

Ice Load Estimation Procedures for IBRV ARAON by Analyzing Shear Strain Data Measured in Arctic Sea

Jung Ki Min*, Kyungsik Choi**, Eun-Jee Cheon** and Jin Myung Kim**

*Ocean Science and Technology School, Korea Maritime and Ocean University, Busan, Korea

**Department of Ocean Engineering, Korea Maritime and Ocean University, Busan, Korea

쇄빙연구선 아라온호의 북극해 실선 계측 전단변형 데이터 분석을 통한 빙하중 산정 기법 고찰

민정기* · 최경식** · 천은지** · 김진명**

*한국해양대학교 해양과학기술전문대학원

**한국해양대학교 해양공학과

KEY WORDS: IBRV ARAON 쇄빙연구선 아라온호, Strain gauge 스트레인게이지, Influence coefficient matrix 영향계수행렬, Shear strain 전단변형, Local ice load 국부 빙하중

ABSTRACT: This paper focuses on the estimation of local ice loads exerted from ship-ice interaction processes. The Korean IBRV ARAON was used to perform field ice trials during her 2015 Arctic voyage. During ARAON's general ice transit, a total of 72 channels of data from both strain gauges on the inner hull plates and those installed on the transverse frames of the ARAON's bow section structures were analyzed to calculate the local ice loads. The local ice loads estimated from the analysis of the shear strain data measured on the side frames were compared to those from the hull plate pressures.

1. 서 론

빙해역을 운항하는 쇄빙선박에 있어서 빙하중의 정확한 산정은 매우 중요한 설계 요소인데 선체구조 및 선형, 출력기관의 선정이 선체에 작용하는 빙하중의 세기에 좌우되기 때문이다. 쇄빙선박이 빙해역을 운항할 때는 파랑하중이나 슬래밍에 의한 하중보다는 빙하중이 선체구조에 미치는 영향이 훨씬 지배적으로 작용하는 경향이 있다. 얼음과의 충돌에 의해 쇄빙선박에 작용하는 빙하중은 전체 빙하중(Global ice load)과 국부 빙하중(Local ice load)으로 구분하지만 실제로 두 하중을 명확하게 나누어 산정하기는 매우 어렵다. 기본적으로 전체 빙하중과 국부 빙하중은 선체와 얼음과의 접촉 부위나 면적에 따른 구분이라 볼 수 있는데, 전체 빙하중은 선체가 하나의 구조부재로 거동한다고 생각하고 선체의 종강도나 선체운동 또는 진동의 측면에서 관심을 가지는 반면, 국부 빙하중은 선체 외판 및 그 주변 부재의 변형과 손상을 유발시키는 요인이 된다(Choi and Jeong, 2008).

현재 쇄빙선박의 빙하중 산정에 관한 국내외의 연구는 경험적인 방법을 위시하여 현장시험(Cheon et al., 2014), 모형실험(Jeong et al., 2015; Takimoto et al., 2006), 수치해석(Lubbad and Loset, 2011) 등 다방면으로 수행되고는 있지만 빙-선체 상호작용(Ice-ship interaction)에 대한 해석이 아직 충분히 정립되어 있지 못한 현실이다. 본 논문은 쇄빙연구선 아라온호의 선체구조에 장착된 스트레인게이지를 이용하여 2015년 북극해 현장시험 시 선체에 작용한 국부 빙하중을 산정하는 방법에 대한 고찰이다. 현장시험을 통한 빙하중 산정은 실제 빙충격을 받는 선체구조의 안전 확보와 함께 현장계측에 소요되는 많은 비용 그리고 획득한 데이터 분석과 관련된 기술적 어려움이 존재하지만, 실선시험을 통해 확보된 빙하중 데이터는 공개된 사례가 많지 않아 더욱 중요한 자료이다.

국내 유일의 쇄빙연구선 아라온호는 과거 수 차례 북극해 탐사를 통해 빙하중 계측과 연계된 실선시험을 수행한 바 있다. 2015년 8월에 실시된 북극해의 척치해(Chukchi Sea) 및 동시베

Received 4 October 2016, revised 16 November 2016, accepted 17 November 2016

Corresponding author Kyungsik Choi: +82-51-410-4324, kchoi@kmou.ac.kr

© 2016, The Korean Society of Ocean Engineers

This is an open access article distributed under the terms of the creative commons attribution non-commercial license (<http://creativecommons.org/licenses/by-nc/3.0>) which permits unrestricted non-commercial use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.

리아해(East Siberian Sea) 실선시험에서는 선수부 선체 외판에 설치된 스트레인게이지를 통해 얼음과의 충돌 시 외판에 가해지는 빙하중을 추정하였다. 통상 스트레인게이지는 외판부(Hull plate)에 설치되는 것이 보통인데 2015년 실선시험에서는 외판부와 함께 선수부 바로 뒤쪽의 횡늑골(Frame) 부위에도 3축 게이지를 설치하여 늑골을 통해 전해지는 전단력을 추정할 수 있도록 하였다.

늑골 부위의 전단변형을 계측하여 전단력을 계산하는 방법은 과거 노르웨이와 캐나다의 실선시험 보고서를 통해 그 가능성을 언급한 바 있으나 이러한 빙하중 계산 결과가 얼마나 정확한 지에 대해서는 보고되지 않았다(Ghoneim et al., 1984; Boersheim, 2007; Holm, 2012). 이런 배경으로 본 논문에서는 2015년 아라온호의 북극해 실선시험에서 계측한 스트레인게이지 데이터 분석을 통해 횡늑골 부위에 발생한 전단변형과 전단력 계산을 수행하였고 그 결과를 동일한 선체 외판 부위에 전달되는 국부 빙하중과 비교해 보았다.

2. 아라온호의 스트레인게이지 계측 시스템

2015년 아라온호의 북극해 실선시험에서는 선수부에 빙하중이 크게 작용할 것으로 예측되는 부분인 제2갑판 아래쪽 102~110번 프레임 사이의 선체 외판에 스트레인게이지를 집중해서 배치하였다. 출입이 비교적 쉬운 좌현 쪽에는 1축 게이지 24개, 3축 게이지 10개를 설치하였고 선박의 구조상 출입이 힘든 우현에는 1축 게이지 12개, 3축 게이지 4개를 설치하였다.

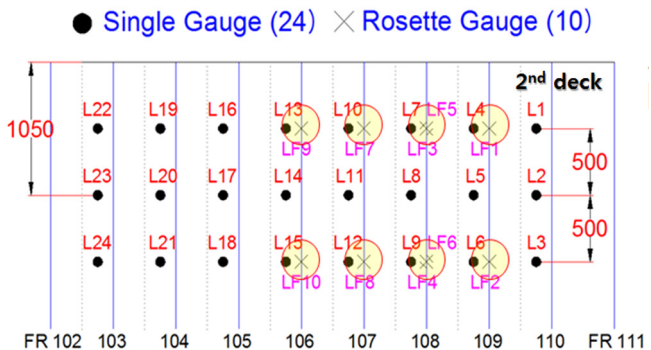


Fig. 1 Layout of strain gauges on the hull panel of the IBRV ARAON during 2015 Arctic ice cruise (Port side)

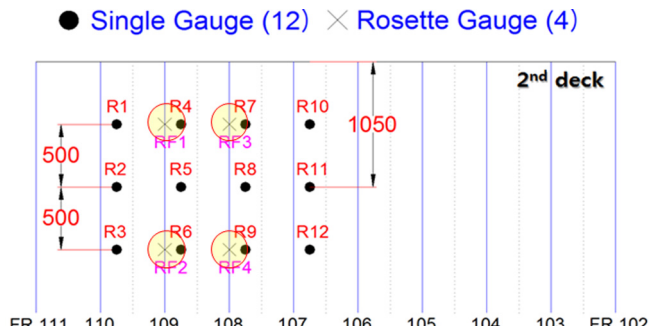


Fig. 2 Layout of strain gauges on the hull panel of the IBRV ARAON during 2015 Arctic ice cruise (Starboard side)

Fig. 1과 Fig. 2에서 보이는 ●으로 표시된 부분이 1축 게이지에 해당하는 위치이고 ×로 표시된 부분이 늑골 부위에 설치된 3축 로제트 게이지이다. 108번 프레임의 경우에는 늑골의 양쪽에 각 2개씩 설치하였다.

3. 선체 외판부에 작용하는 국부 빙하중 산정

얼음과의 충돌 시 선체 외판부에 설치된 1축 스트레인게이지로부터 얻어진 변형률 데이터는 변형이 탄성적이라고 가정하고 Hooke의 공식에 의해 선체 외판부의 응력으로 변환된다. 이렇게 계산된 선체 외판의 응력(Hull stress)은 영향계수행렬법(Influence matrix method)을 이용하여 선체 외판에 직접 작용하는 압력을 계산할 수 있다(Lee et al., 2013). 영향계수행렬은 유한요소법을 이용한 구조해석 과정에서 얻어진다. 스트레인게이지에서 얻어진 변형률 데이터로부터 외판에 작용한 빙압력을 추산하는 계산과정은 Fig. 3에 도식화하여 나타내었다.

출항 전 초기값을 0으로 조정하는 보정과정을 거쳐 스트레인게이지 데이터는 반자동화된 알고리즘에 따라 선체 외판에 작용한 빙압력(Ice pressure)으로 변환되는데 여기서 얻어진 압력값에 각 게이지가 담당하고 있는 면적을 곱해 국부 빙하중을 계산한다. 스트레인게이지 데이터의 해석기법에 대해서는 다음 논문으로 정리되어 발표된 바 있다(Cheon et al., 2014; Lee et al., 2013).

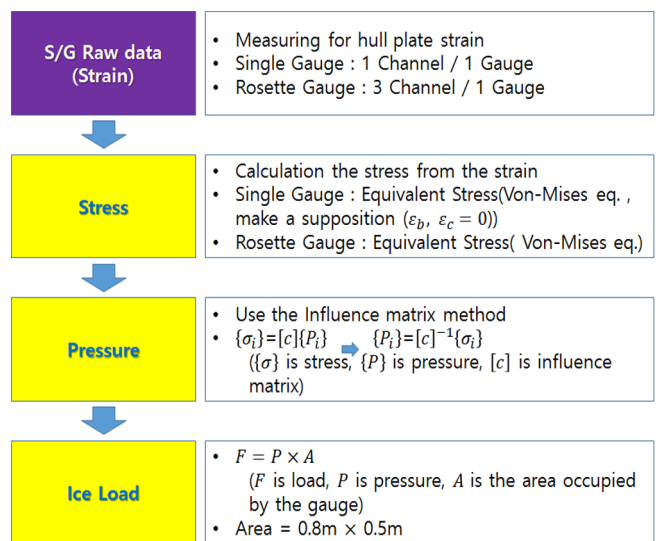


Fig. 3 Stain gauge data analysis procedures

4. 늑골 부위의 전단력 계산과 국부 빙하중 산정

앞서 언급한 바와 같이 늑골 부위의 전단변형을 계측하여 전단력을 계산하는 방법은 노르웨이나 캐나다 연구에서 그 가능성이 언급된 바 있다. 본 논문에서는 실선계측 스트레인게이지를 통해 전단변형을 구하고 이를 통해 늑골 부위의 전단력을 계산하는 과정을 수행하였다.

2015년 8월 북극 실선시험 당시 3축 로제트 게이지를 좌현과 우현의 늑골 부위에 수선면을 기준으로 상하부로 나누어 각기

10개와 4개를 설치하였는데 Fig. 1에서 보듯이 좌현의 선체 외판 내부에 설치한 1축 게이지 위치와 겹치는 부분은 106~109번 프레임이다. 우현은 1축 게이지 위치와 겹치는 부분인 108,109 프레임이다. 선체 외판부에 작용하는 빙압력과 직접 비교하기 위하여 좌현의 4개 프레임에 설치한 8개의 게이지와 우현의 2개 프레임에 설치한 4개의 게이지를 고려하였다.

먼저 빙충격에 의한 늑골의 변형은 3축 로제트 게이지의 변형도($\epsilon_a, \epsilon_b, \epsilon_c$ 각각 선수미 방향, 45° 방향, 선체 깊이 방향에 해당)로 계측되며 Fig. 4에 도시한 것과 같이 Mohr의 원을 이용하여 전단변형도를 구할 수 있다.

전단변형도 γ_a 는 식 (1)로 정의된다.

$$\gamma_a = -(2\epsilon_b - \epsilon_a - \epsilon_c) \quad (1)$$

τ_1 을 위쪽의 전단응력, τ_2 를 아래쪽의 전단응력이라 하면 각 프레임에 발생한 전단력은 식 (2)로 계산된다.

$$F_{shear} = (\tau_1 - \tau_2)A \quad (2)$$

여기서 A 는 전단응력이 작용한 프레임의 단면적을 나타낸다 (Fig. 5). 한편 프레임이 단독으로 하중을 받는 것이 아니라 외판과 함께 빙하중을 받는 것이므로 프레임 단면적을 계산 시 유효폭(Effective width)의 개념을 반영하여 단면적을 계산할 필요가 있다. 아라온호의 늑골이 위에서 아래로 휘어진 경사 프레임이기 때문에 엄밀한 계산은 어렵지만 대략 프레임 간격의 18% 정도로 계산된다(Timoshenko and Goodier, 1951). 아라온호의 경우 게이지가 설치된 프레임 사이의 간격이 0.8m 이기 때문에 유효폭은 14.4cm 정도이다.

아라온호의 106번 프레임의 단면적은 $730\text{mm} \times 28\text{mm} + 100\text{mm} \times 35\text{mm}$ 이며, 107~109번 프레임의 단면적은 $600\text{mm} \times 23\text{mm} + 80\text{mm} \times 23\text{mm}$ 으로 계산된다. 최종적으로 좌현의 경우 국부 빙하중은 4개 프레임에 작용한 전단력을 모두 합한 결과에 해당한다.

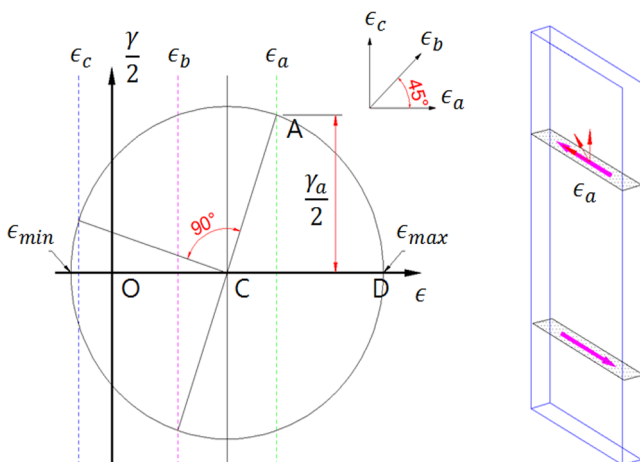


Fig. 4 Calculation of shear strains from Mohr's circle

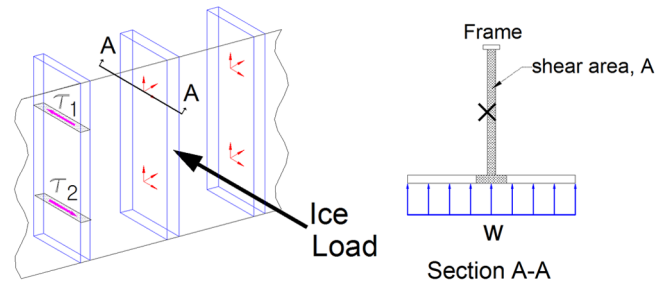


Fig. 5 Shear area and effective width of the frame

5. 2015년 실선시험 데이터 분석과 국부 빙하중 비교

스트레인게이지를 이용한 2015년 아라온호의 북극해 실선시험에서는 이전 실험과는 달리 선수부 늑골 부위에도 게이지를 설치하였는데 그 목적은 프레임에 작용하는 전단력을 통해 추정된 빙하중과 선체 외판에 받는 빙압력을 통해 추정한 빙하중을 비교하는 것이다. 오래 전부터 캐나다의 Canmar Kigoriak, 일본의 Soya, 핀란드의 Uikku호 등 선박에 늑골 부위에 전단변형률 계측할 수 있는 스트레인게이지를 설치하여 빙하중을 추정할 사례를 확인하였으나 자세한 계산방법이나 결과에 대해 제시된 것이 없다(Ghoneim et al., 1984; Takimoto et al., 2006; Kujala et al., 2009; Suominen et al., 2013; Boersheim, 2007; Holm, 2012).

2015년 아라온호의 북극해 실선시험에서 총 33번 데이터를 측정하였다. 본 논문에서는 33번의 데이터 그룹 중 계측 과정에서 이상이 생긴 데이터 그룹을 제외한 13개의 데이터 그룹을 분석하였다(Table 1).

앞 절에서 설명한 바와 같이 두 가지 방법으로 국부 빙하중을 추산해 서로 비교하기 위해서, 외판에 작용하는 빙압력은 설치된 모든 게이지 부위가 아니라 프레임 부위에 3축 게이지를 설치한 부분과 일치하는 영역의 게이지 L4~L15와 게이지 R4~R9만 고려하였다.

Table 1 Raw data obtained during IBRV ARAON's 2015 Arctic voyage

Data group	Date	UTC time
7	0811	04:30 ~ 05:15
11	0814	07:45 ~ 08:00
12		08:20 ~ 09:20
14		10:27 ~ 11:28
16		16:40 ~ 17:45
17		17:50 ~ 20:15
22	0815	06:25 ~ 08:20
23		13:05 ~ 14:05
24		14:12 ~ 15:05
25		15:10 ~ 16:07
28	0816	02:50 ~ 03:50
29		04:09 ~ 05:10
30		05:20 ~ 06:15

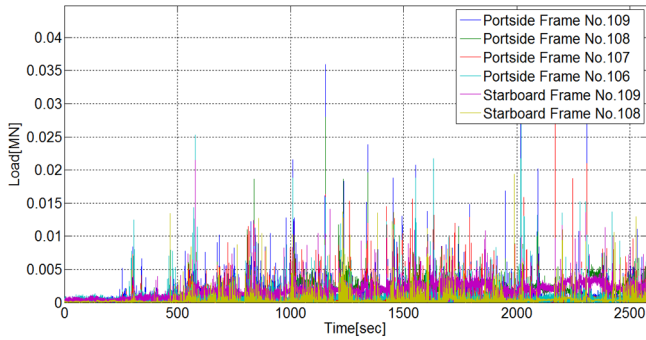


Fig. 6 Shear forces acting on each frame

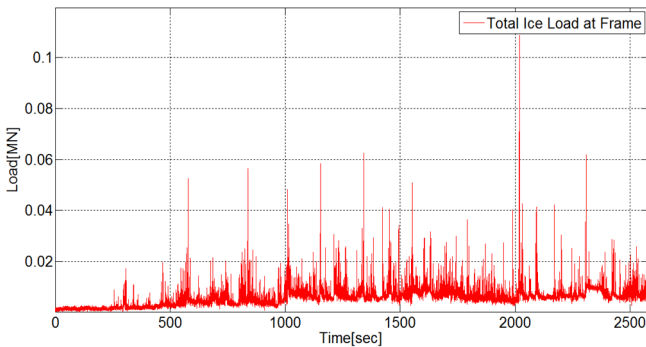


Fig. 7 Sum of shear forces acting on all frames

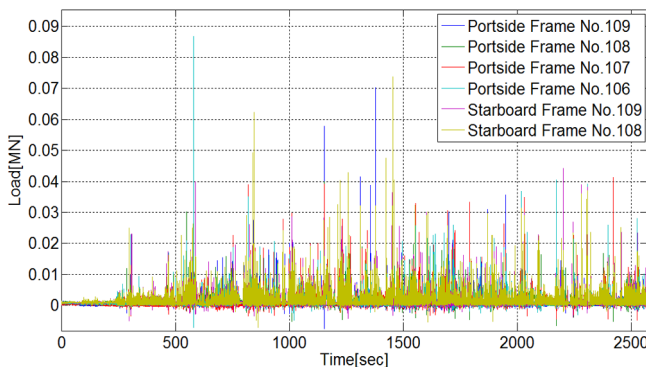


Fig. 8 Ice load acting on hull section corresponding to each frame

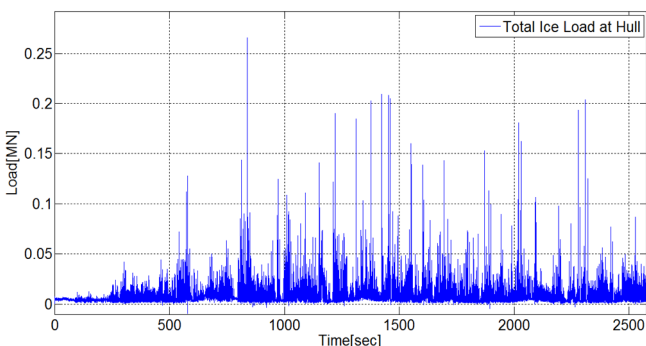


Fig. 9 Sum of local ice load acting on hull plate

먼저 Fig. 6은 6개 프레임 부위에서 각각 계산된 전단력을 보여준다. 그리고 Fig. 7은 좌, 우현 6개의 프레임에 작용하는 전단력을 전부 합한 국부 빙하중이다.

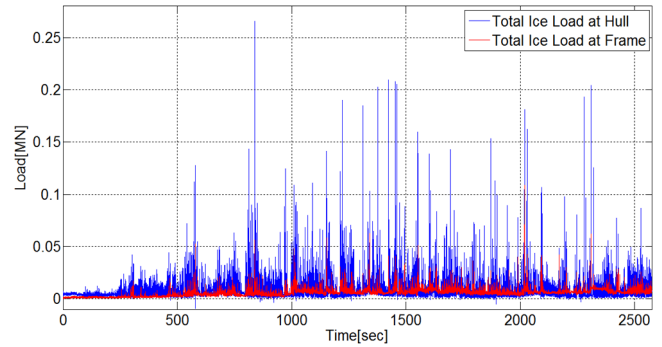


Fig. 10 Comparison of the local ice loads calculated by two approaches

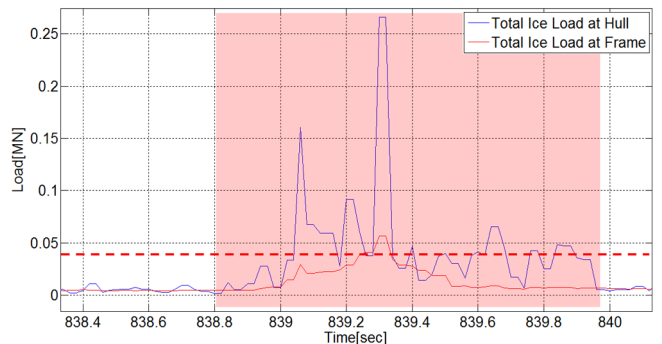


Fig. 11 Comparison of two peak ice loads in an event section

다음으로 Fig. 8은 각각 프레임 전단력 계산 부위와 일치하는 면적의 외판 부분에 작용하는 빙압력에 게이지 하나가 담당하는 면적을 곱해 얻어진 빙하중으로 좌우현 각각 6개 프레임에 상응하는 부위의 국부 빙하중을 나타내며 Fig. 9는 좌, 우현 6개 프레임 부위의 빙하중 값을 모두 합친 빙하중이다.

설명한 바와 같이 두 가지 방법으로 국부 빙하중을 추산하여 얻은 결과인 Fig. 7과 Fig. 9를 하나의 그래프로 나타내어 서로 비교해 보았다(Fig. 10). 여기서 시간에 따른 피크 하중의 변화만 가지고는 그래프를 구분하기 어렵기 때문에 빙충격 이벤트의 개념을 도입하여 빙-구조물 상호작용 하중을 분석하였다.

빙충격 이벤트(Ice collision event)의 개념은 다음과 같이 설명할 수 있다. 얼음이 선체에 부딪히는 순간 하중이 크게 증가하지만 그때 속도는 감소하기 시작한다. 또한 접촉이 끝나는 시점에서는 하중 값이 급격히 작아지며 속도는 다시 증가한다. 선체와 얼음과의 접촉이 시작되고 끝나는 사이의 구간을 하나의 이벤트로 정의할 수 있다. 그래프에 나타난 작은 하중값들은 얼음이 충돌하지 않았거나, 아주 작은 빙편들과 접촉하는 상황이라고 판단하여 이 분석에서 제외하였다.

Fig. 11은 앞의 Fig. 10에서 839sec 구간을 확대한 그래프이다. 이것을 보면 외판에서의 피크 빙하중과 프레임에서 계산된 피크 빙하중이 작용하는 시간이 일치할 경우도 있지만, 두 피크 빙하중이 근소한 시간 차이를 두고 작용하는 것을 확인할 수 있다. 시간 차이는 0.02초에서 3초 사이 정도이다. 이렇게 근소한 시간 차이를 두고 각각 피크 빙하중 값이 발생하는 경우 이를 서로 다른 하중이라 보지 않고 동일한 이벤트 안에서 나타난 빙하중으로 취급하는 것이다.

이런 방법으로 본 연구에서는 하나의 이벤트 내에서 외판에 작용하는 피크 빙하중과 프레임에 작용한 피크 빙하중을 추출하여 그 크기를 서로 비교하였다. 비교 분석을 위한 이벤트는 편의상 프레임에 작용하는 하중 기준으로 피크(Peak) 하중 0.04MN 이상을 기준으로 3~10초 구간으로 정하였다.

Table 2는 선택된 이벤트 구간에서 두 가지 방법으로 계산된 피크 빙하중들의 크기를 추출해 비교한 것이다. 실선시험이 시행되었던 2015년 8월의 북극해 빙상 상태는 큰 빙하중이 계속될만한 조건이 아닌 상황이었기 때문에 기준치보다 큰 빙하중이나 추출된 이벤트의 횟수가 예상보다는 상당히 적었다. 이벤트의 발생 횟수는 총 43회이며, 11, 12, 24, 25, 29, 30번 데이터 그룹에는 프레임에 작용한 피크 빙하중이 0.04MN을 넘는 값이 없었기 때문에 이벤트가 발생하지 않았다. Table 3은 Table 2에 나타난 피크 빙하중의 값들 중 최대값 및 평균값을 나타낸 것이다. 최대값은 외판에서의 빙하중이 0.33MN, 프레임에서의 빙하중이 0.11MN이었으며, 평균값은 각각 0.13MN, 0.05MN으로 외판에서의 빙하중에 비해 프레임에서의 빙하중이 약 40% 정도이었다. 2015년 북극해에서 계속된 아라온호의 전단력 계산에 의한 빙하중이 외판에 작용한 빙하중과 상당한 차이를 보이고 있다.

Table 2 Comparison of the local ice loads in each event section

No.	Time [sec]	Plate load [MN]	Frame load [MN]	No.	Time [sec]	Plate load [MN]	Frame load [MN]	
7	579	0.08	0.05	4544	0.11	0.05		
	839	0.27	0.06		5322	0.14	0.04	
	1010	0.11	0.05		5691	0.11	0.04	
	1153	0.10	0.06		6039	0.33	0.04	
	1342	0.10	0.06		6072	0.16	0.06	
	1424	0.21	0.04		6349	0.13	0.04	
	4552	0.16	0.05		6808	0.23	0.04	
	1989	0.08	0.04		8035	0.08	0.04	
	2018	0.18	0.11		22	174	0.04	0.05
	2030	0.16	0.04		998	0.06	0.04	
	2093	0.11	0.04		3328	0.05	0.07	
	2170	0.05	0.04		4045	0.07	0.05	
	2309	0.20	0.06		4194	0.08	0.06	
14	2333	0.04	0.04	4227	0.05	0.04		
	2984	0.06	0.05	4616	0.13	0.06		
	3059	0.15	0.04	4992	0.13	0.05		
17	1370	0.24	0.04	5642	0.17	0.06		
	1637	0.14	0.05	23	790	0.05	0.05	
	1712	0.10	0.04	827	0.12	0.08		
	3321	0.13	0.04	2192	0.16	0.05		
	3633	0.12	0.04	28	660	0.19	0.04	
	3827	0.13	0.05					

Table 3 Number of event sections for two ice load estimation

No.	Plate load	Frame load
Event average	0.13 MN	0.05 MN
Event max.	0.33 MN	0.11 MN

전단력 계산을 통해 추정되는 국부 빙하중은 측정된 전단변형도 γ_a 값이 직접적인 영향을 준다. 2015년 북극해 실선시험에서 설치한 3축 로제트 게이지의 위치는 늑골의 중앙부에 설치하였는데, 이는 늑골의 횡단면에서의 전단변형도가 모두 일정하다는 가정에 따른 것인데 게이지를 선체 외판부에 가까운 곳에 설치한다면 측정되는 전단변형도의 값은 더 커질 것이며, 따라서 식 (2)로 계산되는 전단력도 외판에 작용하는 빙하중에 비교될 만한 결과를 얻을 수 있을 것이다.

이러한 결과로 볼 때 우선 전단력 계산에 식 (2)를 바로 적용하기 보다는 식 (3)과 같이 수정된 형태를 제안한다.

$$F_{shear} = K(\tau_1 - \tau_2)A \quad (3)$$

여기서 K 는 각 프레임에 작용한 전단력들의 합이 전체 빙하중과 같다는 가정을 보완해주는 파라미터로서, 계측부 프레임의 단면 형태나 설치된 게이지의 위치에 따라 결정된다. 2015년 실선 시험과는 다른 빙상 상태에서 획득한 데이터를 분석할 필요가 있지만, 2016년도에도 2015년 8월 북극해 실선 시험과 동일한 방법에 의해 전단변형도를 계측한 바 있는데, 2016년도 실선 시험에서는 외판에서의 빙하중이 최대 2.42MN, 프레임에서의 빙하중이 1.45MN이었으며, 평균값은 각각 0.81MN, 0.58MN으로서 외판에서의 빙하중에 비해 프레임에서의 빙하중이 약 72% 정도로 나타났다. 참고로 2016년의 북극해 실선 시험 시 빙상 상태는 2015년에 비해 월등히 얼음이 두꺼운 상황이었는 데 기준치를 넘는 빙층들 이벤트 횟수도 216회를 기록하였다.

본 연구는 앞에 설명한 전단력 계산을 통해 국부 빙하중을 추정하는 것인데 2015년 북극해 실선시험에서는 스트레인게이지를 늑골 부위에 처음 설치해 보았고 그 개수도 많지 않았기 때문에 외판에 받는 빙하중과 비교하여 정량적인 값은 많은 차이가 있지만 피크 하중이 발생하는 경향은 유사한 것으로 나타났으며, 늑골 부위에 설치된 스트레인게이지를 이용해 프레임으로 전달되는 전단력을 계산할 때 식 (3)을 이용한다면 선체에 작용한 국부 빙하중을 정량적으로 추정할 수 있다고 판단된다.

6. 결 론

쇄빙선박이 빙해역에서 운항 시, 선체가 받는 국부 빙하중을 산정하기 위해, 스트레인게이지를 이용하여 외판에 작용하는 빙압력을 우선적으로 추정하는 데 더하여 본 연구에서는 늑골 부위에 설치된 게이지를 이용해 프레임으로 전달되는 전단력을 계산하여 빙하중을 산정할 수 있다는 가능성을 확인할 수 있었다.

아라온호의 2015년 북극해 실선 시험을 통해 전체적으로는 프레임에서의 빙하중이 외판에서의 빙하중에 비해 그 크기가 40% 정도인 결과를 얻었고(2016년도에는 72%), 피크 빙하중이

형성되거나 충돌 이벤트 구간이 발생하는 지점에서는 두 빙하중이 동일한 경향을 보이고 있음을 알 수 있었다.

많은 수의 스트레인게이지를 설치해야 하는 외판 부위의 빙하중 산정기법보다는 간편한 전단력 계산방법이 대안이 될 수 있으며 두 가지 방법을 병용한다면 더욱 정확한 빙하중 추정이 가능하리라 판단된다.

후 기

본 연구는 한국해양과학기술원 부설 선박해양플랜트연구소 주요사업인 “쇄빙연구선 아라온호의 실시간 빙충격 하중 계측 통합시스템 개발 (PES2120)” 과제 및 2016년 산업통상자원부 지원 산업핵심기술과제 “ARC7 극지환경용 해양플랜트 내빙구조 설계기술 개발” 과제의 지원으로 수행된 결과임.

References

- Boersheim, L., 2007. Ship Hull Monitoring of Ice-induced Stresses. Master Thesis, Norwegian University of Science and Technology(NTNU), Trondheim, Norway.
- Choi, K., Jeong, S.Y., 2008. Ice Load Prediction Formulas for Icebreaking Cargo Vessels. *Journal of the Society of Naval Architects of Korea*, 45(2), 175-185.
- Cheon, E.J., Choi, K., Kim, H.Y., Lee, T.K., 2014. Analysis of Strain Gauge Data onboard the IBRV ARAON during Icebreaking Voyage in the Antarctic Sea Ice. *Journal of the Society of Naval Architects of Korea*, 51(6), 489-494.
- Ghoneim, G.A.M., Johansson, B.M., Smyth, M.W., Grinstead, J., 1984. Global Ship Ice Impact Forces Determined from Full-scale Tests and Analytical Modeling of the Icebreakers Canmar Kigoriak and Robert LeMeur. *SNAME Transactions*, 92, 253-282.
- Holm, H., 2012. Ice-induced Loads on Ship Hulls, Master Thesis. Norwegian University of Science and Technology (NTNU), Trondheim, Norway.
- Jeong, S.Y., Choi, K., Cheon, E.J., 2015. An Analysis of Characteristics of Ice Load Distribution on Model Ship due to Ship and Ice Interaction. *Journal of the Society of Naval Architects of Korea*, 52(6), 478-484.
- Kujala, P., Suominen, M., Riska, K., 2009. Statistics of Ice Loads Measured on MT UIKKU in the Baltic. *Proceedings of 20th International Conference on Port and Ocean Engineering under Arctic Conditions*, Lulea, Swden, 810-823.
- Lee, T.K., Kim, T.W., Rim, C.W., Kim, S.C., 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), 82-87.
- Lubbad, R., Loset, S., 2011. A Numerical Model for Real-Time Simulation of Ship-Ice Interaction. *Cold Regions Science and Technology*, 65, 111-127.
- Suominen, M., Karhunen, J., Bekker, A., Kujala, P., Elo, M., Polach, R.B., Enlund, H., Saarinen, S., 2013. Full-scale Measurements on Board PSRV S.A. AGULHAS II in the Baltic Sea. *Proceedings of 22th International Conference on Port and Ocean Engineering under Arctic Conditions*, Espoo Finland.
- Takimoto, T., Uto, S., Oka, S., Murakami, C., Izumiyama, K., 2006. Measurement of Ice Load Exerted on the Hull of Icebreaker SOYA in the Southern Sea of Okhotsk. *Proceedings of 18th IAHR International Symposium on Ice*, Sapporo, Japan, 2, 41-48.
- Timoshenko, S.P., Goodier, J.N., 1951. *Theory of Elasticity*. 3th Edition, McGraw-Hill, New York.