



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](#)

工學碩士 學位論文

# ARAON호의 북극해 빙하중 실측 데이터의 확률론적 해석

Probabilistic Approach on the Arctic Ice Load Data for IBRV ARAON



2018년 2월

한국해양대학교 대학원

해양공학과  
조성록

本 論 文 을 趙 成 錄 의 工 學 碩 士 學 位 論 文 으 로 認 准 함.

위원장 서 영 교 (인)

위원 최 경 식 (인)

위원 하 승 현 (인)



2018년 2월

한국해양대학교 대학원

# 목 차

List of Tables .....	ii
List of Figures .....	iii
Nomenclature .....	v
Abstract .....	vi
1. 서 론 .....	1
2. 실선계측 데이터 분석 .....	4
2.1 스트레인게이지 데이터 분석 .....	7
2.2 선속 데이터와 해빙의 두께 데이터 분석 .....	13
2.2 이벤트 발생 데이터 추출 .....	17
3. 확률론적 해석 .....	18
3.1 ARAON호 계측데이터의 확률분포 .....	19
3.2 압력-면적 관계식의 도출 .....	29
4. 압력-면적 관계식의 보완 .....	33
4.1 선박의 속도 .....	33
4.2 해빙의 두께 .....	38
5. 고 찰 .....	43
6. 결 론 .....	46
참고문헌 .....	47

## List of Tables

Table 3-1 $\alpha$ and $x_0$ for different areas .....	23
Table 3-2 Modified $x_0'$ for different areas .....	26



# List of Figures

Fig. 1-1 Undiscovered oil and gas resources in the arctic (USGS, 2010) .....	1
Fig. 2-1 MotionPak installed in the engine room .....	5
Fig. 2-2 Electromagnetic induction instrument installed for measuring ice thickness .....	5
Fig. 2-3 ARAON's intergrated monitoring software .....	6
Fig. 2-4 ARAON's intergrated monitoring system .....	6
Fig. 2-5 Locations of installed strain gauge (port side) .....	8
Fig. 2-6 Locations of installed strain gauge (starboard side) .....	8
Fig. 2-7 Strain gauge installed on plate .....	9
Fig. 2-8 Influence coefficient matrix .....	11
Fig. 2-9 Time history of local ice pressure (area = $8m^2$ ) .....	12
Fig. 2-10 GPS installed for measuring ship speed .....	13
Fig. 2-11 Time history of ship speed .....	14
Fig. 2-12 Camera installed middle in the ship on starboard side .....	15
Fig. 2-13 Exposed sectional image of sea ice .....	15
Fig. 2-14 Thickness estimation of sea ice using image analysis program .....	16
Fig. 2-15 Time history of local ice load and ship speed (Min et al., 2016) .....	17
Fig. 3-1 Local ice pressure vs. contact area data and the proposed local ice load prediction (Choi and Jeong, 2008) .....	18
Fig. 3-2 Ice conditions during 2016 Arctic voyage .....	19
Fig. 3-3 Ranked pressure vs. probability of exceedance in log scale for different areas .....	20
Fig. 3-4 Fit to tail of distribution (a) area = $0.4m^2$ (b) area = $8m^2$ .....	22

<b>Fig. 3-5</b> Fit to tail of modified distribution	
(a) area = $0.4m^2$ (b) area = $8m^2$ .....	25
<b>Fig. 3-6</b> $x_0$ and $x_0'$ for different areas .....	27
<b>Fig. 3-7</b> $\ln(\text{Area})$ vs. $\ln(\alpha)$ .....	28
<b>Fig. 3-8</b> Area vs. $\alpha$ .....	28
<b>Fig. 3-9</b> Probability of exceedance vs. pressure (area = $0.4m^2$ ) .....	31
<b>Fig. 3-10</b> Proposed equation and all measured data for different areas .....	32
<b>Fig. 4-1</b> Ship speed vs. pressure for different areas	
(a) area = $0.4m^2$ (b) area = $4m^2$ (c) area = $8.0m^2$ .....	34
<b>Fig. 4-2</b> $\ln(\text{Fr})$ vs. $\ln(\frac{\text{Pressure}}{\alpha})$ .....	35
<b>Fig. 4-3</b> Ship speed vs. pressure and the modified local design ice load	
(a) area = $0.4m^2$ (b) area = $4m^2$ (c) area = $8.0m^2$ .....	37
<b>Fig. 4-4</b> Ice thickness vs. Pressure for different areas	
(a) area = $0.4m^2$ (b) area = $2.4m^2$ (c) area = $4.8m^2$ .....	39
<b>Fig. 4-5</b> $\ln(\frac{h}{h_{ref}})$ vs. $\ln(\frac{\text{pressure}}{\alpha'})$ .....	40
<b>Fig. 4-6</b> Ice thickness vs. pressure and the modified local design ice load	
(a) area = $0.4m^2$ (b) area = $2.4m^2$ (c) area = $4.8m^2$ .....	42
<b>Fig. 5-1</b> Comparison of each equations	
(a) different ship speed (b) different ice thickness .....	44

# Nomenclature

$E$  = modulus of elasticity [GPa]

$\nu$  = Poisson' s ratio

$\epsilon$  = strain intensity

$\sigma_{eq}$  = equivalent stress [MPa]

$\sigma$  = stress [MPa]

$C$  = influence coefficient

$p$  = local ice pressure [MPa]

$n$  = number of data

$\alpha$  = constant [MPa]

$x_0$  = constant [MPa]

$p_e$  = probability of exceedance

$X$  = random quantity denoting pressure

$\nu_e$  = number of impacting event

$r$  = proportion of event

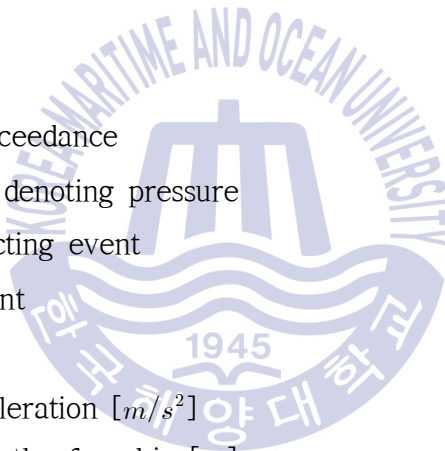
$v$  = ship speed [ $m/s$ ]

$g$  = gravitational acceleration [ $m/s^2$ ]

$L$  = characteristic length of a ship [ $m$ ]

$h$  = ice thickness [ $m$ ]

$A$  = area [ $m^2$ ]





# Probabilistic Approach on the Arctic Ice Load Data for IBRV ARAON

Sungrok Cho

Department of Ocean Engineering  
Graduate School of Korea Maritime and Ocean University

## Abstract

The most important factor in the design of an icebreaking vessel is the ice pressure from sea ice, however it is difficult to quantify ice pressure. The best way is to measure ice load through field test.

The first icebreaking research vessel in Korea, ARAON, has collected various data including strain through several field tests since 2010. The collected data have not been used in the design of ship structures due to insufficient analysis procedures. The purpose of this study is to derive local design ice pressure based on the field data from ARAON in order to improve structural design against ice load.

In this study a local design ice pressure as functions of contact area is derived using data from 2016 ARAON's Arctic field test, which collected more diversified strain data than the previous year's field tests, including ship's speed and ice thickness information by use of integrated monitoring system.

Local ice pressure is usually described as a function of contact areas, but it is not practical to express the ice pressure only by area. The pressure depends on various factors such as ship speed and material properties of sea ice. In this study, the local design ice pressure was reanalysed after reviewing the ARAON's data to consider speed of vessels and thickness of sea ice.

**KEY WORDS:** Local ice pressure(국부빙압력), Probabilistic analysis(확률론적 해석), IBRV ARAON(쇄빙연구선 아라온호), Arctic field data(북극해 계측 데이터)



# ARAON호의 북극해 빙하중 실측 데이터의 확률론적 해석

조성록

해양공학과  
한국해양대학교 대학원

## 초 록

빙해역을 운항하는 쇄빙선박의 설계는 일반 선박과 달리 해빙으로부터 유발되는 빙하중이 가장 중요한 고려 대상이지만 빙하중을 정량적으로 파악하는 것은 쉽지 않으며 이를 파악하기 가장 좋은 방법은 실선시험을 통해 실제 빙하중을 계측하는 것이다.

이에 따른 연구의 일환으로 국내 최초의 쇄빙연구선 ARAON호는 2010년부터 최근까지 수차례의 실선시험을 통해 변형률을 비롯한 여러 가지 데이터를 계측한 바 있다. 하지만 계측된 데이터는 처리방법의 미흡으로 실제 구조물 설계에는 활용되지 못하고 있다. 본 연구의 최종 목적은 ARAON호의 실선계측 데이터를 이용하여 실제 구조물 설계에 활용하기 위해 설계 국부빙압력 추정식을 도출하는 것이다.

2016년 ARAON호의 실선시험은 통합계측 시스템을 이용한 계측시간의 동기화, 설치된 카메라에서 촬영된 해빙의 단면 영상을 분석하여 해빙의 두께 추정 등의 이유로 다른 해에 비해 많은 데이터를 활용할 수 있다.

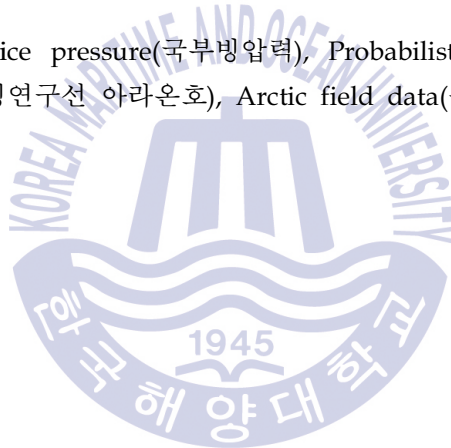
본 연구에서는 2016년 ARAON호의 실선시험 데이터를 이전의 연구자들이

제안한 확률론적 방법을 이용하여 면적에 대한 함수로 설계 국부빙압력 추정식을 도출하였다.

실제 빙압력은 선박의 속도나 해빙의 재료특성 등 여러 요인에 의해 달라지므로 빙압력을 면적만으로 나타내는 것은 현실적이지 못하다. 또한, 2016년 ARAON호의 실선시험은 선박의 손상이 일어나지 않는 정상운항 상태에서 수행되었으며, 얼음의 강도가 약한 여름에 수행되었으므로 이때의 데이터를 토대로 도출한 추정식의 계산 결과는 극한 빙압력이 아니며 추가적인 보완이 필요하다.

본 연구에서는 선박의 속도 및 해빙의 두께와 빙압력의 관계를 추가적으로 분석하였으며, 이때의 결과를 통해 기존의 설계 국부빙압력 추정식을 보다 현실적인 추정식으로 보완하였다.

**KEY WORDS:** Local ice pressure(국부빙압력), Probabilistic analysis(확률론적 해석), IBRV ARAON(쇄빙연구선 아라온호), Arctic field data(북극해 계측 데이터)



## 제 1 장 서 론

미국 지리정보국(USGS)의 조사에 따르면 북극권 내 미발견 자원은 석유 약 900억 배럴, 천연가스 약 440억 배럴로 전 세계 미발견 석유의 13%와 천연가스의 30%를 차지한다(USGS, 2008). 이처럼 북극권은 매우 큰 잠재력을 가졌음에도 불구하고 극한의 기후와 이에 따른 기술적 한계로 인해 개발에 난항이 있었다. 하지만 최근 높은 유가 상승과 지구온난화에 따른 북극권 해빙면적의 감소로 새로운 수송로가 발견되는 등 북극권의 개발 가능성이 높아지고 있으며, 이미 러시아와 같은 북극 연안국의 경우 북극권 개발 프로젝트를 위해 초대형 LNG 운반선을 건조 하는 등 여러 노력을 기울이고 있다.

우리나라는 지정학적으로 북극의 석유 및 가스자원 개발에 직접 참여하는 것이 매우 어렵다. 하지만 에너지 공급루트의 다변화를 꾀하고 조선, 해양산업의 활성화를 위해서 북극권 개발에 필요한 각종 선박 및 해양구조물의 건조와 이를 위한 원천기술을 확보할 필요가 있다.

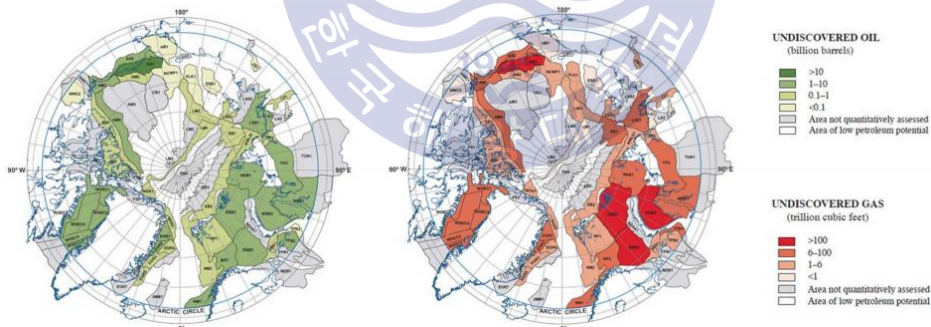


Fig. 1-1 Undiscovered oil and gas resources in the arctic  
(USGS, 2010)

일반해역을 운항하는 선박의 경우 해류, 파도, 바람과 같은 해상환경이 중요한 고려 대상이지만 쇄빙선박과 같이 북극해와 같은 빙해역을 운항하는 선박은 해빙으로부터 유발되는 빙하중의 크기가 파도에 의한 하중의 수십 배에 달하므로 빙하중이 가장 중요한 고려 대상이다. 그러므로 빙하중을 정량적으로 파악하는 것이 필수적으로 요구되지만 빙하중은 해빙의 재료특성과 파괴의 역학적

거동이 해빙의 종류나 크기, 속도 및 지역적인 분포상황 등 수많은 요인에 의해 달라지므로 이를 정량적으로 파악하는 것은 쉽지 않다. 따라서 빙하중의 정량적 파악을 위해 최근까지 여러 연구가 진행되고 있다.

쇄빙선박에 작용하는 빙하중은 선박의 종강도 및 진동 관점에서 산정하는 전체빙하중(global ice load)과 선체의 외관, 주변 부재의 변형 및 손상의 관점에서 산정하는 국부빙압력(local ice pressure)으로 구분할 수 있다(Choi and Jeong, 2008). Johansson et al.(1981), Keinonen(1983)은 쇄빙선박 Kigoriak의 실선계측 데이터를 분석하여 속도와 배수량에 관한 함수로 전체빙하중 경험식을 제안한 바 있다. 국내에서는 쇄빙연구선 ARAON호에 설치된 관성 장치로 선체 운동을 측정하였으며, 이를 이용해 선박에 작용하는 전체빙하중을 추정하는 연구가 진행되었다(Min et al., 2016).

Masterson and Frederking(1993)은 쇄빙선 M.V.Arctic호, Kigoriak호, Polar Sea 호에서 계측된 빙압력 데이터를 분석하여 면적에 따른 함수로 국부빙압력 추정식을 제안한 바 있으며, Frederking(2004)은 촉각센서(tactile sensor)를 이용하여 빙-선박 상호작용 시 발생하는 빙압력의 분포에 대한 분석을 수행하였다. Jordaan et al.(1993), Taylor et al.(2010)은 기존의 실선계측 데이터를 재해석하여, 확률이론을 적용해 면적에 따른 함수로 국부빙압력 추정식을 제안하였다. Masterson and Frederking(1993), Jordaan et al.(1993) 및 Taylor et al.(2010)이 제안한 국부빙압력 추정식은 모두 면적만을 고려하고 있다. 하지만 실제 빙압력은 선박의 속도나 해빙의 재료특성 등 여러 요인에 의해 달라지므로 빙압력을 면적만으로 나타내는 것은 현실적이지 못하다.

국내에서는 2009년 쇄빙연구선 ARAON호를 건조함에 따라 최근까지 수차례의 실선시험을 통해 변형률을 비롯한 여러 가지 데이터를 계측한 바 있다. 하지만 계측된 데이터는 처리방법의 미흡으로 실제 구조물 설계에는 활용되지 못하고 있다. 따라서 본 연구에서는 ARAON호의 실선계측 데이터를 실제 구조물 설계에 활용할 수 있는 방안을 모색하기 위해 실선계측된 데이터를 토대로 이전의 연구자들이 제시한 확률론적 방법을 이용하여 설계 국부빙압력 추정식을 도출하고자 하였다.

수차례 수행된 ARAON호의 실선시험 중 2016년에 수행된 실선시험에서는 GPS를 통한 속도 데이터, 스트레인게이지를 통한 빙압력 데이터를 계측했을 뿐만 아니라 쇄빙 후 뒤집어지며 드러난 해빙의 단면을 촬영하였으며 이때의 영상을 분석하여 해빙의 두께를 추정하였다. 또한, 통합계측 시스템의 동기화된 데이터 계측시간으로 추정된 두께에 대응하는 빙압력 데이터를 얻을 수 있었다. 본 연구에서는 2016년 실선시험을 통해 계측된 선박의 속도와 해빙의 두께 데이터를 이용하여 선박의 속도 및 해빙의 두께와 빙압력의 관계를 분석하였으며, 이때의 결과를 통해 기존의 면적만으로 표현된 설계 국부빙압력 추정식에 선박의 속도와 해빙의 두께 향을 추가적으로 고려하여 보다 실용적인 추정식을 제안하였다.



## 제 2 장 실선계측 데이터 분석

국내 최초의 쇄빙연구선 ARAON호는 2009년 하반기에 건조되었으며, 2010년부터 최근까지 수 차례의 실선시험을 통해 여러 가지 데이터를 계측하였다. 선수부에 스트레인게이지(strain gauge) 및 광섬유센서(fiber optic sensor)를 부착해 해빙과 접촉 시 발생하는 변형률을 계측하였으며, Fig. 2-1와 같이 관성 측정 장치(MotionPak)를 설치해 선체 운동을 계측하기도 하였다. 또한, Fig. 2-2와 같이 선수부에 전자기 유도 장비(electromagnetic induction instrument)를 설치하여 전자기 유도 장비에서 형성된 전자기장을 통해 해빙의 전도도를 계측함으로써, 정량적 해빙의 두께를 실시간으로 추정하고자 하였으나 해빙과의 충돌 시 장비가 파손되는 등의 이유로 인해 정확한 데이터를 확보하지 못하였다. 하지만 2016년 8월 2일부터 8월 21일까지 척치해(Chuckchi sea)에서 실시된 ARAON호의 실선시험에서는 해빙의 두께 추정을 위해 ARAON호의 우현 중앙부에 카메라를 설치하여 선수부에서 깨진 얼음이 흘러나와 뒤집어지며 드러나는 단면을 촬영하였으며, 이때의 영상을 분석하여 해빙의 두께를 추정하였다. 또한 통합계측 시스템의 도입으로 변형률의 계측시간, 카메라의 촬영시간 및 GPS를 통한 속도 계측시간 등 여러 데이터의 계측시간을 동기화함으로써, 동일한 계측시간에 대응하는 데이터를 얻을 수 있었다. Fig. 2-3, 2-4은 통합 데이터 계측 시스템 프로그램과 그 구성도를 나타낸 것이다.

이와 같은 이유로 본 연구에서는 이전의 실선계측에 비해 더 다양한 데이터를 활용할 수 있는 2016년 실선시험 중 계측된 ARAON호의 실선계측 데이터를 분석하였다.





Fig. 2-1 MotionPak installed in the engine room



Fig. 2-2 Electromagnetic induction instrument installed for measuring ice thickness

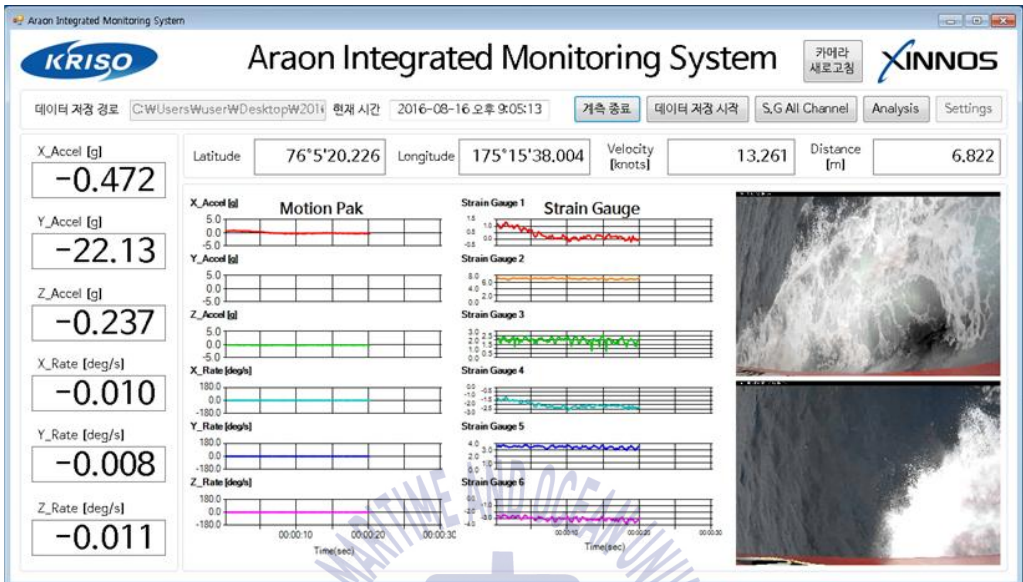


Fig. 2-3 ARAON' s integrated monitoring software

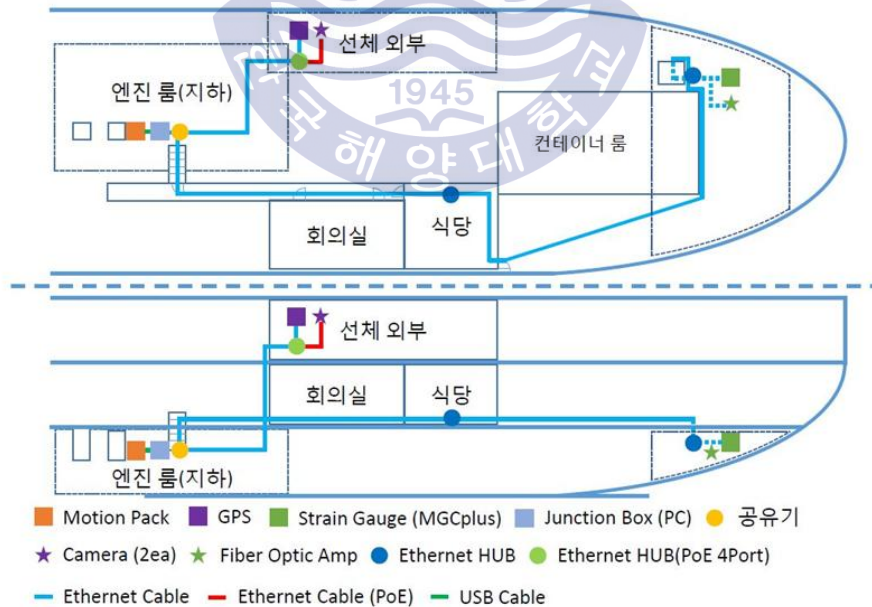


Fig. 2-4 ARAON' s integrated monitoring system

## 2.1. 스트레인게이지 데이터 분석

해빙으로부터 유발되는 빙하중을 계측하기 위한 가장 좋은 방법은 해빙과 직접 접촉하는 구조물 외부에 계측기기를 설치하는 것이다. 하지만 이는 현실적으로 불가능하기 때문에 ARAON호의 실선시험에서는 선체 내부에 스트레인게이지 및 광섬유센서를 설치하여 변형률을 계측하였다.

변형률은 32개의 3축 로제트게이지와 8개의 1축 게이지로 총 40개의 스트레인게이지와 5개의 광섬유센서를 통해 계측하였다. 이들 계측 센서는 선수격벽 뒤쪽의 thrust room 내의 외판 안쪽 second deck 하부의 102번 프레임부터 110번 프레임 사이에 홀수선을 중심으로 Fig. 2-5, 2-6와 같이 좌현에 28개(3축 로제트게이지 20개, 1축 게이지 8개, 광섬유센서 5개), 우현에 12개(3축 스트레인게이지 12개)가 각각 설치되었다. 스트레인게이지가 부착된 ARAON호 외판은 항복강도 355MPa, 탄성계수 200GPa, 프아송비 0.3을 갖는 EH36 강재로 되어있다. Fig. 2-7은 설치되어 있는 스트레인게이지 중 일부를 촬영한 것이다.

한편, 좌현에 설치된 5개의 광섬유센서는 스트레인게이지의 계측 데이터와 비교를 통해 실효성을 확인하기 위한 것으로서, 시범적으로 설치된 것이므로 본 연구에서는 광섬유센서를 통해 계측된 변형률 데이터는 제외하였다. 또한 좌현의 프레임에 설치된 8개의 3축 로제트게이지는 전단 변형률 측정을 통해 선체 외판에 작용하는 국부빙압력을 간접적으로 추정하기 위해 설치된 것으로서, 본 연구에서는 해빙의 직접적인 영향을 받는 외판에 설치된 스트레인게이지 데이터만을 사용하였다.

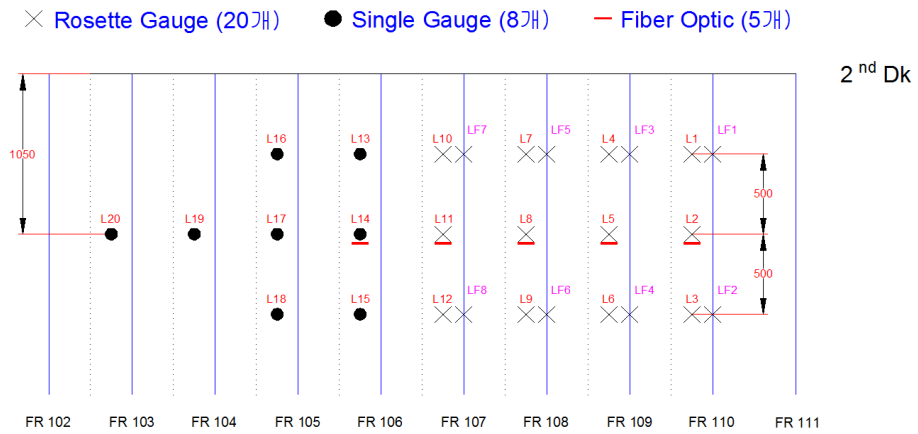


Fig. 2-5 Locations of installed strain gauge (Port side)

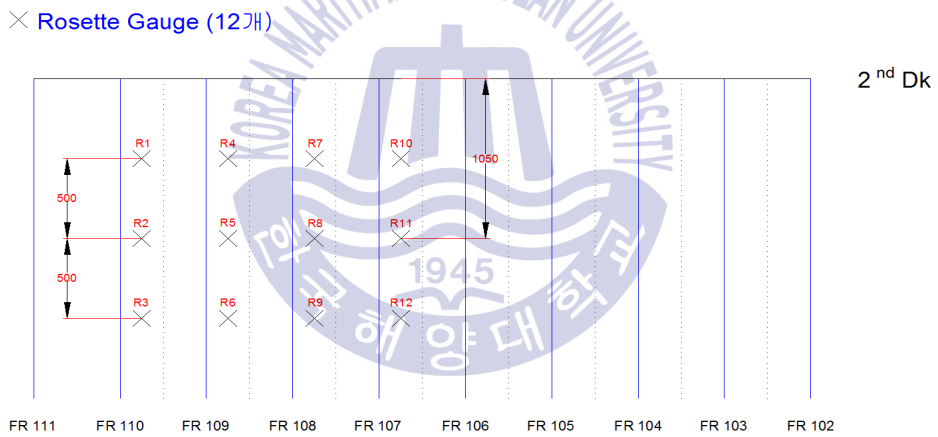


Fig. 2-6 Locations of installed strain gauge (Starboard side)



fig. 2-7 Strain gauge installed on plate

스트레인게이지로부터 측정된 변형률 데이터를 유효한 압력이나 하중으로 환산하기 위해서는 구조물의 응답과 하중 사이의 상관관계를 추정할 수 있어야 하며, 이에 대한 기법은 이전의 연구를 통해 정리된 바 있다(Kim, 2016). 먼저, 측정된 변형률을 응력으로 변환해야 하는데 3축 로제트게이지의 경우 Eq.(1), (2) 와 같이 Von Mises 등가 응력식을 사용해 세 방향의 변형도  $\epsilon_A, \epsilon_B, \epsilon_C$  에 대한 주응력  $\sigma_1, \sigma_2$ 를 계산하고 이로부터 Eq.(3)을 사용해 등가응력  $\sigma_{eq}$ 로 변환한다.

$$\sigma_1 = \frac{E}{2(1-\nu)} (\epsilon_A + \epsilon_B) + \frac{E\sqrt{2}}{2(1+\nu)} \sqrt{(\epsilon_A - \epsilon_C)^2 + (\epsilon_B - \epsilon_C)^2} \quad (1)$$

$$\sigma_2 = \frac{E}{2(1-\nu)} (\epsilon_A + \epsilon_B) - \frac{E\sqrt{2}}{2(1+\nu)} \sqrt{(\epsilon_A - \epsilon_C)^2 + (\epsilon_B - \epsilon_C)^2} \quad (2)$$

$$\sigma_{eq} = \sqrt{\sigma_1^2 + \sigma_2^2 - \sigma_1\sigma_2} \text{ [MPa]} \quad (3)$$

1축 게이지의 경우 선박을 탄성체로 가정하여 Eq.(4)와 같이 1차원 Hooke의 공식에 의해 응력으로 변환한다.

$$\sigma = E \times \epsilon_x \text{ [MPa]} \quad (4)$$

변환된 응력은 영향계수행렬을 이용한 압력과의 관계를 통해 각각의 스트레인게이지에 작용한 빙압력을 추정할 수 있다(Lee et al., 2013). 영향계수행렬은

특정한 영역에 단위 압력을 작용했을 때 스트레인게이지가 설치된 각각의 영역에 발생하는 변형과 응력을 행렬로 만든 것으로 유한요소 해석을 통한 구조해석을 반복적으로 수행하여 구할 수 있다. 한편, 본 연구에서는 각각의 스트레인게이지는 인접한 스트레인게이지와의 거리에 따라 한 개당  $0.4m^2$ 의 면적을 담당한다고 가정하였다. 따라서 좌현의 경우 20개의 스트레인게이지에 해당하는 면적인  $8m^2$ 를 전체 면적으로 정의하였으며, 우현은 12개의 스트레인게이지에 해당하는 면적인  $4.8m^2$ 를 전체 면적으로 정의하였다. Fig. 2-8은 본 연구에서 사용된 영향계수행렬을 나타낸 것이다.

40.927	9.085	3.538	2.508	2.959	2.895	1.454	1.151	0.848	1.201	1.088	0.92	1.048	0.937	0.839	0.928	0.852	0.782	0.813	0.778	0.732	0.729	0.711	0.678
8.155	45.456	12.481	2.896	4.508	4.549	1.603	1.399	1.058	1.307	1.253	1.111	1.126	1.045	0.957	0.983	0.924	0.866	0.857	0.83	0.791	0.764	0.752	0.725
2.557	11.988	47.815	2.398	4.608	5.348	1.565	1.489	1.292	1.312	1.317	1.231	1.149	1.101	1.039	1.003	0.963	0.922	0.876	0.86	0.831	0.782	0.776	0.756
0.749	1.29	1.528	41.74	9.905	4.101	2.244	2.973	3.418	1.568	1.326	1.04	1.327	1.149	0.98	1.148	1.021	0.902	0.967	0.904	0.824	0.835	0.797	0.739
0.835	1.497	2.666	8.774	47.046	13.645	2.733	4.611	5.201	1.677	1.588	1.291	1.422	1.306	1.152	1.22	1.122	1.017	1.02	0.972	0.898	0.874	0.845	0.794
1.4	2.061	2.893	3.587	14.039	48.862	2.316	4.878	6.183	1.6	1.673	1.527	1.414	1.363	1.264	1.228	1.164	1.089	1.031	1.002	0.943	0.886	0.867	0.826
0.775	0.568	0.416	0.688	1.44	1.395	42.176	10.387	4.408	2.993	3.636	3.252	1.706	1.344	1.013	1.422	1.222	1.023	1.154	1.048	0.914	0.96	0.894	0.802
0.866	0.691	0.547	0.983	1.55	2.243	9.024	46.838	13.35	3.356	4.912	4.713	1.831	1.606	1.224	1.55	1.402	1.223	1.245	1.163	1.031	1.026	0.972	0.887
0.858	0.738	0.628	1.512	2.008	2.414	3.648	13.324	48.323	2.709	4.87	5.418	1.748	1.697	1.494	1.56	1.481	1.375	1.271	1.223	1.118	1.056	1.018	0.951
0.617	0.417	0.314	0.837	0.77	0.58	0.905	1.147	1.399	41.051	9.546	3.99	2.358	2.681	2.812	1.769	1.422	1.114	1.385	1.219	1.014	1.107	1.011	0.885
0.709	0.514	0.406	0.985	1.008	0.815	0.912	1.325	2.381	8.455	45.824	13.18	2.728	4.024	4.186	1.927	1.716	1.379	1.521	1.404	1.198	1.197	1.124	1.014
0.766	0.594	0.491	1.027	1.127	0.969	1.308	1.813	2.56	3.198	12.94	47.947	2.268	4.258	4.892	1.894	1.842	1.643	1.56	1.509	1.356	1.242	1.196	1.116
0.48	0.327	0.248	0.587	0.48	0.371	0.645	0.599	0.496	0.785	1.3	1.504	39.01	8.591	3.831	2.238	2.07	2.507	1.687	1.398	1.117	1.296	1.163	0.974
0.566	0.412	0.327	0.671	0.571	0.466	0.716	0.669	0.653	0.962	1.414	2.387	7.454	43.575	12.348	2.612	2.265	3.681	1.892	1.723	1.417	1.447	1.355	1.169
0.634	0.489	0.405	0.732	0.65	0.553	0.728	0.775	0.756	1.498	1.944	2.523	2.902	11.936	46.125	2.334	3.741	4.571	1.907	1.879	1.711	1.519	1.478	1.338
0.343	0.239	0.186	0.436	0.346	0.253	0.474	0.346	0.319	0.595	0.609	0.553	0.676	1.235	1.61	39.604	9.173	4.436	2.339	2.436	2.683	1.491	1.241	0.945
0.413	0.314	0.257	0.515	0.421	0.313	0.549	0.436	0.396	0.644	0.743	0.737	0.748	1.468	2.717	8.066	44.781	13.456	2.799	3.801	4.279	1.644	1.499	1.137
0.467	0.376	0.32	0.572	0.481	0.368	0.601	0.513	0.46	0.648	0.815	0.862	1.351	2.133	3.131	3.759	13.212	47.978	2.503	4.25	5.457	1.649	1.633	1.377
0.199	0.133	0.105	0.269	0.213	0.161	0.31	0.211	0.187	0.411	0.372	0.318	0.541	0.538	0.519	0.498	1.303	1.546	39.068	9.099	4.309	2.195	2.668	2.935
0.247	0.177	0.142	0.332	0.271	0.209	0.385	0.273	0.236	0.502	0.469	0.411	0.64	0.702	0.735	0.796	1.557	2.66	8.375	44.324	13.081	2.969	4.438	5.021
0.279	0.212	0.173	0.373	0.312	0.247	0.433	0.322	0.275	0.551	0.531	0.478	0.658	0.793	0.894	1.421	2.268	2.997	3.746	12.515	47.244	2.706	4.724	6.263
0.088	0.059	0.054	0.128	0.101	0.082	0.151	0.104	0.098	0.215	0.193	0.172	0.305	0.29	0.264	0.367	0.384	0.394	0.419	1.06	1.404	38.56	10.107	6.324
0.115	0.087	0.077	0.164	0.134	0.11	0.197	0.142	0.129	0.277	0.257	0.239	0.405	0.416	0.388	0.445	0.526	0.616	0.539	1.556	2.731	8.702	44.929	16.678
0.136	0.11	0.098	0.191	0.161	0.136	0.232	0.179	0.162	0.324	0.309	0.298	0.47	0.507	0.493	0.465	0.63	0.831	1.322	2.377	3.278	4.161	14.593	51.645

Fig. 2-8 Influence coefficient matrix

이렇게 구해진 영향계수행렬을 통해 Eq.(5)와 같이 응력과 압력에 대한 관계를 나타낼 수 있다.

$$\{\sigma\} = [C]\{p\} \quad (5)$$

이때,  $\{\sigma\}$ 는 특정 영역에 대한 응력 벡터,  $\{p\}$ 는 특정 영역에 대한 압력 벡터,  $[C]$ 는 영향계수행렬을 의미한다. 한편, Eq.(5)에서 영향계수행렬  $[C]$ 의 역행렬  $[C]^{-1}$ 을 이용하면 Eq.(6)와 같이 계측된 변형률로부터 변환된 응력을 통해 각각의 스트레인게이지에 작용된 압력을 추정할 수 있다. Fig. 2-9은 면적  $8m^2$ 에 대해 계산된 국부빙압력 데이터 중 일부를 시간에 따른 그래프로 나타낸 것이다.

$$\{p\} = [C]^{-1}\{\sigma\} \tag{6}$$

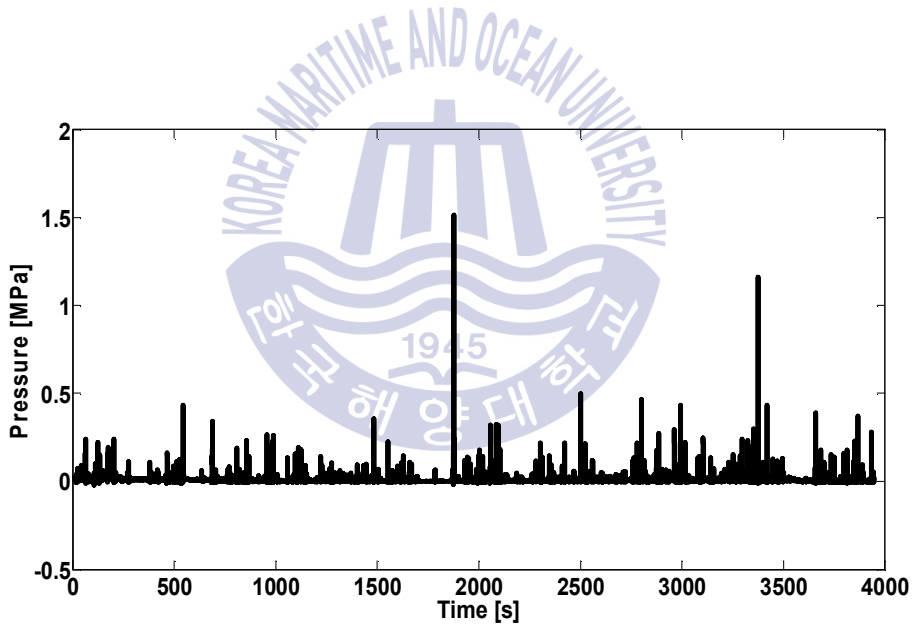


Fig. 2-9 Time history of local ice pressure (area =  $8m^2$ )



## 2.2. 선속 데이터와 해빙의 두께 데이터 분석

선속 데이터는 Fig. 2-10와 같이 GPS를 부착해 계측하였다. 측정된 데이터는 주기적으로 매우 큰 값을 갖거나 선속이 0이 되는 노이즈가 발생하였는데 이는 계측기기의 전력공급이 육지와는 상이하여 발생하는 전기적 노이즈로써 본 연구에서는 불필요한 노이즈를 제거하고, 제거된 부분은 노이즈 발생 전후 데이터를 이용해 보정하였다. Fig. 2-11은 계측된 선속 데이터 중 일부를 시간에 따라 그래프로 나타낸 것이다.



Fig. 2-10 GPS installed for measuring ship speed

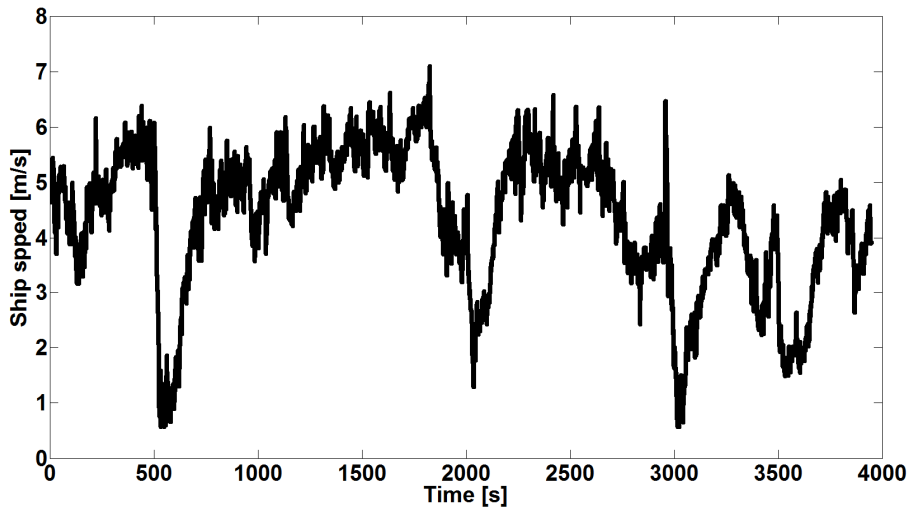


Fig. 2-11 Time history of ship speed

해빙의 두께 데이터는 우현 중앙부에 Fig. 2-12와 같이 설치된 카메라에서 촬영된 영상 데이터를 이용하여 추정하였다. 영상 데이터에는 Fig. 2-13와 같이 깨진 해빙이 회전하며 노출된 해빙의 단면이 촬영되어 있다. 이와 같이 기록된 영상을 통해 Fig. 2-14와 같이 카메라의 높이, 각도 등을 고려하여 길이를 추정하는 영상 분석 프로그램을 이용하여 해빙의 두께를 추정하였다(Park et al., 2014).

한편, 영상속의 해빙은 우현 중앙부에서 촬영되었고, 압력은 선수부에서 계측되었기 때문에 추정된 두께에 대응하는 압력을 찾기 위해서는 시간에 대한 동기화 과정이 필요하다. 선수부에서 깨진 각각의 얼음은 주변 얼음의 형태나 선속 등 여러 요인에 따라 중앙부까지 오는 시간이 모두 상이하므로 선수부와 브릿지에서 촬영된 영상들을 함께 비교하여 각각의 데이터에 대해 동기화 과정을 수행하였다. 이때, 브릿지에서 촬영된 영상을 제외한 모든 영상은 우현에서만 촬영되었으므로, 보다 정확한 결과를 위해 추정된 두께에 대응하는 압력은 우현에서 계측된 데이터만을 사용하였다.



Fig. 2-12 Camera installed middle in the ship on starboard side



Fig. 2-13 Exposed sectional image of sea ice

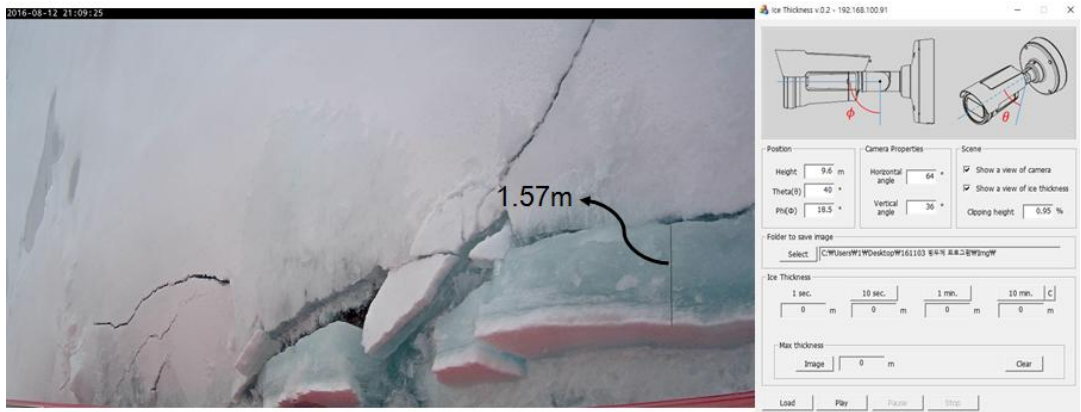


Fig. 2-14 Thickness estimation of sea ice using image analysis program



### 2.3. 이벤트 발생 데이터 추출

추정된 수많은 국부빙압력 데이터는 모든 데이터가 해빙과의 접촉으로 인해 발생한 것이 아니므로, 의미 있는 데이터를 사용하기 위해서는 해빙과의 접촉에 의해 발생한 데이터를 추출하는 과정이 필요하다. 이때, 이전 연구를 통해 정립된 바 있는 ‘이벤트’ 개념을 유용하게 사용할 수 있다(Min et al., 2016). Fig. 2-15은 국부 빙하중 데이터와 속도 데이터를 시간에 따라 그래프로 나타낸 것이다.

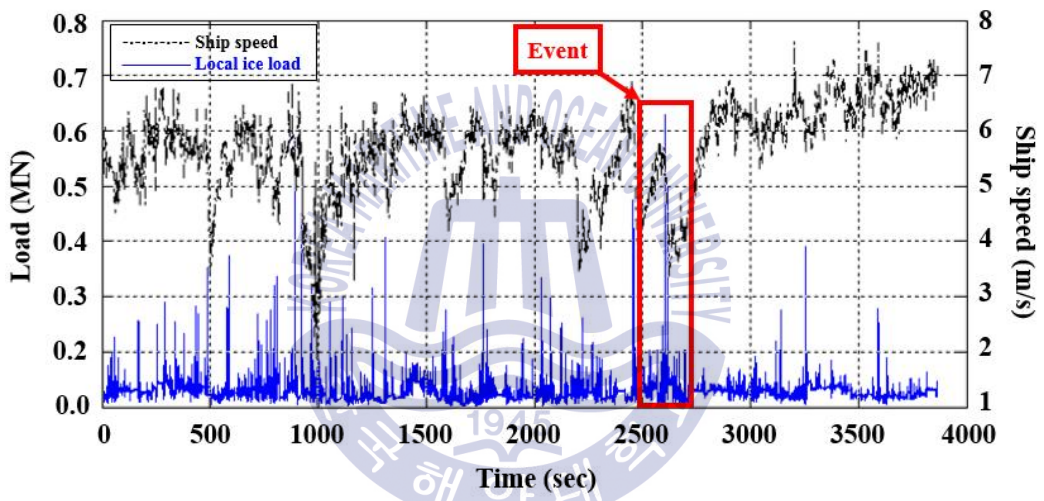


Fig. 2-15 Time history of local ice load and ship speed (Min et al., 2016)

Fig. 2-15을 살펴보면 선박의 속도가 가파르게 떨어지며 동시에 빙하중이 가파르게 상승하는 구간을 볼 수 있다. 이와 같은 현상은 선박이 해빙과 접촉하여 쇄빙하는 과정에서 생기는 현상이다. 본 연구에서는 이러한 현상을 보이는 구간 중 임의의 임계값을 기준으로 임계값 이상의 압력이 발생했을 때 해빙과의 충돌 이벤트가 발생한다고 정의하였으며, 이전 실선계측 자료를 토대로  $8m^2$  영역에 대한 국부빙압력  $0.05MPa$ , 빙하중  $0.4MN$ 을 임계값으로 설정하였다. 이렇게 추출된 이벤트의 총 개수는 1,712개이다.

### 제 3 장 확률론적 해석

2장에서와 같이 실선계측을 통해 계측된 빙압력 데이터를 이용하여 실제 구조물 설계에 활용할 수 있는 방법에 대해 기존의 연구자들은 다양한 방법을 제시한 바 있다. Choi and Jeong(2008)은 Fig. 3-1와 같이 쇄빙선 MV Arctic 호를 비롯한 다양한 선박에서 면적에 따라 계측된 빙압력 데이터의 상한선을 이용해 국부빙압력 추정식을 제안한 바 있으며, Jordaan et al.(1993) 및 Taylor et al.(2010)은 계측된 실선 데이터에 확률이론을 적용하여 확률에 따라 발생 가능한 최대 빙압력을 추정하여 구조물 설계에 활용하고자 하였다.

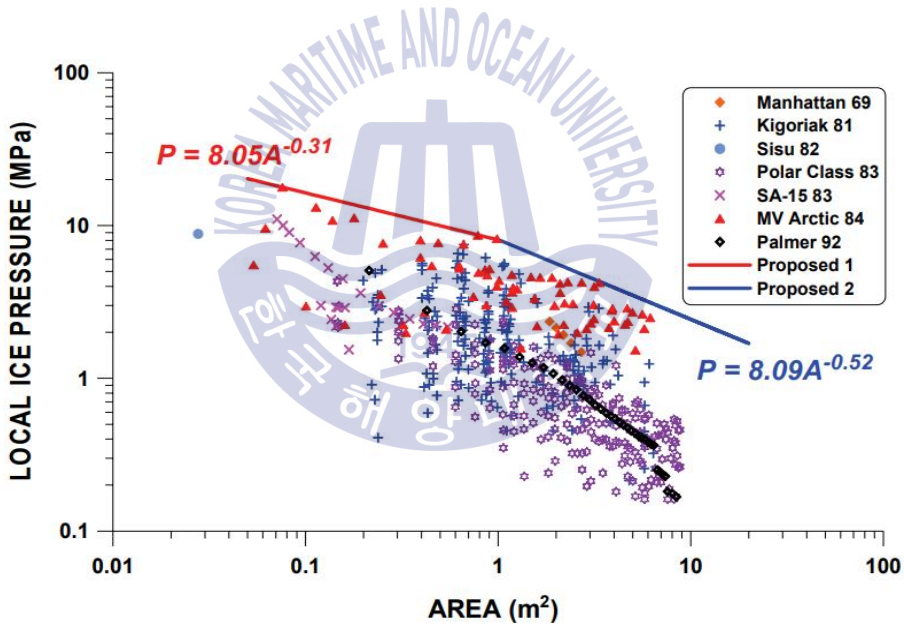


Fig. 3-1 Local ice pressure vs. contact area data and the proposed local ice load prediction  
(Choi and Jeong, 2008)

본 연구에서 사용된 ARAON호의 2016년 실선시험 중 계측된 데이터는 선박의 구조적 안정성이 확보된 정상운항 상태에서 계측되었으며, Fig. 3-2와 같이

두꺼운 얼음이 거의 없는 여름철에 계측되었다. 그러므로 계측된 빙압력은 극한 빙압력이 아니며, 다른 선박에서 계측된 빙압력에 비해 매우 낮은 빙압력이 계측되었다. 따라서 Choi and Jeong(2008)이 사용한 방법과 같이 최대 계측 데이터에 대한 상한선을 통해 추정식을 도출하는 것은 데이터의 확보 여부에 따라 매우 제한적이므로, 본 연구에서는 Jordaan et al.(1993)이 제안한 확률론적 방법을 적용하여 국부빙압력 추정식을 도출하고자 하였다.

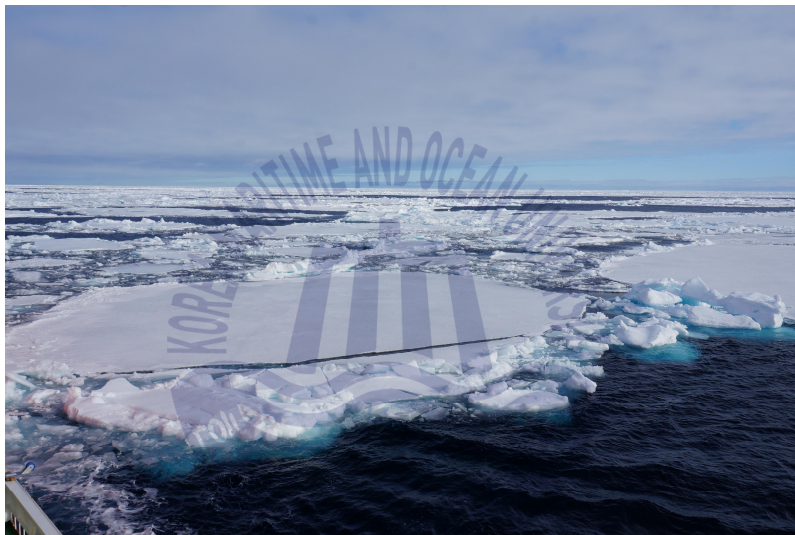


Fig. 3-2 Ice conditions during 2016 Arctic voyage

### 3.1. ARAON호 계측 데이터의 확률분포

각 영역에서 발생한 압력을 정의하기 위해 스트레인게이지 한 개에 해당하는 면적인  $0.4m^2$  부터 좌현, 우현에 따른 전체 면적에 까지 스트레인게이지 개수에 따라 면적을 조합하였다. 조합된 각각의 면적에 대해 가장 큰 압력부터 내림차순으로 정리하였으며, 각각의 압력에 대해 순위를 매겼다. 이렇게 정리된 데이터는 Eq.(7)의 Weibull plotting position을 이용하면 Fig. 3-3에 나타낸 것과 같이 발생 압력에 대한 초과확률의 그래프로 나타낼 수 있다.

$$-\ln\left(\frac{i}{n+1}\right) \tag{7}$$

여기서  $i$ 는 해당 압력의 순위를 의미하고,  $n$ 은 총 데이터 수를 의미한다.

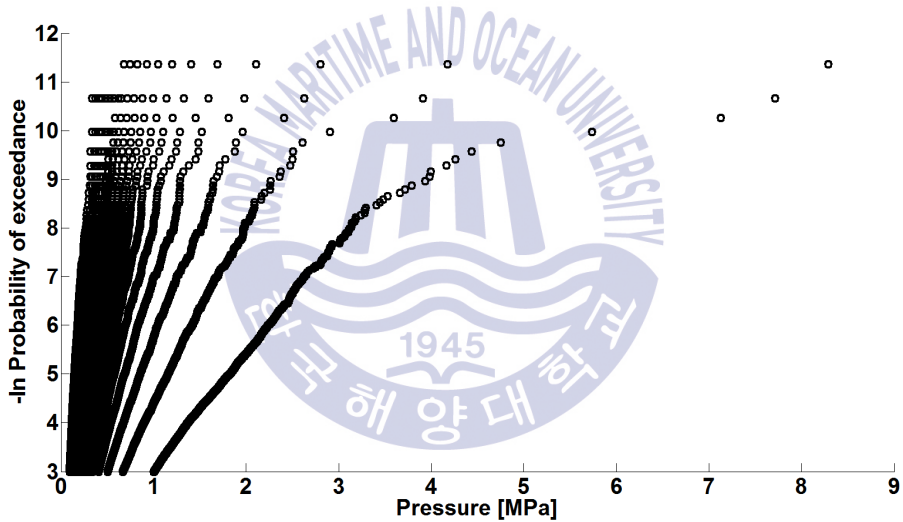


Fig. 3-3 Ranked pressure vs. probability of exceedance in log scale for different areas ( $0.4m^2$  to  $8m^2$ )

각 영역에서의 초과확률의 분포는 그 형태에 따라 특정 분포함수를 통해 나타낼 수 있다. 데이터 관측 기간이 주 또는 월단위의 매우 긴 기간일 경우 1종 극한분포인 Gumbel 분포함수가 데이터 분포에 가장 잘 맞는 결과를 보여주고, 데이터 관측 기간이 분 또는 시 단위의 짧은 기간일 경우 지수분포(exponential

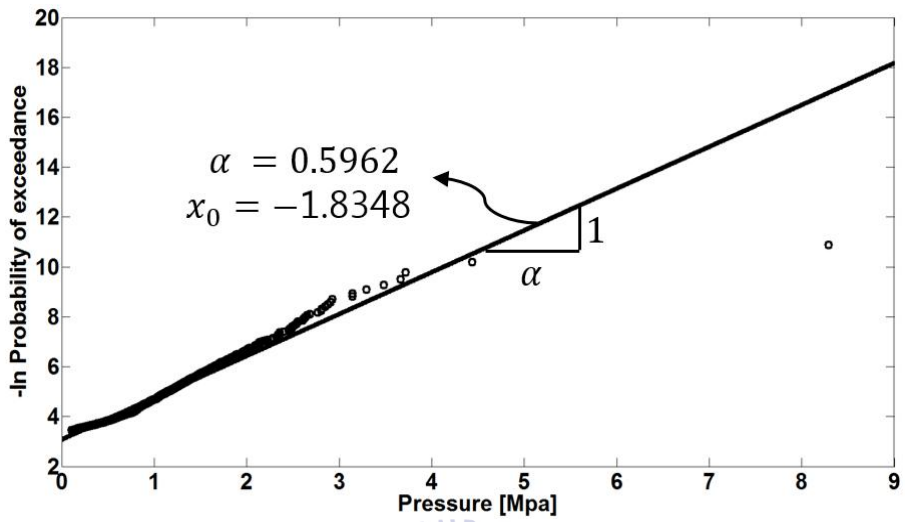


distribution)함수가 가장 잘 맞는 결과를 보여준다(Jordaan et al., 1993). 본 연구에서 사용된 데이터 세트는 분 또는 시 단위의 짧은 기간 동안 계측되었으므로, Eq.(8)와 같은 지수분포의 초과확률 함수를 사용하였다.

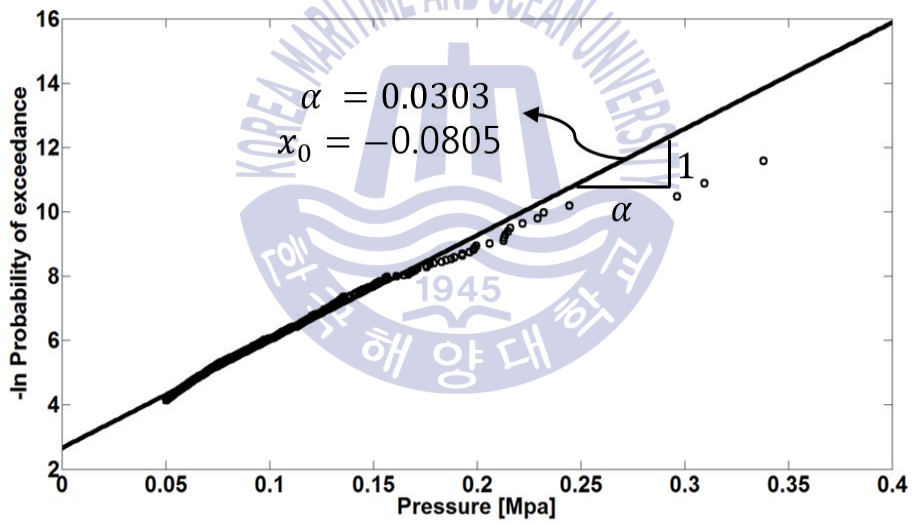
$$P_e = \exp\left(-\frac{x-x_0}{\alpha}\right) \quad (8)$$

여기서  $x$ 는 임의의 발생 압력을 의미하고,  $\alpha$ 와  $x_0$ 는 데이터 분포 형태에 따라 결정되는 임의의 상수를 의미한다.

각 영역에서의 데이터 분포형태는 Fig. 3-4와 같이 Eq.(8)을 이용해 직선식으로 나타낼 수 있다. 이때, 압력이 낮은 부분의 데이터는 무시하고, 압력이 높은 데이터의 분포 형태에 따라 직선 방정식을 세워야 한다. 한편, 2.3절에서 추출한 이벤트에 해당하는 압력 데이터는 선박이 해빙과 접촉하며 발생한 압력 중 높은 압력이 발생한 것들만 포함되어 있기 때문에 본 연구에서는 이벤트에 해당하는 데이터 분포 형태에 대한 선형회귀 분석을 통해 직선식을 도출하였다. 이렇게 결정된 직선의 기울기와 절편을 통해  $\alpha$ 와  $x_0$ 를 결정할 수 있으며 Table 3-1에 각 영역에서 결정된  $\alpha$ 와  $x_0$ 를 정리하였다.



(a)



(b)

Fig. 3-4 Fit to tail of distribution (a) area =  $0.4m^2$  (b) area =  $8m^2$

Table 3-1  $\alpha$  and  $x_0$  for different areas

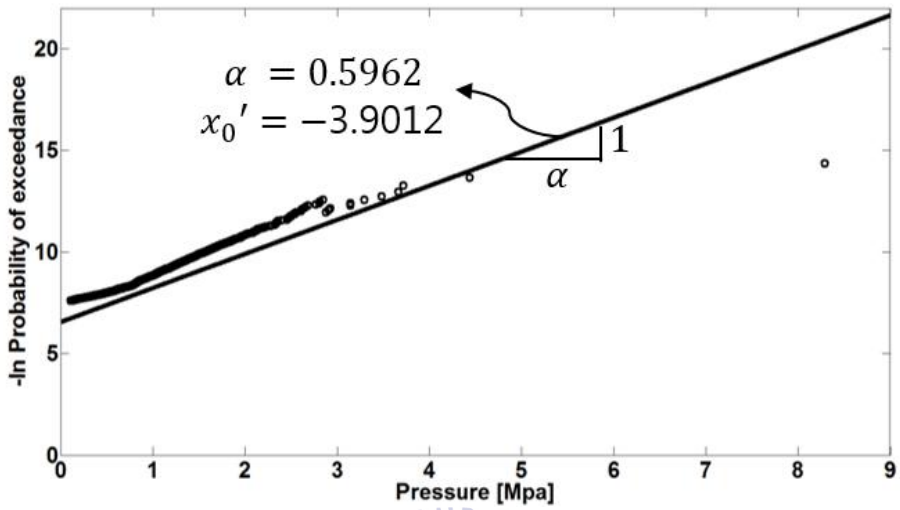
Area ( $m^2$ )	$\alpha$ (MPa)	$x_0$ (MPa)
0.4 $m^2$	0.5962	-1.8348
0.8 $m^2$	0.3609	-1.0278
1.2 $m^2$	0.2576	-0.6988
1.6 $m^2$	0.1977	-0.5143
2.0 $m^2$	0.1589	-0.3978
2.4 $m^2$	0.1322	-0.3198
2.8 $m^2$	0.1131	-0.2657
3.2 $m^2$	0.0985	-0.2257
3.6 $m^2$	0.0872	-0.1955
4.0 $m^2$	0.0781	-0.1722
4.4 $m^2$	0.0707	-0.1536
4.8 $m^2$	0.0644	-0.1830
5.2 $m^2$	0.0590	-0.1663
5.6 $m^2$	0.0543	-0.1518
6.0 $m^2$	0.0500	-0.1388
6.4 $m^2$	0.0461	-0.1269
6.8 $m^2$	0.0423	-0.1156
7.2 $m^2$	0.0387	-0.1048
7.6 $m^2$	0.0349	-0.0936
8.0 $m^2$	0.0303	-0.0805

계측된 빙압력 데이터는 한 위치에 있는 스트레인게이지를 기준으로 계측된 데이터이다. 하지만 해당 압력은 다른 위치 어느 곳에서나 발생할 수 있으며, 이는 Eq.(7)을 Eq.(9)와 같이 수정함으로써 고려할 수 있다.

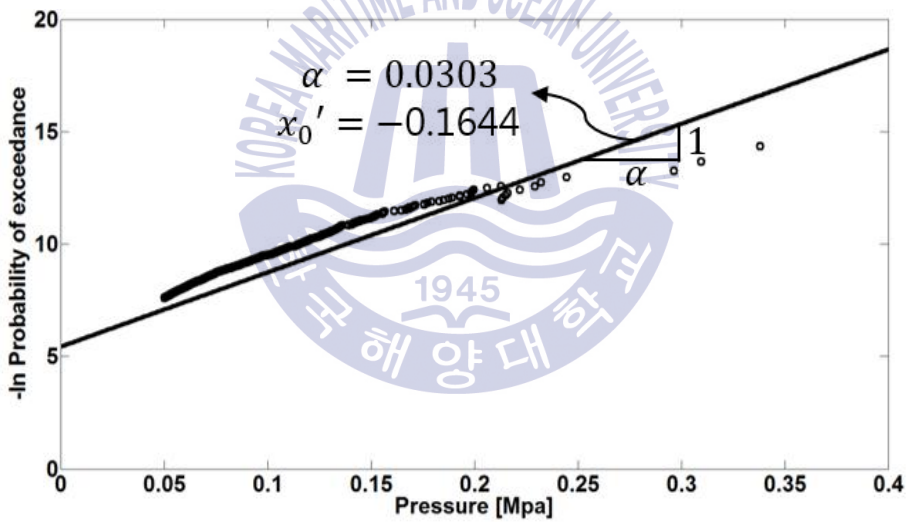
$$-\log\left(\frac{i}{m n + 1}\right) \quad (9)$$

여기서  $m$ 은 합성된 면적에 대응하는 단위 면적의 개수를 의미한다.

Fig. 3-5은 Eq.(9)을 통해 재배치된 데이터 분포에 따른 직선식을 도출한 것이다. 이때, 데이터 분포가 위로 올라가며, 도출된 직선 방정식의 절편이 변화하게 된다. 따라서 직선식의 절편으로 결정되는  $x_0$ 는  $x_0'$ 와 같이 수정되며 Table 3-2에 수정된  $x_0'$ 의 값을 정리하였다.



(a)



(b)

Fig. 3-5 Fit to tail of modified distribution (a) area = 0.4m<sup>2</sup> (b) = area = 8m<sup>2</sup>

Table 3-2 Modified  $x_0'$  for different areas

Area [ $m^2$ ]	$x_0'$ [MPa]
0.4 $m^2$	-3.9012
0.8 $m^2$	-2.2785
1.2 $m^2$	-1.5917
1.6 $m^2$	-1.1995
2.0 $m^2$	-0.9481
2.4 $m^2$	-0.7780
2.8 $m^2$	-0.6576
3.2 $m^2$	-0.5672
3.6 $m^2$	-0.4978
4.0 $m^2$	-0.4430
4.4 $m^2$	-0.3986
4.8 $m^2$	-0.3617
5.2 $m^2$	-0.3300
5.6 $m^2$	-0.3023
6.0 $m^2$	-0.2776
6.4 $m^2$	-0.2547
6.8 $m^2$	-0.2330
7.2 $m^2$	-0.2122
7.6 $m^2$	-0.1904
8.0 $m^2$	-0.1644

Fig. 3-6은 영역에 따른  $x_0$ 와  $x_0'$ 를 그래프로 나타낸 것이다. 그래프를 살펴보면  $x_0$ 가  $x_0'$ 로 수정됨에 따라 값이 모두 낮아지는 것을 볼 수 있다. 한편, 보수적인 빙압력 추정을 위해서  $x_0'$ 가 음수 또는 0에 가까울 경우  $x_0'$ 의 영향은 무시할 수 있다(Taylor et al., 2010). 본 연구에서는 모든  $x_0'$ 의 값이 음수 값을 가지고 있으므로, 이에 대한 영향은 무시하였다.

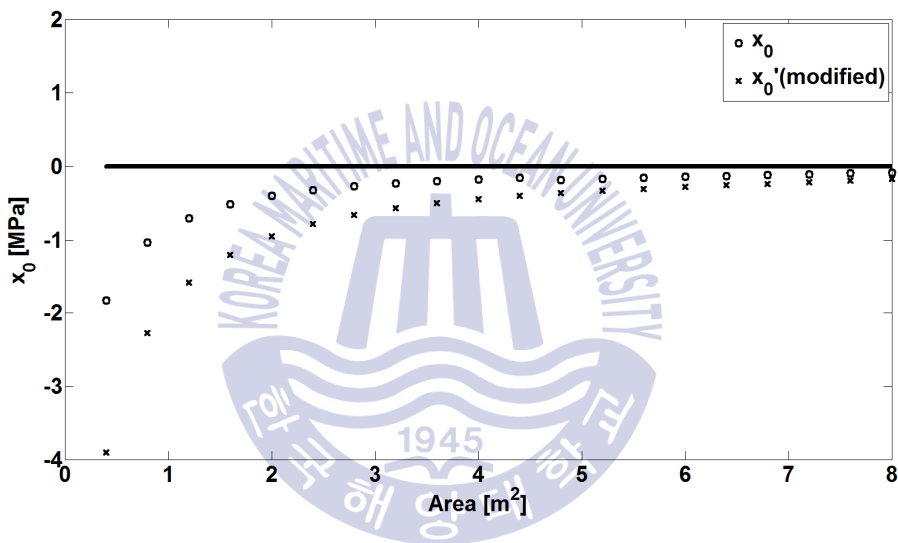


Fig. 3-6  $x_0$  and  $x_0'$  for different areas

각 영역에서 결정된  $\alpha$ 를 Fig 3-7와 같이 로그-로그 그래프로 나타내면  $\ln(\alpha)$ 의 분포 형태에 따른 선형회귀 분석을 통해 직선 방정식을 도출할 수 있다. 이때, 직선의 기울기와 절편을 통해  $\alpha$ 는 Eq.(10)와 같이 영역  $A$ 에 대한 지수함수 형태로 나타낼 수 있으며 이를 Fig. 3-8에 나타내었다.

$$\alpha = 0.29 A^{-0.99} \text{ [MPa]} \quad (10)$$

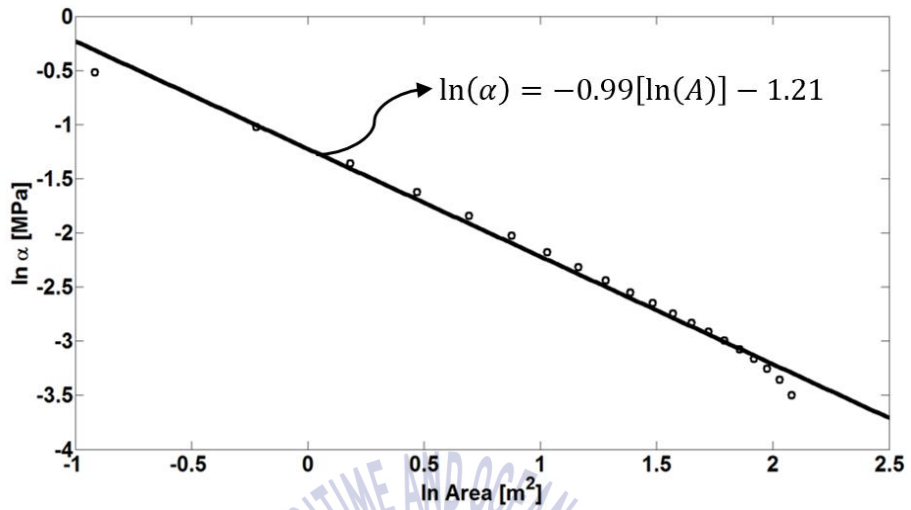


Fig. 3-7 ln(Area) vs. ln( $\alpha$ )

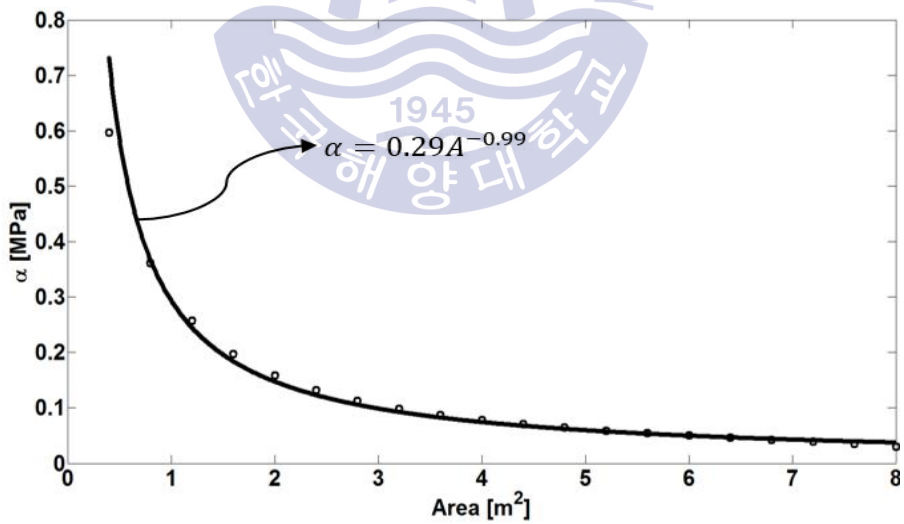


Fig. 3-8 Area vs.  $\alpha$



### 3.2. 압력-면적 관계식의 도출

각각의 데이터는 서로 연관성이 없는 독립성(independence)를 가지고, 매우 짧은 시간에서 동시에 여러 개의 충돌이 발생할 확률은 무시할 수 있을 만큼 작다. 따라서 Eq.(11)와 같이 단위 시간당 발생한 최대 압력을  $P$ 라 하면  $P$ 가 발생할 확률은 Eq.(12)와 같이 초과확률 함수  $F_P(p)$ 에 대한 포아송 과정(Poisson process)으로 나타낼 수 있다.

$$P = \max(X_1, X_2, \dots, X_n) \quad (11)$$

$$F_P(p) = \exp\left[-\exp\left(-\frac{p-x_0'}{\alpha}\right)\mu\right] \quad (12)$$

여기서  $\mu$ 는 Eq.(13)와 같이 단위 기간 동안 발생하는 총 이벤트 수  $\nu_e$ 와 전체 발생 이벤트 중 대상 면적에서 발생하는 이벤트의 비율  $r$ 의 곱으로 나타낼 수 있다. 이때,  $r$ 은 보수적인 결과를 위해 1을 사용하는 것이 권장된다(Taylor et al., 2010).

$$\mu = r \cdot \nu_e \quad (13)$$

Eq.(12)는  $x_1 = \alpha \cdot \ln \mu$ 라 하면 Eq.(14)와 같이 정리할 수 있으며, 이를 다시 발생 가능한 최대 압력  $p$ 에 대해 Eq.(15)와 같이 정리할 수 있다.

$$F_p(p) = \exp[-\exp(-(\frac{p-x_0'-x_1}{\alpha}))] \quad (14)$$

$$p = x_0' + \alpha[-\ln(-\ln(F_p(p))) + \ln\mu] \text{ [MPa]} \quad (15)$$

$x_0'$ 는 위에서 언급한 바와 같이 모든 영역에서 음수 값을 가지므로 무시하고, Eq.(10)에서 도출한  $\alpha$ 의 관계식을 Eq.(15)에 대입하면 Eq.(16)와 같이 발생 가능한 최대 빙압력에 대해 압력과 면적의 관계식 형태로 나타낼 수 있다.

$$p = 0.29 A^{-0.99} [-\ln(-\ln(F_p(p))) + \ln\mu] \text{ [MPa]} \quad (16)$$

ARAON호의 2016년 실선시험의 총 계측시간은 약 310시간이다. 이때, 발생한 이벤트는 총 1,712개 이므로 이벤트는 평균적으로 시간당 5.5개가 발생한다. 이때, ARAON호가 1년 동안 약 1,000시간을 운항한다고 가정하면 1년 동안 평균적으로 발생 가능한 이벤트의 개수는 5,523개이다. 따라서 Eq.(13)은 보수적인 결과를 위해  $r=1$ 이라고 하면 5,523으로 계산할 수 있으며, 이때 확률에 따라 발생 가능한 최대 빙압력은 Eq.(17)와 같이 나타낼 수 있다.

$$p = 0.29 A^{-0.99} [-\ln(-\ln(F_p(p))) + 8.62] \text{ [MPa]} \quad (17)$$

Fig. 3-9은 면적이  $0.4m^2$ 일 때, 확률에 따른 발생 가능한 최대 빙압력을 계산

한 결과를 그래프로 나타낸 것이다.

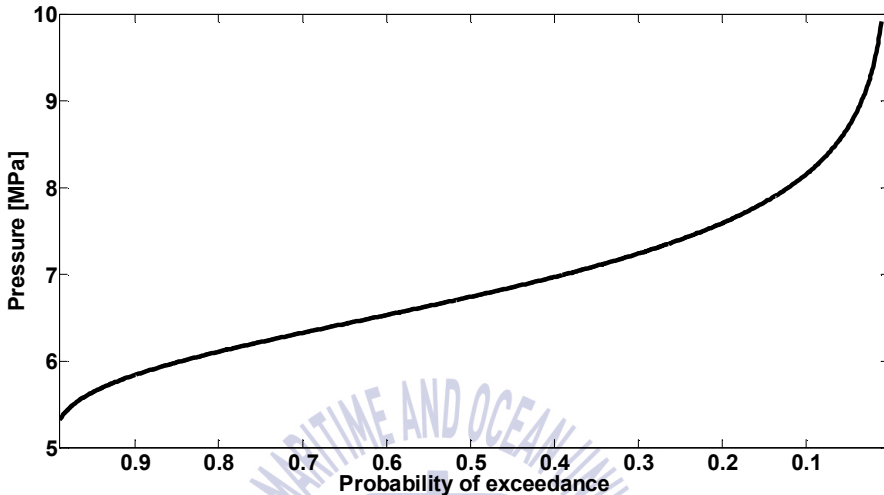


Fig. 3-9 Probability of exceedance vs. pressure (area =  $0.4m^2$ )

Fig. 3-9의 결과를 살펴보면 면적  $0.4m^2$ 에 대해 5%의 초과확률에 대해 최대 8.33MPa, 1%의 초과확률에 대해 최대 9.91MPa의 압력이 발생할 수 있음을 볼 수 있다. 한편, 설계 압력에 대해서 1%의 초과확률에 해당하는 압력은 선박의 치명적인 구조손상을 입히지는 않지만 움푹 파이는 정도의 손상을 입힐 수 있을 정도의 압력이므로 설계 시 1%의 초과확률에 해당하는 압력을 선택하는 것이 합리적이다(Frederking, 2003). 따라서 ARAON호의 실선시험을 토대로 도출한 설계 국부빙압력 추정식은 Eq.(18)와 같이 정리할 수 있다.

$$p_{0.01} = 3.93 A^{-0.99} \text{ [MPa]} \quad (18)$$

Fig. 3-10은 Eq.(18)의 계산 결과와 모든 빙압력 계측 데이터를 함께 그래프로 나타낸 것이며, Eq.(18)이 ARAON호에서 계측된 빙압력 데이터를 모두 포함하고 있는 것을 볼 수 있다.

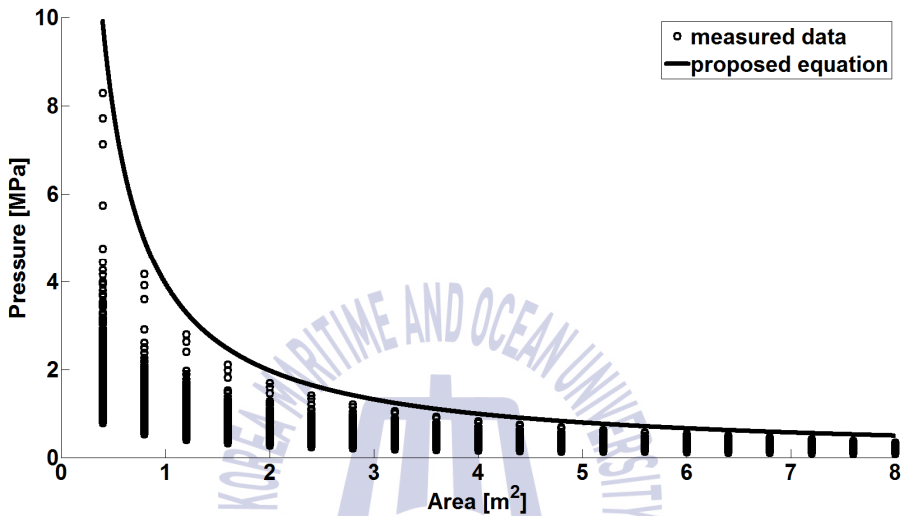


Fig. 3-10 Proposed equation and all measured data for different areas

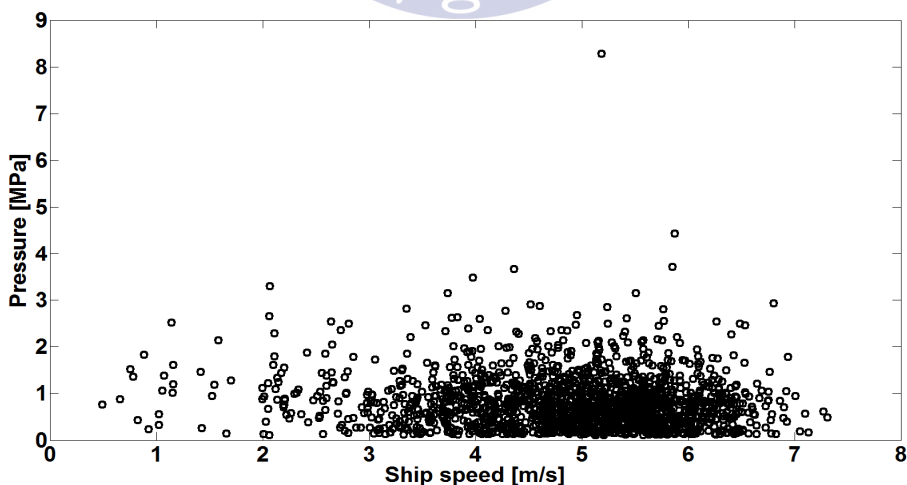
Eq.(18)은 ARAON호에서 계측된 데이터만을 이용하여 도출되었다. 따라서 ARAON호가 아닌 다른 선박에 대하여 Eq.(18)을 사용하기 위해서는 다양한 선박에서 계측된 데이터를 추가적으로 분석하여 Eq.(18)을 보완해야 할 필요가 있다.

## 제 4 장 압력-면적 관계식의 보완

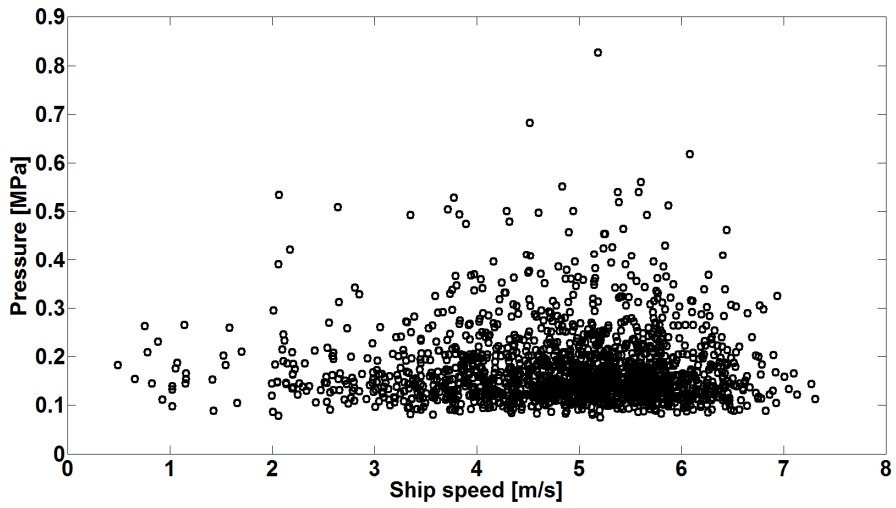
3장에서 도출한 ARAON호의 설계 국부빙압력 추정식 Eq.(18)은 면적만을 고려하고 있다. 하지만 실제 빙압력은 선박의 속도나 해빙의 재료특성 등 여러 요인에 의해 달라지므로 보다 현실적인 추정식의 결과를 위해서는 보완이 필요하며, 본 연구에서는 선박의 속도와 해빙의 두께를 추가적으로 고려해 제안된 추정식을 수정하였다.

### 4.1. 선박의 속도

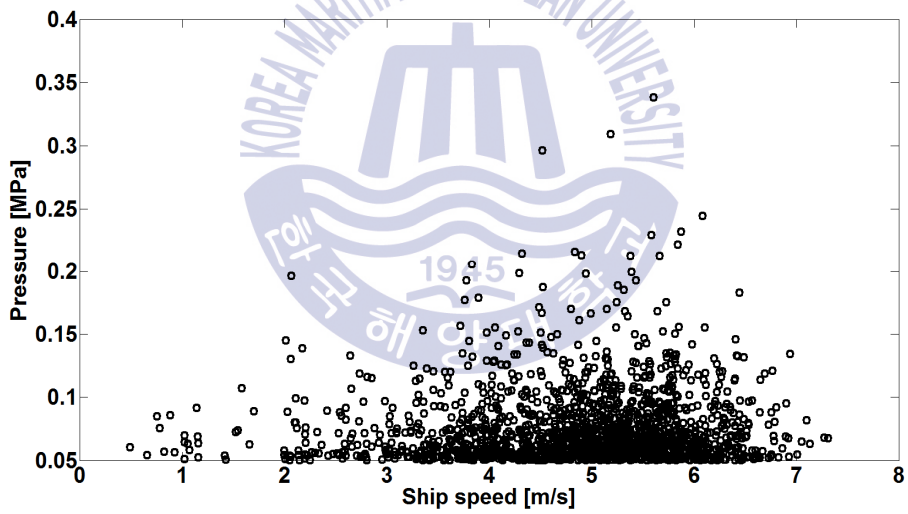
선박의 속도와 빙압력의 관계를 알아보기 위해 Fig. 4-1와 같이 면적에 따라 계측된 빙압력 데이터를 선박의 속도에 대해 그래프로 나타내었다. Fig. 4-1를 살펴보면 각 면적에서 계측된 빙압력 데이터는 모든 속도 구간에 걸쳐 분포되어 있다. 이때, 일정 속도 구간에서 속도가 증가함에 따라 빙압력 또한 증가하는 경향을 볼 수 있으나 속도가 빠른 구간의 경우에는 계측된 빙압력이 그리 크지 않다. ARAON호가 2016년 실선시험 중 정상운항 상태였음을 고려한다면, 높은 속도에서 해빙과 상호작용 시 더 높은 빙압력이 발생할 것임을 예상할 수 있다.



(a)



(b)



(c)

Fig. 4-1 Ship speed vs. Pressure for different areas

(a) area =  $0.4m^2$  (b) area =  $4m^2$  (c) area =  $8.0m^2$

본 연구에서는 선박의 속도 변화를 고려해 기존의 설계 국부빙압력 추정식을 보완하기 위해 Eq.(19)와 같이 Froude수를 이용하는 방법을 사용하였다.

$$Fr = \frac{V}{\sqrt{g \times L}} \quad (19)$$

$V$ 는 선박의 속도,  $g$ 는 중력가속도,  $L$ 은 선박의 특성길이를 의미하며 ARAON 호의 특성길이는 110m이다. 한편, Fig. 4-4에서 볼 수 있듯이 속도에 따른 빙압력의 변화는 각 면적에 따라 다르므로, 본 연구에서는 압력과 면적의 관계식인 Eq.(18)의  $p_{0.01}$ 을 각 면적에서 측정된 압력에 대해 나누어 무차원화 시키는 방법을 사용하였다. Fig. 4-2은 각각 무차원화된 속도와 압력에 대한 측정 빙압력 데이터를 로그-로그 그래프로 나타낸 것이다. 이때 각 속도에서 최대로 발생한 빙압력 데이터의 분포에 대하여 Eq.(20)와 같은 직선식을 도출할 수 있다.

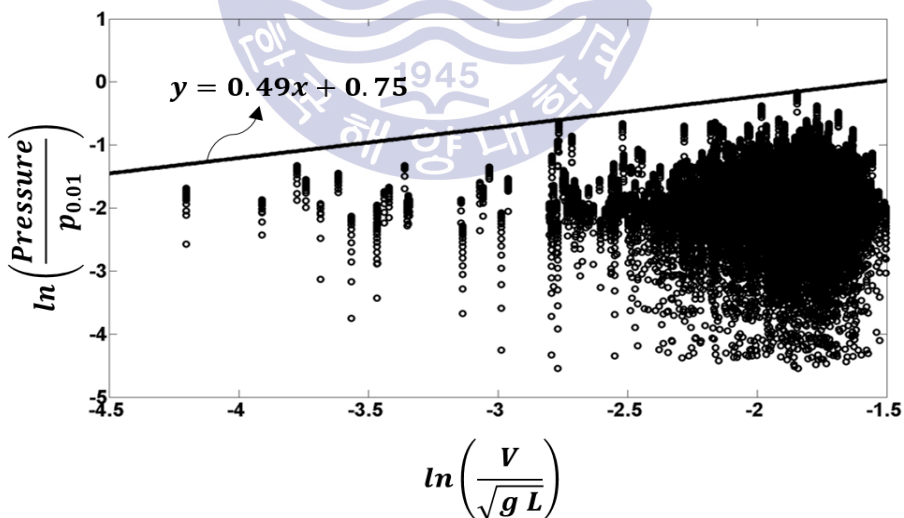


Fig. 4-2  $\ln(Fr)$  vs.  $\ln\left(\frac{Pressure}{p_{0.01}}\right)$

$$\ln\left(\frac{\text{Pressure}}{p_{0.01}}\right) = \ln\left(0.49 \frac{V}{\sqrt{gL}} + 0.75\right) \quad (20)$$

Eq.(20)와 같이 세워진 직선식의 기울기와 절편을 통해 기존의 국부빙압력 추정식  $p_{0.01}$ 에 속도 항을 추가하여 Eq.(21)와 같이  $p'_{0.01}$ 로 수정할 수 있다.

$$p'_{0.01} = 8.43 A^{-0.99} \left(\frac{V}{\sqrt{gL}}\right)^{0.49} \text{ [MPa]} \quad (21)$$

Fig. 4-3은 선박의 속도에 따라 측정된 빙압력 데이터와, 기존의 추정식 및 수정된 추정식의 결과를 로그-로그 그래프로 나타내 비교한 것이다. 이를 살펴보면 기존의 추정식은 선박의 속도에 무관한 반면에 수정된 추정식은 선박의 속도변화를 잘 반영하는 것을 볼 수 있다.



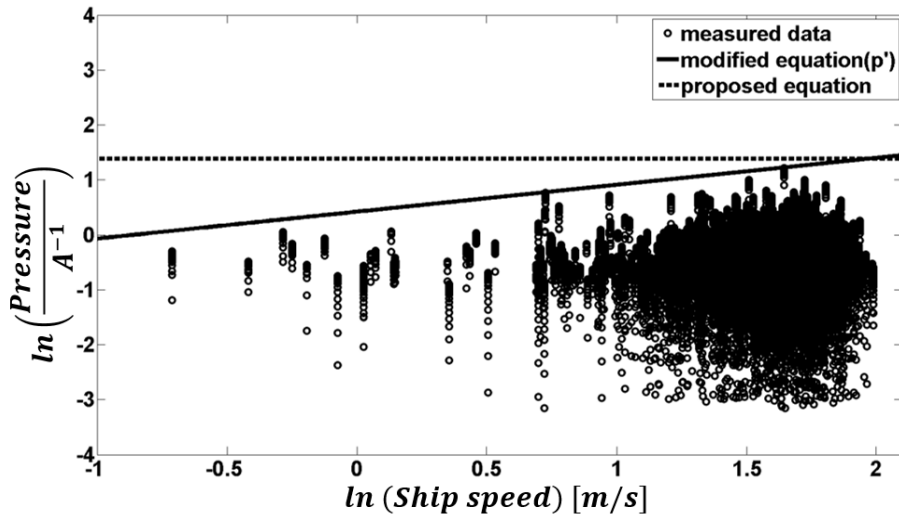
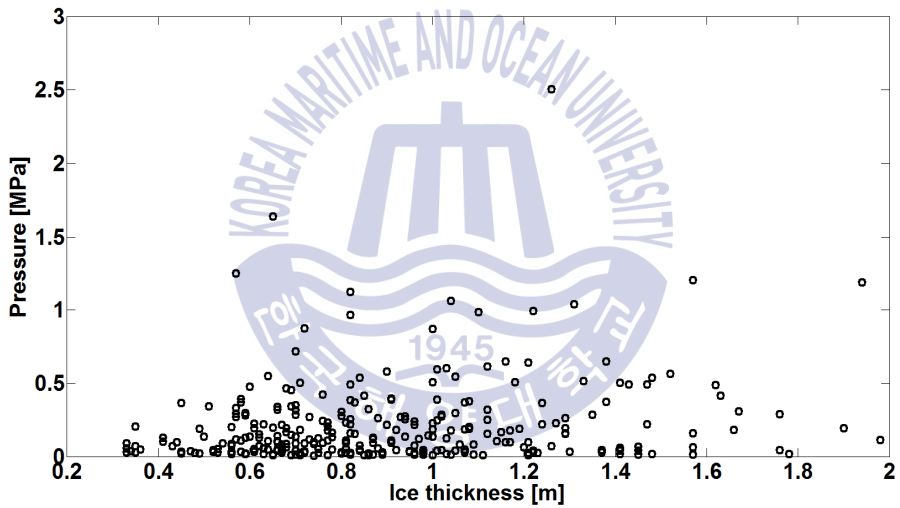


Fig. 4-3 Ship speed vs. pressure and the modified local design ice load

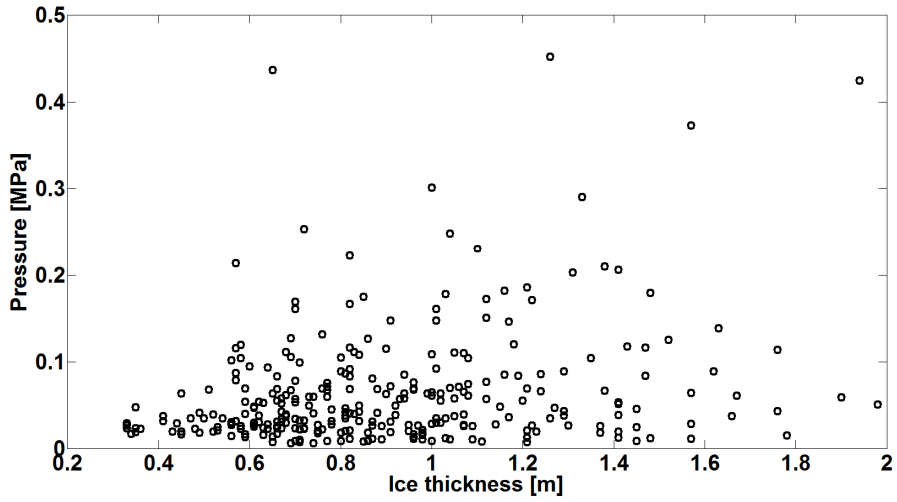
Eq.(21)은 빙압력이  $V^{0.49}$ 에 비례함에 따라 선박의 속도가 증가할수록 빙압력이 커지게 된다. 하지만 해빙은 일반적인 재료와는 다른 재료특성으로 인해 어느 이상의 하중이 가해지면 파괴가 일어나게 된다. 따라서 빙압력은 무한히 커질 수 없다. 또한 속도가 매우 작아지는 경우에도 Eq.(23)은 0에 가까운 빙압력을 계산하지만 저속에서 구조물과 접촉하는 해빙은 파괴역학적 거동이 아닌 크리프와 같은 연속체적 거동을 보이며 빙하중을 발생시킨다. 따라서 Eq.(23)은 일반적인 속도 구간에서 사용되어야 하며, 본 연구에서는 이벤트로 분류된 데이터의 최소 속도  $0.5m/s$ 와, 최대 속도  $7.3m/s$ 의 범위 내에서 Eq.(23)을 사용할 것을 제안한다.

## 4.2. 해빙의 두께

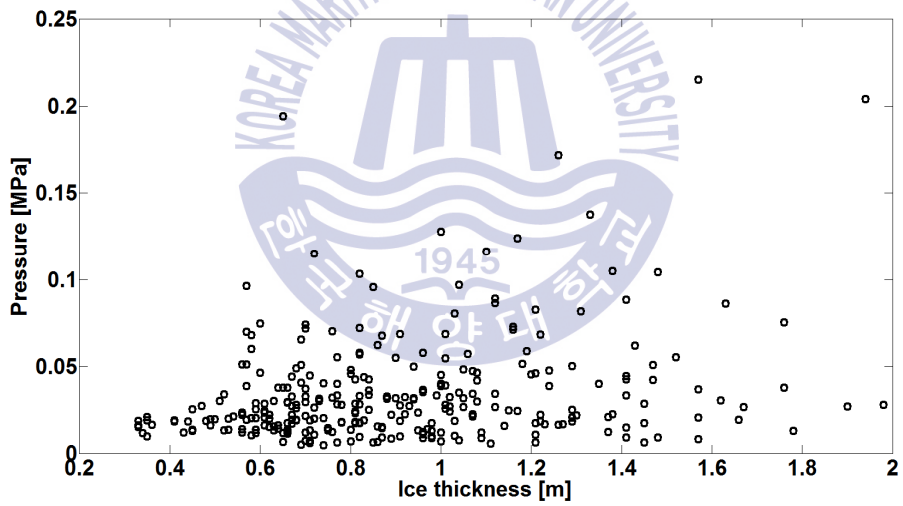
해빙의 두께와 빙압력의 관계를 알아보기 위해서 앞서 선속의 영향을 고려하는 방법과 유사하게 Fig.4-4와 같이 각 영역에서 해빙의 두께에 따른 빙압력 데이터를 그래프로 나타내었다. Fig. 4-4을 살펴보면 큰 면적으로 갈수록 해빙의 두께가 증가함에 따라 빙압력 또한 증가하는 경향을 볼 수 있지만 그 정도는 선속 영향에 비해 심하지 않으며, 모든 두께 구간에 걸쳐 계측된 빙압력 데이터가 분포되어 있는 것을 볼 수 있다.



(a)



(b)



(c)

Fig. 4-4 Ice thickness vs. Pressure for different areas

(a) area =  $0.4m^2$  (b) area =  $2.4m^2$  (c) area =  $4.8m^2$

Fig.4-4에 나타난 각각의 빙압력 데이터는 모두 선박의 속도가 다르므로 선박의 속도를 반드시 고려해 주어야 한다. 또한, 두께에 따른 빙압력의 변화는 각 면적에 따라 다르므로 본 연구에서는 해빙의 두께에 대응하는 빙압력을 Eq.(21)의 수정된  $p'_{0.01}$ 로 나누어 무차원화 시키는 방법을 사용하였다. 또한 Eq.(22)와 같이 계측된 해빙의 두께  $h$ 와 1m의 기준 두께  $h_{ref}$ 에 대한 비로 해빙의 두께를 무차원화 시키는 방법을 사용하였다.

$$\frac{h}{h_{ref}} \quad (h_{ref} = 1m) \quad (22)$$

Fig. 4-5은 각각 무차원화된 해빙의 두께와 압력에 대한 계측 데이터를 로그-로그 그래프로 나타낸 것이며, 이때 각 두께에서 최대 발생한 빙압력 분포 형태에 대한 선형회귀 분석을 통해 Eq.(23)와 같은 직선식을 도출하였다.

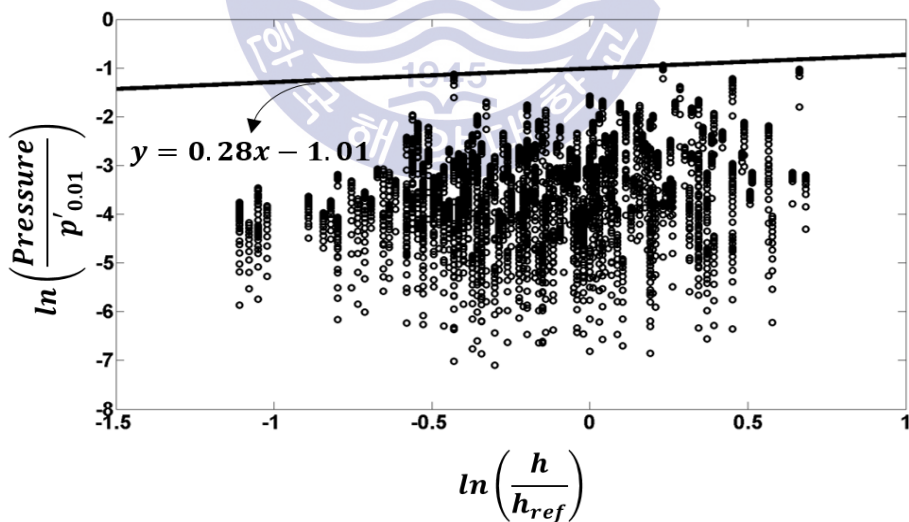


Fig. 4-5  $\ln\left(\frac{h}{h_{ref}}\right)$  vs.  $\ln\left(\frac{pressure}{p'_{0.01}}\right)$

$$\ln\left(\frac{\text{Pressure}}{p'_{0.01}}\right) = \ln\left(0.28 \frac{h}{h_{ref}} - 1.01\right) \quad (23)$$

해빙의 두께는 전체 빙압력 데이터 중 일부에 대해서만 계측되었다. 따라서 본 연구에서는 전체 데이터에서 가장 크게 발생한 압력이 최대 계측 두께인 1.98m에서 발생했다고 가정하였으며, 이에 따라 Eq.(23)을 Eq.(24)와 같이 수정하였다.

$$\ln\left(\frac{\text{Pressure}}{p'_{0.01}}\right) = \ln\left(0.28 \frac{h}{h_{ref}} - 0.19\right) \quad (24)$$

Eq.(24)와 같이 세워진 직선식의 기울기와 절편을 통해 Eq.(21)의  $p'_{0.01}$ 은 해빙의 두께 항을 추가하여 Eq.(25)와 같은 형태의  $p''_{0.01}$ 로 수정할 수 있다.

$$p''_{0.01} = 6.96 A^{-0.99} \left(\frac{V}{\sqrt{gL}}\right)^{0.49} \left(\frac{h}{h_{ref}}\right)^{0.28} \text{ [MPa]} \quad (24)$$

Fig. 4-6은 해빙의 두께에 따라 계측된 빙압력 데이터와, 수정된 추정식의 계산 결과를 그래프로 나타낸 것이다. 이를 살펴보면 수정된  $p''_{0.01}$ 의 결과는 해빙의 두께에 따른 빙압력의 변화를 잘 반영하는 것을 볼 수 있다.

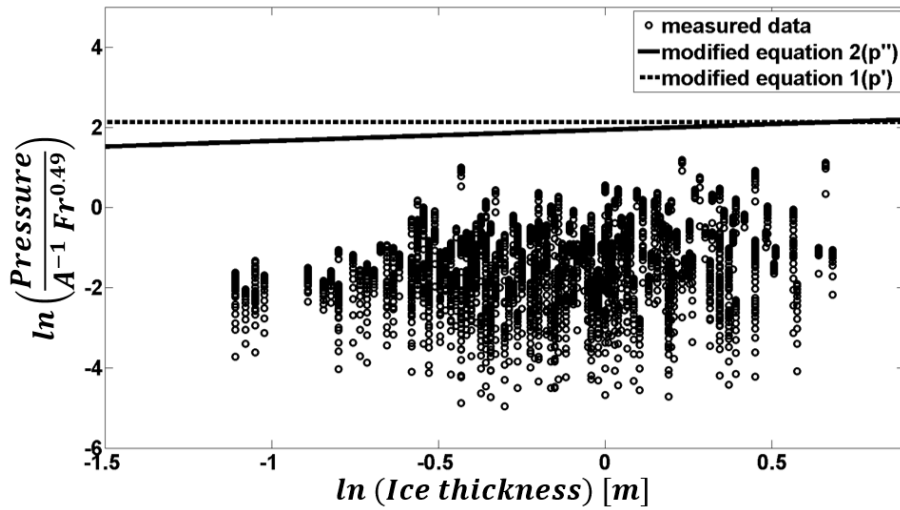


Fig. 4-6 Ice thickness vs. pressure and the modified local design ice load

Eq.(24)은 빙압력이  $h^{0.28}$ 에 비례함에 따라 해빙의 두께가 증가할수록 빙압력 또한 커지게 된다. 하지만 4.1절에서 언급한 바와 같이 다른 재료와는 상이한 해빙의 파괴역학적 특성으로 인해 이는 현실적이지 못하다. 따라서 본 연구에서 제안한 Eq.(24)은 일반적인 해빙의 두께 구간에서 사용되어야 하며, 본 연구에서는 계측된 해빙의 두께 데이터의 최대 두께  $1.98m$  보다 작은 구간에서 Eq.(24)을 사용할 것을 제안한다.

## 제 5 장 고 찰

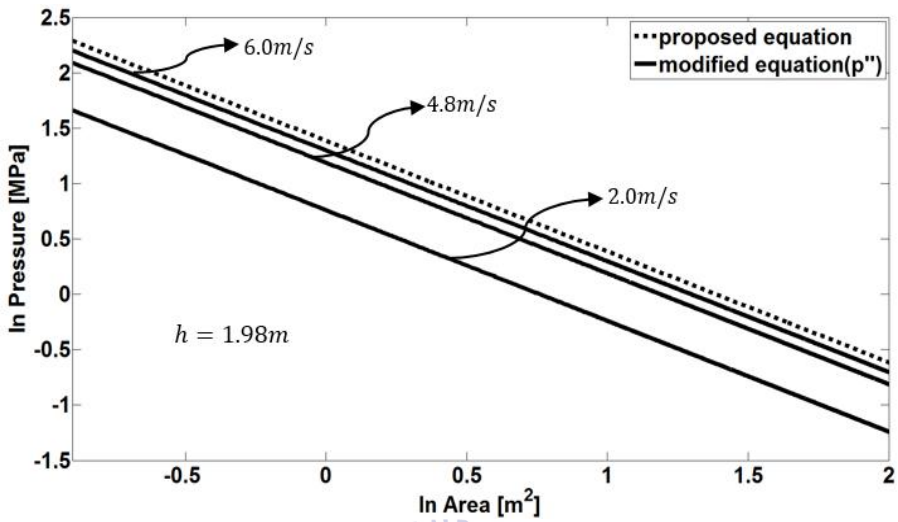
본 연구에서는 통합계측 시스템을 통한 각기 다른 데이터의 계측시간 동기화, 카메라 영상 분석을 통한 해빙의 두께 추정 등 다른 해에 실시한 실선시험에 비해 더 많은 데이터를 활용할 수 있는 2016년 실선계측 데이터를 토대로 설계 국부빙압력 추정식을 다음과 같이 제안하였다.

$$p_{0.01} = 3.93 A^{-0.99} \text{ [MPa]} \quad (18)$$

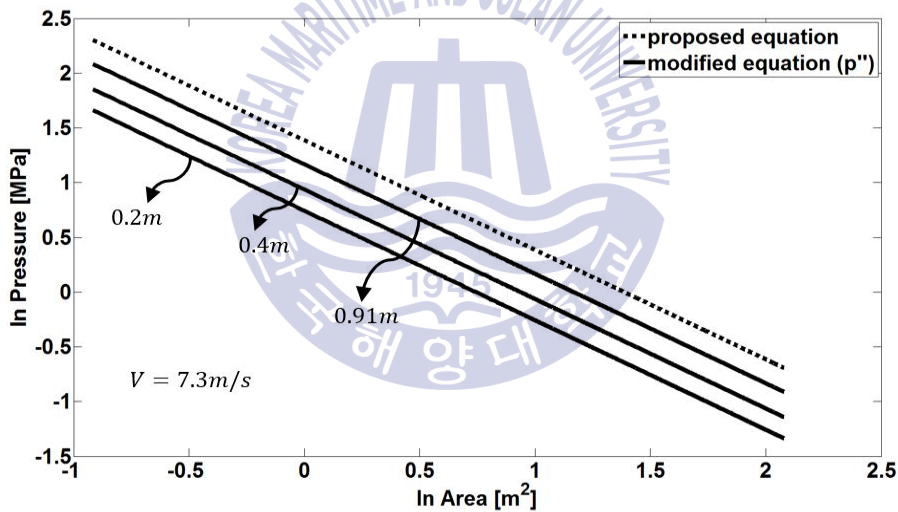
제안된 위의 식은 면적만을 고려하고 있는데, 실제 빙압력은 선박의 속도나 해빙의 재료특성 등 여러 요인에 의해 달라지므로 보다 현실적인 계산 결과를 위해 본 연구에서는 선박의 속도와, 해빙의 두께를 추가적으로 고려하여 제안된 추정식을 다음과 같이 보완하였다.

$$p''_{0.01} = 6.96 A^{-0.99} \left(\frac{V}{\sqrt{gL}}\right)^{0.49} \left(\frac{h}{h_{ref}}\right)^{0.28} \text{ [MPa]} \quad (24)$$

Fig. 5-1은 각각의 선박의 속도와 해빙의 두께에서의 기존 추정식의 계산 결과와 보완된 추정식의 계산 결과를 로그-로그 그래프로 나타내 비교한 것이다.



(a)



(b)

Fig. 5-1 Comparison of each equations  
 (a) different ship speed (b) different ice thickness

Fig. 5-1을 살펴보면 보완된 추정식은 기존의 추정식과는 달리 선박의 속도와 해빙의 두께 변화를 반영하는 것을 볼 수 있다.



본 연구에서 제안된 국부빙압력 추정식은 ARAON호의 실선계측 데이터를 분석하여 얻어진 것으로서 선박의 속도와 해빙의 두께정보를 고려함으로써 보다 현실적인 결과를 기대할 수 있다. 본 연구결과의 신뢰성을 높이기 위해서는 향후 보다 많은 실선계측 데이터 확보를 통해 결과를 검증할 필요가 있다.



## 제 6 장 결 론

2009년에 건조된 국내 최초의 쇄빙 연구선 ARAON호는 2010년부터 최근까지 수차례의 실선시험을 통해 변형률을 비롯한 여러 가지 데이터를 계측하였다. 이때 계측된 원본 데이터는 이전의 연구를 통해 하중 또는 압력과 같은 의미 있는 데이터로 변환되었지만, 처리방법의 미흡으로 실제 구조설계에 활용할 수는 없었다.

본 연구에서는 ARAON호의 실선계측 데이터를 실제 구조설계에 활용할 수 있는 방안을 모색하기 위해 계측된 빙압력을 Jordaan et al.(1993), Taylor et al.(2010)와 같은 이전의 연구자들이 제시한 확률론적 방법을 이용하여 국부빙압력 추정식을 Eq.(18)와 같이 도출하였다. 한편, 이전의 연구에서 제안한 빙압력 추정식은 모두 면적만을 고려하는 함수의 형태로 제안되었는데 실제 빙압력은 선박의 속도나 해빙의 재료특성 등 여러 요인에 의해 달라지므로 빙압력을 면적만으로 나타내는 것은 현실적이지 못하다. 따라서 본 연구에서는 선박의 속도 및 해빙의 두께와 빙압력의 관계를 분석하였으며, 이때의 결과를 이용해 기존의 설계 국부빙압력 추정식을 Eq.(24)와 같이 보완하였다.

보완된 국부빙압력 추정식은 기존의 추정식에 비해 현실적인 빙압력을 추정할 수 있었으나, 이는 2016년 ARAON호의 실선계측 데이터만을 활용하였으므로 연구 결과의 신뢰성을 높이기 위해서는 ARAON호를 비롯한 다른 선박들로부터 계측된 데이터를 추가로 분석할 필요가 있다.

## 참 고 문 헌

- [1] Choi, K. and Jeong, S., 2008. Ice Load Prediction Formulas for Icebreaking Cargo Vessels. Journal of the Society of Naval Architects of Korea, 45(2), 175-185.
- [2] Frederking, R., 2003. Determination of local ice pressures from ship transits in ice. The Thirteenth International Offshore and Polar Engineering Conference, International Society of Offshore and Polar Engineers.
- [3] Frederking, R., 2004. Ice pressure variations during indentation. Proceedings of IAHR Symposium on Ice, 307-314.
- [4] Johnnasson, B., Keinonen, A., Meroer, B. and Stubbs, J., 1981. Technical Development of an Environmentally Safe Arctic Tanker. Proceedings of IceTech 81, SNAME STAR Symposium, Ottawa.
- [5] Jeon, M.C., Min, J.K., Choi, K. and Ha, J.S., 2017. Estimation of Local Ice Load by Analyzing Shear Strain Data for the IBRV ARAON. Proceedings of the 24th International Conference on Port and Ocean Engineering under Arctic Conditions, POAC17-148, Busan, Korea, 148.
- [6] Jordaan, I.J., Maes, M.A., Brown, P.W. and Hermans, I.P., 1993. Probabilistic analysis of local ice pressures. Journal of Offshore Mechanics and Arctic Engineering, 115(1), 83-89.
- [7] Keinonen, A., 1983. Ice Loads on Ships in the Canadian Arctic, Ch.X, WEGEMT, Finland
- [8] Kim, J.M., 2016 Analysis of the IBRV ARAON's Ice Field Data and Development of a Numerical Code for Ice Load Estimation. Master's Thesis, Korea Maritime and Ocean University.

- [9] Lee, T.K., Kim, T.W., Rim, C.W. and Kim, S., 2013. A Study on Calculation of Local Ice Pressures for ARAON Based on Data Measured at Arctic Sea. *Journal of Ocean Engineering and Technology*, 27(5), 88-92.
- [10] Masterson, D.M. and Frederking, R., 1993. Local Contact Pressures in Ship/Ice and Structure/Ice Interactions, *Cold Regions Science and Teology*, 21(2), 169-185.
- [11] Min, J.K., Choi, K., Cheon, E.J. and Kim, J.M., 2016. Ice Load Estimation Procedures for IBRV ARAON by Analyzing Shear Strain Data Measured in Arctic Sea. *Journal of Ocean Engineering and Technology*, 30(6), 468-473.
- [12] Park, I., Nam, J.H., Byun, S. and Park, J., 2014. Conversion of pixel-based ice thickness to physical unit for image of broken ice patch. *Proceedings of the Society of CAD/CAM Conference*, 523-528.
- [13] Taylor, R.S., Jordaan, I.J., Li, C. and Sudom, D., 2010. Local Design Pressures for Structures in Ice: Analysis of Full-Scale Data, *Journal of Offshore Mechanics and Arctic Engineering*, 132(3), 031502.
- [14] USGS, 2008, Circum-Arctic Resource Appraisal: Estimates of Undiscovered Oil and Gas North of the Arctic Circle. USGS Fact Sheet 2008-3049, 4.
- [15] USGS, 2010, U.S. Geological Survey Oil and Gas Resource Assessment of the Russian Arctic. National Energy Technology Laboratory, 29