



# 일반수조에서 합성빙을 이용한 쇄빙선의 저항 및 자항시험

조준철, 이승호, 김문찬, 전호환 (부산대학교 조선해양공학과)

## 1. 서론

이미 알려진 바와 같이 쇄빙선 및 쇄빙상선에 대한 연구는 북극해 항로가 개발됨에 따라 점점 그 관심이 높아지고 있고, 이에 따른 연구도 점점 활발히 이루어지고 있다 (김현수 외 2003, 김현수 외 2006, 왕정용 외 2007). 이러한 상황에서 조선 1위 국인 한국에는 아직 빙해수조가 없는 실정이고 최근 MOERI에 건조하기로 결정된 것은 늦게나마 다행으로 생각된다. 일본의 경우 오래 전부터 4개의 빙해수조를 보유하고 있었으나 최근 경영난의 이유로 일부 수조가 문을 닫는 등 연구를 위해 매우 필요한 시설이나 그 운영이 쉽지 않음을 알 수 있으며 특히 대학과 같은 곳에서는 현실적으로 시설을 운영하기 어려워 빙역학 관련 연구가 거의 없는 실정이다. 부산대학교(PNU)에서는 이러한 상황에서 대학이 보유한 일반수조에서 손쉽게 수행할 수 있는 합성빙(Synthetic ice)을 이용한 빙저항 및 자항 시험에 대한 연구를 수행하였으며 (Song et al. 2006, 임태욱, 2008) 이러한 연구들을 종합하여 빙해수조에서 냉동 모형빙(model ice)을 사용한 결과와의 비교를 통해 그 가능성을 살펴보고자 한다.

빙해역에서 선박의 성능에 영향을 주는 얼음의 주요 특성으로는 밀도(비중), 마찰계수 및 굽힘응력이 있으며 왁스 등으로 만든 합성빙이 냉동 모형빙 특성과 가장 맞추기 어려운 것이 굽힘응력 및 마찰

계수이다. 특히 굽힘응력의 경우는 평탄빙 실험 시 꼭 맞추어야 하는 요소이므로 이를 무시하고 실험할 수 없어 본 연구에서는 pack ice(해면이 깨어진 빙편으로 덮인 상태)에서의 연구로 제한하였다. 쇄빙상선이나 내빙상선의 경우 실제로 완전한 빙편을 쇄빙하는 경우보다 pack ice 상태에서 운항하는 경우가 많으므로 pack ice 상태에서의 저항, 자항 시험에 의한 연구 혹은 선형개발이 의미가 있을 것으로 생각된다.

합성빙을 이용한 일반수조에서의 실험은 여러 가지 면에서 장점이 있어 여러 기관에서 시도되어 왔으나 그 결과에 대해서는 많은 발표가 없는 현실이다. 캐나다의 Memorial 대학에서는 IOT 일반수조를 이용하여 박사학위 논문(Aboulazm, 1989)으로 왁스 재질의 합성빙을 이용한 연구의 예가 있으며 최근 중국의 대련대학에서는 해양구조물에 대하여 합성 평탄빙(콩과 시멘트 등을 조합하여 제조)을 이용하여 실험을 수행한 바 있으나(Li, 2002), 아직 실험 결

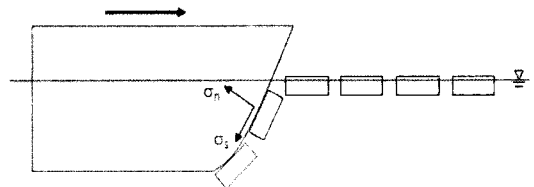


Fig. 1 선체에 작용하는 빙편의 수직응력과 전단응력



과가 냉동 모형빙의 것과 차이가 많이 나고 있다. 국내에서는 MOERI에서 모형빙을 제조하려는 시도가 있었고 실제 얼음을 수조에 넣고 얼음이 녹기 전에 시험을 수행하는 등 시도가 있었으나 모두 좋은 결과를 얻지 못했다. 부산대학교에서는 빙해수조에서의 모형시험 비교자료가 많이 있는 캐나다의 쇄빙선 Terry Fox에 대하여 빙해수조 결과와 비교연구를 수행하였으며 일련의 연구결과를 토대로 합성빙을 이용한 성능 추정의 가능성을 살펴보고자 한다.

## 2. 모형빙에 관한 고찰

Table 1은 여러 가지 모형빙 종류를 보여주고 있다. 냉동 모형빙의 경우 실선 스케일이 아니기 때문에 굽힘강도 등이 빙해역에서의 실제 얼음보다 작아야 되는데 이러한 특성을 맞추기 위하여 모형

빙에 암모니아 혹은 설탕 등을 첨가하게 된다. 합성 빙에도 Table 1에 보인 바와 같이 MOD ice (Schultz and Free 1984), Syg ice (Beltaos et al. 1988) 등 여러 종류가 있다. 각기 빙해수조에서는 자신들만의 독자적인 know-how를 가지고 모형빙을 제작하고 있으며 본 연구에서 비교한 모형빙 형식은 EG/AD/S 이며 합성빙은 BHC Wax 타입이다. 표에서 알 수 있듯이 응력, 마찰계수 및 비중 등이 다 달라 엄밀한 비교를 할 수 없을 것으로 생각되나 비중의 경우는 비교적 쉽게 맞출 수 있으며 응력과 마찰계수를 맞추는 것은 현재로는 거의 불가능한 상황이다. 앞에서 언급한 바와 같이 응력을 비슷하게 맞추지 못하고 평탄빙에서의 실험을 수행하는 것은 큰 의미가 없을 것으로 생각되나 pack ice 상태에서의 저항시험의 경우 굽힘응력은 큰 영향을 주지 않을 것

Table 1 여러 가지 모형빙들의 특성치

Full scale flexural strength = 750 kPa Full scale ice thickness = 1.2m Geometric scale factor = 30												
ICE TYPE	Gran Structure	$\sigma_F$ (kPa)	H	$\sigma_c(h)$ (kPa)	$\sigma_c(v)$ (kPa)	$\sigma_c$ ?	$\sigma_s$ (kPa)	E (MPa)	$K_{1G}$ (kPa-m <sup>1/2</sup> )	$\mu^{(ice-ice)}$ *	$\rho_i$ (g/cc)	References
SEA ICE	cool	25	1	85	250	yes	25	125	0.7	-	0.90	*
<b>Refrigerated Ice</b>												
high saline ice	cool	25	?	?	?	?	?	4	?	good	?	Ersvist 1972
low saline ice	cool	25	0.5	80	140	?	50	25	?	good	0.93	Schwarz, 1977
urea (cabamide)	cool	25	0.4	80	140	?	50	65	6.0	good	0.93	Timco, 1980
fg Ice	gran	25	?	32	32 <sup>a</sup>	no	20	38	?	good	?	Enkvist, 1983
EG/AD/S ice	cool	25	0.7	80	140	yes	25	60	2.5	good	0.93	Timco, 1986
NKK ice	gran	25	?	25	25 <sup>a</sup>	yes	?	6	?	good	0.92	Narita et al, 1988
<b>Synthetic Ice</b>												
BHC wax	?	48	?	150	150 <sup>a</sup>	?	?	130	?	high	0.85	Crago et al. 1970
MOD ice	gran	25	~1 <sup>a</sup>	40	40 <sup>a</sup>	?	?	38	?	high	0.90	Schultz and Free, 1984
Tryde ice	?	70	~1 <sup>a</sup>	280	280 <sup>a</sup>	?	?	100	?	high	0.90~0.95	Tryde, 1977
Syg ice	gran	25	~1 <sup>a</sup>	62	62 <sup>a</sup>	?	6.8	30-90	2.2	high	0.90	Wong et al, 1988
<b>Hybrid Ice</b>												
Russian beads	gran	200	?	?	?	?	?	?	?	?	0.89	Belyakov, 1984
BEADS ice	gran	25	?	?	?	?	?	?	?	?	0.895	Fleet Tech

\* best estimate by the present authors

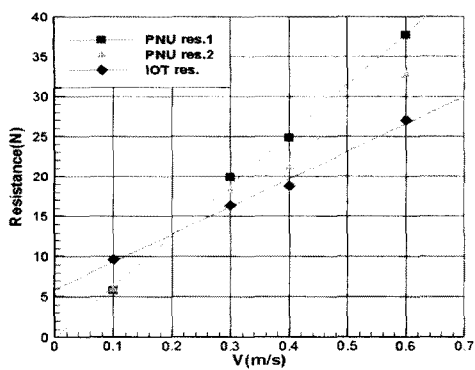


Fig. 2 밀도 차이에 의한 저항시험 비교, 90% 밀집도 (IOT: 냉동 모형빙, 870kg/m<sup>3</sup>, PNU 1: 합성빙, 820kg/m<sup>3</sup>, PNU 2: 합성빙, 900kg/m<sup>3</sup>)

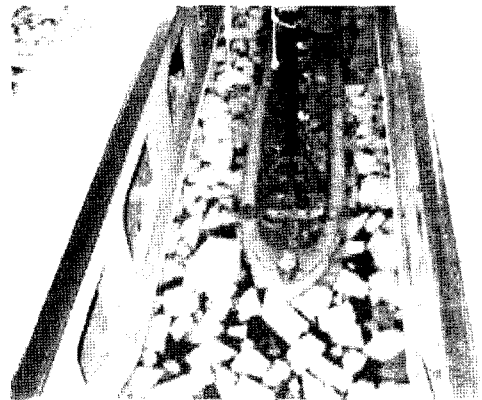


Fig. 3 Pack ice 상태에서의 IOT 방해수조에서의 실험 모습

으로 생각되며 이는 빙해수조에서의 저항시험의 경우 속도가 극히 작아 서 얼음의 변형이나 파괴가 전혀 일어나지 않음을 실험을 통해서 나중에 확인할 수 있었다. 저항시험의 경우는 프로펠러와의 상호 작용에 의해 영향이 있을 것으로 생각되었으며 이 부분에 대해서는 3절에서 더 자세히 논의하도록 한다. 냉동 모형빙과 합성빙의 특성에서 맞추기 힘든 또 하나의 중요한 인자가 마찰계수이다. 통상 왁스 타입의 합성빙의 마찰계수는 냉동 모형빙보다 2~3 배 높은 값을 보인다. 마찰계수 차이는 비중과 더불어 빙저항에 큰 영향을 주리라 생각된다. 빙저항은 통상 쇠빙저항, 부력(buoyancy) 저항, 배제(clearing) 저항으로 나눌 수 있는데 pack ice 상태에서는 쇠빙저항이 없으므로 나머지 두 요소들에 의한 빙저항을 생각할 수 있다. 이들을 역학적인 측면에서 다시 Fig. 1에서와 같이 수직응력과 전단응력으로 나누어 생각할 수도 있으며 마찰계수 차이는 주로 전단응력에 영향을 주는 인자라 할 수 있다. 마찰계수의 차이에 의해 전단응력의 차이가 많이 나타날 수 있으나 빙편과 선체 사이의 물(혹은 해수)에 의해 실제로는 마찰력이 저하되리라 생각되며 이러한 사실은 합성빙과 냉동 모형빙에 의한 저항시험 결과가 정량적으로나 정성적으로 큰 차이

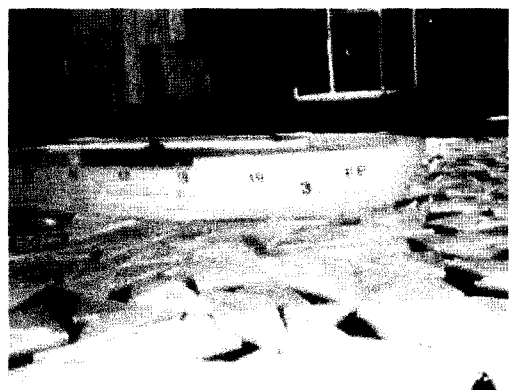


Fig. 4 PNU 일반수조에서 합성빙으로 실험하는 모습을 보이지 않음을 알 수 있다.

### 3. 실험에 의한 비교 고찰

#### 3.1. 밀도 차에 의한 저항시험

먼저 가장 변화시키기 쉬운 밀도 차이에 의한 영향을 냉동 모형빙의 결과와 비교하여 살펴보았다. 820kg/m<sup>3</sup> 밀도의 합성빙을 이용한 저항시험과 냉동 모형빙 (밀도 870kg/m<sup>3</sup>)을 이용한 모형시험 시 설계속도에서 대략 20%의 저항 차이를 볼 수 있었으며 속도에 따라 저항증가율이 냉동빙보다 커지는 경향이 있었다. 밀도 차이에 따른 뚜렷한 저항의 변

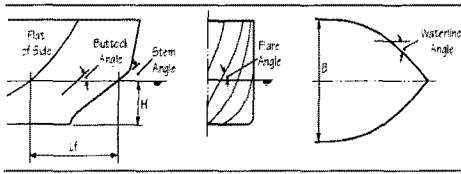


Fig. 5 선형 용어 정의

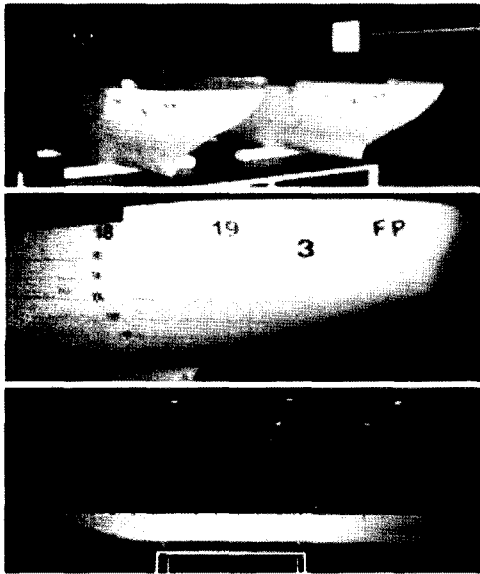


Fig. 6 선수각을 변화시켜 설계한 모형들

화를 확인하기 위하여  $80\text{kg/m}^3$  정도 밀도를 높여  $900\text{kg/m}^3$ 의 밀도를 가진 합성빙으로 실험하였다. Fig. 2에 보인 바와 같이 냉동 모형빙의 결과와 더 유사한 결과를 얻었으며 밀집도(ice concentration)에 따라 차이가 있으나 설계속도에서 대략 10% 정도 차이를 보였다. 앞서 언급한 바와 같이 마찰계수의 차이가 큼에도 불구하고 정량적으로나 정성적으로 비교연구 등에 충분히 활용할 수 있는 결과를 보였다고 생각된다.

Fig. 3과 4는 빙해수조와 일반수조에서 냉동 모형빙과 합성빙으로 실험하는 모습이다. 이와 같은 결과를 토대로 부산대학교에서는 합성빙을 이용하여 최적 선형 도출의 가능성을 살펴보기 위해 선수

각(stem angle) 및 수선면각(waterline angle) 변화에 의해 저항성능을 합성빙을 통해서 예측하고 빙해수조에서 이를 확인할 예정이다. 임태욱 등(2008)에 의해 합성빙을 이용한 실험결과는 이미 발표된 바 있으며 차후 빙해수조에서의 비교실험이 예정되어 있다.

실제로 일반 예인수조에서 빙저항 시험을 수행할 경우 주의해야 할 점이 있는데 이는 일반수조에서 실험하는 경우 수조 전체를 다 사용할 수 없고 일부 영역에만 합성빙을 넣고 실험을 하게 되는데 이 경우 냉동 모형빙과는 달리 합성빙은 마찰계수가 크기 때문에 처음 밀집도(concentration ratio)에 비해 배에 의해 빙편이 몰려 냉동 모형빙의 경우보다 밀집도가 더 커지는 경향이 있으며 뒤쪽에 합성빙이 빠져나가지 못하도록 막아놓는 경우 이와 같은 경향이 심해지므로 주의해야 한다.

### 3.2. 저항시험

저항시험의 경우도 평탄빙의 실험과 마찬가지로 빙강도가 중요한 요인이 될 것으로 생각된다. 프로펠러의 흡입력에 의해 프로펠러로 유입되어 프로펠러와 충돌하거나 큰 움직임으로 부서지는 경우뿐만 아니라 선체와 부딪치는 경우도 많은데 이는 IOT 빙해수조에서의 저항시험 중 수중 비디오카메라에 의해 확인한 바 있다 (Fig. 7~8). 합성빙을 이용한 일반수조에서의 실험에서는 이와 같은 현상이 발견되지 않았으며 프로펠러에 의해 유입되는 빙편의 양도 현저히 줄어들었다. 마찰력 차이에 의한 영향도 있었으나 강도 차이가 크게 작용한 것으로 생각되었으며 현재와 같이 강도 차이가 크게 나타나는 경우(대략 3배 이상)는 저항시험에 의한 상호연관성 연구가 거의 불가능하다고 할 수 있겠다. 부산대학교에서 수행한 연구의 경우에도 예인력에 있어서 저항 차이에 의한 성분까지 더해져 빙해수조 결과와 큰 차이를 보이고 있어(Fig. 9) 모형빙의 굽힘 강도를 맞추지 못할 경우 빙해수조와의 저항시험

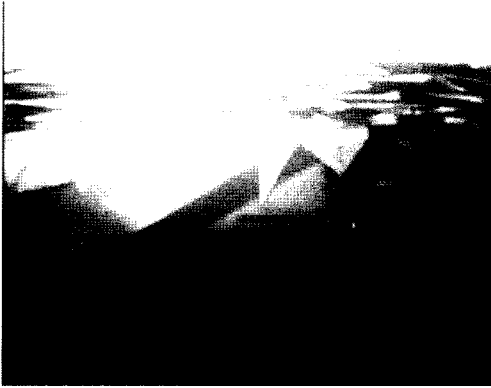


Fig. 7 합성빙을 이용한 저항시험 수행 모습 (PNU 수조)



Fig. 8 냉동 모형빙을 이용한 저항시험 수행 모습 (IOT 수조)

연관성은 찾기 어려울 것으로 보인다.

#### 4. 결론

일반수조에서 합성빙을 이용하여 쇄빙선이나 쇄빙상선에 대한 저항, 저항시험 연구를 수행할 수 있는 경우 여러 가지 장점이 있는 것은 주지의 사실이다. 통상 쇄빙저항이 전체 저항의 50% 이상이므로 쇄빙성능을 예측할 수 없는 합성빙에 대한 관심이 없었으나 최근 쇄빙상선 뿐 아니라 내빙선에 대한 관심이 커지며 pack ice 상태에서의 성능에 대한 관심이 앞에서 언급한 바와 같이 계속 높아지고

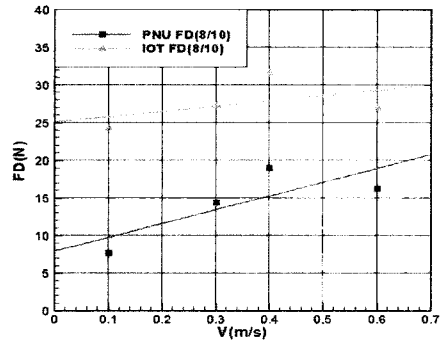


Fig. 9 냉동 모형빙(IOT)과 합성빙(PNU)을 이용한 저항시험에서의 예인력 비교, 밀집도 80%, Terry Fox 모형

있다. 현재까지의 연구를 통해서 살펴볼 때 아직까지 냉동 모형빙과 같은 특성의 합성빙을 만드는 것은 매우 힘든 일로 생각되며 크게 밀도, 강도, 마찰계수로 특성을 나눌 때 저항의 경우는 밀도가 가장 큰 영향을 미치고 있고 마찰계수의 차이는 생각보다 크지 않으며 강도(굽힘응력)의 경우는 큰 영향이 없는 것으로 생각된다. 정량적으로나 정성적으로나 큰 차이를 보이지 않으므로 상대적인 비교에 의한 선형연구 등을 저렴한 비용으로 손쉽게 수행할 수 있으리라 생각된다. 그러나 저항시험의 경우는 프로펠러의 작용에 의해 빙편이 부서지는 예가 냉동 모형빙에서 많았으며 이와 같은 현상이 합성빙에서는 보이지 않아 근본적인 차이가 있음을 알 수 있다. 그러므로 합성빙의 강도를 맞추어주지 못할 경우 빙해수조에서의 저항시험과의 연관성은 찾기 어려울 것으로 보인다. 앞으로 냉동 모형빙과 유사한 특성의 합성빙이 개발된다면 pack ice에서의 저항시험 뿐 아니라 평탄빙에서의 실험도 일반수조에서 수행할 수 있으리라 생각되나 굽힘응력 뿐 아니라 마찰계수까지 맞추기는 사실상 매우 어려울 것으로 생각된다.

#### 참고문헌

1. 김현수, 하문근, 안당, 전호환, 2006, "쇄빙 유조선과 일반 유조선의 저항특성 비교연구" 대한조선학회논문집, 제43권 1



호 pp.43-49.

2. 김현수, 하문근, 안당, 전호환, 2003, “극지용 쇄빙 유조선 개발” 대한조선학회논문집, 40권 6호 pp.20-30.
3. 임태욱, 2008, “Synthetic ice와 Refrigerated ice를 사용한 쇄빙선 저항 저항시험” 부산대학교 석사학위 논문.
4. Song, Y.-Y., Wang, J.-Y., Kim, M.-C., Chun, H.-H., 2006, “Comparative Study on Resistance of Icebreaker with Synthetic Ice and Refrigerated Ice”, Proceeding of 2006 APHydro, Shanghai, China.
5. Aboulazm, A. F., 1989, “Ship Resistance in Ice Flow Covered Waters”, Ph.D Thesis, Memorial University of Newfoundland, Canada.

6. Li, Z.-J. et al., 2002, “Effect of Cement Contents and Curing Periods on Properties of DUT1 Synthetic Model Ice”, Proc. of the 21st International Conference on Offshore Mechanics and Engineering, Oslo, Norway.
7. Beltaos, S., Wong, J. and Moody W., 1990, “A Model Material for River Ice Breakup Studies”, Proceedings of the IAHR 10th International Symposium on Ice, Espoo, Finland, Vol.1, pp.575-585.
8. Schultz, L. A. and Free, A. P. 1984, “Recent Experience in Conducting Ice Model Tests using a Synthetic Ice Modeling Material”, Proceedings of the IAHR, Ice Symposium, Hamburg, Germany. Vol.2, p.229-239 ⚓

김 문 찬 | 부산대학교 조선해양공학과 교수



- 1961년생
- 1998년 히로시마대학 공학박사
- 관심분야: 쇄빙선의 저항 저항 성능해석, 에너지 절약형 추진 장치
- E-mail: kmcprop@pusan.ac.kr

전 호 환 | 부산대학교 조선해양공학과 교수



- 1958년생
- 1988년 Glasgow 대학 공학박사
- 관심분야: 선체저항, 선형최적화
- E-mail: chunahh@pusan.ac.kr

조 준 철 | 부산대학교 조선해양공학과 석사과정



- 1982년생
- 2000년 대구대학교 학사
- 관심분야: 쇄빙선의 저항 저항 성능해석
- E-mail: w0283w@nate.com

이 승 호 | 부산대학교 조선해양공학과 석사과정



- 1981년생
- 2000년 공주대학교 학사
- 관심분야: 쇄빙선의 저항 저항 성능해석
- E-mail: lshn2000@naver.com