

Calculation of Fatigue Life of Bow Frame of ARAON Considering Navigating in Ice and Open Waters

Woo-Seong An*, Tak-Kee Lee^{ID**} and Mi-Ran Hwang^{***}

*Dept. of Ocean System Eng., Graduate School, Gyeongsang National University, Tongyeong, Korea
**Dept. of Naval Archi. & Ocean Eng., Gyeongsang National University, Institute of Marine Industry, Tongyeong, Korea
***Dept. of Civil Eng., Zentech Eng. Corp., Seoul, Korea

빙 및 일반해역 운항을 고려한 아라온호 선수프레임의 피로수명 계산

안우성* · 이탁기^{ID**} · 황미란^{***}

*국립 경상대학교 대학원 해양시스템공학과
**국립 경상대학교 해양과학대학 조선해양공학과, 해양산업연구소
***젠텍 엔지니어링(주), 토목사업부

KEY WORDS: Ice-going ship 빙 해역 운항선박, Fatigue life 피로수명, Ice load 빙하중, Wave load 파랑하중, Fatigue damage index 피로 손상지수

ABSTRACT: Ice-going ships such as icebreakers, icebreaking tankers, and icebreaking LNG carriers are subjected to wave loads in open water and ice loads in ice-covered water. In terms of the ship's structural design, the local ice load is important. The fatigue failure due to repeated ice loads is also important. ISO 19906 specifies the assessment of the fatigue limit for a polar offshore structures. In addition, Lloyd's Register refers to fatigue damage based on ShipRight FDA ICE. In ShipRight FDA ICE, the fatigue damage indices due to wave and ice loads are simply presented as 0.5 for each load. It also states that the sum of the two fatigue damage indices should not exceed one. This study calculated and analyzed the fatigue damage index and fatigue life considering ARAON's voyage schedules and the assumed Antarctic voyage based on data measured during the Arctic voyage of ARAON in 2010.

1. 서 론

빙해역을 주로 운항하는 쇄빙선은 항해 시 해빙과의 접촉과 충돌을 피할 수 없다. 이때 선체는 해빙과의 접촉으로 빙하중(Ice load)을 받게 된다. 빙하중이란 빙해역을 운항하는 선박에서 해빙(Sea ice)에 의해 선체구조가 받게 되는 힘을 말하며, 선체 전체에 작용하는 전체 빙하중(Global ice load)과 국부 구조에 작용하는 국부 빙하중(Local ice load)으로 나눌 수 있다(ABS, 2011). 이러한 빙하중을 산정하는 작업은 빙해역을 운항하는 선박의 설계에서 무엇보다 중요하다.

또한 빙해역을 운항하는 선박은 해빙을 부수어 작은 조각으로 깨거나 항해를 위해 해빙을 밀어내는 과정에서 크고 작은 빙하중을 반복적으로 받게 된다. 이러한 반복하중으로 인해 미세한 균열이 누적되어 파괴로 이어질 수 있는데 이것을 빙 유

기 피로파괴(Ice-induced fatigue failure)라 한다(ISSC, 2012). 빙으로 인한 피로문제는 상대적으로 낮은 관심을 받고 있다. 이는 빙으로 인해 발생한 선박사고 중에서 빙 충돌로 인한 사고사례를 제외하면 피로파괴로 인한 사고는 발생하지 않았으며, 빙해역을 운항하는 선박은 일반 선박보다 두껍고 특수하게 설계되어 있기 때문이라 할 수 있다. 하지만 관련 사고사례가 없다고 해서 지속적인 빙하중으로 인한 피로 파괴를 고려하지 않을 수는 없다. 이와 관련하여 로이드 선급(Lloyd's Register)은 선체 구조의 피로손상을 평가하기 위한 ShipRight FDA ICE(Fatigue design assessment procedure)를 제시하여 피로손상의 허용 기준을 포함하여 빙해역을 운항하는 선박의 피로성능을 강조하였다(Lloyd's Register, 2011). 그리고 ISO19906에서는 극지 해양구조물에 대해 피로한계를 고려하도록 명시하고 있다(ISO, 2010).

빙하중에 의한 피로손상에 관한 연구동향을 살펴보면, Bridges

Received 27 February 2018, revised 14 October 2018, accepted 18 October 2018

Corresponding author Tak-Kee Lee: +82-55-772-9193, tklee@gnu.ac.kr ORCID: <http://orcid.org/0000-0002-5944-156X>

© 2018, 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.

et al.(2006)은 겨울철의 운항해역을 3가지 유형(Mild, Average, Severe)으로 나누어 각 환경에 따라서 빙하중 및 피로손상을 계측한 자료를 분석하였다. 얼음의 두께와 피로손상이 비례함을 알 수 있었으며, 이는 얼음이 가장 두꺼운 환경인 Severe winter에서 큰 문제가 될 수 있다고 결론지었다.

이후, Zhang(2011)은 저온에서 용접이음부의 피로 거동에 대한 실험과 분석을 하고 빙으로 인한 피로를 예측하는 지침을 제시하였다. 그리고 빙하중으로 인한 빙해선박의 피로손상 내역을 조사하기 위해서 로이드 선급의 40년간의 데이터베이스를 분석하였다. 빙해선박과 빙해선박이 아닌 선박의 피로손상 내역까지 조사하였다. 빙해선박 690척 중에서 57%의 선박이 평균 선령 약 13년 인근에서 부분적으로 균열이나 파손이 발생하는 것으로 나타났으며, 빙해선박이 아닌 5,474척에 대해서는 52%의 선박들이 평균 선령 12.7년쯤에 균열이 발생하는 것으로 나타났다. 이러한 분석결과는 구조 건전성의 관점에서 빙해선박 선체구조의 피로손상이 일반 선박만큼 중요하다는 것을 의미한다. 또한 빙해선박과 일반 유조선의 선체구조 위치에 따른 손상 분포를 살펴보았는데, 선체 전반에 걸친 총 손상율은 빙해선박이 일반 선박보다 높으며, 주로 선수부에서 더 많은 균열이 발생한 것으로 보고되었다. 빙해선박은 선체구조를 강화하기 위해 판 두께를 더 두껍게 보강하기 때문에 피로로 인한 균열과 파괴가 적을 것이라 예상할 수 있다. 하지만 위의 조사는 예상과 다른 결과를 보여주며, 이는 반복적인 빙 하중으로 인한 선체 구조의 균열 조사 및 평가가 선박 구조 설계에 있어서 중요한 사항임을 의미한다.

Hwang et al.(2016)은 빙 유기 피로문제에 대해서 기초연구를 수행하였다. 2013년도 아라온호의 북극과 남극의 연구항해에 대해서 선체외판에 가해지는 응력을 가지고 피로수명을 예측하였다. 계산 시에는 해빙 밀집도에 따라 예제계산을 수행하였다. 해빙 밀집도는 얼음이 밀집된 정도를 10단계로 나타낸 것이며, 단계가 높을수록 밀집된 정도가 높다. 2013년도 연구항해에서는 해빙 밀집도에 따라 응력 데이터를 측정하였으며, 측정된 데이터를 가지고 피로수명을 계산하였다. 해빙 밀집도가 1~3수준으로 낮은 경우 누적된 피로손상지수는 0.074로 계산되었으며, 해빙 밀집도가 4~6으로 중간 수준인 경우에는 0.033으로 계산되었다. 두 지수를 통해 계산된 피로수명의 평균은 11년으로 나타났다. 내빙대는 빙과의 접촉과 충격이 주로 일어나는 구역으로 해빙 밀집도가 클수록 선체에 가해지는 충격이 빈번해지기 때문에 아라온호의 내빙대 피로손상에 대해 관심을 가져야 한다고 언급하였다.

이전의 연구에서는 빙해역을 운항할 때 받는 빙하중만을 고려하여 피로수명을 평가하였다. 하지만, 일반해역과 빙해역 모두를 운항하는 선박의 경우에는 파랑하중과 빙하중을 같이 받게 된다. 그렇기 때문에 본 연구에서는 2010년도 아라온호의 북극해 연구항해를 수행하는 동안 계측된 파랑하중과 빙하중 데이터를 바탕으로 선수 프레임 하부의 피로손상 평가를 수행하였고, 해당 부위에서 피로수명을 계산하였다. 또한 남극의 운항 상황을 가정하여 파랑하중의 영향에 따라 시나리오를 설정하고 이를 바탕으로 피로수명을 예측하였다.

2. Lloyd's Register Fatigue Design Assessment(FDA) 평가 절차

로이드 선급은 빙해역을 운항하는 선박의 선체구조에 대한 피로손상을 평가하기 위해 피로 설계 평가 절차(ShipRight FDA ICE)를 개발하였다(Lloyd's Register, 2011). ShipRight FDA ICE를 통하여 빙해역 운항선박의 빙하중으로 인한 피로손상은 일반해역 운항선박의 파랑하중에 의한 피로손상만큼 중요하며, 특히 저온 환경에서 운항하는 선박의 안전을 목표로 선박의 기능과 구조를 집중검사하고 피로손상을 평가하는 일이 필요하다고 강조하였다. ShipRight FDA ICE에 따르면 빙하중으로 인한 피로손상을 고려해야 할 중요한 선체 위치는 선박이 유빙과 주로 조우하는 만재물수선(Load water line)에서 발라스트 수선(Ballast water line) 사이의 내빙대(Ice belt regions)이다. 그 중에서도 선체외판에서 프레임과 보강재의 끝단 이음부(End connection)를 피로 취약 부분이라 설명했다.

피로손상을 계산하기 위해 Palmgren-Miner의 누적손상법칙을 적용하였다. 피로손상지수는 아래 식 (1)을 통해 계산할 수 있으며, 피로손상지수가 1.0을 넘으면 피로파괴가 발생한다.

$$\Omega = \sum_{i=1}^{\infty} \frac{n(S_i)}{N(S_i)} \quad (1)$$

$n(S_i)$ = 응력범위 S_i 에서 응력반복 횟수

$N(S_i)$ = 응력범위 S_i 에서 파단 될 때까지 반복 횟수

피로평가를 위해 응력-수명 곡선(S-N curve)을 사용하였다. 선체구조 피로평가를 위한 응력-수명 곡선은 매우 다양하게 구분되어 있으나, 본 연구에서는 Lloyd's Register(2011)에서 언급하고 있는 영국 에너지성(Department of Energy, DEn)의 기본 응력-수명 곡선을 사용하였다. 응력-수명 곡선은 로그-로그 축에서 직선으로 작도되며 약 $N=10^7$ 에서 기울기가 변한다(Fig. 1). 이러한 관계는 식 (2)처럼 수학적으로 표현할 수 있다.

$$\text{Log}(N) = \text{Log}(K_2) - m \text{Log}(S) \quad (2)$$

여기서, S 는 응력범위, N 은 응력범위 S 에서의 파손반복횟수, m 은 S-N곡선의 역 경사이다.

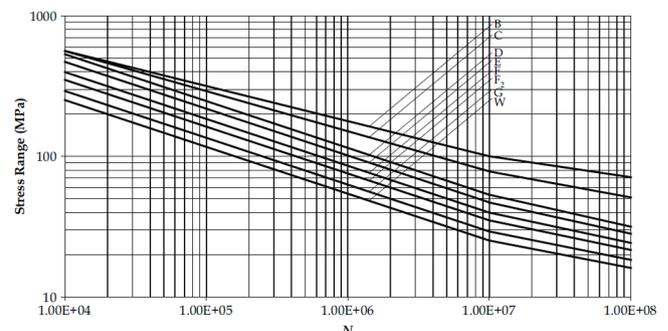


Fig. 1 DEn basic design S-N curve(Lloyd's Register, 2011)

$$\text{Log}(K_2) = \text{Log}(K_1) - 2\sigma \tag{3}$$

여기서, K_1 는 평균 S-N 곡선에 관한 상수, σ 는 $\log N$ 의 표준편차이다.

3. 손상 허용 기준

일반적으로 빙해선박은 빙해역의 빙상환경과 일반해역의 파랑환경에서 운항한다. 그러므로 빙해선박의 피로평가는 두 가지 항해환경을 고려하여 수행되어야 하며, 총 피로손상지수는 다음 기준에 적합해야 한다.

$$\Omega = (\Omega_{ice} + \Omega_{wave}) \leq 1.0 \tag{4}$$

Ω_{ice} = 빙하중으로 인한 피로손상지수

Ω_{wave} = 파랑하중으로 인한 피로손상지수

ShipRight FDA ICE에서는 허용 기준을 빙하중에 의한 피로손상지수(Ω_{ice})와 파랑하중에 의한 피로손상지수(Ω_{wave})로 나누고 각각을 0.5로 단순화하였다. 또한 이 기준은 단순하게 제시된 기준이며, 항해조건이나 경로에 따라 선주와 로이드 선급이 협의하여 조정이 가능하다고 언급하고 있다. 본 연구에서는 ShipRight FDA ICE에서 제시한 파랑하중과 빙하중의 영향을 5:5로 가정한 단순 기준을 적용하여 피로수명 평가를 하였으며, 추후 운항환경과 각 해역의 운항일수 비중 등을 고려하여 빙하중과 파랑하중으로 인한 각각의 영향을 고려한 피로수명에 대해서 추가적인 연구가 이루어져야 할 것으로 사료된다.

$\Omega_{ice} \leq 1/2$: 빙해역에서 빙하중으로 인한 피로손상, 설계수명의 50%로 가정

$\Omega_{wave} \leq 1/2$: 파랑환경에서 파랑하중으로 의한 피로손상, 설계수명의 50%로 가정

4. 아라온호의 피로수명 계산 및 고찰

로이드 선급에서 개발한 ShipRight FDA ICE에서는 운항환경에 따라 피로손상을 나누어 평가하고 있으며, 이 절차는 피로손상도의 합이 1.0이 되면 파괴가 발생하는 피로 손상누적법칙을 기반으로 하고 있다. 아라온호의 경우에는 인천항을 모항으로 하고 북극과 남극을 왕복 항해하는 운항 특성상 빙해역과 일반해역을 반복적으로 운항하게 되므로 빙하중과 파랑하중을 둘 다 받는 영역 안에서 항해하고 있다고 할 수 있다. 아라온호를 대상으로 피로손상에 대한 피로수명을 계산하기 위해 ShipRight FDA ICE를 적용시켜 계산해 보았다.

Lloyd's Register(2011)는 빙하중과 파랑하중에 의한 피로손상지수의 비율을 동등하게 각각 50%로 나타내었지만, 이 비율을 상황에 따라 유연하게 조정가능하다고 언급하고 있다. 아라온호와 같은 일반적인 쇄빙선의 경우 빙하중과 파랑하중 모두를 받는 운항 환경을 항해하지만 각각의 환경에 따른 특정 부위의 응력 발생 상황은 다를 수 있기 때문에 이 비율을 똑같이 적용하는 것은 문제가 있어 보인다. 그러므로 추후에는 선박들의 운

항조건, 운항일수, 해상상태, 하중 크기 등 여러 조건을 고려해서 피로문제에 대한 허용 기준을 세울 수 있는 심도 있는 연구가 필요하며 구체적인 절차가 개발되어야 할 것이다.

본 연구에서는 아라온호를 대상으로 파랑하중과 빙하중 작용 부위에 따른 피로손상지수를 고려하고, 일반항해와 빙해역을 운항하는 연구항해의 운항 일수를 고려해서 피로손상을 평가한 후, Lloyd's Register(2011)가 제시한 단순화된 기준으로 피로수명을 계산하였다.

4.1 피로손상 계산 과정

본 연구에서는 빙충돌이 주로 발생하는 아라온호의 선수 선측부를 빙하중 계측 부위로 선정했으며, 그 중에서 가장 피로에 취약한 프레임과 보강재 하부 용접부의 피로손상평가를 수행하였다. 참고로 보강재를 표시할 때 선수방향으로 프레임 번호 뒤 's'를 표기하여 나타냈다. 그리고 수평과 수직방향의 각 위치에서 피로손상을 알아보기 위해서 Fig. 2과 같이 수직방향으로 위에서 아랫방향으로 _1, _2, _3을 표기하였으며, Fig. 2는 아라온호의 2010년도 북극해 운항당시 선수 선측에 부착한 스트레인 게이지 위치를 나타냈다. 아라온호의 104~106번 프레임의 치수는 730mm×28mm + 100mm×23mm이며, 107~109번 프레임의 치수는 600mm×23mm + 80mm×23mm이다.

본 연구에서 파랑하중과 빙하중으로 인한 피로손상지수를 계산하기 위해 2010년도 아라온호의 북극해에서 연구항해를 수행하는 동안 계측한 자료를 바탕으로 하였다(Lee et al., 2013; Kim and Lee, 2014). 그리고 빙해역을 주로 항해하는 연구일수와 일반해역을 운항하는 이동항해로 구분하였다. 극지연구소(Korea Polar Research Institute, KOPRI)로부터 입수한 아라온호의 연간 운항일수를 Table 1에 나타냈다. 본 연구에서 피로손상지수를 계산하기 위해 설정한 운항일수는 북극해 평균 연구항해 27일, 이동항해 32일이다. 연구항해의 경우 연구항해 일수 동안 앞서 계측한 빙하중 패턴이 반복적으로 작용한다고 가정하고 피로손상지수를 계산하였으며, 이동항해 또한 파랑하중 패턴이 반복적으로 작용한다고 가정하였다.

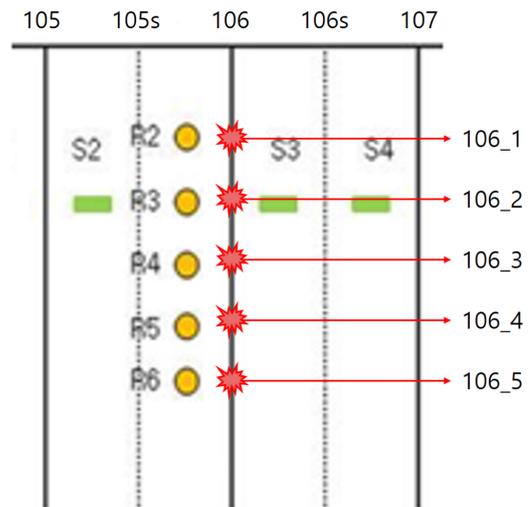


Fig. 2 Location notation of stiffener between frames in vertical direction

Table 1 Number of days of annual voyage of ARAON (KOPRI)

	Research and general voyage				Preparation of the voyage and supply			
	Research		General		Foreign port of call		Base supply	
	South	North	South	North	South	North	Jang Bogo Station	King Sejong Station
2010	21.5	21	99.5	29	27	5	0	8
2011	56.5	13	119.5	32	28	5	10	6
2012	44	34	75	32	22	5	21	0
2013	43.5	31.5	135.5	29.5	35.5	7	23.5	5
2014	26.5	37	103	35	21	8	27	0
2015	48	26	95.5	37	19	8	7.5	0
2016	42	25	97.5	32	26.5	8	6.5	0
2017	44	30	126	32.5	31	5.5	6	2
Avg.	41	27	106	32	26	6	13	3

피로손상지수 계산은 누적손상법칙인 식 (1)을 이용하였다. n_i 는 아라온호에서 측정된 응력범위의 반복 횟수이고, N_i 는 해당 응력범위에서 누적피로손상이 1.0이 되어 피로균열이 발생하게 되는 반복 횟수이다. 프레임하부 등과 같은 용접 이음부의 피로평가를 위해서 영국 에너지청의 'D'curve를 선택하였다.

러시아의 Arctic and Antarctic Research Institute(AARI)는 아라온호의 남극항해 시에 쇄빙성능 및 빙하중 분석을 수행하였다. 이 연구에서 Likhomanov(2010)는 아라온호의 선수 추진기실 선측 외판에 빙하중이 가해진 상황을 가정하고 유한요소법에 의해 응력 해석을 수행하였다. Fig. 3는 AARI에서 수행하였던 응력 해석 결과를 나타내었다. 선체 외판에서 측정된 응력 값 ($\sigma_{support}$)은 40.2MPa이며, 관심영역인 프레임하부의 응력 값 (σ_{span})은 60.8MPa로 나타났다. 이때, 선체 외판과 프레임 하부의 응력비는 $\sigma_{support}/\sigma_{span} = 60.8/40.2 = 1.512(\text{Mpa})$ 로 계산되었다. 따라서 선측 외판에 부착된 스트레인 게이지를 통해 측정된

응력을 σ_A 라고 했을 때, 관심영역인 프레임 하부의 응력은 앞서 계산된 값과 측정된 응력을 곱하여 식 (5)처럼 나타낼 수 있다. 보다 정확한 연구를 위해서는 관심부위인 프레임과 보강재 하부에 스트레인 게이지를 부착하여 변형률을 측정해야 하지만, 2010년 북극에서의 쇄빙 운항 시에 선수선측에 작용하는 빙하중을 측정하고 쇄빙 성능을 확인하는 것이 목적이었기 때문에 관심 부위에 직접 스트레인 게이지를 부착하지 않았다. 이러한 이유로 간접적인 응력 추정법을 적용하였다.

$$\sigma_A \times 1.512 = \text{Stress value} \quad (5)$$

본 연구에서 피로손상 지수의 계산 과정을 설명하기 위해 프레임 106_2의 계산 과정을 Table 2에 나타내었다. 먼저 양쪽의 게이지(R3 & S3)에서 0.02초 간격으로 측정된 응력을 측정시간순으로 정리한 후에, 일정 기준을 넘는 응력을 선별하여 정리하였다. 이때, 고려해야 할 것은 프레임 하부의 응력을 구하기 위해서 양 옆에 위치한 두 개의 스트레인 게이지에서 동 시간에 발생한 응력을 어떻게 처리할 것인가 하는 것이다. 본 연구에서는 0.50초 보다 작은 간격으로 발생한 응력을 중복응력이라 하였으며, 같은 해빙이 접촉하였다고 간주하였다. 그리고 중복응력의 산술평균값과 최대값으로 각각 피로손상지수를 계산하였다. 본 연구에서는 이전 연구와 동일한 계산방법을 적용하여 피로손상지수를 계산하였다. 피로손상지수 계산 과정은 다음과 같다. 측정된 응력에 1.512를 곱하여 관심영역의 응력을 구한다. S-N선도에서 D curve를 적용하여 $\log N$ 과 해당 응력에서 파괴가 일어나게 되는 반복횟수 N_i 를 구한다. 그리고 n_i 가 1,296인 이유는 0.5시간의 측정시간을 24시간으로 확장하고 운항일수인 27일만큼 지속되었다고 가정하였을 때 n_i 값이 $27 \times (24/0.5) = 1,296$ 으로 계산된다. 이 후 각각의 응력에서 피로손상지수 n_i/N_i 를 계산하고, 이를 합하여 최종적인 피로손상지수를 구한다.

4.2 피로손상지수 계산 결과 및 비교

앞서 언급한 계산 절차를 적용하여 아라온호의 2010년도 북극해 운항 시 측정된 데이터를 바탕으로 단순 피로손상지수를

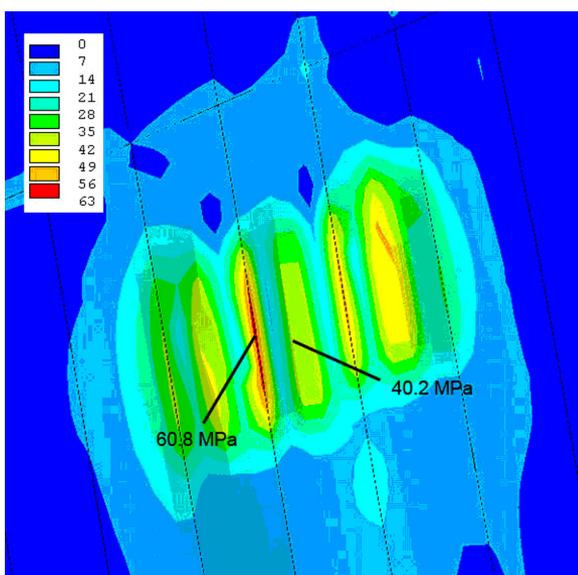


Fig. 3 Ratio of the stresses in the outer plating and the span and near the frame(Likhomanov, 2010)

Table 2 Example of the calculation process for fatigue damage index(average stress case at FR. 106_2)

Time	σ_A	σ_A (Avg.)	$\sigma_A \times 1.512$	LogN (D curve)	N_i	n_i	n_i/N_i	Sum
514.96	28.47	28.47	43.05	7.277658	18,952,115	1,296	6.84E-05	0.0007160
926.78	24.69	24.69	37.33	7.463289	29,059,567	1,296	4.46E-05	
1,408.04	26.84	26.84	40.58	7.354549	22,622,927	1,296	5.73E-05	
1,580.80	20.77							
1,581.06	36.92	28.85	43.61	7.260666	18,224,932	1,296	7.11E-05	
1,604.00	22.60	22.60	34.17	7.578571	37,894,047	1,296	3.42E-05	
1,606.32	20.16	20.16	30.48	7.727317	53,372,438	1,296	2.43E-05	
1,881.44	21.65	21.65	32.74	7.634473	43,099,529	1,296	3.01E-05	
2,062.76	37.87	37.87	57.26	6.906068	8,055,041	1,296	0.000161	
2,212.04	22.90							
2,212.38	26.20	24.55	37.12	7.470786	29,565,558	1,296	4.38E-05	
3,468.54	30.38							
3,468.96	48.45	39.41	59.59	6.854036	7,145,551	1,296	0.000181	

Table 3 Fatigue damage index of frame & stiffener by ice loads

Frame	Avg	Max
104_105	0.000554	0.000884
105	0.000178	0.000238
105_106_1	0.002137	0.002139
105_106_2	0.001618	0.010161
105_106_3	0.002046	0.002070
105_106_4	0.000644	0.000697
105_106_5	0.000679	0.000681
106_1	0.002137	0.002139
106_2	0.002939	0.010394
106_3	0.002042	0.002066
106_4	0.000644	0.000697
106_5	0.000679	0.000681
106_107	0.000797	0.000940
107	0.003552	0.005820
107-108	0.005138	0.006043
108	0.002653	0.002954
108_109	0.004356	0.007634

계산하였다. Table 3은 2010년 북극에서 연구항해를 통해 계측된 빙하중 데이터로 계산된 피로손상지수를 나타내었다. 계산 결과는 날짜별 계측 시간을 연구항해 평균일수인 27일로 확장한 것이다. 표시된 Avg는 동시에 계측된 중복응력의 산술평균값을 이용하여 각 프레임과 보강재에서의 피로손상지수를 계산한 결과이며, Max는 중복응력 중 최대값을 가지고 피로손상지수를 계산한 결과이다.

앞서 계산한 피로손상지수를 비교해보면, 산술평균값일 때는 107s에서 0.005138로 가장 높게 나타났으며, 최대값으로 계산한 경우에는 FR.106_2에서 0.010394로 가장 높게 나타난 것을 볼 수 있다(Fig. 4). 산술평균과 최대값으로 계산하였을 때, 피로손상지수의 차이는 84.08% 정도로 크게 나타났다. 보다 안전한 선박이라는 보수적인 관점에서는 선체에 작용하는 최대응력을 중요하게 고려해야 할 것으로 판단된다.

또한 이동항해 중 계측된 데이터를 통해 파랑하중으로 인한 피로손상지수를 계산하였다. 계측된 데이터를 동일한 과정으로 피로손상지수를 계산하였으며, 그 값을 Table 4에 정리하였다. 피로손상지수가 가장 크게 나타난 부위는 산술평균과 최대값으

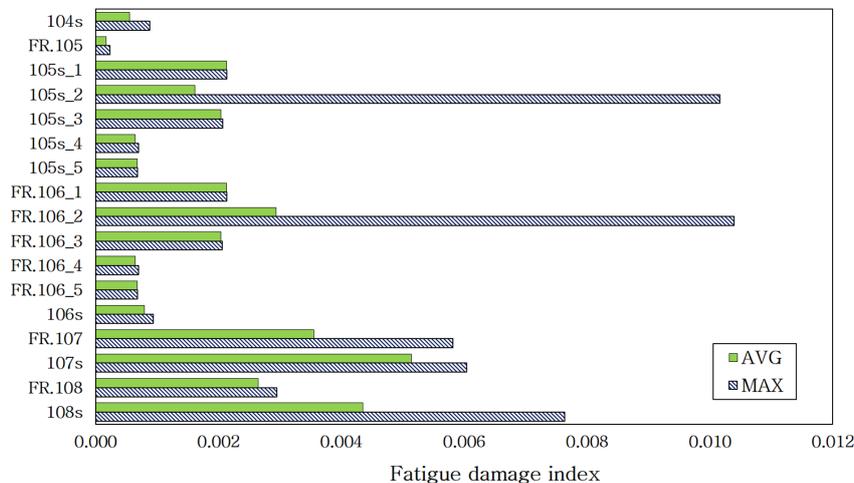


Fig. 4 Comparison of average and maximum values in 2010

Table 4 Fatigue damage index of frame & stiffener by wave loads

Frame	Avg	Max
104s	0.000752	0.000811
FR.105	0.000000	0.000000
105s_1	0.001134	0.001574
105s_2	0.002188	0.002373
105s_3	0.006309	0.006609
105s_4	0.003083	0.004486
105s_5	0.001474	0.001602
FR.106_1	0.001134	0.001574
FR.106_2	0.002188	0.002373
FR.106_3	0.006309	0.006609
FR.106_4	0.003083	0.004486
FR.106_5	0.001474	0.001602
106s	0.000000	0.000000
FR.107	0.002097	0.002118
107s	0.002097	0.002118
FR.108	0.000000	0.000000
108s	0.010656	0.011424

로 계산한 두 가지 경우 모두 108s에서 나타났으며, 각각 0.010656, 0.011424로 계산되었다. 빙하중의 피로손상지수가 높게 나타난 부위보다 선수에 가까운 위치에서 나타났다.

4.3 아라온호의 남극 운항 시나리오 적용

남극 운항 상황을 가정하고 이에 대한 피로손상지수를 추정

하였다. 본 연구에서 설정한 남극운항 상황은 연구항해 동안 받는 빙하중은 북극과 동일하다고 가정하고, 파랑하중의 경우 북극 운항 시 계측된 파랑하중의 100%, 150%, 200%로 설정하였다. 이는 아라온호의 남극 운항일수가 북극에 비해 높은 비중을 차지하고 있으며, 뉴질랜드 크라이스처치 항에서 세종과학기지 사이를 운항하기 전에 기상 상태를 점검하더라도 시시각각 기후가 변하기 때문에 악천후를 만날 가능성을 고려하였다. 운항일수는 극지연구소(KOPRI)에서 입수한 자료를 통해 남극의 평균 연구항해 41일, 평균 이동항해 106일을 적용하였다. Table 5에는 남극 운항 상황을 가정하였을 때, 빙하중과 파랑하중의 영향에 따른 피로손상지수를 나타내었다. 빙하중에 의한 피로손상지수는 산술평균으로 계산 시 0.0078022, 최대값으로 계산 시 0.0294058로 나타났다. 파랑하중의 영향에 따른 피로손상지수 또한 북극 운항보다 높게 나타났으며, 파랑하중을 200% 고려했을 때 피로손상지수는 90% 넘게 증가하였다.

4.4 피로수명 평가

가정된 남극 운항에 따른 빙하중과 파랑하중을 고려하여 피로수명을 계산하였다. 이때, 로이드 선급의 ShipRight FDA ICE 피로평가 기준을 적용하였다. 1년 동안 빙에 의해 누적된 피로손상지수(Ω_{ice})와 파랑에 의한 피로손상지수(Ω_{wave})가 계산되었을 때, 피로수명(Y_f)는 1.0의 피로손상지수를 가진다고 단순하게 표현하였다(식 (6)).

$$1\text{year} : \Omega_{ice} + \Omega_{wave} = Y_f : 1.0 \quad (6)$$

단순화된 식을 통해 피로수명은 아래의 식 (7)로 구할 수 있다.

Table 5 Fatigue damage index of frame & stiffener by ice loads and wave loads in the assumed Antarctic voyage conditions

Frame	by ice load		by wave load					
	Avg	Max	100 %		150 %		200 %	
			Avg	Max	Avg	Max	Avg	Max
104s	0.000841	0.001342	0.0024908	0.0026852	0.0084064	0.0090627	0.0199262	0.0214819
FR.105	0.000270	0.000362	0.0000000	0.0000000	0.0000000	0.0000000	0.0000000	0.0000000
105s_1	0.002955	0.002957	0.0037576	0.0052124	0.0126817	0.0175920	0.0300702	0.0417095
105s_2	0.002457	0.015430	0.0072492	0.0078602	0.0244660	0.0265282	0.0579935	0.0628816
105s_3	0.003051	0.003027	0.0209002	0.0218916	0.0705382	0.0738840	0.1672017	0.1751325
105s_4	0.000977	0.001294	0.0102134	0.0148611	0.0344702	0.0501562	0.0817070	0.1188888
105s_5	0.001031	0.001035	0.0048834	0.0053081	0.0164813	0.0179149	0.0390669	0.0424649
FR.106_1	0.002955	0.002957	0.0037576	0.0052124	0.0126817	0.0175920	0.0300702	0.0417095
FR.106_2	0.007067	0.029406	0.0072492	0.0078602	0.0244660	0.0265282	0.0579935	0.0628816
FR.106_3	0.003045	0.003022	0.0209002	0.0218916	0.0705382	0.0738840	0.1672017	0.1751325
FR.106_4	0.000977	0.001294	0.0102134	0.0148611	0.0344702	0.0501562	0.0817070	0.1188888
FR.106_5	0.001031	0.001035	0.0048834	0.0053081	0.0164813	0.0179149	0.0390669	0.0424649
106s	0.001210	0.001428	0.0000000	0.0000000	0.0000000	0.0000000	0.0000000	0.0000000
FR.107	0.005394	0.008838	0.0069451	0.0070150	0.0234398	0.0236757	0.0555609	0.0352085
107s	0.007802	0.009176	0.0069451	0.0070150	0.0234398	0.0236757	0.0555609	0.0352085
FR.108	0.004028	0.004486	0.0000000	0.0000000	0.0000000	0.0000000	0.0000000	0.0000000
108s	0.006614	0.011592	0.0352984	0.0378413	0.1191320	0.1277143	0.2823869	0.3027301

Table 6 Fatigue life for each case

	Case 1		Case 2		Case 3	
	Ice & 100 % wave		Ice & 150 % wave		Ice & 200 % wave	
	Avg	Max	Avg	Max	Avg	Max
Measuring point	108s					
Fatigue life [year]	23.9	20.2	8.0	7.2	3.5	3.2

$$Y_f = \frac{1.0}{\Omega_{ice} + \Omega_{wave}} \quad (7)$$

피로수명 계산은 프레임 또는 보강재 별로 같은 위치에서 계산된 피로손상지수를 가지고 계산하였다. 시나리오별로 피로손상이 높게 평가되어 낮은 수명이 나타난 위치와 그 위치에서 피로수명을 Table 6에 표시하였다. 누적되는 피로가 높은 위치는 모든 경우에서 108s로 나타났으며, 피로수명은 Case 3의 경우 3.5년과 3.2년으로 상당히 낮게 나타났다. 산술평균과 최대값으로 계산한 두 개의 피로수명은 Case 1에서 3.6년, 파랑하중의 영향을 가장 크게 고려한 Case 3에서 0.3년 정도 차이가 나타났다.

5. 결 론

본 연구에서는 2010년 8월 아라온호가 북극에서 연구 활동을 수행하는 동안 측정한 변형률 데이터를 이용하여 이동항해와 연구항해에 따라 받게 되는 파랑하중과 빙하중의 피로손상지수를 계산하였다. 이는 쇄빙선처럼 빙해역을 운항하는 선박은 파랑하중과 빙하중을 모두 받게 된다는 점을 고려한 것이다. 또한 남극 운항 상황을 가정하여 파랑하중의 영향에 따른 피로손상지수를 예측해 보았다.

(1) 극지연구소(KOPRI)를 통해 입수한 자료에 따르면, 아라온호의 북극해 평균 운항일수는 연구항해 27일, 이동항해 32일이었다. 연구항해 동안 받는 빙하중에 의한 피로손상지수는 산술평균으로 계산했을 때 107s에서 0.005138로 가장 높게 나타났으며, 최대값으로 계산하면 FR.106_2에서 0.010394로 가장 높았다. 이동항해 동안 받는 파랑하중은 산술평균과 최대값 모두 108s에서 나타났으며, 각각 0.010656, 0.011424로 계산되었다.

(2) 아라온호는 북극운항보다 남극운항의 비중이 높아지고 있다. 특히 이동항해의 경우 남극에서의 운항일수가 북극보다 3배 이상 높다. 그리고 남극의 해상조건이 시시각각 변한다는 점을 고려하여 파랑하중에 대한 영향을 100%, 150%, 200%로 가정하였다. 빙하중으로 인한 손상지수는 산술평균으로 계산하였을 때 0.0078022, 최대값으로 계산한 경우에는 0.0294058이었다. 파랑하중으로 인한 피로손상은 북극으로의 이동항해 대비 파랑하중의 영향력이 높아질수록 피로손상지수가 크게 증가하는 것을 확인할 수 있었다. 200%의 영향을 고려하였을 때 피로손상지수는 산술평균으로 계산하면 0.2823869, 최대값으로 계산한 값은 0.3027301로 북극운항보다 90% 이상 높게 증가하였다. 한편, 본 연구에서는 남극의 파랑하중을 단순하게 가정하여 피로손상평가를 수행하였다. 연구를 더욱 엄밀하게 진행하기 위해서는 운

항경로를 따라서 파랑하중을 정확하게 예측하거나 파랑 스펙트럼 자료를 통해 파랑하중에 대해 정밀한 해석이 필요하며, 추후 이러한 과정을 통해 더욱 구체적인 피로수명평가를 수행하는 것이 보다 합리적인 결과를 줄 것으로 생각된다.

(3) 가정된 남극 운항 상황에서 빙하중과 파랑하중의 피로손상지수 기준을 각각 0.5로 설정하였고, 두 가지 하중을 같이 고려하여 피로수명을 계산하였다. 파랑하중의 영향에 따라 3개의 경우로 구분하였다. 파랑하중을 북극과 동일한 수준으로 설정한 case 1에서는 최대값으로 계산한 경우에 피로수명은 20.2년으로 나타났다. 그리고 파랑하중을 150%와 200%로 설정한 case 2와 case 3에서 피로수명은 각각 7.2년과 3.2년으로 case 1에 비해서 크게 줄어든 것을 확인할 수 있었다. 남극의 파랑하중을 북극 기준으로 100%, 150%, 200%로 증가시켰을 때, 피로수명이 급격히 낮아지는 결과로 보아 빙해역을 주로 운항하는 선박일지라도 파랑하중에 의한 영향을 크게 받을 수 있으며 피로수명을 평가할 때 파랑하중 또한 중요한 요소라고 판단된다.

(4) 빙하중과 파랑하중을 동시에 고려하여 북극 및 가정된 남극운항에 대해 피로수명을 예측하였다. 빙하중의 경우 북극운항에서 예측된 수준과 동일하게 설정하였지만, 파랑하중의 영향은 다르게 설정하였고, 크기는 북극운항 대비 200%까지 설정하였다. 뉴질랜드와 남극사이를 운항하기 전에 기상상황을 체크하기 때문에, 악천후를 마주치는 상황은 많지 않다. 하지만, 남극의 해상 날씨의 예측을 하더라도 시시각각 변하기에 혹독한 환경을 가정해 볼 필요가 있다. 그리고 이런 혹독한 환경을 가정하였던 case 3에서 피로수명이 3.2년으로 낮게 나온 것은 남극인근 해양에서의 운항비율이 높은 아라온호의 피로수명을 평가할 때 파랑하중에도 관심을 가져야 하는 의미라고 판단된다.

후 기

본 연구는 한국연구재단의 BK21 플러스 프로그램의 후원으로 수행된 연구결과이며, 연구비 지원에 감사드립니다.

References

- ABS, 2011. Guide for Ice Loads Monitoring Systems. American Bureau of Shipping, Houston, USA.
- Bridges, R., Riska, K., Zhang, S., 2006. Preliminary Results of Investigation on the Fatigue of Ship Hull Structures When Navigating in Ice. Proceedings of Engineers Seventh International Conference and Exhibition on Ships and Structures in Ice, Banff, AB, Canada.
- Hwang, M.R., Kwon, Y.H., Lee, T.K., 2016. A Preliminary Study on the Ice-induced Fatigue in Ice-going Ships. Journal of Ocean Engineering and Technology 30(4), 303-309.
- International Organization for Standardization (ISO), 2010. Petroleum and Natural Gas Industries - Arctic Offshore Structures. ISO19906.
- ISSC, 2012. Arctic Technology. 18th International Ship and Offshore Structures Congress, 2, Rostock, Germany.

- Kim, T.W., Lee, T.K., 2014. Study on Estimation of Local Ice Pressures Considering Contact Area with Sea Ice. *Journal of Ocean Engineering and Technology*, 28(5), 423-428.
- 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), 88-92.
- Likhomanov, V., 2010. Full-Scale Ice Trials of the Korean Research Icebreaker ARAON. Arctic and Antarctic Research Institute (AARI), Scientific-Technical Report.
- Lloyd's Register, 2011. FDA ICE Fatigue Induced by Ice Loading, ShipRight Design and construction - Fatigue Design Assessment. Lloyd's Register, London, United Kingdom.
- Zhang, S., 2011. Fatigue Design Assessment of Ship Structures Induced by Ice Loading - An Introduction to the ShipRight FDA ICE Procedure. Proceedings of the Twenty-first International Offshore and Polar Engineering Conference, Maui, Hawaii, USA, 1082-1086.