대 한 조 선 학 회 논 문 집
제46권 제5호 2009년 10월

Journal of the Society of Naval Architects of Korea
Vol. 46, No. 5, pp. 471-478, October 2009
DOI: 10.3744/SNAK.2009.46.5.471

합성얼음의 두께변화와 선형변화에 따른 Pack ice 상태에서의 쇄빙상선의 저항특성 연구

이승호*, 김문찬†*, 전호환*, 조준철*, 신병철*, 정운화**

부산대학교 조선해양공학과*
국방기술품질원**

Study on Resistance Performance of Icebreaking Cargo Vessel in Pack Ice Condition according to Variation of Synthetic Ice Thickness and Hull Form Characteristics

Seung-Ho Lee*, Moon-Chan Kim†*, Ho-Hwan Chun*
Jun-Cheol Cho*, Byung-Chul Shin* and Un-Hwa Jung**

Department of Naval Architecture & Ocean Engineering, Pusan National University*
Defense Agency for Technology and Quality**

Abstract

The present paper deals with characteristics of resistance performance according to the variation of synthetic ice thickness and hull form. The resistance test has been conducted with pack ice condition in Pusan National University towing tank. Stem angle has been chosen as main parameters for the variation of hull form characteristics, which is the most important factor especially in icebreaking cargo vessel. The serial comparisons of resistance test have been done with the variation of hull form parameter as well as with the different thickness of synthetic ice. The different trend of resistance performances with increasing of stem angle has been shown at each synthetic ice thickness. The present test results is expected to be confirmed by comparing the test results in ice tank in the near future.

※Keywords: Towing tank(예인수조), Icebreaking cargo vessel(쇄빙상선), Synthetic ice(합성 얼음), Stem angle(선수각), Waterline angle(수선면각), Thickness variation(두께변화)

접수일: 2009년 6월 5일, 승인일: 2009년 9월 2일
† 교신저자: kmcprop@pusan.ac.kr, 051-510-2401

1. 서론

본 연구는 합성얼음의 두께변화와 선형특성에 따른 쇄빙상선의 저항성능을 확인하기 위한 시험으로 예인수조에서 합성얼음(Synthetic ice)을 이용하여 팩아이스(Pack ice)상태에서 3개의 모형선을 제작하여 실시하였으며, 그 결과를 비교하였다. 냉동얼음(Refrigerated ice)과 합성얼음을 비교하였을 때 큰 차이를 보이는 요소들로는 쇄빙선의 저항에 영향을 주는 요소인 밀도, 마찰계수, 합성얼음의 두께, 굽힘응력를 꼽을 수 있다. 선행연구(Lim 2008)를 통하여 밀도를 잘 맞출 경우 팩아이스 상태에서는 합성얼음의 시험 결과가 빙수조 결과와 정성적으로 뿐만 아니라 정량적으로도 큰 차이가 없어 이와 같은 결과를 토대로 본 연구에서는 선형요소의 변화에 의한 저항특성 연구를 수행하였다. 또한 합성얼음의 두께변화와 선형요소간의 관계를 확인하기 위한 연구를 수행하였다. 선형요소의 변화는 선수각 $\phi = 25^\circ$ 를 기준으로 하여 각각 20°,30° 로 변화시킨 3가지 선형에 대하여 저항시험을 수행하였으며, 합성얼음의 면적은 일정하게 제작하고 두께를 40mm, 20mm로 변화시켜 시험을 수행하였다.

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 저항 값에 영향을 줄 수 있기 때문에 이를 방지하기 위해 모형선 폭의 6배로 하였다. 캐나다 IOT의 모형시험 방법을 참고하여 수행하였으며(Aboulazm 1989), Fig. 1은 부산대 예인수조에 가이드를 쳐놓고 합성얼음을 띄워놓은 상태를 보여준다.

2.2 모형선

본 연구에서는 부산대학교에서 선형을 설계하였으며, 이를 선수분리형으로 제작한 모형선을 사용하였다. 축적비는 48:1이고, 길이 5m, 폭 0.625m 이다. 본 연구에서 사용된 모형선은 선수각(ϕ)을 20°, 25°, 30° 로 변화시켰다. Fig. 2는 총 3개의 선수분리형 모형선을 나타낸 것이며, Fig. 3은 선수각을 나타낸 것이다(Kim. et. al. 2006).

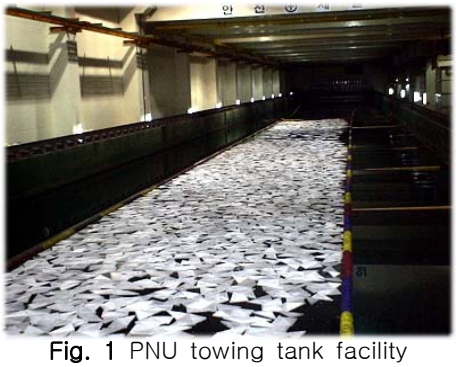

Fig. 1 PNU towing tank facility

Fig. 2 Icebreaking cargo vessel model ships

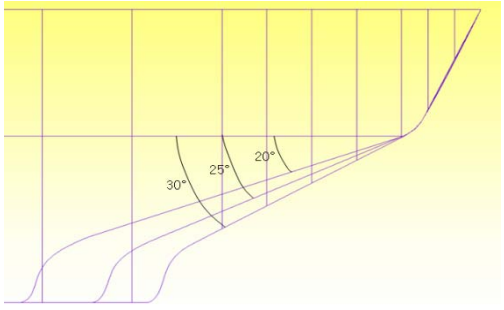

Fig. 3 Stem angle of icebreaking cargo vessel

2.3 합성얼음

합성얼음에는 석고를 이용하여 제작한 Tryde Ice(Tryde 1977)와 Syg Ice(Beltaos. et. al. 1990), 콩과 시멘트를 합성하여 제작한 DUT1(Li. et. al. 2002)등 여러 종류가 있다. 하지만 본 연구에서는 파라핀 왁스(Paraffin wax)를 이용하여 합성얼음을 제작하였다. 냉동얼음에 비해서 합성얼음이 가지는 장점은 우선 실제 얼음이 아니기 때문에 수조전체의 온도를 영하로 떨어뜨릴 필요가 없어서 작업환경이 좋다. 그리고 얼음이 가지고 있는 최대 단점인 녹는 일이 없기 때문에 시간적 제약을 받지 않아서 냉동얼음에 비해 유리하다. 다만 평탄빙 시험을 할 수 없다는 단점이 있다. Table 1과 Fig. 4는 부산대학교 모형시험에서 사용된 두 가지의 합성얼음을 비교한 표와 합성얼음을 나타낸다. 합성얼음은 제작에 편리하고 집중도를 맞추기 유리한 직각삼각형으로 제작하였으며, 합성얼음의 면적을 2가지 형태로 제작하였다.

Table 1 Synthetic ice comparison

	Wax type (PNU 1st test)	Wax type (PNU 2nd test)
Shape	Right triangle	Right triangle
Thickness (mm)	40	20
Density (kg/m^3)	870	870
Friction Coefficient	0.03	0.03
Area (cm^2)	160 110.5	160 110.5

3. 모형시험방법

예인수조에서의 쇄빙상선의 저항시험 방법은, 우선 합성얼음을 넣기 전에 가이드라인을 설치한다. 가이드라인 설치에서 중요한 점은 가이드라인의 폭을 조절하는 것인데 합성얼음이 벽에 부딪혀서 튕겨져 나올 때 선체저항에 영향을 주지 않을 만큼 충분히 넓어야 한다. 그리고 시험 중 합성얼음에 의해서 가이드라인이 밀리는 것을 막기 위해 부목으로 고정을 하고 합성얼음을 넣어 팩아이스 상태를 만든다. 이 때 두 가지 면적의 합성얼음을 1:1의 비율로 잘 섞어서 넣는다. 합성얼음의 집중도 판독은 5~10m 간격으로 위에서 사진을 찍어 화상분석기를 이용하여 정확한 집중도를 맞춘다. 모형시험은 최대 0.6m/s(실선 속도 기준 약 5knots)까지, 집중도 90%, 80%, 60%별로 시험을 수행하였으며, 그 결과 값만을 비교하였다. 또한 왁스타입의 합성얼음은 시험 중 선체에 왁스가 묻어 마찰저항을 증가시킬 수 있기 때문에 수시로 선체표면을 닦아야 한다. Fig. 5는 예인수조에서 팩아이스 상태에서의 저항시험을 보여준다.

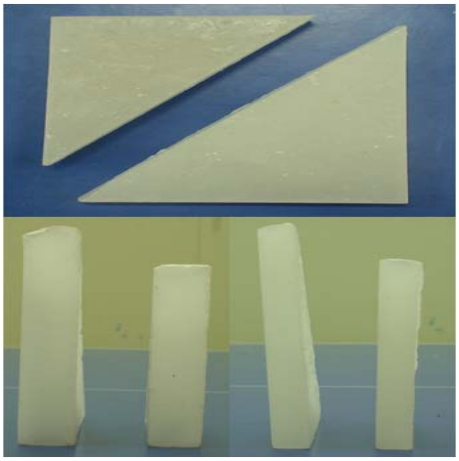

Fig. 4 Synthetic ice (wax type)

Fig. 5 Profile of resistance test with synthetic ice

4. 시험결과

4.1 두꺼운 합성얼음(40mm)에서의 저항특성

쇄빙상선의 저항성분은 얼음을 쇄빙하는데 필요한 쇄빙(Breaking)저항과 얼음의 부력에 의한 부력(Buoyancy)저항, 선체가 얼음을 밀어내는데 작용하는 저항인 배제(Clearing)저항, 개수로(Open water)저항으로 나눌 수 있다. 쇄빙상선의 총 저항은 수식 (1)과 같이 나타내어진다.

$$R_T = R_{br} + R_c + R_b + R_{ow} \quad (1)$$

여기서, R_{br}은 쇄빙저항, R_c는 배제저항, R_b는 부력저항, R_{ow}는 개수로저항을 나타낸다.

이 저항성분들 중 쇄빙저항이 쇄빙상선의 총 저항에 50%이상을 차지하고 있으며, 나머지 저항은 부력저항, 배제저항, 개수로저항이 차지하고 있다. 이번 연구에서 시험한 팩아이스 상태에서는 쇄빙저항이 아닌 부력저항과 배제저항만 측정된다. 여기서 배제저항이 부력저항보다 선체에 작용하는 영향이 크며, 개수로저항은 아주 작은 부분을 차지하고 있다. 그러므로 본 연구에서 다루는 팩아이스 상태에서의 저항은 주로 부력저항과 배제저항이 대부분이라고 볼 수 있다.

합성얼음의 두께변화와 선수각 변화에 따른 팩아이스 저항시험 결과에 대하여 알아보았다. Figs. 6~8은 합성얼음의 두께가 40mm일 때 모형시험에서 계측되어진 저항 값을 각각의 모형선(20°, 25°, 30°)과 집중도(90%, 80%, 60%)별로 그래프를 통해 나타낸 것이다. 합성얼음의 두께가 두꺼운 40mm일 때의 저항특성을 보면 선수각 20°의 저항이 가장 큰 값을 보였고, 선수각 25°의 저항이 가장 작게 나타났다. 수중카메라를 사용하여 선수부분에서 팩아이스의 유동을 관찰한 사진은 Figs. 9~11에 보였으며, 이를 통하여 앞선 결과들을 살펴보았다. 선수각 20°일 때의 합성얼음이 유난히 선수부와 선저로 집중되어 있고, 선저로 유입되는 합성얼음이 많아 부력저항이 크게 작용한 것으로 생각된다. 다음으로 선수각 30°일 때는 선수부에서 합성얼음이 집중되어 배제저항이 증가한 것으로 생각된다. 마지막으로 선수각 25°일 때는 합성얼음이 선체를 따라 자연스럽게 흘러

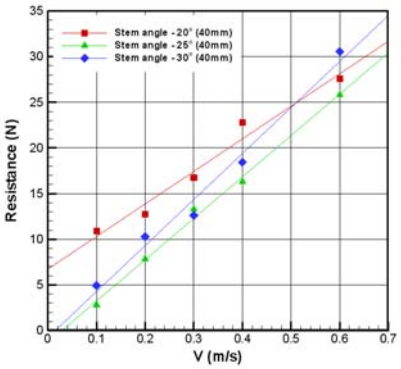

Fig. 6 Comparison of resistance according to the variation of stem angle and thick synthetic ice (40mm, 90%)

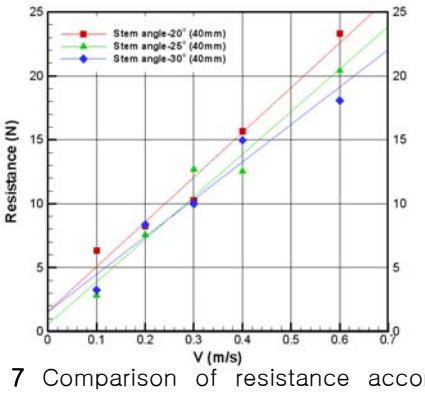

Fig. 7 Comparison of resistance according to the variation of stem angle and thick synthetic ice (40mm, 80%)

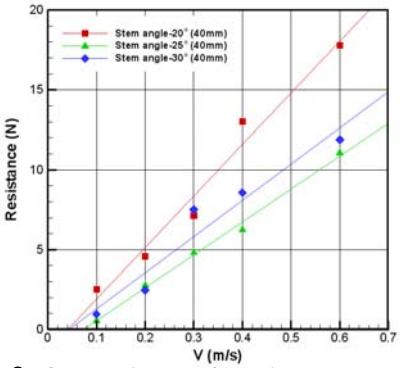

Fig. 8 Comparison of resistance according to the variation of stem angle and thick synthetic ice (40mm, 60%)

가는 것을 확인할 수 있어 가장 좋은 저항특성을 보인 것으로 생각된다.

Fig. 9 Under water view of resistance test with thick pack ice (0.4m/s, 90%, $\phi = 20^\circ$)

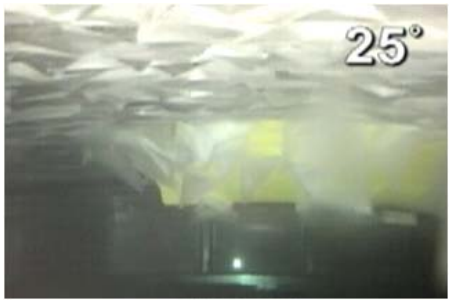

Fig. 10 Under water view of resistance test with thick pack ice (0.4m/s, 90%, $\phi = 25^\circ$)

Fig. 11 Under water view of resistance test with thick pack ice (0.4m/s, 90%, $\phi = 30^\circ$)

4.2 얇은 합성얼음(20mm)에서의 저항특성

합성얼음의 두께가 얇은 20mm일 때의 저항특성에 대하여 알아보았다. Figs. 12~14는 합성얼음의 두께가 20mm일 때 모형시험에서 계측되어진 저항 값을 각각의 모형선(20°, 25°, 30°)과 집중도(90%, 80%, 60%)별로 그래프를 통해 나타낸 것이다. 두께가 두꺼운 40mm일 때와는 달리 두께가 얇은 20mm일 때는 선수각 25°의 저항 값이 가장 크게 나왔으며, 선수각 20°의 저항 값이 가장 작게 나타났다.

수중카메라를 이용하여 수중에서의 팩아이스 유동현상(Figs. 15~17)을 관찰한 결과 육안으로 확인할 때는 3개의 모형선에 유입되는 합성얼음의 양에는 차이를 보이지 않았다. 하지만 선수각 25°일 때를 보면 선수부로 내려오던 합성얼음이 정체되는 현상이 많이 발생하였으며, 이로 인하여 배제저항이 커진 것으로 생각된다. 또한 합성얼음이 선체를 따라 원활히 빠져나가지 못하는 것을 확인할 수 있었으며, 합성얼음이 서로 겹치는 현상이 발생하였다. 합성얼음이 서로 겹칠 경우 하나의 합성얼음일 때보다 부력 저항이 증가하게 된다. 이와 같이 배제저항과 부력저항이 전체적으로 크게 작용하여 가장 큰 저항값이 측정되어진 것으로 생각된다. 선수각 30°일 때는 선수각이 커지면서 선수부에 합성얼음이 집중되며 또한 집중된 합성얼음이 정체되는 현상을 확인하였다. 이로 인하여 배제저항이 증가한 것으로 생각된다. 마지막으로 선수각 20° 일 때는 합성 얼음이 가장 많이 유입되는 것으로 볼 수 있지만, 선수부에서 정체되는 합성얼음의 양도 적었으며 선체를 따라 합성얼음이 자연스럽게 빠져나가는 것을 볼 수 있었다. 그 결과 저항 측면에서 가장 좋은 결과를 보인 것으로 생각된다.

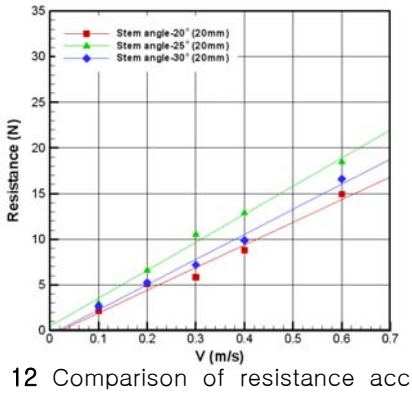

Fig. 12 Comparison of resistance according to the variation of stem angle and thin synthetic ice (20mm, 90%)

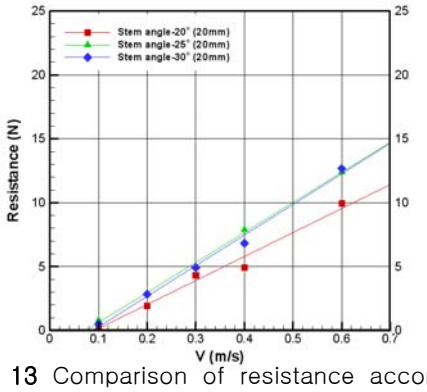

Fig. 13 Comparison of resistance according to the variation of stem angle and thin synthetic ice (20mm, 80%)

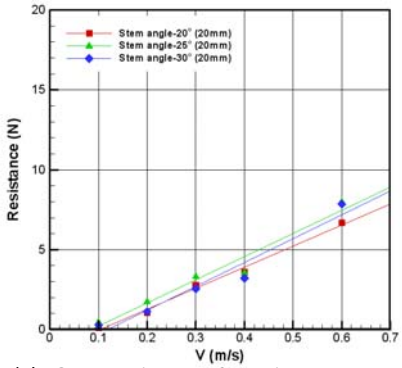

Fig. 14 Comparison of resistance according to the variation of stem angle and thin synthetic ice (20mm, 60%)

Fig. 15 Under water view of resistance test with thin pack ice (0.4m/s, 90%, $\phi = 20^\circ$)

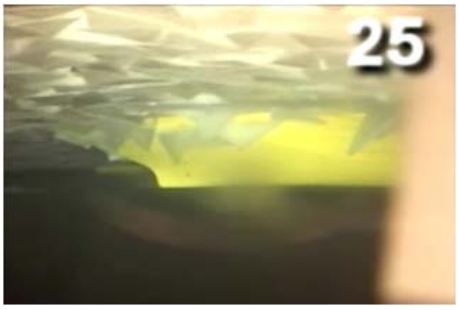

Fig. 16 Under water view of resistance test with thin pack ice (0.4m/s, 90%, $\phi = 25^\circ$)

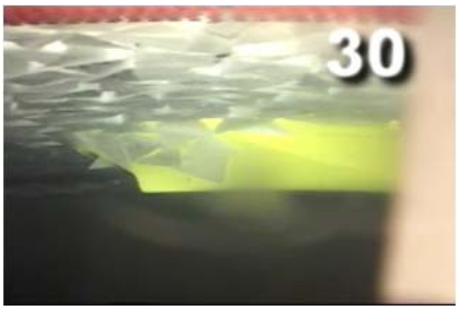

Fig. 17 Under water view of resistance test with thin pack ice (0.4m/s, 90%, $\phi = 30^\circ$)

4.3 설계속도에서의 결과비교

합성얼음의 두께가 두꺼울 때와 얇을 때의 저항값에 역전현상이 발생하였으며, 이에 대한 결과를 좀 더 자세히 알아보기 위하여 집중도 90%에서 설계속도인 0.4m/s의 결과 값을 각각의 모형선과 합성얼음의 두께 별로 그래프를 통하여 나타내 보았다(Fig. 18). Fig. 18의 그래프를 보면 선수각 20°의 경우 합성얼음의 두께가 두꺼운 40mm일 때는 저항값이 가장 컸으나, 합성얼음의 두께가 얇은 20mm일 때는 저항값이 가장 작게 나오는 역전현상이 발생하였다. 이 역전현상은 앞으로 빙수조에서의 검증과 더 많은 선형을 변화시켜 팩아이스 상태에서 저항시험을 수행함으로써 확인하여야 할 결과이지만, 이와같은 결과만으로 보면 쇄빙상선의 선형 설계를 할 때 얼음의 두께를 고려해 주어야 한다는 연구목표와 부합되는 결과라 할 수 있겠다.

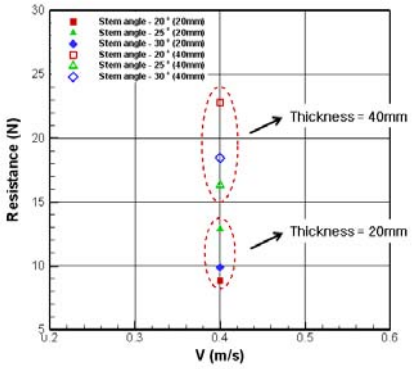

Fig. 18 Comparison of resistance at design speed (0.4m/s, concentration 90%)

4.4 개수로 저항시험결과

개수로 저항에 대하여 알아보았다. 선수각 변화에 따른 개수로 저항시험결과는 Fig. 19에 그래프를 통하여 나타내었다. 그 결과를 보면 선수각(ϕ) 변화에 따른 개수로 저항값의 차이는 거의 없었으며, 이를 통해 선체형상변수의 변화로는 큰 영향을 주지 않는 것을 확인할 수 있었다.

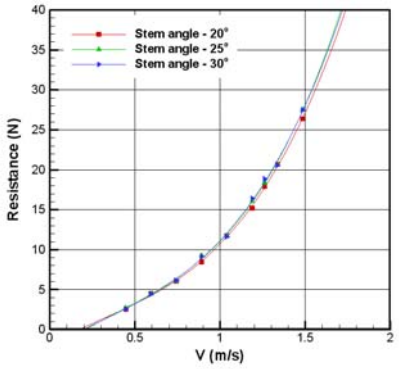

Fig. 19 Comparison of resistance at the open water test

5. 결론 및 고찰

팩아이스 상태에서 합성얼음의 두께변화에 따른 쇄빙상선의 저항특성에 대하여 연구를 수행하였으며, 도출된 결과를 다음과 같이 정리하였다.

1) 쇄빙상선 시험 시 주요하게 고려되어야 할 변수 중 합성얼음의 두께를 변화시켜 저항시험을 수행한 결과 합성얼음의 두께가 두꺼운 40mm의 저항 값이 두께가 얇은 20mm의 저항값보다 큰 것을 확인하였다.

2) 선수각(ϕ)을 변화시켜 팩아이스 저항시험을 수행한 결과 합성얼음의 두께가 40mm일 때는 선수각 25° 일 때가 저항측면에서 가장 좋았으며, 합성얼음의 두께가 얇은 20mm일 때는 선수각 20° 일 때가 저항측면에서 가장 좋은 결과를 보였다.

3) 합성얼음의 두께를 변화시켜 팩아이스 저항시험을 수행한 결과 두께에 따라 3가지 선형변화 ($\phi = 20^\circ, 25^\circ, 30^\circ$)에 대한 저항값의 변화가 달랐다. 그 이유는 합성얼음의 두께변화에 따라 선체에 작용하는 영향에 의한 것으로 추측할 수 있다. 즉, 배제저항과 부력저항이 합성얼음의 두께가 변화하면서 모형선에 작용하는 영향이 달라졌기 때문이며, 이를 통해서 쇄빙상선을 설계할 때 해상의 얼음두께를 고려하여 선형을 달리 해야 할 것으로 판단된다. 이의 확인을 위해서 빙 수조에서의 검증과 좀 더 많은 선형변화와 합성얼음 두께변화로 시험을 수행함으로써 확인되어야 할 것으로 생각된다.

5) 본 연구에서 쇄빙상선의 선체형상변수를 변화시켜 시험한 결과 개수로 저항값의 차이는 크지 않았으며, 또한 전체 저항에는 큰 영향을 주지 못한다는 것을 알 수 있었다.

5) 빙 수조에서의 검증 시험 및 일반 예인수조에서 쇄빙상선 시험 시 주요변수 (굽힘응력, 마찰력, 밀도, 얼음의 두께)에 대한 보다 많은 상관관계 연구를 수행할 예정에 있다. 또한 현재는 Pack ice 상태에서 각각의 저항성분을 분리하는데 어려움이 있으며, 이에 대한 연구도 수행할 예정에 있다.

후 기

본 논문의 내용은 부산대학교 자유과제학술연구비(2년)에 의해 연구되었습니다.

참 고 문 헌

- Aboulazm, A.F., 1989, Ship Resistance in Ice Flow Covered Waters, Ph.D Thesis, Memorial Universty of Newfoundland, Canada.
- Kim, H.S., Ha, M.K., Ahn, D. and Chun, H.H., 2006, “Comparison Study on the Resistance Characteristics of an Arctic Tanker and a General Tanker,” Journal of the Society of Naval Architectures of Korea, Vol. 43, No. 1, pp. 43-49.
- 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.
- Tryde, P., 1977, "Intermittent IceForces Acting on Inclinde Wedges," U.S. Army CRREL, Tept., Hanover, N.H, U.S.A., pp. 26-77.
- 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 >

< 조 준 철 >

< 신 병 철 >

< 정 운 화 >