



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

아라온호의 빙해역 현장 데이터 분석 및 빙하중 산정 전산 프로그램 개발

Analysis of the IBRV ARAON's Ice Field Data and
Development of a Numerical Code for Ice Load Estimation



指導教授 崔 慶 植

2016年 6月

韓國海洋大學校 大學院

海 洋 工 學 科

金 眞 明

本 論文을 金眞明의 工學碩士 學位論文으로 認准함.

위원장 서 영 교 (인)

위 원 최 경 식 (인)

위 원 박 선 호 (인)



2016년 06월

한국해양대학교 대학원

해양공학과

김 진 명

목 차

목 차	i
그림목차	ii
표 목 차	iv
Abstract	v
1. 서 론	1
2. 아라온호 실선계측 데이터	3
2.1 아라온호의 빙해역 실선계측시험	3
2.2 스트레인게이지 데이터 및 GPS 속도 데이터 보정	6
3. 실선계측 데이터 분석과 빙하중 산정	9
3.1 스트레인게이지 데이터를 이용한 국부 빙하중 계산	9
3.1.1 영향계수행렬과 하중 역추정 절차	9
3.1.2 1축 게이지와 3축 게이지를 사용 시 빙하중 계산방법	13
3.1.3 국부 빙하중 계산결과	19
3.2 관성측정시스템 데이터를 이용한 전체 빙하중 계산	35
3.2.1 전체 빙하중 계산 절차	35
3.2.2 전체 빙하중 계산결과	37
4. 국부 빙하중 및 전체 빙하중 결과 비교	40
4.1 2012년 남극 및 2015년 북극 데이터의 국부 빙하중 계산결과	40
4.2 국부 및 전체 빙하중 계산결과 비교	42
5. 빙하중 산정 전산 프로그램 개발	44
5.1 빙하중 계산을 위한 전산 알고리즘	44
5.2 빙하중 산정 프로그램의 구성	49
6. 결 론	53
참고문헌	54

그림 목차

그림 1-1	북극권의 석유 및 천연가스 매장 현황	1
그림 2-1	2012년 남극탐사 시 스트레인게이지 부착 위치	4
그림 2-2	2015년 북극탐사 시 스트레인게이지 부착 위치(좌현)	5
그림 2-3	2015년 북극탐사 시 스트레인게이지 부착 위치(우현)	5
그림 2-4	시간 변화에 따른 변형률 데이터의 보정	6
그림 2-5	시간 변화에 따른 GPS 속도 데이터의 보정	7
그림 3-1	영향계수행렬을 이용한 하중 역추정 절차	10
그림 3-2	2012년 남극 데이터 분석 시 사용된 영향계수행렬(좌현)	11
그림 3-3	2012년 남극 데이터 분석 시 사용된 영향계수행렬(우현)	11
그림 3-4	2015년 북극 데이터 분석 시 사용된 영향계수행렬(좌현)	12
그림 3-5	2015년 북극 데이터 분석 시 사용된 영향계수행렬(우현)	12
그림 3-6	아라온호에 부착된 스트레인게이지	14
그림 3-7	von Mises 등가응력식을 이용해 변환된 3축 응력	16
그림 3-8	Hooke의 법칙을 이용해 변환된 1축 응력	16
그림 3-9	von Mises 등가응력식을 이용해 변환된 1축 응력	16
그림 3-10	계산방법에 따른 최대 등가응력 계산결과	18
그림 3-11	계산된 빙하중과 선속의 동기화	20
그림 3-12	2012년 일반 이동운항 중 예측된 피크 등가응력과 선속의 관계	21
그림 3-13	2012년 쇄빙성능시험 중 예측된 피크 등가응력과 선속의 관계	21
그림 3-14	2012년 쇄빙성능시험 및 일반 이동운항 중 예측된 피크 등가응력과 선속의 관계	22
그림 3-15	2012년 일반 이동운항 중 예측된 피크 빙압력과 선속의 관계	23
그림 3-16	2012년 쇄빙성능시험 중 예측된 피크 빙압력과 선속의 관계	23
그림 3-17	2012년 쇄빙성능시험 및 일반 이동운항 중 예측된 피크 빙압력과 선속의 관계	24
그림 3-18	2012년 일반 이동운항 중 예측된 피크 빙하중과 선속의 관계	25
그림 3-19	2012년 쇄빙성능시험 중 예측된 피크 빙하중과 선속의 관계	25

그림 3-20	2012년 쇄빙성능시험 및 일반 이동운항 중 계측된 피크 빙하중과 선속의 관계	26
그림 3-21	아라온호의 2015년 북극 탐사활동	28
그림 3-22	2015년 일반운항 중 계측된 피크 등가응력과 선속의 관계	29
그림 3-23	2015년 일반운항 중 계측된 피크 빙압력과 선속의 관계	30
그림 3-24	2015년 일반운항 중 계측된 피크 빙하중과 선속의 관계	30
그림 3-25	2012년 일반 이동운항 중 계측된 국부 빙하중과 선속의 관계	32
그림 3-26	2012년 쇄빙성능시험 중 계측된 국부 빙하중과 선속의 관계	32
그림 3-27	2012년 쇄빙성능시험 및 일반 이동운항 중 계측된 국부 빙하중과 선속의 관계	33
그림 3-28	2015년 일반 이동운항 중 계측된 국부 빙하중과 선속의 관계	34
그림 3-29	관성측정시스템을 통해 계측된 데이터 예	35
그림 3-30	선체 무게중심에서의 3축 힘과 모멘트	37
그림 3-31	관성측정시스템 데이터를 사용하여 계산된 전체 빙하중	38
그림 3-32	관성측정시스템 데이터를 사용하여 계산된 전체 빙하중과 선속의 관계	39
그림 4-1	정상운항 상태에서의 전체 빙하중 추정식과 관성측정시스템을 이용한 전체 빙하중	43
그림 5-1	빙하중 산정 프로그램 알고리즘	46
그림 5-2	이벤트 자동 분류 결과의 예	47
그림 5-3	이벤트 자동 분류 알고리즘	48
그림 5-4	자동 분류된 각 이벤트에서의 선속	48
그림 5-5	이벤트 자동 분류로 얻어진 국부 빙하중과 선속의 관계 예	48
그림 5-6	빙하중 산정 전산 프로그램 메인화면	49
그림 5-7	‘Open Data’ 및 ‘Modifying Data’ 화면	49
그림 5-8	‘S/G Graph’ 화면	50
그림 5-9	‘Local Load-Port’ 화면	51
그림 5-10	‘Local Load-Starboard’ 화면	51
그림 5-11	‘Global Load’ 화면	52
그림 5-12	‘Motion Pack Graph’ 화면	52

표 목차

표 3-1	계산방법에 따른 최대 등가응력 계산결과	17
표 3-2	2012년 아라온호의 쇄빙운항 및 일반 이동운항 중 기록된 데이터	19
표 3-3	2015년 아라온호의 일반 이동운항 중 기록된 데이터	27
표 4-1	2012년 남극 및 2015년 북극 데이터 분석결과	41
표 4-2	국부 빙하중과 전체 빙하중 비교	42



Analysis of the IBRV ARAON's Ice Field Data and Development of a Numerical Code for Ice Load Estimation

Jin Myung Kim

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

Abstract

Ice loads estimation is an important issue in the design of an icebreaking vessel. The most common method for predicting hull ice loads is to measure strains of ship's hull and to calculate ice pressures by using strain gauges installed on the inner hull plating of the ship.

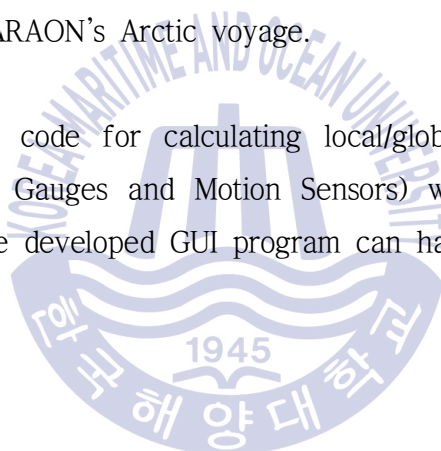
In this study the equivalent stresses in the hull plating of the IBRV ARAON and the local ice pressures/loads were estimated through the analysis of strain data measured during ARAON's Antarctic voyage (2012) and Arctic voyage (2015). The influence coefficient matrix for calculating ice pressures/loads is discussed. The concept of "events" was adopted for describing peak ice

pressures and speed of ship.

The threshold values of 15MPa for equivalent stresses and 1MN for peak ice loads were chosen to analyze significant local ice loads on the hull plating.

Meanwhile the global ice loads were estimated by using the measured data from the 6-DOF inertial measurement system installed at the center of gravity of the ARAON. The calculated results (Global Ice Loads) were compared to those of local ice loads from strain gauge measurement. It was found that the global ice loads were 3-4 times higher than the local ice loads for the case of 2015 ARAON's Arctic voyage.

Finally, a numerical code for calculating local/global ice loads from the measured data (Strain Gauges and Motion Sensors) was developed by using MATLAB language. The developed GUI program can handle a large amount of data efficiently.



1. 서 론

근래 지구온난화로 인해 북극해의 해빙 면적이 현저히 감소하면서 북극해로의 접근성이 높아지고 있다. 미국 지리정보국(USGS)이 2008년에 발표한 자료에 따르면 북극해 매장자원은 그림 1-1에서 보는 바와 같이 원유 약 900억 배럴, 천연가스 약 1669조 평방피트 정도로 각각 전 세계 추정 매장량의 13%, 30%를 차지한다. 이것은 장기적인 관점에서 극지역이 인류의 최종 자원개발 대상이 될 수 있음을 시사한다. 하지만 북극 유전개발과 국제유가 사이에는 매우 긴밀한 관계가 있어서 최근 국제유가 하락에 따라, 북극해 유전개발(Cold Rush)을 추진해오던 세계 여러 기업들이 북극해 지역의 에너지자원 개발사업을 잇따라 잠정 중단하고 있는 상황이다. 이러한 상황에서 우리나라는 향후 북극해 에너지자원 개발사업이 다시 활성화될 미래의 상황에 대비할 필요가 있다.

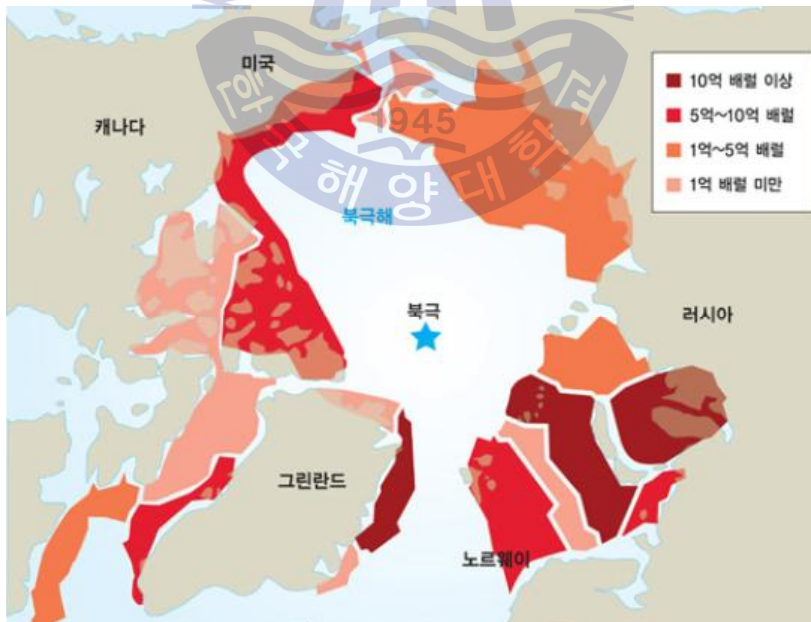


그림 1-1 북극권의 석유 및 천연가스 매장 현황

빙해지역을 운항하는 쇄빙선박은 극지역이라는 열악한 환경으로 인해 극복해야 할 많은 기술적 어려움을 가지고 있으며, 특히 쇄빙선박에 작용하는 빙하중은 파랑하중에 비해 월등히 크기 때문에 쇄빙선박 설계 시 빙하중의 크기를 산정하는 것은 매우 중요한 문제이다(김호연, 2014).

빙해지역을 운항하는 선박과의 충돌에 의해 선체구조가 받게 되는 빙하중은 선체 전체의 거동을 해석하기 위한 전체 빙하중(Global Ice Load)과 국부 구조의 거동을 해석하기 위한 국부 빙하중(Local Ice Load)으로 나눌 수 있다(이탁기 등, 2013).

본 논문에서는 실제 쇄빙선박에 작용하는 빙하중 문제에 주목하였다. 이를 위하여 쇄빙연구선 아라온호의 2012년 남극 및 2015년 북극탐사 시 선체 외판에 설치된 스트레인게이지로부터 계측된 변형률을 사용하여 선체 외판의 등가응력을 계산한 후 영향계수법을 통해 빙압력으로 환산하여 국부 빙하중을 계산하였다.

전체 빙하중 계산은 아라온호 중심에 설치된 관성측정시스템으로부터 계측된 데이터를 사용하였는데 선박을 하나의 질점으로 가정하고 계측된 선박의 3축 가속도와 각속도를 사용하여 무게중심에 작용하는 힘을 전체 빙하중으로 산정하였다. 또한 계산된 결과를 과거 선행연구에서 제시된 전체 빙하중 산정식과 비교 분석하였다. 본 연구에서 전체 빙하중 계산은 2012년 남극탐사 시 계측된 관성측정시스템 데이터의 심한 노이즈로 인하여 2015년 북극탐사 시 계측된 데이터만을 대상으로 분석하였다. 계산된 등가응력과 빙압력 그리고 국부 및 전체 빙하중을 선체의 속도와의 관계로 제시하였다.

본 연구에서는 쇄빙선박에 작용하는 빙하중 산정에 대한 연구결과를 바탕으로 많은 양의 데이터를 빠르게 처리하고 계산결과를 그래프로 출력하여 사용자가 쉽게 확인할 수 있도록 MATLAB을 이용한 빙하중 산정 전산 프로그램을 개발하였다.

2. 아라온호 실선계측 데이터

2.1 아라온호의 빙해역 실선계측시험

국내 최초의 쇄빙연구선 아라온호가 건조된 이후 남극해(2010년 1월, 2012년 1월)에서 2회, 북극해(2010년 8월, 2011년 8월)에서 2회, 빙하중과 빙저항 그리고 해빙의 재료강도 특성을 계측하는 실선시험을 수행한 바 있다. 가장 최근인 2015년 8월에는 아라온호의 빙해역 실선계측시험이 북극해에서 수행되었다(최경식, 2012).

우선 본 연구에서는 2015년 8월 아라온호의 북극탐사 시 계측된 스트레인게이지와 GPS 속도 데이터 및 선박의 6자유도 운동이 기록된 관성측정시스템(Inertial Measurement System) 데이터를 사용하여 아라온호가 받은 국부 빙하중과 전체 빙하중을 계산하였다. 한편 등가응력을 구하는 과정에서 1축 게이지(Single Gauge)가 부착된 경우와 3축 게이지(Rosette Gauge)가 부착된 경우 빙하중 계산결과와의 차이를 확인하기 위하여 2012년 남극 계측시험 시 계측된 스트레인게이지 데이터를 이용하여 비교 분석하였다. 아라온호의 남극해 및 북극해 탐사 시 얻은 실선계측 데이터에는, 빙해역에서 아라온호가 얼음을 깨고 운항하는 동안 스트레인게이지 데이터와 GPS에서 얻은 아라온호의 선속이 포함되어 있다.

2012년 남극탐사 시 스트레인게이지는 2nd Deck 하부의 106번 프레임에서 111번 프레임 사이에 부착되었으며, 게이지는 3축 로제트 형식으로 좌현에 10개, 우현에 11개의 스트레인게이지를 설치하여 총 63개 채널에서 동시에 계측할 수 있도록 구성되었다. 이것은 그림 2-1과 같다.

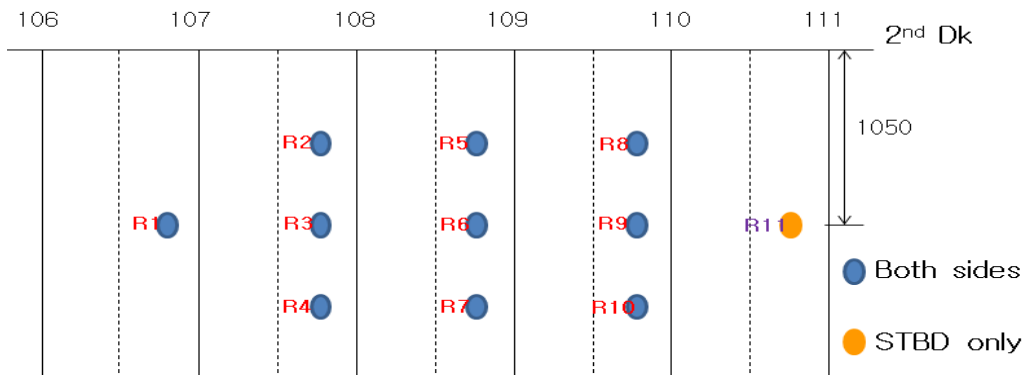


그림 2-1 2012년 남극탐사 시 스트레인게이지 부착 위치

반면 2015년 북극탐사 시에는 좌현의 경우 102번 프레임에서 110번 프레임 사이에 24개, 우현의 경우 106번 프레임에서 110번 프레임 사이에 12개의 1축 게이지를 부착하였다. 또한 2015년 북극탐사 시에는 특별히 전단력을 통한 빙하중 계산을 위하여 선체 외판이 아닌 프레임에도 스트레인게이지를 부착하였으며, 부착위치는 좌현의 경우 106, 107, 109번 프레임에 각각 2개, 108번 프레임에 전후방 각각 2개로 총 10개를 부착하였고 우현의 경우 108, 109번 프레임에 각각 2개로 총 4개를 부착하여 총 78개 채널에서 동시 계측이 가능하도록 구성되었다. 이것은 그림 2-2, 2-3과 같다. 스트레인게이지가 부착된 아라온호 외판은 항복강도 355MPa, 탄성계수 200GPa, 프아송비 0.3을 갖는 EH36 강재로 되어있다.

2012년 남극탐사 시에는 쇄빙연구선 아라온호가 얼음을 깨고 운항하는 32시간 가량의 일반 이동운항 중 계측된 데이터 뿐 아니라 총 100분 가량의 공식 쇄빙시험 데이터도 포함되어 있다. 계측시험은 일반 이동운항 중 19회, 공식 쇄빙시험 2회로 총 21회 수행되었다. 반면 2015년 북극탐사 시에는 공식 쇄빙시험은 수행하지 못하였고 총 33회의 일반운항 계측시험만 수행하였다.

● Single Gauge (24개) × Rosette Gauge (10개)

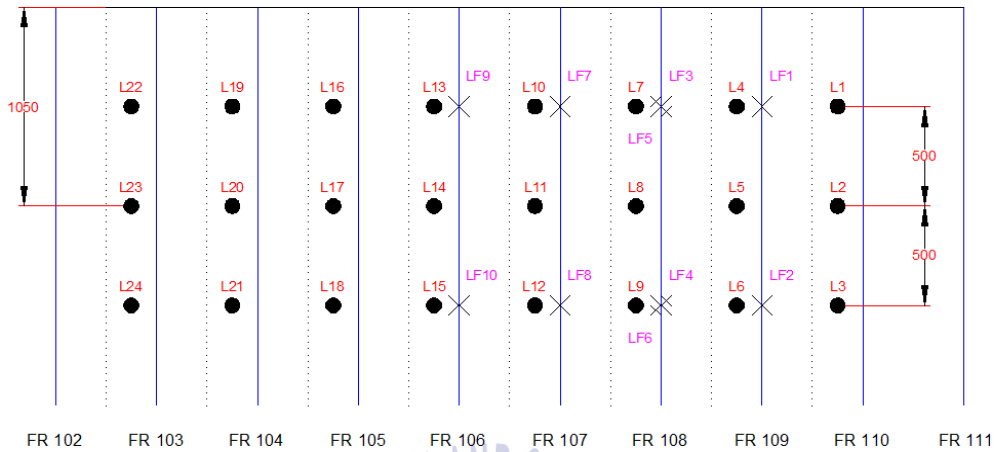


그림 2-2 2015년 북극탐사 시 스트레인게이지 부착 위치(좌현)

● Single Gauge (12개) × Rosette Gauge (4개)

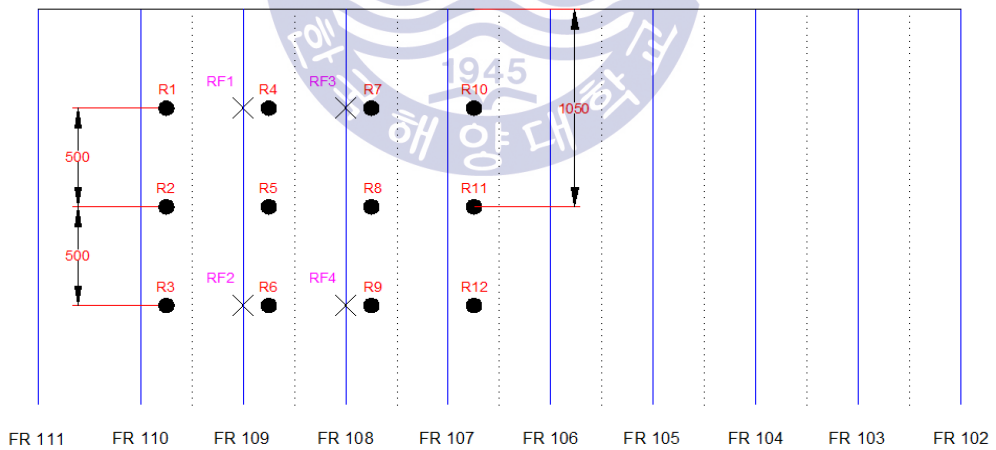


그림 2-3 2015년 북극탐사 시 스트레인게이지 부착 위치(우현)

2.2 스트레인게이지 데이터 및 GPS 속도 데이터 보정

빙해역 실선탐사 시 스트레인게이지로부터 변형률 데이터를 계측할 때에는 선박이 출항하기 전 모든 기기의 이상 유무를 확인하고 선박이 정지해 있는 상태에서 데이터의 초기값을 0으로 맞추어 보정한다. 일단 선박이 출항하여 스트레인게이지가 부착된 선측부 외판에 파랑하중을 비롯한 여타의 하중을 받는 상황이 되면 이로 인한 에러가 생길 수 있기 때문이다. 따라서 데이터의 초기값을 보정(Calibration)하지 않으면 모든 채널의 초기 변형률이 각각 상이할 수 있다. 또한 빙해역을 운항하는 선박의 경우, 열악한 운항환경으로 인해 스트레인게이지가 파손되어 계측이 되지 않거나 예측 가능한 범위 이상의 신호가 계측되거나 정상적으로 작동하는 게이지로부터 얻어지는 신호보다 위 혹은 아래로 시프트 되는 현상이 일어나기도 한다. 그림 2-4는 2015년 북극탐사 시 첫 번째 시험에서 외판에 부착한 36개의 1축 게이지로부터 계측된 변형률을 시간 변화에 따라 나타낸 것이다.

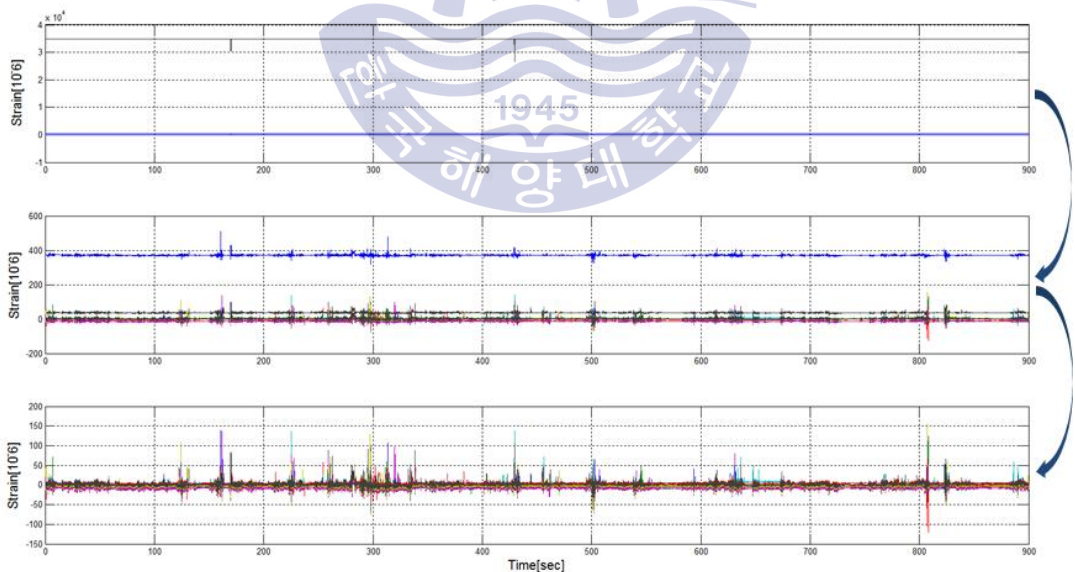


그림 2-4 시간 변화에 따른 변형률 데이터의 보정

그림 2-4의 첫 번째 그래프는 스트레인게이지로부터 측정된 변형률을 아무런 보정없이 나타낸 것인데 36개의 채널이 모두 일직선처럼 보이는 이유는 아라온호의 빙해역 운항 중 발생한 좌현 21번 게이지 고장으로 인해 21번 채널의 신호값이 정상범위를 초과하였고 이에 따라 나머지 35개 채널의 정상적인 신호값들이 상대적으로 매우 작기 때문에 0에 가까운 값으로 나타나는 것이다. 이 문제를 해결하기 위하여 망가진 좌현 21번 게이지의 데이터를 삭제하고 횡방향으로 인접한 18번 게이지와 24번 게이지의 측정치를 선형적으로 보간하여 대체하였다. 그림 2-4의 두 번째 그래프는 선형 보간으로 수정된 21번 게이지의 신호가 반영된 것이다. 또한 변형률을 측정하는 데는 이상이 없으나 장기적인 빙해역 환경으로 인해 몇몇 게이지의 신호가 많게는 400μ 까지 시프트 되는 현상을 해결하기 위하여 모든 게이지의 신호를 처음 1초 동안의 평균값으로 빼어 초기 값을 0에 수렴하도록 보정하였다. 그림 2-4의 세 번째 그래프는 변형률 데이터의 모든 보정이 끝난 후의 신호를 나타낸 것이다.

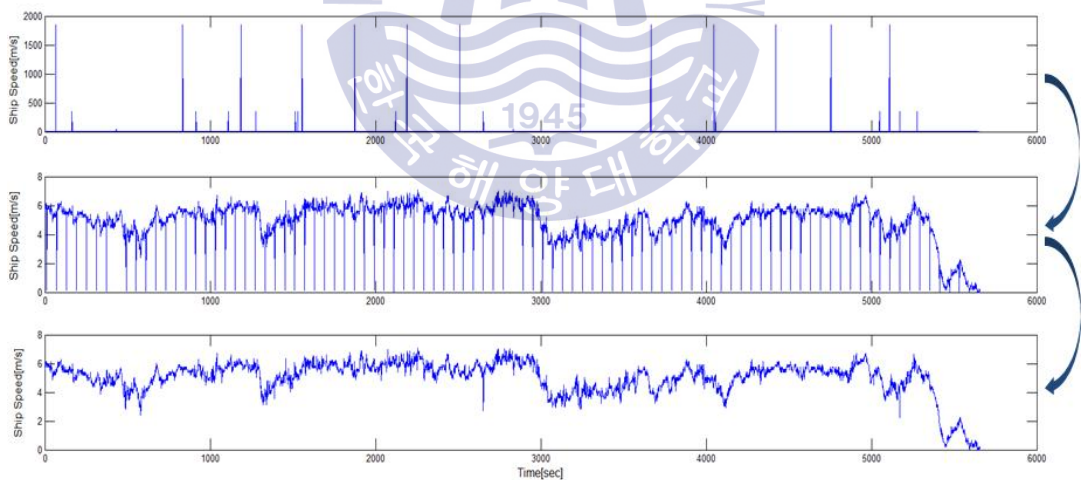


그림 2-5 시간 변화에 따른 GPS 속도 데이터의 보정

스트레인게이지로부터 측정된 변형률 데이터는 von Mises 등가응력식을 사용하여 선체 외판에 발생한 응력으로 계산되는데, 계산된 각 게이지에서의 응력을 구조해석 프로그램으로부터 얻은 영향계수행렬을 사용하여 선체 외판이 받

는 빙압력으로 치환한 뒤 스트레인게이지가 담당하는 영역의 면적을 곱하여 선측부가 받는 국부 빙하중을 계산할 수 있다.

선박 전체가 받는 전체 빙하중을 추정하기 위해서는 얼음과 충돌 시 선박의 속도가 필요하다. 그림 2-5는 GPS로부터 아라온호의 이동속도를 기록한 것인데, 첫 번째 그래프는 아무런 보정없이 시간 변화에 따른 아라온호의 선속을 나타낸 것이다. 보이는 바와 같이 불규칙적으로 선속이 2,000m/s 가까이 매우 큰 값을 갖는 비정상적 신호로 인해 정상적인 신호를 분별하기에 어려움이 있다. 이러한 노이즈를 제거하면 그림 2-5의 두 번째 그래프를 얻게 되는데 첫 번째 그래프 보다 정상적인 신호가 뚜렷하게 구분되지만 거의 일정한 주기로 선속이 0이 되는 노이즈가 남아있다. 일정한 주기로 정상범위에 속하지 않는 신호는 계측기기의 전력공급이 육지에서와는 상이하여 발생하는 전기적 노이즈로 판단된다. 그림 2-5의 세 번째 그래프는 모든 불필요한 노이즈를 제거한 GPS 속도 데이터를 나타낸다.

한편 스트레인게이지로부터 계측되는 변형률 데이터와 관성측정시스템으로부터 선박의 6자유도 운동이 기록된 데이터 그리고 GPS로부터 얻어지는 속도 데이터는 측정기기가 각각 다를 뿐만 아니라 측정위치도 상이하여 데이터를 동기화하는 것이 매우 어렵다. 이러한 이유에서 서로 다른 데이터를 사용하여 결과를 분석하기 위해서는 각 데이터의 시작 시각을 동기화(Synchronization)하는 작업을 거쳐야한다.

3. 실선계측 데이터 분석과 빙하중 산정

3.1 스트레인게이지 데이터를 이용한 국부 빙하중 계산

3.1.1 영향계수행렬과 하중 역추정 절차

선체구조에 작용하는 빙하중은 크게 전체 빙하중과 국부 빙하중으로 구분할 수 있다. 이것은 기본적으로 선체와 얼음과의 접촉면적에 따른 것이기도 하지만 국부 빙하중은 선체 외판에 직접적인 구조손상을 유발시키는 반면 전체 빙하중은 선체 종강도나 전체적인 선체운동과 관련이 있다(최경식, 2015). 국부 빙하중을 계측하기 위한 가장 좋은 방법은 계측기기를 해빙과 직접 접촉하는 선체 외부에 설치하는 것이다. 그러나 이러한 방법은 현실적으로 매우 곤란한 작업이기 때문에 쇄빙선박에서의 국부 압력이나 하중에 관한 데이터는 통상 내부 구조부재에 설치된 스트레인게이지에 의해 기록되는 것이 일반적이다.

스트레인게이지로부터 계측된 변형률 데이터를 유효한 압력이나 하중으로 환산하기 위해서는 구조물의 응답과 하중 사이의 상관관계를 추정할 수 있는 기법이 정립되어 있어야 한다. 이를 위해서 일반적으로 압력과 응력 또는 변형률 사이의 관계를 규정하는 영향계수법을 이용하는데 영향계수법이란 특정한 영역에 하중이 작용하면 그 지점과 인근 영역에 변형과 응력이 발생하게 되는데 이를 역이용하여 구조해석을 통한 반복적 수행으로 인근 영역에 발생하는 변형과 응력을 영향계수행렬로 만들고 이것을 이용하여 실선계측시험에서 계측되는 변형률을 압력과 하중으로 계산하는 방법이다. 이것은 식(1), (2)와 같다.

$$\sigma = [C]\{F\} \quad (1)$$

$$F = [C]^{-1}\sigma \quad (2)$$

여기서, $\{\sigma\}$ 는 특정 영역에 대한 응력 벡터, $\{F\}$ 는 특정 영역에 대한 하중 벡터, $[C]$ 는 응력에 대한 하중의 영향계수행렬이고 $[C]$ 의 역행렬 $[C]^{-1}$ 을 이용하면 예측된 변형률과 계산된 등가응력으로부터 특정 지점에 작용한 하중을 계산할 수 있다(이탁기 등, 2013). 그림 3-1은 이러한 계산 절차를 보여주고 있다.

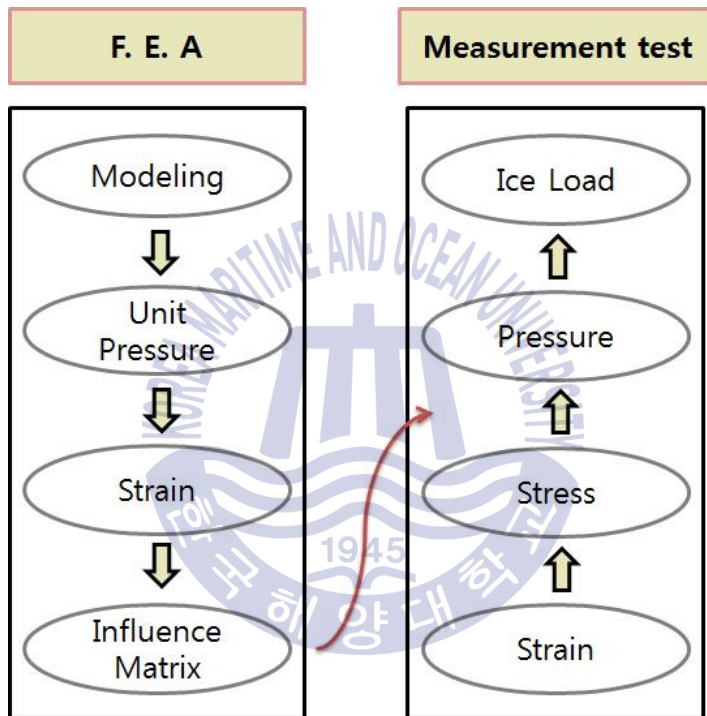


그림 3-1 영향계수행렬을 이용한 하중 역추정 절차

그림 3-2, 3-3은 2012년 남극 데이터 분석 시 사용된 등가응력에 대한 압력의 영향계수행렬 $[C]$ 이고 그림 3-4, 3-5는 2015년 남극 데이터 분석 시 사용된 $[C]$ 를 보여주고 있다.

47.2173	0.7491	2.0128	1.5695	0.2326	0.557	0.5039	0.6704	0.4259	0.5004
1.5104	41.089	8.3448	4.6252	0.5574	0.9168	0.9137	0.5388	0.4213	0.4883
3.2136	8.4562	50.9683	12.3803	0.6999	1.7655	1.4987	0.5384	0.4854	0.6675
3.5356	6.177	12.9665	53.6152	1.3744	1.7788	2.9244	0.5389	0.5022	0.7953
1.4866	1.08	1.4501	2.2507	41.8605	8.2148	4.6202	0.7563	0.8504	1.6748
1.8115	1.9173	3.4178	3.0587	8.8446	52.1819	13.2768	1.0801	2.2005	2.8268
1.9705	2.2768	3.6369	4.1443	4.414	12.0793	54.2336	2.0506	2.8282	4.145
1.1793	1.1989	1.292	1.3135	1.5291	0.9451	1.7634	39.9958	9.5802	3.624
1.3486	1.3763	1.6247	1.734	1.8598	2.0409	2.1452	10.1133	50.9458	15.9095
1.4388	1.3082	1.7168	2.0021	2.0053	2.8442	3.3511	5.5181	13.5141	47.5308

그림 3-2 2012년 남극 데이터 분석 시 사용된 영향계수행렬(좌현)

47.2173	0.7491	2.0128	1.5695	0.557	0.5039	0.6704	0.4259	0.5004	0.4423
1.5104	41.089	8.3448	4.6252	0.9168	0.9137	0.5388	0.4213	0.4883	0.4952
3.2136	8.4562	50.9683	12.3803	1.7655	1.4987	0.5384	0.4854	0.6675	0.6311
3.5356	6.177	12.9665	53.6152	1.7788	2.9244	0.5389	0.5022	0.7953	0.7305
1.8115	1.9173	3.4178	3.0587	52.1819	13.2768	1.0801	2.2005	2.8268	0.884
1.9705	2.2768	3.6369	4.1443	12.0793	54.2336	2.0506	2.8282	4.145	1.05
1.1793	1.1989	1.292	1.3135	0.9451	1.7634	39.9958	9.5802	3.624	1.1842
1.3486	1.3763	1.6247	1.734	2.0409	2.1452	10.1133	50.9458	15.9095	1.717
1.4388	1.3082	1.7168	2.0021	2.8442	3.3511	5.5181	13.5141	47.5308	2.4581
0.9648	1.0049	0.9236	1.0339	1.1609	1.1367	1.1281	2.2581	3.6879	40.6999

그림 3-3 2012년 남극 데이터 분석 시 사용된 영향계수행렬(우현)

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	5.301	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	0.539	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	0.69	0.653	0.962	1.414	2.387	7.454	43.575	12.348	2.612	3.265	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

그림 3-4 2015년 북극 데이터 분석 시 사용된 영향계수행렬(좌현)

40.927	9.085	3.538	2.508	2.959	2.895	1.454	1.151	0.848	1.201	1.088	0.92
8.155	45.456	12.481	2.896	4.508	4.549	1.603	1.399	1.058	1.307	1.253	1.111
2.557	11.988	47.815	2.398	4.608	5.348	1.565	1.489	1.292	1.312	1.317	1.231
0.749	1.29	1.528	41.74	9.905	4.101	2.244	2.973	3.418	1.568	1.326	1.04
0.835	1.497	2.666	8.774	47.046	13.645	2.733	4.611	5.301	1.677	1.588	1.291
1.4	2.061	2.893	3.587	14.039	48.862	2.316	4.878	6.183	1.6	1.673	1.527
0.775	0.568	0.416	0.688	1.44	1.395	42.176	10.387	4.408	2.993	3.636	3.252
0.866	0.691	0.547	0.983	1.55	2.243	9.024	46.838	13.35	3.356	4.912	4.713
0.858	0.738	0.628	1.512	2.008	2.414	3.648	13.324	48.323	2.709	4.87	5.418
0.617	0.417	0.314	0.837	0.77	0.58	0.905	1.147	1.399	41.051	9.546	3.99
0.709	0.514	0.406	0.985	1.008	0.815	0.912	1.325	2.381	8.455	45.824	13.18
0.766	0.594	0.491	1.027	1.127	0.969	1.308	1.813	2.56	3.198	12.94	47.947

그림 3-5 2015년 북극 데이터 분석 시 사용된 영향계수행렬(우현)

3.1.2 1축 게이지와 3축 게이지를 사용 시 빙하중 계산방법

스트레인게이지의 종류는 스트레인 계측방향 또는 가용 채널수에 따라 다르게 사용하는데 1축 게이지의 경우 1방향의 변형률만 계측하여 그 방향의 응력을 구할 수 있으며, 3축 로제트 게이지의 경우 평면내의 x, y축의 변형률과 x, y축 사이 45도 방향의 변형률을 함께 계측하여 그 지점의 평면응력 상태를 구할 수 있다.

그림 3-6은 아라온호에 설치된 스트레인게이지의 종류를 보여주는데 게이지의 종류에 따라 계측된 변형률로부터 응력을 계산하는 방법에 약간의 차이가 있다. 3축 게이지의 경우 흔히 von Mises 등가응력식이 사용되며, 계측된 세 방향의 변형도 ϵ_A , ϵ_B , ϵ_C 를 이용하여 식(3), (4)와 같이 주응력 σ_1 , σ_2 을 계산하고 이로부터 식(5)를 사용하여 등가응력 σ_{eq} 을 계산한다.

$$\sigma_1 = \frac{E}{2(1-\nu)}(\epsilon_A + \epsilon_B) + \frac{E\sqrt{2}}{2(1+\nu)}\sqrt{(\epsilon_A - \epsilon_C)^2 + (\epsilon_B - \epsilon_C)^2} \quad (3)$$

$$\sigma_2 = \frac{E}{2(1-\nu)}(\epsilon_A + \epsilon_B) - \frac{E\sqrt{2}}{2(1+\nu)}\sqrt{(\epsilon_A - \epsilon_C)^2 + (\epsilon_B - \epsilon_C)^2} \quad (4)$$

$$\sigma_{eq} = \sqrt{\sigma_1^2 + \sigma_2^2 - \sigma_1\sigma_2} \quad (5)$$

하지만 1축 게이지의 경우 한 방향의 변형률만 계측되기 때문에 선박을 탄성체로 가정하여 Hooke의 법칙을 이용하여 식(6)과 같이 응력을 계산한다.

$$\sigma = E \times \epsilon_x \quad (6)$$

1축 게이지로부터 계측된 한 방향의 변형률과 Hooke의 법칙을 사용하는 이 방법은 3축 로제트 게이지를 사용하는 것보다 기록되는 채널의 수가 적기 때문에 경제적이고 데이터 처리도 간편하다. 하지만 게이지가 부착된 선체 외판에

일어나는 변형을 1축으로만 계산하기 때문에 3축 게이지와 von Mises 등가응력식을 이용하여 계산되는 것과는 조금은 다른 결과가 얻어진다.

2012년 남극탐사 시 아라온호에 부착된 스트레인게이지는 양현 모두 3축 로제트 게이지인 반면 2015년 북극탐사 시 아라온호에 부착된 스트레인게이지는 프레임 부위를 제외하면 양현 모두 1축 게이지다. 3축 게이지에 비해 상대적으로 정확한 하중 역추정이 어려운 1축 게이지를 사용하는 경우에는 응력 계산 시 적절한 보완이 필요하다.

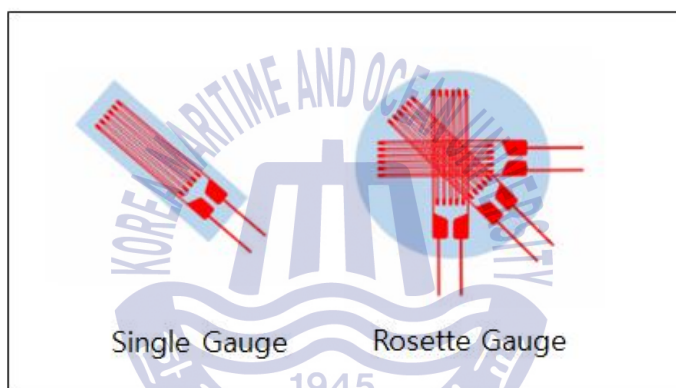


그림 3-6 아라온호에 부착된 스트레인게이지

그림 3-7, 3-8, 3-9는 스트레인게이지로부터 계측된 하나의 변형률로부터 각각 다른 방법을 이용하여 응력을 계산했을 때 발생하는 차이를 확인하기 위하여 2012년 남극 실선계측시험 데이터를 사용하여 확인한 것이다. 모든 그래프는 21개의 계측 데이터 중 3번째 테스트 데이터를 사용하였다.

먼저, 그림 3-7은 좌현과 우현 각각 10개, 11개의 3축 로제트 게이트로부터 들어오는 총 63개 채널의 데이터를 von Mises 등가응력식을 사용하여 좌현 10개, 우현 11개 총 21개의 등가응력으로 환산한 것인데 처음 15분 가량의 데이터 중 최대값은 약 130MPa을 나타내고 있다.

그림 3-8은 Hooke의 법칙을 사용하여 1축 게이지로부터 측정되는 변형률을 응력으로 계산하였을 때 von Mises 등가응력식과의 차이를 확인하기 위하여 본래의 총 63개 채널에서 들어온 데이터 중 각각의 게이지에서의 x축 데이터만을 사용하여 계산한 결과이며, 이때 최대값은 약 90MPa이었다.

그림 3-7과 그림 3-8로 알 수 있듯이 같은 데이터를 사용하였음에도 불구하고 응력을 계산하는 방법에 따라 무시할 수 없는 차이가 발생하며, von Mises 등가응력식을 사용한 경우에 모두 큰 값을 나타내고 있음을 확인 할 수 있다.

아라온호의 실선탐사 시 3축 로제트 게이지만이 부착되었다면 굳이 x축 변형률만 차출하여 Hooke의 법칙을 이용하는 것보다 모든 채널에서 들어온 변형률을 von Mises 등가응력식에 대입하여 데이터를 분석하는 것이 더 높은 신뢰도를 줄 수 있을 것이다. 그러나 2015년 북극 실선 계측시험에서처럼 1축 게이지가 사용된다면 그림 3-9와 같이 von Mises 등가응력식을 이용한 1축 계산을 하는 것이 Hooke의 법칙을 사용하는 것보다 3축 로제트 게이지를 사용한 값에 근접한 결과를 도출한다.

이 방법은 Hooke의 법칙에서 x축 변형률과 선체 외판의 탄성계수($E = 200\text{ GPa}$)를 곱하는 대신 실제로 측정되지 않은 y 축과 45도 축의 변형률을 0으로 가정한 뒤 von Mises 등가응력식을 사용하는 것이다.

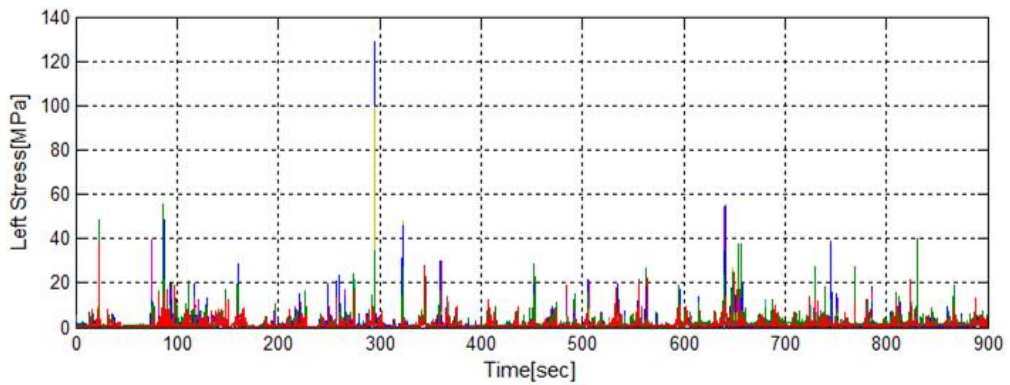


그림 3-7 von Mises 등가응력식을 이용해 변환된 3축 응력

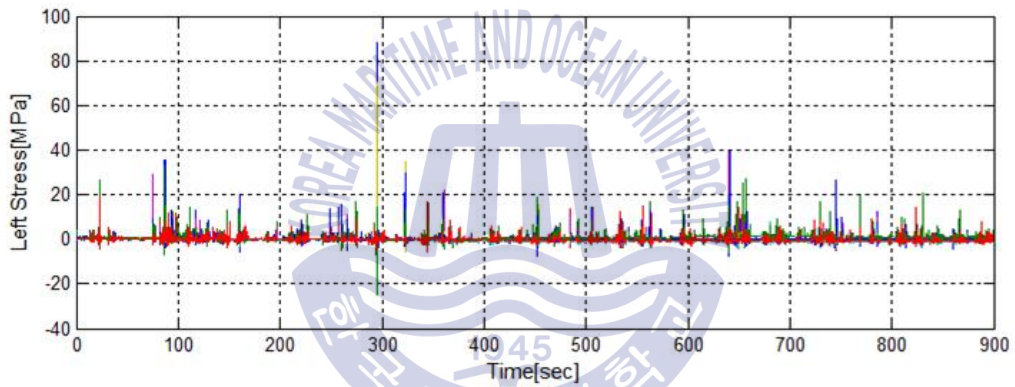


그림 3-8 Hooke의 법칙을 이용해 변환된 1축 응력

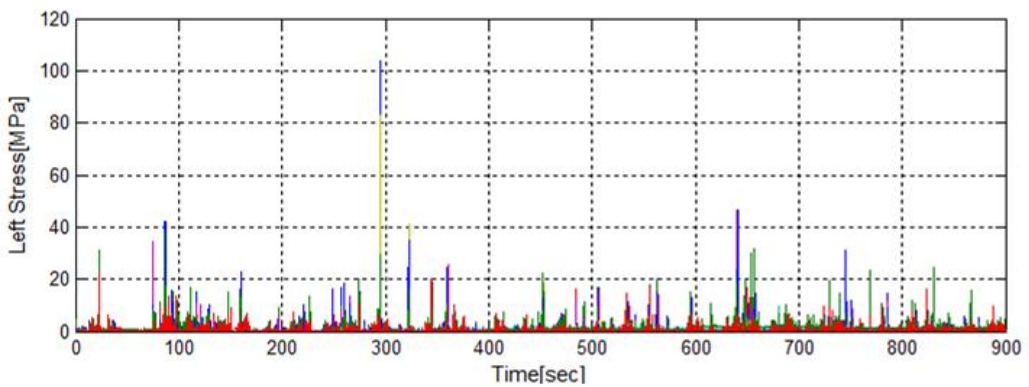


그림 3-9 von Mises 등가응력식을 이용해 변환된 1축 응력

표 3-1은 2012년 남극탐사 시 계측된 좌현 30개의 채널을 대상으로 하여 von Mises 3축 계산과 Hooke의 법칙을 이용한 계산결과, von Mises 공식을 이용한 1축 계산결과를 정리한 것이며, 이를 그림 3-10에 도시하였다. 8번 시험 데이터는 게이지 고장으로 계산결과에서 제외하였다.

표 3-1 계산방법에 따른 최대 등가응력 계산결과

Test No.	Maximum Stress [MPa]		
	3-axis von Mises eq.	1-axis Hooke's law	1-axis von Mises eq.
1	50.370	30.629	36.212
2	94.489	63.798	75.427
3	127.950	87.237	103.138
4	38.434	27.691	32.739
5	76.293	52.311	61.846
6	109.444	75.231	88.944
7	3.547	0.137	3.041
9	223.700	150.561	178.005
10	200.157	129.107	152.641
11	82.141	59.904	70.824
12	148.614	98.848	116.865
13	12.303	7.437	9.538
14	101.934	71.953	85.068
15	120.590	84.166	99.507
16	91.990	66.028	78.063
17	109.152	76.754	90.745
18	118.883	85.326	100.879
19	104.029	69.266	81.891
20	180.813	123.511	146.024
21	65.466	38.537	45.561

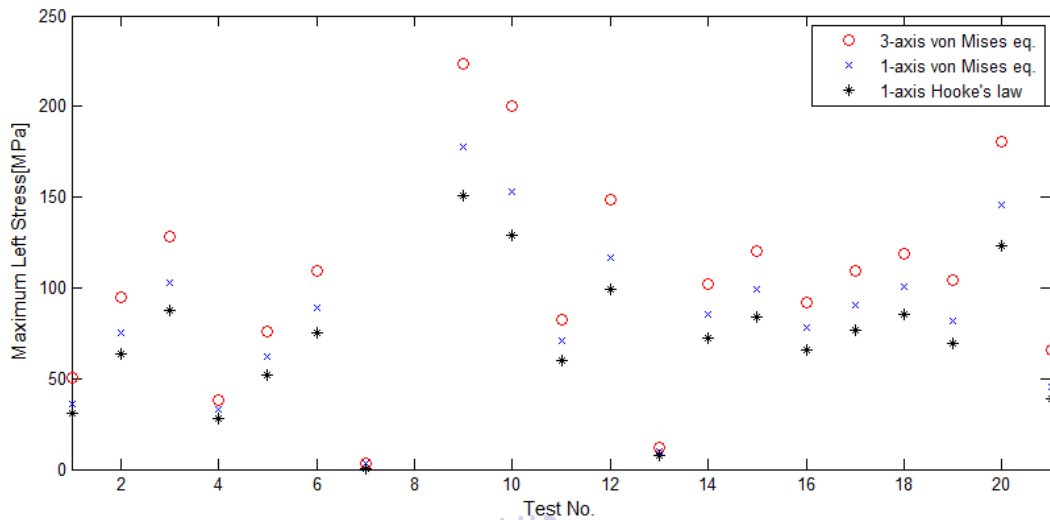


그림 3-10 계산방법에 따른 최대 등가응력 계산결과

그림에서도 알 수 있듯이 계측된 변형률을 사용하여 등가응력을 계산할 때에는 로제트 게이지로부터 3축의 변형률을 모두 계측하고 von Mises 등가응력식을 사용하여 계산하는 것이 전체 외판의 응력을 가장 잘 계산하는 방법이라 할 수 있지만 부득이하게 1축 게이지가 사용된 경우 Hooke의 법칙을 사용하는 것 보다는 y축과 45도 축을 0으로 가정하여 von Mises 등가응력식을 사용하는 것이 비교적 정확한 값을 얻을 수 있다. 또한 더 격차가 큰 상대적으로 큰 하중을 받는 상황에서 세 가지 계산결과의 차이가 뚜렷함을 알 수 있었다.

3.1.3 국부 빙하중 계산결과

2012년 쇄빙연구선 아라온호의 남극 아문젠해(Amundsen Sea) 탐사 시 두 번의 공식 쇄빙시험(No. 5, No. 20)이 수행되었고 공식 쇄빙시험이 아닌 일반운항 중에도 얼음과 충돌이 예상되는 경우에는 스트레인게이지로부터 변형률을 계측하였다. 일반운항 중 계측된 데이터는 총 19개이다. 표 3-2는 2012년 아라온호의 공식 쇄빙시험 및 일반운항 중 기록된 데이터를 정리한 것이다.

표 3-2 2012 아라온호의 쇄빙운항 및 일반 이동운항 중 기록된 데이터

No.	Date	Time[UTC]	Latitude[S]	Longitude[W]
1	02.10	19:00 ~ 19:10	71-53-02631 / 71-54-04719	117-31-44301 / 117-29-03145
2	02.10	19:15 ~ 19:45	71-54-69490 / 71-58-78034	117-27-22903 / 117-17-43584
3	02.10	20:50 ~ 21:20	72-06-43034 / 72-10-28183	117-02-65950 / 116-57-45178
4	02.20	00:45 ~ 01:15	73-28-23775 / 73-31-99157	110-09-96026 / 109-10-97807
5	02.22	11:00 ~ 11:30	73-28-52103 / 73-30-16319	108-42-94181 / 108-51-87029
6	02.27	02:10 ~ 03:30	73-51-30624 / 73-48-75092	106-04-65689 / 106-30-18245
7	02.27	10:00 ~ 10:30	73-48-36476 / 73-49-97927	106-31-61515 / 106-24-37128
8	02.28	13:15 ~ 14:30	73-37-33015 / 73-34-44119	109-29-64878 / 109-38-61929
9	02.28	14:35 ~ 15:40	73-37-33015 / 73-34-44119	109-29-64878 / 109-38-61929
10	02.28	15:45 ~ 18:00	73-33-20699 / 73-31-95289	109-40-98492 / 109-45-51126
11	03.01	11:35 ~ 13:30	72-51-84896 / 72-28-20615	117-27-49795 / 116-23-15399
12	03.01	13:40 ~ 16:00	72-51-84896 / 72-28-20615	117-27-49795 / 116-23-15399
13	03.01	16:05 ~ 16:25	72-51-84896 / 72-28-20615	117-27-49795 / 116-23-15399
14	03.02	02:15 ~ 03:45	72-27-57210 / 72-26-18404	116-19-40474 / 116-55-02788
15	03.02	05:25 ~ 07:45	72-26-13297 / 72-02-99941	116-53-35729 / 116-49-61448
16	03.02	07:55 ~ 09:20	72-26-13297 / 72-02-99941	116-53-35729 / 116-49-61448
17	03.02	09:30 ~ 11:40	72-26-13297 / 72-02-99941	116-53-35729 / 116-49-61448
18	03.02	14:40 ~ 16:35	72-03-21447 / 72-23-98552	117-06-12601 / 117-42-19088
19	03.02	16:45 ~ 18:30	72-03-21447 / 72-23-98552	117-06-12601 / 117-42-19088
20	03.04	04:20 ~ 05:30	72-14-87371 / 72-11-78717	117-50-19679 / 117-55-27713
21	03.10	23:20 ~ 01:40	73-29-44644 / 73-26-36582	109-49-54272 / 109-56-36658

2.2절에서 언급한대로 GPS 속도 데이터를 보정하고 계산된 빙하중과 주파수를 맞추어 동기화시키면 그림 3-11과 같이 도시할 수 있다. 그림 3-11은 No.1 시험의 처음 10분 동안 데이터를 사용하여 계산된 좌현의 국부 빙하중을 보여주고 있다.

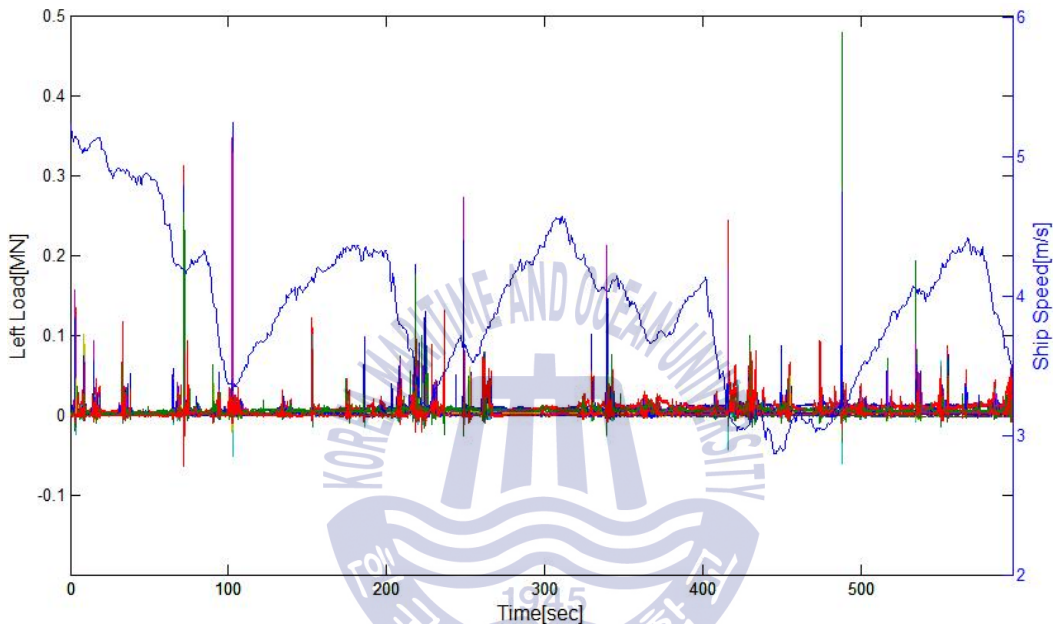


그림 3-11 계산된 빙하중과 선속의 동기화

계산된 하중을 시계열 해석(Time Series Analysis)하는 것은 계측된 데이터를 사용하여 바로 그래프로 나타낼 수 있기 때문에 간편하고, 계산된 하중이 정상 범위를 벗어나거나 게이지의 손상으로 발생하는 비정상 신호와 같은 데이터의 특징들을 쉽게 파악할 수 있어 편리하다. 그러나 일반적으로 국내 및 외국의 선행연구 결과로 발표된 대다수의 빙하중 경험식들이 선박의 속도에 관한 함수로 되어있기 때문에 변형률을 이용하여 국부 및 전체 빙하중을 추정하기 위해서는 계산된 힘들과 선속과의 관계를 분석할 필요가 있다(이탁기 등, 2014; Likhomanov, 2010).

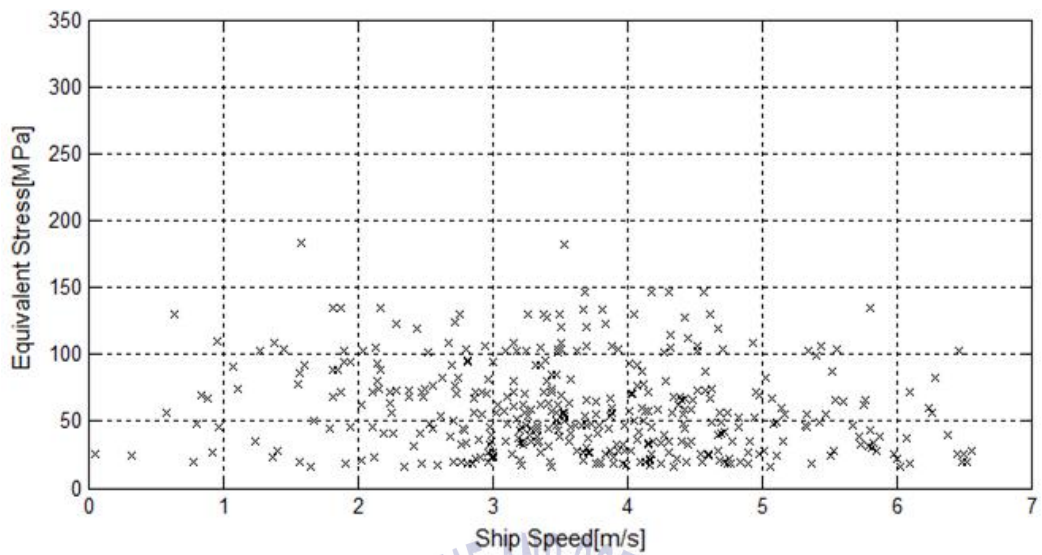


그림 3-12 2012년 일반 이동운항 중 계측된 피크 등가응력과 선속의 관계

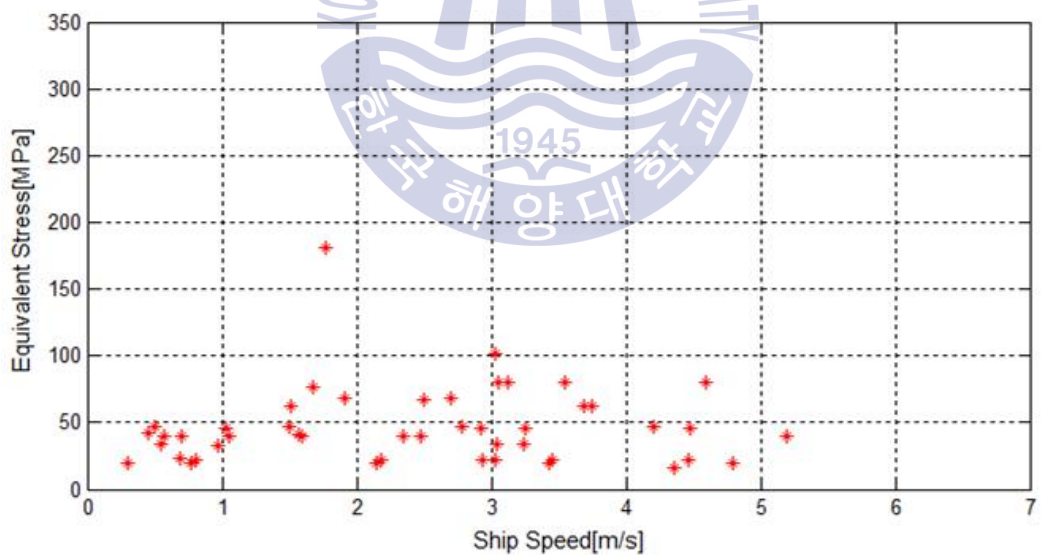


그림 3-13 2012년 쇄빙성능시험 중 계측된 피크 등가응력과 선속의 관계

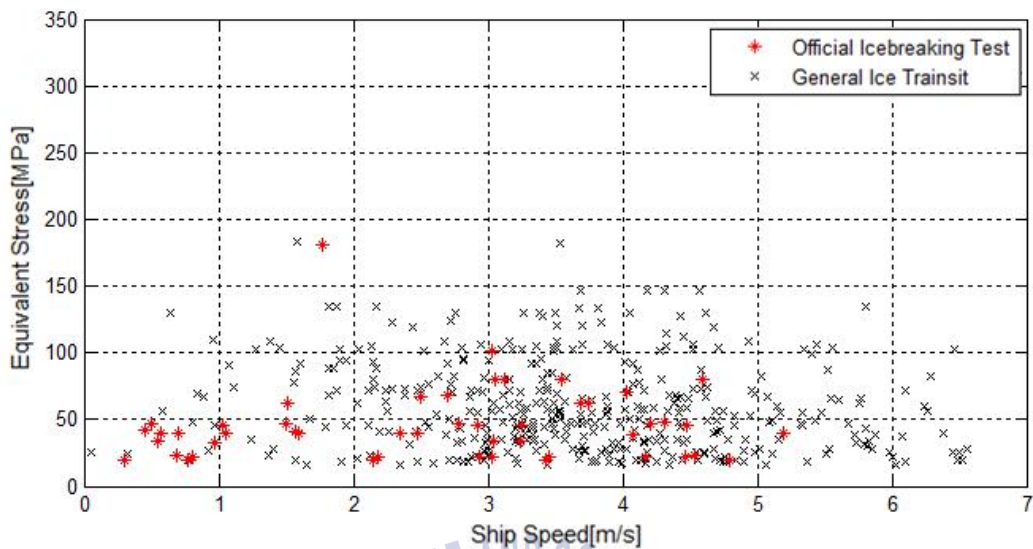


그림 3-14 2012년 쇄빙성능시험 및 일반 이동운항 중 측정한
피크 등가응력과 선속의 관계

그림 3-12는 일반 이동운항 중 측정한 약 32시간 분량의 데이터를 모두 분석하여 피크 등가응력을 계산한 것인데, 현장에서 아라온호가 얼음에 갇히는 상황이 발생하여 0에 가까운 선속을 갖는 3개의 데이터(No.08 ~ No.10)는 아주 예외적인 경우로서 제외하였다. 같은 방법으로 공식 쇄빙성능시험 중 측정한 데이터를 사용하여 피크 등가응력을 계산한 결과는 그림 3-13에 도시하였고 그림 3-14에 전체 데이터에 대한 계산결과를 도시하였다.

쇄빙성능시험 중 측정한 데이터는 정해진 쇄빙능력을 검증하기 위해 선속을 제한하고 쇄빙성능시험 목적에 맞도록 비교적 두껍고 큰 얼음을 찾아 측정하기 때문에 일반 이동운항에 비해 선속의 범위가 좁게 분포하는 것을 확인할 수 있다. 한편, 일반운항 시 계산된 등가응력의 최대값은 No.6 시험에서 발생하였고 크기는 약 182.8MPa이었으며, 공식시험 시 계산된 등가응력의 최대값은 No.20 시험에서 발생하였고 크기는 약 180.8MPa이었다.

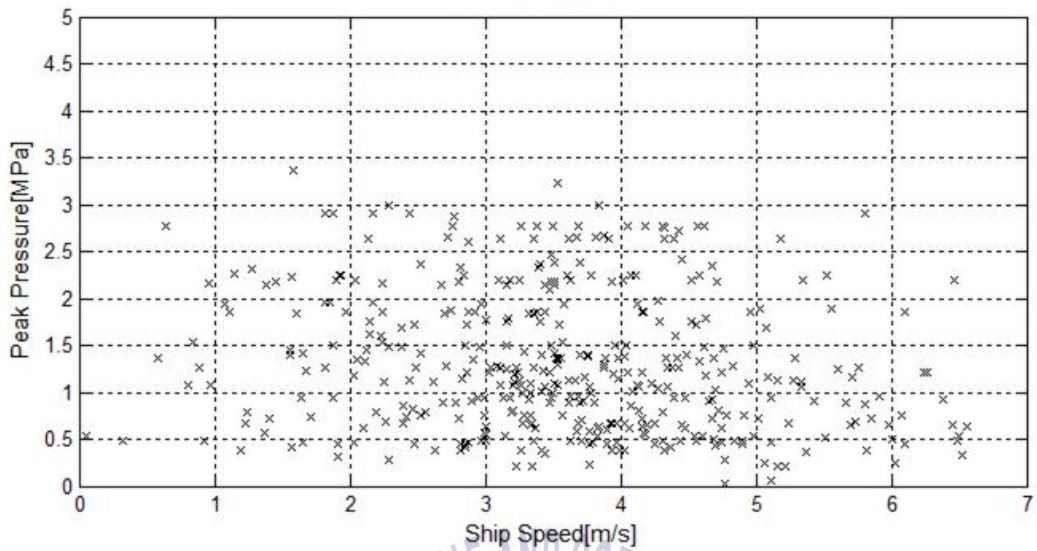


그림 3-15 2012년 일반 이동운항 중 측득된 피크 빙압력과 선속의 관계

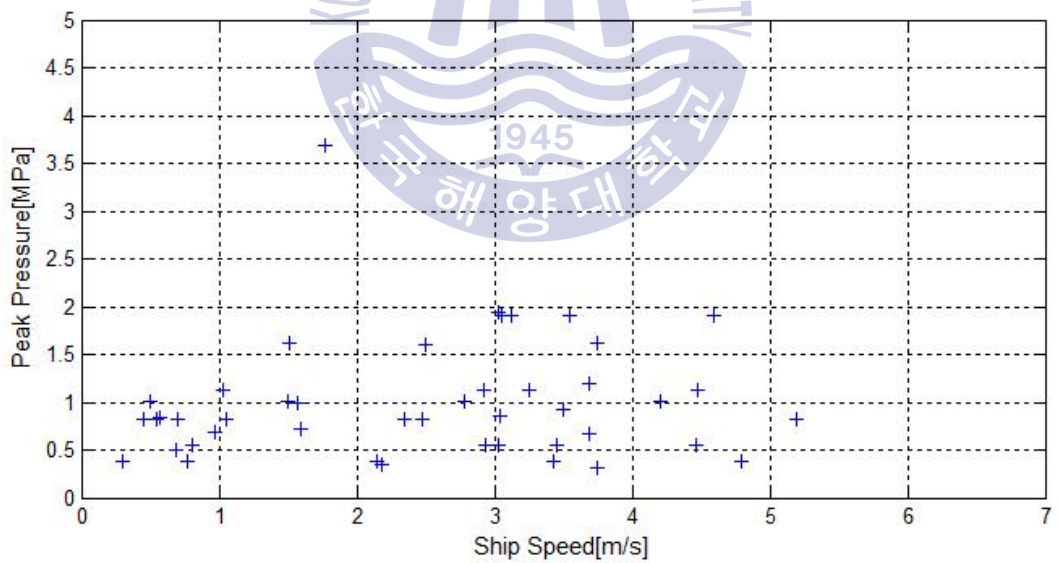


그림 3-16 2012년 �빙성능시험 중 측득된 피크 빙압력과 선속의 관계

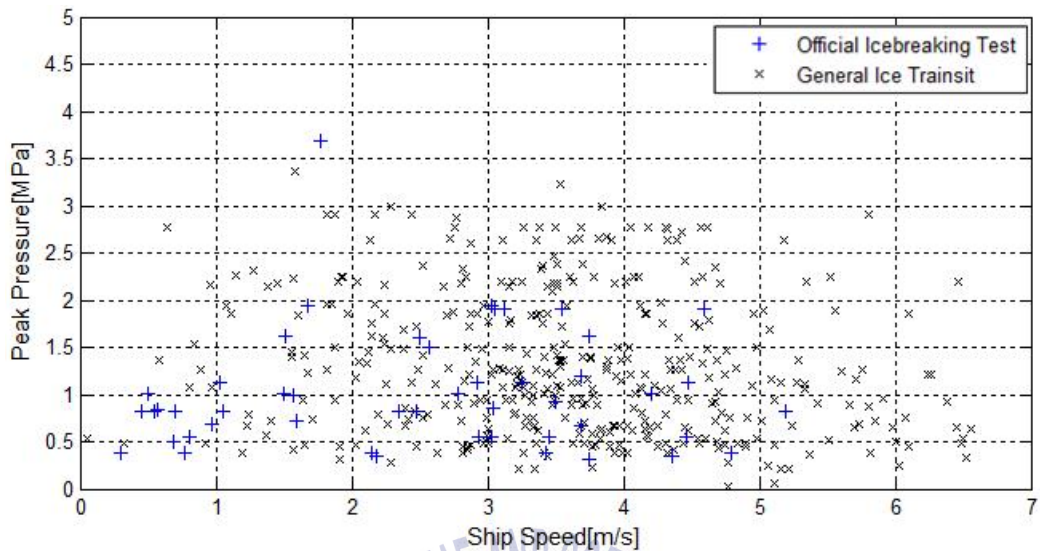


그림 3-17 2012년 쇄빙성능시험 및 일반 이동운항 중 계측된
피크 빙압력과 선속의 관계

그림 3-15, 3-16은 계산된 등가응력 중 15MPa 이상의 피크가 기록되었을 때 선체와 얼음과의 충돌을 하나의 이벤트로 간주하고 각 이벤트에서 발생하는 피크 등가응력의 최대값을 사용하여 각각 일반 이동운항 중 계측된 것과 공식 쇄빙시험 시 계측된 빙압력을 선속에 따라 그래프로 도시한 것이며, 그림 3-17에 전체 데이터에 대한 계산결과를 도시하였다. 일반운항 시 피크 빙압력의 최대값은 약 3.7MPa이고 공식시험 시 계산된 피크 빙압력의 최대값은 약 3.4MPa이다.

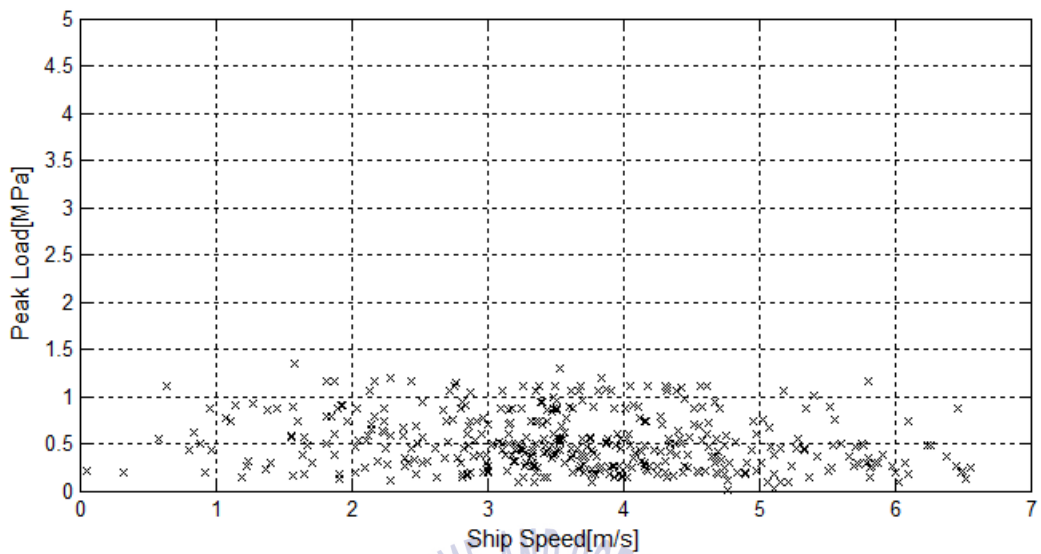


그림 3-18 2012년 일반 이동운항 중 계측된 피크 빙하중과 선속의 관계

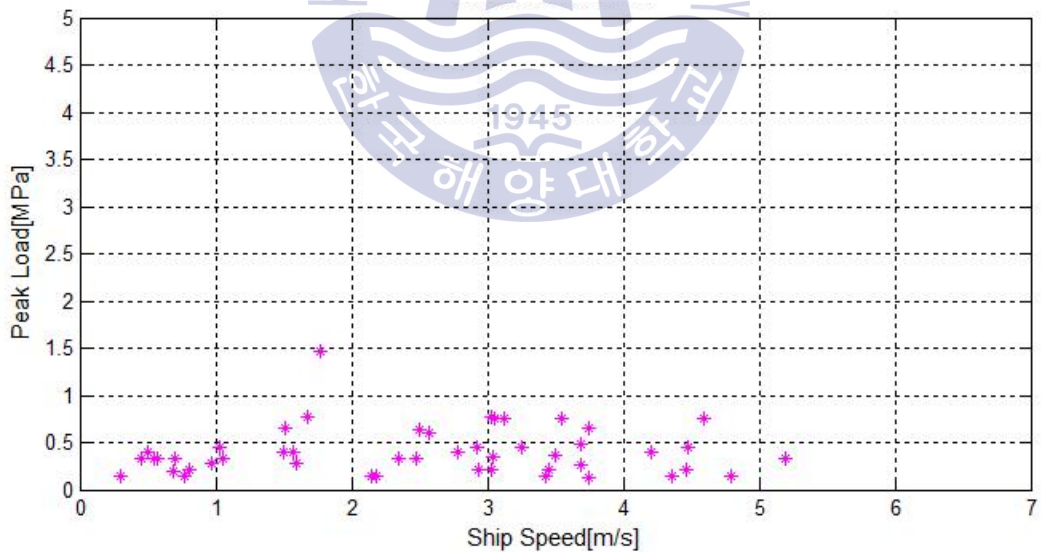


그림 3-19 2012년 쇄빙성능시험 중 계측된 피크 빙하중과 선속의 관계

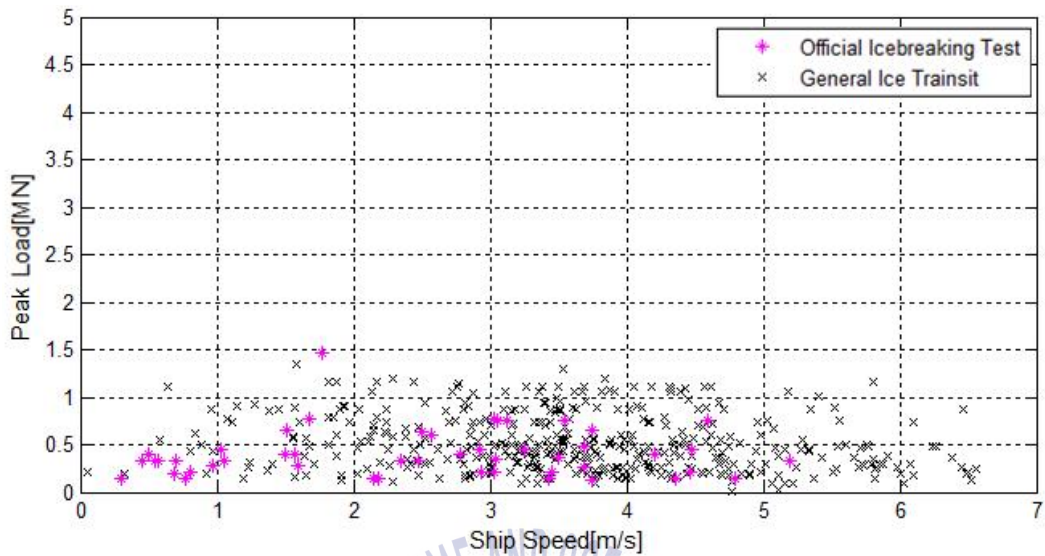


그림 3-20 2012년 쇄빙성능시험 및 일반 이동운항 중 측정된
피크 빙하중과 선속의 관계

그림 3-18, 3-19는 같은 이벤트 내에서 각각 일반 이동운항 중 측정된 것과 공식 쇄빙시험 시 측정된 피크 빙하중을 선속에 따라 그래프로 도시한 것이고, 그림 3-20은 전체 데이터에 대한 계산결과를 도시한 것이다. 일반운항 시 피크 빙하중의 최대값은 약 1.3MPa이며, 공식시험 시 계산된 피크 빙하중의 최대값은 약 1.5MPa이다.

2015년 북극탐사 시에는 현장의 사정으로 인해 공식 채빙시험은 수행되지 않았으므로 일반운항 중 기록된 33개의 시험 데이터만을 표 3-3에 정리하였다.

표 3-3 2015년 아라온호의 일반 이동운항 중 기록된 데이터

No.	Date	Time[UTC]	Latitude[S]	Longitude[E/W]
1	08.10	11:30 ~ 12:50	79-00-34.848 / 79-12-57.150	172-49-32.070 / 172-43-54.870[E]
2	08.10	14:20 ~ 16:20	79-27-35.658 / 79-44-09.888	172-37-43.902 / 172-21-00.972[E]
3	08.10	16:25 ~ 18:00	79-44-48.156 / 79-59-44.562	172-21-02.988 / 172-21-14.412[E]
4	08.11	00:05 ~ 02:00	80-05-10320 / 80-19-13.206	172-19-28.866 / 172-15-48.276[E]
5	08.11	02:05 ~ 03:15	80-20-06.930 / 80-29-43.254	172-14-41.946 / 172-10-33.708[E]
6	08.11	03:40 ~ 04:20	80-33-28.416 / 80-38-57.360	172-12-21.408 / 172-04-18.120[E]
7	08.11	04:30 ~ 05:15	80-39-22.788 / 80-44-10.050	172-02-03.444 / 172-02-06.348[E]
8	08.11	05:25 ~ 06:15	80-45-30.456 / 80-49-12.960	172-00-48.192 / 172-00-10.896[E]
9	08.14	05:15 ~ 05:55	80-46-21.096 / 80-42-15.150	172-58-31.422 / 173-17-13.560[E]
10	08.14	06:05 ~ 07:15	80-40-27.090 / 80-32-01.746	173-21-53.046 / 173-58-09.354[E]
11	08.14	07:45 ~ 08:00	80-29-42.618 / 80-29-02.682	174-09-30.420 / 174-20-48.684[E]
12	08.14	08:20 ~ 09:20	80-26-16.290 / 80-20-05.208	174-32-07.350 / 175-03-07.398[E]
13	08.14	10:05 ~ 10:22	80-14-56.856 / 80-13-13.554	175-12-08.736 / 175-19-22.506[E]
14	08.14	10:27 ~ 11:28	80-12-30.684 / 80-04-33.924	175-21-09.000 / 175-55-14.886[E]
15	08.14	12:17 ~ 14:15	79-58-59.604 / 79-43-16.248	176-15-53.790 / 177-33-23.484[E]
16	08.14	16:40 ~ 17:45	79-25-42.894 / 79-16-53.586	178-26-25.392 / 178-58-25.128[E]
17	08.14	17:50 ~ 20:15	79-15-59.544 / 78-59-28.710	179-01-35.412 / 179-56-56.832[E]
18	08.15	01:50 ~ 03:00	78-56-24.018 / 78-43-49.122	179-52-20.892 / 179-58-46.116[W]
19	08.15	03:10 ~ 04:05	78-42-23.772 / 78-42-14.604	179-58-42.408 / 179-58-40.584[W]
20	08.15	04:10 ~ 05:00	78-32-36.480 / 78-22-53.460	179-56-04.920 / 179-52-59.118[W]
21	08.15	05:15 ~ 06:15	78-21-00.072 / 78-14-47.892	179-49-59.118 / 179-46-15.690[W]
22	08.15	06:25 ~ 08:20	78-13-19.446 / 78-00-03.162	179-42-32.220 / 179-51-53.076[W]
23	08.15	13:05 ~ 14:05	77-59-08.202 / 77-59-50.316	179-25-25.374 / 178-38-40.038[W]
24	08.15	14:12 ~ 15:05	77-59-39.402 / 77-58-40.134	178-34-09.762 / 178-02-45.756[W]

25	08.15	15:10 ~ 16:07	77-58-28.794 / 77-58-57.918	177-58-23.946 / 177-09-36.060[W]
26	08.15	16:17 ~ 19:43	77-58-54.540 / 78-00-16.296	177-00-26.508 / 174-58-02.994[W]
27	08.16	01:20 ~ 02:42	77-52-33.876 / 77-48-52.452	172-53-43.914 / 171-50-29.166[W]
28	08.16	02:50 ~ 03:50	77-48-37.254 / 77-46-02.988	171-45-20.196 / 171-14-24.852[W]
29	08.16	04:09 ~ 05:10	77-44-52.314 / 77-43-16.872	171-09-21.180 / 170-21-58.470[W]
30	08.16	05:20 ~ 06:15	77-43-09.054 / 77-41-54.402	170-13-41.670 / 169-29-27.402[W]
31	08.18	11:38 ~ 14:38	77-00-26.154 / 76-59-59.034	172-37-37.674 / 174-59-56.682[W]
32	08.18	19:03 ~ 21:05	76-58-19.068 / 76-51-15.444	175-39-34.698 / 176-47-02.334[W]
33	08.18	21:07 ~ 22:55	76-51-17.154 / 76-50-49.488	176-48-39.936 / 178-17-22.890[W]



그림 3-21 아라온호의 2015년 북극 탐사활동

그림 3-22는 일반 이동운항 중 계측된 약 41시간 분량의 데이터를 계산한 등가응력과 속도의 그래프인데 2015년 북극 데이터는 모두 1축 게이지로 계측된 것이기 때문에 3.1.2절에서 언급한대로 Hooke의 법칙을 사용하지 않고 y축과 45도 축의 변형률을 0으로 가정하여 von Mises 등가응력식에 대입하였다. 계산된 최대값은 약 45MPa이다.

계산된 등가응력을 영향계수행렬을 이용하여 빙압력으로 환산하고 응력기준으로 15MPa 이상의 이벤트만을 분류하여 피크 빙압력을 속도에 관하여 나타낸 것이 그림 3-23이며, 이때 최대값은 약 0.98MPa이었다. 게이지 하나가 담당하는 면적이 $0.8\text{m} \times 0.5\text{m}$ 에 해당되므로 전체 계측부위에 가해진 피크 빙하중을 계산한 결과는 그림 3-24와 같고 그 최대값은 약 0.39MN이다.

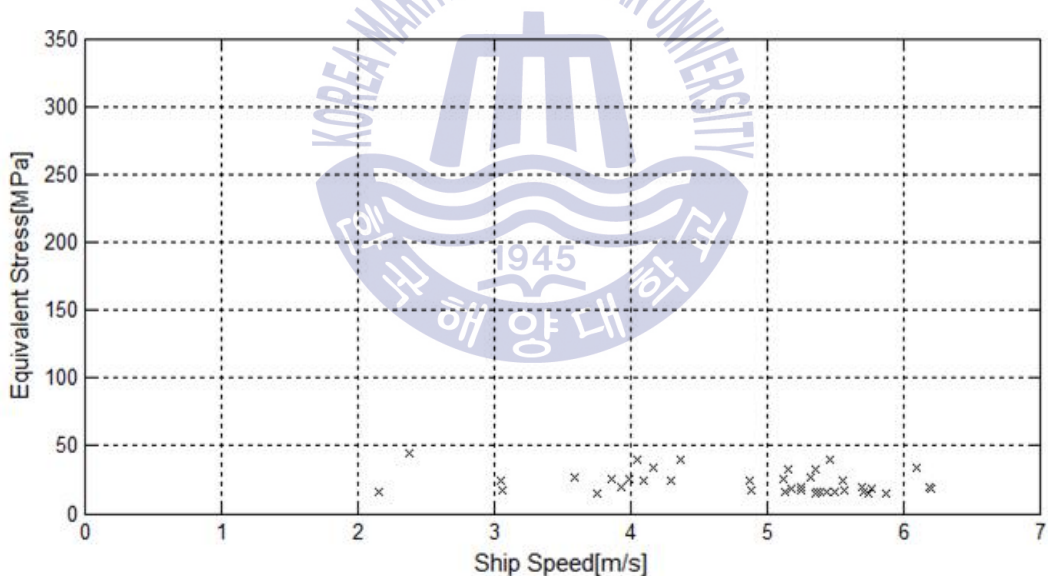


그림 3-22 2015년 일반운항 중 계측된 피크 등가응력과 선속의 관계

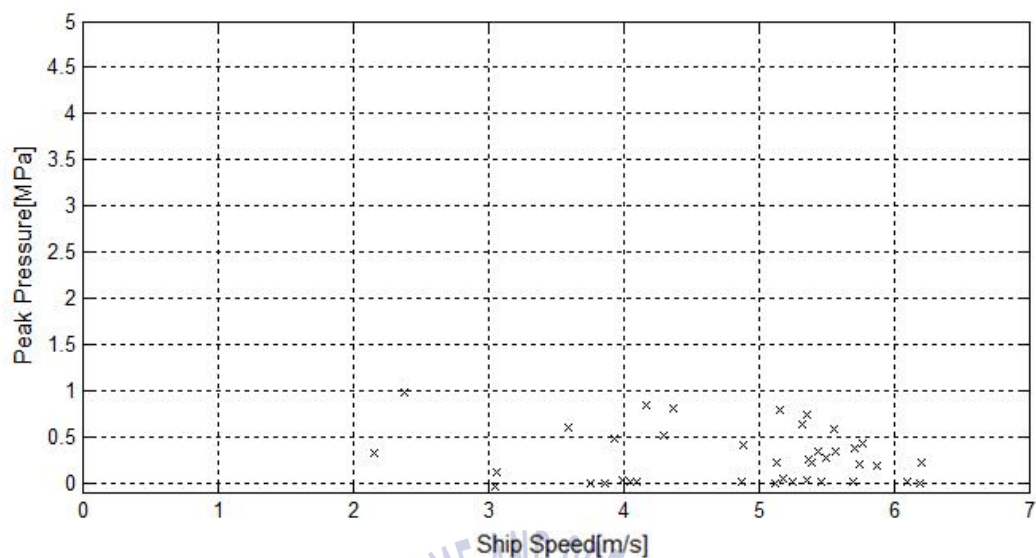


그림 3-23 2015년 일반운항 중 계측된 피크 빙압력과 선속의 관계

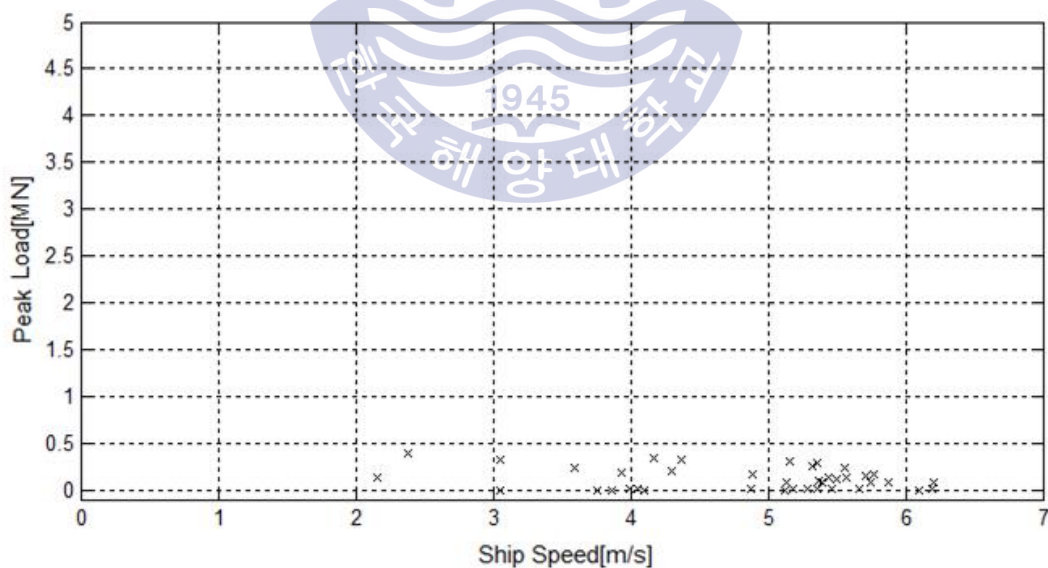


그림 3-24 2015년 일반운항 중 계측된 피크 빙하중과 선속의 관계

영향계수법을 사용하여 빙하중을 역추정하기 위해서는 먼저 구조해석 프로그램을 이용한 반복적 구조해석이 선행되어야 한다. 구조해석 결과로 얻어지는 영향계수행렬을 계산하는 과정에서 단위압력이 작용하는 면적이 계산결과에 영향을 주기 때문에 적합한 면적을 산정하는 것은 중요한 일이다. 본 연구에서는 가로 세로 각각 인접한 게이지와의 경계까지 거리를 사용하여 $0.8\text{m} \times 0.5\text{m}$ 를 하나의 게이지가 담당하는 면적으로 계산하였다.

실선계측 데이터로부터 빙하중을 역추정하여 최종적으로 얻어지는 선체 외판의 압력과 하중은 게이지 하나가 담당하는 면적에 해당하는 국부 빙하중인데 스트레인게이지가 부착된 선측부의 하중을 합산하여 국부 빙하중으로 정의하고, 이것을 다시 선박 전체에 가해지는 전체 빙하중과 비교하는 것이 타당하다고 판단된다.

그림 3-25은 2012년 남극탐사 시 일반 이동운항 중 계측된 데이터로부터 계산된 국부 빙하중과 선속의 관계이며, 좌현은 1번 게이지부터 10번 게이지까지 총 10개, 우현은 파손된 5번 게이지를 제외하고 1번 게이지부터 11번 게이지까지 총 10개로 각각 면적 $10 \times 0.8\text{m} \times 0.5\text{m}$ 에 작용하는 선측부 부근에서의 국부 빙하중을 계산한 결과이다. 그림 3-26은 공식 쇄빙성능시험 시 동일한 면적에 해당하는 국부 빙하중을 계산한 결과이고 그림 3-27은 모든 데이터의 계산결과를 도시한 것이다.

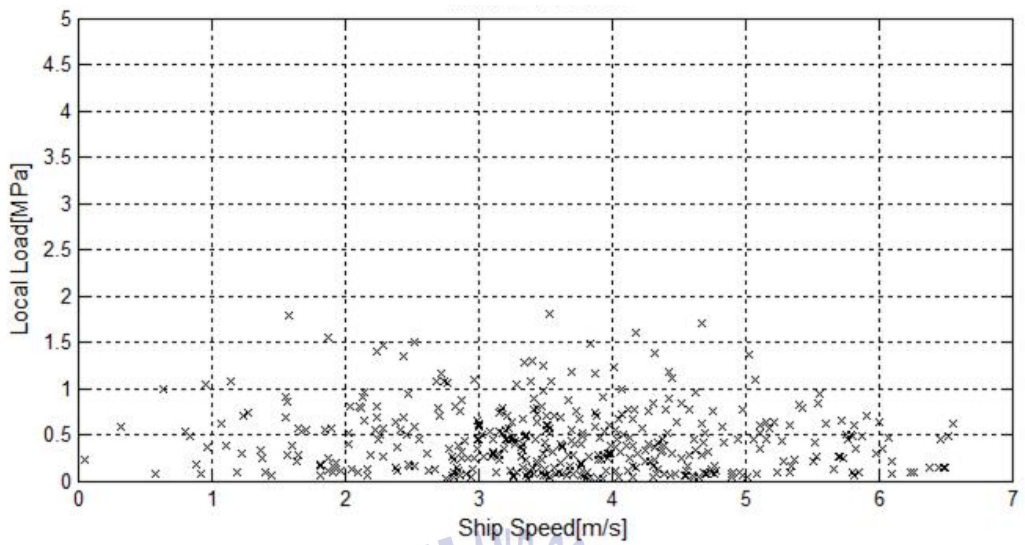


그림 3-25 2012년 일반 이동운항 중 계측된 국부 빙하중과 선속의 관계

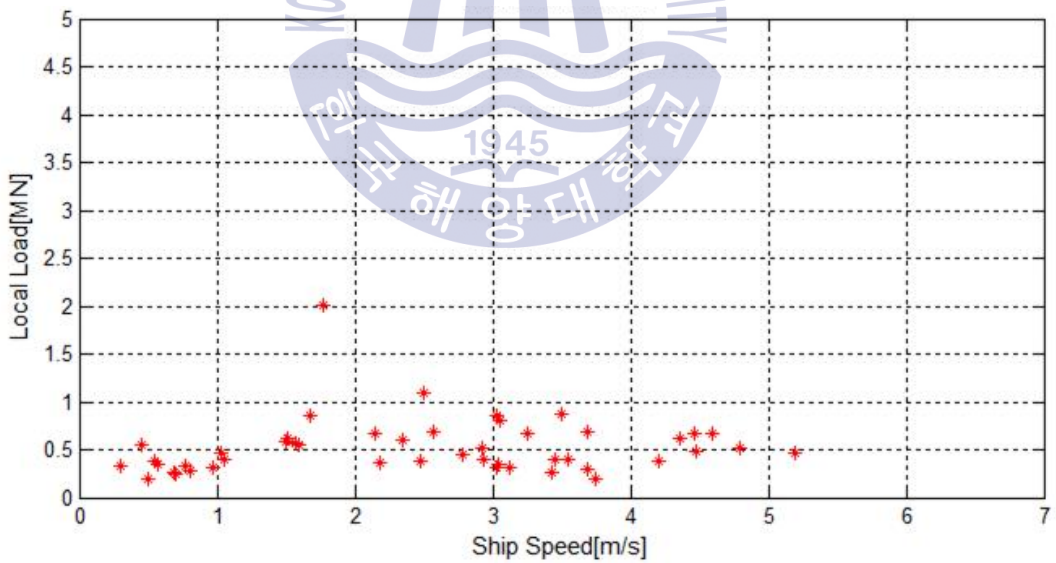


그림 3-26 2012년 쇄빙성능시험 중 계측된 국부 빙하중과 선속의 관계

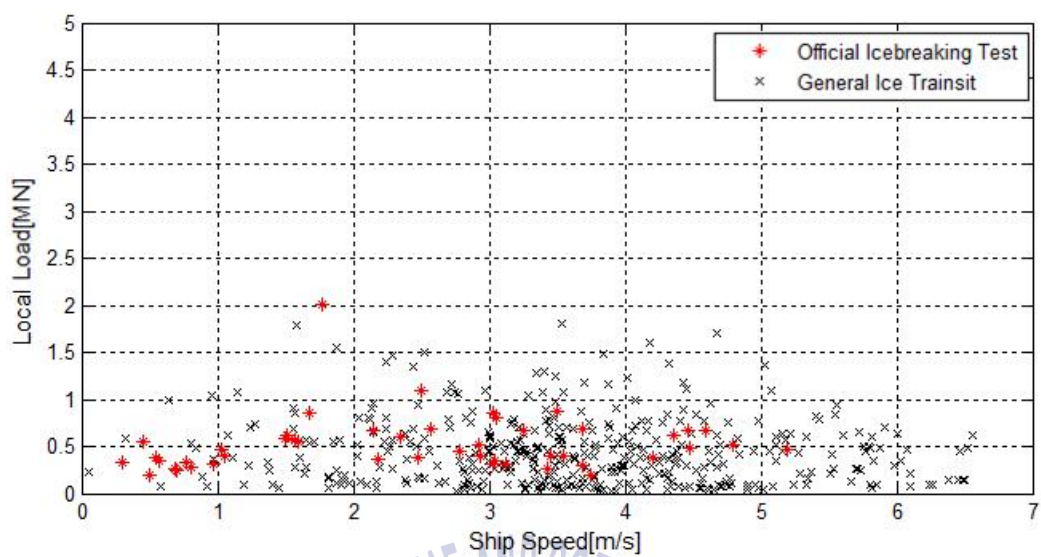


그림 3-27 2012년 쇄빙성능시험 및 일반 이동운항 중 계측된
국부 빙하중과 선속의 관계

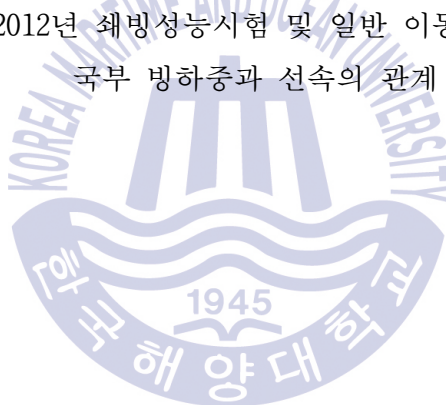


그림 3-28은 2015년 북극탐사 시 일반 이동운항 중 계측된 데이터로부터 계산된 국부 빙하중과 선속의 관계이며, 2012년 남극 데이터의 분석결과와 비교가 가능하도록 좌현은 전체 24개의 게이지 중 1~9, 11번 게이지를 사용하여 총 10개, 우현은 전체 12개의 게이지 중 1~9, 11번 게이지를 사용하여 총 10개로 각각 면적 $10 \times 0.8 \text{m} \times 0.5 \text{m}$ 에 작용하는 국부 빙하중을 계산하였다.

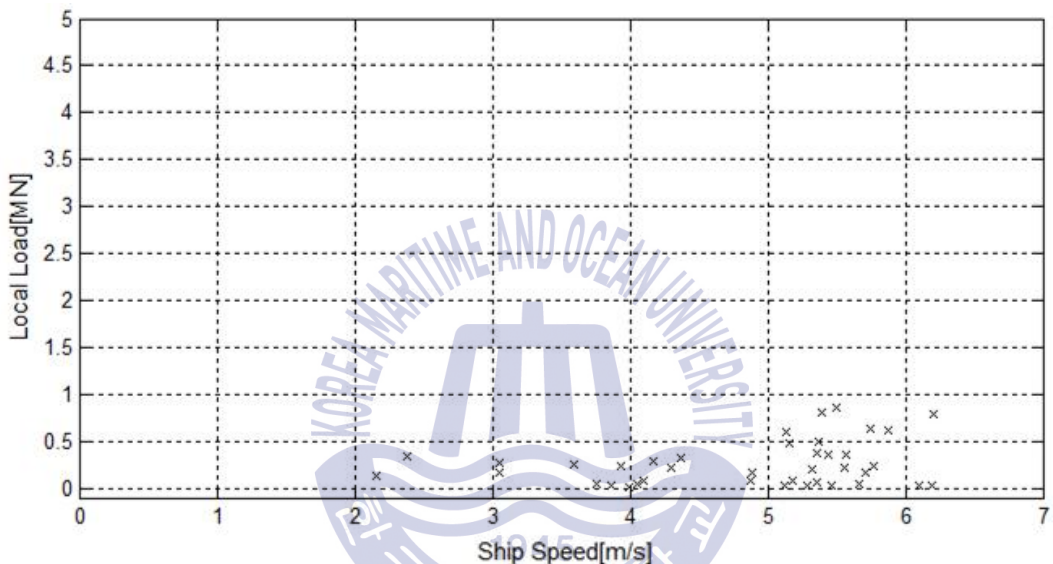


그림 3-28 2015년 일반 이동운항 중 계측된 국부 빙하중과 선속의 관계

그림 3-27과 비교해서 알 수 있듯이, 2015년 북극탐사 시 계측된 데이터는 기준치를 넘는 빙하중의 이벤트 수도 매우 적고 그 크기도 2012년 남극탐사 시에 계측된 데이터로부터 계산된 국부 빙하중 데이터에 비해 상대적으로 매우 작다는 것을 알 수 있다.

3.2 관성측정시스템 데이터를 이용한 전체 빙하중 계산

3.2.1 전체 빙하중 계산 절차

과거 캐나다의 Canadian Hydraulic Center에서는 스트레인게이지를 사용하여 쇄빙선박 선체에 가해지는 국부 빙하중을 계산하는 방법과 함께 선체를 강체로 가정하고 선박의 6-자유도 운동을 관성측정시스템을 통해 측정하여 전체 빙하중을 산정하는 방법을 제시한 바 있다(Johnston, et al., 2003, 2004).

이 방법을 적용하여 아라온호의 2012년 남극 및 2015년 북극탐사 시에도 3개의 가속도계와 3개의 각속도계로 구성된 관성측정시스템을 설치하였다. 그러나 앞서 언급했듯이 2012년 남극탐사 시 계측된 관성측정시스템 데이터는 심한 노이즈로 인하여 정상적인 신호를 확인하기가 불가능하여 본 논문에서는 2015년 북극탐사 시 계측된 데이터만을 사용하여 전체 빙하중을 산정하였다. 그림 3-29에서는 관성측정시스템을 통해 계측된 선박의 6-자유도 운동의 원본 데이터를 보여주고 있다.

Time [sec]	XRate [deg./sec]	YRate [deg./sec]	ZRate [deg./sec]	Xacc [g]	YAcc [g]	ZAcc [g]
0	-1.09E-02	-1.20E-02	-2.07E-02	4.20E-01	-2.22E+01	5.11E-01
0.1	-1.23E-02	-1.66E-02	-2.27E-02	3.92E-01	-2.21E+01	4.65E-01
0.2	-8.29E-03	-1.81E-02	-2.27E-02	3.00E-01	-2.21E+01	4.77E-01
0.3	-9.07E-03	-1.48E-02	-2.28E-02	1.85E-01	-2.19E+01	5.01E-01
0.4	-1.12E-02	-1.31E-02	-1.96E-02	2.92E-01	-2.20E+01	5.28E-01
0.5	-1.01E-02	-1.31E-02	-1.69E-02	4.33E-01	-2.21E+01	5.21E-01
0.6	-8.38E-03	-1.52E-02	-1.77E-02	5.01E-01	-2.21E+01	4.85E-01
0.7	-9.02E-03	-1.63E-02	-1.94E-02	4.25E-01	-2.21E+01	5.15E-01
0.8	-1.01E-02	-1.46E-02	-1.85E-02	3.35E-01	-2.20E+01	4.98E-01
0.9	-8.38E-03	-1.30E-02	-2.06E-02	2.96E-01	-2.20E+01	4.92E-01
1	-1.12E-02	-1.75E-02	-2.11E-02	3.89E-01	-2.21E+01	4.91E-01
1.1	-1.17E-02	-1.08E-02	-1.90E-02	4.70E-01	-2.21E+01	4.76E-01
1.2	-9.84E-03	-1.52E-02	-1.81E-02	3.46E-01	-2.20E+01	5.08E-01
1.3	-1.34E-02	-1.42E-02	-2.12E-02	2.66E-01	-2.20E+01	4.76E-01
1.4	-9.37E-03	-1.76E-02	-1.88E-02	3.24E-01	-2.20E+01	4.91E-01
1.5	-1.14E-02	-1.29E-02	-2.23E-02	4.78E-01	-2.22E+01	4.49E-01
1.6	-1.40E-02	-1.19E-02	-2.18E-02	5.27E-01	-2.20E+01	4.79E-01
1.7	-1.05E-02	-1.51E-02	-2.08E-02	4.36E-01	-2.20E+01	4.96E-01
1.8	-1.34E-02	-1.96E-02	-1.93E-02	2.76E-01	-2.20E+01	5.03E-01
1.9	-8.21E-03	-1.25E-02	-1.70E-02	2.18E-01	-2.20E+01	5.16E-01
2	-8.68E-03	-1.71E-02	-2.08E-02	4.44E-01	-2.22E+01	4.70E-01
2.1	-1.17E-02	-1.24E-02	-2.28E-02	5.06E-01	-2.20E+01	4.47E-01
2.2	-9.58E-03	-1.45E-02	-2.10E-02	4.47E-01	-2.20E+01	4.64E-01
2.3	-1.06E-02	-1.74E-02	-1.77E-02	3.78E-01	-2.20E+01	4.49E-01

그림 3-29 관성측정시스템을 통해 계측된 데이터 예

관성측정시스템으로 계측된 데이터를 분석하기 위해서는 먼저 5Hz 이하의 선체 운동영역을 제외한 불필요한 노이즈를 제거한다. 다음으로는 계측된 X, Y, Z 방향의 가속도와 각속도 데이터를, 미분과 적분을 통해 6자유도 운동방정식을 풀기위한 각가속도와 속도 및 변위로 계산하여 식(7)의 운동방정식에 대입한다(Johnston, et al., 2003).

$$[M + M_a]A + [B]V + [C]D = F \quad (7)$$

여기서 A, V, D 는 각각 가속도, 속도, 변위를 의미하며, M 은 선체의 질량 계수, M_a 는 부가질량 계수, B 는 감쇠계수 C 는 복원력 계수를 의미한다. 본 논문에서 사용된 전체 질량, 감쇠 및 복원력 계수는 KRISO(선박해양플랜트연구소)에서 수행된 쇄빙연구선 아라온호의 모형시험으로 구해진 값을 사용하였다.

운동방정식을 통해 X, Y, Z축 방향에서의 외력 F_X, F_Y, F_Z 가 계산되면 식(8)을 사용하여 선체에 작용하는 전체 빙하중을 무게중심에 대하여 계산하거나 혹은 충돌위치에 대하여 계산할 수 있다(Johnston, et al., 2003).

본 연구에서는 선체와 얼음이 충돌하는 위치를 정확히 계산할 수 없을 뿐만 아니라 얼음과의 충돌위치가 동시다발적으로 변하기 때문에 식(9)를 사용하여 선체의 무게중심에 대한 전체 빙하중으로 계산하였다.

$$F = \sqrt{(F_X)^2 + \left(\frac{M_Z}{X_{ab}}\right)^2 + \left(\frac{M_Y}{X_{ab}}\right)^2} \quad (8)$$

$$F = \sqrt{(F_X)^2 + (F_Y)^2 + (F_Z)^2} \quad (9)$$

3.2.2 전체 빙하중 계산결과

본 연구에서 관성측정시스템 데이터를 이용하여 계산한 전체 빙하중은 3.2.1 절에서 언급했듯이 선체를 강체로 가정하고 그림 3-30과 같이 무게중심에 대하여 계산된 결과이다.

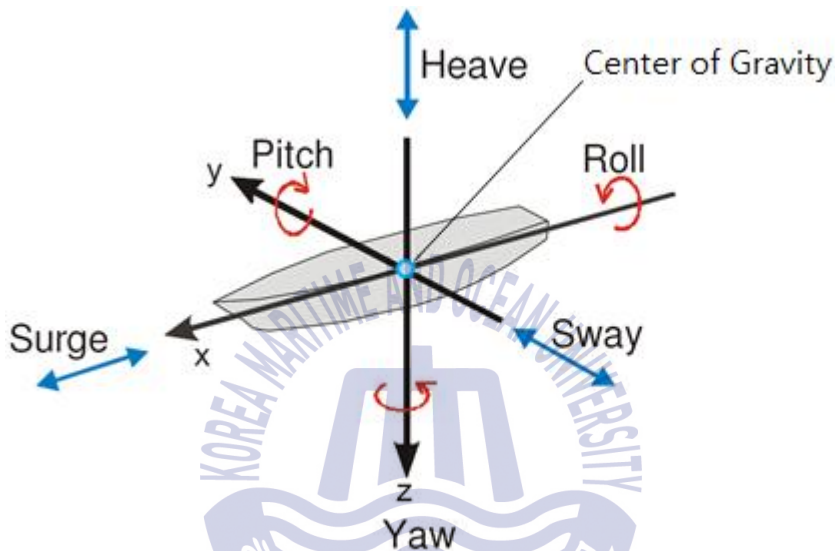


그림 3-30 선체 무게중심에서의 3축 힘과 모멘트

그림 3-31은 2015년 33개의 계측 데이터 중 No.1 시험의 데이터를 가지고 계산한 결과이다. 첫 번째 그래프는 스트레인게이지로부터 계측된 데이터와 동일한 시간에 대하여 관성측정시스템 데이터를 선박의 6-자유도 운동방정식을 풀어 계산한 시계열 분석결과이며, 두 번째 그래프는 1MN 이상의 전체 빙하중을 이벤트 별로 분류하여 피크 값들을 같은 시간에 대하여 도시한 것이고 세 번째 그래프는 GPS를 통해 계측된 선박의 속도와 동기화한 것이다.

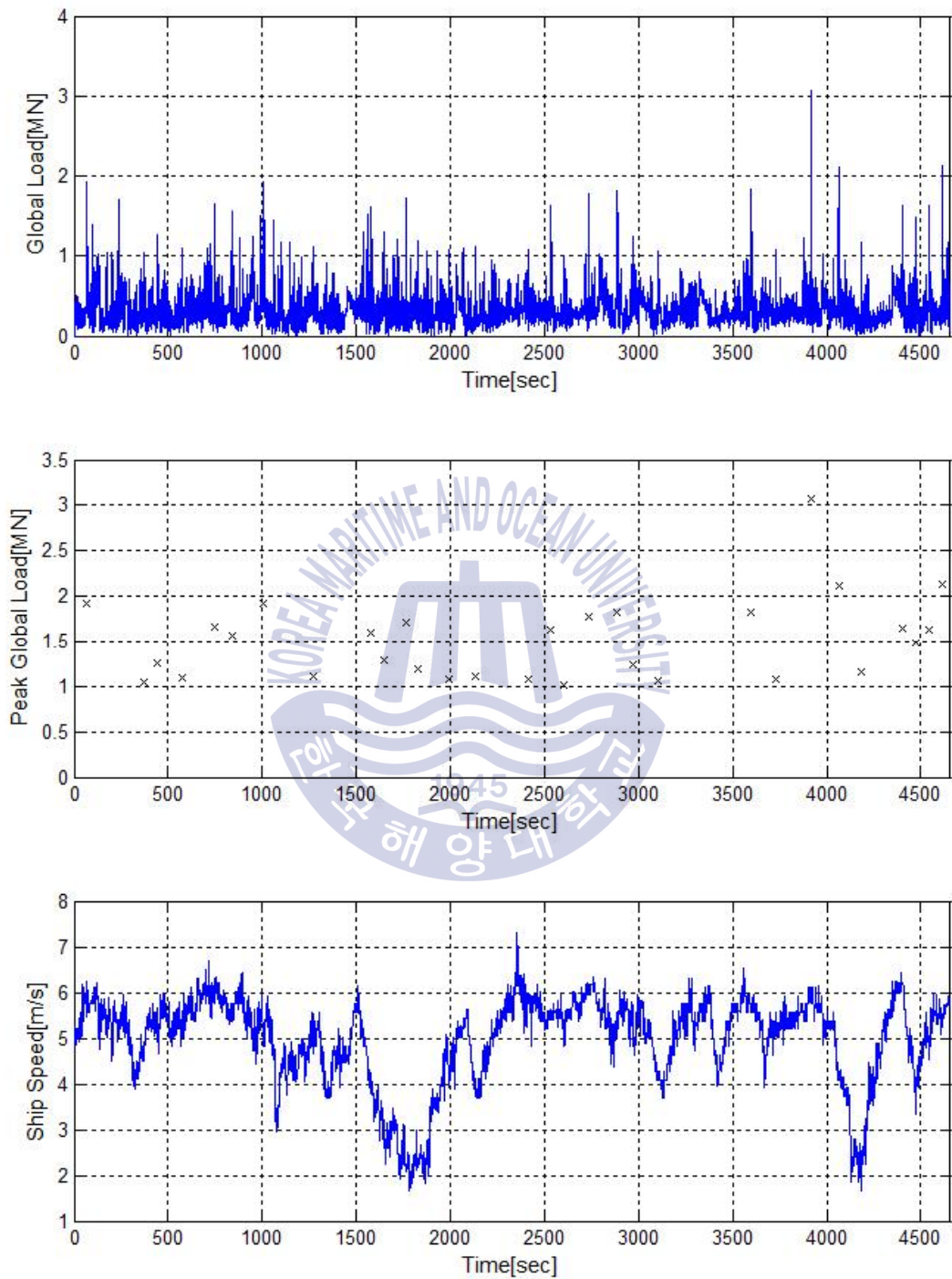


그림 3-31 관성측정시스템 데이터를 사용하여 계산된 전체 빙하중

관성측정시스템을 통해 계측된 데이터를 스트레인게이지 데이터와 비교하기 위하여 동일한 시간으로 분류하였고, 정리된 총 30개의 모든 데이터를 그림 3-32와 같이 전체 빙하중 1MN 이상의 이벤트로 분류하여 아라온호의 이동속도에 따라 도시하면 그림 3-26과 같으며, 평균값은 약 1.5MN이고 최대값은 4.1MN으로서 No.4 시험에서 발생하였다.

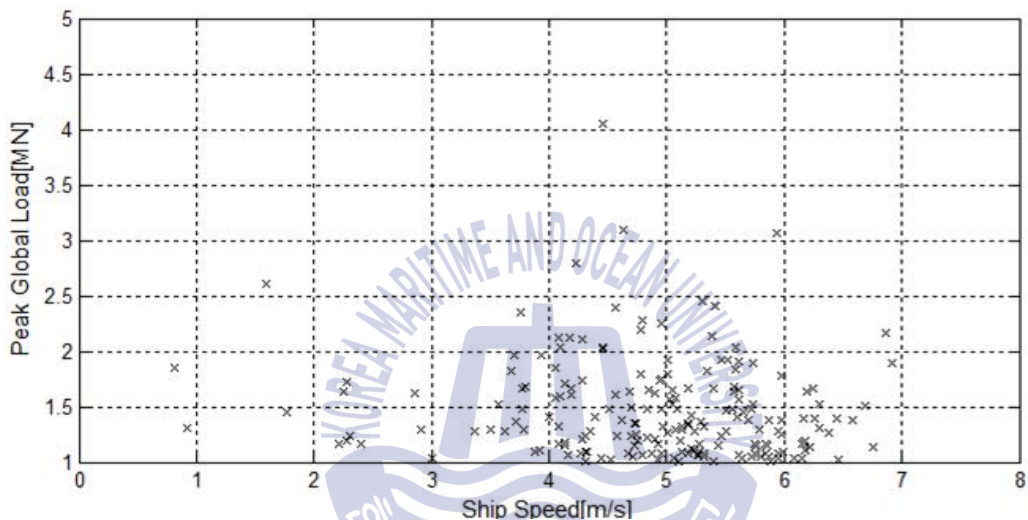


그림 3-32 관성측정시스템 데이터를 사용하여 계산된 전체 빙하중과 선속의 관계

4. 국부 빙하중 및 전체 빙하중 결과 비교

4.1 2012년 남극 및 2015년 북극 데이터의 국부 빙하중 계산결과

3.1.3절에 나타난 게이지 하나가 담당하는 피크 등가응력과 피크 빙압력, 피크 빙하중 그리고 스트레인게이지가 부착된 아라온호 선측부에서의 국부 빙하중에 관한 2012년 남극 및 2015년 북극 데이터 분석결과를 표 4-1에 정리하였다.

결과를 살펴보면 2012년 남극탐사 시 아라온호에 작용한 피크 등가응력은 평균 50.1MPa 정도로 2015년 북극탐사 시 계측된 피크 등가응력의 평균 22.2MPa 보다 2.3배 정도로 높게 나왔으며, 피크 등가응력의 최대값은 182.8MPa로 북극에서의 피크 등가응력의 최대값 45.0MPa 보다 4.1배 가량 높게 나온 것을 확인할 수 있다. 피크 등가응력과 피크 빙압력, 피크 빙하중과 국부 빙하중을 전체적으로 봤을 때 남극탐사 시 아라온호에 작용한 힘이 북극탐사 시 보다 대략 2~4배 정도 큰 것으로 확인되었다. 그러나 이것은 남극 얼음의 강도가 북극 얼음의 강도보다 전반적으로 높음을 의미하는 것이 아니라 2012년 남극 및 2015년 북극에서 수행된 아라온호의 실선계측시험 시 얼음의 강도와 상황에 국한된 것이다.

또한 본 연구에서의 남극 및 북극 데이터 분석결과는 모든 데이터에서 15MPa 이상의 선체외판 응력을 받는 데이터들을 추출하고 얼음과의 충돌로 발생하는 신호들을 이벤트 단위로 나누어 최대값과 평균값을 계산하였다. 최대값은 시계열에 따른 분석과 동일할 수 있으나 선박이 해빙의 밀집도가 낮은 지역을 통과할 때 계측되는 불필요한 데이터들을 걸러낸다는 점에서 표 4-1의 결과가 보다 목적에 적합한 계산결과라고 보여 진다.

표 4-1 2012년 남극 및 2015년 북극 데이터 분석결과

	2012 Antarctic		2015 Arctic	
	Max	Mean	Max	Mean
Peak Equivalent Stress [MPa]	182.79	50.134	44.997	22.242
Peak Pressure [MPa]	3.6827	1.1037	0.9794	0.4719
Peak Load [MN]	1.4731	0.4415	0.3917	0.1888
Local Load [MN]	2.0168	0.6015	0.8565	0.3826



4.2 국부 및 전체 빙하중 계산결과 비교

표 4-2는 스트레인게이지로 계산한 국부 빙하중과 6-자유도 운동계측으로 계산한 전체 빙하중을 비교한 것인데 앞서 언급했듯이 2012년 데이터의 심한 노이즈로 인해 6-자유도 운동계측 데이터는 사용할 수 없어 비교가 불가능하였으며, 2015년 북극 데이터만 사용하여 비교했을 때 전체 빙하중은 국부 빙하중의 최대값 기준 약 4.7배, 평균값 기준 약 3.8배 정도로 높게 산정되는 것을 확인할 수 있었다. 최대값과 평균값 모두를 고려했을 때 스트레인게이지를 이용하여 계산된 선측부 부근의 국부 빙하중과 선박 전체에 작용하는 전체 빙하중은 대략 3~4배 정도의 차이를 나타냈다.

스트레인게이지 데이터를 이용하여 계산된 국부 빙하중으로부터 선박 전체에 작용하는 전체 빙하중을 정확히 산정하는 것은 매우 어려운 일이다. 특히 쇄빙 시 가장 큰 하중이 작용하는 선수부에는 선박의 구조적 특성상 스트레인게이지를 부착하여 빙하중을 산정하는 작업이 불가능하기 때문에 모형실험을 통하여 스트레인게이지가 부착된 국부 면적에 작용하는 하중과 전체 면적에 작용하는 하중 사이의 관계를 유도하거나 쇄빙 시 전체와 해빙의 응답 모델을 구현하여 구조해석 프로그램의 반복적 해석을 통한 선박 전체의 영향계수행렬을 계산해 내는 연구가 필요할 것으로 판단된다.

표 4-2 국부 빙하중과 전체 빙하중 비교

		2012 Antarctic		2015 Arctic	
		Max	Mean	Max	Mean
Local Load using the S/G	[MN]	2.0168	0.6015	0.8565	0.3826
Global Load using the Motion	[MN]			4.0530	1.4678

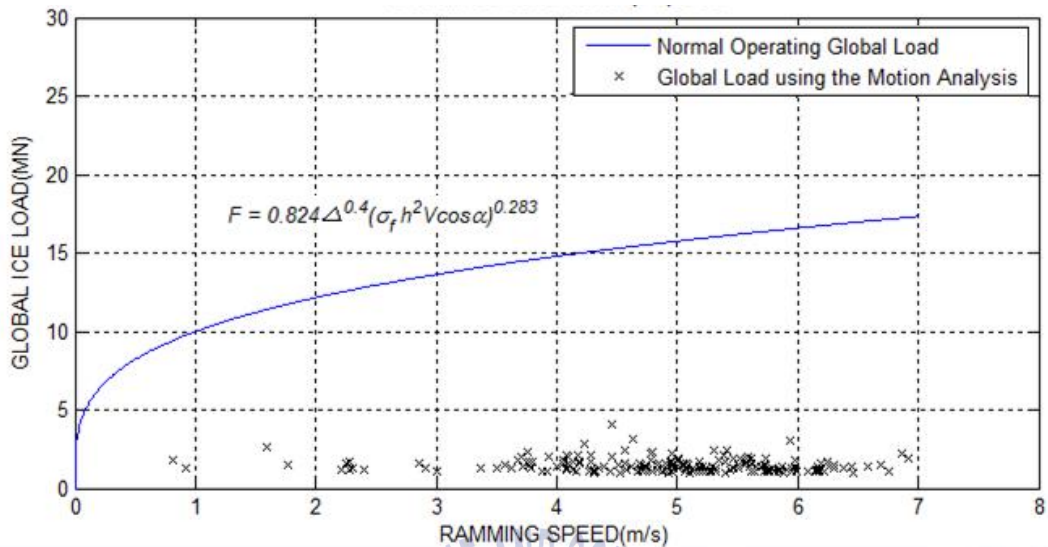


그림 4-1 정상운항 상태에서의 전체 빙하중 추정식과 관성측정시스템을 이용한 전체 빙하중

그림 4-1은 실측 데이터를 바탕으로 선박의 속도에 따라 전체 빙하중을 추정하는 외국의 선행연구들을 정리하여(최경식과 정성엽, 2008) 선박의 속도와 배수량의 함수로 도출한 전체 빙하중 추정식(Choi & Jeong, 2008; 최경식 등, 2009)과 본 연구에서 계산된 전체 빙하중을 비교한 것이다.

그림 4-1은 본 연구에서 계산된 전체 빙하중 결과가 전체 빙하중 추정식에 비하여 전체적으로 낮은 범위에 있음을 보여준다. 전체 빙하중 추정식의 정확한 검증 위해서는 얼음의 강도가 높은 빙해역을 대상으로 좀 더 많은 실선계 측시험이 수행될 필요가 있다고 판단된다.

5. 빙하중 산정 전산 프로그램 개발

5.1 빙하중 계산을 위한 전산 알고리즘

빙해역을 운항하는 쇄빙선박에 스트레인게이지와 같은 계측장치를 설치하여 실선계측자료를 분석하는 것은 선체에 작용하는 빙하중 크기를 추정하는 가장 정확한 방법이지만 많은 비용과 노력에 비해 얻을 수 있는 데이터의 양이 제한적이기 때문에 많은 양의 데이터를 확보하는 것과 더불어 데이터를 정확하고 안정적으로 계측하는 것은 매우 중요한 일이다(천은지 등, 2014).

아라온호 건조 이래 매년 극지해역에 대한 탐사가 수행되고 있으며, 선체 외판에 부착된 스트레인게이지로부터 계측된 데이터와 관성측정시스템으로부터 기록된 데이터를 분석하여 아라온호가 빙해역 운항 중 받는 빙하중을 추정할 수 있다. 그러나 계측된 데이터들의 주파수가 동일하지 않거나 노이즈가 심한 경우에는 데이터의 분석이 불가능한 경우도 종종 발생한다. 이러한 문제의 해결을 위해서는 계측된 데이터의 계측과 동시에 처리하고 기본적인 계산과정을 거쳐 계측장치 및 데이터의 이상 유무를 확인하는 작업이 필요하다. 그러나 스트레인게이지 데이터만 보더라도 50Hz의 주파수로 대략 1~2시간 동안 연속으로 계측되는 경우 데이터의 크기가 매우 크고 변형률로부터 빙하중을 계산하기 까지 많은 시간이 소요되기 때문에 데이터를 빠르게 처리하는 데 어려움이 있다.

본 연구에서는 빙해역 운항 중에도 스트레인게이지와 관성측정시스템 데이터에 관한 분석이 가능하도록 MATLAB을 이용한 빙하중 산정 전산 프로그램을 개발하였으며, 별도의 계산과정을 거치지 않고서도 손쉽게 계측된 변형률의 이상 유무와 등가응력, 압력, 국부 및 전체 빙하중에 관한 결과 분석이 가능하도록 구현하였다. 다만 앞서 4장에서 수행된 2012년 총 21번, 2015년 총 33번에 걸쳐 계측된 남극 및 북극 데이터 전체의 대한 비교 분석을 위해서는 모든 데

이터를 하나의 데이터 파일로 통합하는 데이터 가공과정을 거쳐야 한다. 이러한 작업은 각각의 시험에서 측정된 시간 뿐 아니라 파손된 게이지의 수, 데이터 시프트로 발생하는 노이즈 정도가 각기 다르기 때문에 이런 경우에는 본 연구에서 개발한 빙하중 산정 전산 프로그램을 사용하는 대신 MATLAB으로 반자동식 코드를 작성하여 처리하였다.

한편, 계산된 피크 등가응력, 압력, 하중의 결과를 개발된 프로그램 내에서 선속과 비교하기 위해서는 스트레인게이지로부터 측정되는 변형률 데이터와 GPS 장비로 측정되는 속도 데이터의 입력을 하나의 소프트웨어로 처리하여 두 데이터의 동기화는 물론 동일한 주파수의 신호로 받아들일 수 있어야 한다. 또한 속도 데이터는 스트레인게이지 데이터와는 달리 단일신호이기 때문에 장비의 파손이나 노이즈가 발생한 경우에는 변형률 데이터의 보정과 같은 간단한 작업만으로 처리할 수 없기 때문에 개발된 프로그램만으로는 처리하기 힘들다.

그러나 본 연구에서 개발된 빙하중 산정 전산 프로그램은 앞서 언급했듯이 빙해역 실선계측시험이 진행되는 동안 선박 내에서도 복잡한 계산과정없이 빠르게 데이터를 처리할 수 있을 뿐만 아니라 국부 및 전체 빙하중에 대한 시계열 그래프를 확인하여 장비의 이상 유무를 판단하고 빙하중 결과를 시각적으로 쉽게 확인하는 데 주된 목적이 있다.

그림 5-1은 본 연구에서 개발된 국부 및 전체 빙하중 산정 전산 프로그램의 알고리즘이다. 지금까지 아라온호의 실선계측시험을 통해 측정된 모든 스트레인게이지 데이터와 관성측정시스템 데이터는 측정기가 달라 각각의 데이터로 개별 저장되었기 때문에 프로그램 구동을 위해 필요한 입력 데이터 역시 S/G Data와 Motion Data로 각각 나누어 불러들이는 시스템으로 구성하였다.

국부 빙하중을 계산하기 위하여 스트레인게이지 데이터를 불러오면 3.1.2절의 결과를 토대로 1축 게이지가 부착된 경우에 한하여 y축과 45도 축의 변형률을 0으로 가정한 후 von Mises 등가응력식을 사용하여 등가응력이 계산된다. 등가

응력이 계산되면 미리 설정해 둔 영향계수행렬과 면적을 이용하여 빙압력과 빙하중으로 환산된다. 이러한 과정은 입력 데이터를 불러옴과 동시에 자동으로 계산되도록 하였으며, 사용자가 확인하고자 하는 게이지를 선택하면 결과 그래프가 나타나도록 하였다.

한편 관성측정시스템 데이터를 입력 데이터로 하여 전체 빙하중을 계산하는 과정은 3.2.1절에서 설명한 내용과 동일하다. 다만 개발된 프로그램에서는 무게 중심에 대한 전체 빙하중 뿐 아니라 충돌위치에 대한 전체 빙하중 결과도 확인할 수 있으며, 이때 사용되는 Moment arm 즉, 선체의 무게중심에서부터 해빙과 충돌이 일어날 것으로 예상되는 지점까지의 횡방향 길이는 58.5m로 초기값을 설정해 두었다.

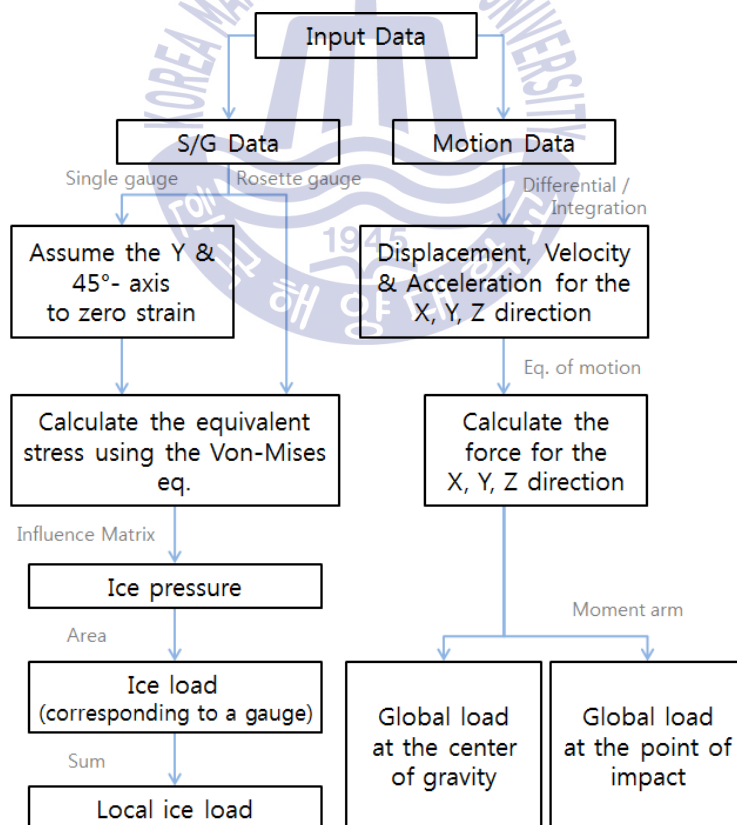


그림 5-1 빙하중 산정 프로그램 알고리즘

쇄빙선박이 운항중에 해빙과 충돌하여 발생하는 선체 외판의 응력이나 이로 부터 역추정된 압력 또는 하중의 신호변화는 짧은 순간 피크값들을 만들어내는데 흔히 이러한 하나의 짧은 충돌과정을 하나의 이벤트라고 하며, 선체와 해빙의 충돌을 이벤트 단위로 분류하여 분석하는 것은 불필요한 데이터를 제거하여 해석결과의 오차를 줄일 수 있는 효과적인 방법이다. 그러나 일반적으로 하나의 이벤트는 1~3초 정도로 짧은 순간에 발생하기 때문에 수십 시간에 이르는 모든 데이터를 눈으로 분류하는 것은 매우 어려운 작업이다.

본 논문에서는 이러한 문제점을 해결하기 위하여 시간에 따른 등가응력, 압력, 국부 및 전체 빙하중의 계산결과가 얻어지면 MATLAB으로 작성한 코드를 사용하여 전체 데이터를 모두 이벤트 단위로 자동 분류하였다. 그림 5-2는 2015년 북극탐사 시 계측된 첫 번째 시험의 처음 15분간의 데이터를 대상으로 양현의 국부 빙하중 합을 계산한 후 1MN 이상을 기준으로 하여 이벤트로 분류한 것이며, 정상적으로 좋은 결과가 얻어짐을 확인할 수 있었다.

그림 5-3은 자동으로 이벤트를 분류할 수 있는 알고리즘이고 그림 5-4는 그림 5-2와 같은 시간에 대하여 이벤트가 발생할 때 선박의 운항속도를 나타낸다. 그림 5-5는 그림 5-2와 5-4를 이용하여 국부 빙하중과 선속에 관계를 나타내고 있다.

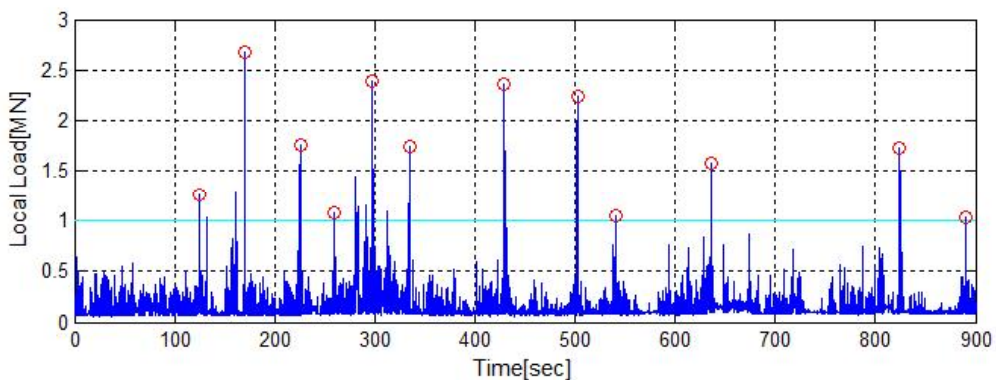


그림 5-2 이벤트 자동 분류 결과의 예

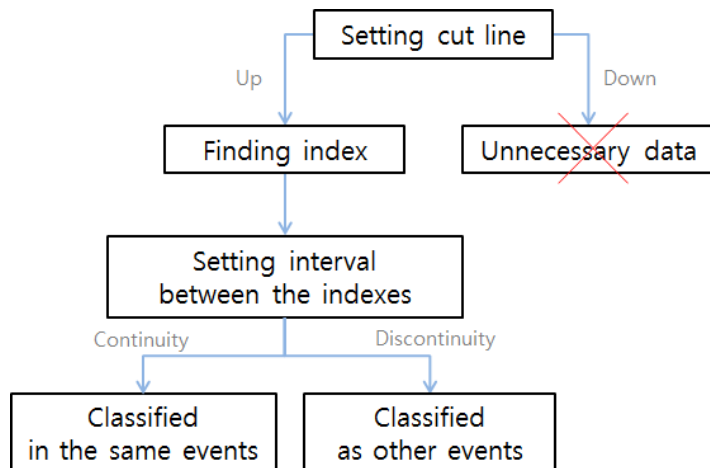


그림 5-3 이벤트 자동 분류 알고리즘

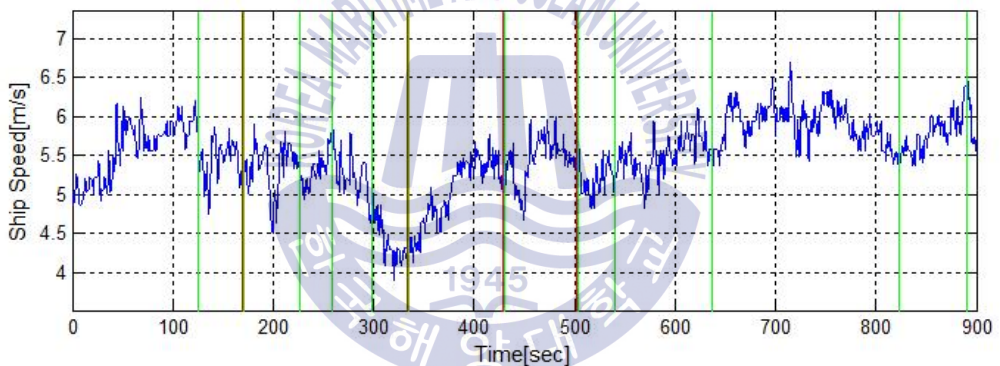


그림 5-4 자동 분류된 각 이벤트에서의 선속

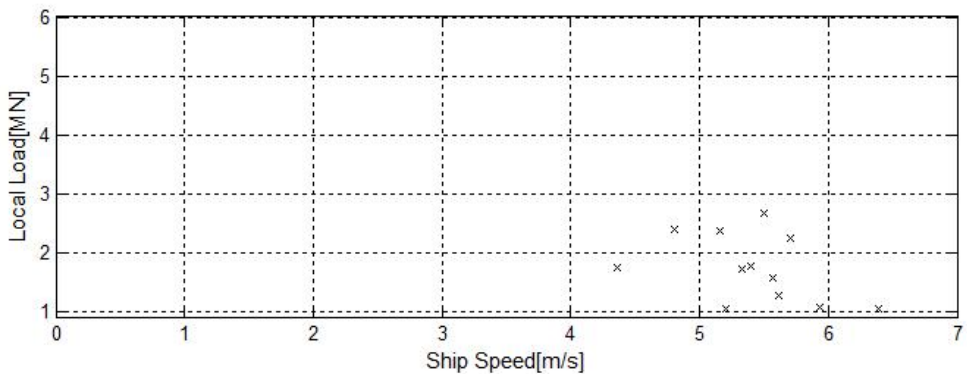


그림 5-5 이벤트 자동 분류로 얻어진 국부 빙하중과 선속의 관계 예

5.2 빙하중 산정 프로그램의 구성

그림 5-6은 본 연구에서 개발한 빙하중 산정 전산 프로그램의 메인화면이며, 크게 6개의 탭(Information, Open data, S/G Graph, Local Load, Global Load, Motion Pack Graph)으로 분리하였다.

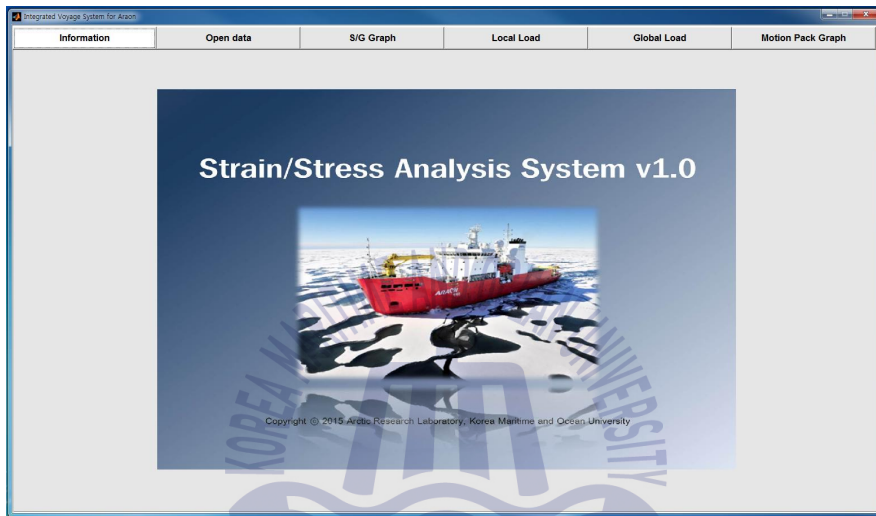


그림 5-6 빙하중 산정 전산 프로그램 메인화면

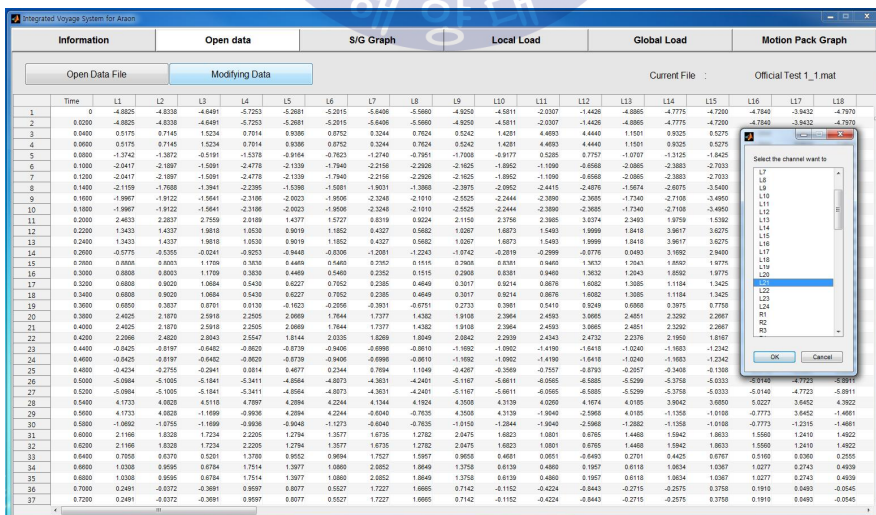


그림 5-7 ‘Open Data’ 및 ‘Modifying Data’ 화면

프로그램 구성을 살펴보면 그림 5-7과 같이 두 번째 탭 ‘Open data’ 는 스트레인게이지 데이터 즉, 변형률을 불러와 데이터에 이상이 있는 게이지가 있는지 확인하고 고장으로 인해 손상된 게이지의 경우 ‘Modifying Data’ 버튼을 눌러 양옆의 게이지로부터 측정된 변형률로부터 선형적으로 보정이 가능하도록 하였다. 그림 5-7은 2015년 북극탐사시 측정된 데이터 중 No.1을 불러온 것이며 프로그램 우측 상단 ‘Current File’ 에 현재 열려있는 데이터의 파일이름이 표시되게 하였다.

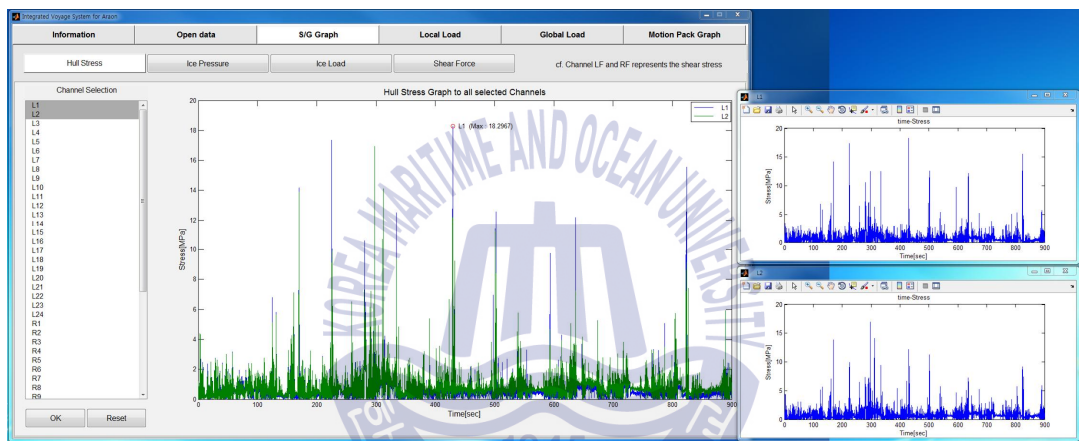


그림 5-8 ‘S/G Graph’ 화면

그림 5-8의 세 번째 탭 ‘S/G Graph’ 에는 2장, 3장에서 설명한 계산과정을 반영하여 좌현 L1~L24까지 총 24개의 게이지, 우현 R1~R12 총 12개의 게이지 각각에 대한 Hull Stress, Ice Pressure, Ice Load, Shear Force의 계산결과가 전체 시간에 대한 그래프로 그려지며 선택한 모든 게이지의 계산결과 중 최대값이 표시된다. 또한 여러 개의 게이지를 중복으로 클릭한 경우 별도의 팝업창에 게이지 각각의 그래프가 따로 그려지게 하였다.

그림 5-9, 5는 네 번째 탭 ‘Local Load’ 화면이며 좌현과 우현으로 나누어 국부 빙하중을 구하고자 하는 면적을 선택할 수 있다. 2015년 북극탐사 시 좌현과 우현의 부착된 스트레인게이지의 수가 다르기 때문에 좌현과 우현의 국부 빙하중을 비교하기 위해서는 게이지를 같게 선택하여 같은 면적에 대한 국부 빙하중을 계산하여야 한다.



그림 5-9 ‘Local Load-Port’ 화면

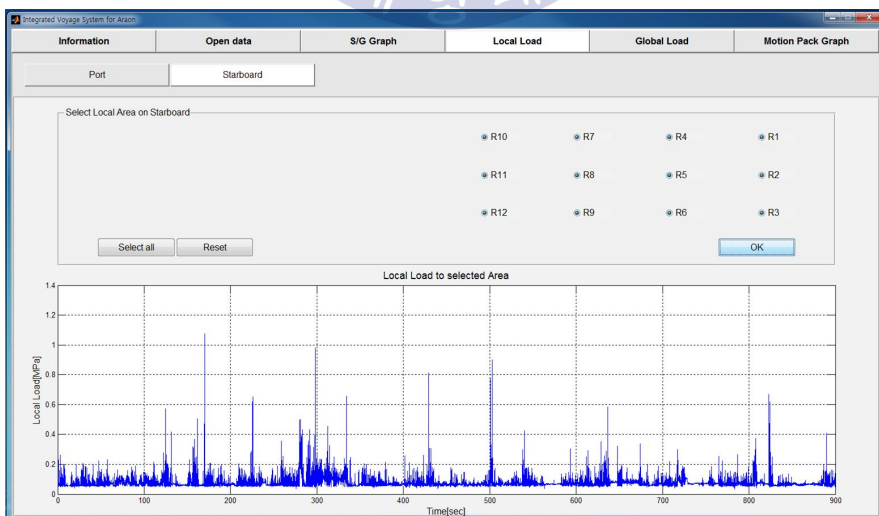
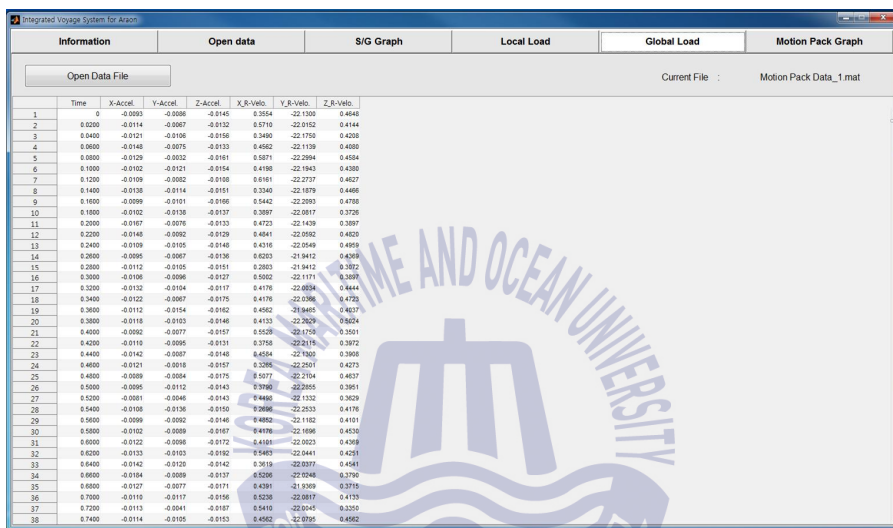


그림 5-10 ‘Local Load-Starboard’ 화면

‘Global Load’ 탭에서는 관성측정시스템 데이터를 불러와 선박의 6자유도 운동을 풀기위한 원본 데이터를 그림 5-11과 같이 확인할 수 있으며, 3.2.1절에서 설명한 계산과정을 거쳐 그림 5-12처럼 ‘Motion Pack Graph’ 탭에는 무게중심에서의 전체 빙하중(Global Load at the Center of Gravity)과 충돌위치에서의 전체 빙하중(Global Load at the Point of Impact)으로 나누어 표시된다.



	Time	X-Accel	Y-Accel	Z-Accel	X_R-Velo	Y_R-Velo	Z_R-Velo
1	0	-0.0093	-0.0086	-0.0145	0.3554	-22.1300	0.4643
2	0.0200	-0.0114	-0.0087	-0.0132	0.5710	-22.0162	0.4164
3	0.0400	-0.0121	-0.0106	-0.0156	0.3490	-22.1750	0.4200
4	0.0600	-0.0148	-0.0075	-0.0133	0.4562	-22.1139	0.4080
5	0.0800	-0.0129	-0.0032	-0.0161	0.5871	-22.2384	0.4554
6	0.1000	-0.0102	-0.0121	-0.0154	0.4198	-22.1943	0.4300
7	0.1200	-0.0109	-0.0082	-0.0108	0.6161	-22.2737	0.4627
8	0.1400	-0.0136	-0.0114	-0.0151	0.3340	-22.1679	0.4466
9	0.1600	-0.0099	-0.0101	-0.0166	0.5442	-22.2093	0.4700
10	0.1800	-0.0102	-0.0136	-0.0137	0.3097	-22.0817	0.3728
11	0.2000	-0.0167	-0.0076	-0.0133	0.4723	-22.1439	0.3507
12	0.2200	-0.0146	-0.0082	-0.0129	0.4641	-22.0562	0.4620
13	0.2400	-0.0109	-0.0105	-0.0148	0.4316	-22.2549	0.4959
14	0.2600	-0.0095	-0.0087	-0.0136	0.6253	-21.9412	0.4506
15	0.2800	-0.0112	-0.0105	-0.0151	0.2803	-21.9412	0.3872
16	0.3000	-0.0106	-0.0096	-0.0127	0.5002	-22.1171	0.3287
17	0.3200	-0.0132	-0.0164	-0.0117	0.4176	-22.0804	0.4444
18	0.3400	-0.0122	-0.0067	-0.0175	0.4176	-22.0396	0.4725
19	0.3600	-0.0112	-0.0154	-0.0162	0.4562	-21.9455	0.4637
20	0.3800	-0.0116	-0.0103	-0.0146	0.4133	-22.2629	0.5024
21	0.4000	-0.0092	-0.0077	-0.0157	0.5129	-22.1510	0.3501
22	0.4200	-0.0110	-0.0095	-0.0131	0.3758	-22.2119	0.3972
23	0.4400	-0.0142	-0.0089	-0.0140	0.4554	-22.7809	0.3905
24	0.4600	-0.0121	-0.0018	-0.0157	0.3396	-22.2617	0.4273
25	0.4800	-0.0089	-0.0084	-0.0175	0.5077	-22.2104	0.4637
26	0.5000	-0.0095	-0.0112	-0.0143	0.3749	-22.2855	0.3951
27	0.5200	-0.0081	-0.0046	-0.0143	0.4460	-22.1332	0.3529
28	0.5400	-0.0108	-0.0136	-0.0150	0.2696	-22.2533	0.4176
29	0.5600	-0.0069	-0.0082	-0.0146	0.4852	-22.1162	0.4151
30	0.5800	-0.0102	-0.0089	-0.0167	0.4976	-22.1696	0.4539
31	0.6000	-0.0122	-0.0098	-0.0172	0.4105	-22.0023	0.4369
32	0.6200	-0.0133	-0.0103	-0.0182	0.5463	-22.0441	0.4251
33	0.6400	-0.0142	-0.0123	-0.0142	0.3419	-22.0397	0.4561
34	0.6600	-0.0164	-0.0089	-0.0137	0.5296	-22.0248	0.3790
35	0.6800	-0.0127	-0.0077	-0.0171	0.4291	-21.9309	0.3719
36	0.7000	-0.0110	-0.0112	-0.0156	0.5236	-22.0637	0.4135
37	0.7200	-0.0113	-0.0041	-0.0167	0.5410	-22.0545	0.3355
38	0.7400	-0.0114	-0.0105	-0.0153	0.4562	-22.0795	0.4562

그림 5-11 ‘Global Load’ 화면

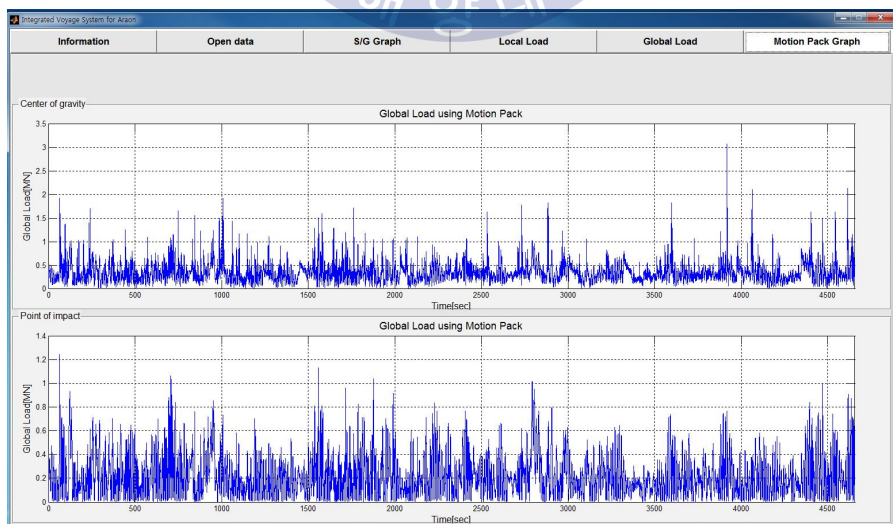


그림 5-12 ‘Motion Pack Graph’ 화면

6. 결 론

본 논문에서는 2012년 남극 및 2015년 북극에서 쇄빙연구선 아라온호의 실선 계측시험 시 확보된 스트레인게이지 데이터를 이용하여 국부 빙하중을 계산하였다. 2012년 남극탐사 시에는 2회의 공식 쇄빙성능 시험이 수행되었기 때문에 일반운항 중 계측된 데이터와 구분하여 결과를 제시하였다. 또한 본 연구에서는 관성측정시스템 데이터를 이용하여 전체 빙하중을 산정하고 이를 국부 빙하중과 비교하였다. 2012년 관성측정시스템으로부터 계측된 남극에서의 자료는 심한 노이즈로 인해 전체 빙하중 계산에 사용할 수 없었기에 2015년 북극에서 계측된 자료만으로 전체 빙하중 계산을 수행하였다.

스트레인게이지로 계측된 데이터를 분석하는 과정에서는 정확한 데이터 분석을 위해 모든 데이터를 충돌이벤트 단위로 나누어 처리하였다. 충돌이벤트는 스트레인게이지 데이터의 경우 등가응력 15MPa를 기준으로 하였고 관성측정시스템 데이터의 경우 전체 빙하중 1MN을 기준으로 하였다. 스트레인게이지 데이터를 이용하여 등가응력을 계산하는 과정에서는 von Mises 등가응력식을 사용하였다.

피크 등가응력과 압력 그리고 국부 빙하중 결과를 분석한 결과 남극탐사 시 아라온호에 작용한 힘이 북극탐사 시 보다 전반적으로 크게 나타난 것을 확인할 수 있었으며, 국부 빙하중과 전체 빙하중을 비교한 결과 스트레인게이지를 이용하여 계산된 국부 빙하중의 3~4배 정도를 전체 빙하중으로 추정할 수 있었다. 이러한 결과는 2012년 남극에서의 빙상조건이 2015년 북극에서의 빙상조건에 비해 훨씬 열악한 상태인 것을 대변하는 것으로 판단된다. 본 연구결과의 신뢰성을 높이기 위해서 얼음의 강도와 집적도가 높은 빙해역을 대상으로 추가적인 실선계측시험이 수행되어야 할 필요가 있다.

참고문헌

- 김호연, 2014, 남극해에서 계측된 스트레인게이지 데이터 분석과 아라온호 빙하 중 추정에 관한 연구. 석사학위논문, 한국해양대학교.
- 이탁기, 김태욱, 임채환, 김성찬, 2013, 북극해 계측자료에 기초한 아라온호의 국부 빙압력 계산 연구, 한국해양공학회지, 27(5), pp.88-92.
- 이탁기, 이종현, 임채환, 최경식, 2013, 북극해에서 계측된 국부 빙하중에 대한 선속 및 빙두께 영향, 한국해양공학회지, 27(5), pp.82-87.
- 이탁기, 김태욱, 임채환, 김홍섭, 2014, 북극해 운항 중 계측된 빙하중에 대한 분석 연구, 대한조선학회논문집, 51(2), pp.107-113.
- 천은지, 최경식, 김호연, 이탁기, 2014, 쇄빙연구선 ARAON호의 남극해 쇄빙운항 중 계측된 스트레인게이지 데이터 분석, 대한조선학회논문집, 40(6), pp.489-494.
- 최경식, 2012, 쇄빙연구선 ARAON호의 2012년 남극 아문젠해 해빙의 재료특성 계측시험보고서, 지식경제부.
- 최경식, 2015, 쇄빙선박과 빙하중, 문운당, 서울.
- 최경식, 정성엽, 2008, 쇄빙상선의 빙하중 추정식 고찰, 대한조선학회논문집, 45(2), pp.175-185.

최경식, 정성엽, 남종호, 2009, 정상운항 상태에서 쇄빙선박에 작용하는 설계 빙하중 추정, *대한조선학회논문집*, 46(6), pp.603-610.

Choi, K. and Jeong, S.Y., 2008, Global ice Load Prediction for Icebreaking Vessels, *Proceedings of the 18th International Offshore and Polar Engineering Conference*, Vancouver, Canada, pp.638-643.

Johnston, M., Frederking R., Timco, G. & Miles, M., 2003, MOTAN: A Novel Approach for Determining Ice-Induced Global Loads, *Proceedings of MARI-TECH*, Montreal, Canada, pp.1-17.

Johnston, M., Frederking R., Timco, G. & Miles, M., 2004, Using MOTAN to Measure Global Accelerations of the CCGS Terry Fox during Bergy Bit Trials, *Proceedings of the 23rd International Conference on Offshore Mechanics and Arctic Engineering*, Vancouver, Canada, pp.911-918.

Likhomanov, 2010, *Full Scale Ice Trials of the Korean Research Icebreaker ARAON*, Arctic and Antarctic Research Institute (AARI) Scientific Technical Report.