

# 빙-선체 마찰계수 측정 기법

조성락<sup>1,†</sup> · 천은지<sup>1</sup> · 유창수<sup>2</sup> · 정성엽<sup>1</sup> · 이춘주<sup>1</sup>  
한국해양연구원 해양시스템안전연구소<sup>1</sup>  
충남대학교 선박해양공학과<sup>2</sup>

## The Measuring Methodology of Friction Coefficient between Ice and Ship Hull

Seong-Rak Cho<sup>1,†</sup> · Eun-Jee Chun<sup>1</sup> · Chang-Soo Yoo<sup>2</sup> · Seong-Yeob Jeong<sup>1</sup> · Chun-Ju Lee<sup>1</sup>  
Maritime & Ocean Engineering Research Institute, KORDI<sup>1</sup>  
Department of Naval Architecture and Ocean Engineering, Chungnam National University<sup>2</sup>

### Abstract

In this paper, friction coefficients between ices and model ship were studied in order to predict the resistance of ice. The friction coefficient is a dimensionless scalar value which describes the ratio of the force of friction between two bodies and the force pressing them together. The coefficient of friction depends on the materials, roughness on surface, lubrication, etc. We tested and analyzed the friction coefficient for the development of the test methodology. The friction coefficient for ice model test is very dominant to predict the ship performance, so every ice tank uses their own painting technique. In this study, the friction coefficient with changing the moving speed of ice was studied by using a flat plates which were made by the MOERI's painting technique and the basic research for the developing the painting methodology in the MOERI ice model basin was carried out.

**Keywords** : Friction coefficient(마찰계수), Ice model test(빙모형시험), Clearing resistance(Clearing 저항)

## 1. 서론

실해역에서 운항하는 빙해선박의 경우, 선체와 해빙과의 마찰에 의한 빙저항은 전체 저항의 약 25% 정도로 추정하고 있으며, 얼음과의 마찰저항을 줄이기 위해서 빙-선체 사이의 마찰계수 측정이 점차 중요한 요소로 부각되고 있다. 이러한 마찰저항을 줄이기 위하여 Kimmo Juurmaa (1978)는 압축공기를 이용하여 선체 표면에 공기방울을 분사하는 방법을 개발하였고, 미국의 해안경비대(1973)에서는 쇄빙선 선체에 직접 물을 분사하여 빙마찰 저항을 감소하는 방법 등을 적용시킨 해안 경비정들을 개발하였다. 또한 빙마찰저항을 감소시키기 위한 새로운 선체 도장법 및 페인트 재료 특성에 대한 연구들이 진행 중이다(Lee, 2010).

해빙의 마찰계수는 마찰력의 법칙 (Amontons - Coulomb's law)에 따르지 않고, 실해빙의 수직항력과 선속에 따라 매우 다른 양상을 보이는 것으로 조사되고 있다. 특히, 선형, 선체의 거칠기, 도장상태, 해빙의 상태, 해빙에 착빙된 눈(Snow)의 여부 등에 따라 크게 양상이 바뀌게 된다. Kietzig, et al. (2010)는 운도의 변화와 얼음의 이동 속도에 따른 마찰계수 특성을 디스크 형태의 시편을 통해 측정하고 조사하였으며, Frederking, et al. (2002)는 세밀하게 도색된 철판(Smooth painted steel)과 부식된

철판을 이용하여 여러 속도 상태에서 빙마찰계수를 측정하였다. 그리고 Barker, et al. (2003)는 모형 얼음덩어리(Ice block)과 모래를 이용하여 빙하와 지면 사이의 마찰계수를 측정하였다.

실해역에서는 실선과 해빙 사이의 마찰력을 직접 측정하기가 어렵기 때문에, 빙모형시험에서 모형선과 모형빙 사이의 마찰력 및 마찰계수를 실제 현상과 같게 조절해 주어야 한다. 이러한 조건에 따라 빙모형시험 결과를 해석하므로, 모형선과 모형빙 사이의 마찰계수는 빙저항을 정확하게 추정하는데 매우 중요한 요소로 분류된다. 따라서 세계 각국의 주요 빙해수조에서는 수조별 고유의 마찰계수를 정하여 모형선을 제작하고, 모형선에 도장을 수행하며, 빙시험을 수행하고 빙시험 해석에 활용하고 있다(Table 1, Lee, et al., 2008).

MOERI 빙해수조에서는 빙모형시험의 정도 향상 및 정확한 빙저항 추정을 위하여 얼음과 다른 물질과의 마찰계수를 측정할 수 있는 마찰계수 측정기를 제작하였다. 또한 제작된 측정기를 이용하여 다양하고 기초적인 마찰계수 시험을 수행하였으며, 마찰계수를 계산하기 위한 마찰계수 측정 기법 및 해석을 위한 절차를 연구하였다. ITTC에서 권장하고 있는 빙마찰계수(0.04 - 0.06)를 맞추기 위한 모형선 제작법 및 도장법 개발을 위한 선행 연구로 본 연구가 수행되었으며, 국외의 비슷한 시험 데이터와 비교하여 마찰계수 측정 기법에 대해 상세히 연구하였다.

Table 1 Standard frictional coefficients at some ice tanks

Facility	IOT	HSVA	AARC	AARI
Model ice	EG/AD/S	Saline	FGX	Saline
Fric. Coef.	0.05	0.1	0.04-0.06	0.10-0.13

## 2. 빙마찰계수 시험장치

MOERI 빙해수조에서는 모형빙과 모형선 사이의 마찰계수를 측정하기 위해 Fig. 1과 같은 마찰계수 측정기를 설계하였다. 국외의 다른 수조에서는 대부분 모형선 시험판만을 시험하도록 설계되어 마찰계수를 측정한다. 즉, 모형빙 위에 모형선 시험판을 올려놓은 후, 모형선 시험판을 움직이는 구조로 제작되었다. 하지만 MOERI 빙해수조 마찰계수 측정기는 모형선 시험판뿐만 아니라 실제 모형선의 바닥면이나 측면에서도 직접 마찰계수를 구할 수 있도록 장치를 고안하였다. 모형선 시험판 위에 모형빙을 올려놓은 후 모형빙을 이동시켜서 마찰계수를 측정하게 된다. 또한 마찰계수 측정기 양쪽에 흡착판을 부착하여 모형선에 단단하게 고정할 수 있으며, 수직방향으로 측정기의 위치를 조정하여 모형선에 정확하게 설치할 수 있다.

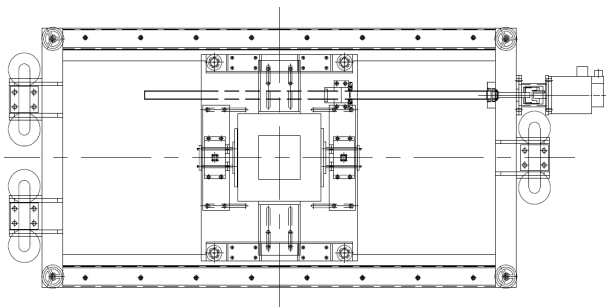


Fig. 1 Drawing of frictional force measurement device

Fig. 2는 제작된 마찰계수 측정기의 형상을 보여주고 있으며, 모형선 및 모형선 시험판이 바닥에 위치하고 그 위에 모형빙이 위치하게 된다. 모형빙은 로드셀을 포함하고 있는 지그(Jig)에 의해 구속되어지며, 0.75kW급의 서보모터에 의해 지그가 스크류 방식으로 작동된다. 모형선 시험판과 모형빙 사이에서 수직항력에 따른 마찰력이 발생되며, 모형빙이 움직이는 방향으로 설치되어 있는 2개의 로드셀을 이용하여 마찰력을 측정하게 된다.

지그의 최대 이동거리는 700mm이며, 이동속도는 0.01 - 0.9m/s로 정밀 디지털 제어가 가능하고 좌우로 이동 방향을 설정할 수 있다. 그리고 모형빙의 시편은 최대로 300mm×300mm 까지 시험이 가능하도록 지그를 조절할 수 있으며, 모형선과 모형빙 사이의 마찰력은 5kgf의 용량을 가지고 있는 2개의 로드셀을 이용하여 계측된다.

서보모터의 제어는 Fig. 3과 같이 이동속도, 이동거리, 반복횟수, 이동방향 등을 컴퓨터에서 설정하여 자동으로 제어되며, 수동 모드로 모터를 구동할 수 있도록 설계되었다. 그리고 계측된 마찰력 값이 실시간으로 컴퓨터 화면에 나타나게 된다.

계측된 값은 시리얼 포트를 거쳐 계측 컴퓨터로 전달되고, 컴퓨터에 자동으로 저장되며, 계측된 마찰력과 사용한 모형빙 및 추의 무게를 이용하여 마찰계수를 계산할 수 있다.

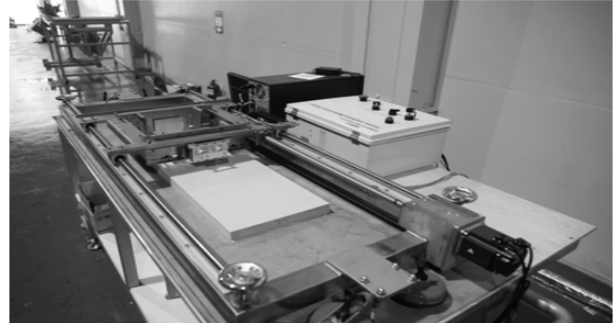


Fig. 2 Photo of frictional force measurement device

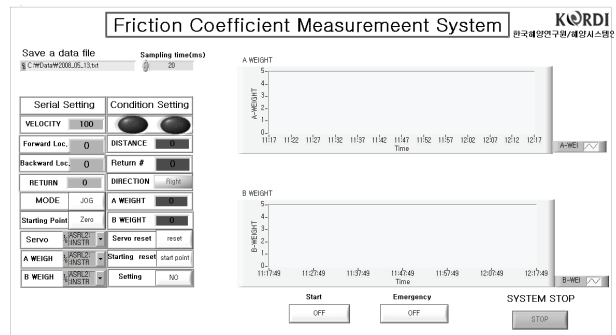


Fig. 3 GUI capture of friction coefficient measurement system

## 3. 시험 절차

마찰계수를 측정하고 계산하는 방법은 여러 시험조건에 따라 다양한 방법으로 진행할 수 있으며, 이번 연구에서는 도장법 개발을 위한 기초 연구가 진행되었다. 따라서 현재 MOERI 선형시험수조에서 사용하고 있는 도장법과 캐나다 NRC - IOT (National Research Council-Institute for Ocean Technology) 빙해수조에서 사용하는 겔코트(Gel-coat)를 이용하여 도장했을 때의 마찰계수의 특성을 비교하였다.

또한 모형빙의 종류, 모형빙의 예인속도, 모형빙의 마찰면 방향, 모형선과 모형빙과의 마찰 상태, 무게의 증가에 따른 마찰계수의 변화 등을 시험 변수로 설정하여 시험하였다.

### 3.1 모형선 시험판

모형선 시험판은 미송 1000mm×300mm×40mm 크기로 제작되었으며, MOERI 선형예인수조에서 기본적으로 사용하는 도장법과 겔코트를 이용한 도장법으로 나누어 제작하였다.

MOERI 선형수조에서 기본으로 사용하는 도장법으로, 투명 샌딩실러를 3-4회 반복하여 무게 및 연마성을 높여주며, 다음으로 노랑색 우레탄 계열의 코레탄 락카를 이용하여 3-4회 도장하며, 마무리로 투명락카를 이용하여 벗겨지지 않도록 처리해 주었다.

겔코트 도장은 MOERI 기본 도장법에 겔코트와 소량의 희석제 및 약 1%의 경화제를 섞은 후 스프레이 건을 이용하여 Fig. 4와 같이 직접 분사하는 방식으로 도장을 마무리하였다.

그리고 마찰계수 측정기의 성능 및 재현성(Repeatability) 시험을 위하여 모형빙과 다양한 재질과의 마찰계수를 측정하였다. Fig. 5, 6과 같이 나무, 유리, 고무, 아연도금 철판 및 연마 철판을 준비하였다.



Fig. 4 Sample of prepared model ship

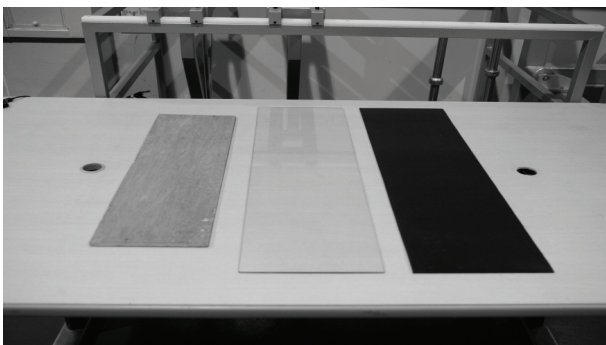


Fig. 5 Prepared wood plate, glass and rubber

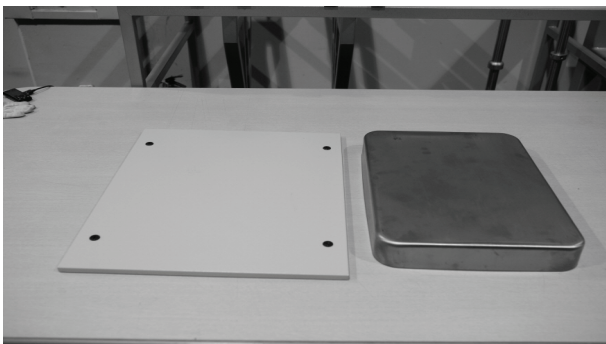


Fig. 6 Prepared painting steel and grinding steel plate

### 3.2 모형빙

사용된 모형빙은 MOERI 빙해수조에서 사용하고 있는 EG/AD-CD 빙으로, MOERI 콜드룸의 소형빙수조를 이용하여 모형빙 생성 절차에 따라 모형빙을 준비하였다.

모형빙 생성 두께는 30mm와 50mm이었으며, 두께 이외의 모든 특성은 같도록 준비되었다. 그리고 생성된 모형빙의 수면 위 방향과 수면 아래 방향으로 나누어 마찰계수를 측정하였다.

### 3.3 시험 변수

우선적으로, 마찰계수 측정 시험은 모형빙의 이동 속도를 0.1, 0.2, 0.3, 0.357m/s로 각각 바꾸어 주면서 시험을 수행하였다. 모형빙의 이동 속도는 빙모형시험 시 환산한 모형선의 예인속도 근처의 값으로 설정하였다.

시험방법은 모형선 시험판 위에 바로 모형빙을 놓고 마찰계수를 측정할 건(Dry)마찰계수 시험법과 모형선 시험판 위에 약 50cc의 담수를 뿌린 후 시험하는 습(Wet)마찰계수 시험법을 사용하였다.

또한 모형빙 상부에 Fig. 7과 같이 5kg, 10kg의 추를 올려, 수직항력의 변화에 따른 마찰계수의 특성을 파악하고자 하였다.



Fig. 7 A weight and model ice for the test

## 4. 시험 결과

본 마찰계수 측정시험에서는 시간에 따른 마찰력을 로드셀을 이용하여 측정하여, 모형빙의 정지 마찰력을 제외한 운동 마찰력의 평균을 구한 후, 얼음의 자중과 추 무게를 더하여 운동 마찰력의 값을 나누어 주는 방식으로 동마찰계수를 계산하였다.

### 4.1 재질에 따른 마찰계수 비교

Fig. 8은 여러 재질과 모형빙 사이의 마찰계수를 나타내고 있다. 나무, 고무, 도금철판, 연마철판, 유리 순으로 마찰계수가 낮게 측정되었으며, 나무의 경우 모형빙의 이동 속도에 따른 마찰계수의 변화가 크게 나타남을 알 수 있었다. 이는 나무결에 따른 나무판의 운동마찰력이 달라져 발생한 것으로 추정된다. 또한, 예상했던 대로 유리와 모형빙 사이의 마찰계수가 가장 작게 측정되었다. 유리의 경우 시험 준비를 위하여 모형빙을 올려 놓았을 경우에도 조금씩 움직일 정도로 마찰계수가 매우 작음을 알 수 있었다.

도금철판의 경우 ITTC 및 국외의 주요 수조에서 표준 마찰계수로 사용하고 있는 0.05로 측정되어 기존의 근거 자료가 타당함을 확인할 수 있는 중요한 시험이었다. 반면 연마 철판의 경우, 도장을 하지 않아 도금철판보다 매끄러웠으며, 마찰계수도 작게 나타남을 알 수 있었다.

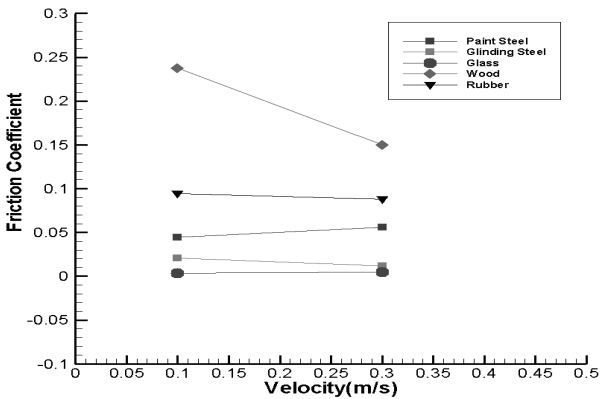


Fig. 8 Frictional coefficients in various materials

### 4.2 모형선 시험판에 따른 마찰계수

Fig. 9는 모형선 시험판 변화에 따른 마찰계수를 측정한 것으로, 모형빙의 예인속도는 0.357m/s(아라온 모형선의 쇠빙시 설계 속도)였으며, 추의 무게는 5kg, 10kg로 변화시켜 주었다. 그리고 모형선 시험판은 크게 MOERI 기본 도장법으로 도장한 모형선 시험판과 겔코트를 공기 중에 분사하여 마른 형태로 뿌려주는 방법과 직접 모형선 시험판에 분사하여 액체 상태로 뿌려주는 방법 등 총 3개의 시험판이 준비되었다. 공기 중에 분사되면 떨어지는 동안 겔코트 입자들이 마른 형태로 굳어지기 때문에, 모형선 시험판 표면 상태가 거칠어지며, 직접 분사하게 되면 액체형태로 모형선 시험판에 코팅되어 지기 때문에, 공기 중에 분사되는 것보다 표면 거칠기가 부드러워진다.

Fig. 9 에서 보듯이 MOERI 기본 도장법에서는 대략 0.02의 마찰계수를 가지는 것으로 측정되었으나, 겔코트에 의한 모형선 시험판에서는 대략 0.2정도로 기본 도장법에 비해 10배 정도 큰 값을 가지는 것으로 측정되었다.

그리고 겔코트를 도장하는 방법에 있어서도 공기 중에 분사하는 방법과 직접 시험판에 분사하는 방법에서도 많은 차이가 나타남을 알 수 있었다. 이는 향후 빙모형시험용 모형선 도장 시 도장하는 방법에 따라 마찰계수가 큰 차이를 발생하게 되어 표준 도장법 정립이 필수적으로 요구되고 있음을 말해주고 있다.

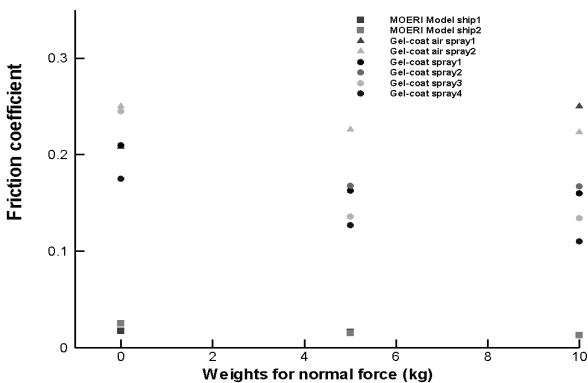


Fig. 9 Frictional coefficient changes when the MOERI model ship and gel-coat painting

### 4.3 이동속도에 따른 마찰계수

Fig. 10은 모형빙 예인속도에 따른 마찰계수의 변화를 보여주는 그래프로서, MOERI 기본 도장법으로 도장된 시험판에 습식 시험법으로 시험하였다. 0.2m/s에서는 추에 따른 마찰계수가 거의 변화가 없지만 0.3m/s에서는 마찰계수 값이 약간 떨어짐을 확인할 수 있었다. 이는 계측 오차 범위 안에 드는 미소량으로 추정되며, 일반적으로 저속(0.1m/s 이하)으로 이동하는 빙-선체 사이의 마찰계수가 고속으로 이동하는 빙-선체 사이의 마찰계수보다 큰 경향을 보임을 확인할 수 있었다.

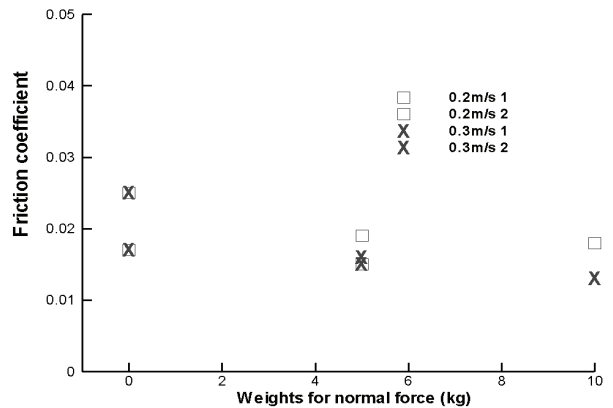


Fig. 10 Test results at various moving speeds

### 4.4 습(Wet)상태와 건(Dry)상태에서의 마찰계수

Fig. 11과 같이 모형빙의 종류 및 예인속도에 따른 습식 시험법(Wet methodology)과 건식 시험법(Dry methodology)의 차이에 따른 마찰계수를 측정하였다.

전체적으로 건식 시험법에 의한 마찰계수가 습식 시험법에 의한 마찰계수보다 높게 나왔으며, 대부분의 수조에서 습식 시험법으로 수행하고 있으며, 실제 모형시험에서도 수조수가 중간에 존재하고 있기 때문에 향후 MOERI 빙해수조에서도 마찰계수 측정 시 반드시 습식 시험법으로 시험을 수행해야 한다는 결론을 얻었다.

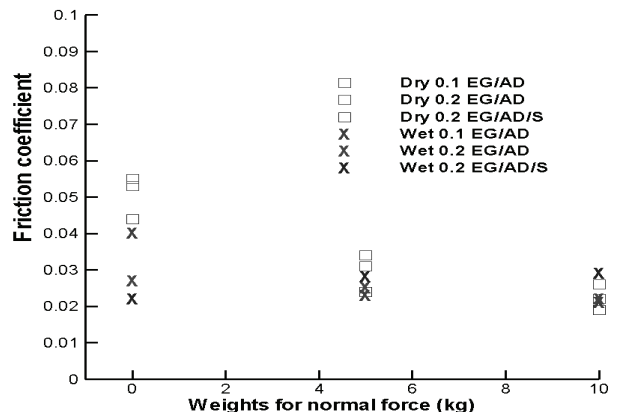


Fig. 11 Test results of wet and dry methodology



### 4.5 마찰면에 따른 마찰계수

Fig. 12는 모형빙 생성 시에 수면을 기준으로 모형빙의 상부면(Upward surface)과 하부면(Downward surface)으로 나누어 모형선 시험판과 마찰했을 시에 계산된 마찰계수를 보여주고 있다. 결론적으로 0.02 정도의 마찰계수 근처에서 마찰계수가 측정되고 있으며, EG/AD 빙의 경우 상부면과의 마찰계수와 하부면과의 마찰계수가 큰 차이가 없음을 확인할 수 있었다.

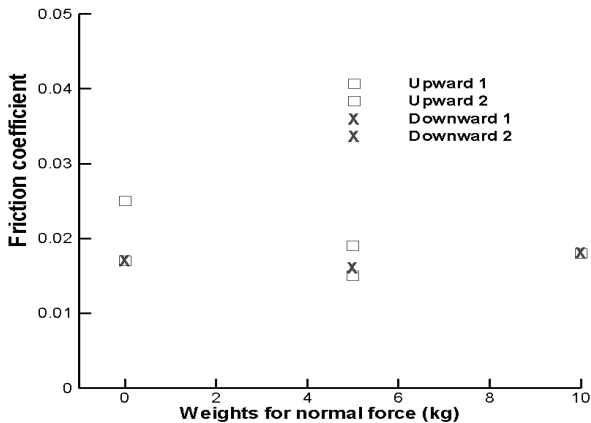


Fig. 12 Test results when model samples meet upward side and downward side

## 5. 결론

본 연구에서는 빙모형시험 시 필수적으로 해석되어야 할 모형선과 모형빙 사이의 마찰계수에 대한 기초 연구를 수행하였다.

우선 모형빙과 모형선 시험판 사이의 마찰계수를 측정할 수 있는 측정기를 자체적으로 제작하였으며, 다양한 조건에서도 마찰계수를 측정할 수 있도록 측정기를 제작하였다.

또한 마찰계수 측정기를 통해 다양한 재질과 모형빙 사이의 마찰계수를 측정하였으며, 국외에서 사용하고 있는 겔코트 도장법을 적용하여 MOERI 기본 도장법과 차이점을 분석하였다.

그리고 빙마찰계수 시험 절차 및 측정 기법 개발을 위하여 모형빙의 이동속도, 모형빙과 모형선 시험판 사이의 윤활, 모형빙의 상부면/하부면 방향에 따른 마찰계수를 분석하여 향후 마찰계수 측정 절차 등을 정립하였다.

또한 MOERI 모형선 기본 도장법에 따른 마찰계수는 너무 작아서 추가적인 도장법이 필요하다는 것을 확인하였으며, 캐나다 NRC - IOT빙해수조에서 사용하고 있는 겔코트 도장은 너무 큰 마찰계수를 발생하기 때문에 새로운 도장법이 개발되어야 함을 확인할 수 있었다.

향후 캐나다 NRC - IOT 빙해수조에서 최종 마찰계수 조정용으로 사용하고 있는 IMRON 페인트를 이용(Bell, et al., 1991)하여

추가적으로 마찰계수 시험을 수행할 예정이며, 모형빙과 모형선 사이의 마찰계수를 조정하기 위한 지속적인 연구가 필요하다.

## 후 기

본 연구는 지식경제부 원천기술개발사업 과제인 “빙해선박의 극지항로 안전운항기술 및 극저온 빙성능 시험평가 기법 개발(PNS151B)” 및 한국해양연구원 주요과제(PES141A)의 지원으로 수행되었으며 이에 감사드립니다.

## 참 고 문 헌

Coast Guard Washington D. C., 1973. Hull lubrication for icebreaking on the RARITAN, *U.S.C.G.*

J. Bell, & S. Newbury., 1991. Kinetic coefficient of friction measurements of EG/AD/S ice on filled imron paint LM-1991-26, *Institute for Ocean Technology*, National Research Council of Canada.

Kimmo, Juurmaa., 1978. The Wartsila air bubble system, *Polar record*, 19.

Lee, C. J. Cho, S. R. Micheal, Lau, & Jung-yong, Wang., 2008. A Study on Improvement of Ice Model Test Procedure, *Journal of the Society of Naval Architects of Korea*, 45(5), pp.455-461.

Lee, J.Y. 2010. History and flow of ship painting, *Journal of the Society of Naval Architects of Korea*, 47(2), pp.59-67.

R, Frederking, A, Barker., 2002. Friction of Sea Ice on Steel for Condition of Varing Speeds, *12th International Offshore and Polar Engineering Conference*.

