

합성얼음과 냉동얼음을 이용한 선형을 변화시킨 쇄빙상선의 저항특성 연구

이승호*, 김문찬[†]*, 전호환*, 신병철*

부산대학교 조선해양공학과*

Comparative Study on Resistance Performance of Icebreaking Cargo Vessel
according to Hull Form Variation by using Synthetic Ice and Refrigerated Ice

Seung-Ho Lee*, Moon-Chan Kim[†]*, Ho-Hwan Chun* and Byung-Chul Shin*

Department of Naval Architecture & Ocean Engineering, Pusan National University*

Abstract

The present paper deals with the comparative study of resistance performance with refrigerated ice and synthetic ice according to the variation of hull form characteristics. The resistance test has been conducted in pack ice condition in each concentration condition. Stem angle has been chosen as main parameters for the variation of hull form characteristics. The correlation of performance between with the refrigerated ice and with the synthetic ice has been shown according to the variation for stem angles. The present study show the possibility of ice test in general towing tank with synthetic ice for the time-consuming research such as hull form optimization although that is confined in pack ice condition. The more parametric study for the properties of synthetic ice is expected to be conducted to have more close correspondence for the test results of refrigerated ice in near future.

*Keywords: Towing tank(예인수조), Ice tank(빙수조), Icebreaking cargo vessel(쇄빙상선), Synthetic ice(합성얼음), Refrigerated ice(냉동얼음), Stem angle(선수각)

1. 서론

쇄빙상선은 쇄빙선과 달리 쇄빙하지 않는 상태로 운항하는 일이 많다. 즉, 평탄빙(Level ice)을

운항하는 경우보다 쇄빙선을 뒤따르며 팩아이스(Pack ice)상태에서 운항하는 경우가 많다. 합성얼음(Synthetic ice)을 이용한 일반수조에서의 연구는 아직까지 얼음의 강도를 맞출 수 없어 평탄빙에서 시험한 경우는 거의 없으며, 최근 대련대학에서 콩과 시멘트를 합성하여 연구한 결과가 있으나 일반선택의 경우가 아닌 단순화된 해양구조

접수일: 2009년 11월 5일, 승인일: 2010년 3월 31일

† 교신저자: kmcprop@pusan.ac.kr, 051-510-2401

물이었으며, 결과도 아직은 많은 차이를 보이고 있다(Li, Zhijun, et al., 2002). 이러한 이유로 합성얼음의 경우는 팩아이스 상태에서 시험이 가능하다고 할 수 있다.

본 연구에서는 합성얼음을 이용하여 팩아이스 상태에서의 쇄빙상선에 대한 저항특성을 연구하고, 이를 빙수조에서의 냉동얼음(Refrigerated ice)을 이용한 결과와 비교하고자 하였다. 합성얼음을 이용한 쇄빙선에 대한 저항연구들은 최근 부산대학교에서 많이 수행한 바 있다(송윤영, 2007, 임태욱, 2008). 냉동얼음과 합성얼음을 비교하였을 때, 큰 차이를 보이는 요소들로는 쇄빙선의 저항에 영향을 주는 요소인 밀도, 마찰계수, 합성얼음의 두께, 굽힘응력을 꼽을 수 있다. 팩아이스의 경우는 굽힘응력이 큰 영향을 주지 않음을 알 수 있으며 임태욱(2008)의 연구결과를 통하여 밀도를 잘 맞출 경우 마찰계수가 다소 차이가 나더라도 팩아이스 상태에서는 합성얼음의 시험결과가 빙수조 결과와 정성적으로 뿐만 아니라 정량적으로도 큰 차이가 없는 것을 쇄빙선의 저항시험 비교연구를 통하여 알 수 있었다.

통상 선형 최적화에 대한 실험적 연구는 많은 시험이 요구되어 특히 비용이 많이 드는 빙수조에서의 연구는 제한적으로 수행되어지는 경우가 많다. 이러한 선형최적화와 같은 연구는 합성얼음을 이용한 일반수조에서 수행할 경우 비용적인 측면에서 뿐 아니라 얼음조건을 똑같이 할 수 있는 등 이점이 많아 매우 유용한 방법이라 생각된다. 일반적으로 선수각(Stem angle)이나 수선면각(Waterline angle)등은 얼음을 깨는데 관련된 선형변수이나 앞에서 언급한 바와 같이 쇄빙상선의 경우는 실제로 팩아이스 상태에서 운항하기 때문에 팩아이스 상태에서의 저항특성을 연구하여 이를 선형 결정에 참고하는 것도 의미 있다고 생각하여 본 연구를 수행하였다. 선형요소의 변화로는 선수각 $\phi = 25^\circ$ 를 기준으로 하여 각각 20° , 30° 로 변화시킨 3가지 선형에 대하여 저항시험을 수행하였다. 얼음의 두께는 20mm(실선 기준 Ice IC 급 정도)로 하여 빙수조와 일반수조에서 시험을 수행하여 결과를 비교하였다.

2. 시험 준비

2.1 예인수조 설비

합성얼음을 이용한 쇄빙상선의 저항시험은 부산대학교 예인수조에서 실시하였다. 예인수조의 제원은 길이 100m, 폭 8m, 깊이 3.5m 이며, 가이드를 쳐 놓은 후 합성얼음을 채워서 시험을 수행하였다. 여기서 폭은 합성얼음이 가이드라인에 부딪혀 저항값에 영향을 줄 수 있기 때문에 이의 방지를 위해 모형선 폭의 6배로 하였다. 이는 캐나다 IOT 연구소의 합성얼음을 이용한 모형시험 방법을 참고하여 수행하였으며(Aboulazm, 1989), Fig. 1은 부산대 예인수조에 가이드를 쳐놓고 합성얼음을 띄워놓은 상태를 보여준다.



Fig. 1 PNU towing tank facility

2.2 빙 수조 설비

냉동얼음을 이용한 쇄빙상선의 저항시험은 Canada IOT 빙수조에서 실시하였다. IOT 빙수조의 제원은 길이 91m, 폭 12m, 깊이 3m로 세계 최대 규모이며 Fig. 2와 같다. 보조 전차를 포함하여 2개의 전차가 있으며 수중 카메라가 설치되어 있어 시험 시 수면 아래의 유동현상을 관찰할 수 있다. 10m 높이의 냉각시스템에서 암모니아 가스를 사용하여 공기를 냉각한다. 공기를 냉각하여 결빙을 하며, 조절 가능한 공기의 온도 범위는 $-30 \sim -15^\circ\text{C}$ 이다. -25°C 에서 시간당 3.5mm의 얼음을 얼릴 수 있다. 예인 전차의 제원은 길이 15m, 폭 14.2m, 높이 3.96m, 무게 80ton이며, 속도 범위는 0.0002~4m/s이다.

2.3 모형선

본 연구에서는 부산대학교에서 선형을 설계하였으며, 이를 선수분리형으로 제작한 모형선을 사용하였다. 축적비는 48:1이고, 길이 5m, 폭 0.625m이다. 본 연구에서 사용된 모형선은 선수각(ϕ)을 20° , 25° , 30° 로 변화시켰으며, Fig. 3은 3개의 선수분리형 모형선을 나타낸 것이다. 선수각은 만재흘수선과 선수가 이루는 각을 의미한다.

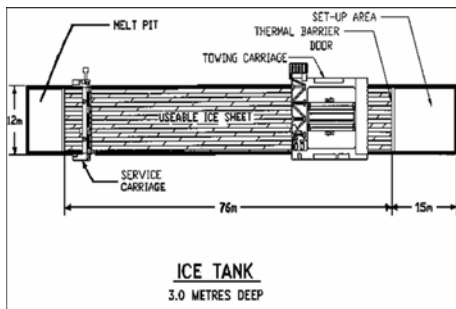


Fig. 2 IOT Ice tank facility



Fig. 3 Icebreaking cargo vessel model ships

2.4 합성얼음

합성얼음에는 Tryde Ice(Tryde, 1977)와 Syg Ice(Beltaos. et. al. 1990), DUT1(Li. et. al, 2002)등 여러 종류가 있으나, 본 연구에서는 파라핀 왁스(Paraffin wax)를 이용하여 합성얼음을 제작하였다. 합성얼음은 냉동얼음에 비해서 작업환경이 좋고, 녹는 일이 없어 시간적 제약을 받지 않는 장점이 있다. 다만 평탄빙 시험을 할 수 없다는 단점이 있다. 부산대학교 예인수조 모형시험

에 사용된 합성얼음을 Fig. 4에서 나타내었다. 합성얼음은 제작에 편리하고 집중도를 맞추기 유리한 직각삼각형으로 제작하였으며, 합성얼음의 면적을 2가지 형태로 제작하였다.

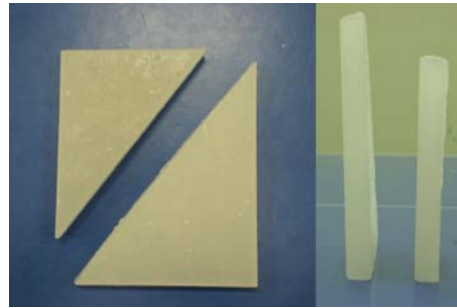


Fig. 4 Synthetic ice (wax type)

2.5 냉동얼음

IOT 빙수조 시험에서는 Ethylene Glycol (EG), Aliphatic Detergent (AD), Sugar (s)를 섞은 EG/AD/S 냉동얼음을 사용하였다. 이런 첨가물은 실제 해상얼음과 파괴모드가 비슷한 column형 결정구조를 만들기 위함이다(Timco, 1986). Fig. 5는 IOT 빙수조 시험에 사용한 냉동얼음의 사진이다. Table 1은 본 연구에서 사용된 합성얼음과 냉동얼음을 비교한 표이다.



Fig. 5 Refrigerated ice (EG/AD/S)

3. 모형시험방법

3.1 예인수조

예인수조에서의 쇄빙상선의 저항시험 방법은,

우선 합성얼음을 넣기 전에 가이드라인을 설치한다. 그리고 시험 중 합성얼음에 의해서 가이드라인이 밀리는 것을 막기 위해 부목으로 고정을 하고 두 가지 면적의 합성얼음을 1:1 비율로 잘 섞어서 팩아이스 상태를 만든다. 합성얼음의 집중도 판독은 5~10m 간격으로 사진을 찍어 화상분석기를 이용하여 정확한 집중도를 맞춘다. 모형 시험은 최대 0.6m/s(실선 속도 기준 약 5knots)까지, 90%, 80%, 60%의 세 가지 집중도에서 시험을 수행하였으며, 그 결과 값만을 비교하였다. 또한 왁스타입의 합성얼음은 시험 중 선체에 왁스가 묻어 마찰저항을 증가시킬 수 있기 때문에 수시로 선체표면을 닦아야 한다. Fig. 6은 예인수조에서 팩아이스 상태에서의 저항시험을 보여준다.

Table 2 Comparison of ice using ice going ship test

	Refrigerated ice (IOT)	Synthetic ice (PNU)
Shape	Various	Right triangle
Thickness (mm)	20	20
Density (kg/m ³)	870	870
Friction Coefficient	0.01	0.03
Area (cm ²)	Various	160 110.5



Fig. 6 Profile of resistance test with synthetic ice

3.2 빙 수조

빙수조 저항시험 방법은 우선 수조 전체 온도를 10시간 정도 영하 25도까지 내려서 어느 정도 두께의 평탄빙을 만든 후 다시 0도로 온도를 올려서 얼음의 강도를 조절한다. 평탄빙을 만든 후 가장 먼저 평탄빙 시험을 한다. 보통 빙수조 시험은 얼음을 한번 얼려서 여러 시험을 모두 하기 때문에 수조를 3등분하여 시험을 수행한다. 평탄빙 시험은 중앙에서 수행하며 시험 후 남아있는 좌측에 pre-sawn sheet를 만든다. pre-sawn sheet는 쇠 빙선의 저항에서 순수 쇠빙저항을 알아보기 위해서 ice sheet에 미리 톱질을 해놓은 상태를 말한다. 이때 중앙부분에서 평탄빙 시험으로 이미 깨진 얼음 쪽으로 pre-sawn 얼음이 밀리지 않도록 부목으로 지지하는 것이 필요하다. Level ice와 pre-sawn 상태에서 시험하는 모습은 Fig. 7에서 보이고 있다. pre-sawn 시험을 한 후에 보조전차로 얼음을 깨서 팩아이스 상태를 만들어 팩아이스 시험을 수행하며, Fig. 8는 팩아이스 시험 모습을 보여주고 있다.



(1) Level ice test



(2) Pre-sawn test

Fig. 7 Level ice & Pre-sawn test of icebreaking cargo vessel in IOT ice tank



Fig. 8 Pack ice test of icebreaking cargo vessel in IOT ice tank

4. 시험결과

4.1 합성얼음에서의 저항특성

Figs. 9~11는 합성얼음의 모형시험에서 측정되어진 저항 값을 각각의 모형선(20°, 25°, 30°)과 집중도(90%, 80%, 60%)별로 그래프를 통해 나타낸 것이다. 선수각 25°의 저항 값이 가장 크게 나왔으며, 선수각 20°의 저항 값이 가장 작게 나타났다. 수중카메라를 이용하여 수중에서의 팩아이스 유동현상(Figs. 12~14)을 관찰하였다. 그 결과, 선수각 25°일 때는 선수부로 내려오던 합성얼음이 정체되는 현상이 발생하였으며, 선체를 따라 합성얼음이 원활히 빠져나가지 못하는 것을 확인할 수 있었다. 또한 합성얼음이 겹치는 현상이 발생하였는데, 합성얼음이 서로 겹칠 경우 하나의 합성얼음일 때보다 부력저항이 증가하게 된다. 이로 인하여 배제저항과 부력저항이 커진 것으로 생각되며 가장 큰 저항값이 측정되어진 것으로 생각된다. 선수각 30°일 때는 선수각이 커지면서 선수부에 합성얼음이 집중되고, 집중된 합성얼음이 정체되는 현상을 확인하였다. 이로 인하여 배제저항이 증가한 것으로 생각된다. 마지막으로 선수각 20°일 때는 합성얼음이 가장 많이 유입되는 것으로 볼 수 있지만, 선수부에서 정체되는 합성얼음의 양이 적고, 선체를 따라 합성얼음이 자연스럽게 빠져나가는 것을 볼 수 있었다. 그 결과 저항 측면에서 가장 좋은 결과를 보인 것으로 생각된다.

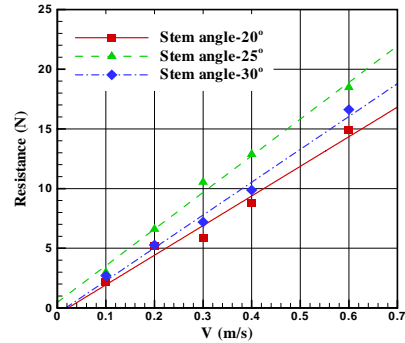


Fig. 9 Comparison of resistance according to the variation of stem angle (synthetic ice thickness 20mm, concentration 90%)

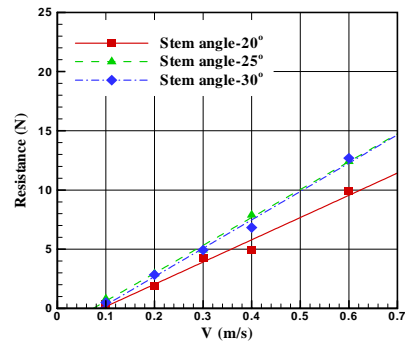


Fig. 10 Comparison of resistance according to the variation of stem angle (synthetic ice thickness 20mm, concentration 80%)

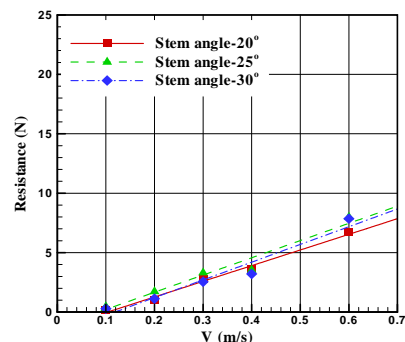


Fig. 11 Comparison of resistance according to the variation of stem angle (synthetic ice thickness 20mm, concentration 60%)



Fig. 12 Under water view of resistance test with pack ice (0.4m/s, 90%, $\phi = 20^\circ$)



Fig. 13 Under water view of resistance test with pack ice (0.4m/s, 90%, $\phi = 25^\circ$)



Fig. 14 Under water view of resistance test with pack ice (0.4m/s, 90%, $\phi = 30^\circ$)

4.2 냉동얼음에서의 저항특성

Fig. 15~17은 빙 수조에서 pack ice 상태에서 시험한 결과를 각각의 모형선과 집중도별로 나타낸 그래프이다. 집중도 90%일 때 저속에서는 선수각 30°의 저항값이 가장 작았으며, 선수각 25°의 저항값이 가장 크게 나왔다. 하지만 고속으로 갈수록 역전현상이 발생하여 선수각 25°의 저항

값이 가장 작고, 선수각 30°의 저항값이 가장 큰 경향을 보였다. 집중도 90%에서의 집중도 판독사진을 Fig. 18에서 보이고 있다. 집중도 판독사진을 확인한 결과 저속에서 깨어진 냉동얼음의 크기가 크고, 시험의 진행이 늦어지면서 냉동얼음의 강도가 떨어져 이를 깨면서 진행하게 되어 쇄빙저항이 포함된 것으로 판단되어진다. 또한 고속에선 상대적으로 저속에서 보다 크기가 작은 냉동얼음이 분포되어 있으며, 이에 대한 영향으로 고속에서 저항이 작게 나온 것으로 판단되어진다. 집중도 80%와 60%에선 선수각 25°의 저항값이 가장 크게 나왔으며, 선수각 20°의 저항값이 가장 작은 경향을 보였다.

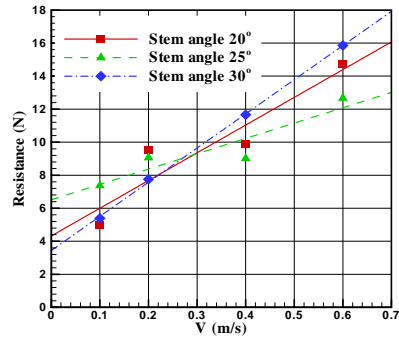


Fig. 15 Comparison of resistance according to the variation of stem angle (refrigerated ice thickness 20mm, concentration 90%)

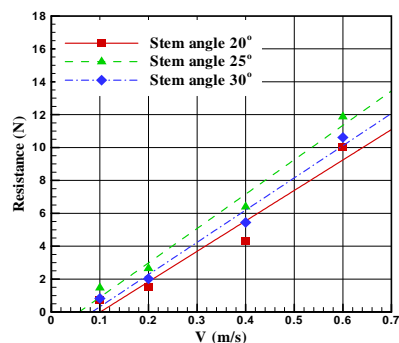


Fig. 16 Comparison of resistance according to the variation of stem angle (refrigerated ice thickness 20mm, concentration 80%)

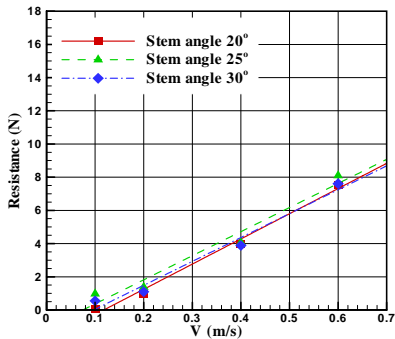
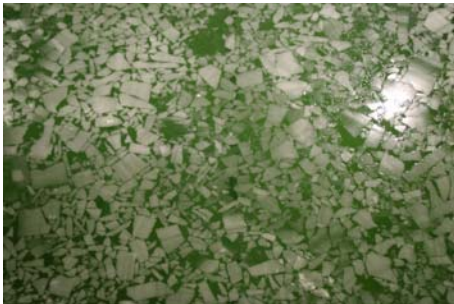


Fig. 17 Comparison of resistance according to the variation of stem angle (refrigerated ice thickness 20mm, concentration 60%)



(1) Concentration at low speed



(2) Concentration at high speed

Fig. 18 Comparison of concentration between low speed and high speed in concentration 90%

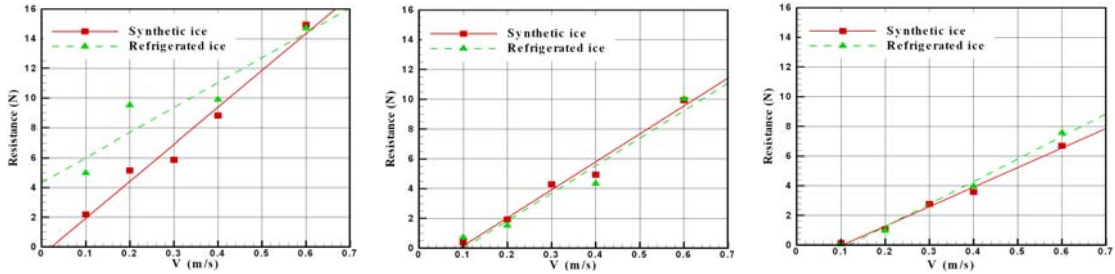
4.3 합성얼음과 냉동얼음의 결과비교

합성얼음을 이용하여 일반 예인수조에서의 팩아이스 시험과 냉동얼음을 이용하여 IOT 빙수조에서의 팩아이스 시험의 결과값을 비교하였다. 합성얼

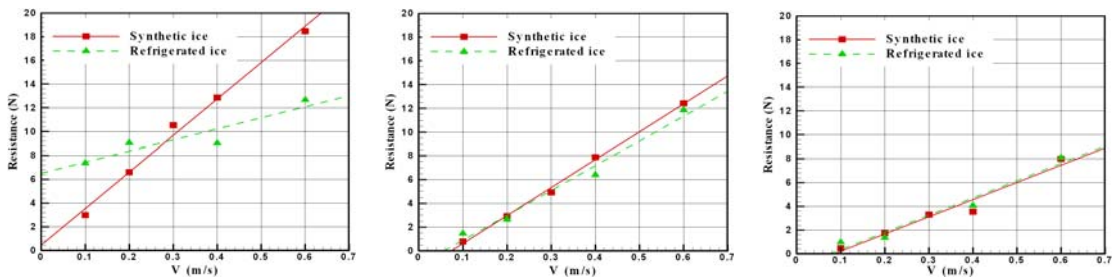
음을 이용하여 선수각을 변화시킨 3가지 선형에 대하여 팩아이스 저항시험을 수행한 결과 선수각 20° 일 때의 저항값이 가장 작았으며, 선수각 25° 일 때의 저항값이 가장 크게 나왔다. 이는 세 가지 집중도(90%, 80%, 70%)에서 모두 동일한 경향을 보였다. 이를 Canada IOT 빙수조에서 냉동얼음과의 비교 시험을 수행한 결과 집중도 80%, 60%일 때는 합성얼음의 경우와 동일한 결과를 얻었으나 집중도 90%일 때는 다소 다른 경향을 얻었다. 집중도 90%일 때 저속에서는 선수각 30°의 저항값이 가장 작았지만 고속일 때는 선수각 25°의 저항값이 가장 작은 경향을 보였다. 각각의 선수각에 대한 비교 그래프를 Figs. 19에 보이고 있다. 그래프를 통해 알 수 있듯이 집중도 90%일 때는 저속에서 냉동얼음일 때의 저항값이 다소 크고 고속으로 감에 따라 상대적으로 저항값이 적어지며, 80%, 60%일 때는 저항특성이 정량적, 정성적으로 잘 일치함을 보인다. 집중도 90%, 선수각 25°의 경우를 제외하면 정성적으로나 정량적으로 두 시험값들이 잘 일치하고 있어 팩아이스 상태에서 합성얼음을 이용하여 일반 예인수조에서 시험을 수행할 경우 충분히 냉동얼음을 대체할 수 있으리라 생각된다. 특히, 90%에서 선수각 25°의 경우는 Fig.18에서 알 수 있듯이 저속에서 빙의 크기와 집중도가 고속구간에 비해 많이 컸기 때문인 것으로 생각된다. 합성얼음과 냉동얼음의 마찰계수가 대략 3배 정도의 차이가 남에도 불구하고 이러한 일치를 보이는 것은 합성얼음과 선체 표면이 접촉할 경우 물이 사이에 존재하여 수조 밖에서 예측한 마찰계수보다 실제 마찰은 작아지기 때문이라 생각된다.

4.4 개수로 저항 시험결과

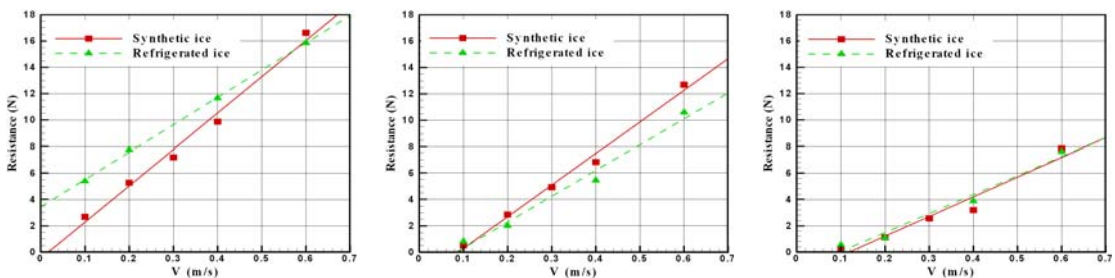
개수로 저항에 대하여 알아보았다. 선수각 변화에 따른 예인수조와 빙수조에서의 개수로 저항시험결과는 그래프를 통하여 Fig. 20에서 보이고 있다. 그 결과를 보면 두 수조에 따른 개수로 저항값의 차이는 거의 없었으며, 이를 통해 선수각의 변화가 개수로 저항에 큰 영향을 주지 않는다는 것을 알 수 있었다.



(1) stem angle 20°, concentration 90% (2) stem angle 20°, concentration 80% (3) stem angle 20°, concentration 60%



(4) stem angle 25°, concentration 90% (5) stem angle 25°, concentration 80% (6) stem angle 25°, concentration 60%



(7) stem angle 30°, concentration 90% (8) stem angle 30°, concentration 80% (9) stem angle 30°, concentration 60%

Fig. 19 Comparison of pack ice resistance between synthetic ice and refrigerated ice

5. 결론 및 고찰

선형 요소 변화에 의한 저항 특성을 일반수조에서 합성얼음을 이용하여 수행할 수 있는지에 대한 연구를 수행하였으며, 이를 냉동얼음의 결과와 비교하였다. 도출된 결론은 다음과 같다.

- 집중도 90%에서 선수각 25°의 경우를 제외하면 모든 경우에서 합성얼음과 냉동얼음을 이용한 시험 결과가 정량적, 정성적으로 일치하였다.

- 마찰계수의 차이에도 불구하고 결과값이 잘 일치하는 이유는 합성얼음과 선체표면 사이의 물로 인하여 실제 마찰계수가 감소했기 때문으로 생각된다.

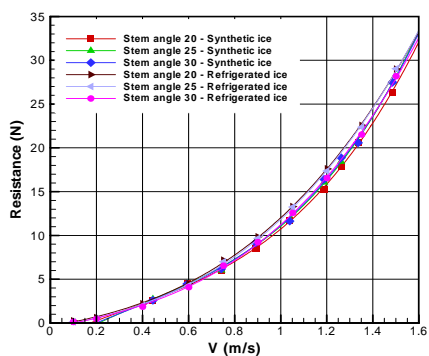


Fig. 20 Comparison of open water resistance between synthetic ice and refrigerated ice

- 본 연구 결과로부터 팩아이스 상태에서 쇄빙선박에 대한 연구를 일반 예인수조에서 합성얼음을 이용하여 수행할 수 있으리라 생각된다. 특히 선형개발과 같이 많은 양의 시험이 소요되는 경우 초기 시험 수행에 유용하게 이용될 수 있으리라 생각된다.

- 보다 정도 높은 검증을 위해서 MOERI 빙수조에서 냉동얼음에 대한 재시험을 수행할 예정이며, 집중도 90%에서 선수각 25°에 대한 결과를 검증할 예정이다.

후 기

본 논문의 내용은 빙해선박의 극지항로 안전운항기술 및 극저온 빙성능 시험평가 기법개발과제(5년)에 의해 연구되었습니다.

참 고 문 헌

- Aboulazm, A.F., 1989, "Ship Resistance in Ice Flow Covered Waters," Ph.D thesis, Memorial University of Newfoundland, Canada.
- Lim, T.W., 2008, "Comparative Study on Resistance and Self-propulsion of Icebreaker with Synthetic ice and Refrigerated ice," Master's thesis, Pusan National University.
- Li, Zhijun., Wang, Yongxue., Wang, Xiwen., Li, Guangwei., 2002, "Effect of Cement Contents and Curing Periods on Properties of DUT1 Synthetic Model Ice," 21st International Conference on Offshore Mechanics and Engineering, OMAE 2002, Oslo, Norway.

- Song, Y.Y., 2007, "Comparative Study on Resistance of Icebreaker with Synthetic ice and Refrigerated ice," Master's thesis, Pusan National University.
- Tryde, P., 1977, "Intermittent Ice Forces Acting on Inclined Wedges," U. S. Army CRREL, Tept., Hanover, N.H, U.S.A., pp .26-77.
- Timco, G.W. 1986, "EG/AD/S: a New type of Model Ice for Refrigerated Towing Tanks." Cold Regions Science and Technology, 12, pp175-195.
- 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, 1:575-585



< 이 승 호 >



< 김 문 찬 >



< 전 호 환 >



< 신 병 철 >