

빙해수조 공냉 시스템 변화에 따른 결빙 균질도 비교 전산해석

이승수^{1,†} · 김영민¹ · 이춘주²
충북대학교 토목공학부¹
한국해양과학기술원²

Computational Analysis for Effects of Cooling System on Homogeneity of Ice Thickness and Temperature on Water Surface

Sungsu Lee^{1,†} · Young-Min Kim¹ · Chun-Ju Lee²
School of Civil Engineering, Chungbuk National University¹
Marine Transportation Research Division, Korea Institute of Ocean Science & Technology²

This is an Open-Access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution Non-Commercial License(<http://creativecommons.org/licenses/by-nc/3.0>) which permits unrestricted non-commercial use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.

Model ice forming process in ice tank needs several steps of seeding, freezing, tempering. In those process, one of the most important factors to affect the accuracy of experiment is the homogeneity of the ice thickness and the temperature. This paper investigated a computational and statistical method to assess the uniformity of the model ice. In addition, the different configurations of freezing systems were considered to improve the uniformity. Qualitative assessment using streamlines from the cooling units was carried out by computational fluid dynamics (CFD) and the quantitative evaluations of the homogeneity were compared using the temperature distribution on the ice surface. In addition, multi species transport analysis is introduced to understand the circulation efficiency of cold air from the cooling units. As the results, optimized configurations were determined by adjusting the angles of vane in the cooling units.

Keywords : Computational Fluid Dynamics(CFD, 전산 유체 역학), Homogeneity(균질도), Multi-species(다종물질)

1. 서론

기후 변화에 따라 북극해 해상 항로의 가능성이 커지고 있으며 세계의 주요 공업지역과 대도시들이 북반구에 위치함에 따라 국제간 물류이동의 용이함으로 대두되고 있다. 그에 따라 대형 화물선과 특수선이 북극해를 통해 물량을 수송하는 등과 같이 상업적으로 이용하기 위해 여러 가지 빙해역과 관련된 학문의 중요성이 갈수록 커지고 있으며 현재 캐나다를 비롯해 많은 나라에서도 실해역에서의 연구 뿐 만 아니라 빙해수조를 통한 실험적 연구를 진행하고 있다. 실해역에서의 연구에 비해 인적, 물적으로도 경제적인 빙해수조를 통한 연구는 현재 우리나라에서도 진행되어지고 있는데 기존의 모형빙을 통한 빙저항 실험에 관한 연구는 파라핀 왁스를 이용해 Packed ice와 같은 형태의 합성 얼음을 제작해 수조에서 실험을 하여 저항특성에 관련된 실험을 진행하였다(Kim, et al., 2009).

한국해양과학기술원에서는 빙해수조를 통한 빙성능과 관련된 연구가 진행되고 있다. 빙해수조에서의 실험과 연구는 빙시험의

기본이 되는 평탄빙을 비롯해 평탄빙을 통해 쇄빙선이 얼음을 깨며 진행되는 형태로 미리 자른 Pre-sawn ice, 이외에 Brash ice와 같은 모형빙을 통해 빙저항 시험과 빙자항 시험을 하며(Lee, et al., 2008; Kim, et al., 2011), 굽힘 강도 및 압축 강도 실험 등 빙파괴의 특성을 축소 모형을 이용하여 파악하고 있다.

빙해수조 내에서 실험 시 중요한 조건 중 하나는 모형빙의 균질도의 정도를 높이는 부분이라 할 수 있다. 균질도의 정도가 좋지 않을 경우 두께에 차이가 나타나 모형빙을 이용한 쇄빙 실험의 정확도가 떨어지게 된다.

일반적으로 모형빙의 결빙 과정은 냉방기를 이용하여 냉풍 유동을 수조 내에 순환시키고 Tempering 과정을 통해 모형빙의 강도를 조절하는 방식으로 진행된다. 그러나 현재 한국해양과학기술원의 빙해수조 내부 공간의 비대칭성으로 내부의 냉풍 유동에 의한 결빙 과정의 균질도가 저하되는 것이 빙해 수조를 이용한 실험 연구의 가장 큰 문제점으로 대두되고 있다.

이에 본 논문에서는 전산유체역학(CFD: Computational Fluid Dynamics)을 이용한 열 유체 해석을 수행하여 빙해수조 내부의 냉풍 유동을 분석하고, 수면에서의 온도 분포의 균질도를 이용하

여 간접적으로 결빙 균질도를 평가하고 개선 방향을 제시하였다. 또한 냉방기에서 토출되는 냉풍의 공간적 분포와 순환 효율의 정량적 평가를 위하여 다중 물질 이송 방정식을 이용하여 냉풍의 질량분율을 이용해 순환율을 평가하였다.

2. 지배 방정식과 경계 조건식

본 연구에서는 빙해 수조 내 공냉 시스템에 의한 냉풍 유동의 토출 방향 변화에 내부 유동과 수면에서의 온도 분포의 균질도 분석을 위하여 3차원 비압축성, 이상 기체를 이용한 열유동 해석을 수행하였다. 이를 위하여 연속 방정식과 운동량 방정식을 지배방정식으로 이용하였으며 난류 해석을 위해 $\kappa - \epsilon$ 모델을 적용하였다. 또한 빙해수조 내 공냉 시스템에 의해 수면에서의 온도변화를 나타내기 위한 에너지 방정식을 포함하였으며, 전체 지배 방정식은 아래와 같다.

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

$$\rho \left[\frac{\partial u_i}{\partial t} + u_j \frac{\partial u_i}{\partial x_j} \right] = - \frac{\partial p}{\partial x_i} + \mu \frac{\partial}{\partial x_j} \left(\frac{\partial u_i}{\partial x_j} \right) + \rho g_i \quad (2)$$

$$\rho C_p \frac{DT}{Dt} = k \nabla^2 T + \Phi \quad (3)$$

에너지 방정식에서 C_p 는 비열을 의미하며 Φ 는 점성에 의한 손실을 나타낸다.

$$\Phi = \mu \left(\frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right) \frac{\partial u_i}{\partial x_j} \quad (4)$$

또한 각 냉방기의 토출 유동에 대한 순환을 분석은 식 (5)에 나타낸 보존 방정식을 이용하여 물질 이송 방정식의 해를 구하였다.

$$\frac{\partial(\rho Y_i)}{\partial t} + \frac{\partial(\rho u_j Y_i)}{\partial x_j} = - \frac{\partial J_{i,j}}{\partial x_j} \quad (5)$$

식 (5)에서 $J_{i,j}$ 는 확산에서 물질의 흐름이 농도기울기에 비례하다는 것을 알 수 있는 Fick's law를 통해 구할 수 있다. 여기서 $D_{i,m}$ 은 질량 확산 계수(Mass diffusion coefficient)를 나타낸다.

$$J_{i,j} = - \rho D_{i,m} \frac{\partial Y_i}{\partial x_j} \quad (6)$$

내부 유동의 순환을 분석을 위한 물질 이송 방정식의 적용은

이전에 자동차 운반선 내부의 화물창에 대해 다중물질을 통해 각 환기시스템에 대한 시간 경과 변화에 따른 용적 평균 순환율을 비교하고 정체구간에 대해서도 연구가 진행된 바 있으며 (Lee, et al., 2005), 온도에 따라 색깔이 변화하는 감온성 액정을 이용해 자동차 차체 내부유동을 나타내어 실내 환기유동에 대해 연구가 수행된 바 있다 (Yoon, et al., 1997).

수면에서의 경계조건으로 대류 열전달 계수를 이용하여 외부 대류 환경을 모사하기 때문에 그에 관한 대류에 관한 식은 다음과 같다.

$$q_{conv} = h_{ext} (T_{ext} - T_w) \quad (7)$$

식 (7)에서 h_{ext} 는 열전달 계수(Heat transfer coefficient), T_{ext} 는 외부 온도(External temperature), T_w 는 자유수면 온도(Free stream temperature)를 의미하며 수면을 제외한 다른 건물 내 외벽과 수조의 벽에 대해서는 모두 단열 조건이다.

3. 해석 대상공간의 경계조건과 모델링

현재 빙해수조 내 실험수조부분의 평면도는 Fig. 1과 같다. 해석영역에 빙해수조의 준비구역은 제외하였는데 이는 차단막을 통해 단열조건으로써 결과에 영향을 미치지 않기 때문에 생략하였다.

빙해수조의 냉방기는 Fig. 1에 보는 바와 같이 각 열 당 4개씩 4열로 되어있는데 각 냉방기는 지름이 700mm인 원형 토출구 3개로 구성되어 있으며 510 m³/min으로 유동을 배출한다. Fig. 1의 숫자는 각 냉방기의 열을 의미하며 Tempering과 Freezing시에 냉풍과 온풍을 통해 얼음의 강도 및 두께를 조절하게 된다. 현재 각각 4개씩 4열로 배치되어 있으며 냉방기 사이에 등간격을 유지하게 된다. 유동의 배출 방향은 건물의 중앙을 기준으로 1,2열과 3,4열은 반대방향의 벽면을 향하게 되어 있다.

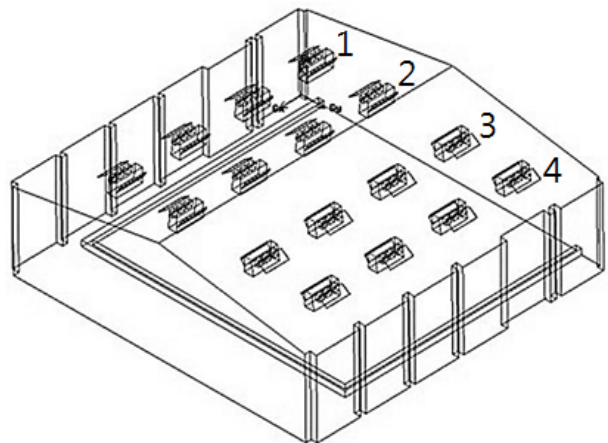


Fig. 1 Computational model of the ice tank

냉방기는 유동 분포에 대해 가장 큰 비중을 차지하는 부분으로써 유입구와 유출구 부분에 각각 가이드 판이 위치해 있으며, 유출구 부분의 경우 35° 하향되어 있고 유입구의 경우 50°의 경사각을 갖고 있다. 유출구 부분의 가이드 판의 경우 배출되는 유동의 방향을 결정하는 중요 인자로서 수면에서의 유동 분포에도 많은 영향을 미치게 된다.

현재 빙해수조의 경우 왼편으로 편향되어 있으며, 빙해수조와 복도 사이에 800mm의 높이차가 있으며 지상으로부터 수면까지의 높이는 300mm이다. 또한 각각의 측벽에는 기둥이 있으며 이 또한 유동의 방향에 영향을 미칠 것으로 판단되고 있다.

빙해수조의 유동 해석 시 냉방기를 지지하는 트러스 구조물과 Service Carriage의 경우 해석 영역을 복잡하게 만들기 때문에 계산 시간을 증대시키지만 그에 따르는 해석 결과에 미치는 영향이 크지 않다는 판단에 따라 모델링에서 제외하였다. 그 결과 약 274.5만개의 유한 요소 격자를 생성하였다.

경계조건으로 건물 내에는 단열조건으로써 외부에서의 열의 유출입이 없도록 하였으며, 냉방기는 5° 상향으로써 7.37m/s로 유동을 배출하였다.

균질빙 생성 시 얼음의 강도와 두께를 결정짓는 과정 중에서 얼음핵을 분사하는 단계인 Seeding을 제외하고 냉방기가 작동하게 되는 Tempering과 Freezing 두 케이스에 관해 해석을 실시하였다. 모형빙을 결빙시키기 위한 단계인 Freezing에서는 주변온도가 -10°C일 때 냉방기에서 -20°C의 냉기를 배출시켜 결빙하게 된다. 이때 Tempering을 통해 강도를 조절하게 되는데 주변온도가 -6.1°C일 때 냉방기에서 1°C의 온기를 배출시켜 모형빙의 강도를 조절시킨다. 그리하여 이번 해석조건으로 냉방기에서의 온도와 빙해수조 내의 온도의 경우 각각에 맞는 상황에 따라 전산해석을 실시하였다.

4. 수치해석 결과

4.1 기본 공냉 시스템

현재 빙해수조 내에서는 각각의 Fig. 2와 같이 가이드가 모두 35°하향으로 향해서 있게끔 설계되어 있다. 초기 유동 방향에 지배적인 역할을 하며 이에 현재의 상황에 대해 Freezing과 Tempering시에 대해 각각 전산해석을 하였다.

현재 상황에서의 결과를 보면 Freezing에서의 온도 분포도와 냉방기 2번째 열에서의 속도 벡터장에 대해서 나타내었는데 Tempering에서의 온도 분포도는 Freezing에 비해 대칭적인 분포를 갖고, 속도 벡터장 또한 유사한 패턴을 갖기 때문에 본문에서 생략하였으며, 수면 위에서의 온도 균질도 비교를 위하여 통계적 방법인 RMS(Root Mean Square)를 이용하여 본 논문에 나타내었다.

Fig. 3에서와 같이 1열과 4열의 경우 배출 후 바로 벽면에 충돌한 뒤 수조 벽면과의 충돌로 속도가 줄어들어 수면의 온도 분

포에 영향을 미치게 되며 이에 반해 2열과 3열의 경우 각각 수면의 모서리 방향으로 향하는 벡터들을 많이 확인 할 수 있다. 그로 인해 중앙부에는 상대적으로 직접적으로 영향을 받는 부분이 적은 것을 정성적으로 확인 할 수 있다. 수면에서의 온도 분포도에서도 2열과 3열에서 방출된 냉기로 온도 분포가 수조의 외벽으로 갈수록 많은 유동을 직접적으로 받기 때문에 상대적으로 중앙에 비해 낮은 온도 분포를 갖는 것을 알 수 있다.

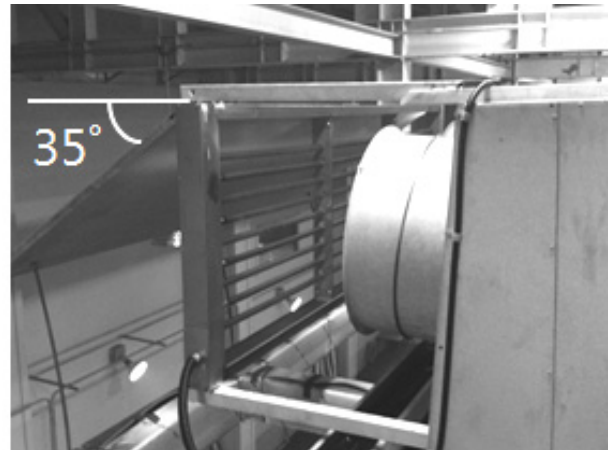


Fig. 2 Angle of previous guide plate

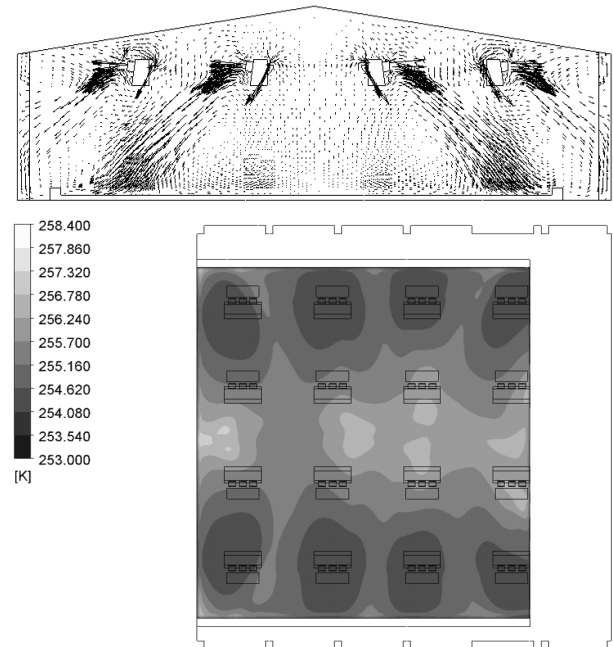


Fig. 3 Contour of temperature at water surface and vector of velocity on existing system

그에 따라 현재의 가이드 각도의 수정이 필요하다고 판단하여 일차적으로 유동의 흐름방향에 가장 큰 영향을 미치는 각도변화에 따른 유동의 흐름과 수면에서의 균질한 온도분포를에 대해 최적화를 나타낼 수 있는 방법에 대해 연구를 수행하였다.

4.2 가이드 각도 변화의 영향

이전 해석 결과에서 첫 번째로 유동의 움직임에 가장 직접적인 영향을 미치는 요소로 가이드 각도로 판단 할 수 있기 때문에 이에 따라 여러 가지 각도 수정에 따른 해석을 수행하였다. Table 1 은 본 연구에서 고려된 경우를 나타내고 있다.

Table 1에 나타난 모든 해석 결과에 대해 Freezing과 Tempering에 대해 수치해석을 실시하였으며 주요 경우에 대하여 유동장과 온도 분포를 검토하였다.

Table 1 Tested cases

Row	1	2	3	4
Existing	35° (Down)	35° (Down)	35° (Down)	35° (Down)
Case 1	15° (Up)	15° (Up)	15° (Up)	15° (Up)
Case 2	15° (Up)	35° (Down)	35° (Down)	15° (Up)
Case 3	35° (Down)	15° (Up)	15° (Up)	35° (Down)
Case 4	15° (Up)	35° (Up)	35° (Up)	15° (Up)
Case 5	20° (Up)	35° (Up)	35° (Up)	20° (Up)
Case 6	35° (Down)	85° (Down)	85° (Down)	35° (Down)
Case 7	20° (Up)	25° (Up)	25° (Up)	20° (Up)
Case 8	20° (Up)	30° (Up)	30° (Up)	20° (Up)

4.2.1 Case 1 분석

기존 공냉 시스템의 가이드 판이 하향으로 되어 있기 때문에 유동의 순환을 빙해수조 내에서 전체적으로 순환 할 수 있도록 Case 1의 경우 1열부터 4열까지 모든 냉방기에 대해 15° 상향시켜 해석을 실시하였다. 그 결과 개선된 점으로는 직접적으로 냉방기에서 방출된 유동이 직접적으로 영향을 주기보다 건물 외벽을 따라 순환하기 때문에 Fig. 4의 벡터장에서 건물 내에서 전체적으로 크게 순환하는 것을 확인 할 수 있었다. 또한 온도 분포도에서도 가장 낮은 온도 분포와 높은 온도 분포를 나타내는 부분이 줄어드는 것을 정성적으로도 확인 할 수 있다.

반면, 단점으로는 15° 상향 시킨 값으로는 각 냉방기에서 배출되는 유동이 각 가이드 판에 닿지 않고 가이드 판이 없는 것과 다름없이 흘러나가 2열과 3열에서 배출되는 유동이 각각 앞의 열인 1열과 4열의 유입구에 다시 유입되는 문제점을 갖는 것을 알 수 있었다. 또한 문제점으로 기존의 현상에서와 같이 수면 중앙부 지점에 제대로 유동의 영향이 닿지 않는 부분이 생기기 때문에 상대적으로 높은 온도 분포를 갖는 지역이 생겼다.

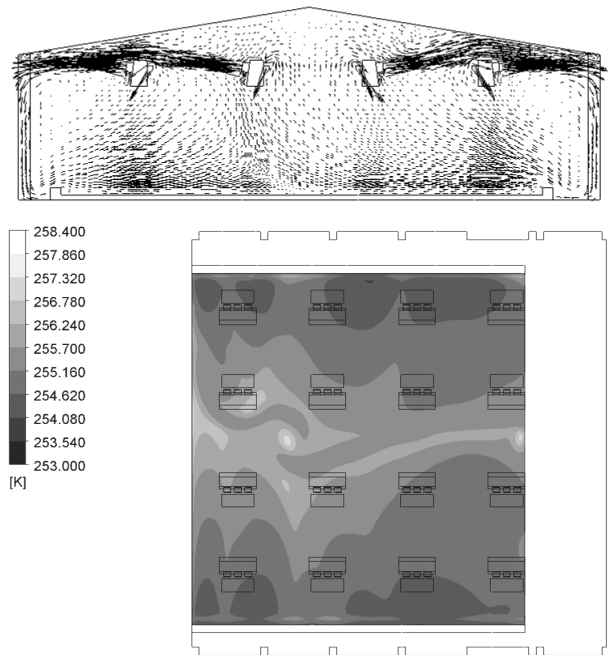


Fig. 4 Contour of temperature at water surface and vector of velocity on the case 1

4.2.2 Case 5 분석

앞서 나타난 기존의 상황과 Case 1의 가이드 판의 각도 수정에 대한 해석 결과에 대해 유동의 진행 방향과 온도 분포도에 대해 Case 1의 결과가 수면에서의 온도 분포에 대해 상대적으로 높은 부분과 낮은 부분이 적기 때문에 Case 1의 문제점이었던 2열과 3열의 냉방기에서 방출된 유동이 각 전면에 있는 냉방기에 유입되는 점을 수정하여 모든 열의 가이드 판을 1열과 4열에 대해서 20° 상향, 2열과 3열에 대해 35° 상향이 되어있는 경우에 대한 전산해석을 실시하였다. 그 결과 Fig. 5와 같이 속도 벡터장과 온도분포도를 나타내었다.

Case 1의 문제점에 대응하여 앞 열의 냉방기의 유입부로 직접 유입되는 유동이 상당량 감소하였으며 Case 1의 결과에 비해 온도 분포도에서도 상대적으로 높은 온도와 낮은 온도를 갖는 부분에 대해 줄어드는 것을 확인 할 수 있다. 또한, 속도 벡터장에서 수면 부근에서의 속도 벡터가 Case 1에 비해 값이 크고 많은 것을 확인 할 수 있는데 그로 인해 Freezing시의 수면부를 열리는 데에도 더 효과적으로 작용하는 것임을 알 수 있다.

하지만, 냉방기 중 1열과 2열에서 방출된 유동이 벽에 충돌하거나 수조 벽과 복도사이에서 충돌 후 유동의 움직임이 줄어드는 것을 확인 할 수 있었는데 1열과 4열에 비해 2열과 3열의 냉방기에서 방출되는 유동이 수면 전체에서의 온도 분포에서 지배적으로 나타나는 것을 확인 할 수 있었는데, 벽면에 충돌 후 속도가 줄어드는 문제점은 Case 1에서도 나타나며, 위의 문제점에 대해 대응하기 위해 차단막을 설치하는 등의 방안에서 고려하여야 할 필요성이 있다.

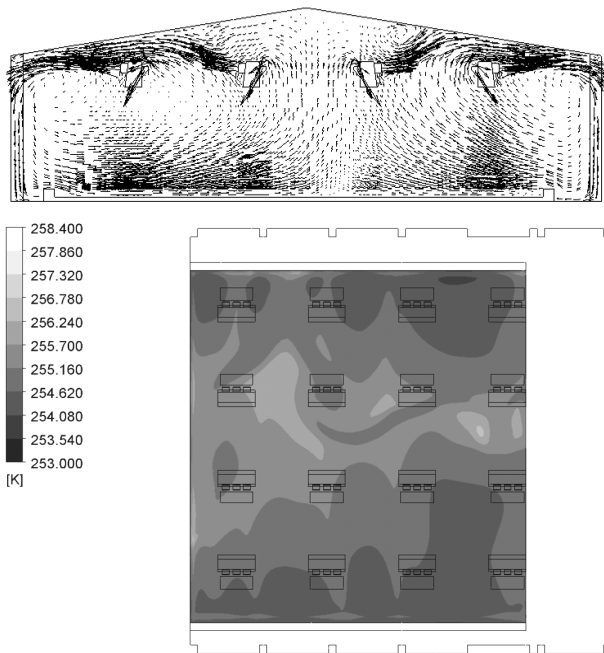


Fig. 5 Contour of temperature at water surface and vector of velocity on the case 5

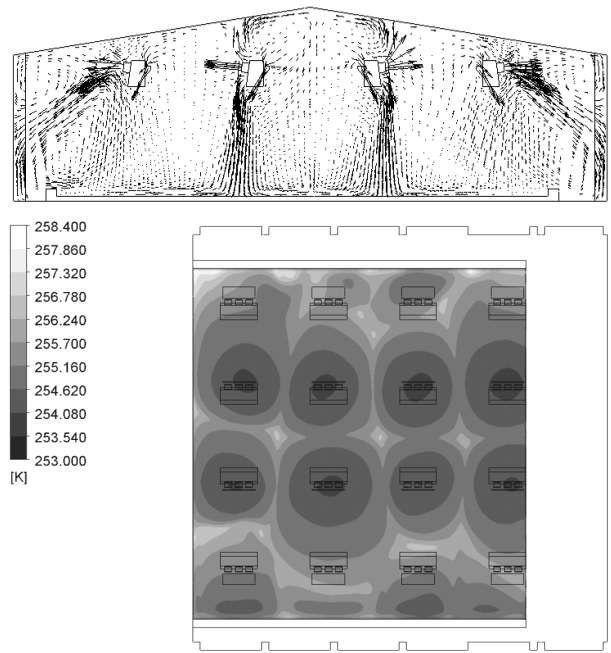


Fig. 6 Contour of temperature at water surface and vector of velocity on the case 6

4.2.3 Case 6의 수치해석 결과

앞서 수행한 결과에서 공통적으로 생기는 문제점 중 하나인 수면의 중앙부에 가장자리부분에 비해 상대적으로 적은 유량이 가해지기 때문에 중앙부에서 Freezing에서는 높은 온도 분포가 형성되고, Tempering에서는 낮은 온도 분포가 형성되는 문제점에 대해 고려해야한다.

앞서 수행한 결과에서 공통적으로 생기는 문제점 중 하나인 수면의 중앙부에 가장자리부분에 비해 상대적으로 적은 유량이 가해지기 때문에 중앙부에서 Freezing에서는 높은 온도 분포가 형성되고, Tempering에서는 낮은 온도 분포가 형성되는 문제점에 대해 고려해야한다.

현재 상황에서는 가이드 판이 모두 35° 하향으로 수면으로 유

동이 직접 영향을 미치게 되어있는데 2열과 3열에 대해 85°로 수정하면 수면의 중앙부에 대한 많은 유동을 직접적으로 수면부에 보내기 위해 빙해수조의 현재 상태인 케이스에서 2열과 3열에 대해 가이드 판이 85° 하향 각을 갖도록 한 뒤 해석을 실시하였다.

해석 결과 2열과 3열의 냉방기에서 방출된 유동이 대부분 수면으로 향해서 각 냉방기 하단 부분에서 낮은 온도분포를 확인할 수 있으며 중앙부에 그동안의 해석 결과에 비해 중앙부가 높은 온도 분포를 갖는 것을 확인할 수 있다.

하지만 유동이 집중적으로 작용하기 때문에 그에 의해 온도 분포가 불균일한 부분이 존재하게 된다. 이는 수면의 평탄빙의 두께가 일정하지 않고 일부는 두껍게 생성될 수 있다. 또한, 일부 유동의 경우 하단으로 향하지 않고 냉방기 위로 가는 유동을 Fig. 6의 속도 벡터장에서 확인할 수 있다.

Table 2 Comparison of averaged temperature on water surface

		Existing	Case 1	Case 2	Case 3	Case 4	Case 5	Case 6	Case 7	Case 8
Freezing	RMS	0.61835	0.46193	0.51632	0.53925	0.45848	0.40973	0.57082	0.4163	0.4506
	Average Temperature	255.11K	255.10K	254.94K	255.39K	254.91K	254.91K	254.98K	253.93K	254.90K
Tempering	RMS	0.48539	0.39577	0.40305	0.46714	0.31864	0.30770	0.45812	0.3113	0.3265
	Average Temperature	272.65K	272.68K	272.78K	272.40K	272.80K	272.79K	272.72K	272.81K	272.81K

5. 균질도 비교

현재 빙해수조에서의 가이드 판 각도를 비롯해 Table 1에 나타낸 수정된 각도에 대해 수행한 결과에 대해 균질도를 비교하기 위해서 RMS를 통해 비교해 보았다. RMS를 통한 계산값의 의미는 0에 가까울수록 균질도가 높다는 것을 의미하며, 값이 클수록 분포되어 있는 온도값이 다양함을 나타낸다.

$$S = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^N (T_{ave} - T_i)^2}{N - 1}} \quad (8)$$

여기서 T_{ave} 는 평균 온도 값을 의미하며, T_i 는 i 번째의 온도 값을 나타낸다. N 는 표집점단의 샘플의 총 숫자를 의미하게 되는데 Residual 수렴시의 수면의 온도 중 기준이 되는 표본 집단 약 32000개의 샘플을 이용해 위의 수행한 각 케이스에 대해 RMS를 계산하였으며 평균 온도에 대한 값 또한 구하여 Table 2에 정리하였다. 균질도 평가의 경우 RMS를 통해 계산한 값이기 때문에 0에 근접할수록 수면에서의 온도가 평균값에 근접한 값이 많은 것을 의미하며, 평균 온도의 경우 Freezing에서의 목표가 되는 값이 253.15K이며, Tempering에서는 274.15K가 된다.

현재 상황에서의 해석(모든 가이드 판: 35°하향)에서의 RMS가 Freezing과 Tempering모두 가장 큰 값을 의미하므로 균질도가 가장 떨어지는 것을 알 수 있으며, Case 5(1열과 4열에서 가이드 판이 20°상향, 2열과 3열에서 35° 상향)에서 Freezing과 Tempering 모두 RMS가 가장 작은 값을 가지므로 균질도가 가장 좋음을 알 수 있다.

온도의 경우에는 Case 7이 목표치에 가장 가깝지만 그 외의 다른 값들과의 차이가 작기 때문에 이 부분을 통해 어느 케이스의 값이 우수하다고 보기 어렵다.

현재까지의 계산의 결과로는 다음과 같이 다른 조건이 모두 같을 경우 Case 5가 가장 균질빙을 만들 수 있으므로, Case 5를 토대로 다른 변수에 대해서도 연구해야 하는데 그 방편으로 차단막의 설치를 통해 냉방기에서 배출된 유동의 방향을 조절할 수 있는 방안이 있다.

6. 차단막 설치의 영향

현재까지 수행한 결과에 대해 중앙부분과 가장자리의 온도분포가 차이가 발생하는 문제점과 빙해수조 건물 외벽의 기둥부분, 수조 외벽의 충돌에 의해 생기는 유동의 속도가 급감으로 수면에 영향을 효과적으로 미치지 못하는 점, 그리고 Melting tank부분으로 유동이 유입됨에 의해 낭비되는 유동의 문제가 있기 때문에 이와 같은 문제점에 차단막 설치를 통한 완화에 대해 고려해 볼 수 있다.

먼저 수조 벽부터 빙해수조 측면 벽에 경사각을 갖는 차단막을 설치해서 기존 해석에서 측면 벽과 기둥의 요철부분에 의해 속도가 줄어들거나 정지하는 부분에 대해 개선할 수 있을 것이며

Melting tank 부분으로 흘러가는 유동을 제외한 다른 유동은 모두 수면으로 집중 시킬 수 있다.

다음으로 수조 벽과 측면 벽 사이의 800mm의 공간에 대해 차단막을 설치하는 방법을 통해 수조 측면 벽을 맞고 속도 감소의 영향을 받는 유동에 대해 대응할 수 있을 것이며 유동의 형태 또한 개선 될 것이다.

위의 경우에 대한 차단막은 Fig. 7의 회색 부분과 같이 설치가 되는데 수조 벽과 건물 측벽에 경사진 차단막을 설치의 위치를 나타낸 것은 Type 1에 것이며, 수조 벽과 측면 벽 사이의 복도를 막은 경우를 나타낸 것은 Type 2에 해당한다.

수조 안쪽 벽으로부터 건물 측벽에 경사진 차단막을 설치한 케이스인 Type 1의 수채해석 결과를 Fig. 8에 속도 벡터장으로써 나타내었는데 냉방기로부터 배출한 유동이 일부 충돌 뒤 속도가 감소하는 부분이 존재하는 것을 확인 할 수 있으며, 빙해 수조 내 수조가 왼편으로 약간 편심 되어 있는데 수조 내벽에서부터 연결된 차단막에 의해 왼편과 오른편에서 중앙부로 향하는 유동이 한편으로 치우치지 않고 중앙부에서 상승하는 것을 확인할 수 있다.

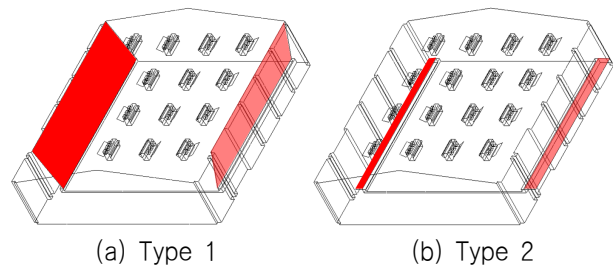


Fig. 7 Position of insulation plate in the ice tank

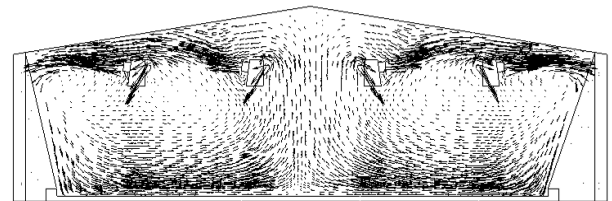


Fig. 8 Contour of temperature at water surface and vector of velocity on the type 1

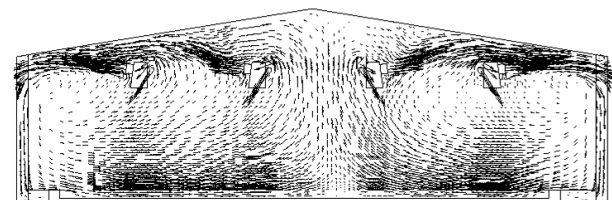


Fig. 9 Contour of temperature at water surface and vector of velocity on the type 2

수조 내벽부터 차단막을 연결하는 경우인 Type 1을 제외한 가이드판의 각도를 수정한 해석에서 공통적으로 나타나는 문제점인

복도와 수조 외벽 간 높이 차에 의해 유동이 충돌하고 속도가 줄어드는 부분을 해결하기 위해 차단막을 설치하였는데 그 결과 Fig. 9에서와 같이 알 수 있는데 차단막이 존재하지 않는 부분에 대한 벡터장을 나타낸 Fig. 3과 비교할 경우 전체 유동에 많은 영향을 끼치지 않지만 복도와 수조 외벽 사이의 공간에 의해 유동이 충돌해 속도가 감소하는 부분에 대해서 대응하는 것을 확인할 수 있다.

기준이 되는 해석 케이스와 차단막을 설치한 해석 케이스에 대해서 RMS를 통해 Freezing과 Tempering에 대한 균질도 비교 분석을 하였다. 또한 그에 대한 내용을 Table 3에 정리하였다.

현재 차단막 설치하지 않은 부분에 비해 수조 벽과 건물 측면 벽에 경사진 차단막을 설치한 경우 RMS가 Freezing과 Tempering 모두 향상된 값을 가지는 것을 확인할 수 있었으며 Case 5을 이용한 해석에서는 경사진 차단막을 설치하는 것이 가장 좋은 균질도를 갖는 균질빙을 생성해 낼 수 있음을 알 수 있었다.

Table 3 Evaluation of homogeneity of depending on insulation plate for

Temperature	No Insulation	Type 1	Type 2
RMS (Freezing)	0.40973	0.34024	0.42677
Mean (Freezing)	254.91K	254.825K	254.963K
RMS (Tempering)	0.30770	0.24693	0.32053
Mean (Tempering)	272.793K	272.892K	272.799K

7. 다종 물질을 이용한 환기 성능 해석

다종 물질이송(Multi-species transport)은 같은 유체 상에서 서로간의 반응을 해석하는 방법 중 하나로서, 주로 화학과 관련된 분야에서 확산, 연소와 같은 화학 반응 등의 해석에 이용하는 방법으로써, 본 논문에서는 동일한 물성을 갖는 두 공기를 Air1, Air2라 할 때, 서로 간 화학적 방법을 배제시킨 상태에서 Air1만 유입을 시켜 빙해수조 내에서 정상상태를 도달 할 때까지 순환을 시킨 뒤 Air2만의 유입을 시키는 방법을 통해 잔류해 있는 Air1의 질량분율을 측정해 현재 상황에서와 기존의 가이드 판을 수정한 경우 중 가장 좋은 균질도를 갖는 Case 5의 건물 내 순환을 비교 해석하였다.

빙해수조의 체적에서 기존의 공기의 유입을 제거하고 새로 유입되는 공기의 체적 비에 의한 순환율을 두 해석 Case에 대해 비교를 하였는데 가이드판의 각도의 수정에 따른 순환속도의 차이는 미미한 것으로 Fig. 12를 통해 확인할 수 있다.

또한 새로운 공기의 유입이 시작 된 뒤 70초가 지났을 때 기존의 공기의 질량분율이 70%가 되는 부분에 대한 Iso-surface를 통해 잔류해 있는 공기를 정성적으로 평가해 보았다. Fig. 10은 현재 빙해수조의 가이드판이 설치되어 있는 상황에서의 해석 결과로

써, Melting tank의 중앙부부터 수조의 상단의 중앙부까지 Iso-surface를 통해 확인할 수 있는데 현재 상황에서 가이드판이 하단부를 향하기 때문에 건물 내 상단 부분에서 상대적으로 유체의 순환이 빠르게 이루어지지 않는 점을 확인할 수 있으며, Fig. 11을 통해 가이드판이 개선된 사항에서는 Melting Tank부분을 제외한 부분에서는 현재의 상황에서 보다 빠르고 원활하게 순환이 되는 것을 알 수 있다.

빙해수조 내 전체 체적에 대해 시간당 표준 편차에 대한 변화와 두 해석에 대해 비교하였는데 수면부에서의 기존 공기에서의 질량분율에 대해 표준편차를 계산함으로써 균질도에 대해 비교하여 Table 4에 정리하였다.

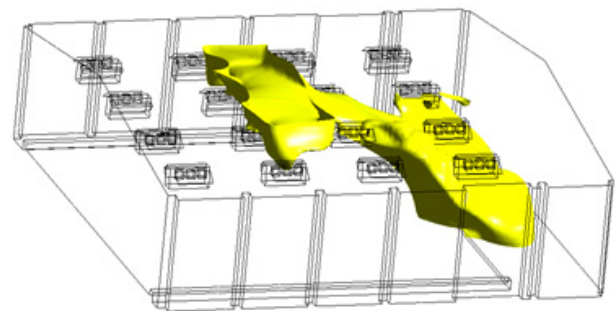


Fig. 10 Iso-surface of mass fraction of Air1 of 70% at 70s in existing system

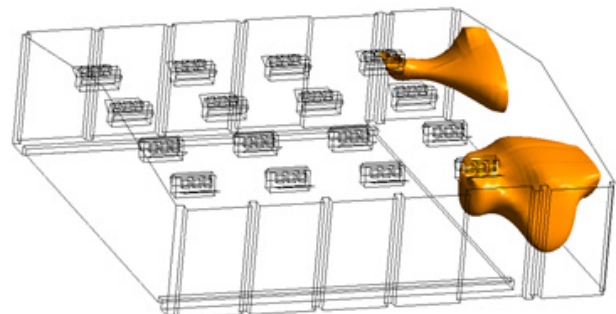


Fig. 11 Iso-surface of mass fraction of Air1 of 70% at 70s in case 5

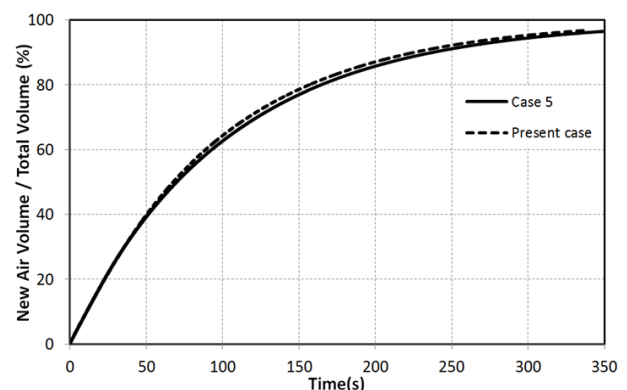


Fig. 12 Comparison of time history of circulation between existing system and case 5

새로운 공기가 유입된 이후 새로운 공기로서 50%, 80%, 90% 이상 교체된 시간에 대해 비교를 하였는데, 수면부에서의 질량분율의 표준편차가 현재 상황에 비해 Case 5로 가이드판의 각도가 수정된 상황에서의 값들이 모두 더 낮은 것을 확인 할 수 있기 때문에 Case 5가 더 새로운 공기로서 순환하는 부분에 대해 더 유리한 것을 확인 할 수 있다.

Table 4 Evaluation of homogeneity of mass fraction on water level

	Time (s)	RMS
Present case	70	0.07729
	150	0.05081
	300	0.01475
Case 5	70	0.07298
	150	0.03978
	300	0.01294

8. 결론

본 논문에서는 빙해 수조 내 공냉 시스템의 유동을 변화시키는 방법을 통해 수면부에서 균질도를 높이는 방법을 찾기 위해 가이드판의 각도의 수정 및 차단막의 설치를 통해 전산 유체 역학을 통한 정성적으로 판단 및 수면부에서 RMS를 통한 균질도를 비교 분석하였다. 또한 다중 물질 이송을 통해서 새로운 공기의 유입에 의한 잔존 공기의 질량분율을 이용해 순환이 잘 이루어지지 않는 부분에 대해서도 정성적 비교를 할 수 있는 방법에 대해 제시하였다. 빙해수조에서의 수면부에서와 같이 특정 구역에서의 균질도를 요구 구조물에서 유체가 아닌 시각적으로 판단하기 어려운 기체에 대해 전산 유체 역학을 통해 유동의 흐름을 통해 환기 시스템의 비교를 판단 할 수 방법을 제시하였으며, 위의 방법에서와 같이 가이드판의 수정 및 차단막 이외에 균질도를 높일 수 있는 방법에 대해서도 후속 연구가 필요하다.

후 기

본 연구는 한국해양과학기술원의 산업원천기술개발사업 (빙해 선박의 극지방로 안전운항기술 및 극저온 빙성능 시험평가 기법 개발)의 지원으로 수행되었습니다.

참 고 문 헌

- Kim, M.C. et al., 2011. Study on the Correction Method of Ice Strength and Thickness Applied to the Sea Trial Condition Based on the Ice Model Test Results. *Journal of the Society of Naval Architects of Korea*, 48(5), pp.457-464.
- Kim, M.C. et al., 2009. Study on Resistance Performance of Icebreaking Cargo Vessel in Pack Ice Condition according to Variation of Synthetic Ice Thickness and Hull Form Characteristics. *Journal of the Society of Naval Architects of Korea*, 46(5), pp.471-478.
- Lee, S. Kim, H.S. & Chun, S.H., 2005. Assessment of Ventilation System for Ro/Ro Ship Using CFD. *Journal of the Society of Naval Architects of Korea*, 42(1), pp.10-17.
- Lee, C.J. Cho, S.R. Michael, L. & Wang, J.Y., 2008. A Study on Improvement of Ice Model Test Procedure. *Journal of the Society of Naval Architects of Korea*, 45(5), pp.562-568.
- Yoon, J.H. Lee, S.J. & Kim, K.W., 1997. Temperature Field Measurement of Ventilation Flow in a Vehicle Interior. *Journal of the Korean Society of Automotive Engineers*, 5(1), pp.120-128.



이 승 수

김 영 민

이 춘 주