빙해수조용 모형빙의 재료특성

김정현, 최경식(한국해양대학교 해양개발공학부)

1. 서 론

쇄빙선박의 빙저항이나 해양구조물에 작용하는 빙하중을 추정하는 수단으로 극지 현장에서 실규모의 시험을 수행하거나 그보다는 규모는 작지만 극지환경 재현 실험시설인 빙해수조에서 모형시험을 수행하는 방법이 있다. 빙해수조 모형시험은 모형의 계측 값으로부터 실제 구조물에 작용하는 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. 빙해수조를 이용한 모형시험에는 빙-선박, 빙-해양구조물의 축척비에 맞추어 실선과 닮은꼴의 모형을 만들고 빙해수조에서는 이들 모형을 이용해 저항 및 자항시험, 선회조종성능, 관입(Indentation)시험 등을 수행한다. 빙수조에서 재현 가능한 빙상조건은 평탄빙(Level ice), 빙맥(Ice ridge), 얼음조각층(Rubble fields), 유빙(Ice floe) 그리고 개수로 내의 깨진 빙편(Brash ice)이 집적된 빙해역 현상 등이다.

빙해수조에서 모형시험을 성공적으로 수행하기 위해서는 실제 극지 빙해역의 빙상조건과 역학적으로 상사인 상태를 재현해야 하는데 이때 제일 중요한 것이 상사법칙을 만족하는 모형빙(Model ice)의 선택이다. 즉 얼음의 특성 중 빙판의 두께, h, 굽힘강도, σ_f, 탄성계수, E 등의 특성치를 상사법칙에 맞추어 축소하는 것이 필요한데, 순수 얼음에 화합물을 첨가하여 모형빙을 만들게 된다.

실선과 모형선의 기하학적인 축척비를 λ라고 하면 실제 빙판의 탄성력과 모형빙의 탄성력의 비가 λ^3가 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_f는 실제와 모형시험에서 동일한 값을 유지해야 한다는 결론이다. 일반적으로 선수각이 작은 쇄빙선박이나 경사면을 가진 해양구조물에서는 E/σ_f 값을 실제 해빙의 값인 2,000~5,000에 가깝게 유지하는 것이 빙수조 시험용 모형빙을 선택하는 기준이다 (Jones 1993, ITTC 2002).

현재 2009년 준공 예정으로 쇄빙선박과 해양구조물의 빙해역 모형시험을 위한 국내 최초의 빙해수조가 한국해양연구원(KORDI) 해양시스템안전연구소(MOERI)에서 계획되고 있다. 빙해수조에 사용되는 모형빙의 종류와 제조기술의 확보가 향후 MOERI 빙수조의 활용에 절대적으로 중요하다고 판단되며 이러한 배경으로 모형빙의 재료특성에 관한 연구가 착수되었다. 현재 빙해수조에 사용되는 모형빙 제조기술은 핀란드, 캐나다 등 극지공학이 발달한 몇몇 선진국만이 가지고 있으며 향후 건설될 MOERI 빙수조의 효율적인 활용을 위해, 본고에서는 각국의 빙수조의 운영 현황을 파악하고 각

빙수조에서 사용되고 있는 모형빙의 재료특성과 제조기법에 대해 상세하게 조사 분석하였다. 이를 통하여 MOERI 빙수조에 사용될 모형빙의 선택과 제조기술에 관한 개선방안을 제시하고자 한다.

2. 빙해수조

빙해역에서의 여러 가지 빙상환경을 모의적으로 재현해서빙해용 선박의 쇄빙성능이나 해양구조물에 작용하는 빙하중 실험을 가능하게 하는 시설이 빙해수조(Ice towing tank or Ice model basin)이다. 빙해수조 시설은 1,2차 중동전쟁과 원유가 폭등에 맞물려 1970년대 및 80년대 중반에 걸쳐 극지에서의 자원개발과 수송수단의 확보라는 차원에서 선진국에 경쟁적으로 건설되었는데 1960년대 이전에 건설된 구소련의 AARI 수조에 이어 2세대인 빙수조(대표적으로 독일(HSVA 소형수조), 미국(CRREL, IIHR)과 일본(SRI, NKK)에 건설된 중소형 빙수조)가 있다. 당시의 관심사는 주로 빙해용 선박의 성능향상이었기에 모두 장수조 형태로 건설된 바 있다.

한편 1970년대 후반과 80년대에 걸쳐 캐나다 북극해의 개발과 러시아 사할린 자원개발로 극지용 해양구조물을 건조하게 되면서 1987년 핀란드의 HUT에서는 최초로 길이와 폭의 비가 비슷한 사각수조 형태의 빙수조를 건설한 바 있다. 1980년대 중반 이후에 건설된 3세대 빙수조(대표적으로 독일(HSVA 대형수조), 핀란드(MARC, HUT), 캐나다(IOT))는 모형빙 및 제빙법과 모형실험 기법에 있어서 보다 진보적이고 각기 독자적인 방법을 고안해 사용하고 있다. 2006년 핀란드의 MARC 빙해수조를 대체해 새로 AARC 빙해수조가 건설되었다.

빙해수조 시설의 일반적 형태를 살펴보면, 먼저 모형시험을 직접 수행하는 수조(Main tank)는 공기온도를 -30℃ 전후까지 냉각 가능한 건물 속에 설치되며 모형선을 준비하거나 빙판의 상태를 고르는 등 실험준비에 필요한 보조수조(Trimming tank), 부서진 빙편을 제거해 녹이는 수조(Melting tank)로 구성된다. 빙해수조의 측면과 밑면에는 여러 개의 관측창이 있으며 0.01~3 m/s 의 범위에서 속도를 제어할 수 있는 주 예인전차가 설치되며, 아울러 빙판을 시험조건에 맞게 준비하거나 굽힘시험 등 모형빙의 재료특성을 검사하고 시험 후의 부서진 빙편을 제거하기 위해 보조 예인전차가 설치된다. 경우에 따라서 수조의 바닥에도 모형선과 함께 움직이며 시험과정을 촬영하는 비디오카메라가 설치된 소형 예인전차도 있다.

쇄빙선박의 경우는 예인전차에 모형선을 부착하여 예인하지만 해양구조물인 경우는 바닥에 구조물을 고정하고 빙판 전체를 밀어서 빙하중을 계측하거나 쇄빙현상을 관측한다. 예인형 빙수조(장수조) 외에 선박의 선회시험이 가능한 사각형 빙수조(각수조), 하천 결빙시험용 회류수조나 항구·항만의 결빙현상을 재현 가능한 천수용 빙수조 등이 있다.

3. 모형빙의 재료특성

모형빙의 재료는 그 사용목적과 상사법칙을 만족하는 기준에 따라 구분할 수 있는데 일반적으로 빙저항/빙하중을 측정하는 모형시험에 사용되는 모형빙으로는 대개 깨지기 쉬운 빙판(Breakable sheet)과 빙편(Ice rubble)을 시뮬레이션 할 수 있다. 여기서는 합성 모형빙(Synthetic ice)이 아닌 화학첨가물을 사용한 모형빙(Doped ice)에 대해서만 언급한다.

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 하는 것이다. 따라서 σ_f를 모형빙 축척 수준까지 낮추기 위해 순수한 물을 얼리지 않고 특정 화학첨가물을 넣어서 결빙시키는데 그 첨가물로 염분이 들어간 염수빙(Saline doped ice), 요소(Carbamide or Urea)가 첨가된 요소빙(Urea doped ice), 그리고 다중 복합첨가물인 EG/AD/S가 있다.

3.1 염수빙

1950년 중반 소련의 극지연구소(AARI)에서는 10~20‰의 진한 식염수를 결빙시켜 모형실험에 적합한 낮은 강도의 얼음을 제조하는 방법을 고안했다. 이 방법에 의하면 결빙 시에 액체 상태의 진한 염수(Brine)가 얼음 속에서 염수맥을 형성하기 때문에 굽힘강도에 대해서는 상사법칙에 맞도록 낮은 강도의 얼음을 비교적 쉽게 제조할 수 있어서 당시의 빙수조에서는 이 방법이 주로 사용되었다. 그러나 굽힘강성이 상사법칙에서 기대되는 값보다 상당

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
1961	U.K.	British Hovercraft	Synthetic Ice	76×3.7×1.7
1969	Finland	Wartsila Shipyard (WARC)	Saline Ice	29×4.8×1.2
1972	Germany	HSVA - Hamburg	1% Urea Doped Ice	37×6×1.2
1974	U.S.A.	Arctec Inc.	Saline/Synthetic Ice	30×3.7×1.5
1977	Canada	Arctec Canada	Saline/Synthetic/Urea Ice	30×4.9×1.5
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
1980	Japan	Ship Research Institute (NMRI) - Tokyo	Saline/Urea-Doped Ice	35×6×1.8
1982	Japan	Nippon Kokan (NKK) -Tsu	Urea-Doped Ice	30×6×2
1982	U.S.A.	Iowa Institute of Hydraulic Research (IIHR) - Iowa	Urea-Doped Ice	20×5×1.2
1982	Norway	Norwegian Hydrodynamic Lab. (NHL)	Synthetic Ice	25×2.5×1
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	Japan	Mitsubishi Heavy Industries(MHI) - Nagasaki	0.7% Urea Doped Ice	20×9×2.3
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	40×40×2.8
1988	Finland	Technical Research Center of Finland (VTT) - Espoo	Saline Ice	15×3.2×1.5
2006	Finland	Aker Arctic Research Center (AARC) - Helsinki	FGX Saline Ice	75×8×2.1

히 작아서 E/σ_f 값이 200~500 으로 실제 해빙의 값 2,000~5,000 에 비해 매우 낮고, 염분농도를 높게 하면 굽힘강도를 감소시키는 것이 가능하지만 파괴 이후의 하중-변위 곡선은 실제 해빙과는 달리 되돌아가지 않고 잔류소성이라 불리는 부분이 남는다.

1970년대부터는 모형빙의 탄성계수값 E를 낮추어 실제 해빙의 E/σ_f에 가깝게 만드는 방법이 연구되었다. 독일의 HSVA에서는 저농도 식염수를 사용하는 방법을 개발했는데 0.67%의 저농도 식염수를 사용해서 약간 단단한 얼음을 만들어 필요한 얼음 두께를 유지한 뒤 실온을 결빙온도보다 약간 높게 올리는 방법(Warm-up method)으로 모형빙을 제작하였다. 얼음의 강도는 제빙 완료 시점에는 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 소성이 발생하는 영역에 대한 특별한 보정이 필요하게 되며 또한 부식성이 강해 이것을 견딜 수 있는 빙해수조 구조나 특수장치가 필요하다.

첨가물이 들어있는 대부분의 Doped ice는 잔류소성과 해빙의 밀도범위인 0.84~0.94에 비해 고밀도인 0.93~0.98의 값을 가진다 (Evers and Jochmann 1993). 1990년대 HSVA에서는 일반적인 염수빙이 가지고 있는 결점들을 극복하기 위해 0.7% 염화나트륨에, 모형빙의 입자 크기와 구조적인 측면에서 향상된 값을 갖는 Air bubble 과 Ice scraper를 이용하여 결빙시키고 있다. 또한 미국의 ARCTEC사에서는 수조의 공기를 -60℃ 까지 낮추고 수조안에 있는 염수에 질소 수용액을 표면에 분사시켜 10mm/hr의 결빙률로 모형빙을 성장시키는데, 이런 빠른 결빙률은 얼음 안에 염수가 갇히게 하며 얼음의 강도 또한 저하시킨다.

3.2 Carbamide 모형빙

1970년대 후반부터 1980년 전반에 걸쳐서 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 동일한 성장과정 때문에 구조적으로 염수빙(Saline ice)과 매우 비슷하며 무독성이어서 여러 빙수조에 많이 사용되었다.

Carbamide 모형빙과 6%의 염수빙에 대해 탄성계수와 굽힘강도 사이의 관계를 살펴보면 Carbamide 모형빙에서는 승온효과에 따라 굽힘강도가 70kPa (λ = 10.7)에서 15kPa (λ = 50)로 감소하고 있지만 이 동안 E/σ_f는 2,000~3,000으로 실제 해빙에 가까운 값이 유지되고 있다. 한편, 염수빙의 경우에는 σ_f를 20kPa (λ = 37.5) 이하로 내리면 E/σ_f가 1,000 이하가 되어 해빙에 비해 현저히 작은 값을 갖는다.

Carbamide 모형빙의 비중은 0.95으로 염수빙의 비중 0.89에 비해 높은 값을 갖고, 축척비가 λ>30 인 경우 두 모형빙의 압축강도 값은 예정된 값보다 2~3배 가량 작은 값을 갖는다 (Hirayama, 1983). Carbamide 모형빙은 염수빙에 비해 저강도에서 높은 E/σ_f가 유지되지만 모형시험에 대한 상사성에 대해 살펴보면 σ_f가 크면 (즉, λ가 작다면), 파괴 후의 잔류응력이 남지 않고 실제 얼음과 비슷한 하중분포가 얻어지지만 σ_f가 작아지면 잔류응력이 크게 생긴다. 모형시험에 대응하는 축적비가 λ = 20~40 (12.5~25kPa)을 주로 사용하는 경향이므로 파괴에 필요한 에너지도 상대적으로 증가할 것으로 예상되며 파괴 직후의 잔류응력과 압축강도 그리고 밀도에 관해서도 개선될 필요가 있다.

3.3 복합 첨가물을 사용한 모형빙

Timco(1986)는 Carbamide 모형빙의 결점을 보충하고 상사법칙을 만족시키는 모형빙으로 EG/AD/S 모형빙을 개발하였다. 이것은 에틸렌글리콜(EG) 4.6

‰, 지방산(AD) 0.32‰, 설탕(S) 0.49‰ 용액을 섞은 물질을 결빙시키고 승온작업을 하여 얻는다.

EG/AD/S 모형빙의 E/σ_f는 거의 1,500~2,500 이고 σ_f가 20kPa로 작은 경우에서도 2,000 정도의 값을 유지하고 있으나, 요소빙의 E/σ_f는 1,000~2,000 정도이지만 σ_f가 50kPa 이상이 되면 E/σ_f가 1,000 이하로 떨어지는 경향이 있다. 두 경우 모두 승온을 시작할 때 약 160kPa 이었던 굽힘강도를 20kPa까지 내리는데 약 14시간이 필요하였다. Fig. 1에 굽힘강도 계측에서 얻은 하중-시간이력을 도식적으로 나타내었다. 굽힘강도는 40kPa 인데 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 같이 취성적 상태를 가지고 있는 것을 나타내는 것이다 (Schwarz 1975).

EG/AD/S 모형빙은 다른 화학물질이 첨가된 얼음과 비교해 결이 고운, 단층(single layered) 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 의한 영향이 매우 커 밀어내려 파괴하는 것이 더 힘들게 된다. 하지만 단층형 구조인 EG/AD/S 모형빙은 요소빙에 비해 방향성의 영향을 덜 받게 된다.

EG/AD/S 모형빙의 장점은,

1) 에틸렌글리콜(EG)이 요소에 비해 훨씬 비싸지만 요소빙은 1년 정도 지나면 재료특성이 바뀌는 반면 EG/AD/S 모형빙은 캐나다 IOT에서 오랫동안 사용했어도 재료특성이 바뀌지 않았다.
2) 단층형 구조로 요소빙에 비해 하중방향의 영향을 덜 받는다.
3) E/σ_f는 모든 σ_f 범위 내에서 1,500~2,500 정도이고, σ_f가 20kPa로 작은 경우에도 2,000 정도의 값을 유지한다.

반면 EG/AD/S 모형빙의 단점은,

1) 해빙에 비해 높은 값을 가지는 밀도와 마찰계수는 개선될 필요가 있다.
2) CRREL의 소형 수조에서 한때 EG/AD/S 모형빙을 사용했었는데, 요소빙에 비해 초기 변형이 발생했고 설탕으로 인한 박테리아 번식 때문에 여과장치가 필요하였다는 문제가 발생되었다.

이후에, Spencer and Timco(1990)는 다양한 EG/AD/S 모형빙에 대해 연구를 하였는데, 해빙과 같이 공기방울을 모형빙 속에 간히게 해서 모형빙의 밀도를 감소시킬 수 있었다. EG/AD/S-CD (Controlling Density)라 불리는 모형빙은 일반적인 EG/AD/S 모형빙에 비해 E/σ_f 값이 더 높고, 마찰계수 값은 작고 투명도도 많이 개선되었다. 현재 캐나다의 IOT 빙수조에는 EG/AD/S와 EG/AD/S-CD 모형빙을 사용하고 있으며 최근 대부분의 빙수조에서는 일반 염수빙에 비해 부식성이 감소되고 좀 더 나은 확장성을 가지는 요소빙이나 EG/AD/S 모형빙을 사용하고 있다.

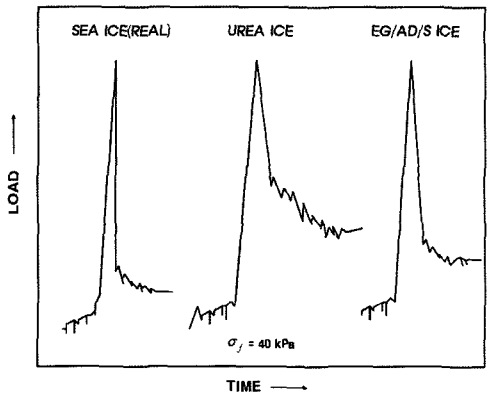

Fig. 1 Load-time histories for actual sea ice, urea ice and EG/AD/S model ice

Carbamide 빙과 EG/AD/S 모형빙 이후 모형빙의 강도특성을 향상시키기 위해 개발된 것이 핀란드 MARC에서 사용되고 있는 Fine-grained ice (FGX)이다. FGX는 균일한 층과 강도 값을 가질 수 있게 결빙온도에 가까운 온도의 물에 계속적으로 고운 얼음의 결정입자를 분무시키며 얼음을 성장시키는 방법이다. 최근에는 저농도 염수나 요소를 포함한 물에 고운 결정입자를 분무하는데 이와 같은 화학제품은 강도를 낮추는 역할을 한다(Wilkman et al. 1997). Table 2에는 앞의 분석결과를 바탕으로 모형빙의 재료에 따른 얼음의 강도특성을 정리한 것이다.

4. 빙해수조 시험용 모형빙의 선택

2009년 준공 예정인 한국해양연구원 해양안전시스템연구소 MOERI 빙해수조는 모형시험이 수행되는 주 시험동과 Cold Room 및 계측장비가 구비된 보조 시험동으로 구성되어 있으며 주 시험동의 크기는 57m×37m×14.2m 이고 시험 가용구역인 수조의 크기는 32m×32m×2.5m의 사각형으로 X-Y 방향으로 0.001~3.0m/s 속도로 이동이 가능한 50톤급의 예인전차와 모형시험 준비를 위한 보조 예인전차가 설치될 예정이다.

MOERI 빙해수조에 사용될 모형빙의 재료는 국외의 모든 빙해수조에서 건설과 함께 수행해 왔듯이 다양한 성분의 첨가물에 대하여 체계적인 재료시험이 필요한데 현재까지 발표된 여러 연구결과에 따르면 캐나다의 EG/AD/S 모형빙이 다른 재질에 비해 탄성계수/굽힘강도 비율 및 빙판 파괴 이후의 잔류소성 특성에 있어서 가장 효과적인 모형빙 특성을 보이고 있기 때문에 EG/AD/S 모형빙을 1차적인 선택으로 고려해 볼만 하다.

하지만 EG/AD/S 모형빙의 경우 낮은 분자량 첨가물인 EG(에틸렌글리콜)은 표면활성제 역할을 하는 AD(지방산)와 함께 얼음 속에 갇혀 모형빙의 강도를 저하시켜 물리적인 상사성은 만족시켜주지만 빙판의 얼음결정들이 수평방향으로 성장시키는 것을 억제하여 비교적 고른 결정구조를 갖게 하는 S(설탕)의 존재로 박테리아를 번식시켜 충분히 효율적인 여과시설이 없다면 빙수조의 유지 보수에 많은 어려움이 있으리라 예상된다.

균일한 층과 결정구조를 형성하기 위해 결빙온도에 가까운 온도의 물에 계속적으로 고운 얼음 입자를 분사시키며 얼음을 성장시키는 방법(Wet-seeding)

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

Material	Flexural Strength (kPa)	Elastic Modulus/ Flex.Strn.	Compre-ssive Strength (kPa)	Specific Gravity	Static coeff. of Friction
Sea ice	700 ~800	2500 ~4500	8k~12k(v)	0.91	0.45~0.5
Freshw-ater ice	500 ~1500	1500 ~1600	10k(v) 1.5~3k(v)	0.92	0.5~0.7
Saline-doped	20 ~80	1000 ~1700	100~275(v) 75~180(h)	0.89	0.45
Urea-doped	20 ~120	1000 ~2500	120~250(v) 75~160(h)	0.93 ~0.94	0.35
WARC-FG	20 ~75	1000 ~2000	50~400(v)	0.89	0.45
FGX	15 ~90	700 ~8000	15~180	0.88 ~0.91	NR
Urea-(fine-grain)	15 ~45	200 ~310	10~45	0.92	NR
EG/AD/S	20 ~100	1500 ~2500	150~370(v) 80~280(h)	0.93	NR
CD ice	NR	2200 ~3400	NR	0.83 ~0.93	NR
GE ice	15 ~90	1000 ~2000	15~55	NR	NR

을 이용하면 굳이 설탕성분을 넣지 않아도 적절한 모형빙을 제작할 수도 있다고 보이는데 이러한 예가 동일한 사각수조 형태인 HUT 빙수조에서 사용하는 0.5%의 에탄올이 첨가된 모형빙이다. 하지만 에탄올 모형빙은 고가의 재료이기 때문에 초기 시설비가 많이 들고 휘발성 냄새로 인해 모형시험 시 많은 불편함이 있다는 것을 생각하면 에탄올 모형빙의 선택은 쉽지 않은 결정이 될 것이다.

따라서 지금까지의 여러 문헌조사를 통해 결론지을 수 있는 것은 20여 년간의 많은 자료가 축적되어 있고 캐나다로부터 기술 전수가 충분히 가능하다는 장점을 생각해서 EG/AD/S-CD 모형빙 체계로 나가되 설탕(S)의 첨가는 가능한 억제하는 방법을 택하는 것이다.

참고문헌

1. Enkvist, E. (1984). "Experience with a New Type of Model Ice", Ice Tech '84 - International Conference on Ships and Marine Systems in Cold Regions, SNAME Arctic Section, Calgary, Canada, ppJ1-J15.
2. Evers, K. and Jochmann, P. (1993). "An Advanced Technique to Improve the Mechanical Properties of Model Ice Developed at the HSVA Ice Tank", Proceedings of POAC Symposium, Hamburg, Germany, Vol.2, pp.877-888.
3. Hirayama, K. (1983). "Experience with Urea Doped Ice in the CRREL Test Basin", Proceedings of POAC Symposium, Helsinki, Finland, pp.788-801.
4. ITTC, (2002). Testing and Extrapolation Methods - Ice Testing General Guidelines, ITTC Recommended Procedures, Ice Specialist Committee of 23rd ITTC.
5. Jones, S.J. (1993). Ice Tank Test Procedures at the Institute for Marine Dynamics, Institute for Marine Dynamics, NRC Report LM-AVR-20.
6. Schwarz, J. (1975). "On the Flexural Strength and Elastic of Saline Ice", Proceedings of 3rd IAHR Symposium, Hanover, N.H., USA, pp.373-386.
7. Schwarz, J. et al. (1981). "Standardized Testing Methods for Measuring Mechanical Properties of Ice", Cold Regions Science and Technology, Vol.4, pp.245-253.
8. Spencer, D.S. and Timco, G.W. (1990), "CD Model Ice: A Process to Produce Correct Density(CD) Model Ice", Proceedings of 10th IAHR Symposium on Ice, Vol.2, pp.744-755.
9. Timco, G.W. (1979). "The Mechanical and Morphological Properties of Doped Ice: A Search for a Better Structurally Simulated Ice for Model Test Basins", Proceedings of POAC Symposium, Trondheim, Norway, pp.719-739.
10. 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.
11. 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.
12. Wilkman, G., Mattsson, T., Ponomarev, A.V. and Beliashov, V.A. (1997). "Experience of a New Model Ice (MARC FG) Material at the Krylov Shipbuilding Research Institute (KSRI) Ice Basin", Proceedings of OMAE Symposium, Vol.4, pp.289-295.
13. Zufelt, J.E. and Ettema, R. (1996). Model Ice Properties, Cold Regions Research and Engineering Laboratory, Hanover, N.H. USA, Report 96-1.

최 경 식 | 한국해양대학교 해양개발공학부 교수

· 1957년생
· 1989년 M.I.T 공학박사
· 관심분야: 극지공학: 쇄빙선박과 극지용 해양구조물
· E-mail: kchoi@hhu.ac.kr

김 정 현 | 한국해양대학교 해양개발공학과 박사과정

· 1982년생
· 2007년 한국해양대학교 공학석사
· 관심분야: 극지공학: 빙역학 실험과 빙해 수조 시험법
· E-mail: sy8296@hhu.ac.kr