대한조선학회논문집
Journal of the Society of Naval Architects of Korea
pISSN:1225-1143, Vol. 49, No. 6, pp. 541-549, December 2012
eISSN:2287-7355, http://dx.doi.org/10.3744/SNAK.2012.49.6.541

빙해선박 상부갑판 열선의 열전달 특성에 따른 착빙방지 성능평가 및 설계기준에 관한연구

이종찬[1] · 서영교[1,†] · 이춘주[2]
한국해양대학교 해양공학과[1]
한국해양과학기술원 해양시스템안전연구소[2]

A Study on the Anti-Icing Performance Evaluating and Design Guide by Heating Coil for Upper Deck of Icebreaking Vessels

Jong-Chan Lee[1] · Young-Kyo Seo[1,†] · Chun-Ju Lee[2]
Department of Ocean Engineering, Korea Maritime University[1]
KIOST (Korea Institute of Ocean Science & Technology), Maritime & Ocean Engineering Research Department[2]

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.

The study adopted a freezing prevention method of the upper deck which used heating coil, and carried out numerical analysis by using ANSYS 13.0 CFD for design guide of the vessel operating in cold region. It is based on the experimental results of the anti-icing performance tests which were carried at cold room chamber in MOERI. Numerical analysis for the design guide was performed by considering S.S.T. (Shear Stress Transport) turbulent model for flow separation effects and the turbulence which occurred in interfaces of the numerical model in order to express appropriate heat transmission phenomenon. The numerical result shows average temperature of the upper deck surface appeared similarly compared with the indoor chamber test. The design guide for optimum freezing prevention presented through heat transmission capability and interval of the heat coil in various outdoor temperature(10℃~-30℃) and wind speed($1m/s \sim 7m/s$).

Keywords : CFD(전산유체역학), Anti-icing(착빙방지), Shear Stress Transport(S.S.T.), Heat transmissions(열전달), Heating coil(열선)

1. 서 론

지구온난화와 북극해의 빙하감소로 인한 항해가능성의 증대와 함께 러시아를 비롯한 북극해 주변에 부존된 극지유전개발 및 수송을 위한 빙해선박의 수요는 증가하고 있다. 이러한 빙해역을 항행하는 선박들은 극한환경에 노출됨에 따른 착빙현상으로 야기될 수 있는 많은 위험을 내재하고 있다. 착빙현상은 선박의 상부갑판에 추가하중 및 충격하중으로 작용하며 이러한 원인으로 선박자체의 복원성에 대한 문제를 야기할 수 있다. 또한 선원들의 이동 및 장비운반 등에 대한 불편, 이에 따른 인명피해와 장비피해 및 추가적인 안전사고에 대한 문제를 내재하고 있다 (Kang, et al., 2010).

이러한 문제를 예방하고자 현재 IMO(International Maritime Organization)를 비롯한 IACS(International Association of Classification Societies)는 극지항로 항해중의 안전과 긴급 상황 및 사고 발생에 따른 환경오염을 예방하기 위한 국제적 규제 요구상항을 통하여 여러 나라에 산재해 있는 다양한 극지등급기준과 동결방지처리(Winterization) 기법을 조합하여 통일된 규칙 제정에 힘쓰고 있다 (Kim, et al., 2010).

현재 국내에서는 방한대책에 관한 강제화 된 Code 개발을 위하여 산업원천기술개발사업을 통한 '빙해선박의 극지 항로 안전 운항기술 및 극저온 빙성능 시험평가 기법 개발' (Ministry of Knowledge Economy, 2012)을 진행 중에 있다.

본 논문에서는 이와 관련하여 한국해양연구원에서 선행연구된 '극저온 설계 및 동결방지처리(Winterization) 평가 기술 개발'의 일환으로 진행된 상부갑판 결빙방지를 위한 성능평가 실내실험을 바탕으로 이루어 졌다. 본 실험은 상부 갑판의 착빙방지 및 제빙을 위한 공법 중 통용되고 있는 열선을 이용한 동결방지 처리 공법으로서 상부갑판 하부에 열선을 부착하여 갑판 상부온도를 0℃이상으로 유지하는 목적으로 한다. 그러나 이러한 열선을 이용한 공법의 시행기준은 저온챔버(Cold chamber)를 이용한 온도분포를 측정하는 제한적인 실험에 의존되어 왔다. 하지만 극한환경의 제한적 구현으로 인하여 다양한 환경 및 악조건에서의 구현이 불가능한 것이 사실이다. 이러한 문제를 해결하기 위하여

접수일 : 2012년 10월 12일 | 1차 수정일 : 2012년 11월 22일 | 게재확정일 : 2012년 11월 28일
† Corresponding author : yseo@hhu.ac.kr, 051-410-4846

열전달 해석을 통한 다양한 설계변수의 데이터베이스 구축이 필수적이다.

상부갑판의 경우 극해역의 특성상 자연대류에 의한 열전달보다는 강제대류에 의한 열전달이 더욱 강하게 나타난다. 이는 기존해역의 풍속 및 온도에 비하여 지속적인 극저온 환경을 나타내기 때문이다. 따라서 설계해석에서 중요한 점은 지속적인 풍속과 극저온에서의 열전달을 수치적으로 접근하는 방법이다. 본 논문에서는 이러한 환경조건을 만족하는 동시에 상부갑판의 착빙방지를 위한 온도분포가 이루어지는가에 대하여 중점을 두었으며 정상상태의 열전달 특성을 파악하여 최적 설계에 대해 고찰하였다. 해석 결과의 타당성 검증과 해석에 필요한 데이터를 확보하기 위해 선행 연구 된 실험을 바탕으로 하였으며 측정된 실험 데이터와 수치해석결과를 비교하여 신뢰성을 검증한 뒤, 착빙방지를 위한 열선의 설계인자를 도출하여, 각각의 경우에 대해서 수치해석을 수행하였다.

2. 실 험

한국해양연구원 '극저온 설계 및 동결방지처리(Winterization) 평가기술 개발(2011)'의 일환으로 진행 된 상부갑판의 결빙방지를 위한 성능평가 실험을 토대로 수치해석이 이루어졌으며 실험방법은 다음과 같다.

저온챔버(Cold chamber: 4,700mm×2,500mm×3,300mm)에 설치된 표준시편으로 Fig.1과 같이 강제시편(1,000mm ×1,000mm)을 제작, 열선의 간격 33mm, 65mm, 110mm으로 부착한다. 외부환경조건 10℃, −10℃, −20℃, −30℃에서 바람 발생장치(Fan)를 이용하여 1m/s, 2m/s, 3m/s, 5m/s, 7m/s를 적용한다. 실험에 사용된 열선은 33 W/m, 49 W/m, 65 W/m이며, 강제시편을 가열하여 환경조건 및 간격에서의 온도를 계측한다 (Jeong, et al., 2011a, 2011b; Choi, 1995).

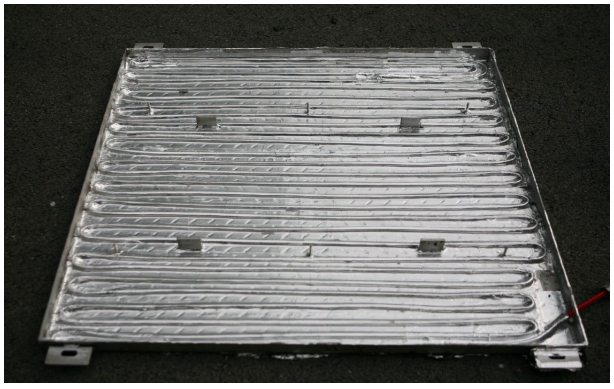
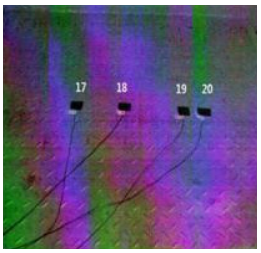


Fig.1 Test panel

제작된 강제시편의 상부에는 Fig.2와 같이 온도센서를 부착하여 각각의 환경조건 및 풍속에서 온도변화를 계측한다. 시간의 흐름에 따라 강제시편의 측정온도가 정상상태를 일정시간 유지하게 되면 순차적으로 저온챔버의 온도를 변화시켜 동일한 방법으로 온도를 계측, 결빙방지 성능평가를 실시한다. 온도 센서의 위치는 Fig.2와 같다.



Ch.17	on the walkway
Ch.18	on the walkway (heating cable)
Ch.19	on the walkway
Ch.20	on the walkway (heating cable)

Fig.2 Location of sensors

3. 수치해석방법 및 경계조건

3.1 지배방정식

본 수치해석 연구는 아래와 같이 비정상 RANS 방정식(Unsteady Reynolds Averaged Navier Stokes Equation)을 지배방정식으로 적용하였다.

연속방정식

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho U) = 0 \tag{1}$$

운동량방정식

$$\frac{\partial (\rho U)}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho U \otimes U) = -\nabla p + \nabla \cdot \tau = S_M \tag{2}$$

여기서, τ는 분자응력텐서이고, S_M은 운동량 항(Momentum Source)이다. 연속방정식은 변환되지 않지만 운동량 방정식과 스칼라 수송방정식은 분자확산유동에 추가되는 난류 유동항을 포함한다.

추가된 난류 유동항 S.S.T.(Shear Stress Transport)모델은 다음과 같이 표현할 수 있다(ANSYS 13 MANUAL).

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho\omega) + \frac{\partial}{\partial x_j}(\rho\omega U_j) = \alpha\rho S^2 - \beta\rho\omega^2 + \frac{\partial}{\partial x_j}\left(\frac{\mu_t}{\sigma_w}\frac{\partial \omega}{\partial x_j}\right) + \frac{2\rho}{\sigma_\Phi}\left(\frac{1}{\omega}\frac{\partial k}{\partial x_j}\frac{\partial \omega}{\partial x_j} - \frac{k}{\omega^2}\frac{\partial \omega}{\partial x_j}\frac{\partial \omega}{\partial x_j}\right) + \tilde{\zeta}_2 k\rho S^2 \frac{L}{L_{\nu k}} \tag{3}$$

레이놀즈 평균에너지 방정식은 (The Reynolds Average

Energy Equation)은 식 (4)과 같이 표현할 수 있다.

$$\frac{\partial(\rho U)}{\partial t}-\frac{\partial \rho}{\partial t}+\nabla \cdot(\rho U h_{tot})= \nabla \cdot(\lambda \nabla T)+\nabla \cdot(U \cdot \tau)+U \cdot S_M+S_E \quad (4)$$

여기서, λ는 열전도계수, S_E는 에너지 항을 나타낸다. 또한 평균 총 엔탈피는 (Enthalpy, h_{tot})는 다음과 같다.

$$h_{tot}=h+\frac{1}{2}U^2+k \quad (5)$$

여기서, 운동에너지(k)는 다음과 같다.

$$k=\frac{1}{2}\overline{u^2} \quad (6)$$

따라서, 변수들이 추가된 방정식은 식(7)과 같다.

$$\frac{\partial(\rho\phi)}{\partial t}-\nabla \cdot(\rho U\phi)= \nabla \cdot(\Gamma \nabla \phi-\rho\overline{u\phi}p)+S_\phi \quad (7)$$

3.2 해석방법

Fig. 3은 본 연구에서 사용된 저온챔버 및 강제시편의 개략도를 나타낸다. 실험환경을 재현에 있어서 지속적으로 저온챔버 내부의 온도가 측정 환경온도 즉, 10℃, 0℃, -10℃, -20℃, -30℃로 유지 할 수 있음과 동시에 순환 될 수 있도록 경계조건을 설정하였다. 또한 바람 발생장치에 의한 강제대류가 일어남과 동시에 강제시편의 주변부에 모델 형상에 의하여 발생할 수 있는 와류에 의한 전열현상을 고려하였다. 또한 선행 실험결과를 통하여 관찰한 결과 바람 발생장치에 의해 형성된 공기의 유동은 강제시편(Walkway)의 상부를 따라 형성되며 바람 발생장치와 인접한 부분에서 발생되어지는 와류현상과 빠른 풍속에 의한 전열현상이 크고 빠르게 진행됨을 볼 수 있었다. 반면 강제시편의 바람 발생장치와 멀어짐으로써 상면을 따라 유동하는 공기는 상대적인 저 풍속 및 고온의 층류가 발달하게 됨으로 부분적인 전열현상이 감소됨을 볼 수 있었다. 이는 강제시편의 바람 발생장치와 인접한 부분으로부터 멀어질수록 계측온도의 상승을 통하여 알 수 있었으며, 전체적인 온도의 분포는 비대칭, 불규칙적으로 나타남을 볼 수 있다. 따라서 결빙방지 해석에 있어 강제시편 상부의 전열형상을 모사하기 위한 변수들 적용과 해석모델은 매우 중요한 경계조건이다. 이에 따라 본 연구에서는 강제시편 상면의 전열현상을 보다 정확하게 표현하기 위하여 CFD (ANSYS Inc., 2010)의 난류모델 중 Two-equation 모델을 사용하였으며 이는 기존의 $k-\epsilon$ 모델에 비하여 높은 정확성을 보여주기 때문이다. 특히 S.S.T.(Shear Stress Transport) model은 압력의 역 구배에 의한 유동 박리의 보다 정확한 예측이 가능함으로 적용되었으며 유동박리 및 난류에 의한 전열현상을 함께 고려하였다.

해석에 적용된 열선은 33 W/m, 49 W/m, 65 W/m로서 총 3가지의 Case로 열 유량(heat flux)로 환산하여 970.00 W/m^2, 1441.17 W/m^2, 1911.76 W/m^2를 적용하였다. 열선에 의하여 강제시편에 전열된 열량은 상면(경계면)에 바람 발생장치에 의해 형성된 유동장에 의하여 지속적으로 전열현상이 이루어진다. 따라서 특정시간 이후 정상상태가 지속적으로 유지되어 질 때 저온챔버의 온도를 변화시킴으로써 각각의 경우에 대한 수렴되어지는 온도를 도출하였다.

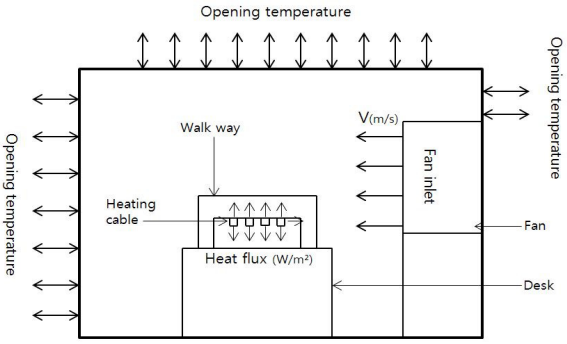


Fig. 3 Conceptual diagram of cold chamber

해석에 사용된 모델의 각 도메인은 해석결과의 타당성 평가를 위하여 실제 실험 환경과 같은 규격으로 모델링하였으며 해석의 정확성과 시간적 효율성을 높이기 위하여 경계면과 밀접한 부분에 대한 격자 $0.1e-003m$을 기준으로 체적증가율(Growth ratio: 1.2)를 적용하였다. Fig.4는 전체모델의 형성된 격자를 나타내고 있으며 격자의 개수는 열선의 간격에 따라 약 50~70만개이다 (Kim, et al., 2011).

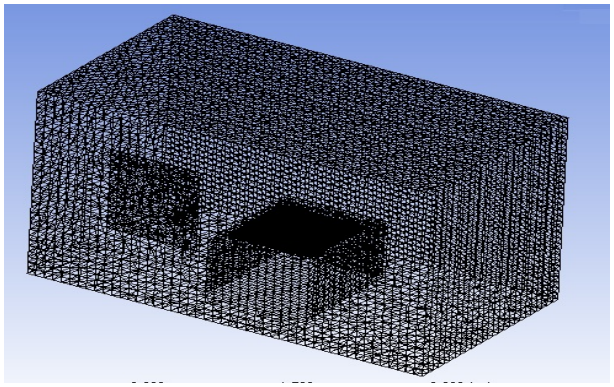


Fig.4 Grid generation for analysis

3.3 해석항목 및 재료 적용 물성치

3.3.1 해석항목

강제시편의 결빙방지 기준을 검토하기 위한 해석은 총 225회

(풍속 5 Case× 열선의 간격 3 Case× 열선의 종류 3 Case× 환경온도항목 5 Case) 수행되었다. 각각의 항목에 대하여 동일한 경계조건을 적용하고 각각의 변수에 따른 강제시편 상의 온도 변화를 관찰 및 분석한 후 결빙방지가 이루어질 수 있는 온도 즉, 0℃이상의 평균온도를 유지할 때의 열량과 간격을 선정함으로써 선박의 구동환경에 적합한 기준을 선정하고자 한다.

3.3.2 재료별 적용 물성치

Table 1은 저온챔버 domain 내부를 이루는 공기의 온도별 물성치이다. 난류가 발달하게 될 바람 발생장치와 인접한 강제시편의 앞부분에 비하여 층류 층이 발달하게 될 강제시편의 뒷부분의 유동 해석에서는 층류와 난류 현상구현을 위한 공기의 온도별 물성치를 충분히 고려되어야 한다. 바람 발생장치에서 유입되어질 공기 역시 동일한 물성치를 적용하였으며 입구에서의 풍속을 적용풍속의 기준으로 설정하였다. Table 2는 강제시편과 열선의 물성치이며 Table 3는 실험에서 사용된 열선의 열 유량을 환산한 것이다.

Table 1 Properties of air

Temp.	Density (kg/m^3)	Specific heat capacity $(kJ/kg.K)$	Thermal conductivity $(W/m.K)$	Expansion coefficient $(1/K)$	Dynamic viscosity $(kg/m.s)$
10℃	1.240	1.005	0.025	0.0035	1.80e-05
0℃	1.293	1.005	0.024	0.0036	1.71e-05
-10℃	1.350	1.005	0.023	0.0037	1.68e-05
-20℃	1.420	1.005	0.022	0.0039	1.62e-05
-30℃	1.480	1.005	0.021	0.0041	1.56e-05

Table 2 Properties of material

Material	Density (kg/m^3)	Specific heat capacity $(kJ/kg.K)$	Thermal conductivity $(W/m.K)$
Copper	8933	3.85e+02	401.0
Steel	7923	4.34e+02	60.5

Table 3 Heat flux

Product	Nominal electric power output (W/m at 10℃)	heating power capacity (W/m^2)
10XTV_CT	33	970.00
15XTV_CT	49	1441.17
20XTV_CT	65	1911.76

4. 타당성 검토

제안된 수치해석 해석방법 결과의 타당성을 검토하고자 선행되었던 한국해양연구원의 "빙해선박의 극지항로 안전운항기술 및 극저온 빙성능 시험평가 기법 개발" 2차 년도 결과 보고서의 실험 결과를 참고하였다. 다음의 Table 4~7의 음영부분은 실내실험이 이루어진 실험결과와 동일한 실험조건에서의 수치해석이 이루어진 비교분석이 가능한 항목들이다. 편의상 Case(No.)를 기준으로 순서대로 Case(NO.)-(1~9)로 명명하였다. 따라서 비교 가능한 항목은 음영 부분인 Case2-5, Case2-7, Case4-5, Case4-7의 항목들이다.

Table 4 Numerical Analysis of the average temperature: Case2

Wind speed (m/s)	2								
Interval(mm)	33			65			110		
Heating coil (W/m) / Temp.(℃)	33	49	65	33	49	65	33	49	65
10	62.2	87.7	112	40.8	56.2	56.8	37.7	51.1	73.6
0	53.9	80.7	106	32.1	48.7	62.1	28.2	41.8	69.5
-10	43.9	68.2	92.8	21.7	37.1	51.4	19.0	33.8	59.5
-20	33.5	59.9	86.1	11.7	26.9	41.3	9.5	23.8	49.5
-30	24.0	49.9	76.1	1.6	16.7	31.2	-0.4	13.9	39.5

Table 5 Experimental of the average temperature: Case2

Wind speed (m/s)	2								
Interval(mm)	33			65			110		
Heating coil (W/m) / Temp.(℃)	33	49	65	33	49	65	33	49	65
10					53.2		36.4		
0					46.3		26.7		
−10					37.2		17.0		
−20					27.8		10.5		
−30					18.2		−2.0		

Table 6 Numerical Analysis of the average temperature: Case4

Wind speed (m/s)	5								
Interval(mm)	33			65			110		
Heating coil (W/m) / Temp.(℃)	33	49	65	33	49	65	33	49	65
10	44.6	61.4	80.1	30.4	40.0	51.2	29.6	39.0	52.6
0	35.4	52.7	69.7	21.0	31.7	42.4	19.8	29.4	43.2
−10	25.5	42.7	58.8	10.9	21.5	32.3	9.9	19.6	33.7
−20	15.4	32.1	48.8	0.8	10.7	21.9	0.1	9.8	23.8
−30	5.1	22.2	39.1	−9.4	0.54	11.8	−9.7	1.0	15.6

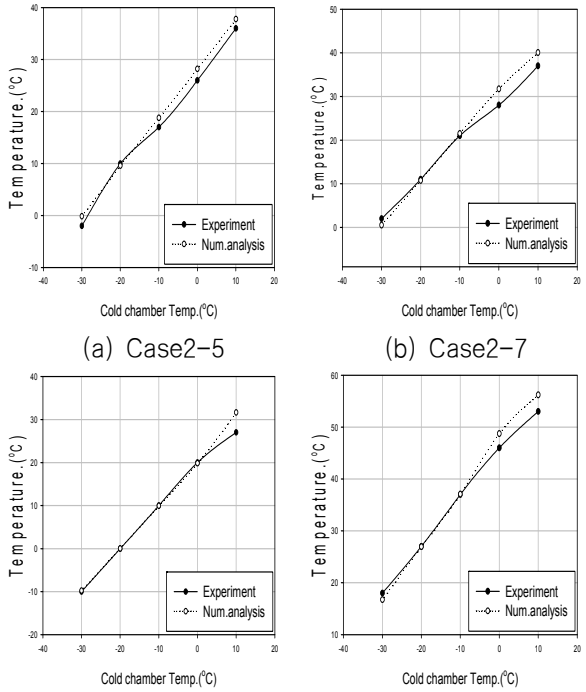
Table 7 Experimental of the average temperature: Case4

Wind speed (m/s)	5								
Interval(mm)	33			65			110		
Heating coil (W/m) / Temp.(℃)	33	49	65	33	49	65	33	49	65
10					37.8		27.2		
0					28.7		20.5		
−10					21.2		10.0		
−20					11.3		0.0		
−30					2.1		−10		

Fig. 5는 각각의 경우에 대하여 강제시편 상면의 평균온도를 비교하여 도식화 하였다. 실선은 실험 온도 값을 나타내며, 점선은 수치해석 결과 온도를 나타낸다.

결과비교는 수치해석시의 온도 관찰지점의 위치와 실내 실험 온도센서 위치의 측정온도의 평균값 비교를 통하여 이를 확인하였으며 온도 변화 추이가 유사하게 도출되었다.

또한 측정 및 해석된 평균온도 값은 ±1~2℃ 정도의 근소함을 보이고 있으며 거의 동일한 온도가 도출됨을 확인할 수 있으며, 본 논문에서 제안한 모델과 수치해석 기법이 신뢰성을 갖는 것을 확인할 수 있다 (Juen, 2005).



(a) Case2-5 (b) Case2-7

(c) Case4-5 (d) Case4-7

Fig. 5 Average temperature at the walkway surface Comparisons with data provided by MOERI

5. 결과 및 분석

열선을 $33mm$, $65mm$, $110mm$로 배치하였을 때 공급되는 전력량 $33\,W/m$, $49\,W/m$, $65\,W/m$ 에 따라 풍속-온도, 간격-온도, 전력량-온도 특성을 파악하였다.

Table 8~13은 환경온도 -20℃, -30℃에서 전력량, 풍속, 열선간격에 따른 평균온도의 변화를 보여주고 있다. 옅은 음영은 적절온도로 수렴했을 때를 나타내며 짙은 음영은 결빙방지를 기대하기 어려운 수렴온도를 나타낸다. 이를 도표화 한 이유는 -20 ~ -30℃ 환경온도 내에서 결빙방지를 기대하기 어려운 구간이 발생하기 때문이다. Fig. 6은 변화경향을 표현하기 위하여 제시되었으며 외부온도 -30℃일 때의 온도변화 경향을 나타낸다.

Fig.6을 통하여 풍속의 증가에 따라 온도변화 곡선은 완만함을 확인할 수 있다. 이는 과잉 공급된 열량은 일정간격으로 배치된 열선의 사이에 충분한 열에너지를 공급하게 되지만 풍속의 증가와 동시에 증가하게 되는 전열현상은 강제시편 자체에서의 열전달보다 급속한 열손실을 초래하기 때문이다. 따라서 열선과 접합부에서의 강제시편 상면은 점차 열평형을 이루게 되어 도출되어지는 평균온도의 변화는 완만함을 보이게 된다.

Table 8 Numerical Analysis of the average temperature at -20℃, $33\,W/m$

Wind speed(m/s) / inter.(mm)	1	2	3	5	7
33	41.4	35.5	25.5	15.4	9.1
65	18.9	11.6	6.4	0.8	-2.5
110	26.6	9.6	6.0	0.1	-3.1

Table 9 Numerical Analysis of the average temperature at -20℃, $49\,W/m$

Wind speed(m/s) / inter.(mm)	1	2	3	5	7
33	78.4	59.9	47.6	32.1	23.2
65	38.4	26.9	20.0	10.7	7.3
110	32.4	23.9	18.6	9.8	5.3

Table 10 Numerical Analysis of the average temperature at -20℃, $65\,W/m$

Wind speed(m/s) / inter.(mm)	1	2	3	5	7
33	109	86.1	69.7	48.8	37.3
65	69.4	59.5	38.1	23.8	15.9
110	57.2	41.3	33.3	21.9	14.2

Table 11 Numerical Analysis of the average temperature at -30℃, $33\,W/m$

Wind speed(m/s) / inter.(mm)	1	2	3	5	7
33	31.4	24.0	15.5	5	-0.9
65	15.8	1.6	-3.5	-9.4	-12.6
110	9.1	-0.4	-3.9	-9.7	-13.0

Table 12 Numerical Analysis of the average temperature at -30℃, $49\,W/m$

Wind speed(m/s) / inter.(mm)	1	2	3	5	7
33	68.3	49.9	37.7	22.2	13.3
65	28.4	16.7	9.9	0.5	-2.2
110	22.4	13.9	8.5	1.0	-4.7

Table 13 Numerical Analysis of the average temperature at -30℃, $65\,W/m$

Wind speed(m/s) / inter.(mm)	1	2	3	5	7
33	98.8	76.1	59.9	39.2	27.3
65	49.5	39.5	28.2	15.6	6.1
110	46.9	31.2	23.3	11.8	4.2

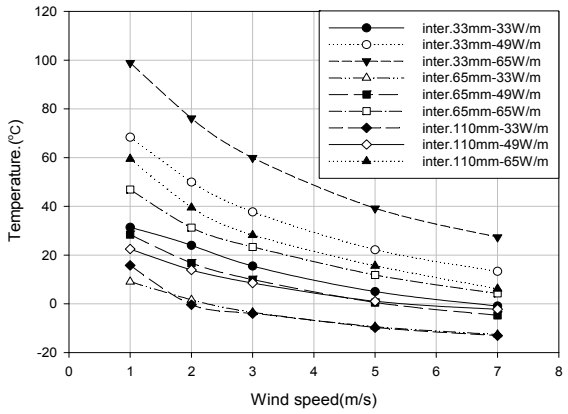


Fig.6 Average temperature at the walkway on each wind speed (−30℃)

저온챔버 내부에 지속적인 풍속이 적용될 때 풍속 $1m/s$의 증가에 따라 크게는 22℃에서 적게는 2℃정도 감소함을 Table 8~13을 통하여 알 수 있다.

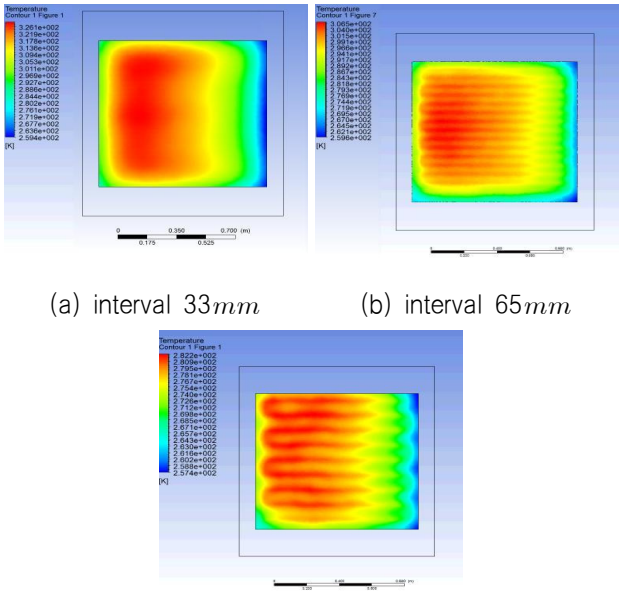
해석결과 열선의 간격이 조밀한 $33mm$의 경우 해석항목 대부분에서 0℃이상을 유지하고 있었으나 전력량 $49\,W/m$, $65\,W/m$의 경우 최대 109℃ 최소 −0.9℃로 부분적으로 과도한 전력이 사용됨을 알 수 있다.

또한 해석항목 중 가장 극한 환경은 −30℃, $7m/s$의 경우에서 $33mm$의 상대적으로 조밀한 배치임에도 불구하고 $33\,W/m$ W/m의 전력이 공급되었을 때 −0.9℃의 온도로 수렴함을 보였으며, 부분적으로 결빙방지를 기대하기 어려울 것으로 보여 진다. 따라서 −30℃, $7m/s$환경에 $33mm$의 열선간격을 배치하고자 한다면 $33\,W/m$이상의 전력을 사용하여야 한다. 그러나 항해지역의 최저온도가 −40℃이하 풍속 $7m/s$이상의 극한지역에서는 오히려 $33mm$의 열선 간격에서는 $49\,W/m$의 전력 이상을 사용하는 것이 결빙방지에 적합할 것으로 예상된다.

열선의 간격이 $65mm$인 경우 즉, $33\,W/m$의 전력이 공급되어 질 때 외부온도 −20℃, −30℃에서 풍속이 증가함에 따라 영하의 온도를 보이고 있으며 $7m/s$에서는 각각 −2.52℃, −12.58℃로 결빙방지 효과를 기대 할 수 없을 것으로 나타났다. 또한 전력 $49\,W/m$이 공급될 때 외부온도 −30℃, 풍속 $7m/s$에서 −2.2℃ 로 풍속이 $7m/s$이상으로 지속된다면 이 또한 결빙방지 효과를 기대하기 어려울 것으로 판단되어진다. 따라서 간격 $65mm$의 경우 −30℃, $7m/s$의 환경에서 $65\,W/m$이상의 전력을 사용할 때 결빙방지가 이루어 질수 있음을 알 수 있다. 그러나 적용풍속이 $7m/s$ 이상, −30℃이하의 온도가 작용되어질 때 $65\,W/m$의 전력이 공급됨에도 불구하고 결빙방지 효과를 기대하기 어려울 것으로 예상되어진다.

또한 열선의 간격 $110mm$를 적용하고자할 때 −30℃,$7m/s$의 환경에서는 $65\,W/m$ 이상의 전력을 공급해야 함을 알 수 있다.

Fig.7는 열선 간격에 따른 온도 Contour을 나타낸다. 열선사이의 간격이 증가함에 따라 열선사이 강제시편의 온도는 풍속 및 외부온도에 의한 전열현상이 더욱 크게 나타남을 보여준다. 열선의 간격에 조밀($33mm$의 경우)할수록 열선에 공급되는 전력에 의한 온도증가는 열선과 열선사이의 부분에도 영향을 주어 고른 온도분포를 나타내었으나 $65mm$와 $110mm$의 열선간격에서는 열선사이의 간격이 넓어짐에 따라 열선주변부로 멀어질수록 강제시편상의 열전달보다는 풍속과 외부온도에 의한 전열현상으로 인한 열손실이 일어남으로써 온도가 감소하며 열선주변부의 온도는 공급열량과 환경에 의한 열손실이 거의 평형을 이루어 간격의 변화와는 크게 영향이 없이 유사한 온도를 보임을 알 수 있다.



(a) interval $33mm$ (b) interval $65mm$

(c) interval $110mm$

Fig.7 Temperature contour at walkway surface

그러나 수치해석에서 도출된 온도는 열선주변부의 온도임으로써 0℃이상의 온도를 나타내었다고는 하나 Fig. 7에서 확인 할 수 있듯이 열선사이의 온도는 0℃이하의 온도를 보일 가능성이 있으며 부분적인 결빙이 있음을 고려하여야 한다.

Fig.8, 9, 10는 $33\,W/m$, $49\,W/m$, $65\,W/m$의 전력이 공급될 때 저온챔버의 온도 −30℃에서의 풍속-간격에 따른 온도변화를 나타낸다. 이를 선정한 이유는 결빙방지를 위한 수치해석 분석에 있어 −30℃에서의 수렴온도 값이 영하의 온도를 두드러지게 나타내기 때문이다. Fig.8에서 볼 수 있듯이 $3m/s$, −30℃에서 간격$65mm$~$110mm$에서 0℃이하의 온도를 보이고 있다. 또한 적용 풍속이 $5m/s$, $7m/s$ 일 때 관찰한 대부분의 열선 간격구간에서 0℃ 이하의 온도를 보이고 있다. 즉 $33\,W/m$의 전력이 공급될 때 풍속 $5m/s$, $7m/s$, 간격 $33mm$~$110mm$, 외부온도 −30℃에서는 결빙방지 효과를 기대하기 어렵다.

또한 Fig.9에서 볼 수 있듯이 $49\,W/m$의 전력이 공급될 경우 대부분 0℃이상의 온도를 보이고 있으나 $7m/s$, −30℃에서 간격 $65mm$~$110mm$사이에서 0℃ 이하의 수렴온도를 보이고 있다. 이러한 부분은 결빙방지를 기대하기 어려우나 열선을 간격

50mm정도로 배치한다면 충분한 결빙방지 효과를 기대할 수 있을 것으로 예상된다.

Fig.10에서 볼 수 있듯이 사용전력 65 W/m의 경우 전력의 증가에 따라 모든 열선간격에서 0℃이상의 수렴온도를 보이고 있다. 이러한 경우 열선간격 65mm이하로 배치하는 것은 과도한 설계임을 알 수 있다.

Fig.11은 해석 경우 중 가장 극한의 환경인 -30℃, $7m/s$ 환경에서 열선 간격에 공급되는 전력량에 따른 온도변화를 보여준다. 이를 통해 간격 33mm, 65mm, 110mm의 경우에 대하여 적절한 전력량을 예상할 수 있다.

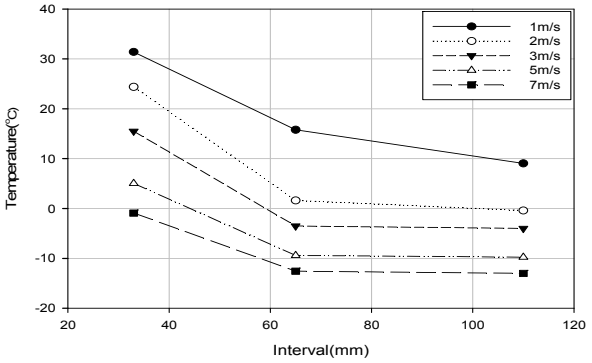


Fig.8 Surface temperature considering condition: Heating cable:33 W/m - Amb. Temperature:-30℃

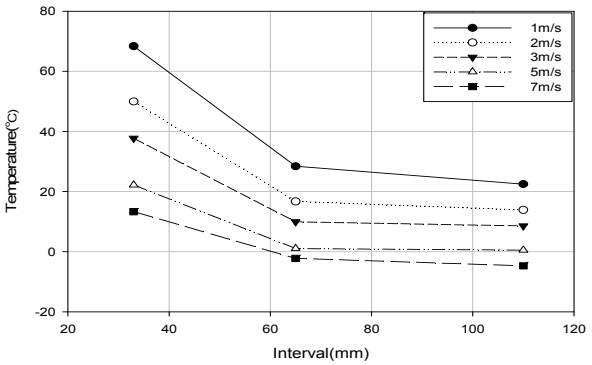


Fig.9 Surface temperature considering condition: Heating cable:49 W/m - Amb. Temperature:-30℃

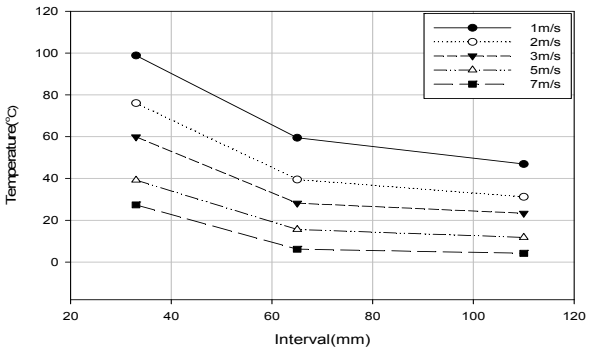


Fig.10 Surface temperature considering condition: Heating cable:65 W/m - Amb. Temperature:-30℃

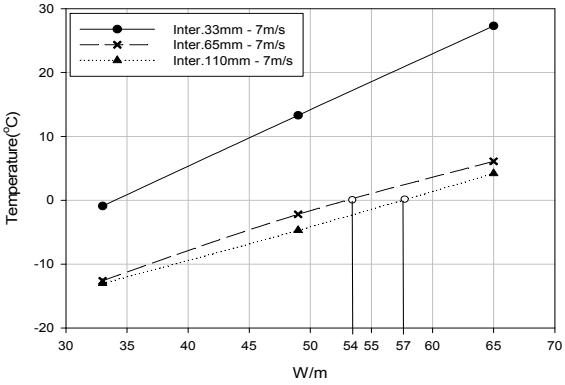


Fig.11 Surface temperature of electric power

열선의 간격이 33mm인 경우 최악의 환경인 -30℃, $7m/s$를 고려하였을 때 33 W/m에서 대부분 결빙방지가 이루어짐을 알 수 있다. 역시 65mm, 110mm의 경우에서도 동일한 상황을 고려하였을 때 적절 전력량을 예상할 수 있으며 65mm일 경우 52 W/m 이상의 전력이, 110mm일 경우 57 W/m 이상의 전력이 적절함을 알 수 있다.

6. 결 론

본 논문에서는 열전달 수치해석을 이용하여 빙해선박 상부갑판(walkway)의 열선을 이용한 결빙방지 방법을 수치적으로 모사하였고, 이를 실험과 비교, 분석하였으며 결과를 요약하면 다음과 같이 요약할 수 있다.

(1) 본 연구는 선박에서 공급될 수 있는 전력, 열선의 제원, 항해해역의 온도와 풍속을 통하여 적절한 열선의 간격 설정의 기준을 제시하고자 하였으며, 설계기준 제시를 통하여 과도하거나 부적합한 열선의 배치를 사전에 방지함과 동시에 경제적이고 효율적인 설계가 가능하게 하고자 수행되었다.

(2) 해석 방법에 있어 풍속에 의한 강제대류 및 강제시편에서 발생되는 난류 특성 등을 고려하여 열전달 특성을 분석하였다.

(3) 본 연구에서 대상으로 한 강제시편은 한국해양연구원에서 선행연구 되었던 자료를 바탕으로 구현되었으며 동일한 제원 및 규격으로 모델링하였다. 수치해석 결과 각각의 환경조건에서 강제시편의 온도는 발산하지 않고 특정온도로 수렴함을 보였으며 수렴온도 값은 실내실험값과 매우 유사함을 보였다.

(4) 저온챔버 내부에 풍속이 지속적으로 공급될 때 Table 8~13을 통해 결과를 관찰한 결과 풍속의 증가에 따라 크게는 22℃에서 적게는 2℃ 정도 감소함을 보이며, 풍속에 따른 온도 변화량은 공급전력이 증가하면서 커지는 경향을 보였다. 열선의 간격이 증가하는 경우 33mm ~ 65mm사이에서 온도변화가 급격하게 발생하는데 이는 열선사이 부분에 공급되는 열량보다 강제대류에 의한 열손실이 급격하게 증가하여 발생하였기 때문으로 사료되며 특정 간격이상에서 공급되는 열량이 모두 손실됨으로 인하여 강제시편 상에 부분적으로 결빙현상이 발생할 수 있을 것

으로 판단되나, 열선주변부의 평균온도 변화는 상대적으로 감소되는 양이 줄어듦을 볼 수 있어 부분적인 결빙방지 역시 가능하다고 판단된다.

(5) 수치해석 항목 중 10℃ ~ -10℃사이의 환경온도에서는 수렴온도 값이 모두 영상의 온도를 보였다. 반면 -20℃, -30℃의 외부 환경온도에서는 부분적으로 영하의 수렴온도 값을 보였다. 따라서 이와 같은 환경을 고려한 Table 8~13을 이용한다면 선박의 항해지역 온도와 풍속, 공급 가능한 전력이 결정됨에 따라 0℃이상을 유지할 수 있는 적절한 간격을 도출할 수 있다. 이러한 열선간격 기준을 제시함으로써 과도한 배치설계나 부적합한 설계를 피할 수 있으며, 경제적이고 효율적인 배치가 가능한 기준이 될 것으로 사료된다.

후 기

본 논문은 지식경제부 산업원천기술개발사업인 “빙해선박의 극지항로 안전운항기술 및 극저온 빙성능 시험 평가 기법 개발” 중“ 극지용 저온 설계 및 Winterization 평가기술(PNS133C)"과제의 연구비 지원으로 수행된 결과이다.

참 고 문 헌

ANSYS Inc., 2010. *ANSYS User's Manual Fluent Theory Guide. Version 13.0.*. ANSYS Inc.: USA.

Choi, K.S., 1995. Prospects of the Domestic and Foreign Academic Research in the Polar Engineering. *Journal of the Society of Naval Architects of Korea,* 32(32), pp.27-32.

Jeong, S.Y. Lee, C.J. & Cho, S.R., 2011a. A Study on Anti-icing Technique for Ballast Water of Icebreaking Vessels Operating in Ice-covered Water. *Journal of the Society of Naval Architects of Korea,* 48(1), pp.93-97.

Jeong, S.Y. Chun, E.J. Cho, S.R. & Lee, C.J., 2011b. A Study on Anti-icing Technique for Weather-Tight Door of Ice-Strengthened Vessel. *Journal of the Society of Naval Architects of Korea,* 48(6), pp.575-580.

Juen, H.Y. Lee, C.K. Bae, H.J. & Lee, S. J., 2005. A Study on Performance Test and Verification of Heat Transfer characteristics in Automobile Rear Window Heater. *Journal of the Korea Society for Power System Engineering,* 9(2), pp.73-80.

Kang, H.K. Kim, K.P. & Kim, D.H., 2010. Requirements of Mechanical and Environmental Conditions on Winterization of Vessels Intended for Cold Climate Operation. *Collection of dissertations of The Korea Society of Marine Engineering,* 2010(10), pp.83-86.

Kim, K.P. Kang, H.K. Kim, D.H. & Ha, T.B., 2010. International Convention & Class Requirement of Equipments for Ice Class Vessels Collection of dissertations of The Korea Society of Marine Engineering. *Journal of the Korea Society for Power System Engineering,* 2(), pp.73-80.

Kim, Y.K. Yang, J.S. Kim, K.C. & Ji, H.S., 2011. Numerical Study on the Performance Assessment for Defrost and De-Icing Modes. *Journal of mechanical science and technology,* 35(2), pp.161-168.

Ministry of Knowledge Economy, 2012. *Cold Region Design Specification and Winterization(PNS133C).*

이 종 찬

서 영 교

이 춘 주