

A Preliminary Study on the Ice-induced Fatigue in Ice-going Ships

Mi-Ran Hwang, Yong-Hyun Kwon* and Tak-Kee Lee**

*Dept. of Ocean System Engineering, Graduate School, Gyeongsang National University, Tongyeong, Korea

**Dept. of Naval Architecture and Ocean Engineering, Gyeongsang National University, Institute of Marine Industry, Tongyeong, Korea

빙 해역 운항선박의 빙 유기 피로문제에 대한 기초연구

황미란* · 권용현* · 이탁기**

*국립 경상대학교 대학원, 해양시스템공학과

**국립 경상대학교 조선해양공학과, 해양산업연구소

KEY WORDS: Ice-induced fatigue 빙 유기 피로, Ice loads 빙 하중, Fatigue damage 피로손상, Ice-going ships 빙 해역 운항선박, Ice-covered waters 빙 해역

ABSTRACT: As commercialization of the Arctic sea route and resource developments are regularized, demands for ice-breaking tankers, LNG carriers, and offshore plants are expected to increase. In addition, the existing ice-breaking cargo ships navigating in the ice-covered waters are worn out. Hence, the construction of new ships is likely to be undertaken for both current and long-term applications. The design of ships navigating in ice-covered waters demands conservative methods and strict development standards owing to the extreme cold and collision tendencies with ice floes and/or icebergs. ISO 19906 recently stated that a fatigue limit should be defined when designing Arctic offshore structures such that the ice-induced fatigue becomes one of the important design drivers. Thus, establishing systematic measures to mitigate ice-induced fatigue problems in ice-breaking ships are important from the viewpoint of having a competitive advantage. In this paper, the issues relating to ice-induced fatigue problems, based on data and published literature, are examined to describe the criticality of ice-induced fatigue. Potential fatigue damage possibilities are investigated using data measured in the Arctic Ocean (2013) and using the Korean icebreaker, ARAON.

1. 서 론

지구온난화로 북극지역 자원개발 및 수송 여건이 크게 개선되었다. 이에 따라 러시아, 노르웨이, 덴마크, 미국, 캐나다 등의 북극해 연안 국가들은 국가적인 차원에서 관련 인프라 건설과 북극지역 자원개발 사업을 활발히 계획하거나 추진하고 있다. 또한 북극해 항해 가능 일수가 길어짐에 따라 새로운 수송로가 개척되면서 북극항로를 통한 석유·가스 수송 가능성도 크게 높아지게 되었다.

향후 북극지역의 상업적 이용은 북극해 항해에 적합한 선박 건조 및 운항을 활성화할 전망이다(Lee, 2010). 무엇보다도 북극해를 통해 물자를 수송하려면 쇄빙기능이 있는 선박이 필요한데 현재 빙 해역에서 충돌 및 좌초에 의한 해상오염을 방지하기 위해 쇄빙선의 설계와 운항조건을 국제적으로 규정하고 있다. 이러한 빙 해역 규정(Ice class rule)을 만족시키지 못하는

선박은 빙 해역을 운항할 수 없게 되어있다.

그리고 ISO19906은 극지 해양구조물 설계 시 피로 한계 상태를 고려해야 한다고 명시하였고, LR(Lloyd's Register)는 최근 빙 해역을 항해하며 빙 하중을 받는 선체 구조의 피로손상을 평가하는 ShipRight FDA ICE를 개발하며 빙 해역을 항해하는 선박의 선체 구조에 대한 피로성능의 중요성을 강조했다(Lloyd's Register Group Limited. 2014). 이는 쇄빙선이나 내빙선이 유빙이나 빙산 등이 출몰하는 결빙해역에서 반복적으로 선체에 작용되는 빙 하중으로 인한 피로로 선체가 손상을 입을 수 있음을 의미한다.

결빙해역을 항해하는 선박은 빙 해역의 얼음을 부수어 작은 조각으로 깨거나 유빙을 밀어내는 과정에서 크고 작은 빙 하중을 반복적으로 받는데, 이러한 반복하중으로 인해 미세한 균열이 누적되다 파괴로 이어지는 것을 빙 유기 피로라 할 수 있다. 본 논문에서는 빙 유기 피로문제에 대한 문헌조사를 통해 빙

Received 23 July 2015, revised 11 August 2016, accepted 18 August 2016

Corresponding author Tak-Kee Lee +82-55-772-9193 tklee@gnu.ac.kr

© 2016, The Korean Society of Ocean Engineers

It is noted that this paper is revised edition based on proceedings of KAOST 2015 in Jeju.

해역 운항 선박의 피로 문제에 대해 조사하였으며, 이를 우리나라의 쇄빙 연구선인 아라온호에도 적용하여 피로손상 가능성을 검토하였다.

2. 빙 유기 피로 설계 평가 절차

2.1 빙 해역 운항 선박에 대한 피로문제의 중요성

LR는 최근 빙 해역 항해 시 빙 하중을 받는 선체구조의 피로손상을 평가하기 위해 피로 설계 평가 절차 ShipRight FDA ICE를 개발했다. LR는 전문적인 경험적 지식과 실선 실험(Full scale field test)을 바탕으로 8가지 Notation(SDA, Structural design assessment; FDA, Fatigue design assessment; CM, Construction monitoring; HCM, Hull condition monitoring; SEA, Ship event analysis; ES, Enhanced scantlings; SERS, Ship emergency response service; PCWBT, Protective coatings in water ballast tanks)을 제시하며 FDA를 현 산업에서 가장 중요하게 지켜봐야 할 관심사 중 하나라고 설명했다(Zhang et al., 2011).

ShipRight FDA ICE에서는 혹독한 기후와 두꺼운 얼음이 지배하는 환경에서 선박의 피로손상 위험을 감소시키고 저온에서 운항하는 선박의 안전을 확보하는 것을 목표로 선박의 기능과 구조 건전성(Structural integrity)을 집중 검사하고 평가하는 일이 필요하다고 강조했다.

1980년대 해양파에 의한 파랑하중으로 유조선 및 벌크선에 피로 균열과 파괴가 발생하는 사고가 다수 있었다. 그 후 LR은 1994년 상선 구조의 피로 성능을 결정하는 평가법을 제공하기 위해 ShipRight FDA 절차를 소개하였고, 평가법의 일부를 설계 시 도입하면서 선체 구조의 피로 파괴사고를 감소시키는데 기여하고 있다. 빙 하중으로 인한 피로손상은 상대적으로 적은 관심을 받고 있지만, 빙 해역 운항선박(Ice classed ships)의 피로로 인해 발생하는 선체 구조의 균열과 파괴는 적어도 일반해역 운항선박(Non ice classed ships)의 파랑하중에 의한 피로손상만큼 중요하다고 할 수 있다.

1970년 1월에서 2009년 12월까지 40년 동안의 LR 선대 데이터베이스를 활용하여 빙 해역 운항선박의 피로 손상 내역을 파악할 목적으로 손상 및 결함의 모든 유형을 조사하였다. 조사결

과, 총 690대의 빙 해역 운항선박에서 57%, 5,474대의 일반해역 운항선박 중 52%에서 균열이나 파괴가 발생되었다(Fig. 1 참조). 이는 서로 비슷한 정도의 균열과 파괴가 발생한다는 것을 보여주는 것으로, 빙 해역 운항선박에서의 피로평가가 일반해역 운항선박의 피로문제만큼 중요하다는 것을 의미하는 것이다(Lloyd's Register Group Limited., 2014).

2.2 피로 허용 기준

빙 해역 운항선박이 빙 해역과 공해상의 파랑환경에서 운항한다고 가정하면 총 피로 손상지수는 다음 기준을 만족해야 한다.

$$\Omega = (\Omega_{ice} + \Omega_{wave}) \leq 1.0 \tag{1}$$

Ω_{ice} = fatigue damage index induced by ice load

Ω_{wave} = fatigue damage index induced by wave loads

ShipRight FDA ICE에서는 일반적으로 아래와 같이 단순화된 허용 기준을 적용하였는데 빙 하중에 의한 피로손상지수(Ω_{ice})와 파랑하중에 의한 피로손상지수 (Ω_{wave})를 각각 0.5로 가정하여 이 둘의 합이 1.0을 넘지 말아야 한다고 하였다(Zhang et al., 2011).

$\Omega_{ice} \leq 1/2$: 빙 하중에 의한 피로 손상지수, 빙 해역에서의 설계 수명 50%를 가정

$\Omega_{wave} \leq 1/2$: 파랑하중에 의한 피로 손상지수, 파랑환경에서의 설계 수명 50%를 가정

2.3 사례 연구

ShipRight FDA ICE 절차를 이용하여 기존의 LNG선박과 유조선의 피로성능을 조사하였다. 발트해의 Kemi, Kokkola와 Primorsk 무역경로가 채택되었고, Load Waterline(LWL) 하에 있는 중 보강재의 피로성능을 검토하였다. 선수부의 6곳, 선체 중앙부와 선미부의 각 1곳에서 평가를 수행했다. Fig. 2는 평가장소를 나타낸 그림이다.

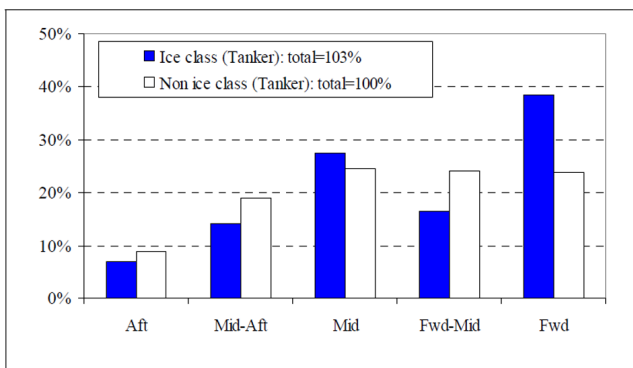


Fig. 1 Damage distribution at side shell structures of ice class oil tankers and non ice classed oil tankers (service history data)

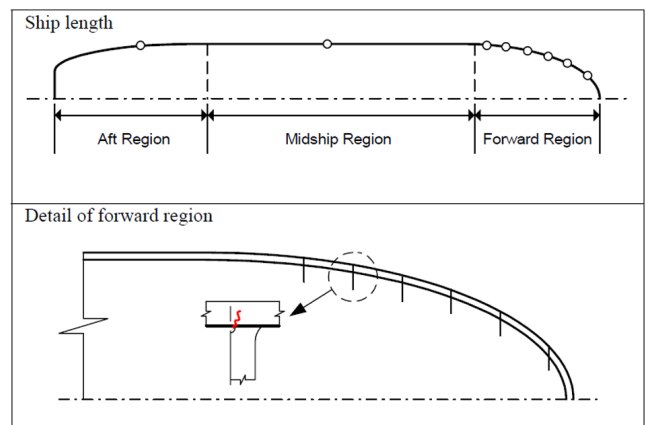


Fig. 2 Illustration of the assessed locations

사례연구 1: LNG 선

피로설계 수명이 20년인 150,000m³급의 LNG선을 대상으로 하였다. Table 1은 사례연구의 결과로써 대상 프레임의 위치에 따라 빙 하중에 의한 피로손상을 수치로 정리한 것이다. Primorsk 경로에 대한 모든 손상 지수는 1/2보다 작은 결과를 내지만, Kemi와 Kokkola 경로에 대한 일부 프레임의 손상지수는 1/2보다 크다.

Table 1 Fatigue damage index for LNGC (Zhang et al., 2011)

Location	Fatigue Damage (F2 curve, 20 year design life)				
	Fr#	X/Lpp	Kemi	Kokkola	Primorsk
Aft	45	0.10	0.18	0.04	0.04
	85	0.50	0.26	0.07	0.06
	102	0.81	0.18	0.04	0.04
Midship	104	0.85	0.47	0.12	0.10
	106	0.88	1.85	0.51	0.43
	108	0.91	0.91	0.24	0.21
Forward region	110	0.93	1.57	0.43	0.36
	112	0.95	1.46	0.40	0.34

사례연구 2: 유조선

조사된 37,000톤급 유조선의 중 보강재 피로손상의 지수 값이 Table 2에 나타나 있다. 이 값 또한 Table1과 같이 빙 하중에 의한 피로손상을 수치로써 발트해에 위치한 세 경로에서 다수 프레임의 손상지수가 0.5보다 큰 것을 확인할 수 있다.

이를 통해 빙 해역을 항해하는 선박들의 피로 성능을 향상시키기 위해서는 일부 프레임 구조의 개선이 필요하다는 것을 알 수 있다.

Table 2 Fatigue damage index for the oil tanker (Zhang et al., 2011)

Location	Fatigue Damage (F2 curve, 20 year design life)				
	Fr#	X/Lpp	Kemi	Kokkola	Primorsk
Midship	100	0.49	5.03	1.45	1.22
	160	0.81	0.70	0.18	0.16
	166	0.84	0.70	0.18	0.16
Forward region	172	0.87	0.70	0.18	0.15
	178	0.90	2.78	0.78	0.66
	184	0.93	6.27	1.80	1.51
	187	0.95	4.22	1.22	1.03

3. 이전 실선 계측 자료에 대한 분석 예

Bridges et al.(2006)은 빙 해역 운항 시 각기 다른 겨울환경 조건(Mild, Average, Severe winter)을 고려하여 빙 하중 및 피

로 손상을 계측한 자료를 분석했다. 먼저 화학운반선을 이용해 Kokkola와 중앙 유럽을 항해하며 계측한 연간하중 및 응력진폭 히스토그램을 통해 프레임의 응력 진폭을 설정하였다. 그리고 Mild, Average, Severe winter로 나누어 하중 반복 횟수에 대한 프레임 응력을 나타내었다(Fig. 3). 이에 따르면 다양한 응력범위에서 프레임에 응력이 작용하는 것을 확인할 수 있다. 또한 작은 값의 응력들이 수차례 프레임에 작용하는 것을 볼 수 있는데 이처럼 반복적으로 빙 하중이 작용한다면 잠재적인 피로 손상이 일으킬 수 있다. 또한 얼음의 두께가 증가할수록 선체에 큰 응력을 유발하며 피로를 발생시키는 것을 확인할 수 있는데 발트해의 Kokkola와 Kemi를 항해하며 피로손상을 계측한 그래프가 Fig. 4에 나타나 있다. Fig. 4에 따르면 얼음의 두께가 두꺼워질수록 피로손상이 커짐을 알 수 있는데 이는 손상 및 파괴 문제로 이어질 수 있기 때문에 얼음의 두께가 가장 두꺼워지는 Severe winter에 큰 문제가 될 수 있다는 결론을 내릴 수 있다.

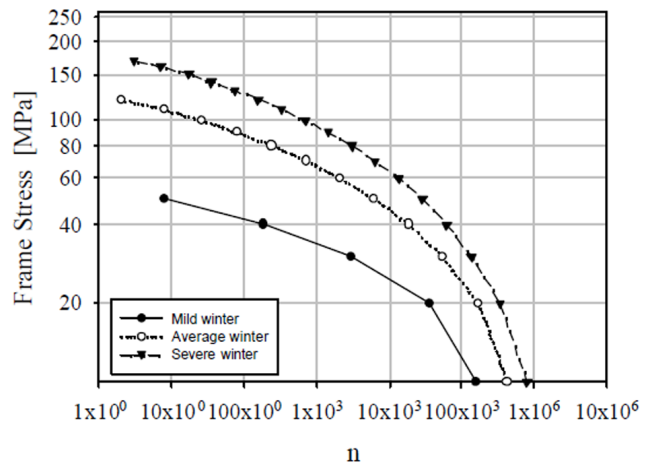


Fig. 3 The annual frame stress amplitude histograms in mild, average, severe winters for the ship route Kokkola to Central Europe (Bridges., 2006)

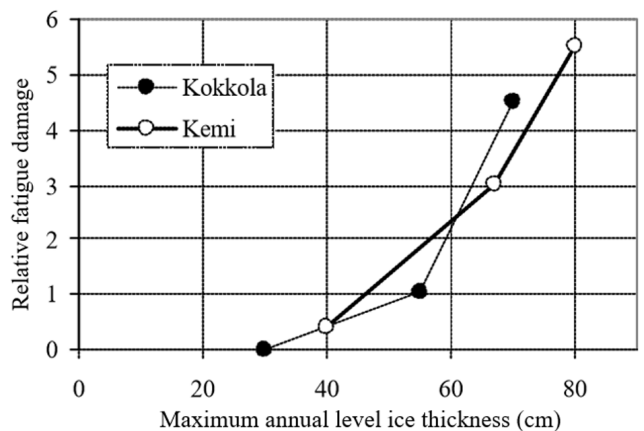


Fig. 4 The lifetime fatigue damage caused by ice loads The structural member considered is a transverse frame (Bridges., 2006)

4. 2013년 아라온호 계측결과를 이용한 예제 계산

4.1 쇄빙 연구선 아라온호의 누적피로손상 계산 절차

남극과 북극의 빙 해역을 항해하는 아라온호에 빙 유기 피로 문제를 적용시키기 위해 예제 계산을 수행하였다. Table 3은 연도별 아라온호의 운항일수로 본 예제 계산에서는 2013년 빙 해역을 주로 항해하는 연구항해를 대상으로 항구에서 빙 해역까지 유빙이 없는 구간에서의 기간을 제외하여 계산하였다. 이 개략적인 계산에 의하면, 남극의 경우 74일의 연구항해 기간 중 약 40일, 북극은 25일 중 20일 정도가 빙 해역에서의 운항일수에 해당한다. 참고로 Table 3의 S는 남극(South pole)을 의미하고 N은 북극(North pole)을 의미한다.

Fig. 5는 AARI(Arctic and Antarctic Research Institute Russian Antarctic Expedition)(Likhomanov, 2010)에서 계산한 아라온호의 선수 스티스트룸 선측 외판에 대한 빙 충격 시 응력 해석 결과이다. 이 그림에 의하면 피로손상에 민감한 부위인 프레임하부의 응력범위는 선측 외판에서 계측된 응력범위 σ_A 에 대하여

Table 3 Annual operation status for ARAON (Oh and Jung, 2014) [unit: day]

	General and Research Voyage				Preparation of the voyage and supply			Sum
	General		Research		Foreign port of call	Base supply		
	S	N	S	N				
2010	105	28	30	22	15	6	8	214
2011	119	33	79	28	19	5	6	289
2012	105	34	73	32	19	5		268
2013	144	32	74	25	17	8	11	311

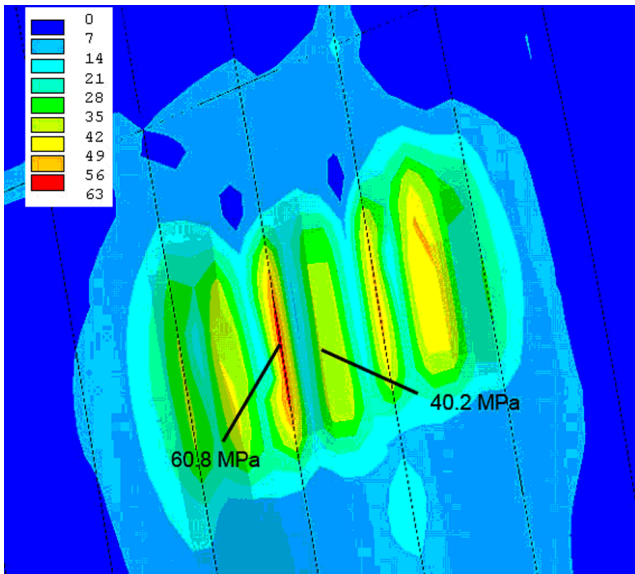


Fig. 5 Ratio of the stresses in the outer plating and the span and near the frame (unit of legend: MPa) (Likhomanov, 2010)

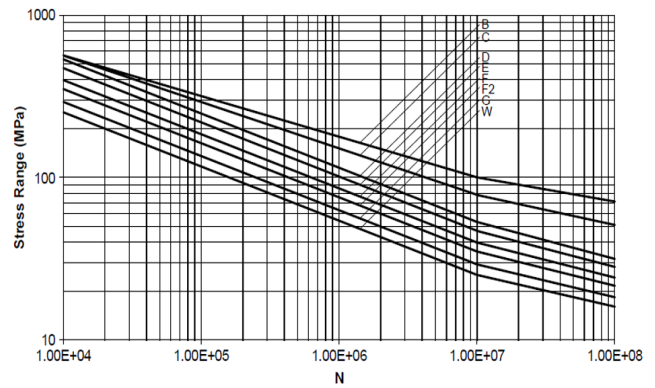


Fig. 6 DEn basic design S-N curves (Lloyd's Register Group Limited, 2011)

아래 식 (2)에 의한 계산 값을 적용함으로써 구할 수 있다. 여기서 응력범위 σ_A 는 해빙 충격 시 대부분의 응력 변동범위가 0~ σ_{Peak} 까지 이므로 $\sigma_A = \sigma_{Peak}$ 를 취하였다. 그리고 프레임 하부의 응력 범위는 AARI의 구조해석 결과를 활용하여 결정하였는데 AARI 구조해석 위치와 2013년 항해 시 계측한 위치와 같기 때문에 이를 사용하였다. 따라서 선체 외판에서 측정된 응력 값과 피로측면에서 관심부위인 프레임하부의 응력 비는 $\sigma_{support}/\sigma_{span} = 60.8/40.2 = 1.512 (MPa)$ 이다.

$$\sigma_A \times 1.512 = \text{Stress range} \tag{2}$$

피로손상은 아래 식 (3)에 의한 누적 손상법칙(Miner's rule)을 적용하였다.

$$D = \sum_{i=1}^{n_s} \frac{n_i}{N_i} \tag{3}$$

여기서, n_i 는 아라온호에서 측정된 응력범위의 반복 횟수 이다. 이때, N_i 는 각 응력범위에서 누적피로손상이 1.0이 되어 피로균열이 발생하는 Cycle 수이다. 이 값은 Fig. 6과 같은 S-N선도로부터 구할 수 있으며, 피로해석에서 프레임 하부와 같은 이음부에 대해서는 'F2' curve를 선택하였다.

식 (3)을 적용하여 계산한 값이 LR에서 정한 빙 하중에 의한 피로 손상지수 0.5보다 클 경우 피로손상이 발생한다고 볼 수 있다. 즉, 아래 식 (4)를 만족할 때 피로손상이 발생할 것이라는 예측이 가능하다.

$$\sum_{i=1}^{n_s} \frac{n_i}{N_i} > 0.5 \tag{4}$$

4.2 해빙 밀집도에 따른 예제계산

해빙 밀집도(Ice concentration, 최댓값: 10)에 따른 피로 손상치를 비교 분석하기 위해 다음 두 예제를 계산하였다. 2013년 북극해 항해에서는 연구 정점 간 이동시 계측을 수행하였기 때

Table 4 Summary of measurements and ice conditions in Araon's 2013 Arctic Voyage

Date	August 26	
Starting time	03:28	07:28
Measuring time [sec]	14,400	36,000
Estimated ice concentration	1-3	4-6

문에 측정시간이 다르게 나타났고 해빙밀집도 변화에 따라 응력 데이터를 측정하였다.

Table 4는 같은 날 측정된 두 개의 해빙 밀집도와 시간을 나타낸 표이다(Kwon et al., 2015). 아래 사례연구에서는 해빙 밀집도에 따른 예제계산을 수행하였다.

사례연구 1: 해빙밀집도가 낮은 경우

2013년 아라온호에서 측정된 Fig. 7의 응력 통계치를 사용하여 계산하였다. 해빙 밀집도는 1-3 수준이며, Fig. 7 상세 측정값은 Table 5에 나타나있다(Kwon et al., 2015).

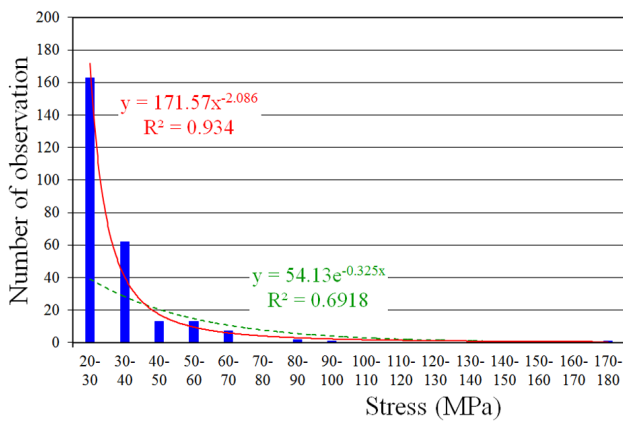


Fig. 7 Histogram and probability density approximation of stress (Measuring time = 14,400 sec.)

Table 5 Stress measurements in ice concentration 1-3

Category of stress [MPa]	Number
20-30	163
30-40	62
40-50	13
50-60	13
60-70	7
70-80	0
80-90	2
90-100	1
100-170	0
170-180	1
Sum	262

Table 6 Results of fatigue damage index in case study 1

Category of stress [MPa]	N_i	n_i	n_i/N_i
20-30	8000000	58680	0.0073
30-40	3000000	22320	0.0074
40-50	1600000	4680	0.0029
50-60	800000	4680	0.0058
60-70	460000	2520	0.0054
70-80	-	-	-
80-90	250000	720	0.0028
90-100	160000	3600	0.0225
100-170	-	-	-
170-180	18000	360	0.02
Sum			0.0744

위의 절차를 통해 계산했을 때 아라온호에 1년 동안 누적된 피로손상치의 계산 결과가 Table 6에 나타나있다. 이러한 계산 결과로부터 선박에 피로 문제가 발생할 가능성을 예상해 볼 수 있다. 즉, 1년 동안 누적된 피로 손상치는 0.074로 나타났으며 이 기간 동안에는 피로 문제가 발생하지 않을 것이라는 결과를 얻었다. 하지만, 위의 결과는 1년에 대한 피로손상 평가 결과이므로 이를 LR의 FDA ICE에서 가정된 빙 해역에서의 설계 수명률 50%와 비교해 보면 피로균열 발생수명은 약 6.7년인 것을 알 수 있다.

사례연구 2: 해빙밀집도가 중간수준인 경우

보다 자세한 예제계산을 비교분석하기 위해 응력범위별 단위 시간당 빈도수가 낮은 데이터를 사용하여 계산하였다. 앞서 예를 든 사례연구 1 (2013.08.26. 03:28)과 같은 날에 측정된 데이터로, 해빙 밀집도는 4-6이다. 해빙 밀집도가 다소 높은데도 불구하고 단위시간당 응력 범위별 빈도수가 낮은 것은 해빙이 적게 분포할 경우 운항사가 좀 더 높은 선속으로 과감하게 운항하기 때문일 것으로 추측된다. 이에 따른 응력통계치가 Fig. 8에 나타나있다(Kwon et al., 2015).

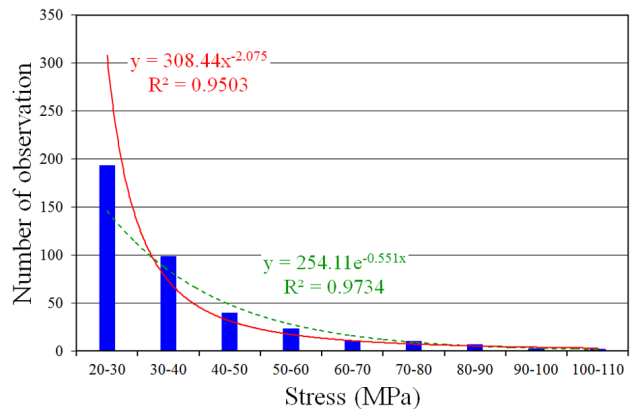


Fig. 8 Histogram and probability density approximation of stress (Measuring time = 36,000 sec.)

Table 7 Stress measurements in ice concentration 4-6

Category of stress [MPa]	Number
20-30	193
30-40	99
40-50	40
50-60	23
60-70	10
70-80	10
80-90	7
90-100	3
100-110	2
sum	387

Table 8 Results of fatigue damage index in case study 2

Category of stress [MPa]	N_i	n_i	n_i/N_i
20-30	8000000	27792	0.0034
30-40	3000000	14256	0.0047
40-50	1600000	5760	0.0036
50-60	800000	3312	0.0041
60-70	460000	1440	0.0031
70-80	300000	1440	0.0048
80-90	250000	1008	0.0040
90-100	160000	432	0.0027
100-110	146000	288	0.0019
Sum			0.0326

Table 7는 Fig. 8의 상세 측정값이며 모든 과정과 절차는 사례연구 1과 동일한 조건에서 진행하였다.

앞에서 서술한 절차에 따라 계산한 결과는 Table 8과 같다. 1년 동안 누적된 피로 손상치는 0.033으로 나타났다. 이 기간 동안에도 피로 문제가 발생하지 않을 것이라는 결과를 얻었다. 하지만, 이 결과 역시 1년에 대한 피로손상 평가 결과이므로 손상치가 0.5가 되는 피로 균열 발생수명은 약 15.3년인 것을 알 수 있다.

2013년 8월 26일 같은 날 해빙밀집도 1-3, 4-6에서 측정한 데이터의 평균값을 통해 보다 통계적인 값을 얻고자 했다. 해빙밀집도 1-3에서 1년 동안 누적된 피로 손상치는 0.074이고 해빙밀집도 4-6에서 1년 동안 누적된 피로 손상치는 0.033이므로, 두 개의 피로균열 발생 수명의 평균은 11년이 되며 이는 수시 및 정기 검사기간을 고려할 때 비교적 합리적인 범위라 생각된다. 다만, 이 합리성이 인정되려면 수시 및 정기검사 기간 중 빙 하중에 반복적으로 노출되는 개소에 대한 균열 검사가 수행되는 것을 전제로 한다.

4.3 피로손상에 대한 평가

본 연구에서 수행한 예제 계산은 해빙 밀집도와 빙 해역 운항 조건에 대해 상당히 과도한 가정을 포함하고 있다. 다시 말하면, 연구항해기간 중 많은 일수를 빙 해역 운항기간으로 설정하

였는데, 일반적으로 극지방의 결빙 분포는 일정하지 않으며, 아라온호의 운항 경험에 의하면 해빙을 거의 만나지 않은 경우도 있었다고 하기 때문에 본 연구의 예제 계산 시 설정된 가정은 매우 과도하다고 할 수 있다.

그렇지만, 2013년과 같은 결빙 조건을 만나지 않으리라는 보장이 없는 것 또한 사실이다. 그리고 상당히 과도하게 설정된 조건 하에 계산된 프레임 하부 용접부의 피로수명이지만, 그 평균 수명이 평균 11년이라는 것은 아라온호가 해빙과의 부딪힘을 피할 수 없는 쇄빙 연구선임을 생각한다면 내빙대의 피로손상에 관심을 기울여야 하는 이유가 되기에 충분하다고 생각된다. 이런 관점에서 보다 근거 있는 자료에 바탕을 둔 피로평가가 수행되어야 할 것으로 보인다.

한편, 2020년 12월 취항을 목표로 하는 제2쇄빙선은 운항 경로 상 남극 얼음두께의 2배 이상 두꺼운 얼음으로 덮여 있는 북극해 전용 항해를 위한 선박이다. 그러므로 설계 시 쇄빙, 내빙과 함께 내빙대의 용접이음부에 발생 가능한 피로손상 문제를 충분히 고려해야 할 것이다.

5. 결 론

본 연구는 현재까지 발표된 문헌과 자료를 바탕으로 빙 해역 운항 선박의 빙 유기 피로문제 관련 이슈를 정리하고 분석함으로써 빙 유기 피로의 특징과 평가법에 대해 알아보고 간단한 예제 계산을 통해 이를 적용해 보고자했다.

빙 유기 피로의 위험성은 아직 많이 알려지지 않고 과량하중으로 인한 피로만큼 중요성을 인정받지 못하여 현재까지도 빙 유기 피로에 대한 평가절차가 비교적 자세히 개발되지 않았고, 관련 연구들이 부족한 상태이다.

하지만 빙 해역을 항해하는 선박 역시 피로손상 위험을 평가하는 과정이 필요하고 과량하중으로 인한 피로손상 뿐만 아니라 빙 하중으로 인한 빙 유기 피로손상 역시 고려해야 할 대상이다.

최종적으로 빙 유기 피로문제 관련하여 본 연구에서는 다음의 결론을 얻을 수 있었다.

(1) 유빙 및 빙산 등이 출몰하는 해역에서 반복적으로 작용하는 빙 하중은 선체에 피로 손상을 입힐 수 있다. 결빙해역을 항해하면서 선박은 크고 작은 얼음을 부수고 밀어내는 과정을 반복하는데 이 과정에서 반복하중으로 인해 미세한 균열이 누적되다 파괴로 이어질 수도 있다.

(2) 40년 동안의 선대 데이터베이스를 활용하여 피로 손상의 내역을 조사한 자료를 통해 빙 해역 운항선박에서의 피로평가가 일반해역을 운항하는 선박의 과량환경에 의한 피로문제만큼 중요하다는 것을 확인해 주는 자료도 있다.

(3) 얼음의 두께가 증가할수록 빙 하중은 선체에 큰 응력을 유발하며 피로를 발생시키는데, Bridges et al.(2006)의 관측 자료를 바탕으로 얼음의 두께가 두꺼워 질수록 피로가 증가하며 이는 손상 및 파괴 문제로 이어질 수 있기 때문에, 얼음 두께가 가장 두꺼워지는 Severe winter에 피로 문제가 발생할 수 있다.

(4) ShipRight FDA ICE 평가절차를 적용하고 2013년 빙 해역

운항을 기준으로 아라온호의 피로손상을 계산한 예제를 통해 본 선박에 대하여도 빙 하중을 받는 용접이음부에는 누적 피로 손상이 발생할 가능성이 있음을 제시하였다.

(5) 2020년 취역 목표인 북극해 전용 제2쇄빙선 건조 시 이러한 피로 문제를 충분히 고려하여 설계하고 건조해야 할 것이다.

후 기

본 연구는 한국연구재단의 BK21 플러스 프로그램의 후원과 2015년도 경상대학교 연구년제연구교수 연구지원비에 의하여 수행되었으며, 지원에 감사드립니다.

References

- Bridges, R., Riska, K., Zhang, S., 2006. Preliminary Results of Investigation on the Fatigue of Ship Hull Structures when Navigating in ICE. No. ICETECH06-142-RF, 7th International Conference and Exhibition on Performance of Ships and Structures in Ice, Banff, AB, Canada.
- Kwon, Y.H., Lee, J.H., Choi, K.S., Lee, T.K., 2015. A study on Statistical Analysis of Local Ice Loads Measured during the Arctic Voyage of the IBRV ARAON. The International Society of Offshore and Polar Engineers.
- Lee, S.K., 2010. Current State and Prospects for Arctic Resource Development. Research Report of Korea Energy Economics Institute 10-03.
- Likhomanov, V. 2010. Full-scale Ice Trials of the Korean Research Icebreaker ARAON. Arctic and Antarctic Research Institute Scientific-Technical Report.
- Lloyd's Register Group Limited., 2011. FDA ICE Fatigue Induced by Ice Loading, FDA Ice Procedure.
- Lloyd's Register Group Limited., 2014. ShipRight Design and Construction, Fatigue Design Assessment - Application and Notations. September.
- Oh, S.J., Jung O.J., 2014. Tired ARAON because of the Long Term Sailing. The Kookje Daily News, November 26.
- Zhang, S., Bridges, R., Tong, J., 2011. Fatigue Damage Assessment of Ship Structures Induced by Ice Loading - An introduction to the ShipRight FEA ICE Procedure. 21st International Offshore and Polar Engineering Conference, Maui, Hawaii, USA.