

합성얼음과 냉동얼음을 사용한 쇄빙선의 추진 성능 비교 연구

김문찬* · 임태욱** · 조준철* · 전호환* · 왕정용***

*부산대학교 조선해양공학과

**대우조선해양(주)

***Institute for Ocean Technology

Comparison Study on the Propulsion Performance for Icebreaker with Synthetic ice and Refrigerated ice

Moon-Chan Kim*, Tae-Wook Lim**, Jun-Cheol Jo*, Ho-Hwan Chun* and Jungyong Wang*

*Pusan National University Dept. of Naval Architecture Ocean Engineering, Busan, Korea

**Daewoo Ship Building and Marine Engineering

***Institute for Ocean Technology, Canada

KEY WORDS: Towing tank 예인수조, Icebreaker 쇄빙선, Synthetic ice 합성 얼음, Refrigerated ice 냉동 얼음, Self-propulsion 자항

ABSTRACT: This paper reports on experimental investigations of self-propulsion performance with synthetic (model) ice and refrigerated ice, which were conducted in a typical towing tank and ice tank, respectively. The main purpose of this research was to find the correlation between the self-propulsion performance with synthetic ice in a typical towing tank and that with refrigerated ice in an ice tank. The different stresses between the synthetic ice and refrigerated ice influenced the self-propulsion performance due to different ice and propeller interactions. A further study on the ice property variation for a self-propulsion performance comparison is to be conducted in the near future.

1. 서 론

북극권은 지구상에 남은 최후의 자원 부존 지역으로서 석유와 천연가스를 비롯한 각종 천연자원이 풍부하게 매장되어 있는 것으로 알려져 있고 이를 개발하기 위해서는 쇄빙선의 역할이 무엇보다도 중요하다(최경식, 1995). 또한 최근 고유가의 영향으로 항로단축을 위한 북극 항로에 관한 관심이 높아짐에 따라 극지방을 운항 할 수 있는 쇄빙선 및 쇄빙상선에 관한 관심이 높아지고 있다. 이러한 영향으로 극지방 쇄빙선 및 쇄빙상선의 연구가 일반수조에서 빙 관련 선박의 실험을 할 수 있는 가능성을 살펴보고자 하였으며 앞서 수행되었던 합성 얼음을 이용한 쇄빙선 저항 연구(송운영, 2007; 임태욱, 2008)에 뒤이어 자항시험에 대한 연구를 수행 하였다. 즉 앞서 합성 얼음을 이용한 저항시험 결과와 냉동 얼음을 이용한 결과가 얼음의 주요 특성들 중 밀도(비중), 굽힘응력, 마찰계수 등이 차이가 있음에도 불구하고 비교적 빙 수조 결과와의 연관성을 가져 이에 대한 추가 연구로 저항에서 한 발 더 나아가 자항시험에 대한 비교연구를 수행한 것이다.

빙 해상에서 선박의 성능에 영향을 주는 얼음의 주요 특성으로는 밀도(비중), 마찰계수 및 굽힘 응력이 있으며 왁스 등의 합성얼음들로 냉동 얼음의 특성과 가장 맞추기 어려운 것이 굽힘

응력 및 마찰계수이다. 특히 굽힘응력의 경우는 평탄 빙에서의 실험 시 꼭 맞추어야 하는 요소이므로 이를 무시하고 실험할 수 없어 본 연구에서는 얼음이 겹치치 않고 널리 퍼져 있는 팩 아이스(Pack ice) 상태에서의 실험만 비교하였다. 최근 중국의 Dalian 대학에서 해양구조물에 대한 합성 평탄 빙(공과 시멘트 등을 조합하여)을 이용하여 실험을 수행한 바(Li et al., 2002) 있으나 아직 실험 결과가 냉동 평탄빙의 것과 차이가 많이 나고 있다. 팩 아이스 상태에서의 저항 시험의 경우 굽힘응력은 큰 영향을 주지 않을 것으로 생각되며 이는 빙 수조에서의 저항 시험의 경우 속도가 극히 낮아 빙의 변형이나 파괴가 전혀 일어나지 않음을 통해서도 확인할 수 있었다. 냉동얼음의 특성과 합성얼음의 특성 중 맞추기 힘든 또 다른 특성이 마찰계수이다. 통상의 왁스타입의 합성 얼음의 마찰계수는 모형 냉동 얼음보다 2~3배 높은 값을 보인다. 즉 마찰력이 더 크게 작용한다고 볼 수 있다. 앞선 연구에서 이에 대한 영향(뒤에 언급할 비중을 포함해서)으로 합성얼음의 경우가 저항 값이 크게는 20~30% 정도 차이가 난 바 있다. 마지막으로 중요한 요소인 비중의 경우, 합성얼음의 경우 왁스의 비중이 작아 냉동 얼음에 비해 5~10% 정도 작은 값을 가지는데 앞선 연구에서는 저항시험에 대하여 처음에는 보정 없이 비중이 적은 상태에서 그대로 수행했으며 두 번째 실험에서는 오히려 약간 크게 보정해서 실험함으로 이

에 대한 영향을 살펴보고(임태욱, 2008) 예상대로 비중에 의한 영향이 컸으며 저항시험의 경우 합성얼음과 냉동얼음의 결과차이가 마찰계수와 비중의 차이로 볼 때 20~30% 정도의 차이에서 10~15% 정도의 차이로 줄어 정성적 뿐 아니라 정량적으로도 상당한 근접을 보였다고 할 수 있다. 본 연구에서는 비중을 다소 크게 한 합성얼음을 사용하여 추진시험을 수행하였으며 앞에서 언급한 굽힘응력, 마찰계수, 비중의 차이에 의한 두 실험 간의 차이점을 살펴보기로 한다. 앞선 모형시험 때와 같이 실제 냉동얼음의 모형 시험은 IOT(Institute for Ocean Technology, NRC, Newfoundland, Canada) 빙 수조에서 실시하였고, 합성얼음의 모형 시험은 PNU(Pusan National University) 예인 수조에서 실시하였다. 모형 시험에 사용한 모형선으로는 저항시험 때 사용했던 모형과 동일한 캐나다 해안 경비정 Terry Fox 호 쇄빙선이 사용되었다. 앞선 연구에서 언급한 바와 같이 본 쇄빙선은 실험결과와 실선결과가 많이 축적되어 있으므로 실험 후 오차분석이나 결과 비교에 용이한 장점이 있다. 모형선은 축척 비 21.8이고, 길이 3.739m, 폭 0.789m로 Terry Fox 호는 많은 실험을 한 선박이고, 캐나다에서도 현재 운항 중인 선박이기도 하다.

2. 얼음의 특성 비교

2.1 냉동얼음

사용된 냉동얼음으로는 IOT에서 개발된 EG/AD/S 얼음(Timco, 1986)을 사용하였다. EG/AD/S 얼음은 파괴모드가 실제 해빙과 유사한 기둥(Column)형 결정구조를 갖고 있다(Timco, 1986). 냉동 얼음과 합성 얼음을 비교했을 때 가장 큰 차이를 보이는 요소로는 얼음의 굽힘 응력을 꼽을 수 있다. IOT 모형 시험에서는 냉동 얼음(Refrigerated ice)의 강도까지도 축척비에 고려가 되어 있지만, PNU의 모형 시험에서는 왁스타입의 합성얼음(Synthetic ice)이기 때문에 강도 조절에는 어려움이 있었다. 그리하여 비교적 강도가 낮은 얼음을 사용한 IOT 실험에서는 회전하는 프로펠러로 유입되는 얼음을 프로펠러가 쉽게 갈아내는 반면 부산대학교 모형 시험에서는 합성얼음이 분쇄되지 않는 것을 볼 수 있었다. IOT에서 수행되어진 냉동얼음의 두께는 40mm(실제 두께 87.2cm)로 만들어서 실험을 하였고, 굽힘응력은 35Kpa, 밀도는 870kg/m³이다.

2.2 합성얼음

합성얼음에는 MOD ice(Schultz and Free, 1984), Syg ice(Beritaos et al., 1990) 등 여러 종류가 있으나 본 연구에서는 왁스 타입의 합성얼음을 사용하여 실험을 하였다. 냉동얼음에 비해서 합성얼음이 가지는 장점은 우선 실제 얼음이 아니기 때문에 수조 전체의 온도를 영하로 떨어뜨릴 필요가 없어서 작업 환경이 좋다. 그리고 얼음이 가지고 있는 최대 단점인 녹는 일이 없기 때문에 시간의 제약을 받을 필요도 없어서 냉동얼음에 비해 유리하다. 크기는 가로 320mm 세로 200mm와 가로 200mm 세로 160mm 크기의 두 가지 종류를 사용하였고, 두께는 냉동 얼음과 같은 두께인 40mm로 만들어서 실험을 하였다. PNU 저

Table 1 Comparison of three tested ices

	Refrigerated ice (IOT)	Wax type (PNU 1 st test)	Wax type (PNU 2 nd test)
Shape	Various	Right triangle	Right triangle
Thickness [mm]	40	40	40
Density [kg/m ³]	870	820	900
Friction coefficient	0.01	0.03	0.03
Area [cm ²]	Various	320 160	320 160
Flexural strength [kPa]	160~200	About 40 times of refrigerated ice	

항 2차 모형 시험에서 밀도를 증가시킨 합성얼음을 사용하였으므로 밀도는 900kg/m³으로 실험하였다. Table 1은 IOT와 PNU 1차, 2차 모형시험에서 사용된 냉동 얼음과 합성 얼음을 비교한 표이다.

3. 모형시험

예인수조에서의 저항시험 방법은, 저항시험 시와 마찬가지로 우선 합성 얼음을 넣기 전에 가이드라인을 설치한다. 가이드라인 설치에서 중요한 점은 가이드라인의 폭을 조절하는 것인데 합성 얼음이 벽에 부딪혀서 다시 나올 때 선체저항에 영향을 주지 않을 만큼 충분히 넓어야 한다. IOT의 모형시험 방법을 참고하여 선폭의 4배로 넓혀 수행했다(Aboulazm, 1989). 이 때 두 가지 크기의 합성 얼음은 1:1의 비율로 잘 섞어서 넣고 합성 얼음의 집중도 판독은 냉동 얼음과 마찬가지로 5m~10m 간격으로 위에서 수직으로 사진을 찍어서 사진 판독으로 정확한 집중도를 맞춘다.

얼음이 덮여있는 상태에서는 Open water 상태보다 저항이 커지므로 모형선의 선속은 최대속도 0.6m/s(실선 속도 기준 약 5knot)까지로 하여 실험을 수행하였다. 이는 실제 쇄빙선이 실제 해상을 운항할 때 낼 수 있는 최대 속도와 비슷하다. 이는 Ice class rule에서도 규정하고 있다. 본 연구에서는 평탄빙과 Pre-sawn 상태에서의 저항 결과는 비교하지 않고, 팩 아이스 상태에서 실험을 실시하였으며 3가지 집중도(90%, 80%, 60%)에서 실험하였다. 또한 각 집중도에서 0.1m/s, 0.3m/s, 0.4m/s, 0.6m/s의 4가지 속도에서 측정되어진 결과 값들을 비교하였다.

합성얼음의 모양은 집중도를 조절하는데 용이한 직각 삼각형을 사용하였다. Fig. 1과 2는 예인수조에서 합성 얼음을 이용하여 팩 아이스 실험을 하는 모습과 빙 수조에서 냉동 얼음을 이용하여 팩 아이스 실험을 하는 모습을 각각 보여주고 있다.

IOT의 저항 시험과 PNU 저항 시험의 결과를 비교하기 위해서 같은 조건하의 팩 아이스 상태에서 시험을 수행하여 결과를 비교하였다. 저항 시험도 저항 시험과 마찬가지로 3가지의 집중도(60%, 80%, 90%)로 나누어 Pack ice 실험을 수행 하여 각 집중도 별로 추력, 토크, 예인력을 구하였다.

팩 아이스 상태에서 정확한 빙 저항점을 찾는 것은 일반 추진



Fig. 1 The profile of self-propulsion test with synthetic ice



Fig. 2 The profile of self-propulsion test with refrigerated ice

시험 뿐 아니라 빙 상태에서 중요한데 통상 저속이고 대부분 쇄빙 저항이 대부분이므로 볼라드 상태(Bollard pull condition)에서 구한 예상 추력과 회전수를 기준으로 사용한다. 통상 볼라드 상태에서의 기준 회전수보다 약간 크거나 작은 2~3개의 회전수를 선택하여 각 선속에서의 빙 저항 시험을 수행한다. 특히 팩 아이스 상태에서는 쇄빙저항 성분이 없으므로 저항 점을 보다 정확히 찾는 것이 필요하나 본 연구에서는 비교 연구 목적으로 저항과 같아지는 추력 점을 볼라드 상태에서 선정하여 예인수조와 빙 수조 추진 시험에 똑 같은 회전수로 사용하였다. 본 연구에서는 실선으로의 확장은 수행하지 않았으며 빙 상태에서의 저항 시험 뿐 아니라 실선 확장 방법 등에 관한 추진 시험 관련 연구는 앞으로 더 많이 수행 되리라 생각된다.

Figs. 3~5는 PNU와 IOT의 각 모형 시험에서 계측되어진 추력 값을 집중도(90%, 80%, 60%)별로 그래프를 통해 나타낸 것이다. 추력의 경우 집중도 90%일 때, PNU가 IOT의 결과보다 평균 약 10%의 더 큰 값이 나타나고(앞으로의 비교도 전체 속도 평균 값 비교임) 집중도 80%일 때는 PNU가 IOT의 결과보다 약 15%의 더 큰 값을 보인다. 그리고 집중도 60%일 때는 PNU가 IOT의 결과보다 약 45%의 더 큰 결과 값이 나온다. 이러한 결과의 원인으로는 IOT의 냉동 얼음이 PNU의 합성 얼음

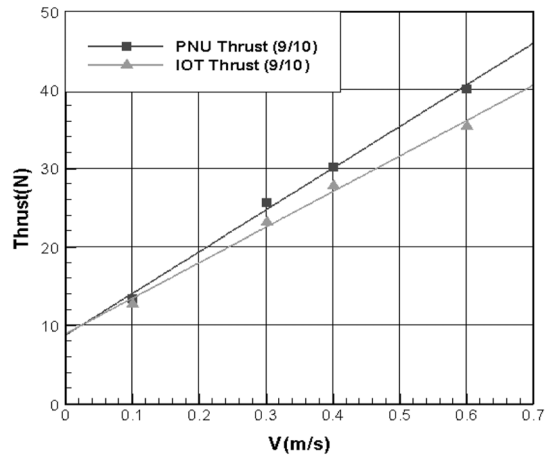


Fig. 3 Comparison of thrust between with synthetic ice in PNU tank and with refrigerated ice in IOT tank at the concentration of 90%

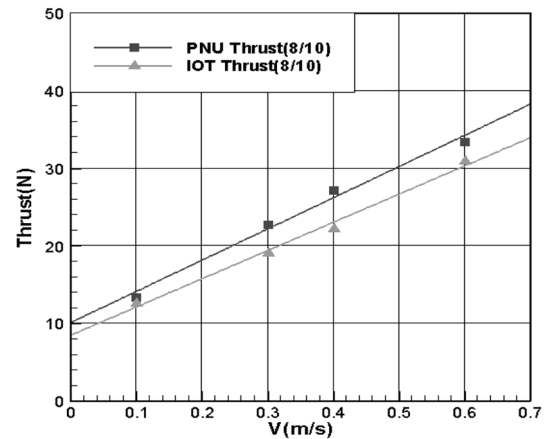


Fig. 4 Comparison of thrust between with synthetic ice in PNU tank and with refrigerated ice in IOT tank at the concentration of 80%

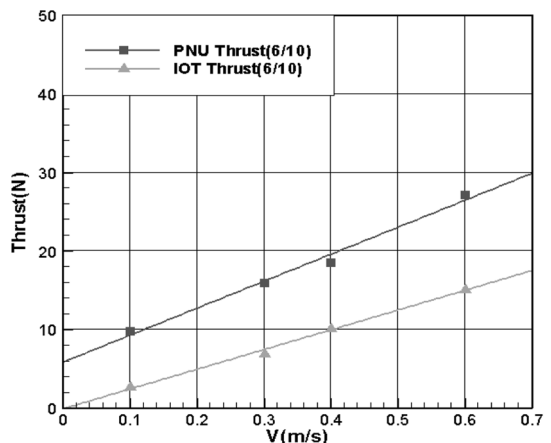


Fig. 5 Comparison of thrust between with synthetic ice in PNU tank and with refrigerated ice in IOT tank at the concentration of 60%

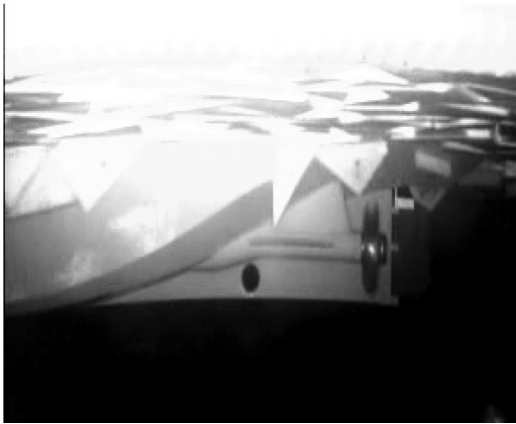


Fig. 6 Underwater profile around the propeller in PNU towing tank



Fig. 7 Underwater profile around the propeller in IOT ice tank

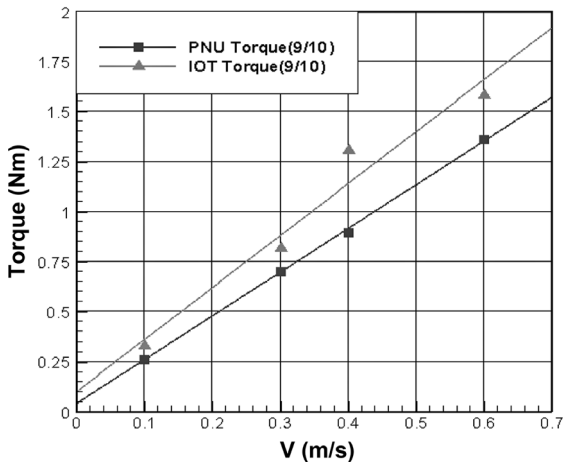


Fig. 8 Comparison of torque between with synthetic ice in PNU tank and with refrigerated ice in IOT tank at the concentration of 90%

보다 프로펠러에 유입되는 경우가 더 빈번하게 일어나기 때문이라고 할 수 있고, 이는 수중 비디오를 통해 확인할 수 있었으며 IOT의 모형시험에서 많은 양의 냉동얼음이 부서져 프로펠러에 유입되어 추력을 저하시키는 것으로 판단된다. Figs. 6과 7는

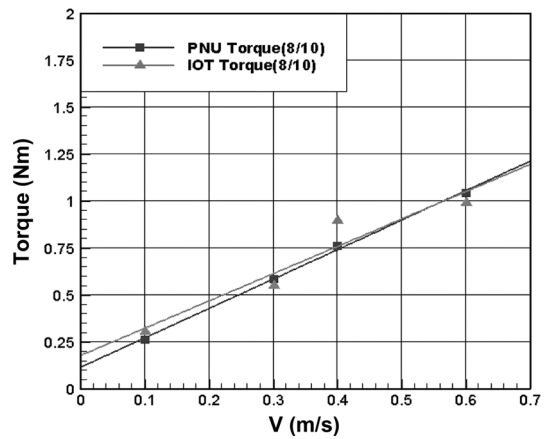


Fig. 9 Comparison of torque between with synthetic ice in PNU tank and with refrigerated ice in IOT tank at the concentration of 80%

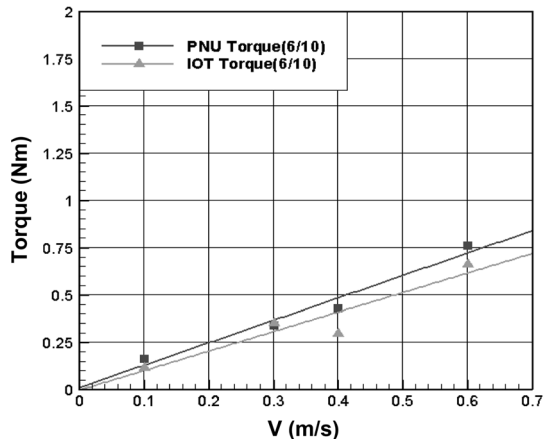


Fig. 10 Comparison of torque between with synthetic ice in PNU tank and with refrigerated ice in IOT tank at the concentration of 60%

IOT와 PNU에서 각각의 모형시험 시 프로펠러로 유입되는 얼음의 순간 모습을 포착한 사진이다. 빙 수조의 경우에는 저항시험과 달리 프로펠러의 흡입력에 의해 빙이 선체에 부딪치거나 프로펠러에 유입되어 부서지는 현상이 나타났으나 PNU 실험의 경우는 특히 굽힘 응력이 상대적으로 매우 커 선체에 부딪쳐도 깨지지 않고 프로펠러로 유입되는 양도 현저히 적었다. 이러한 현상은 집중도가 낮아질수록 많이 나타나 빙 수조 결과와 차이를 더 보이고 있음을 알 수 있다.

Figs. 8~10은 PNU와 IOT의 각각의 모형 시험에서 측정되어진 토크 값을 집중도(90%, 80%, 60%)별로 그래프를 통해 비교한 것이다. 토크의 경우 집중도 90%일 때, IOT가 PNU의 결과보다 약 20%의 더 큰 값이 나오고, 집중도 80%일 때는 IOT가 PNU의 결과보다 약 10%의 더 큰 값이 나온다. 그리고 집중도 60%일 때는 IOT가 PNU의 결과보다 약 15%의 더 큰 결과 값이 나온다. 이러한 결과 값은 IOT의 냉동얼음이 PNU의 합성얼음보다 프로펠러에 유입되는 경우가 더 빈번하게 일어나기 때

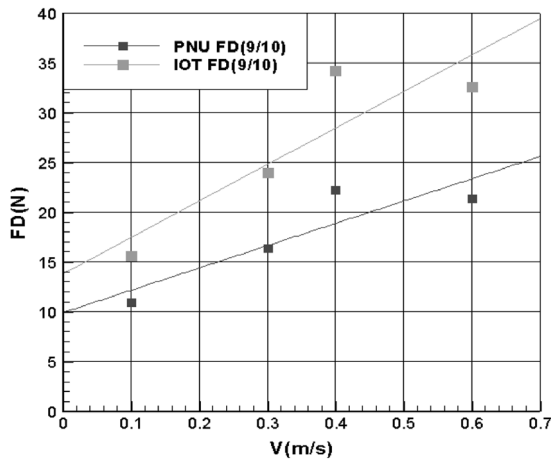


Fig. 11 Comparison of towing force(FD) between with synthetic ice in PNU tank and with refrigerated ice in IOT tank at the concentration of 90%

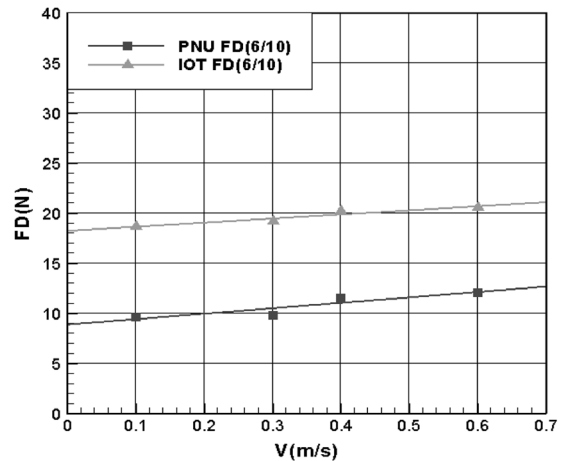


Fig. 13 Comparison of towing force(FD) between with synthetic ice in PNU tank and with refrigerated ice in IOT tank at the concentration of 60%

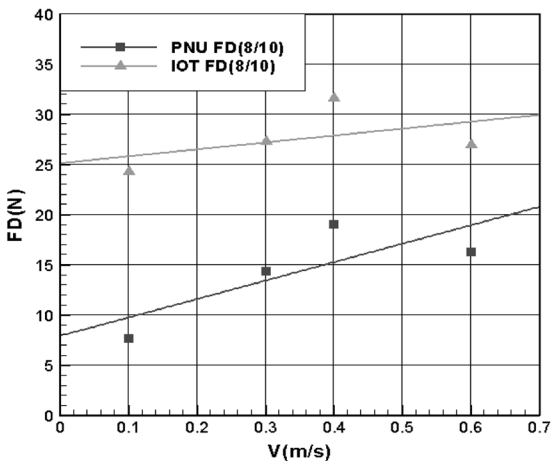


Fig. 12 Comparison of towing force(FD) between with synthetic ice in PNU tank and with refrigerated ice in IOT tank at the concentration of 80%

문이라고 할 수 있다. 앞서 살펴본 추력의 경우와 유사하다 할 수 있으며 이번에는 추력 때와 달리 집중도에 따른 차이가 크지 않음을 알 수 있다.

Fig. 11~13은 PNU와 IOT의 각 모형 시험에서 계속되어진 예인력(FD)을 집중도(90%, 80%, 60%)별로 그래프를 통해 나타낸 것이다. 예인력의 경우 집중도 90%일 때, IOT의 모형시험 결과 값이 PNU의 모형시험 결과 값보다 평균 약 10N이 증가하였고, 집중도 80%일 때는 IOT의 모형시험 결과 값이 PNU의 모형시험 결과 값보다 평균 약 14N이 증가하였다. 그리고 집중도 60%일 때는 IOT의 모형시험 결과 값이 PNU의 모형시험 결과 값보다 평균 약 9N이 증가하였다. 이는 두 가지 이유로 설명 할 수 있는데, 이전 실시한 IOT의 모형시험 저항 결과 값이 PNU의 모형시험 저항 결과 값 보다 약 14% 증가함으로 인해 더 많은 예인력이 필요했고, 또 다른 이유로는 PNU의 모형 시험에 비하여 IOT의 모형시험에서 많은 양의 냉동얼음이 프로펠러에 유

입됨으로 인한 추력의 손실이 합쳐져 이러한 큰 차이를 보인다고 할 수 있다. 앞서와 같이 이를 백분율로 나타내면 매우 큰 차이로 할 수 있으며 추진 시험에서 중요한 예인력이 이렇게 차이가 나타나고 있음을 볼 때 굽힘 모우먼트와 점성의 차이로 인한 빙과 프로펠러의 상호관계가 차이가 많아 두 실험 결과 사이에 큰 차이가 나타났다고 할 수 있겠다. 그러므로 저항시험 때와 달리 저항시험의 경우는 본 연구에서 제안한 왁스형 합성얼음을 사용한 일반수조에서의 실험 결과가 빙 실험 결과와 연관성을 가지기 어려울 것으로 보이며 굽힘 모우먼트와 점성계수가 냉동얼음과 보다 유사한 합성얼음을 개발해야 할 것으로 생각되며 앞으로 이와 같은 연구가 이루어지길 기대해 본다.

4. 결 론

합성얼음을 이용하여 일반 예인수조에서 저항시험을 수행하고 빙 수조에서의 결과와 비교하여 그 연관성을 살펴보았으며 결론을 다음과 같이 요약하였다.

(1) Canada의 IOT 빙 수조에서 수행한 팩 아이스 저항 시험 결과 값을 기준으로 PNU 팩 아이스 저항 시험 결과 값을 비교하여 보았을 때, 추력은 합성 얼음을 사용한 모형 시험이 약 15% 정도 증가되는 경향을 보임을 알 수 있었으며, 토크는 냉동얼음을 사용한 모형 시험이 약 10% 증가된 경향을 보임을 알 수 있었다. 또한 예인력에서는 냉동 얼음을 사용한 모형 시험이 약 10N 증가된 경향을 보이고 있다.

(2) 저항시험 시에 중요한 요소가 아니었던 굽힘응력이 프로펠러에 의한 선체와 빙의 충돌 등의 상호작용에 큰 영향을 주고 있으며 마찰계수 또한 영향이 있는 것으로 생각된다.

(3) 현실적으로 굽힘응력이나 마찰계수를 냉동얼음과 정확히 일치되도록 합성얼음을 제작하는 것은 거의 불가능해 보이나 향후 이러한 요소들을 변화시켜가며 저항시험 결과들을 비교해 본다면 이러한 요소들의 보다 자세한 영향을 파악할 수 있으리라 생각된다.

후 기

이 논문은 2007년 정부의 재원으로 학술진흥재단의 지원을 받아 수행된 연구임(KRF-2007-314-D00315).

참 고 문 헌

- 송윤영 (2007). Synthetic ice와 Refrigerated ice를 사용한 쇄빙선 저항시험 비교 연구, 부산대학교 석사학위 논문.
- 임태욱 (2008). 합성얼음과 냉동얼음을 사용한 쇄빙선 저항 저항시험 비교 연구, 부산대학교 석사학위 논문.
- 최경식 (1995). 빙역학과 극지용 해양구조물, 2.3 해빙.
- Aboulazm, A.F. (1989). Ship Resistance in Ice Flow Covered Waters, Memorial University of Newfoundland, Canada.
- Beitaos, 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, International Association for Hydraulic Research, pp 575-585.

- Schultz, L.A. and Free, (1984). "Recent Experiment in Conducting Ice Model Tests using a Synthetic Ice Modeling Material", Proceeding of the IAHR, Ice Symposium, Hamburg, Germany, Vol 2, pp 229-239.
- Timco, G.W. (1986). "EG/AD/S: A New Type of Model Ice for Refrigerated Towing Tanks", Cold Regions Science and Technology, p 175-795.
- Li, Z., Wang, Y., Wang, X., Li, G. (2002). "Effect of Cement Contents and Curing Periods on Properties of DUT1 Synthetic Model Ice", 21st International Conference on Offshore Mechanics and Engineering, OMAE2002, Oslo, Norway.

2009년 1월 8일 원고 접수

2009년 1월 31일 최종 수정본 채택