



저작자표시-비영리-변경금지 2.0 대한민국

이용자는 아래의 조건을 따르는 경우에 한하여 자유롭게

- 이 저작물을 복제, 배포, 전송, 전시, 공연 및 방송할 수 있습니다.

다음과 같은 조건을 따라야 합니다:



저작자표시. 귀하는 원저작자를 표시하여야 합니다.



비영리. 귀하는 이 저작물을 영리 목적으로 이용할 수 없습니다.



변경금지. 귀하는 이 저작물을 개작, 변형 또는 가공할 수 없습니다.

- 귀하는, 이 저작물의 재이용이나 배포의 경우, 이 저작물에 적용된 이용허락조건을 명확하게 나타내어야 합니다.
- 저작권자로부터 별도의 허가를 받으면 이러한 조건들은 적용되지 않습니다.

저작권법에 따른 이용자의 권리는 위의 내용에 의하여 영향을 받지 않습니다.

이것은 [이용허락규약\(Legal Code\)](#)을 이해하기 쉽게 요약한 것입니다.

[Disclaimer](#)

공학석사 학위논문

내빙선박용 풍우밀문과 아이스 클래스  
루버의 결빙방지, 해빙 성능평가 및  
설계기준에 관한 연구

A Study on the Anti-Icing, De-Icing Performance Evaluation and  
Design Guide for Weather-Tight Door & Ice Class Louver of the  
Vessels Operating in Cold Region

지도교수 서 영 교



2015년 2월

한국해양대학교 대학원

해양공학과

정 영 준

本 論 文 을 鄭 泳 俊 의 工 學 碩 士 學 位 論 文 으 로 認 准 함.

위원장      공학박사      박 선 호



위 원      공학박사      하 승 현



위 원      공학박사      서 영 교



2014년 12월 19일

한국해양대학교 대학원

# 목 차

List of Figures .....	iii
List of Tables .....	vi
Abstract .....	viii
<b>제 1 장 서 론 .....</b>	<b>1</b>
1.1 연구 배경 .....	1
1.2 Anti-icing/De-icing 시험기법 .....	3
1.3 연구내용 및 방법 .....	5
<b>제 2 장 실내모형실험 및 유한요소해석 .....</b>	<b>6</b>
2.1 실내모형실험 방법 .....	6
2.1.1 Weather-Tight Door의 실내모형실험 방법 .....	6
2.1.2 Ice Class Louver의 실내모형실험 방법 .....	7
2.2 유한요소해석 방법 .....	8
2.2.1 Weather-Tight Door의 유한요소해석 방법 .....	8
2.2.2 Weather-Tight Door의 유한요소해석 지배방정식 .....	9
2.2.3 Weather-Tight Door의 유한요소해석 항목 및 재료 물성치 ..	10
2.2.4 Ice Class Louver의 유한요소해석 방법 .....	12
2.2.5 Ice Class Louver의 유한요소해석 지배방정식 .....	14
2.2.6 Ice Class Louver의 유한요소해석 항목 및 재료 물성치 .....	15
<b>제 3 장 유한요소해석의 타당성 검토 .....</b>	<b>17</b>
3.1 Weather-Tight Door의 유한요소해석 타당성 검토 .....	17
3.2 Ice Class Louver의 유한요소해석 타당성 검토 .....	23
<b>제 4 장 수치해석 수행결과 및 분석 .....</b>	<b>26</b>
4.1 Weather-Tight Door의 수치해석 수행결과 및 분석 .....	26
4.1.1 열선용량에 따른 수치해석 수행결과 및 분석 .....	26

4.1.2 강관의 두께에 따른 수치해석 수행결과 및 분석 .....	28
4.2 Ice Class Louver의 수치해석 수행결과 및 분석 .....	32
제 5 장 결 론 .....	41
참고문헌 .....	43



## List of Figures

Fig. 1 Freezing of the vessels operating in cold region .....	2
Fig. 2 Key consideration for winterization .....	3
Fig. 3 The procedure of anti-icing performance evaluation .....	4
Fig. 4 The procedure of de-icing performance evaluation .....	4
Fig. 5 Sensor location in the weather-tight door .....	6
Fig. 6 Sensor location on the blade of the ice class louver .....	7
Fig. 7 Cross-sectional diagram of the weather-tight door in the cold-chamber .....	8
Fig. 8 Grid generation of the weather-tight door for the analysis .....	9
Fig. 9 Longitudinal section of the cold-chamber experiment .....	12
Fig. 10 Location of the heating cable on the ice class louver blade (front, center, behind) .....	13
Fig. 11 Grid generation of the ice class louver for analysis .....	13
Fig. 12 Numerical analysis data of #11: Compared with the experimental data(left). Numerical analysis data of #11: Compared with the experimental data except in the -10°C(right) .....	19
Fig. 13 Numerical analysis data of #12: Compared with the experimental data(left). Numerical analysis data of #12: Compared with the experimental data except in the -10°C(right) .....	19
Fig. 14 Numerical analysis data of #13: Compared with the experimental data(left). Numerical analysis data of #13: Compared with the experimental data except in the -10°C(right) .....	20
Fig. 15 Numerical analysis data of #14: Compared with the experimental data(left). Numerical analysis data of #14: Compared with the experimental data except in the -10°C(right) .....	20
Fig. 16 Numerical analysis data of #15: Compared with the experimental data(left). Numerical analysis data of #15: Compared	

	with the experimental data except in the -10°C(right) .....	21
<b>Fig. 17</b>	Numerical analysis data of #16: Compared with the experimental data(left). Numerical analysis data of #16: Compared with the experimental data except in the -10°C(right) .....	21
<b>Fig. 18</b>	The graph of the weather-tight door experimental result .....	22
<b>Fig. 19</b>	The graph of the ice class louver experimental result .....	25
<b>Fig. 20</b>	The graph of the ice class louver numerical analysis result .....	25
<b>Fig. 21</b>	Numerical analysis of the weather-tight door for each heating cable power output: External environmental temperature -40°C .....	27
<b>Fig. 22</b>	Numerical analysis of the weather-tight door for each heating cable power output: External environmental temperature -55°C .....	28
<b>Fig. 23</b>	Numerical analysis of the weather-tight door for each thickness of the circular bar: Heating cable power output 33 <i>W/m</i> (External environmental temperature: 0°C(top left), -10°C(top center), -20°C(top right), -30°C(bottom left), -40°C(bottom right) .....	29
<b>Fig. 24</b>	Numerical analysis of the weather-tight door for each thickness of the circular bar: Heating cable power output 45 <i>W/m</i> (External environmental temperature: 0°C(top left), -10°C(top center), -20°C(top right), -30°C(bottom left), -40°C(bottom right) .....	30
<b>Fig. 25</b>	Numerical analysis of the weather-tight door for each thickness of the circular bar: Heating cable power output 66 <i>W/m</i> (External environmental temperature: 0°C(top left), -10°C(top center), -20°C(top right), -30°C(bottom left), -40°C(bottom right) .....	31
<b>Fig. 26</b>	Numerical analysis of the ice class louver: External temperature 0°C, relative velocity 1 <i>m/s</i> , heating cable power output 33 <i>W/m</i> (Location of heating cable: front(left), center(center), behind(right)) .....	32
<b>Fig. 27</b>	The graph of the ice class louver numerical analysis: External temperature 0°C, relative velocity 1 <i>m/s</i> , heating cable power output 33 <i>W/m</i> .....	33

<b>Fig. 28</b> Numerical analysis of the ice class louver: External temperature -15°C , relative velocity 1 <i>m/s</i> , heating cable power output 33 <i>W/m</i> (Location of heating cable: front(left), center(center), behind(right)) .....	33
<b>Fig. 29</b> The graph of the ice class louver numerical analysis: External temperature -15°C , relative velocity 1 <i>m/s</i> , heating cable power output 33 <i>W/m</i> .....	34
<b>Fig. 30</b> Numerical analysis of the ice class louver: External temperature -30°C , relative velocity 1 <i>m/s</i> , heating cable power output 33 <i>W/m</i> (Location of heating cable: front(left), center(center), behind(right)) .....	34
<b>Fig. 31</b> The graph of the ice class louver numerical analysis: External temperature -30°C , relative velocity 1 <i>m/s</i> , heating cable power output 33 <i>W/m</i> .....	35
<b>Fig. 32</b> Numerical analysis of the ice class louver according to the relative velocity: Heating cable power output 33 <i>W/m</i> (Location of heating cable: front(top left), center(top right), behind(bottom)) .....	36
<b>Fig. 33</b> Numerical analysis of the ice class louver according to the relative velocity: Heating cable power output 45 <i>W/m</i> (Location of heating cable: front(top left), center(top right), behind(bottom)) .....	37
<b>Fig. 34</b> Numerical analysis of the ice class louver according to the relative velocity: Heating cable power output 66 <i>W/m</i> (Location of heating cable: front(top left), center(top right), behind(bottom)) .....	38

## List of Tables

<b>Table 1</b> Properties of the air .....	11
<b>Table 2</b> Properties of the material .....	11
<b>Table 3</b> Information of the heating cable and the heat generation .....	11
<b>Table 4</b> Properties of the air .....	15
<b>Table 5</b> Properties of the material .....	16
<b>Table 6</b> Information of the heating cable and the heat generation .....	16
<b>Table 7</b> Numerical analysis data and experimental data of the sensor temperature .....	18
<b>Table 8</b> Numerical analysis data of the weather-tight door: Compared with the numerical analysis data except in the $-10^{\circ}\text{C}$ : External environmental temperature $-10^{\circ}\text{C}$ .....	23
<b>Table 9</b> Estimated experimental data of the weather-tight door: Compare with the experimental data except in the $-10^{\circ}\text{C}$ : External environmental temperature $-10^{\circ}\text{C}$ .....	23
<b>Table 10</b> Numerical analysis data and experimental data of the sensor temperature .....	24
<b>Table 11</b> Numerical analysis of weather-tight door: External environmental temperature $-40^{\circ}\text{C}$ .....	26
<b>Table 12</b> Numerical analysis of weather-tight door: External environmental temperature $-55^{\circ}\text{C}$ .....	27
<b>Table 13</b> Numerical analysis of the weather-tight door for each thickness of the circular bar: Heating cable power output $33\text{ W/m}$ .....	29
<b>Table 14</b> Numerical analysis of the weather-tight door for each thickness of the circular bar: Heating cable power output $45\text{ W/m}$ .....	30

<b>Table 15</b>	Numerical analysis of the weather-tight door for each thickness of the circular bar: Heating cable power output 66 $W/m$ .....	31
<b>Table 16</b>	Numerical analysis of the ice class louver according to the relative velocity: Heating cable power output 33 $W/m$ .....	36
<b>Table 17</b>	Numerical analysis of the ice class louver according to the relative velocity: Heating cable power output 45 $W/m$ .....	37
<b>Table 18</b>	Numerical analysis of the ice class louver according to the relative velocity: Heating cable power output 66 $W/m$ .....	38
<b>Table 19</b>	Numerical analysis data of the sensor temperature (Location of the heating cable: front) .....	40



# A Study on the Anti-Icing, De-Icing Performance Evaluation and Design Guide for Weather-Tight Door & Ice Class Louver of the Vessels Operating in Cold Region

Young Jun Jung

Department of Ocean Engineering

Graduate School of Korea Maritime University

## Abstract

For the design guide of a vessel operating in cold region, numerical analysis was carried out to evaluation weather-tight door and ice class louver which installed the heating cables by using ANSYS 13.0. This study based on the experimental results of ‘A Study on Anti-Icing Technique for Weather-Tight Door of Ice-Strengthened Vessels’ and ‘The Cryogenic Performance Evaluation for the Excellent De-icing Ice Class Louver’ in KRISO. The numerical analysis of weather-tight door was performed by considering Advection-Diffusion equation. In case of ice class louver’s numerical analysis was performed by considering RANS(Unsteady Reynolds Averaged Navier Stokes) equation. The numerical analysis results applying the same specifications and the position of the temperature sensor compare with the cold-chamber experimental data for validation of

numerical analysis. The design variable factors of weather-tight door external environmental temperature(0, -10, -20, -30, -40°C, -55°C), power output of heating cable(33, 45, 66  $W/m$ ), the thickness of pipe(0.5, 1.0, 1.5  $mm$ ) were performed total 48 cases numerical analysis. And then, the design variable factors of ice class louver external environmental temperature(0, -15, -30°C), relative velocity(1, 4, 7  $m/s$ ), power output of heating cable(33, 45, 66  $W/m$ ), location of heating cable on blade(top, center, behind) were performed total 81 cases numerical analysis for most efficient and anti-icing & de-icing design guide of weather-tight door and ice class louver.

**KEY WORDS:** Anti-icing 결빙방지; De-icing 해빙; Weather-tight door 풍우밀문; Ice class louver 아이스 클래스 루버; Heat transfer analysis 열전달해석



# 제 1 장 서 론

## 1.1 연구 배경

미국의 알래스카 연안, 캐나다 북부지방, 그리고 러시아의 시베리아 북부 연안을 포함하는 북극해 지역은 원유와 천연가스 등 각종의 천연자원이 매장되어 있는 곳으로(전 세계 채굴가능 매장량의 30% 정도로 추정) 알려져 있다. 2008년 7월 미국 지질조사국(United States Geological Survey)에 따르면 북극해에 매장된 석유는 약 900억 배럴, 액화천연가스는 약 470억 배럴로 추정하고 있다. 이는 고유가 시대를 맞은 현재 극지방의 자원개발의 필요성이 대두되어 북극해 연안국을 중심으로 천연자원개발이 활발하게 추진되고 있으며, 과거 일본 후쿠시마 원전 사태로 인해 LNG의 수요가 급증하면서 한국가스공사(KOGAS)에서도 캐나다 가스전 지분 20%를 매입해 우리나라 최초로 북극권 자원개발의 시작을 알리기도 했다.

또한 지구 온난화에 따른 기후변화로 인해 북극해 해빙이 현저하게 감소하고 있어 북극해 항로를 이용한 운항 및 자원의 수송과 저장을 위해 빙해선박과 극지용 해양구조물의 수요가 증가하고 있다, 특히 극지용 선박 시장은 쇄빙선 외에 쇄빙유조선, 쇄빙LNG선, 쇄빙컨테이너선 등 쇄빙상선으로 확대되고 있다.

이처럼 극지해역을 운항하는 빙해선박의 경우 빙해역의 극한환경(low temperature environment) 속에서 안전운항 및 작업이 가능하도록 결빙방지(anti-icing) 설계와 해빙(de-icing) 설계기술이 새롭게 적용되고 있다. 이에 극지방을 항행하는 선박에 대해 미국선급(ABS), 노르웨이선급(DNV), 영국선급(Lloyd's Register), 러시아선급(RMRS) 등에서는 방한기술 부호(winterization notation)를 정의하고 있는데, 방한기술은 선박의 건조과정에서 다루어지는 문제로서 강제규정은 아니지만 선박의 안전운항 및 저온 환경에서 선박의 기자재 및 긴급, 구난 장비 등의 성능과 밀접한 관련이 있는 사항이다. 미국선급은 9가지의 section과 13가지의 부록으로 저온환경에서 운항하는 선박의 재료 및 용접, 코팅부터 시작하여 선원들의 안전 시스템 및 교육에 관한 전반적인 사항까지 다루고 있다. 영국선급은 빙해선박의 북극해 운항 시 대기온도 및 선박에 대한 상대풍속, 수온과 같은 여러 성분들의 상관관계에 따라 선박기자재 및 상

부 구조물에서 착빙(icing) 현상이 발생하게 된다. 그러므로 극지환경에서 상부 구조물의 착빙에 따른 빙해선박의 안정성 확보 대책과 함께 빙해선박에 탑재되는 의장품들은 북극해의 저온상태에서 결빙이 발생하더라도 사용이 가능하도록 설계가 되어야 한다. 노르웨이선급은 기자재에 대한 방한기술을 크게 category I, II로 구분하는데, category I은 navigation, steering & propulsion, anchoring, lifesaving, escape routes의 결빙방지 설계에 관련된 사항을 나타내고 category II는 decks & superstructures, helicopter decks, railings, cargo deck area의 해빙설계 기술에 관련된 사항을 나타낸다. 그러므로 극지해역을 운항하는 선박의 전체 및 의장 기자재에 대한 강제화 코드를 개발해야할 필요성이 더욱더 증가하고 있다. 이에 현재 국내에서는 방한대책에 관한 강제화 된 코드 개발을 위해 산업원천기술개발사업을 통해 ‘빙해선박의 극지항로 안전 운항기술 및 극저온 빙성능 시험평가 기법 개발’을 진행 중에 있다.



Fig. 1 Freezing of the vessels operating in cold region

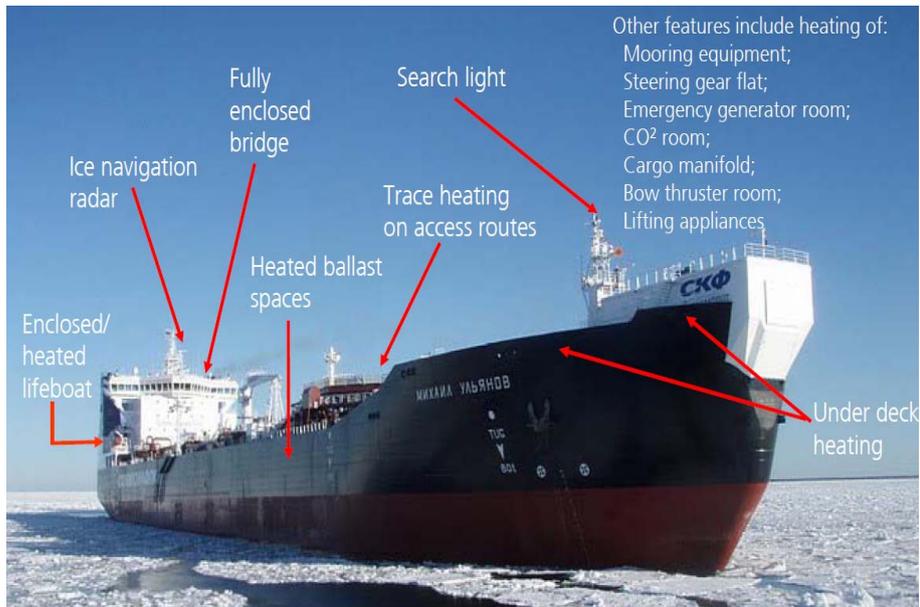


Fig. 2 Key considerations for winterization

## 1.2 Anti-Icing/De-Icing 시험기법

일반적으로 저온챔버에서의 저온성능 시험은 대기온도를 높은 온도에서 낮은 온도로 변화시켜가며 시험을 수행한다. 특히 시험과정에서 대기온도가 시험 온도조건에 도달하더라도 시험에서 계측되는 온도 값이 수렴할 때까지 일정시간동안 대기온도를 유지시킨다. 아래 Fig. 3과 4에 Anti-icing/De-icing 저온성능 시험 절차를 도시하였다.

Anti-icing 시험의 경우 온도조건을 영상 5°C ~ -40°C로 단계적으로 변화시키면서 시험을 수행하고 시험시작 시 열선코일 또는 열선케이블에 전원을 공급한다. 또한 시험 전후 과정에서 열화상카메라를 이용해 시험의 열전달 상태를 확인한다.

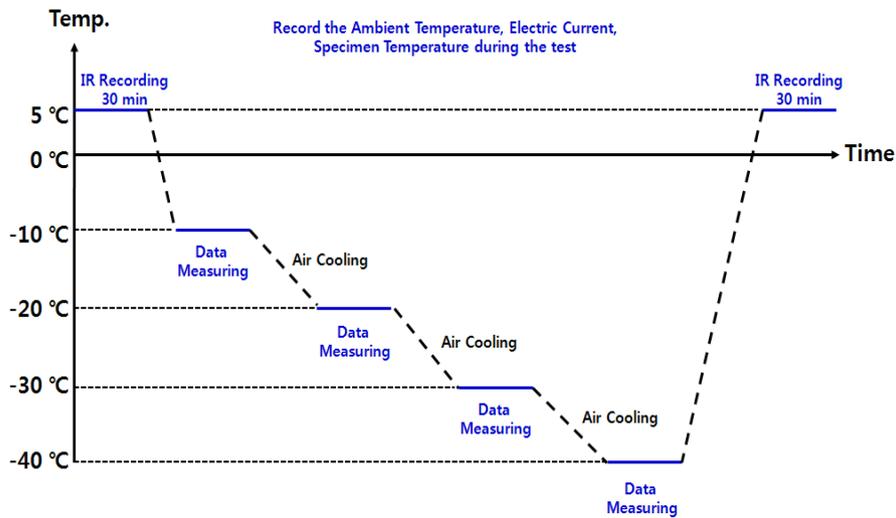


Fig. 3 The procedure of anti-icing performance evaluation

De-icing 시험의 경우 대상온도(-30°C 또는 -40°C)에서 열선코일 또는 열선 케이블에 전원을 공급한 후 착빙(icing)에 대한 변화과정을 확인한다. 또한 De-icing 시험에서도 Anti-icing 시험과 동일한 방법으로 시험 전후 과정에서 열 화상카메라를 이용해 시편의 열전달 상태를 확인한다.

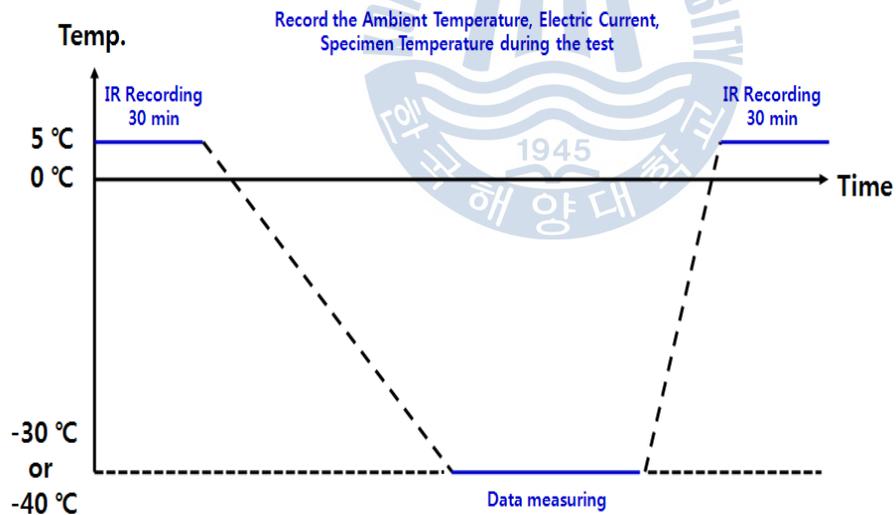
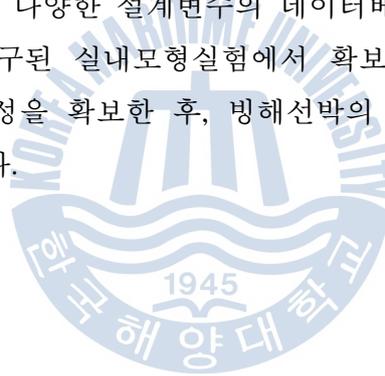


Fig. 4 The procedure of de-icing performance evaluation

### 1.3 연구내용 및 방법

본 연구는 상용수치해석 프로그램인 ANSYS 13.0을 이용하여 풍우밀문과 아이스 클래스 루버의 결빙 방지 및 해빙 성능평가를 수행하여 빙해선박의 항행 경로의 환경에 따라 효율적인 설계기준을 제시하기 위해 수행되었다. 선박기자재의 저온성능 평가 시 러시아, 핀란드, 노르웨이 등의 국외 저온챔버에서 수행되고 있는 실정이나 최근 국내에서도 소규모의 저온챔버 시설이 확보되어 기자재에 대한 저온성능 시험을 수행하고 있다. 아울러, 극지운항 생존성 향상 및 인명구조 기술의 경우 북유럽 국가에서는 구난장비 업체와 전문 연구기관과의 공동연구를 통해 장비를 개발하고 있으나 국내의 경우 다수의 빙해선박 건조정형을 바탕으로 구조정 또는 구난장비에 대한 핵심기술 개발에 많은 노력을 기울이고 있는 실정이다. 그러나 이러한 열선을 이용한 공법의 실내모형실험은 저온챔버를 이용한 온도분포를 측정하는 제한적인 실험에 의존되어 왔다. 하지만 실내모형실험은 극한 환경의 제한적 구현으로 인해 제대로 된 극한 환경 구현이 불가능한 것이 사실이다. 이러한 문제를 해결하기 위해 수치해석 프로그램을 이용한 열전달 해석을 통한 다양한 설계변수의 데이터베이스 구축이 필수적이다. 본 논문에서는 선행 연구된 실내모형실험에서 확보한 실험 데이터와 수치해석 결과를 비교하여 신뢰성을 확보한 후, 빙해선박의 항행 환경에 효율적인 설계기준을 제시하고자 한다.



## 제 2 장 실내모형실험 및 유한요소해석

### 2.1 실내모형실험 방법

#### 2.1.1 Weather-Tight Door의 실내모형실험 방법

저온챔버( $4,700\text{mm} \times 2,500\text{mm} \times 3,300\text{mm}$ )에 풍우밀문을 설치하여 다양한 외부환경온도( $5, -10, -20, -30, -40^\circ\text{C}$ )를 적용하여 결빙방지 기술을 평가하였다. 풍우밀문의 끝단에 두께  $1\text{mm}$ 의 강관을 설치한 후, 그 속에  $33\text{W/m}$ 의 열선용량을 가진 열선을 삽입한 후 가열하여 문과 문틀에서의 온도를 측정하였다.

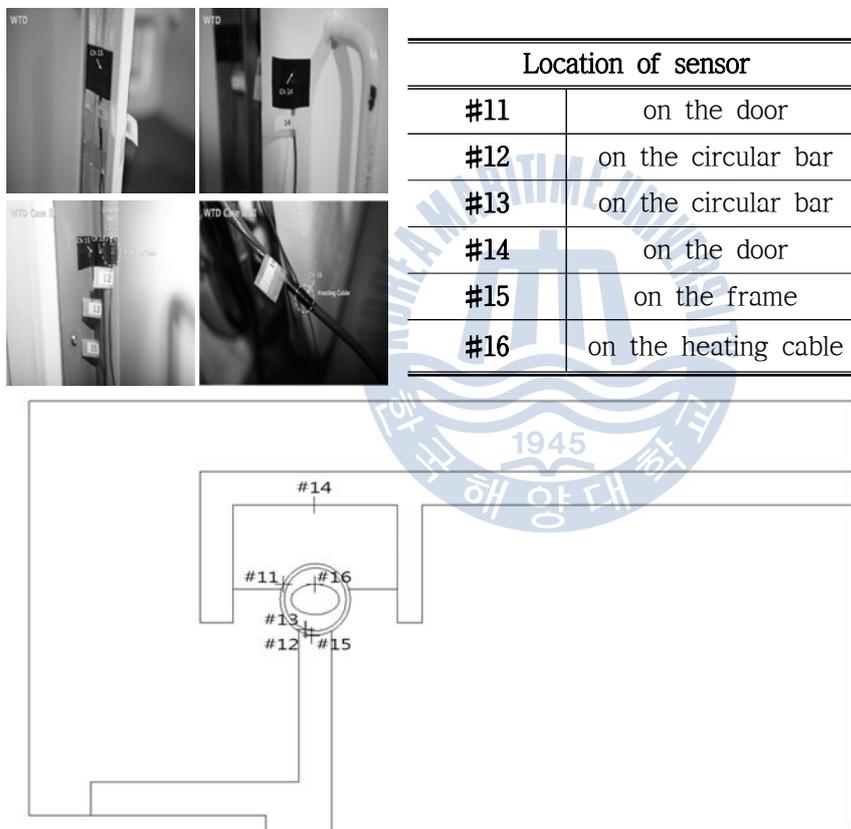


Fig. 5 Sensor location in the weather-tight door

온도계측은 Fig. 5와 같이 온도센서(6개소)를 부착하여 각각의 외부환경온도에서의 온도변화를 측정하였다. 시험과정에서 저온챔버 내부의 온도가 시험 온도조건에 도달하더라도 시편에서 계측된 온도가 수렴된 값을 보일 때까지 일정 시간동안 저온챔버의 내부온도를 유지시켜 실험을 수행하였다.

### 2.1.2 Ice Class Louver의 실내모형실험 방법

풍우밀문의 실내모형실험과 유사하게 수행되며 저온챔버에 루버를 설치하여  $-15^{\circ}\text{C}$ 의 외부환경온도조건과  $4\text{m/s}$ 의 상대풍속을 적용하여 해빙 기술을 평가하였다. 루버의 blade 끝단에 열선용량  $33\text{W/m}$ 의 열선을 설치한 후, 가열하여 blade에서의 온도를 계측하였다.

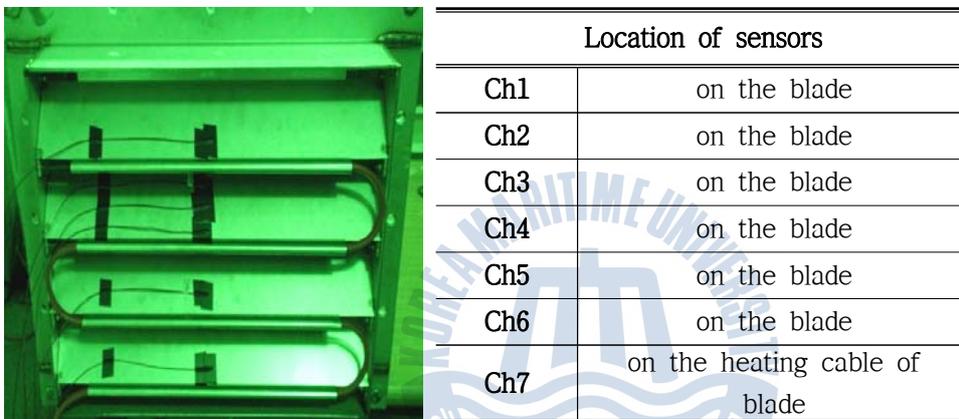


Fig. 6 Sensor location on the blade of the ice class louver

실험을 위해 설치된 루버에 Fig. 6과 같이 온도센서(7개소)를 부착하여 blade의 온도변화를 측정하였다. 여기서 해빙기술을 평가하기 위해 저온챔버의 온도가 외부환경온도( $-15^{\circ}\text{C}$ )에 도달한 후, 열선에 전원을 공급하여 착빙에 대한 변화과정을 확인한다.

## 2.2 유한요소해석 방법

### 2.2.1 Weather-Tight Door의 유한요소해석 방법

실내모형실험에서 풍우밀문과 문틀에 설치된 온도센서의 높이가 동일하며, 열선의 발열에 의한 공기의 대류가 열선의 직접적인 열전달보다 매우 미미하므로 실제 풍우밀문의 작동성능에 영향을 줄 수 있는 문과 문틀이 있는 부분만을 2차원 평면으로 수치해석을 수행하였다. Fig. 7은 풍우밀문에서 열선이 시공된 부분의 단면도 및 본 유한요소해석의 개념도이다.

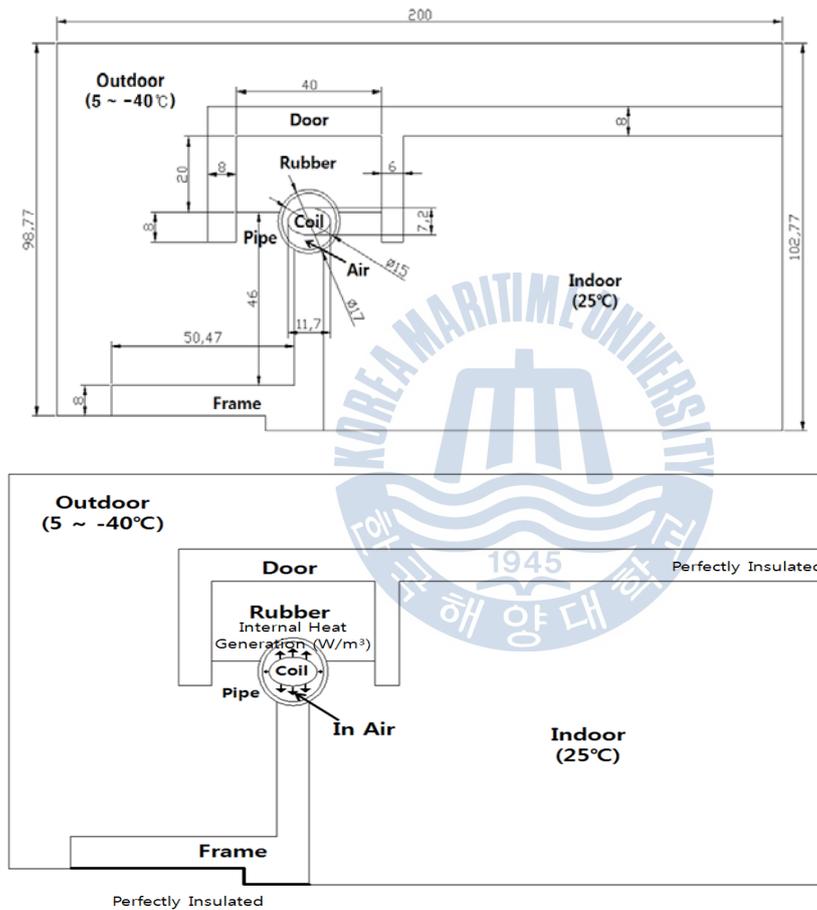


Fig. 7 Cross-sectional diagram of the weather-tight door in the cold-chamber

실내모형실험의 환경을 그대로 구현하기 위해서 지속적인 외부환경온도를 유지해주었고, 2차원 평면 해석이므로 단면의 상하면과 door와 frame에서 outdoor와 indoor가 만나지 않는 부분은 온도에 의한 영향을 받지 않도록 완전 단열(perfectly insulated)로 지정하였고, coil 전체에 각각의 열선용량에 따라 Table 3에 표기한 internal heat generation을 적용하였다. 또한 풍우밀문을 구성하는 각 재료마다의 열전도계수(thermal conductivity)가 다르기 때문에 공기와의 접촉면은 재료에 따라 각각의 다른 대류(convection) 값을 지정해주었다. 본 수치해석에서의 격자의 크기는  $0.001m$ 로 일정하게 주었으며, node의 개수는 7,290개이며, 격자의 개수는 3,357개로 수행되었다.

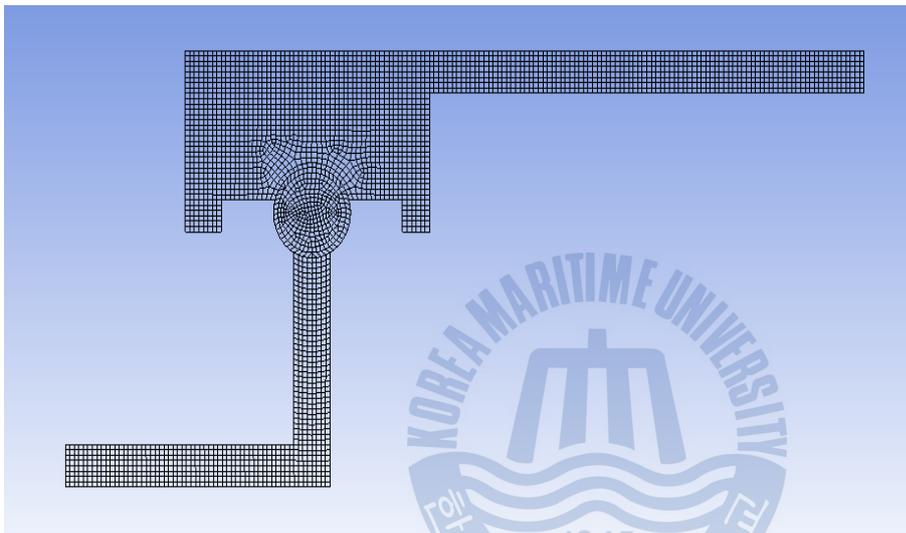


Fig. 8 Grid generation of the weather-tight door for the analysis

### 2.2.2 Weather-Tight Door의 유한요소해석 지배방정식

본 유한요소해석 연구는 아래와 같이 이류-확산 방정식 (Advection-Diffusion Equation)을 지배방정식으로 적용하였다.

$$\frac{\partial}{\partial t}(\gamma\rho\Phi) + \nabla \cdot (\rho K \cdot U\Phi) - \nabla \cdot (\Gamma K \cdot \nabla\Phi) = \gamma S \quad (2.1)$$

위의 방정식은 유체와 고체 사이의 유한 온도차이가 있다. 그것은 비열 평형 모델이므로 도메인 내의 각 단계에 대한 별도의 에너지 방정식이 있다.

유체의 경우:

$$\frac{\partial\gamma\rho h}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho K \cdot UH) - \nabla \cdot (\Gamma_e K \cdot \nabla H) = \gamma S_k^h + Q_{fs} \quad (2.2)$$

고체의 경우:

$$\frac{\partial\gamma_s\rho_s C_s T_s}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho K_s \cdot U_s C_s T_s) - \nabla \cdot (\lambda K_s \cdot \nabla T_s) = \gamma_s S_k^T + Q_{sf} \quad (2.3)$$

여기서,  $\gamma_s = 1 - \gamma$ , 그리고 유체와 고체 사이의 계면 열전달(interfacial heat transfer)인  $Q_{fs}$ 를 사용하여 전체 열전달 계수 모델을 결정한다.

$$Q_{fs} = -Q_{sf} = hA_{fs}(T_s - T_f) \quad (2.4)$$

여기서,  $h$ 는 유체와 고체 사이의 열전달 계수이고,  $A_{fs}$ 는 유체와 고체 사이의 계면 면적밀도이다.

### 2.2.3 Weather-Tight Door의 유한요소해석 항목 및 재료 물성치

풍우밀문과 문틀의 결빙방지 및 설계기준을 검토하기 위한 해석항목은 타당성 검토, 열선용량에 따른 결빙방지 조건 확인을 위해 열선용량 3case × 외부환경온도 6case, 18회와 강관의 두께 및 길지름에 따른 설계기준 검토를 위해 열선용량 3case × 외부환경온도 5case × 강관의 두께 3case, 45회이나 중

복 경우를 뺀 총 48회의 유한요소해석이 수행되었으며, 각각의 항목에 동일한 재료의 물성치 및 경계조건을 적용하고, 항목별로 동일한 센서의 위치를 적용하여 풍우밀 문과 문틀이 결빙방지 조건 즉, 0℃ 이상의 온도를 유지할 때의 설계기준을 알아보기 위해 본 연구를 수행하였다.

Table 1 Properties of the air

Temp.	Density ( $kg/m^3$ )	Specific heat capacity ( $kJ/kg.K$ )	Thermal conductivity ( $W/m.K$ )	Expansion coefficient ( $1/K$ )	Dynamic viscosity ( $kg/m.s$ )
5℃	1.267	1.005	0.024	0.0035	1.80e-05
0℃	1.293	1.005	0.024	0.0037	1.78e-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
-40℃	1.520	1.005	0.020	0.0044	1.51e-05
-55℃	1.534	1.005	0.019	0.0045	1.44e-05

Table 2 Properties of the material

Material	Density ( $kg/m^3$ )	Specific heat capacity ( $kJ/kg.K$ )	Thermal conductivity ( $W/m.K$ )
Copper	8933	3.85e+02	401.0
Rubber	1190	4.86	0.16
Steel	7923	4.34e+02	60.5

Table 3 Information of the heating cable and the heat generation

Cable type	Nominal power output ( $W/m$ at 10℃)	Internal heat generation ( $W/m^3$ )
10XTV2_CT-T2	33	4.9836e+8
15XTV2_CT-T3	45	6.7959e+8
20XTV2_CT-T2	66	9.9674e+8

Table 1 ~ 3은 풍우밀문의 유한요소해석에 적용된 재료의 물성치다. Table 1은 온도변화에 따른 공기의 물성치를 나타내며, Table 2는 풍우밀문과 문틀, 열선, 그리고 문과 문틀이 만나는 부분의 고무에 적용된 물성치이며, Table 3은 시공된 열선의 용량에 따른 내부발열량을 나타낸 것이다.

### 2.2.4 Ice Class Louver의 유한요소해석 방법

모델링 프로그램인 CATIA V5로 실내모형실험과 동일한 재원의 저온챔버, 루버 및 열선을 모델링하여 수치해석을 수행하였다. Fig. 9는 측면에서 본 수치해석의 개념도이다. 실험환경을 재현에 있어서 지속적으로 저온챔버 내부의 온도가 외부환경온도 즉, 0, -15, -30℃로 유지할 수 있음과 동시에 순환될 수 있도록 경계조건을 설정하였다. 또한 열선에 의하여 강제시편에 전열된 열량은 경계면에 fan inlet에 의해 형성된 유동장에 의하여 지속적으로 전열현상이 이루어진다. 따라서 특정시간 이후 정상상태가 지속적으로 유지될 때 저온챔버의 온도를 변화시킴으로써 각각의 경우에 대해 수렴되는 온도를 도출하였다.

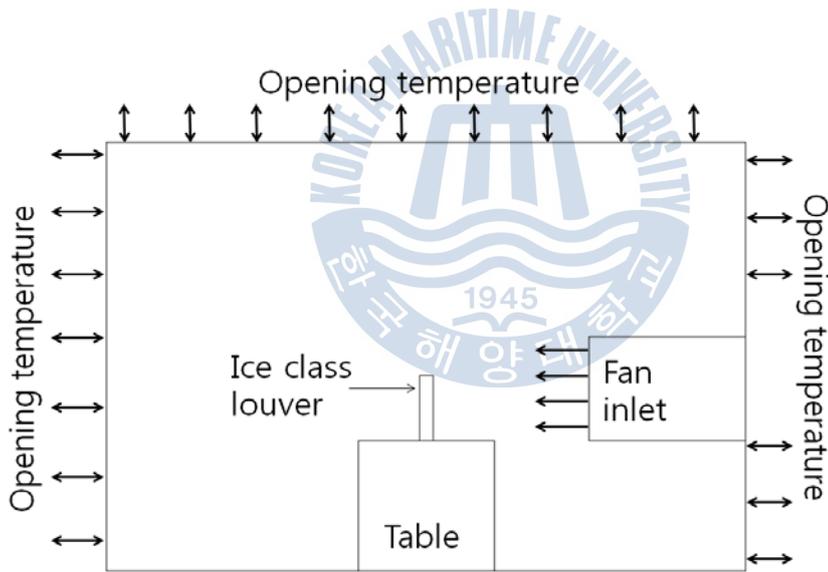
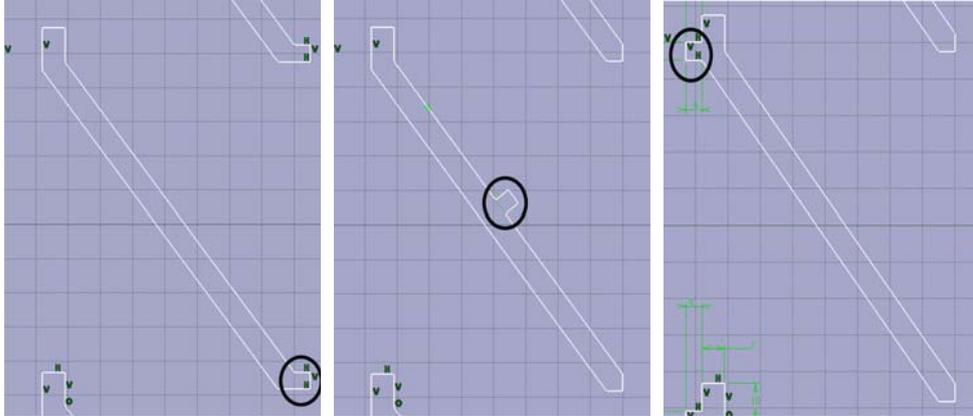


Fig. 9 Longitudinal section of the cold-chamber experiment

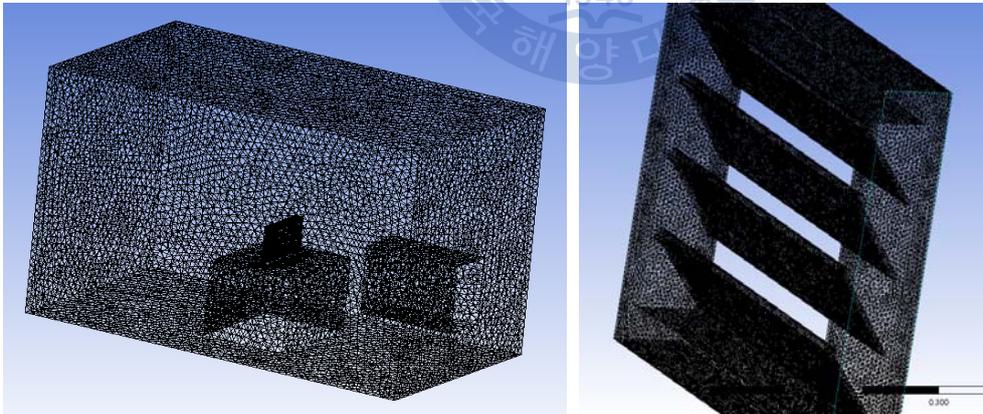
본 수치해석이 풍속에 비하여 실내모형실험의 환경이 협소하고 자연대류에

의한 열손실보다는 풍속에 의한 강제대류로 인한 열손실이 상대적으로 클 것을 예상하여 풍속에 직접적인 영향을 줄 것으로 판단한 table과 fan inlet을 Fig. 11과 같이 모델링하였다. Fig. 10은 blade에 부착된 열선의 부착위치를 나타내는 것으로 좌측부터 전면부, 중면부, 후면부 순으로 나타내었다.



**Fig. 10** Location of the heating cable on the ice class louver blade (front, center, behind)

수치해석에 사용된 루버의 각 도메인은 해석결과와 타당성 평가를 위하여 실제 실내모형실험의 환경과 같은 규격으로 모델링하였으며 해석의 정확성과 시간의 효율성을 높이기 위하여 경계면과 밀접한 부분에 대한 격자의 크기를  $0.0001m$ 를 기준으로 체적증가율(growth ratio: 1.2)을 적용하였다. Fig. 11은 전체모델 및 루버의 격자를 나타내고 있으며, node의 개수는 177,118개이며, 격자의 개수는 902,401개로 수행되었다.



**Fig. 11** Grid generation of the ice class louver for analysis

## 2.2.5 Ice Class Louver의 유한요소해석 지배방정식

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

연속방정식

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho U) = 0 \quad (2.5)$$

운동량방정식

$$\frac{\partial(\rho U)}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho U \otimes U) = -\nabla p + \nabla \cdot \tau = S_M \quad (2.6)$$

여기서,  $\tau$ 는 분자응력텐서이고  $S_M$ 은 운동량 항(Momentum Source)이다. 연속방정식은 변환되지 않지만 운동량방정식과 스칼라 수송방정식은 분자확산유동에 추가되는 난류 유동항을 포함한다.

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

$$\begin{aligned} & \frac{\partial}{\partial t}(\rho \omega) + \frac{\partial}{\partial x_j}(\rho \omega U_j) \\ &= \alpha \rho S^2 - \beta \rho \omega^2 + \frac{\partial}{\partial x_j} \left( \frac{\mu_t}{\sigma_w} \frac{\partial \omega}{\partial x_j} \right) + \frac{2\rho}{\sigma_\Phi} \left( \frac{1}{\omega} \frac{\partial k}{\partial x_j} \frac{\partial \omega}{\partial x_j} - \frac{k}{\omega^2} \frac{\partial \omega}{\partial x_j} \frac{\partial \omega}{\partial x_j} \right) + \tilde{\zeta}_2 k \rho S^2 \frac{L}{L_{\nu k}} \end{aligned} \quad (2.7)$$

레이놀즈 평균에너지 방정식(The Reynolds Average Energy Equation)은 식 (2.8)과 같이 표현할 수 있다.

$$\frac{\partial(\rho U)}{\partial t} - \frac{\partial \rho}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho U h_{tot}) = \nabla \cdot (\lambda \nabla T) + \nabla \cdot (U \cdot \tau) + U \cdot S_M + S_E \quad (2.8)$$

여기서,  $\lambda$ 는 열전도계수,  $S_E$ 는 에너지 항을 나타낸다. 또한 평균 총 엔탈피 (Enthalpy,  $h_{tot}$ )는 다음과 같다.

$$h_{tot} = h + \frac{1}{2} U^2 + k \quad (2.9)$$

여기서, 운동에너지( $k$ )는 다음과 같다.

$$k = \frac{1}{2} \overline{u^2} \quad (2.10)$$

따라서, 변수들이 추가된 방정식은 식 (2.11)과 같다.

$$\frac{\partial(\rho\phi)}{\partial t} - \nabla \cdot (\rho U\phi) = \nabla \cdot (\Gamma \nabla \phi - \overline{\rho u\phi p}) + S_\phi \quad (2.11)$$

## 2.2.6 Ice Class Louver의 유한요소해석 항목 및 재료 물성치

아이스 클래스 루버의 해빙 성능평가를 위한 유한요소해석을 총 81회(외부 환경온도 3 case × 열선용량 3 case × 열선 부착위치 3 case × 상대풍속 3 case)를 수행하였으며, 각각의 항목에 동일한 재료의 물성치 및 경계조건을 적용하고, 항목별로 동일한 센서의 위치를 적용하여 루버의 해빙 성능을 평가하여 빙해선박의 항행조건에 효율적인 열선 시공을 목표로 수행하였다.

Table 4 Properties of the air

Temp.	Density ( $kg/m^3$ )	Specific heat capacity ( $kJ/kg.K$ )	Thermal conductivity ( $W/m.K$ )	Expansion coefficient ( $1/K$ )	Dynamic viscosity ( $kg/m.s$ )
0°C	1.293	1.005	0.024	0.0037	1.78e-05
-15°C	1.385	1.005	0.023	0.0038	1.65e-05
-30°C	1.480	1.005	0.021	0.0041	1.56e-05

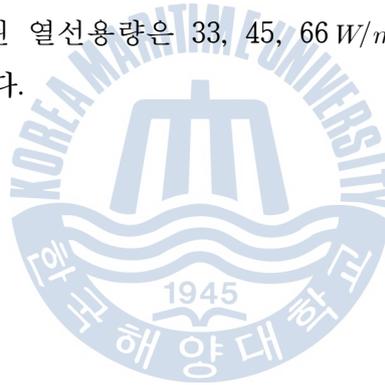
**Table 5** Properties of the material

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 6** Information of the heating cable and the heat generation

Cable type	Nominal power output ( $W/m$ at $10^\circ C$ )	Heat flux ( $W/m^2$ )
10XTV2_CT-T2	33	1650
15XTV2_CT-T3	45	2250
20XTV2_CT-T2	66	3300

Table 4 ~ 6은 본 수치해석에 적용된 재료의 물성치이다. Table 4는 온도변화에 따른 공기의 물성치를 나타내며, Table 5는 루버의 재료 및 열선에 적용된 물성치이며, Table 6은 시공된 열선용량은 33, 45, 66  $W/m$ 로, 이를 열 유량 (heat flux)로 환산하여 나타내었다.



## 제 3 장 유한요소해석의 타당성 검토

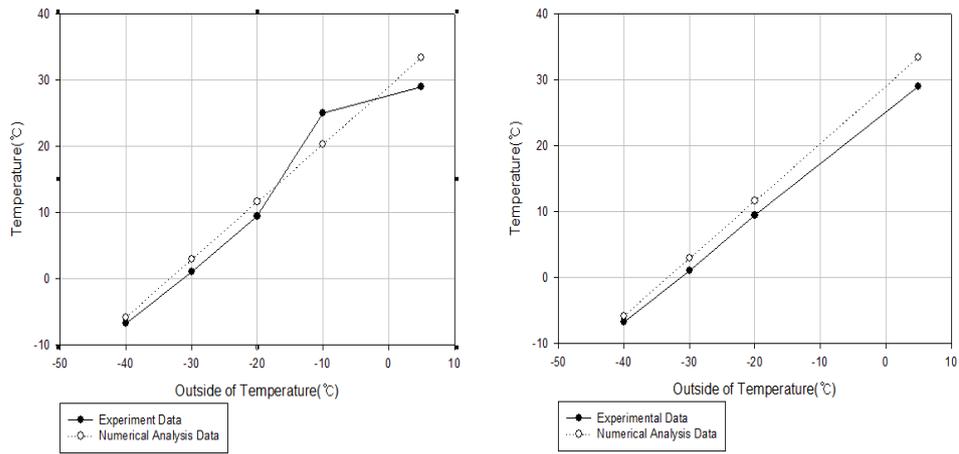
### 3.1 Weather-Tight Door의 유한요소해석 타당성 검토

유한요소해석의 타당성 검토를 위해 실내모형실험의 결과인 Table 7을 토대로 타당성 검토를 실시하였다. 타당성 검토를 실시한 실험 항목은 열선용량이  $33\text{ W/m}$ 이고, 강관의 두께가  $1\text{ mm}$ 인 경우이다.

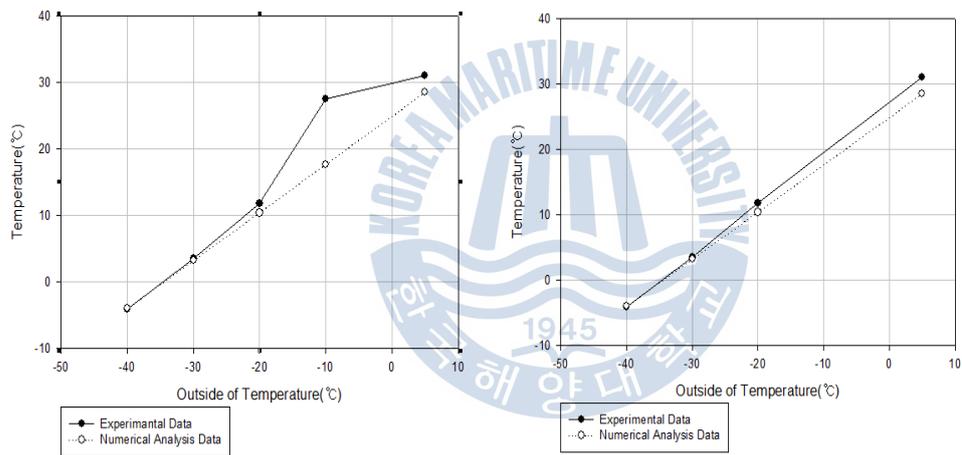
Fig. 12 ~ 17은 수치해석 결과 값과 실내모형실험 결과 값을 비교한 그래프(왼쪽)과 외부환경온도가  $-10^{\circ}\text{C}$ 일 때의 실내모형실험 결과 값 및 수치해석 결과 값을 제외한 그래프(오른쪽)이다. 여기서, 실선은 실내모형실험 결과 값을 나타내며, 점선은 수치해석 결과 값을 나타낸다. 왼쪽에 위치한 그래프의 분석결과를 보면 외부환경온도가  $-10^{\circ}\text{C}$ 일 때를 제외한 다른 온도에서는 실내모형실험 결과 값의 오차 범위가 최대  $\pm 4.4^{\circ}\text{C}$ 이나, 외부환경온도가  $-10^{\circ}\text{C}$ 에서의 수치해석 결과 값은 실내모형실험 결과 값과의 차이가 최대  $11^{\circ}\text{C}$ 가 난다. 다른 외부환경온도에서는 이러한 오차가 나타나지 않는데, 이는 실내모형실험의 결과 그래프인 Fig. 18에서 보면 #14의 결과 값은 외부환경온도가  $-20^{\circ}\text{C}$ 로 바뀌기 직전의 온도는  $10^{\circ}\text{C}$  이하를 가리키는 반면, Table 7의 실내모형실험 결과에서는 #14의 온도가  $10.6^{\circ}\text{C}$ 를 나타내는 것을 볼 수 있다. 이처럼 Table 7의 실내모형실험 결과에 작성된 온도는 실내모형실험의 종료시점의 결과 값이 아니라 외부환경온도가 유지될 때의 평균 온도 값을 나타낸 것으로 볼 수 있다. 하지만 이는 외부환경온도가  $-10^{\circ}\text{C}$ 일 때만 적용된 것임을 Fig. 18과 Table 7의 실내모형실험 결과를 분석한 결과로 알 수 있었다.

**Table 7** Numerical analysis data and experimental data of the sensor temperature

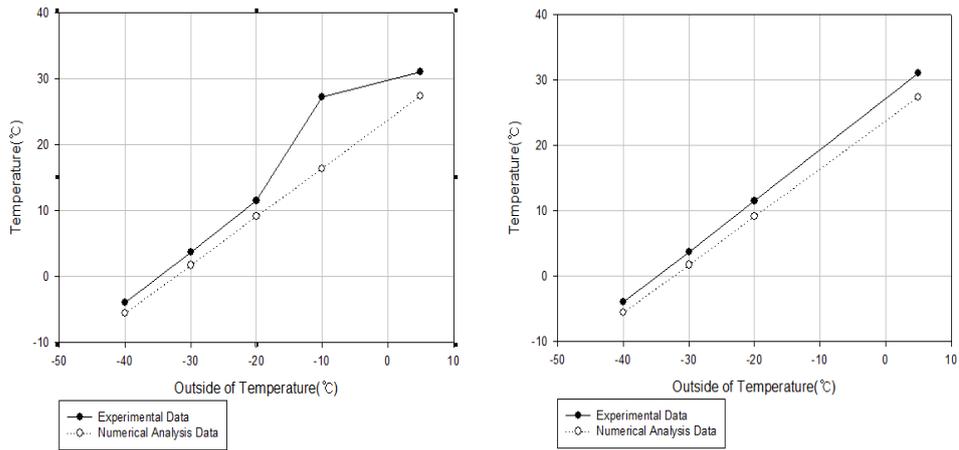
		Numerical analysis data			Experimental data
		Cable power output( $W/m$ )			
Temp.	S.P.	33	45	66	33
5°C	#11	33.4	42.8	59.3	29.0
	#12	28.5	35.0	46.5	31.1
	#13	27.4	33.7	44.6	31.0
	#14	17.4	20.6	26.4	17.8
	#15	28.2	33.9	43.8	31.2
	#16	103.3	135.8	192.7	99.7
-10°C	#11	20.3	29.7	46.2	25.0
	#12	17.7	24.2	35.6	27.5
	#13	16.4	22.7	33.6	27.2
	#14	4.8	8.1	13.9	10.6
	#15	19.0	24.7	34.6	27.7
	#16	95.0	127.5	184.3	97.0
-20°C	#11	11.6	21.0	37.5	9.4
	#12	10.4	17.0	28.4	11.8
	#13	9.1	15.3	26.2	11.5
	#14	-3.5	-0.2	5.5	-6.0
	#15	12.9	18.5	28.4	12.3
	#16	89.4	121.9	178.8	89.4
-30°C	#11	2.9	12.3	28.8	1.0
	#12	3.2	9.7	21.2	3.6
	#13	1.7	8.0	18.9	3.7
	#14	-11.9	-8.6	-2.8	-13.7
	#15	6.7	12.4	22.3	4.4
	#16	83.9	116.4	173.2	85.2
-40°C	#11	-5.8	3.6	20.0	-6.7
	#12	-4.0	2.5	13.9	-4.1
	#13	-5.6	0.6	11.5	-4.0
	#14	-20.2	-16.9	-11.2	-22.2
	#15	0.6	6.2	16.1	-3.3
	#16	78.3	110.8	167.7	81.7



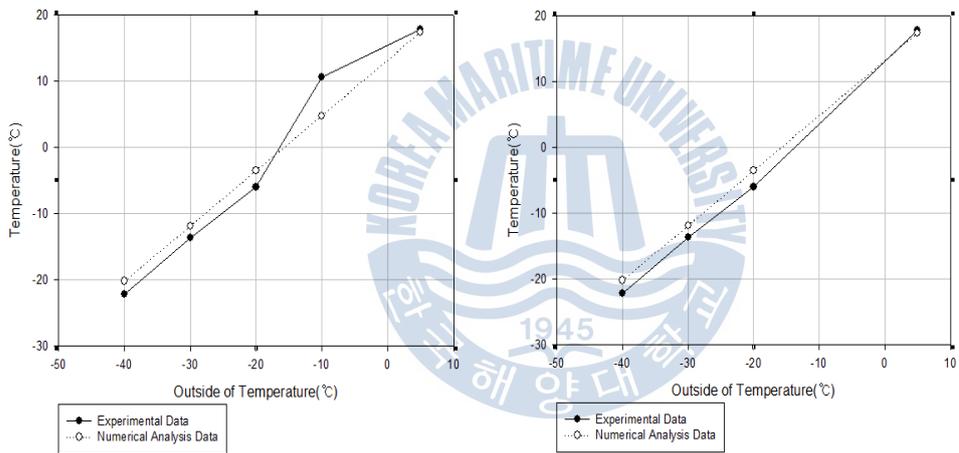
**Fig. 12** Numerical analysis data of #11: Compared with the experimental data(left). Numerical analysis data of #11: Compared with the experimental data except in the  $-10^{\circ}\text{C}$ (right)



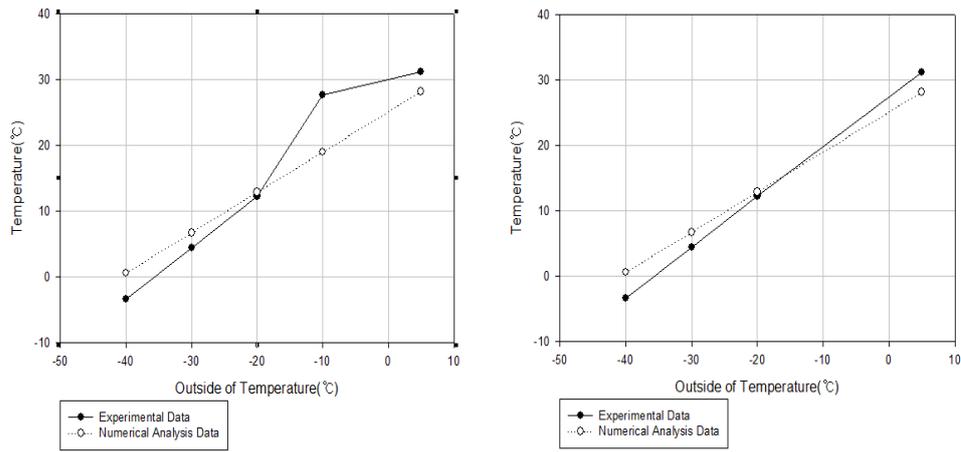
**Fig. 13** Numerical analysis data of #12: Compared with the experimental data(left). Numerical analysis data of #12: Compared with the experimental data except in the  $-10^{\circ}\text{C}$ (right)



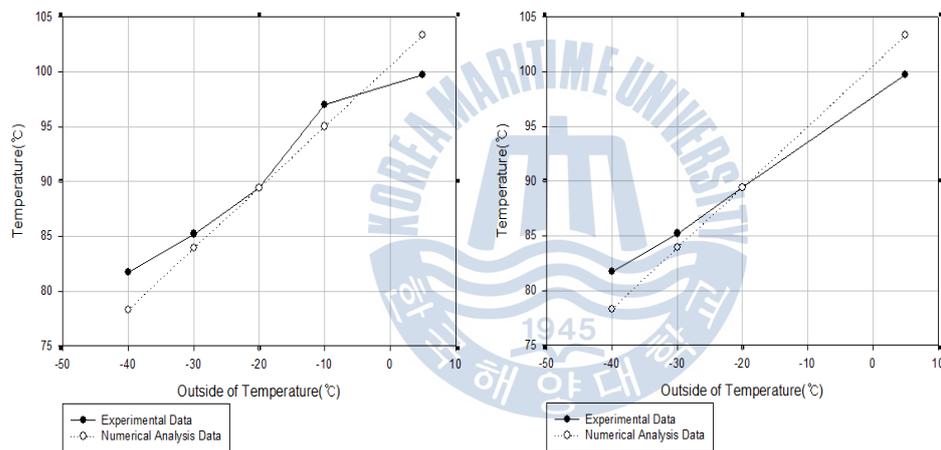
**Fig. 14** Numerical analysis data of #13: Compared with the experimental data(left). Numerical analysis data of #13: Compared with the experimental data except in the  $-10^{\circ}\text{C}$ (right)



**Fig. 15** Numerical analysis data of #14: Compared with the experimental data(left). Numerical analysis data of #14: Compared with the experimental data except in the  $-10^{\circ}\text{C}$ (right)



**Fig. 16** Numerical analysis data of #15. Compared with the experimental data(left). Numerical analysis data of #15. Compared with the experimental data except in the  $-10^{\circ}\text{C}$ (right)



**Fig. 17** Numerical analysis data of #16: Compared with the experimental data(left). Numerical analysis data of #16: Compared with the experimental data except in the  $-10^{\circ}\text{C}$ (right)

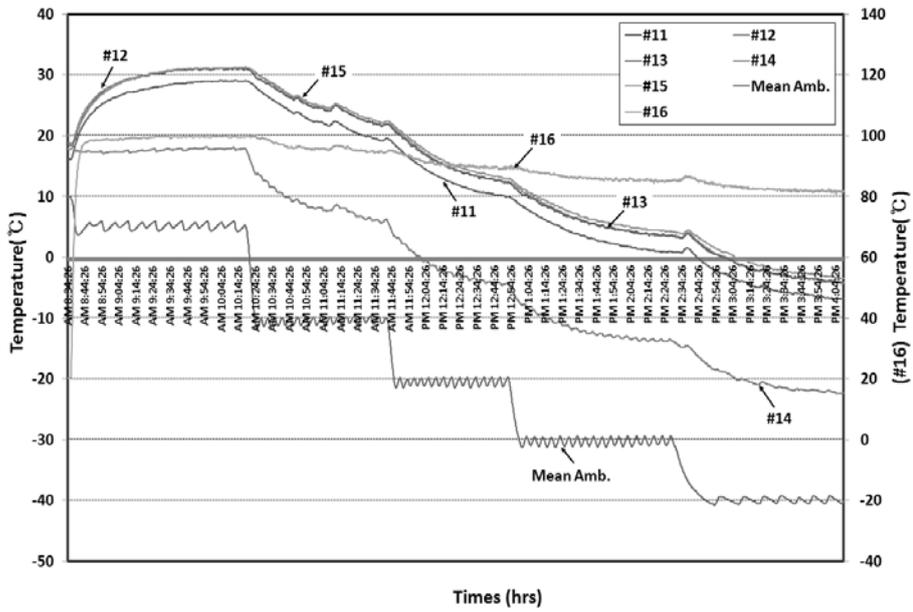


Fig. 18 The graph of the weather-tight door experimental result

그리고 Fig. 12 ~ 17의 오른쪽에 위치한 그래프를 분석한 결과를 Table 8에 나타내었다. 수치해석 결과 값과  $-10^{\circ}\text{C}$ 의 결과 값을 제외하고 그린 그래프에서  $-10^{\circ}\text{C}$ 에서의 결과 값을 분석한 결과 값과의 오차가 최대  $0.4^{\circ}\text{C}$ 로, 수치해석의 결과가 선형적으로 나타나고 있고, 신뢰성이 있다고 판단하여 외부환경온도가  $-10^{\circ}\text{C}$ 일 때의 실내모형실험 결과 값을 동일한 방법으로 추정하였다.

**Table 8** Numerical analysis data of the weather-tight door: Compared with the numerical analysis data except in the  $-10^{\circ}\text{C}$ : External environmental temperature  $-10^{\circ}\text{C}$

	Numerical Analysis Data	Numerical Analysis Data except in the $-10^{\circ}\text{C}$
#11	20.3	20.1
#12	17.7	17.3
#13	16.4	16.2
#14	4.8	4.5
#15	19.0	18.7
#16	95.0	94.8

**Table 9** Estimated experimental data of the weather-tight door: Compare with the experimental data except in the  $-10^{\circ}\text{C}$ : External environmental temperature  $-10^{\circ}\text{C}$

	Estimated Experimental Data	Experimental Data except in the $-10^{\circ}\text{C}$
#11	19.0	17.2
#12	22.3	19.4
#13	22.4	18.8
#14	6.6	3.2
#15	22.5	19.5
#16	95.0	93.5

추정 결과는 Table 9에 나타내었으며, 최대  $3.6^{\circ}\text{C}$  ~ 최소  $1.5^{\circ}\text{C}$  차이를 보이며, 실내모형실험에서 나타낸 외부환경온도  $-10^{\circ}\text{C}$  일 때의 결과 비교 값보다 현저하게 적은 오차를 보인다.

### 3.2 Ice Class Louver의 유한요소해석 타당성 검토

본 수치해석의 타당성 검토를 위해 KRISO에서 수행된 ‘Ice Class Louver

의 De-Icing 저온 성능 시험 보고서'의 실내모형실험결과를 토대로 타당성 검토를 실시하였다. 타당성 검토를 수행한 실내실험의 환경은 외부환경온도  $-15^{\circ}\text{C}$ 에 열선용량  $33\text{ W/m}$ , 열선의 부착위치는 blade의 전면부이고, 상대풍속이  $-4\text{ m/s}$ 이다.

Table 10은 실내모형실험에서 얻은 결과 값과 수치해석을 통해 얻은 각 온도센서에서 얻은 수렴온도이다. Ch7을 제외한 나머지 온도센서에서의 결과 값을 비교했을 때 최대 오차 값이  $0.39^{\circ}\text{C}$ 로 거의 오차가 없다고 보기 무방하나, 열선에 부착된 온도센서인 Ch7에서의 온도 차이가 약  $10^{\circ}\text{C}$  정도로 나타나는데, 이는 실내모형실험에서 사용된 열선은 열선의 온도손실을 줄이기 위해 열선의 곁에 프레임을 덧대어 실험을 수행한 결과 값을 얻은 것이고 수치해석에서도 실내모형실험과 동일한 환경으로 모델링을 수행하여 수치해석을 하고자 하였으나, 격자생성 과정 중에 격자 깨짐 현상이 발생해 수치해석을 수행할 수 없어 본 수치해석은 열선에 프레임을 모델링하지 않고 결과를 도출하였기 때문에 이와 같은 오차가 발생한 것으로 분석하였다.

**Table 10** Numerical analysis data and experimental data of the sensor temperature

	Numerical analysis data	Experimental data
Ch1	-14.08	-13.77
Ch2	-12.75	-13.14
Ch3	-12.75	-12.76
Ch4	-13.52	-12.43
Ch5	-13.52	-12.84
Ch6	-11.81	-11.52
Ch7	2.11	12.10
Aver.	-13.07	-12.74

Fig. 19는 소요시간 별 각 온도센서에서의 실내모형실험 결과 값을 나타낸 그래프이고, Fig. 20은 소요시간 별 각 온도센서에서의 수치해석 결과 값을 나

타낸 그래프이다. 여기서, blade의 온도를 측정하는 온도센서 Ch1 ~ Ch6의 온도분포는 거의 유사한 결과를 보이나, 열선의 온도는 fan off를 한 상태에서 실내모형실험 결과 값과 수치해석의 결과 값의 수렴온도 차이가 약 30℃ 정도 나는 것을 볼 수 있는데 실내모형실험에서는 fan off를 했다 하더라도 이미 차가워진 프레임 때문에 열선의 온도가 더 낮게 측정된 것으로 분석하였다.

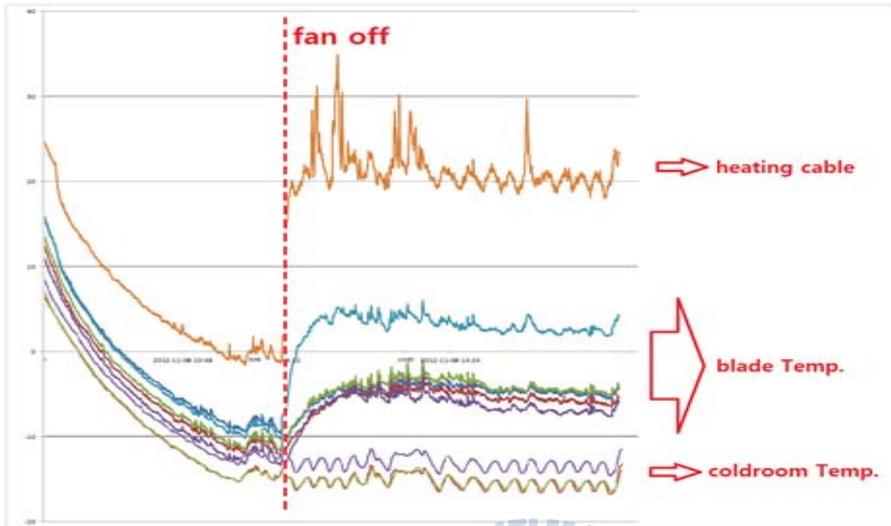


Fig. 19 The graph of the ice class louver experimental result

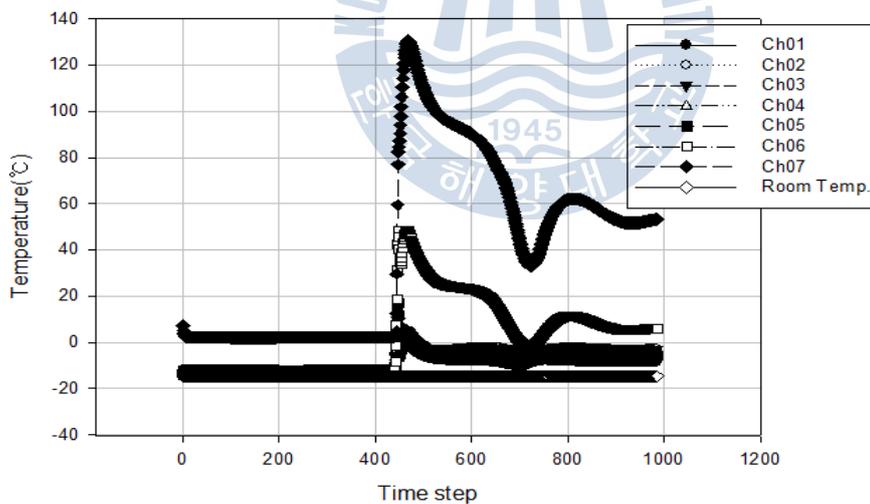


Fig. 20 The graph of the ice class louver numerical analysis result

## 제 4 장 수치해석 수행결과 및 분석

### 4.1 Weather-Tight Door의 수치해석 수행결과 및 분석

#### 4.1.1 열선용량에 따른 수치해석 수행결과 및 분석

풍우밀문과 문틀의 결빙방지의 기준을 만족하는 최적의 열선용량을 도출하기 위해 온도 센서의 위치, 재료의 물성치 등의 조건은 동일하게 적용하고, 열선용량만 변경하여 수치해석을 수행하였다.

여기서, #14의 온도센서는 풍우밀문의 문틀 부근에 위치하고 센서의 위치가 외부와 4mm 떨어져 있는 반면, 열선과의 거리가 상대적으로 떨어져있어 낮은 환경온도에서는 결빙방지 조건을 충족하기 어렵다. 그래서 본 연구는 #14를 제외한 나머지 센서에서의 온도가 결빙방지 조건을 충족하는지를 알아보았다.

외부환경온도가 5°C, -10°C, -20°C, -30°C 일 때는 모든 온도센서에서는 모두 결빙방지 조건을 만족하기 때문에 본 결과에서는 이에 대한 분석을 생략하도록 한다.

Table 11, 12는 외부환경온도가 -40°C, -55°C 일 때의 각 센서마다의 온도를 나타내고 있다.

Table 11에서는 열선의 용량이 33 W/m일 때 #11 ~ 13이 결빙방지 조건을 충족하지 못하는 것을 알 수 있으며, Table 12에서는 열선용량이 66 W/m일 때와 #16을 제외하고는 결빙방지 조건을 충족하지 못하고 있다.

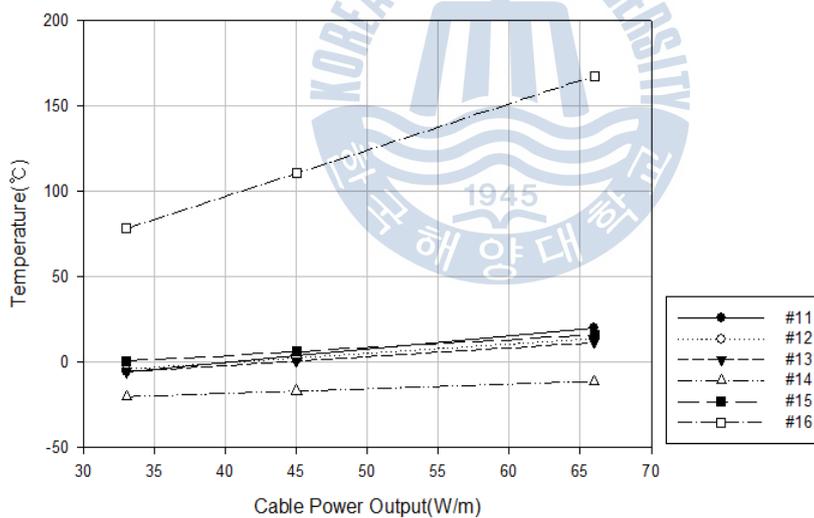
**Table 11** Numerical analysis of weather-tight door: External environmental temperature -40°C

Sensor point	#11	#12	#13	#15	#16
Cable power output					
33 W/m	-5.8	-4.0	-5.6	0.6	78.3
45 W/m	3.6	2.5	0.6	6.2	110.8
66 W/m	20.0	13.9	11.5	16.1	167.7

**Table 12** Numerical analysis of weather-tight door: External environmental temperature  $-55^{\circ}\text{C}$

Sensor point Cable power output	#11	#12	#13	#15	#16
33 $W/m$	-18.9	-14.9	-16.6	-8.7	70.5
45 $W/m$	-9.5	-8.3	-10.4	-3.0	98.9
66 $W/m$	6.9	3.1	0.5	6.9	148.6

외부환경온도가  $-40$ ,  $-55^{\circ}\text{C}$  일 때, 결빙방지에 효율적인 열선용량을 도출하기 위해 Fig. 21, 22와 같은 그래프를 나타내었다.  $-40^{\circ}\text{C}$ 의 환경온도에서 결빙방지 조건을 만족하는 열선용량은 45, 66  $W/m$ 이고,  $-55^{\circ}\text{C}$ 의 환경온도에서 결빙방지 조건을 만족하는 열선용량은 66  $W/m$ 로, 본 연구에서는 고려되지 않은 선박의 상대적인 풍속과 물보라 같은 추가적인 환경조건까지 고려한다면  $-40^{\circ}\text{C}$ 의 환경온도에서는 열선용량이 66  $W/m$ ,  $-55^{\circ}\text{C}$ 의 환경조건에서는 열선용량이 66  $W/m$  이상인 열선을 사용하여 시공하여야 풍우밀문을 결빙방지 할 수 있다.



**Fig. 21** Numerical analysis of the weather-tight door for each cable power output: External environmental temperature  $-40^{\circ}\text{C}$

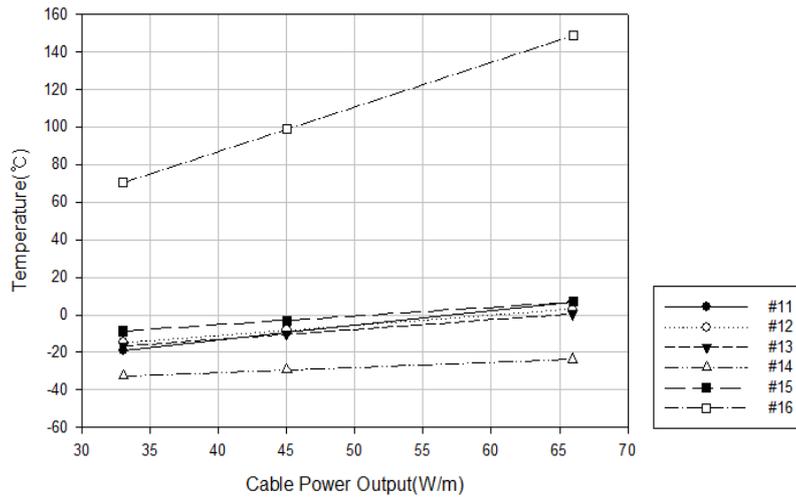
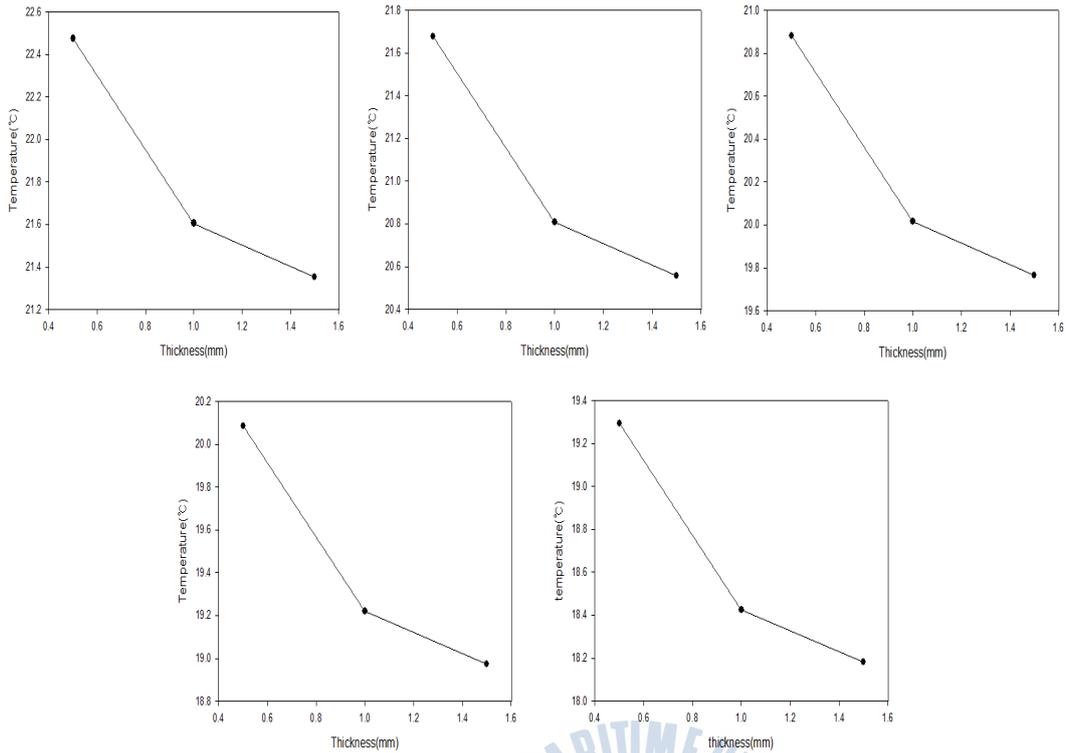


Fig. 22 Numerical analysis of the weather-tight door for each cable power output: External environmental temperature  $-55^{\circ}\text{C}$

#### 4.1.2 강관의 두께에 따른 수치해석 수행결과 및 분석

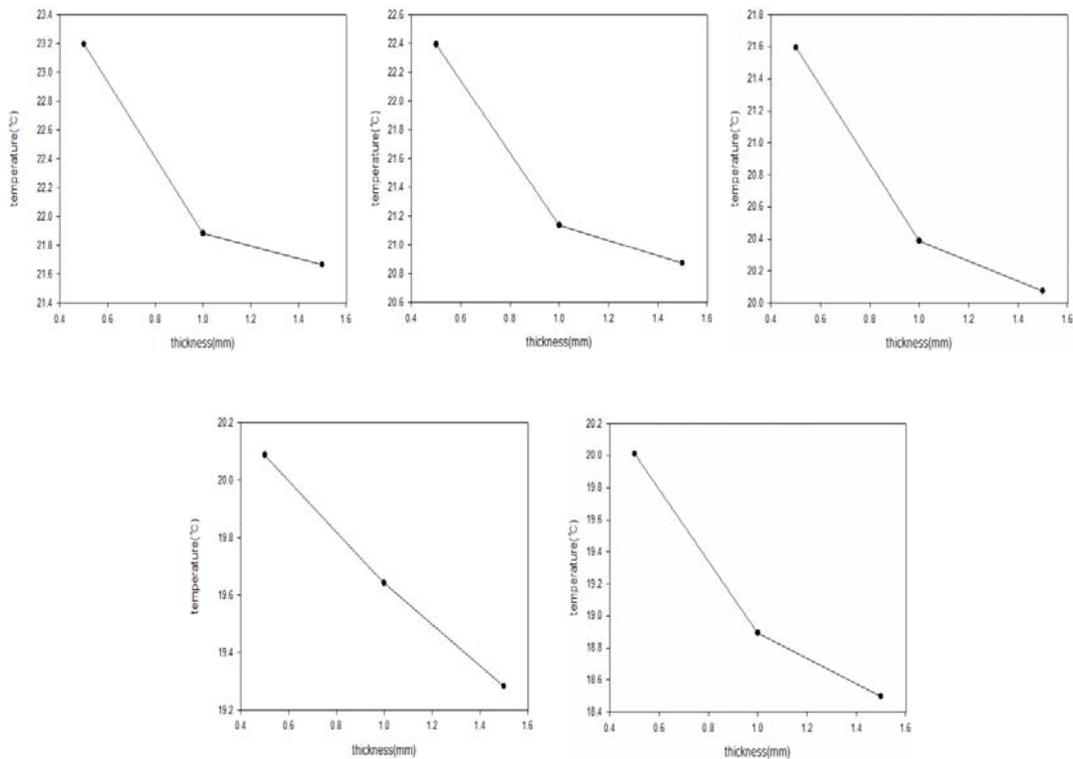
풍우밀문의 열선시공에서 열선이 삽입되는 강관의 두께를 변경하여 해석을 수행하여 각각의 외부환경온도에서 최적의 강관의 두께를 찾아내기 위해 본 수치해석을 수행하였다. 강관의 두께를 제외한 나머지 변수인자들은 동일하게 적용하여 수치해석을 수행하였다. 여기서 온도측정센서의 위치는 문의 개폐성과 관련이 있는 강관의 최상단에 센서를 두고 해석을 수행하였다.



**Fig. 23** Numerical analysis of the weather-tight door for each thickness of the circular bar: Heating cable power output  $33\text{ W/m}$ (External environmental temperature:  $0^{\circ}\text{C}$  (top left),  $-10^{\circ}\text{C}$  (top center),  $-20^{\circ}\text{C}$  (top right),  $-30^{\circ}\text{C}$  (bottom left),  $-40^{\circ}\text{C}$  (bottom right))

**Table 13** Numerical analysis of the weather-tight door for each thickness of the circular bar: Heating cable power output  $33\text{ W/m}$

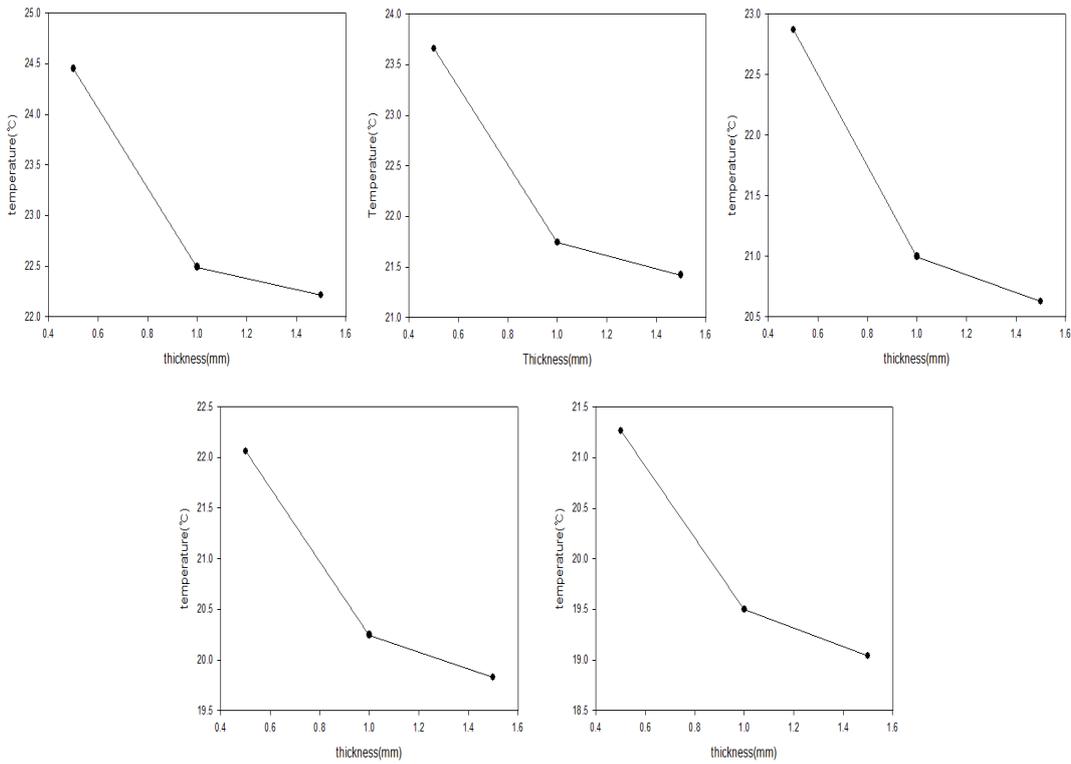
	$0^{\circ}\text{C}$	$-10^{\circ}\text{C}$	$-20^{\circ}\text{C}$	$-30^{\circ}\text{C}$	$-40^{\circ}\text{C}$
$0.5\text{ mm}$	22.475	21.677	20.882	20.085	19.293
$1.0\text{ mm}$	21.606	20.808	20.015	19.221	18.426
$1.5\text{ mm}$	21.353	20.558	19.767	18.974	18.181



**Fig. 24** Numerical analysis of the weather-tight door for each thickness of the circular bar: Heating cable power output  $45\text{ W/m}$ (External environmental temperature:  $0^{\circ}\text{C}$  (top left),  $-10^{\circ}\text{C}$  (top center),  $-20^{\circ}\text{C}$  (top right),  $-30^{\circ}\text{C}$  (bottom left),  $-40^{\circ}\text{C}$  (bottom right))

**Table 14** Numerical analysis of the weather-tight door for each thickness of the circular bar: Heating cable power output  $45\text{ W/m}$

	$0^{\circ}\text{C}$	$-10^{\circ}\text{C}$	$-20^{\circ}\text{C}$	$-30^{\circ}\text{C}$	$-40^{\circ}\text{C}$
$0.5\text{mm}$	23.194	22.392	21.595	20.807	20.009
$1.0\text{mm}$	21.883	21.137	20.386	19.641	18.893
$1.5\text{mm}$	21.666	20.874	20.077	19.284	18.484



**Fig. 25** Numerical analysis of the weather-tight door for each thickness of the circular bar: Heating cable power output  $66\text{ W/m}$ (External environmental temperature:  $0^{\circ}\text{C}$  (top left),  $-10^{\circ}\text{C}$  (top center),  $-20^{\circ}\text{C}$  (top right),  $-30^{\circ}\text{C}$  (bottom left),  $-40^{\circ}\text{C}$  (bottom right))

**Table 15** Numerical analysis of the weather-tight door for each thickness of the circular bar: Heating cable power output  $66\text{ W/m}$

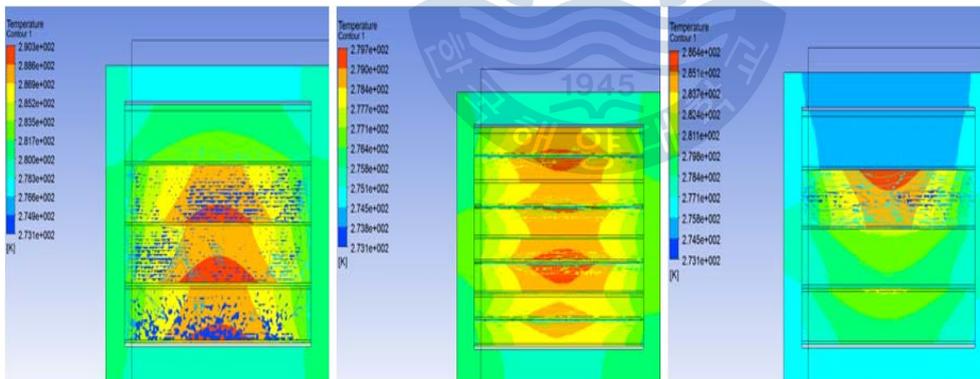
	$0^{\circ}\text{C}$	$-10^{\circ}\text{C}$	$-20^{\circ}\text{C}$	$-30^{\circ}\text{C}$	$-40^{\circ}\text{C}$
$0.5\text{mm}$	24.450	23.659	22.866	22.058	21.264
$1.0\text{mm}$	22.491	21.744	20.998	20.246	19.499
$1.5\text{mm}$	22.212	21.420	20.628	19.830	19.037

위의 Fig. 23 ~ 25와 Table 13 ~ 15는 열선용량이  $33, 45, 66\text{ W/m}$ 일 때, 강관의 두께의 변화에 따른 각 외부환경온도별 결과 값을 도식화 한 것이다. 그래프는 x축을 강관의 두께로 설정하여 강관의 두께에 따라 환경온도가 변할 때

의 경향성을 알아보려고 하였다. Fig. 23 ~ 25를 분석하면 강관의 두께가 0.5 mm일 때 가장 높은 온도를 나타내고 1.0, 1.5mm 순서로 온도가 낮고, 그래프의 형상을 분석하였을 때 수치해석의 결과 값이 뚜렷하게 경향성을 가진다는 것도 알 수 있다. 열선용량이 33 W/m일 경우, 환경온도가 10℃ 감소할 때 온도 센서의 측정값이 약 0.8℃ 감소하고, 두께가 0.5mm 커질 때 최소 0.2℃ ~ 최대 1.4℃ 감소하는 것으로 나타났다. 열선용량이 45 W/m일 경우, 환경온도가 10℃ 감소할 때 온도 센서의 측정값이 약 0.8℃ 감소하고, 두께가 0.5mm 커질 때 최소 0.3℃ ~ 최대 1.8℃ 감소하는 것으로 나타났다. 열선용량이 66 W/m일 경우, 환경온도가 10℃ 감소할 때 온도 센서의 측정값이 약 0.8℃ 감소하고, 두께가 0.5mm 커질 때 최소 0.4℃ ~ 최대 2.4℃ 감소하는 것으로 나타났다.

#### 4.2 Ice Class Louver의 수치해석 수행결과 및 분석

아이스 클래스 루버의 최적 해빙성능을 나타내는 열선의 부착위치를 도출하기 위해 온도 센서의 위치, 재료의 물성치 등의 조건은 동일하게 적용하고, 열선의 부착 위치, 외부환경온도, 상대풍속 및 열선용량을 변경하여 수치해석을 수행하였다.



**Fig. 26** Numerical analysis of the ice class louver: External temperature 0℃, relative velocity 1m/s, heating cable power output 33 W/m (Location of heating cable: front(left), center(center), behind(right))

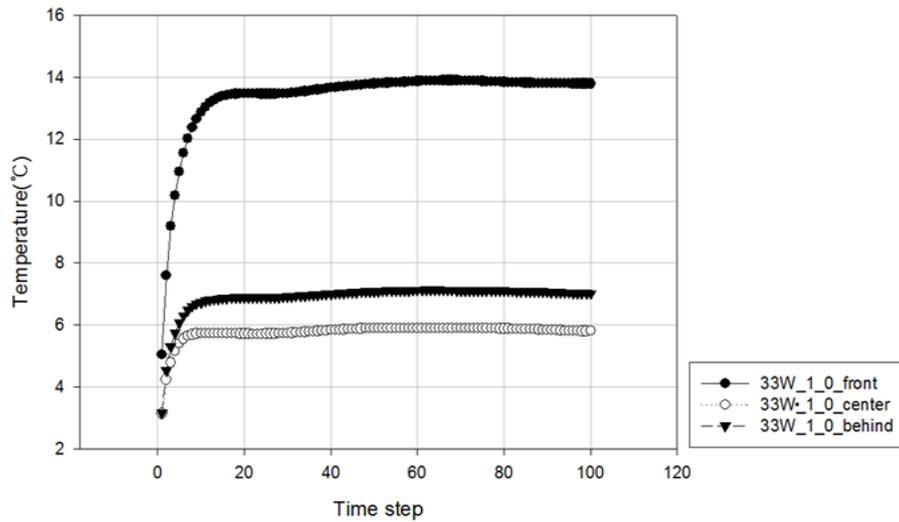


Fig. 27 The graph of the ice class louver numerical analysis: External temperature 0°C, relative velocity 1m/s, heating cable power output 33 W/m

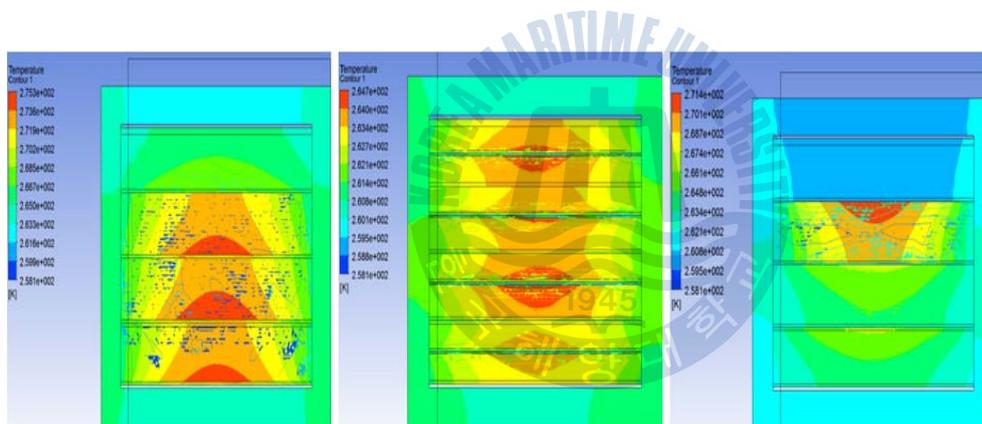


Fig. 28 Numerical analysis of the ice class louver: External temperature -15°C, relative velocity 1m/s, heating cable power output 33 W/m(Location of heating cable: front(left), center(center), behind(right))

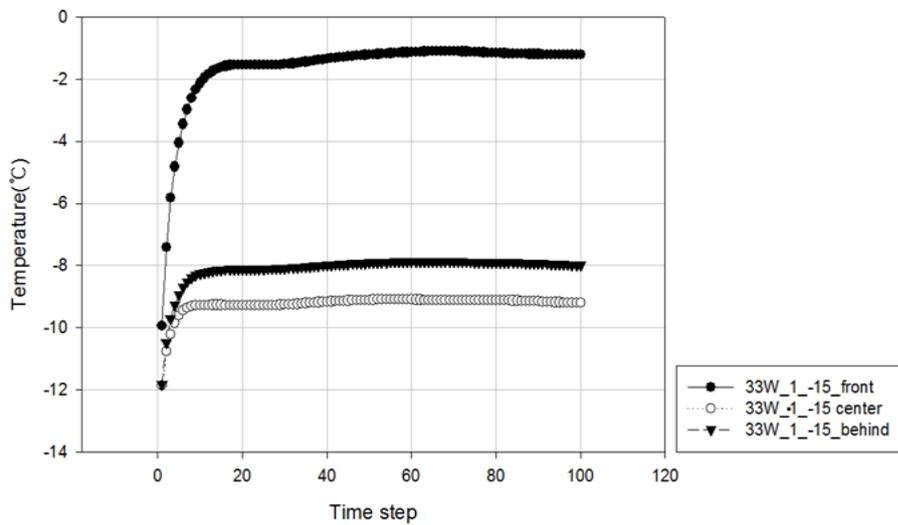


Fig. 29 The graph of the ice class louver numerical analysis: External temperature  $-15^{\circ}\text{C}$ , relative velocity  $1\text{m/s}$ , heating cable power output  $33\text{W/m}$

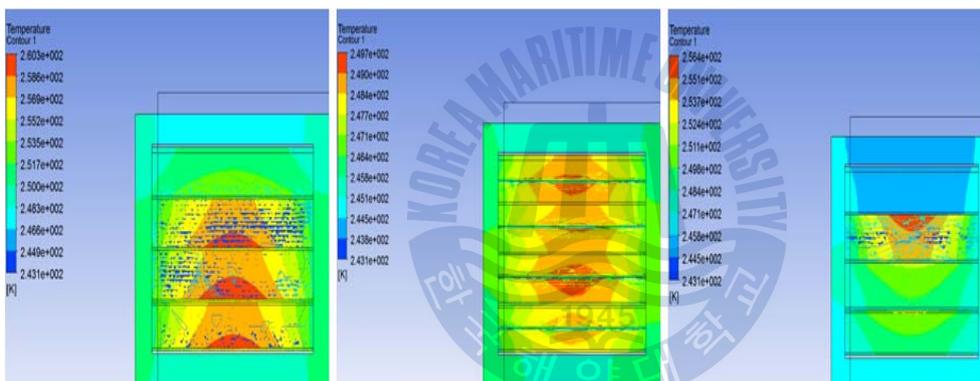


Fig. 30 Numerical analysis of the ice class louver: External temperature  $-30^{\circ}\text{C}$ , relative velocity  $1\text{m/s}$ , heating cable power output  $33\text{W/m}$ (Location of heating cable: front(left), center(center), behind(right))

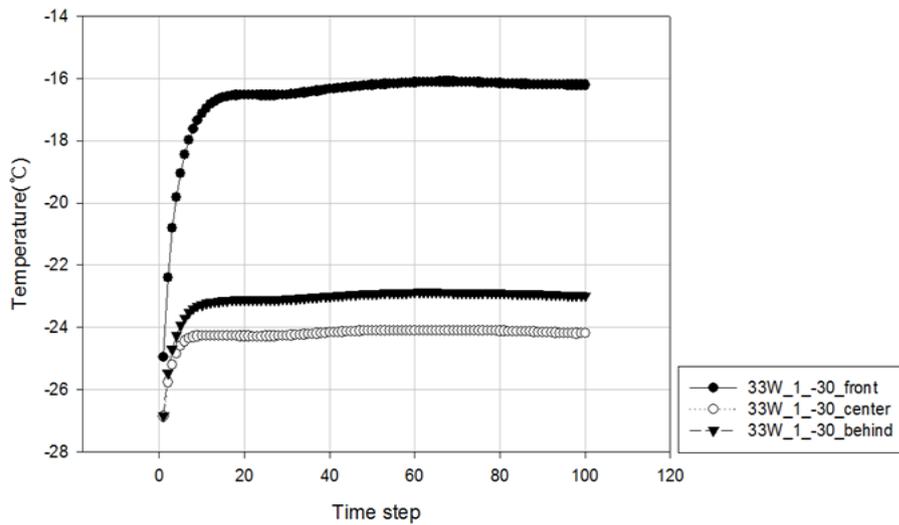


Fig. 31 The graph of the ice class louver numerical analysis: External temperature  $-30^{\circ}\text{C}$ , relative velocity  $1\text{m/s}$ , heating cable power output  $33\text{W/m}$

Fig. 26, 28, 30은 열선용량  $33\text{W/m}$ , 상대풍속  $1\text{m/s}$ 로 고정하고 외부환경온도만을 변경하여 해석을 수행한 blade 전체의 온도분포를 나타낸 것이고, 좌측부터 열선의 부착 위치가 전면부, 중면부, 후면부를 나타내고 있다. Fig. 27, 29, 31은 time step별 열선의 온도를 측정하는 Ch7을 제외한 Ch1 ~ 6의 평균값을 나타내었다. 이를 분석하였을 때, 열선을 blade의 전면부에 부착했을 때가 상대적으로 높은 온도를 나타내었고 이는 중면부에 비해서는 약  $10^{\circ}\text{C}$ 가 높으며, 후면부에 비해서는 약  $7^{\circ}\text{C}$  정도 높은 것으로 나타났다.

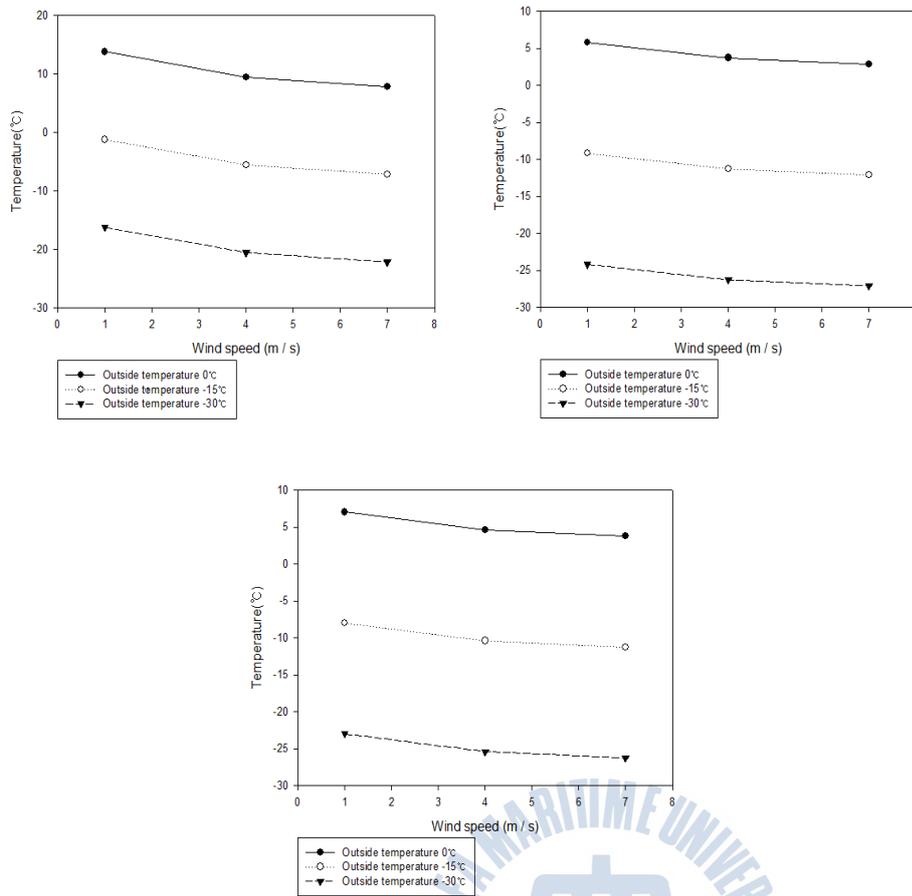
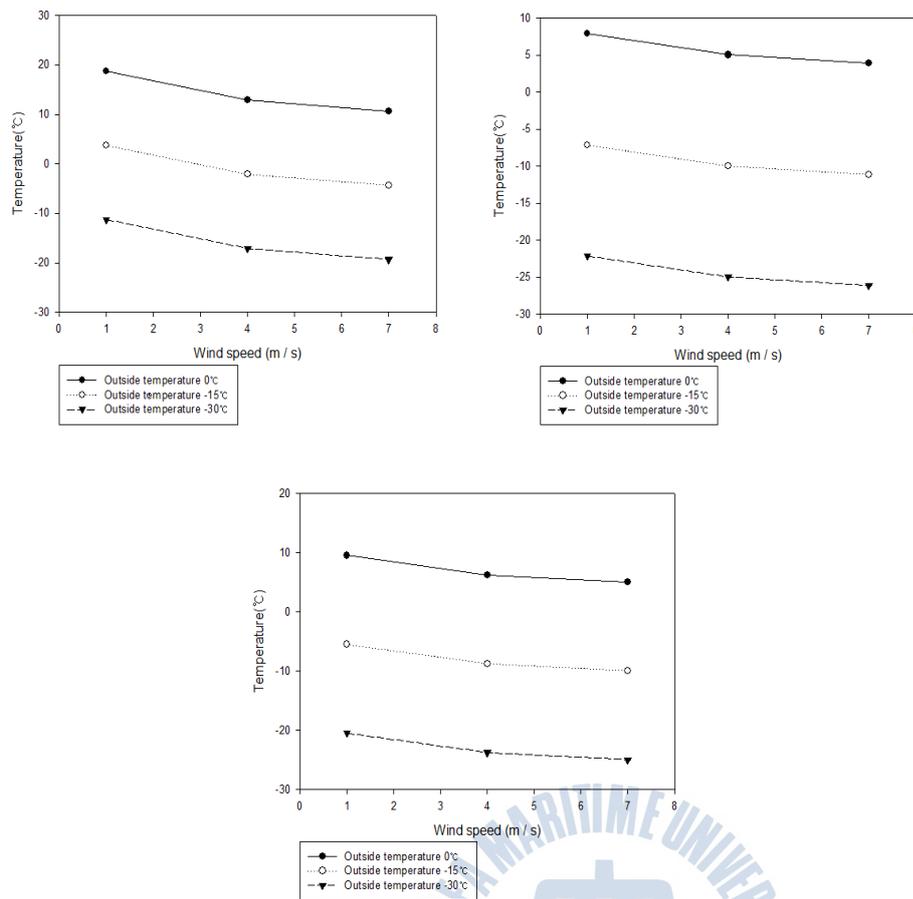


Fig. 32 Numerical analysis of the ice class louver according to the relative velocity: Heating cable power output  $33\text{ W/m}$  (Location of heating cable: front(top left), center(top right), behind(bottom))

Table 16 Numerical analysis of the ice class louver according to the relative velocity: Heating cable power output  $33\text{ W/m}$

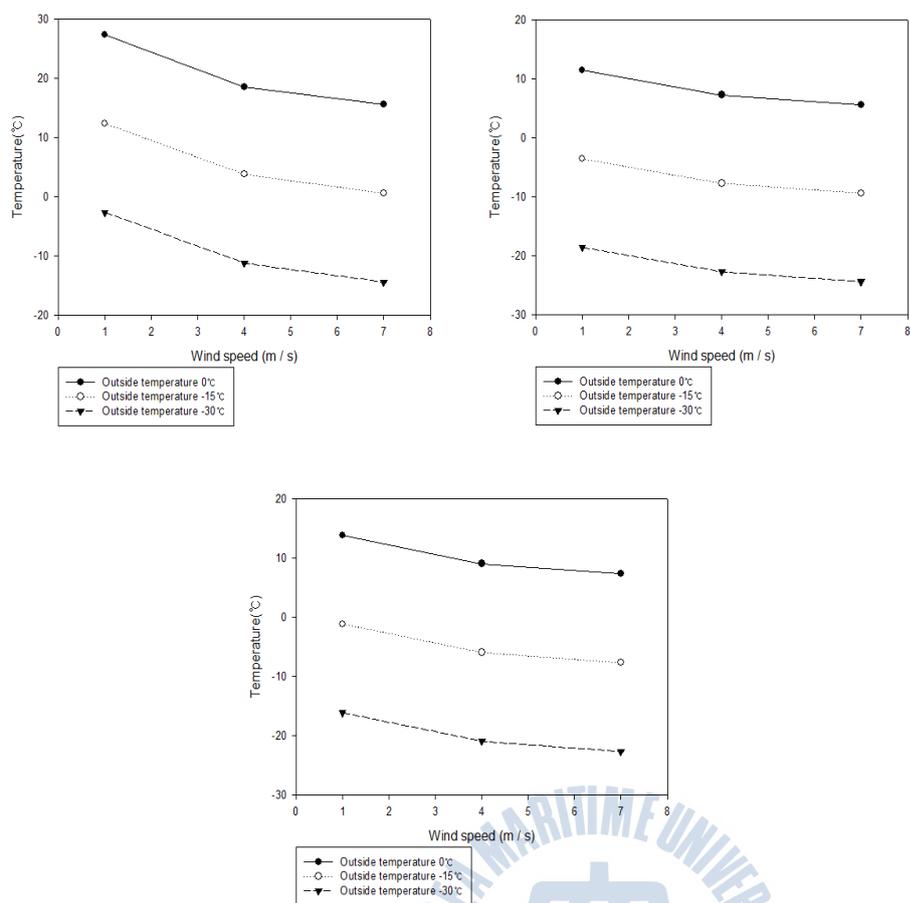
	Top			Center			Behind		
	0°C	-15°C	-30°C	0°C	-15°C	-30°C	0°C	-15°C	-30°C
1m/s	13.78	-1.21	-16.22	5.81	-9.19	-24.19	7.02	-7.98	-22.98
4m/s	9.48	-5.52	-20.52	3.73	-11.27	-26.27	4.61	-10.39	-25.39
7m/s	7.78	-7.13	-22.13	2.89	-12.11	-27.11	3.74	-11.26	-26.26



**Fig. 33** Numerical analysis of the ice class louver according to the relative velocity: Heating cable power output  $45\text{ W/m}$  (Location of heating cable: front(top left), center(top right), behind(bottom))

**Table 17** Numerical analysis of the ice class louver according to the relative velocity: Heating cable power output  $45\text{ W/m}$

	Top			Center			Behind		
	0°C	-15°C	-30°C	0°C	-15°C	-30°C	0°C	-15°C	-30°C
$1\text{ m/s}$	18.74	3.74	-11.26	7.86	-7.14	-22.14	9.52	-5.48	-20.48
$4\text{ m/s}$	12.88	-2.12	-17.12	5.03	-9.97	-24.97	6.23	-8.77	-23.77
$7\text{ m/s}$	10.68	-4.32	-19.32	3.89	-11.11	-26.11	5.05	-9.95	-24.95



**Fig. 34** Numerical analysis of the ice class louver according to the relative velocity: Heating cable power output  $66 \text{ W/m}$  (Location of heating cable: front(top left), center(top right), behind(bottom))

**Table 18** Numerical analysis of the ice class louver according to the relative velocity: Heating cable power output  $66 \text{ W/m}$

	Top			Center			Behind		
	0°C	-15°C	-30°C	0°C	-15°C	-30°C	0°C	-15°C	-30°C
$1 \text{ m/s}$	27.39	12.39	-2.61	11.47	-3.53	-18.53	13.90	-1.10	-16.10
$4 \text{ m/s}$	18.52	3.81	-11.19	7.30	-7.70	-22.70	9.07	-5.93	-20.93
$7 \text{ m/s}$	15.59	0.53	-14.41	5.63	-9.37	-24.37	7.33	-7.67	-22.67

Fig. 32, 33, 34는 상대풍속에 따른 수치해석 결과를 그래프로 나타낸 것이며 Table 16, 17, 18은 Ch1 ~ 6까지의 온도센서 측정값의 평균값을 나타낸 것으로, 이를 분석한 결과, 열선의 부착 위치가 전면부일 때 해빙성능이 가장 큰 것으로 나타났으며, 열선의 부착 위치가 측면부일 때 해빙성능 가장 낮은 경향으로 나타났다. 여기서 해빙성능이 가장 뛰어난 전면부의 해석결과를 Table 19에 도식화하였다. 이를 분석한 결과 환경온도가 15℃ 낮아질 때마다 온도센서의 데이터 값은 약 14℃ 정도 감소하고, 상대풍속이 3m/s 빨라질 때마다 최저 4.2℃ ~ 최고 9℃까지 감소하며, 열선용량이 10 W/m 증가할 때마다 약 2℃ 정도 상승하였다.

이와 같은 결과를 토대로 빙해선박의 작업환경에 따라 루버의 열선 부착위치 및 전력용량을 고려하여 열선을 시공한다면 더욱더 경제적으로 시공할 수 있는 토대가 될 것이다.



**Table 19** Numerical analysis data of the sensor temperature(Location of the heating cable: front)

	Room Temp. (°C)	Wind speed (m/s)	Ch1	Ch2	Ch3	Ch4	Ch5	Ch6	Ch7	Aver.
<b>33</b> <i>W/m</i>	<b>0</b>	1	2.50	7.26	7.26	4.67	4.67	11.40	58.16	6.29
		4	0.92	2.26	2.26	1.49	1.49	3.20	17.10	1.94
		7	0.56	1.55	1.55	0.99	0.99	1.90	9.38	1.26
	<b>-15</b>	1	-12.50	-7.74	-7.74	-10.33	-10.33	-3.60	43.15	-8.71
		4	-14.08	-12.75	-12.75	-13.52	-13.52	-11.81	2.11	-13.07
		7	-14.44	-13.45	-13.45	-14.01	-14.01	-13.11	-5.63	-13.75
	<b>-30</b>	1	-27.50	-22.74	-22.74	-25.33	-25.33	-18.60	28.16	-23.71
		4	-29.08	-27.74	-27.74	-28.51	-28.51	-26.80	-12.90	-28.06
		7	-29.44	-28.45	-28.45	-29.01	-29.01	-28.10	-20.62	-28.74
<b>45</b> <i>W/m</i>	<b>0</b>	1	3.18	9.68	9.68	6.15	6.15	14.89	75.63	8.29
		4	1.19	2.99	2.99	1.95	1.95	4.25	23.12	2.55
		7	0.71	2.06	2.06	1.29	1.29	2.52	12.70	1.66
	<b>-15</b>	1	-11.82	-5.32	-5.32	-8.85	-8.85	-0.11	60.63	-6.71
		4	-13.81	-12.01	-12.01	-13.05	-13.05	-10.75	8.12	-12.45
		7	-14.29	-12.94	-12.94	-13.71	-13.71	-12.48	-2.3	-13.35
	<b>-30</b>	1	-26.82	-20.32	-20.32	-23.85	-23.85	-15.11	45.63	-21.71
		4	-28.81	-27.01	-27.01	-28.05	-28.05	-25.75	-6.88	-27.45
		7	-29.29	-27.94	-27.94	-28.71	-28.71	-27.48	-17.3	-28.35
<b>66</b> <i>W/m</i>	<b>0</b>	1	4.52	13.52	13.52	8.51	8.51	20.13	101.92	11.45
		4	1.64	4.21	4.21	2.73	2.73	6.02	33.49	3.59
		7	0.98	2.95	2.95	1.82	1.82	3.61	18.47	2.36
	<b>-15</b>	1	-10.47	-1.48	-1.48	-6.49	-6.49	5.13	86.92	3.55
		4	-13.36	-10.79	-10.79	-12.27	-12.27	-8.98	18.49	-11.41
		7	-14.02	-12.05	-12.05	-13.18	-13.18	-11.39	3.47	-12.65
	<b>-30</b>	1	-25.47	-16.48	-16.48	-21.49	-21.49	-9.87	71.92	-18.55
		4	-28.36	-25.79	-25.79	-27.27	-27.27	-23.98	3.49	-26.41
		7	-29.02	-27.05	-27.05	-28.18	-28.18	-26.39	-11.53	-27.65

## 제 5 장 결 론

본 논문은 상용수치해석 프로그램인 ANSYS 13.0을 이용하여 빙해선박의 풍우밀문(weather-tight door) 및 아이스 클래스 루버(ice class louver)의 효율적인 열선 시공 및 설계기준을 도출하기 위해 수치적으로 모사하였고, 이를 KRISO에서 수행한 실내모형실험과 비교, 분석함으로써 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다.

본 연구는 선박에 사용되는 풍우밀문 및 루버를 극지역에서도 사용할 수 있도록 하기 위해 풍우밀문의 경우, 문틀에 열선을 시공하여 문틀과 문이 0℃ 이하로 내려가지 않도록 하여 문의 개폐성능이 이상이 없도록 하면서, 효율적인 열선 시공 및 설계기준을 도출하고자 수행되었고, 아이스 클래스 루버의 경우, blade에 열선을 시공하여 blade의 온도가 0℃ 이하로 내려가 착빙이 되었을 때, 열선에 전력을 공급하여 해빙이 될 수 있도록 효율적인 열선 시공 방안을 마련하여 경제적이고 효율적인 설계가 가능하게 하고자 수행되었다.

본 연구에서 대상으로 한 풍우밀문 및 아이스 클래스 루버는 KRISO에서 수행한 실내모형실험으로 연구된 자료를 바탕으로 구현되었으며, 풍우밀문의 경우, 온도 측정을 위한 온도센서의 위치 및 열전달 특성상 공기의 대류에 의한 온도의 영향이 미비할 것이라 예상하고 2차원 평면으로 모델링하여 해석을 수행하였고, 아이스 클래스 루버의 경우, 실험에 사용된 장비의 제원을 토대로 모델링을 하여 해석을 수행하였다. 풍우밀문은 외부환경온도가 -10℃인 경우, 실내모형실험 결과 값과 수치해석 결과 값을 비교하였을 때, 오차가 최대 11℃가 나는데 그 원인은 실내모형실험 결과 값이 외부환경온도가 -20℃로 변하기 직전의 온도가 아닌 -10℃에서 실내모형실험 결과 값을 산출해 놓은 값이고, 수치해석 결과 값과 외부환경온도가 -20℃로 변하기 직전의 결과 값과는 유사하므로 수치해석의 오류는 없는 것으로 판단하였다. 아이스 클래스 루버의 경우는 열선에 부착된 온도센서의 결과 값의 차이가 10℃ 정도 나타나는데 이는 실내모형실험에서 사용된 열선의 곁에 프레임이 덧대어져 실험이 수행되었고 수치해석의 경우 프레임과 함께 모델링을 했을 경우 격자 깨짐 현상이 발생하

여 수치해석을 수행할 수 없어 프레임을 모델링하지 않고 결과를 도출하였기 때문에 이와 같은 오차가 발생한 것으로 분석하였다. 나머지 결과들은 강제시편의 온도가 발산하지 않고 특정온도로 수렴하였다.

풍우밀문의 수치해석 결과, 외부환경온도가  $10^{\circ}\text{C}$  감소할 때 센서의 온도는 약  $0.9^{\circ}\text{C}$  정도 감소하고, 열선 용량이  $10\text{ W/m}$  증가할 때마다 약  $0.6^{\circ}\text{C}$  정도 증가하는 것을 확인할 수 있었다. 그리고 강관의 두께가  $0.5\text{ mm}$  증가할 때 최소  $0.2^{\circ}\text{C}$  ~ 최대  $2.4^{\circ}\text{C}$  감소하였다.

아이스 클래스 루버의 수치해석 결과, blade의 전면부에 열선을 부착한 것이 상대적으로 가장 높은 온도를 나타내었고 이 결과는 중면부에 비해 약  $10^{\circ}\text{C}$  정도 높으며, 후면부에 비해서는 약  $7^{\circ}\text{C}$  정도 높은 것으로 나타났다. 열선을 전면부에 부착했을 경우, 외부환경온도가  $15^{\circ}\text{C}$  낮아질 때마다 약  $14^{\circ}\text{C}$  정도 감소하고, 상대풍속이  $3\text{ m/s}$  빨라질 때마다 최저  $4.2^{\circ}\text{C}$  ~ 최고  $9^{\circ}\text{C}$  까지 감소하며, 열선용량이  $10\text{ W/m}$  증가할 때마다 약  $2^{\circ}\text{C}$  정도 증가하였다.



## 참고문헌

- [1] 김호연, 2014. *남극해에서 계측된 스트레인계이지 데이터 분석과 아라온호 빙하중 추정에 관한 연구*. 석사학위논문. 부산:한국해양대학교
- [2] 서영교, 정영준, 2013. 빙해선박 풍우밀문의 결빙방지 성능평가 및 설계기준에 관한 연구. *대한조선학회논문집*, 50(6), pp.450-457.
- [3] 이종찬, 서영교, 이춘주, 2012. 빙해선박 상부갑판 열선의 열전달 특성에 따른 착빙방지 성능평가 및 설계기준에 관한연구. *대한조선학회논문집*, 49(6), pp.541-549.
- [4] 정성엽, 이춘주, 조성락, 2011. 극지운항용 빙해선박의 벨러스트 수 결빙방지 기법 연구. *대한조선학회논문집*, 48(1), pp.93-97.
- [5] 정성엽, 천은지, 조성락, 이춘주, 2011. 내빙선박용 풍우밀 문의 결빙방지 기법 연구. *대한조선학회논문집*, 48(6), pp.575-580.
- [6] 정영준, 서영교, 이채은, 채아영, 2014. 아이스 클래스 루버의 해빙 성능평가에 관한 연구. *한국해양과학기술협의회 공동학술대회*, pp.1764-1767.
- [7] 지식경제부, 2012. *극지용 저온 설계 및 Winterization 평가 기술*. 지식경제부 산업원천기술개발사업 1단계 제 3세부과제 보고서.
- [8] 한국해양과학기술원 해양운송연구부, 2012. *Ice Class Louver의 De-Icing 저온 성능 시험 보고서*. 한국해양과학기술원.
- [9] American Bureau of Shipping(ABS), 2006. *Guide for Vessels Operating in Low Temperature Environments*.
- [10] ANSYS Inc., 2010. *ANSYS CFX-Solver Theory Guide. RELEASE 13.0*.
- [11] Det Norske Veritas(DNV), 2005. *DNV Rules for Classification of Ships*.
- [12] Lloyd's Register., 2011. *Rules for Ice and Cold Operations Winterization of Vessels*.