

## 프리징 현상을 고려한 발라스트 탱크 내 유동 및 열전달 해석

구명준<sup>†\*</sup>, 최재웅\*, 전진환\*\*, 김종현\*\*\*

삼성중공업 조선해양연구소\*  
삼성중공업 조선설계\*\*  
인하대학교 선박공학과\*\*\*

### Fluid Flow and Heat Transfer Analysis on Freezing in Water Ballast Tank

Myung-Jun Koo<sup>†\*</sup>, Jae-Woong Choi\*, Jin-Hwan Jeon\*\* and Joung-Hyun Kim\*\*\*

Marine Research Institute, Samsung Heavy Industries Co., Ltd.\*  
Ship Design Team, Samsung Heavy Industries Co., Ltd.\*\*  
Dept. of Naval Architecture and Ocean Engineering, Inha University\*\*\*

#### Abstract

Several anti-freezing systems, such as heating coil system, hot air spray system, ballast water circulation system and air bubbling system, have been applied to the water ballast tanks for the vessels, operating in cold sea. In this study, numerical simulations were performed to investigate effectiveness of the air bubbling system used for winterization design concept for water ballast tank. Through the results of this study, it became clear that the air bubbling system equipped in each frame of water ballast tanks was effective to prevent freezing along the outer surface by promoting convective heat transfer.

※Keywords: Winterization(방한), Air bubbling system(공기 방울 시스템), FLUENT

#### 1. 서언

지속되어온 세계 경제의 활황과 주요 유전지대를 둘러싼 환경의 변동성 그리고 중국과 같은 급부상하는 석유 소비국의 등장은 석유 수급 상황을

위험해 왔으며 유래 없는 세계의 고유가 시대를 이끌었다. 이러한 유가의 상승은 하향 안정세 시절 개발비와 운송비의 채산성이 맞지 않아 포기해 왔던 극지지역의 석유와 가스 개발에 경제성을 부여해 주었다. 북극해 연안에는 세계 원유 매장량의 1/4 이상 그리고 가스 매장량의 1/3 이상이 분포되어 있다. 가시화되고 있는 서부 시베리아 및 극동 아시아 개발 프로젝트의 석유 및 가스의 주

접수일: 2006년 11월 30일, 승인일: 2007년 3월 16일

†교신저자: mj43.koo@samsung.com, 055-630-6906

요 수요처는 미국, 유럽, 동아시아가 될 것이며, 이를 운송하기 위한 유조선 및 LNG선의 발주 수요가 예상된다. 또한, 러시아의 경제력 확대로 인한 물자 수송 및 유가를 절약할 수 있는 최적 항로로 북극해 항로가 적극 모색되고 있으며 향후 다수의 쇄빙 화물선의 발주가 예상되고 있다.

하지만, 상시적으로 매우 낮은 영하의 온도까지 떨어지는 매서운 기후에 혹독한 바람조건까지 맞서야 하는 자연 조건에 안정적으로 운항 가능한 선박의 개발은 일반적인 선박 개발에서는 경험할 수 없는 어려운 점이 많다. 이러한 선박의 설계에는 방한(Winterization) 개념이 도입되며 이는 착빙이 될 수 없도록 하거나 착빙되었더라도 운용 요구 시에 정해진 시간 내에 장비가 사용 가능하도록 하는 설계 개념이라 할 수 있겠다.

발라스트 탱크는 주로 탱크 상부에 위치한 수면과 외판 근처에서 어는 현상이 발견되는 것으로 알려져 있다. 특히, 발라스트수 교환 시에 공기의 유입, 유출 경로가 되는 탱크 상단에 위치한 환기 파이프에 착빙이 발생할 경우 발라스트 탱크가 파손되는 사고사례도 보고 되었다. 또한, 선체의 외판에 착빙이 발생한 상태에서는 선체가 설계 강도 및 강성을 만족할 수 없으므로 구조 안전상 유해할 수 있다. 발라스트 탱크의 동결방지 시스템에는 열선 시스템(heating coil system), 증기 살포 시스템(hot air spray system), 발라스트수 순환 시스템(ballast water circulation system) 그리고 공기 방울 시스템(air bubbling system) 등이 있다. 공기 방울 시스템은 대표적인 발라스트 탱크 내 동결방지 시스템으로 널리 사용되고 있으나 지금까지 그 유효성과 효과 정도가 증명되거나 평가된 사례가 없었다. 본 연구에서는 방한설계 개념으로 공기 방울 시스템이 적용된 발라스트 탱크에 대해 자체 개발된 수치모사법을 활용하여 성능 및 설계 최적화 안을 평가하였다.

본 연구에 앞서, Freitag and McFadden(1997)은 물에 대한 빙결 메커니즘의 원리 및 물성 변화를 심층적으로 다루는 내용의 저서를 발간하였다. 또한, Kowalewski(1999)는 얼음 주위에서 상변화가 동반된 유체의 온도 및 유동에 대해 TLCs (Thermo chromic Liquid Crystal Tracers) 기법을

활용하여 실험적 측정을 시도하였다.

## 2. 수치해석 기법 및 해석방법

### 2.1 해석기법 및 지배방정식

유체 및 에너지의 수송현상의 해석에 필요한 방정식은 질량, 운동량, 에너지 보존법칙을 미소의 체적에 적용하여 얻어진 비선형 연립 편미분방정식이다. 이를 정리하면 아래와 같다.

Continuity equation

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x_i}(\rho u_i) = 0 \quad (1)$$

Momentum conservation equation

$$\begin{aligned} \frac{\partial}{\partial t}(\rho u_i) + \frac{\partial}{\partial x_j}(\rho u_i u_j) &= -\frac{\partial p}{\partial x_i} + \frac{\partial \tau_{ij}}{\partial x_j} + \rho g_i \\ \tau_{ij} &= \left[ \mu \left( \frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right) \right] - \frac{2}{3} \mu \frac{\partial u_l}{\partial x_l} \delta_{ij} \end{aligned} \quad (2)$$

여기서  $\tau_{ij}$ 는 힘 텐서(stress tensor)이며,  $i$ 와  $j$ 는  $i$  방향의 수직면에  $j$  방향으로 작용하는 힘을 가리킨다.  $\mu$ 는 동점성계수이며,  $\delta_{ij}$ 는 크로네커 델타(Kronecker delta)로  $i=j$ 에서 1이며 그 외에 0이 된다.

Energy conservation equation

$$\begin{aligned} \frac{\partial}{\partial t}(\rho h) + \frac{\partial}{\partial x_i}(\rho u_i h) \\ = \frac{\partial}{\partial x_i} \left( K \frac{\partial T}{\partial x_i} \right) + \frac{\partial p}{\partial t} + u_i \frac{\partial p}{\partial x_i} + \tau_{ij} \frac{\partial u_i}{\partial x_j} + S_h \\ h = \sum_i m_i h_i \tau_{ref} C_{p,i} dT \end{aligned} \quad (3)$$

여기서  $h$ 는 엔탈피이며,  $K$ 는 열전도계수 그리고  $S_h$ 는 열원이다.

이방정식(two-equation) 계열의 표준  $k-\epsilon$  난류 모델이 난류에 대한 운동에너지와 소산율을 계산하기 위해 적용되었다. 본 난류 모델에서는 벽 근처에서 대수속도법칙(Log law)에 의해 난류의 두 파라미터를 계산한다.

고정된 격자계에 대한 각 상 간의 계면을 계산

하는 VOF (Volume Of Fluid) 모델이 공기 방울의 궤적을 추적하기 위해 고려되었다. 본 모델은 불침투성의 두 개 이상의 유체간 계면을 추적할 수 있으며 각 상에 대해 하나의 운동지배방정식을 계산하고 또한, 계산 격자에 대해 각 상의 체적 비율을 계산한다.

본 연구의 수치 해석은 FLUENT(2005)를 통해 수행되었다.

2.2 상변화 및 잠열에 대한 모델링

발라스트 탱크 내 빙결 현상을 모사하기 위해 응고 모델(solidification model)을 사용하여 비정상 상태에 대한 해석을 수행하는 것이 가장 적절할 것이다. 그러나 이러한 접근은 표면에서 해수가 얼음으로 착빙되는 과정 동안의 긴 소요 기간과 탱크 구조의 복잡성으로 인해 전산상의 계산 시간과 수렴성 조건 등이 열악하였다.

이미 알려진 대로 상변화 시에는 잠열로 불려지는 큰 양의 에너지 교환이 발생해야 한다. 이러한 열은 일반적으로 온도가 변화되는 현열에 비해 매우 큰 양이다. 이러한 이유로 상변화 시에는 많은 에너지가 요구되어 일반적으로 발생하기가 쉽지 않다. 현열은 물질과 질량이 정해지면 비열을 이용하여 쉽게 계산될 수 있다. 반면에 잠열은 물질과 상변화의 종류에 따라 정해진 값을 가지는 것이 특성이다. 해수의 빙결에서는 어는점에 따라 결정된다. 일반적으로 35% 염분농도의 해수의 어는점은 -1.94°C이다. 어는점에서는 열교환량에 따른 온도 변화 곡선이 현열과는 다른 양상을 보인다.

이론적으로, 순수한 유체는 어는 동안에 온도 변화가 없다. 그러나 해수와 같은 혼합물에 대해서는 약간의 온도 변화가 있다. 실제로 상변화 시에는 비열은 존재하지 않으나 빙결로 기인하는 열변화량 만큼을 보상해주기 위해 임의적인 작은 온도 구간에 가상의 비열을 정의하는 것처럼 단순히 접근하는 것이 가능해 보인다. 이러한 작은 온도 구간은 해수와 같은 혼합물에서 온도 거동 상, 그 정의가 더욱 합리적인 면을 가지게 된다. 본 연구에서는 어는점 근처에서 특정 온도 구간에 가상의 비열을 정의하여 잠열에 해당하는 만큼의 현

열을 고려함으로써 탱크 내 빙결 현상을 수치적으로 모사하고자 한다. 따라서 비열은 Fig. 2에 나타난 세 가지 국면에 따라 다르게 적용되어 열교환량을 계산한다. 액체상에서는 해수의 비열값이 적용되며 고체상에서는 해수의 얼음에 대한 비열값이 적용된다. 그리고 상변화 영역(Mush zone)에 대해서는 잠열을 보상하는 가상의 비열이 적용된다.

2.3 격자 구성 및 계산 조건

화물선과 탱커의 발라스트 탱크는 구조상 안정성을 위해 많은 프레임으로 구성되어 있다. 이러

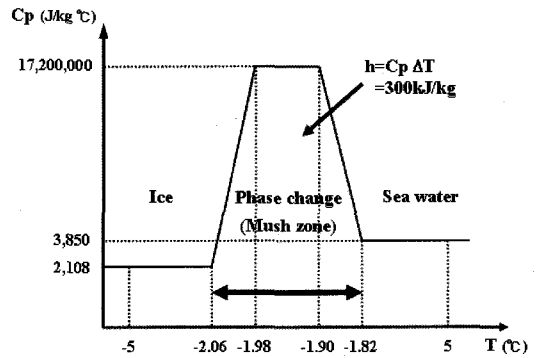


Fig. 1 Entropy - Temperature curve while freezing and melting

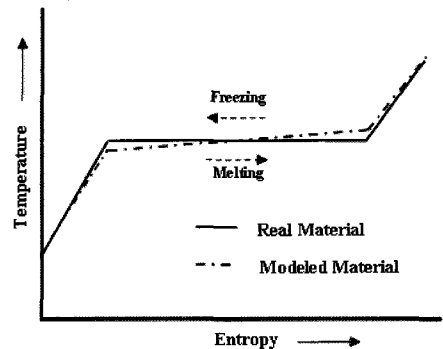


Fig. 2 Modeled latent heat defined by variable specific heat at the range of freezing point

한 프레임들은 탱크 안의 유동 현상 및 열 흐름과 밀접하게 관련되어 있다. 또한 각 프레임을 이루는 격벽에는 홀과 보강재가 시공되어 있어 복잡한 구조적 형태를 띠고 있다. 이러한 이유로, 세 개 프레임만으로 구성된 발라스트 탱크에 대해 해석을 수행하였다. 그리고 첫 번째 프레임에만 공기 방울 시스템을 설치하였다. 이것은 공기 방울 시스템이 있을 때와 없을 때의 효과를 판단하고자 함이었다. 사용된 격자는 약 41만개로 정렬 격자 형태로 만들어졌다.

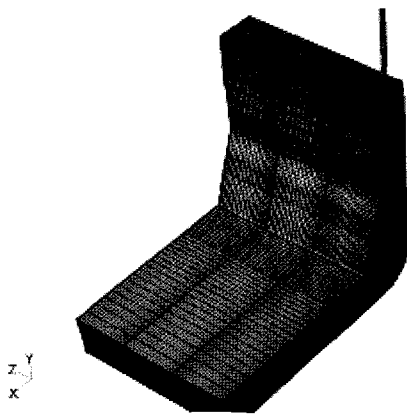


Fig. 3 Mesh of numerical model

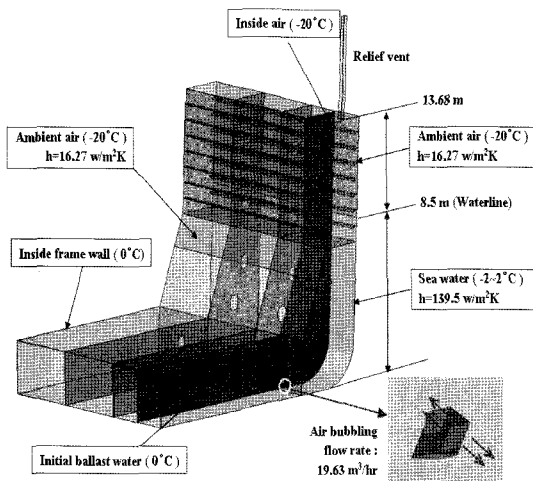


Fig. 4 Schematics of water ballast tank including detailed boundary conditions

외기의 온도는  $-2^{\circ}\text{C}$ 이며 이는 북해의 Norne 해역의 연중 최저 온도이다. 외부 해수의 온도는  $-2, 0, 2^{\circ}\text{C}$ 의 세 가지 경우를 고려하였다. 그리고 여기서  $2^{\circ}\text{C}$ 의 해수는 북해 Norne 해역의 1월 ~ 3월 중 연중 최저 수온이다. 대기에 노출된 외판 주위의 대류 열전달 효과가 고려되었다. 공기 방울 시스템에서 분사 공기 방울의 양은  $19.63 \text{ m}^3/\text{hr}$ 이다.

### 3. 해석 및 결과 고찰

#### 3.1 해석 결과

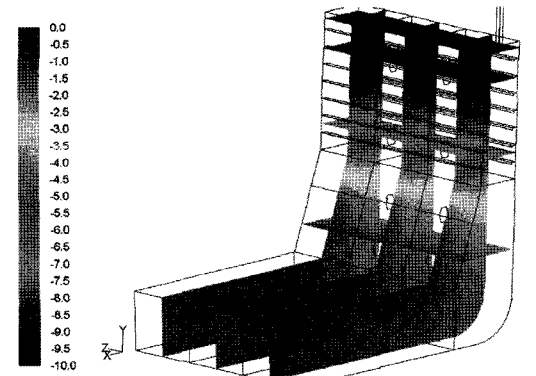
상변화에 대한 잠열을 고려하지 않은 경우와 잠열을 고려한 경우에 대하여 해석을 수행하고 이를 비교 고찰하였다. 본 장의 해석 결과는 해수의 온도가  $-2^{\circ}\text{C}$ 인 경우에 대한 것이다. Fig. 5에서 확인할 수 있듯이 잠열이 고려되지 않은 경우는 발라스트 탱크 내 상부 영역 대부분이 해수의 어는점보다 낮아 결빙을 의심할 수 있다. 또한 외기 조건으로부터 열전달이 전도에 의하여 일어남에 따라 상하부의 온도 편차가 큼을 알 수 있다. 반면에 잠열을 고려한 경우에는 상변화의 잠열로 인한 위치에 따른 온도 편차가 줄어든 결과를 확인할 수 있다.

Fig. 6에는 앞쪽 첫 번째 프레임에 공기 방울을 분사한 경우와 그렇지 않은 경우에 대한 해석 결과이다. Fig. 5와 같이 공기 방울 분사가 없을 때 상대적으로 외기 온도가 낮은 상부에서  $-7 \sim -2^{\circ}\text{C}$ 를 나타낸 반면 공기 방울이 분사되는 경우에 대해서는 탱크 내부의 온도 분포가 어느정인  $-1.94^{\circ}\text{C}$ 를 기준으로  $\pm 0.1^{\circ}\text{C}$  내외로 평균화 되어지는 결과를 보이고 있다. 이는 공기 방울이 분사됨에 따라 발라스트 탱크 내에 발생하게 되는 유동에 의한 열전달이 기존의 전도에 의존한 열전달보다 원활하게 에너지를 탱크의 각 부위에 이송해줌으로써 내부 온도 격차를 줄이는 것을 반증한다. 특히 (b)의 좌측상단의 온도 분포는 온도 구간을  $-2.05 \sim -1.80^{\circ}\text{C}$ 로 나타낸 것인데, 공기 방울 분사가 없을 때와 동일한 분포를 보이나 온도 편차가 괄목할만하게 줄어들었음이 재확인 된다.

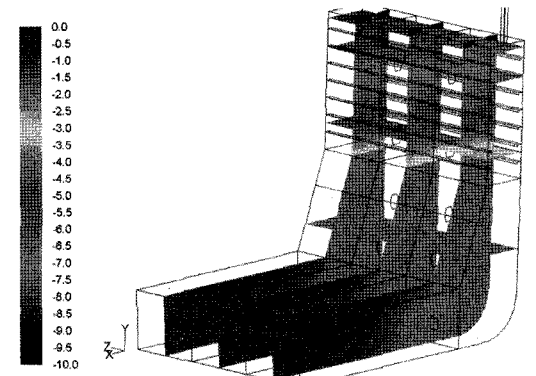
Fig. 7과 Fig. 8은 발라스트 탱크 내에서 발생

하는 유동특성을 보여주고 있다. Fig. 7은 공기 방울의 궤적을 보여주고 있는데, 노즐의 위치와 상부 구조의 홀 위치가 일치하지 않기 때문에 공기 방울들이 일차적으로 상부 구조의 하단부에 모인 후 홀로 빠져나가는 것을 확인할 수 있다. 이러한 현상으로 인하여 공기가 갖는 체적 및 부력이 커짐에 따라 유동의 발생 정도가 더욱 커지는 효과가 있음을 추측할 수 있다. Fig. 8은 발라스트 탱

크내의 유동을 속도 및 유선으로 보여주고 있다. 그림에서와 같이 탱크의 하부에서는 앞쪽으로 치우친 노즐에서 분사된 공기 방울에 의해 유발되는 유동이 주를 이루어 앞쪽에서는 상승 유동이 뒤쪽에서는 하강 유동이 형성된다. 반면에 탱크의 상부는 상부 구조의 위쪽에서 홀로 탈출되는 공기

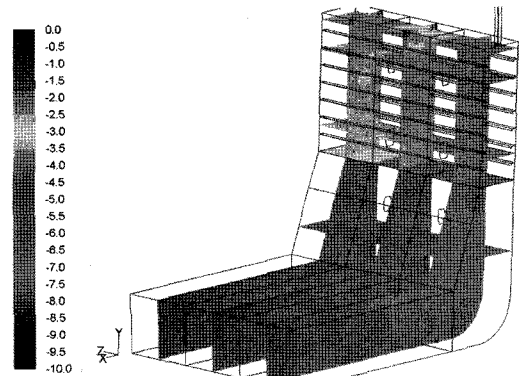


(a) Using constant specific heat for ballast water

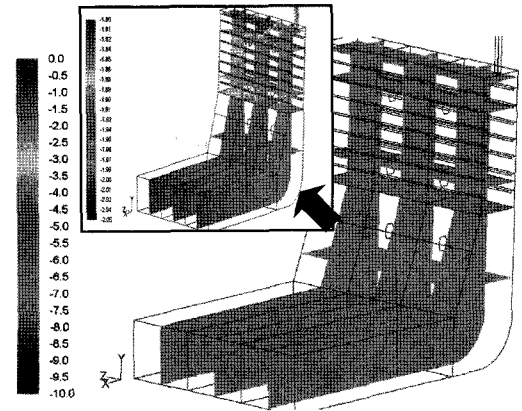


(b) Using variable specific heat to offset latent heat for ballast water

Fig. 5 Comparison of temperature distribution of the tank as the conditions of specific heats, represented by degree of celsius



(a) Without air bubbling system, temperature range of from -10 to 0°C



(b) With air bubbling system, temperature range of from -10 to 0°C (For small figures of the top portion of the left side, temperature range from -2.05 to -1.80°C)

Fig. 6 Comparison of temperature distribution of the tank as per installation of air bubbling system, represented by degree of celsius

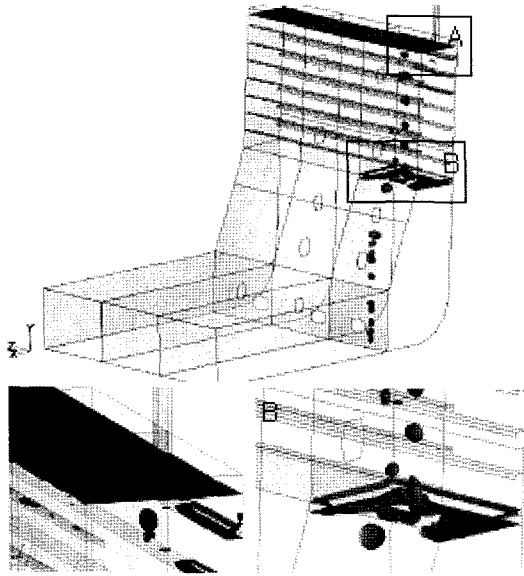


Fig. 7 Air bubbles trajectories in water ballast tank, represented by volume fraction for air

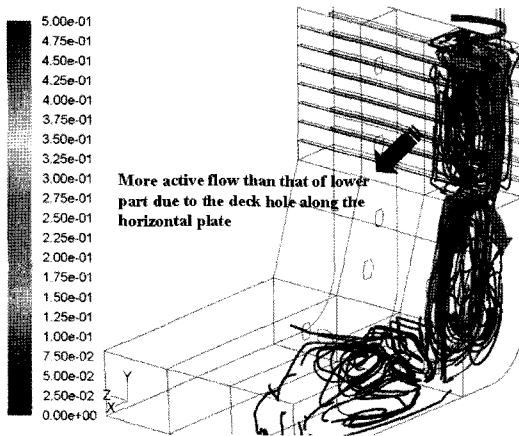
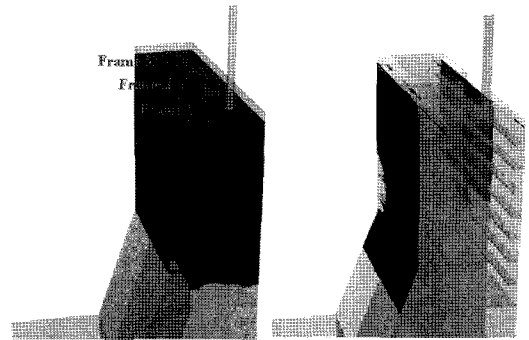


Fig. 8 Path line of flow in water ballast tank with color legend of velocity magnitude with unit of m/s

방울에 의해 유동이 기인하여 무질서적이고 복잡한 형태의 유동을 보여준다. 또한, 탱크의 수면에서는 빠져나가는 공기에 의해 유속이 더욱 빠르면서 좌우로 회전하는 형태의 유동이 발생된다. 이



(a) Freezing area without air bubbling system (b) Freezing area without air bubbling system

Fig. 9 Comparison of freezing area as application of air bubbling stem

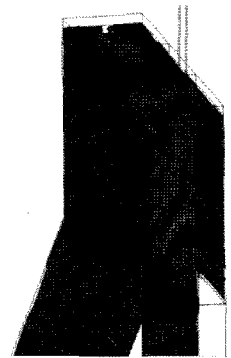


Fig. 10 Representation of mush zone with air bubbling system in Frame 1

는 외기 온도가 낮은 조건에서도 결빙 영역의 발생을 지연시키거나 억제할 것으로 기대된다.

### 3.2 공기 방울 분사 시 빙결 가능성 평가

앞 절에서 상변화 시 필요한 잠열을 고려하여 공기 방울 시스템의 효과에 대한 해석을 수행함에 따라 발라스트 탱크 내의 열유동 특성에 대하여 고찰하였다. 본 절에서는 이러한 해석 결과를 바탕으로 공기 방울 분사 시에 각 프레임에서의 빙결 현상 발생 가능성과 어느 정도를 정량적으로 평가해 보았다.

Fig. 9는 공기 방울 시스템의 유무에 따른 어느

점 이하의 온도 영역을 보여주고 있다. 공기 방울 시스템이 없는 a)의 경우  $-20^{\circ}\text{C}$ 의 외부 공기와 접하는 1 ~ 3 프레임(앞쪽부터 뒤쪽의 위치에 따른 번호순서)의 상부 영역에서 빙결 영역이 광범위하게 발견되었다. 공기 방울 시스템이 설치된 b)의 경우는 대류 열전달의 영향으로 두 번째, 세 번째 프레임에서는 외기에 접하는 벽면의 일부 영역을 제외하고는 물과 얼음이 공존하는 상변화 영역(Mush zone)이 상당 부분을 차지하고 있는 것으로 드러났으며 반면에, 첫 번째 프레임에서는 원활한 대류 현상으로 기인해 어는 영역이 나타나지 않음을 확인 할 수 있었다. 이러한 결과로부터 첫 번째 프레임의 공기 방울이 두 번째와 세 번째 프레임에서 큰 효과로 드러나지 않음을 확인하였다. 이것은 프레임의 사이의 격벽에 시공된 홀을 통하여 유동이 원활하게 전파되지 못하고 있음을 확인시켜 준다. 따라서 대류의 영향이 미미하고 전도에 의한 열 흐름에 의존하여 결빙 영역이 외판 부근에서 층을 형성하는 것으로 판단된다. 공기 방울 시스템의 빙결 방지 효과를 극대화 하기 위해서는 각 프레임마다 소량이라고 하더라도 분사 장치를 설치하여 대류 유동을 형성해 주는 것이 효과적일 것으로 본 연구 내용은 나타내고 있다.

3.3 프레임에 대한 결빙 두께 평가

본 절에서는 공기 방울 시스템의 효과에 따른 각 프레임의 외판에 생성되는 결빙 두께를 탱크의 수직 방향의 높이에 따라 평가하였다. 본 연구에서 결빙의 판단은 Fig. 2에 나타났듯이 온도 분포로 결정되며  $-2.06^{\circ}\text{C}$  이하의 온도가 그에 해당된다.

Fig. 12는 첫 번째 프레임에서의 결빙층 두께를 확인할 수 있는 온도 분포를 수직 방향의 높이에 따라 보여주고 있다. 공기 방울 시스템에 의하여 외판 근처에서 완전히 결빙이 일어나 얼음층이 형성되는 구간은 전혀 나타나지 않았다. 앞에서 언급된 유동 특성으로 제일 상부인 13.38m에서 온도가 오히려 다른 위치보다 높게 나타나는 것을 알 수 있다.

Fig. 13은 두 번째 프레임에서의 결빙층을 보여

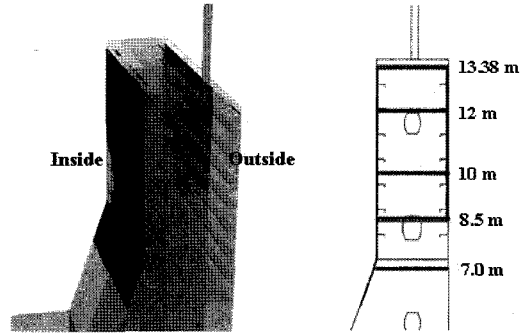


Fig. 11 Measuring positions in Fig. 12 ~ Fig. 14

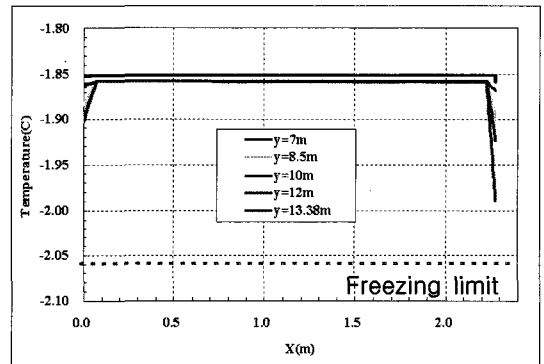


Fig. 12 Measures of thickness of ice sheet in frame 1

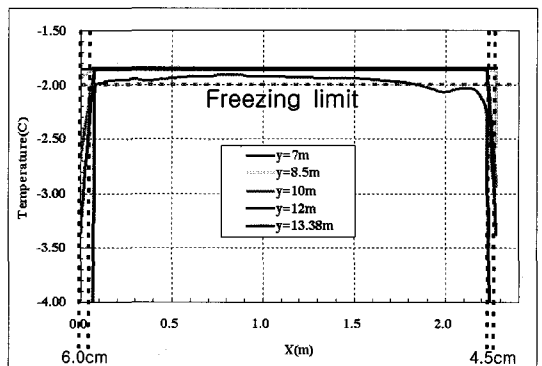


Fig. 13 Measures of thickness of ice sheet in frame 2

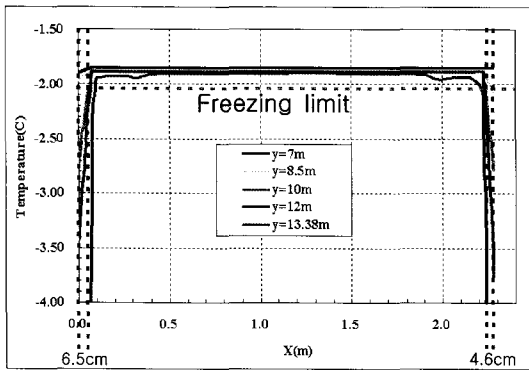


Fig. 14 Measures of thickness of ice sheet in frame 3

#### 4. 결론

본 연구에서는 방한 설계 개념으로 공기 방울 시스템이 적용된 발라스트 탱크에 대한 수치 모사법을 개발하여 성능을 확인해 보았다.

해석 결과 공기 방울 시스템이 없는 경우  $-20^{\circ}\text{C}$ 의 외기 공기와 접하는 탱크 영역의 일부가 결빙 현상이 의심되었다. 공기 방울 시스템이 있는 경우에는 대류 열전달의 영향으로 설치된 개별 프레임에 대해서는 결빙이 발생하지 않았다. 그리고 공기 방울 시스템이 설치된 프레임 외에 인접한 프레임에서는 격벽에 흠이 시공되어 있어도 대류 열전달이 원활하기 전파되지 못해 외판쪽에 결빙층이 발생하는 것으로 확인되었다. 따라서 공기 방울 시스템은 발라스트 탱크의 각 프레임마다 설치되어 분사될 때 결빙 방지에 효과적일 것으로 판단된다.

본 연구를 바탕으로 차후에는 실험적 접근을 시도할 예정이며 수치 모사법의 보완과 검증을 계속적으로 추진하고자 한다.

#### 참 고 문 헌

- Freitag, D.R. and McFadden, T., 1997, "Introduction to Cold Regions Engineering," American Society Civil Engineers Press, pp. 163-198.
- FLUENT 6.2 manual, 2005, FLUENT 6.2 User's Guide - Volume 2, Fluent Inc., chapter 9, pp. 3-31.
- FLUENT 6.2 manual, 2005, FLUENT 6.2 User's Guide - Volume 3, Fluent Inc., chapter 24, pp. 7-19.
- Kowalewski, T.A., 1999, "Measurement of Temperature and Velocity Field of Freezing Water Using Liquid Crystal Tracers," Proc. of 6th Symposium, Advances in Cold Region Thermal Engineering and Science, pp. 83-90.



< 구 명 준 >



< 최 재 웅 >



< 전 진 환 >



< 김 중 현 >