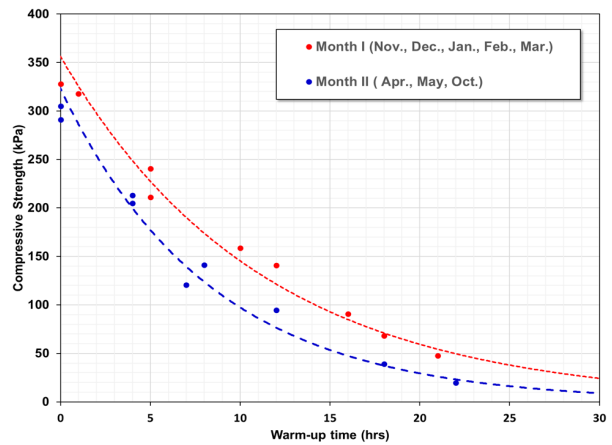


Fig. 11 Characteristics of compressive strength of model ice during warm-up phase

Fig. 9와 같이 변형률 속도가 빠른 경우 취성파괴가 나타나고 속도가 느린 경우에는 연성파괴의 특징을 나타내게 된다. 해빙의 경우 변형률 범위는 대략 10^{-3} 에서 10^{-5} 정도로서 KRISO 빙해수조에서는 계속 시 하중재하 속도는 4 mm/s 정도를 사용하고 있다.

$$\sigma_c = \frac{P}{A} \tag{5}$$

여기서 P 는 압축시편의 파괴하중, A 는 압축시편의 면적을 나타낸다.

3.5 모형빙의 주요 강도 특성 관계 분석

앞서 논의된 모형빙의 강도 특성 관련하여 모형시험 시 주요한 강도 특성은 다음과 같이 두 가지로 구분할 수 있다.

- (1) 탄성계수와 굽힘강도의 비율
- (2) 압축강도와 굽힘강도의 비율

모형시험 시 탄성계수와 굽힘강도의 비율(E/σ_f)은 해빙과 유사할 것을 권고하고 있는데, 핀란드 Aker Arctic의 경우 이 범위는 700~1,200 정도이고 독일 HSVA는 1,000~1,700 정도이며, 러시아 KSRC의 경우 1,000~2,000 정도인데, Aker Arctic 빙해수조가 다른 빙해수조 보다 약간 낮은 범위에 속함을 알 수 있다.

Fig. 12에서 보면 KRISO 빙해수조의 경우 E/σ_f 의 비율은 대략 725~1,168 정도로서 Aker Arctic 빙해수조와 유사한 특징을 가지고 있다. 특히 쇄빙과정 시 선박의 수선면 부근에서 반달 모양의 부서진 빙편인 ice cusp가 발생하는데, 쇄빙연구선 아라온을 대상으로 모형시험 시 빙판의 쇄빙패턴과 실제 빙해역 운항 시 쇄빙패턴을 비교해 보면 현재 KRISO 빙해수조에서 사용 중인 CD-PG/EG/AD 모형빙은 비교적 실제 해빙과 유사한 파괴양상을 나타냄을 확인할 수 있다(Fig. 14 참조).

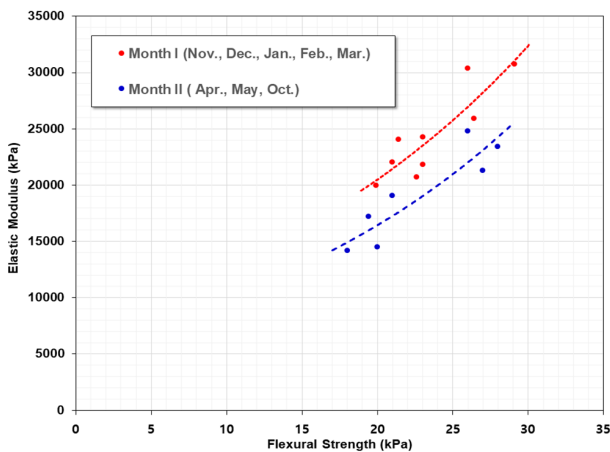


Fig. 12 Relationship between elastic modulus and flexural strength of model ice in KRISO

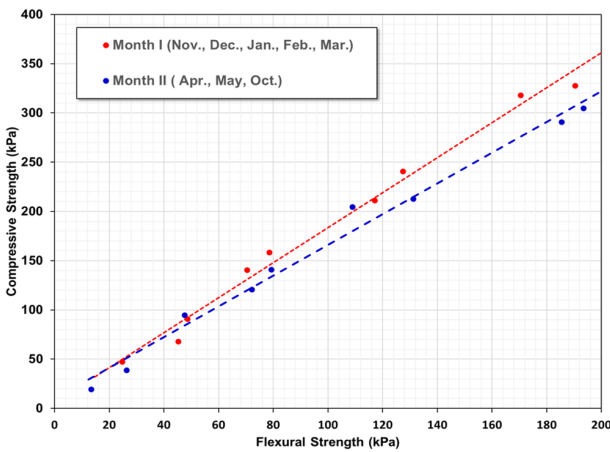


Fig. 13 Relationship between flexural strength and compressive strength of model ice in KRISO



Fig. 14 Comparison of icebreaking pattern between model-scale and full-scale for the Korean icebreaking research vessel Araon

모형시험에서는 굽힘강도가 압축강도보다 쇄빙성을 평가 하는데 주요 변수로 인식되고 있으므로 직접적으로 압축강도와 굽힘강도 비율(σ_c/σ_f)을 제시하고 있지 않지만, Aker Arctic 빙해수조 모형빙의 경우 등방성을 나타내어 비율은 1~1.5 정도이고 HSVA 빙해수조는 1.5~2.5 정도이며, 캐나다 NRC-OCRE 빙해수조는 2~3 정도로 가장 큰 편이다. Fig. 13에서 보면 KRISO 빙해수조는 이 비율이 1.5~2.0 정도라서 NRC-OCRE 빙해수조 보다는 약간 작고 Aker Arctic 빙해수조 보다는 약간 높은 것을 알 수 있는데, 이러한 차이는 모형빙에 사용되는 화합물과 모형빙 생성 방법의 차이로 판단된다.

4. 결론

본 연구에서는 현재 KRISO에서 사용 중인 CD-PG/EG/AD 모형빙에 대한 계절별 승온 과정에 따른 강도특성을 평가하였고 탄성계수와 굽힘강도의 비율(E/σ_f) 및 압축강도와 굽힘강도의 비율(σ_c/σ_f)을 분석하여 다음과 같은 연구결과를 도출하였다.

CD-PG/EG/AD 모형빙의 초기 굽힘강도는 190~200 kPa 정도로 일반적인 모형시험을 위한 30 kPa 정도까지 승온 시간은 평균 19시간 정도 소요되는 것을 알 수 있고 이는 계절에 따라 영향을 받게 되는데, 주로 동절기일 11월에서 3월 사이는 주로 21시간 정도가 소요되나, 빙해수조의 평균 유지보수 기간인 6월에서 9월을 제외한 계절에서는 이보다 짧은 시간인 16시간 정도가 소요되는 것을 알 수 있다. 따라서 계절적으로 영향을 고려하여 모형시험을 위한 준비시간 및 시험시작 시간 예측에 활용이 가능할 것으로 판단된다. 탄성계수와 굽힘강도, 압축강도의 경우 승온 과정에 따라 지수함수 형태로 감소하는 경향을 나타내지만 실제 목표조건에 도달한 이후 온도가 -2~-1 °C 정도 유지될 경우 대략 3시간 이내에는 큰 변화가 없음을 확인하였다. 따라서 모형시험 과정 동안 빙해수조 내부 온도는 비교적 -2~-1 °C 정도의 영하 조건을 유지하는 것이 좋으나, 대기온도가 그 이하보다 낮을 경우 모형빙 표면의 재 결빙으로 인해 강도 특성에 영향을 줄 수 있기 때문에 이점에 유의해야 한다. 또한 탄성계수와 굽힘강도의 비율(E/σ_f)과 압축강도와 굽힘강도의 비율(σ_c/σ_f)을 분석한 결과 모형시험에서 권고하는 비율에 근접한 경향을 나타내고 있는데, 이들 비율이 중요한 이유는 모형시험 시 빙판의 파쇄 현상이 실제 현상과 유사한 패턴을 보여 주기 때문이다. 언급한 바와 같이 E/σ_f 비율의 경우 국외 빙해수조에서도 이 범위를 직접적으로 제어하는 것은 쉽지 않은 상황인데, KRISO 빙해수조의 경우 모형빙 생성 시 밀도 제어를 위해 투입되는 미세공기방울(micro air bubble)을 제어함으로써 모형빙의 굽힘강도를 낮추는 방법이 대안으로 활용될 수 있다. 따라서 향후에는 이에 관한 연구가 중점적으로 수행되어야 할 것으로 보인다.

끝으로, σ_c/σ_f 비율은 선박의 빙 선회성을 평가 시 선수 또는 선측부에서 발생하는 분쇄 및 압축파괴, 굽힘파괴와 밀접한 연관성을 가질 것으로 판단되므로 이들의 상관관계 해석을 통해

현재까지 ITTC 빙 분과에서 논의된 바 없는 빙 선회성능 평가를 위한 보정법 개발 또는 새로운 지표를 제안함으로써 빙 모형시험 관련 기술을 선도하는데 기여할 수 있을 것으로 판단된다.

후 기

본 논문은 선박해양플랜트연구소 주요사업인 “선박의 유체성능 평가를 위한 특수시험 계측기반 구축(PES3220)”과 “극지 빙하 탐사와 원격 모니터링을 위한 수중로봇 ICT 원천기술 개발(PES3580)”에 의해 수행되었습니다.

References

International Towing Tank Committee (ITTC), 2017. *General guidance and introduction to ice model testing*, Technical Report No. 7.5-02-04-01.

International Towing Tank Committee (ITTC), 2014. *Testing and extrapolation methods ice testing resistance in level ice*, Technical Report No. 7.5-02-04-02.

Jeong, S.Y., Jang, J.H., Kang, K.J. & Kim, H.S., 2017a. Implementation of ship performance test in brash ice channel. *Ocean Engineering*, 140, pp.57-65.

Jeong, S.Y., Choi, K., Kang, K.J. & Ha, J.S., 2017b. Prediction of ship resistance in level ice based on empirical approach. *International Journal of Naval Architecture and Ocean Engineering*, 9(6), pp.613-623.

Jeong, S.Y., 2016. *Ice resistance prediction method based on icebreaking pattern and ice hull contact conditions*. Ph.D. Korea Maritime and Ocean University.

Kato, K., Nixon, W., Jones, S., Wilkman, G., Izumiyama, K. & Sazanov, K., 1999. The specialist committee in ice, final report and recommendations to the 22nd ittc. *Proceeding of the 22nd International Towing Tank Conference (ITTC)*, Seoul, Republic of Korea. pp.349-373.

Riska, K., Jalonen, R., Veitch, B., Nortala-Hoikkanen, A. & Wilkman, G., 1994. Assessment of ice model testing techniques, *In proceedings of Ships and Marine Structures in Cold Regions (ICETECH)*, Calgary, Canada, March 1994.

Schulson, M.E., 2001. Brittle failure of ice. *Journal of Engineering Fracture Mechanics*, 68, pp.1839-1887.

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

Su, B., Riska, K., & Moan, T., 2010. A numerical method for the prediction of ship performance in level ice. *Cold Regions Science and Technology*, 60(3), pp.177-188.

Tan, X., Su, B., Riska, K. & Moan, T., 2013. A six-degrees-of-freedom numerical model for level ice-ship interaction. *Cold Regions Science and Technology*, 92, pp.1-16.

Wang, J. & Lau, M., 2007. *A state-of-the-art review on ice modeling methodologies employed in refrigerated ice tanks*, URL: <https://doi.org/10.4224/8895364> [Accessed May 2007].

Zhou, Q., Peng, H. & Qui, W., 2016. Numerical investigations of ship-ice interaction and maneuvering performance in level ice. *Cold Regions Science and Technology*, 122, pp.36-49.

