

# 극지운항용 빙해선박의 밸러스트 수 결빙방지 기법 연구

정성엽<sup>†</sup> · 이춘주 · 조성락  
한국해양연구원 해양시스템안전연구소

## A Study on Anti-Icing Technique for Ballast Water of Icebreaking Vessels Operating in Ice-Covered Water

Seong-Yeob Jeong<sup>†</sup> · Chun-Ju Lee · Seong-Rak Cho  
Maritime & Ocean Engineering Research Institute, KORDI

### Abstract

When freezing is present on ballast water, it can impose additional loads on the hull and effect on stabilization of ship. The anti-icing techniques of ballast water, therefore, are key criteria for ship safety. The existing anti-icing techniques of ballast tank are hull heating, water circulation and air bubble system etc. In this research, anti-icing performance tests for the ballast water using micro-bubble system and sea water circulation system have been carried out at two temperature conditions(-10°C and -25°C). Ambient temperature, sea water temperature and temperature of the inner parts of the ballast tank are measured and also ballast water conditions are checked during the model test. The applied anti-icing techniques of ballast water, such as micro-bubble system and sea water circulation system show good performance in the low temperature conditions.

**Keywords** : Winterization(방한기술), Ballast water(밸러스트 수), Anti-icing technique(결빙방지 기술), 마이크로 버블장치(Micro-bubble system), 해수순환장치(Sea water circulation system)

## 1. 서론

최근 러시아 부근 페초라해(Pechora Sea)를 비롯해 북극해 주변에 부존된 극지유전개발 및 수송을 위해 새로운 개념의 빙해선박에 대한 수요가 증가하고 있는 추세이며, 이는 조선산업에 있어서 고부가가치선 건조 시장을 활성화 시키는 계기가 되었다.

이처럼 극지해역을 운항하는 빙해선박의 경우 방해역의 극한 환경(low temperature environment) 속에서 안전운항 및 작업이 가능하도록 결빙방지(anti-icing) 설계와 해빙(de-icing) 설계기술이 새롭게 적용되고 있다. 극지역을 운항하는 빙해선박에 대해 미국선급(ABS), 노르웨이선급(DNV), 영국선급(Lloyd's Register), 러시아선급(RMRS) 등에서는 방한기술 표기법(winterization notation)을 정의하고 있다. 일반적으로 방한기술은 선박의 건조과정에서 다루어지는 문제로서 강제규정은 아니지만 선박의 안전운항 및 저온 환경에서 기자재 및 간급·구난 장비 등의 성능과 밀접한 관련이 있는 사항이다.

북극해 지역의 겨울철인 경우 대기온도는 대략 -20°C~-45°C 정도로서 기자재 및 장비 등은 일반적인 내빙선박에 적용되는 기술과 달리 저온상태에서 내한성·내후성을 확보할 수 있도록 설계된다. 특히 북극해 인접 국가들은 빙해선박의 저온설계 기술 및

방한성능 검증 기술을 동시에 확보하고 있다.

국내의 경우 2009년 말 지식경제부 기반조성사업의 일환으로 한국해양연구원 해양시스템안전연구소(Maritime & Ocean Engineering Research Institute, MOERI)에 빙해수조(ice model basin)와 함께 저온 콜드룸(low temperature cold room) 시설이 확보됨으로서 빙해선박에 대한 빙성능 평가와 함께 선박기자재의 저온성능을 평가할 수 있는 인프라가 구축되었다.

본 연구에서는 빙해선박에 대한 방한기술의 개념을 분석한 후 한국해양연구원 해양시스템안전연구소 빙해수조 부속시설인 저온 콜드룸 시설에서 마이크로 버블장치(micro-bubble system) 및 해수순환장치(sea water circulation system)가 적용된 밸러스트 탱크(ballast tank)에 대한 저온성능 평가를 수행하였으며, 이를 바탕으로 효과적인 빙해운항용 선박의 밸러스트 수(ballast water) 결빙방지 기법을 도출하였다.

## 2. 빙해선박의 Winterization

빙해선박의 방한기술은 주로 북극해 지역에서 선체 동결을 고려한 상부갑판 의장시스템의 설계기술 및 선체 밸러스트 탱크의 결빙방지 기술로, 의장품의 착빙/결빙 시 빙강도를 고려한 저온

용 소재의 개발 및 극지 운항용 갑판장비 개발과 밸러스트 수 결빙방지를 위한 설계가 요구된다.

빙해역 선급규정(ice class rule)에서는 극지항로 운항 시 저온 환경에서 선박 의장품들이 기계적 성능을 원활히 발휘할 수 있도록 온도변화에 따른 의장품의 재료특성 변화와 극한환경에서 작동성을 확보하기 위해 방한기술 표기법을 규정하고 있다. 또한 저온 의장품에 관련된 사항은 해상인명안전협약(International Convention for Safety of Life at Sea, SOLAS), 해양오염방지협약(International Convention for the Prevention of Marine Pollution from Ship, MARPOL) 등 국제협약과 미국선급, 영국선급, 노르웨이선급 등의 인증기관에서 규정을 확보하고 있다 (Fridtjof Nansen Institute, 2007). 특히 극지운항용 선박기자재의 핵심기반 기술은 핀란드 빙해수조(Aker Arctic Research Center, AARC)를 비롯해 노르웨이선급, 미국선급 등에서 확보하고 있으며, 저온성능 검증기술을 주도하고 있고 그 밖에 러시아, 독일, 일본 등에서도 자체적으로 기술을 확보하고 있는 실정이다. 국내의 경우 주로 빙해선박용 강재의 재료특성(Hong, et al., 2008)에 관한 연구가 수행된 바 있다.

빙해선박에 적용되는 방한기술의 핵심고려사항은 Fig. 1에서처럼 흡수선 하부와 흡수선 상부로 구분할 수 있다. 즉, 흡수선 하부는 크게 밸러스트 탱크의 결빙방지 대책 및 선체내부 단열문제와 관련이 있으며, 흡수선 상부 부분은 갑판장비 및 항해, 통신장비에 대한 결빙방지 및 해빙설계 기법으로 구분할 수 있다. 최근 적용되고 있는 저온용 선박기자재의 결빙방지 기술과 해빙설계 기술은 열선코일 및 단열재 시공과 보호막 설치, 스팀가스 등을 이용한 방법이 가장 많이 사용되고 있다(Lloyd's Maritime Academy, 2009)



Fig. 1 Key considerations for winterization

선박기자재의 저온성능 평가 시 러시아, 핀란드, 노르웨이 등의 국외 콜드룸 시설에서 수행되고 있는 실정이나 최근 국내에도 소규모의 콜드룸 또는 저온챔버 시설이 확보되어 기자재에 대한 저온성능 시험을 수행하고 있다. 아울러, 극지운항 생존성 향상 및 인명구조 기술의 경우 북유럽 국가에서는 구난장비 업체와 전문연구기관과의 공동연구를 통해 장비를 개발하고 있으나 국내의 경우 다수의 내빙선박 건조경험을 바탕으로 구조정 또는 구난장비에 대한 핵심기술 개발에 많은 노력을 기울이고 있는 실정이다.

언급한 바와 같이 MOERI 저온 콜드룸 시설에서는 선박기자재의 방한성능 평가와 관련해 결빙방지 및 해빙설계 성능시험과 항해/통신/갑판장비 및 구난/인명구조 장비 등의 저온성능 평가시험이 가능하다.

일반적으로 선박기자재에 대한 방한기술은 크게 category I, II로 구분할 수 있다. 여기서 category I은 결빙방지 설계에 관련된 사항으로서 통신장비, 추진기, 계류장비, 소화장비, 구난장비 등과 같이 극지역 운항 시 장비에 착빙이 발생하더라도 항시 사용이 가능해야하는 부분이다. Category II는 해빙설계에 관련된 사항으로 작업트로 또는 계단, 매니폴더(manifolder), 난간, 외부 파이프라인, 크레인 등은 일정시간 안에 해빙기능을 통해 착빙을 제거할 수 있어야 한다(Det Norske Veritas, 2005).

### 3. 밸러스트 수 결빙방지 시험

빙해선박의 극지항로 운항 시 밸러스트 수는 대기온도와의 차이와 밸러스트 수위 및 선박의 흡수차이 등에 의해 결빙(freezing)이 발생하게 된다. 이처럼 밸러스트 수가 결빙되면 흡수를 변화시키고 선체트림(trim)을 변화시켜 저항성능 및 안정성에 큰 영향을 미치게 된다(Fig. 2 참조). 그러므로 빙해선박의 밸러스트 수 결빙 문제는 극지역 운항 시 중요한 문제로 인식이 되고 있으며, 이를 방지하기 위해 에어 버블(air bubble) 장치 및 열선코일(heating coil) 설치 등의 방법이 사용되고 있다.



Fig. 2 Freezing of ballast water

미국선급에서는 밸러스트 수의 결빙방지를 위한 설계온도 (Design Service Temperature, DST)를  $-30^{\circ}\text{C} \sim -10^{\circ}\text{C}$ 로 구분하고 있으며, 밸러스트 수의 결빙방지를 위해 선체 내부에 난류발생 장치(turbulence-inducing system) 또는 난방 장치(heating system)가 사용되고 있다(Legland, et al., 2006).

본 연구에서는 효과적인 밸러스트 수 결빙방지 기법을 도출하기 위해 기존의 방법과 달리 마이크로 버블장치와 해수순환장치를 제작한 후 저온 콜드룸을 이용해 겨울철 빙해역과 유사한  $-25^{\circ}\text{C}$  상태를 모사한 후 저온 성능시험을 수행하였다. 아래 Fig. 3은 소형 밸러스트 탱크(miniature ballast tank)의 제원을 보여주고 있다. 여기서 소형 밸러스트 탱크는 일반적인 선박의 밸러

스트 탱크의 형상을 모사하였으며, 해수면과 직접적으로 접촉하는 면은 측면과 바닥으로 제한을 하였다.

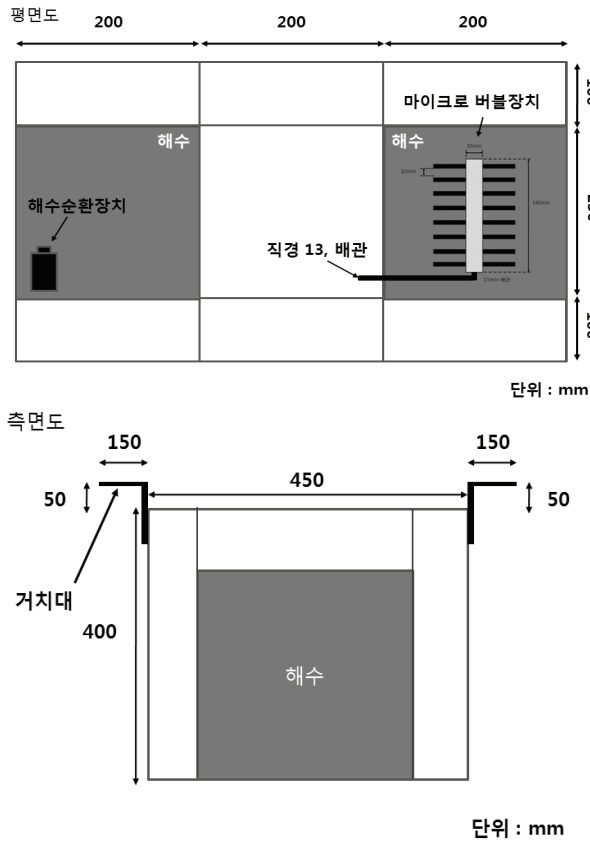


Fig. 3 Dimension of miniature ballast tank

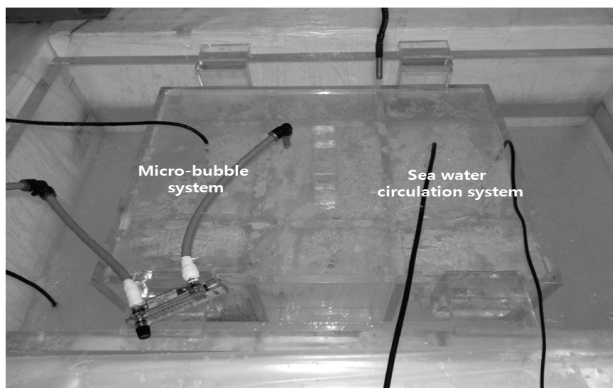


Fig. 4 Anti-icing test of miniature ballast tank in low temperature cold room

Fig. 4에서처럼 소형 밸러스트 탱크에는 각각 15ℓ의 해수(sea water)가 채워져 있으며, 밸러스트 수위는 흘수보다 0.1m 정도 높은 상태를 모사하였다. 그리고 모형시험은 -10℃와 -25℃ 상태에서 수행되었으며, 해수순환장치의 유량(flow)은 350cc/min, 1000cc/min이고 마이크로 버블장치의 유량은 200cc/min, 400cc/min이 사용되었으며, 각 유량은 사전 시험을 통해 도출된

값을 기준으로 선정되었다.

저온성능 시험에서는 해수가 채워진 소형 빙수조(miniature ice model basin)에 소형 밸러스트 탱크를 설치한 다음 -10℃에서 3시간 후 밸러스트 수의 결빙상태를 확인하였다. 그리고 -25℃인 상태에서 소형 밸러스트 탱크 내부에 마이크로 버블장치 및 해수순환장치를 설치한 후 선박의 밸러스트 수 결빙방지를 위해 사용된 마이크로 버블장치 및 해수순환장치의 유량에 대한 성능 시험을 수행하였다. 특히 -25℃ 상태에서의 시험을 통해 선정된 유량은 -10℃ 상태에서도 성능을 만족한다는 전제하에 수행되었다. 아래 Table 1에는 시험조건이 정리되어 있다.

Table 1 Test condition of anti-icing test

System	Temperature	Flow
Micro-bubble system	-10℃ at 3hrs	Check the ballast water condition
	-25℃ at 3hrs	200cc/min at 1hr 30min, 400cc/min at 1hr 30min
Sea water circulation system	-10℃ at 3hrs	Check the ballast water condition
	-25℃ at 3hrs	350cc/min at 1hr 30min, 1000cc/min at 1hr 30min

Fig. 5는 밸러스트 시험 시 대기온도와 해수온도 그리고 마이크로 버블장치 및 해수순환장치가 설치된 밸러스트 탱크 내부의 해수온도를 도시한 그래프이다. 여기서 파란색 실선은 대기온도를 나타내며, 보라색 점선은 해수의 온도, 노란색 얇은 점선과 밝은 파랑색 굵은 점선은 각각 마이크로 버블장치가 설치된 곳의 해수 온도와 해수순환장치가 설치된 곳의 해수 온도를 나타낸다. 또한 시험과정 중 대기온도는 -10℃에서 -25℃로 변화를 시켜가면서 밸러스트 수의 결빙상태를 확인하였다.

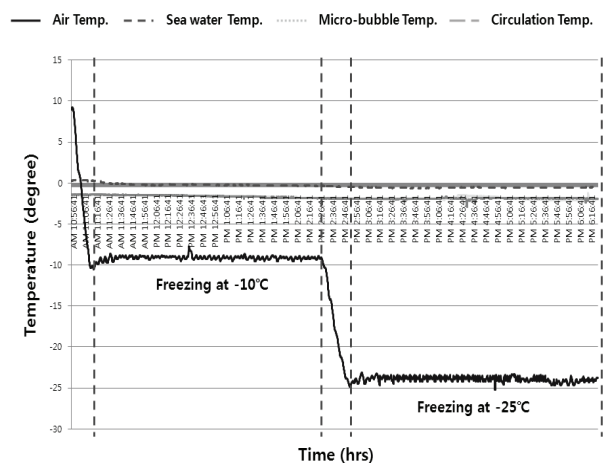


Fig. 5 Temperature variation in the anti-icing test for miniature ballast tank

Fig. 6에서처럼 마이크로 버블 및 해수순환장치를 작동시키지 않은 경우 대기온도가 -10℃, -25℃인 상태에서 밸러스트 수가

결빙됨을 알 수 있다. 특히  $-25^{\circ}\text{C}$ 인 경우 밸러스트 수의 결빙발생까지의 시간은 현저히 줄어들음을 알 수 있으며, 밸러스트 탱크가  $-25^{\circ}\text{C}$ 의 저온상태에서 지속적으로 노출될 경우 밸러스트 수 전체가 결빙됨을 확인 할 수 있다. 그리고 마이크로 버블장치에서 유량이  $200\text{cc}/\text{min}$ 인 경우 밸러스트 수 표면의 대부분이 결빙되었으나,  $400\text{cc}/\text{min}$ 인 경우에는 결빙이 거의 발생하지 않았으며, 해수순환장치의 경우 유량이  $350\text{cc}/\text{min}$ 에서는 밸러스트 수의 표면에 결빙이 발생하였고  $1000\text{cc}/\text{min}$ 인 경우 결빙은 발생되지 않았다(Fig. 7과 Fig. 8 참조).

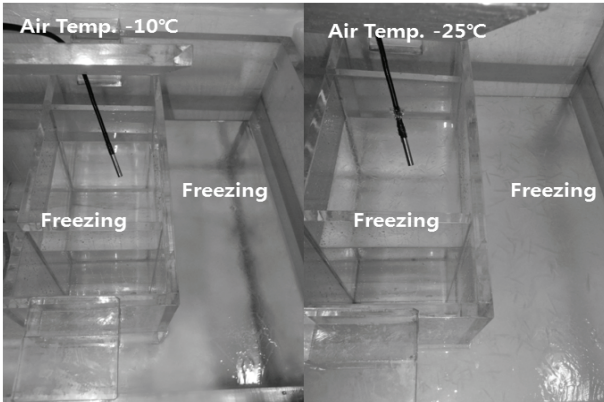


Fig. 6 Freezing of ballast water in low temperature ( $-10^{\circ}\text{C}$ ,  $-25^{\circ}\text{C}$ )

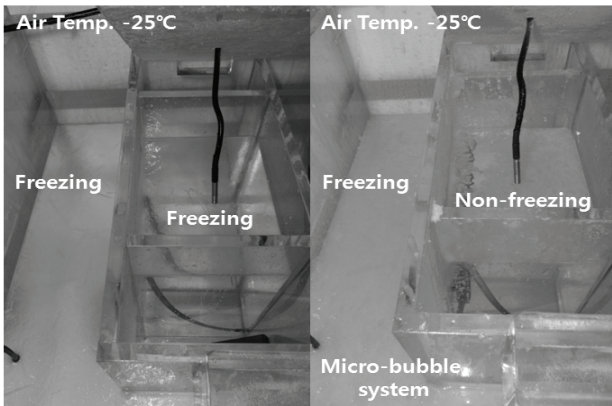


Fig. 7 Condition of ballast water for  $400\text{cc}/\text{min}$  micro bubble system

Fig. 7과 Fig. 8은  $-25^{\circ}\text{C}$ 의 저온상태에서 마이크로 버블장치 및 해수순환장치를 설치하지 않은 경우와 설치한 경우 밸러스트 수의 결빙발생 상태를 보여주고 있다. 여기서 밸러스트 수의 결빙방지를 위해 사용된 마이크로 버블장치와 해수순환장치의 유량은 각각  $400\text{cc}/\text{min}$ ,  $1000\text{cc}/\text{min}$ 이 적정함을 알 수 있으며, 결빙방지를 위해 도출된 기법의 경우 저온환경에서 효과적인 성능을 발휘함을 알 수 있다.

일반적으로 밸러스트 수는 외부의 해수와 접하는 본체 내 측면 및 탱크 표면에서부터 결빙이 발생하며, 이러한 상태가 지속되면 밸러스트 수 전체가 결빙하게 된다. 그러므로 이를 방지하기 위해 밸러스트 탱크 내 측면 및 밸러스트 수 표면의 결빙방지를 위한 기법이 적용되어야 한다.

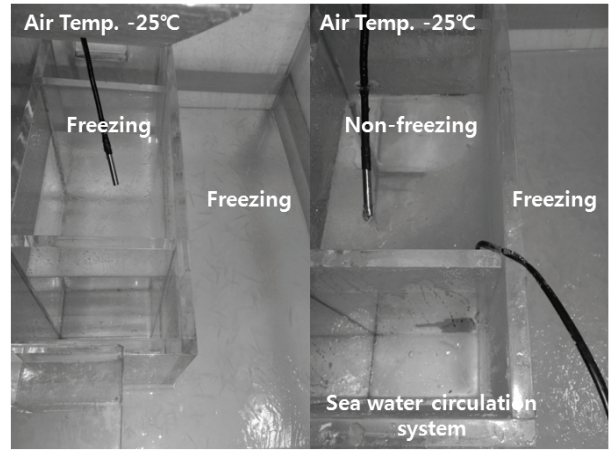


Fig. 8 Condition of ballast water for  $1000\text{ml}/\text{min}$  sea water circulation system

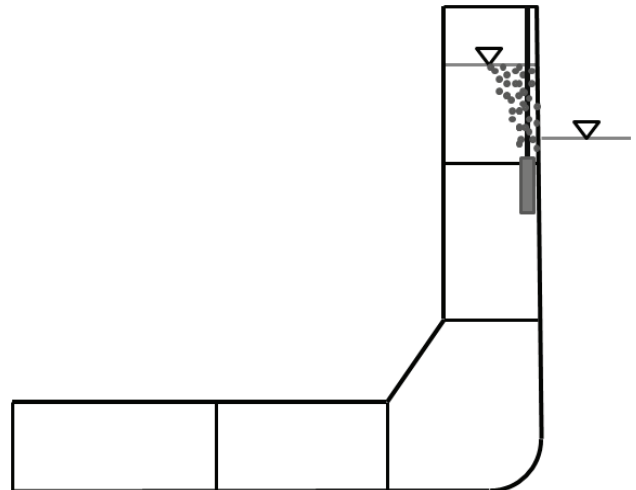


Fig. 9 Concept of micro-bubble system for full-scale ballast tank

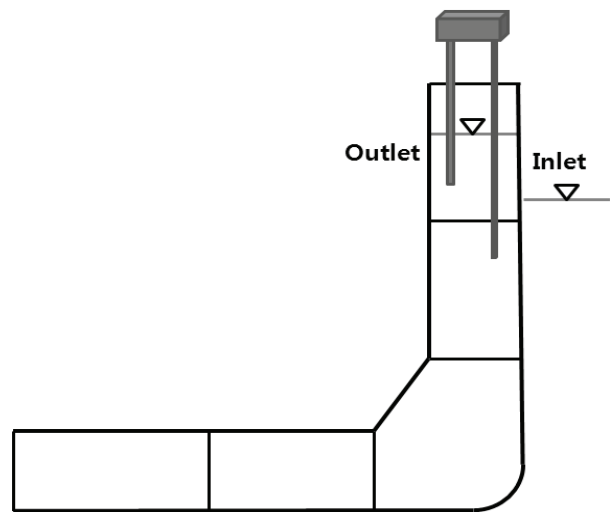


Fig. 10 Concept of sea water circulation system for full-scale ballast tank

Fig. 9와 Fig. 10에는 모형시험에서 사용된 기법을 바탕으로 실 규모(full-scale)에 적용될 수 있도록 개념도를 도출하였다. 마이크로 버블장치의 경우 밸러스트 수 표면 아래 부분에 위치시킴으로서 표면이 결빙되는 현상을 방지할 수 있도록 하였다. 그리고 해수순환장치의 경우 토출구는 밸러스트 수 표면 아래쪽에 위치시키고 흡입구는 토출구보다 아래쪽에 위치시킴으로서 보다 효율적인 해수순환이 이루어지도록 구성할 수 있다. 아울러, 해수의 염분 차이에 따른 밀도 차이를 고려하여 해수유입에 따른 자연적인 해수순환 효과를 이용한 방법이 적용될 수 있으며, 밸러스트 탱크 내부에 초음파 센서를 장착함으로써 초음파를 이용한 밸러스트 결빙방지 기술을 적용할 수 있을 것으로 판단된다.

## 4. 결론

본 연구에서는 한국해양연구원 해양시스템안전연구소 빙해수조의 부속시설인 저온 콜드룸 시설을 활용해 빙해운항용 선박의 밸러스트 수 결빙방지 기법에 대한 성능시험을 수행하였다.

우선 소형 빙수조와 소형 밸러스트 탱크를 제작한 후 밸러스트 수위가 선박의 흘수보다 높은 조건에서 대기온도를  $-10^{\circ}\text{C}$ 에서  $-25^{\circ}\text{C}$ 로 변화시키면서 결빙상태를 확인하고  $-25^{\circ}\text{C}$ 에서 마이크로 버블장치와 해수순환장치의 유량에 따른 결빙방지 기술을 검증하였다.

본 연구에서는 마이크로 버블장치를 이용해 미세한 공기방울을 발생시켜 밸러스트 수의 상부 표면과 외부 해수와 접하는 본체 내 측면이 결빙되는 것을 방지시켜줌으로서 밸러스트 수가 결빙되는 것을 방지하였다. 특히 마이크로 버블장치의 경우 밸러스트 수면 아래에 위치시키고 밸러스트 본체 내 측면 쪽으로 마이크로 버블을 발생시키는 방법을 사용하였다. 실제 현장에서 해수순환장치를 이용하는 경우 토출구를 밸러스트 수면 상부 근처에 위치시키고 흡입구를 토출구 보다 아래쪽에 위치시킴으로서 밸러스트 수를 효과적으로 순환시킴으로서 결빙을 방지시킬 수 있다. 또한 해수순환펌프는 밸러스트 펌프실에 배치시킴으로서 보다 효율적인 공간 확보가 가능할 것으로 판단된다.

저온 콜드룸은 빙해선박에 대한 내빙설계 및 기자재 저온성능 시험을 수행할 수 있는 시설로 설계되었다. 그러므로 향후 선박기자재 및 기타 방한장비에 대한 성능시험이 가능할 것으로 판단되며, 저온성능 시험 및 검증을 통해 고부가가치선박인 빙해선박에 적용되는 핵심설계 및 건조기술 확보가 가능할 것으로 예상된다.

특히 빙해선박의 기자재 즉, 항법장치, 전자통신장치, 각종 의장시스템, 갑판장비 그리고 극지역 운항 시 생존성과 관련된 예인장치, 화재진압, 생존장비 등과 같은 긴급구난 장비 등에 관한 핵심기술 개발이 가능하며, 빙해선박의 내빙설계 및 기자재 저온성능 검증기법 구축을 통해 기술표준화를 선도할 수 있을 것으로 판단된다.

## 후 기

본 논문은 지식경제부 산업원천기술개발사업인 "빙해선박의 극지항로 안전운항기술 및 극저온 빙성능 시험평가 기법 개발" 중 "극지용 저온 설계 및 Winterization 평가 기술 (PNS151C)" 과 한국해양연구원 해양시스템안전연구소 일반과제인 "수조 및 대형 터널의 새로운 시험기법 개발" (PES132B) 과제의 연구비 지원으로 수행된 결과임.

## 참 고 문 헌

- Det Norske Veritas (DNV), 2005. *DNV Rules for Classification of Ships*, DNV.
- Fridtjof Nansen Institute (FNI), 2007. *The IMO Guidelines for Ships Operating in Arctic Ice-Covered Waters*, FNI.
- Hong, J.H. et al., 2008. Mechanical Characteristics of Stainless Steel under Low Temperature Environment. *Journal of the Society of Naval Architects of Korea*, 45(5), pp.530-537.
- Legland, E. Conachey, R. Wang, G. & Baker, C., 2006. *Winterization Guidelines for LNG/CNG Carriers in Arctic Environments*. ABS Technical Paper, pp.305-316.
- Lloyd's Maritime Academy, 2009. *Shipboard Winterization the technical challenge for operations in ice and cold climates*. Lloyd's Maritime Academy Presents.



정성엽

이춘주

조성락