

두꺼운 해빙에 대한 충격쇄빙 시 빙하중 신호 분석

안세진¹·이탁기^{2,†}·최경식³

국립 경상대학교 대학원, 해양시스템공학과¹

국립 경상대학교 조선해양공학과, 해양산업연구소²

국립 한국해양대학교 해양공학과³

An Analysis on Ice Load Signals Measured from Repetitive Ramming in Heavy Ice Condition

Se-Jin Ahn¹·Tak-Kee Lee^{2,†}·Kyungsik Choi³

Department of Ocean System Eng., Graduate School, Gyeongsang National University, Tongyeong, Korea¹

Department of Naval Archi. & Ocean Eng., Gyeongsang National University, Institute of Marine Industry, Tongyeong, Korea²

Department of Ocean Engineering, Korea Maritime and Ocean University, Busan, Korea³

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.

To navigate in ice-covered waters, the ice-breaking process is required. The ice-breaking mode depends on material properties of sea ice and ice conditions. The ice-breaking mode is classified into ramming and continuous ice-breaking. The ramming is effective on large ice features, such as thick ice ridge and icebergs, and the continuous ice-breaking is on level ice. In general, the impact time duration of crushing or bending on ice sheets is from 0.2 to 1.0 second. However, impact duration in ramming will be increased. The Korean ice-breaking research vessel ARAON conducted her research voyage in the Antarctic sea during the winter of 2012. The IBRV ARAON measured strain in ramming and continuous ice-breaking. Strain gauge signals were recorded during the planned ice-breaking performance and the unplanned ice transits in heavy ice conditions. The aim of this study is to investigate the ice load signals measured in ramming processes under the heavy ice condition. Based on the time history of the signals, a raising time, a half-decaying time and time duration were investigated and compared with the previous study which was suggested the five profiles of the ice load signals.

Keywords : Ice-breaking process(쇄빙과정), Ramming(충격쇄빙), Ice load signal(빙하중 신호), Time-history(시간이력), Raising time(상승시간), Half-decaying time(1/2 감쇄시간), Impact time duration(충격 지속 시간)

1. 서론

지구온난화로 인해 북극의 빙하가 최근 30년간 400만 km² 이 가까이 줄어들면서 선박이 항해할 수 있는 수준까지 감소하였다. 기후 변화로 인해 Northern Sea Route(NSR)는 여름기간 동안 항해할 수 있는 조건을 갖추게 되었다. 북극항로는 유럽, 아시아 그리고 아메리카를 잇는 항로를 뜻한다. 또한 북서항로와 북동항로를 통칭하는 말이다.

우리나라에서 수행한 Stena Bulk사의 북극항로 시범항해에 따르면 부산에서 수에즈 운하를 거쳐 러시아의 Ust-Luga항까지 기존항로를 이용할 때 약 48일을 항해해야 한다. 하지만 베링해협을 통과하여 시베리아 북부 해안을 따라 태평양과 대서양을 잇는

북동항로를 이용할 때는 약 35일을 항해하면 된다(Stena Bulk, 2013). 남방항로를 이용할 경우와 비교했을 때 북극항로는 약 7,200 km를 단축하는 항로이다. 이는 북극항로의 최대 장점이다. 이러한 항로구축으로 인해 극지용 선박 시장에서는 쇄빙선 외에 기존 선박의 특징에 쇄빙능력을 내포한 쇄빙유조선, 쇄빙LNG선, 쇄빙컨테이너선 등 쇄빙상선의 수요증가로 확대되고 있다.

쇄빙능력은 빙해역에서 선박이 항해하기 위해 요구되는 필수 능력이다. 쇄빙은 일반적으로 충격쇄빙과 연속쇄빙으로 구분된다. 충격쇄빙은 두꺼운 빙판이나 빙맥에서 큰 효과를 가지며, 연속쇄빙은 평탄빙에서 운항할 경우 이용된다. 쇄빙작업을 수행할 때 선박은 해빙과의 충돌이나 접촉에 의해 전체 또는 국부적으로 힘을 받는다. 이러한 힘을 빙하중 또는 빙압력이라 한다. 빙압력

은 특정 부위의 국부적인 면적에만 작용하는 국부 빙하중을 일반적인 형태로 표현한 것이다. 쇄빙선박에 작용하는 빙하중은 일반 해역에서 발생하는 파랑하중이나 슬래밍에 의한 힘보다 크기 때문에 설계 시 빙하중의 크기는 매우 중요하게 다루어지고 있다 (Kim, 2014).

2009년 우리나라 기술력으로 설계 및 건조한 한국 최초의 쇄빙연구선 아라온호(Fig. 1)가 2012년 1월 31일에서 3월 20일 사이 남극 아문젠 해를 항해하였다 (Choi et al., 2014, Fig. 2). 아라온호는 빙판 쇄빙운항, 빙해역 일반 운항으로 구분하여 선수선측부의 빙하중 실선계측시험을 수행하였다. 빙하중 계측을 위해 선수선측부 외판 내측에 21개의 로제트 게이지를 부착하였다. 이를 통해 계측된 데이터는 공식적인 두 차례의 쇄빙 성능 시험과 빙 밀집도가 다양한 빙해역에서 얼음을 깨고 운항하는 일반 이동 항해 도중 기록된 것이다.



Fig. 1 Korean ice-breaking research vessel, ARAON (The Korea Post News, 2017)

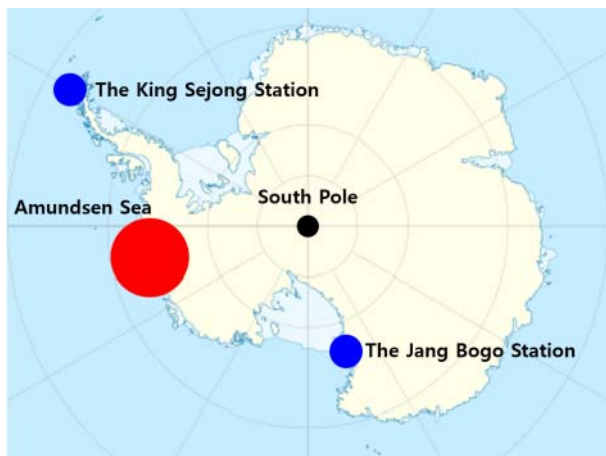


Fig. 2 Location of the Amundsen Sea

본 연구는 충격량이 충격 지속시간과 충격하중에 비례하므로, 충격 지속시간이 길어질수록 충격에 의해 선체 손상의 발생확률이 커질 수 있다는 점에 착안하였다. 충격쇄빙 시 충격 지속시간을 분석하기 위해 기록된 데이터를 바탕으로 시간이력을 분석하였다. 데이터를 분석하기에 앞서 충격쇄빙 시 계측된 변형률 데이터를 응력으로 변환하였다. 변환된 응력 중 20 MPa 이상의

피크가 기록되었을 때의 계측데이터를 분석하였다. 피크가 발생했을 때의 시간이력을 최대응력으로 무차원화한 후 이 그래프를 이용하여 상승시간, 1/2 감쇄시간을 정리하였으며, 충격 지속시간을 계산하였다. 또한 측정된 신호를 5가지 유형으로 나타낸 이전 연구 (Lee et al., 2016)의 기준을 적용하여 분류하고, 그 특성을 조사, 분석하였다. 이후 이전 연구 (Lee et al., 2016)에서 분석한 연속 쇄빙 시의 빙하중 신호 특성과 비교를 수행하였다.

2. 2012년 아라온호의 남극 항해

한국 최초의 쇄빙연구선인 아라온호는 건조된 이후 2010년 1월부터 최근까지 남극해와 북극해에서 빙하중과 빙저항 등 다양한 실선계측시험을 수행한 이력이 있다 (Lee et al., 2014; Kwon et al., 2015). 2012년 1월 31일부터 3월 20일 사이 아라온호는 남극 아문젠 해의 빙해역에서 실선계측과 쇄빙성능시험을 수행하였다 (Cheon et al., 2014). 충격쇄빙을 진행한 곳은 Fig. 3에서 (X)로 표시된 곳이다.

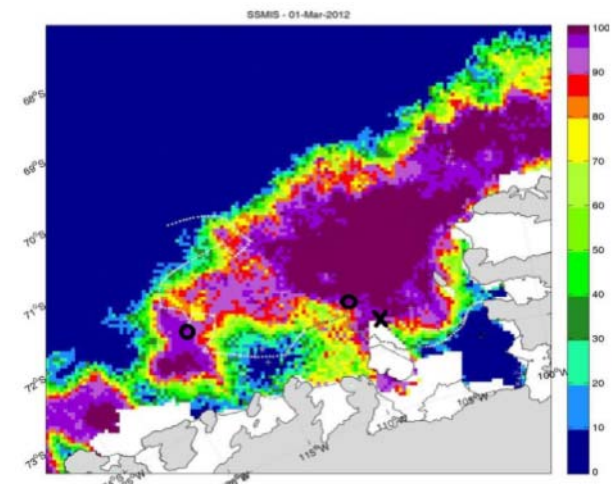


Fig. 3 Ice concentration in the Amundsen Sea, Antarctica
(O) Official ice performance test sites;
(X) Location where ARAON was stuck on heavy ice (Choi et al., 2015)

2012년 남극 아문젠해에서 진행된 연구에서는 선수선측에 작용하는 국부 빙하중을 계측하기 위해 선수 스러스트실 내의 외판 안쪽, 2nd Deck 하부의 Frame No.106~111 사이에 흡수부를 중심으로 좌현 10개, 우현 11개, 전체 21개의 로제트 게이지를 부착하였다. 3방향 로제트 형식으로 총 63개 채널을 동시에 계측할 수 있도록 구성되었다. Fig. 4는 아라온호에서 로제트 게이지가 설치된 부위를 나타내고 있다. 로제트 게이지를 부착한 아라온호 외판의 재질은 EH36 강재로서 항복강도 355 MPa, 탄성계수 200 GPa, 푸아송비 0.3이다 (Lee et al., 2015).

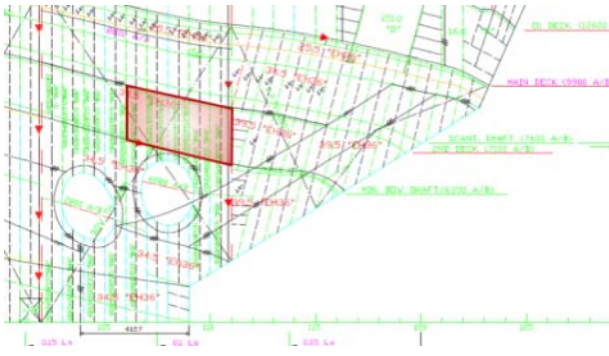


Fig. 4 Area instrumented by strain gauges in the IBRV ARAON(modified from Lee et al., 2014)

3. 반복 충격쇄빙 상황과 시행 장소

Table 1은 아라온호의 일반 운항 동안 계측된 자료 중 충격쇄빙과 관련된 데이터를 요약한 것이다. 여기서 시험번호는 계측을 수행한 팀이 일반 운항 중 각 계측에 대하여 연속적으로 부여한 번호이다. 본 연구에서는 충격쇄빙이 발생한 9와 10, 두 번의 계측에 초점을 두고 있다. 또한, 계측시간은 UTC(세계 협정시)를 기준으로 정리되어 있다. 충격쇄빙이 발생한 위치는 73°37'33015"S, 109°29'64878"W에서 73°34'44119"S, 109°38'61929"W로 이동할 때와 73°33'20699"S, 109°40'98492"W에서 73°31'95289"S, 105°45'51126"W로 이동 중 발생하였다.

당일의 아라온호 운항 상황을 설명하면 다음과 같다. 2012년 2월 28일, 강풍으로 인해 아라온호가 지나온 개수로가 단혔고, 배는 두꺼운 해빙군의 중간에 갇히게 되었다. 두꺼운 해빙군은 그날 20 km 이상을 움직였다. 이후 개수로 앞쪽은 완전히 사라졌다. 20시간 동안 아라온호는 최고출력으로 반복적인 충격쇄빙을 시행해 두꺼운 해빙군을 벗어나기 위한 길을 찾고자 노력했다. 결과적으로 아라온호는 성공적으로 벗어나고, 상당히 많은 양의 변형을 게이지 신호가 기록되었다 (Choi et al., 2015). 여기서, Fig. 5는 계측된 변형률 데이터의 예를 보여주고 있으며, Fig. 6은 당시 해빙군의 상황을 알 수 있는 사진이다.

Table 1 Summary of data information in ramming

Test no.	Date	Time [UTC]	Measuring site	Measuring time [sec]
9	2012. 02.28	14:35~15:40	73° 37' 33015"S-109° 29' 64878"W~ 73° 34' 44119"S-109° 38' 61929W	3,900
10	2012. 02.28	15:45~18:00	73° 33' 20699"S-109° 40' 98492"W~ 73° 31' 95289"S-109° 45' 51126"W	8,100

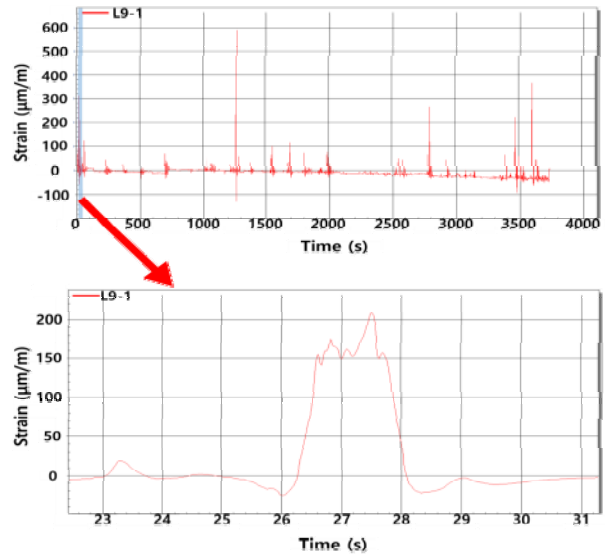


Fig. 5 Example of measured strain gauge data



Fig. 6 Heavy ice condition in repeated ramming (Choi, 2015)

4. 2012년 충격쇄빙 시 빙하중 계측 신호 분석

로제트 게이지로부터 계측된 데이터를 Hooke의 법칙을 적용하여 응력으로 환산하였다. 로제트 게이지로부터 계측된 신호들 중 선수미 방향의 값을 대표값으로 취하였는데, 이는 선수 쇄빙에 의해 깨진 얼음이 선박의 진행에 따라 선측 외판을 타고 흐른다고 본 것이다 (Jeon et al., 2013). Table 2에서 S_{max} 는 피크 응력의 최대값, T_r 은 상승시간, T_{hd} 는 1/2 감쇄시간, T_d 는 충격 지속시간을 나타낸다. 여기서 상승시간은 신호가 zero점을 통과하는 시점부터 피크점에 도달하기까지 걸린 시간을 의미하며, 1/2 감쇄시간은 피크점부터 무차원화된 응력수준이 0.5점에 이

르는 시간이다 (Lee et al., 2016). 그리고 type I, II의 지속시간은 1/2 감쇄시간을 두 배하여 상승시간과 더한 값으로 취하였다. 하지만 type III, IV, V는 감쇄시간이 끝난 후 응력이 zero가 되었을 때의 시간을 계산하여 상승시간 계산점으로부터 계산된 점까지의 시간차이를 충격 지속시간으로 취하였다.

2012년 2월 28일 충격쇄빙에서는 총 12,000초 동안 20 MPa 이상의 최대 피크응력이 총 347회 기록되었다. 각 게이지별 데이터를 중간 피크 유무를 기준으로 신호유형 5가지 (Lee et al., 2016)로 분류하였다. Type I은 상승 및 감쇄시간동안 중간피크가 없는 유형이며, Type II는 상승시간에 중간 피크가 존재하는 유형이다. Type III는 감쇄시간에 중간 피크가 존재하는 유형이며, Type IV는 상승 및 감쇄시간 모두 중간 피크가 존재하는 유형이다. Type V는 앞서 말한 유형들을 제외한 모든 유형이다. 각 신호유형 5가지별로 피크응력, 상승시간, 1/2 감쇄시간, 충격 지속시간의 최대값, 최소값 그리고 평균값으로 정리하여 각각 Table 2에 정리하였다. 계측된 피크응력의 최대값은 159.6 MPa 이었다. 또한, 평균 상승시간은 0.540초, 평균 1/2 감쇄시간은 0.326초, 평균 충격 지속시간은 1.173초이다.

Table 2 Summary of measured data in ramming

Type	No. of Peak over 20MPa		S_{max} [MPa]	T_r [sec]	T_{hd} [sec]	T_d [sec]
I (53.3%)	185	Max.	159.6	7.231	1.854	9.750
		Min.	20.1	0.050	0.013	0.128
		Avg.	37.8	0.286	0.138	0.562
II (12.4%)	43	Max.	111.3	4.863	1.781	8.425
		Min.	20.3	0.124	0.042	0.225
		Avg.	32.1	0.516	0.181	0.879
III (12.4%)	43	Max.	119.4	3.237	3.733	9.952
		Min.	20.1	0.077	0.066	0.242
		Avg.	39.6	0.305	0.333	0.986
IV (4.6%)	16	Max.	83.2	1.308	0.812	3.326
		Min.	20.9	0.188	0.048	0.467
		Avg.	39.4	0.557	0.337	1.223
V (17.3%)	60	Max.	90.9	6.470	5.698	14.077
		Min.	20.3	0.174	0.108	0.497
		Avg.	35.4	1.507	0.999	3.387
Total	347	Max.	159.6	7.231	5.698	14.077
		Min.	20.1	0.050	0.013	0.128
		Avg.	37.0	0.540	0.326	1.173

Fig. 7은 신호유형별 5가지로 분류된 충격쇄빙 계측 데이터 중 상승시간과 피크응력 사이의 관계를 보여주는 그래프이다. 이 그래프에 의하면, 일반 운항 시 계측된 피크응력은 Lee et al. (2016)에서 분석한 바와 같이 상승시간이 짧은 구간에서 높게 나타났다. 그렇지만, 일부 데이터는 긴 상승시간구간에서 비교적 높은 피크 응력을 기록하고 있는데, 이는 비교적 두꺼운 빙판을 저속으로 쇄빙한 당시 운항 상황에 따른 것이라 생각된다(Kim, 2014). 특히, 피크응력이 높을 경우 type I의 신호가 가장 많이 기록되었다. 그리고 상승시간이 2초 이상일 때는 대부분이 type V로 분류되었다. 또한, type I, III 그리고 IV의 데이터는 약 0.4초 이전에 많이 분포하고 있으며, type II, V의 데이터는 약 0.4초 이후에 많이 분포했다.

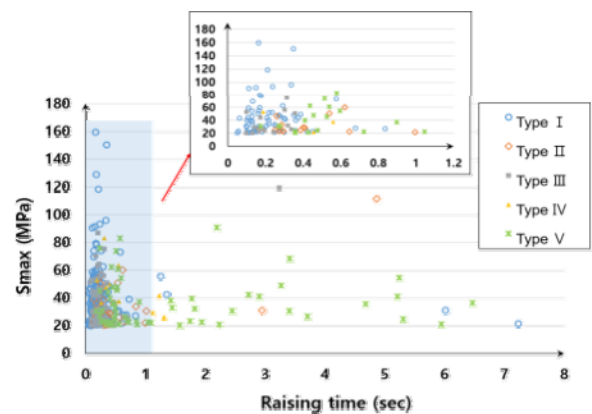


Fig. 7 Relationship between raising time and peak stresses

Fig. 8은 1/2 감쇄시간과 피크응력 사이의 관계를 보여주는 그래프이다. 1/2 감쇄시간은 상승시간과 다르게 2초 이상일 때는 type V만 기록되었다. 그러나 type III은 예외로 기록되었다. 또한, 0.4초를 기준으로 type I, II, III, IV는 이전에 대부분 분포하고, type V는 이후에 대부분 분포하는 것을 알 수 있다.

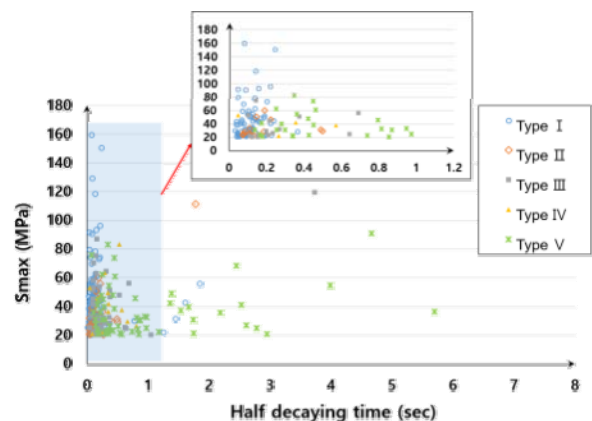


Fig. 8 Relationship between half-decaying time and peak stresses

Fig. 9는 충격 지속시간과 피크응력사이의 관계를 보여주는 그래프이다. Hysing et al. (1979, cited in Choi, 2015)은 쇄빙 상선의 충격쇄빙 시 충격 지속시간이 0.3~0.5초 범위라고 발표했다. 하지만 실제 남극에서 충격쇄빙을 시행하며 계측된 충격 지속시간은 평균 1.173초였다. 또한, type별로 모두 분포하는 범위가 달랐다. 전체 데이터에서 지배적인 type I의 경우 0.1~10초의 넓은 범위로 분포하였다. Type II와 III은 0.2~10초, type IV는 0.4~4초까지 분포하였다. 가장 긴 지속시간을 가지는 type V의 경우 최고 약 14초까지 지속되었으며 충격 지속시간범위는 0.5~14초까지 고루 분포한 것을 알 수 있다. 하지만 대부분의 경우 0.8~10초 사이에 분포함을 그래프를 통해 알 수 있다.

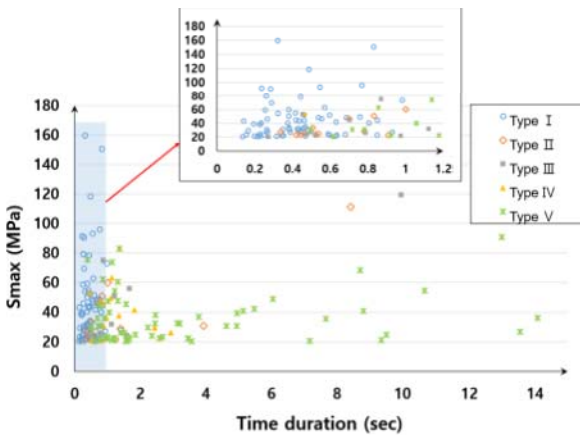


Fig. 9 Relationship between time duration and peak stresses

Table 3은 충격쇄빙에서 충격 지속시간이 가장 긴 3개의 데이터를 추출하여 피크응력, 상승시간, 1/2 감쇄시간, 충격 지속시간을 정리한 것이다. 이들 충격쇄빙의 평균 지속시간은 13.537초로 나타났다. 또한, 충격쇄빙의 모든 이벤트는 type V로만 나타났다. 충격 지속시간이 가장 긴 3개의 데이터는 모두 test no.9에서만 나타났다. Fig. 10은 앞서 정리한 Table 3의 데이터를 각각 무차원화해서 하나의 그래프로 겹쳐 나타낸 것이다.

Table 3 Summary of the top 3 on time duration

No.	Type	S_{max} (MPa)	T_r (sec)	T_{hd} (sec)	T_d (sec)
R6 in Test no.9	V	36.3	6.470	5.698	14.077
R7_2 in Test no.9	V	26.8	3.709	2.612	13.543
R7_3 in Test no.9	V	90.9	2.197	4.664	12.992
Avg.		51.3	4.125	4.325	13.537

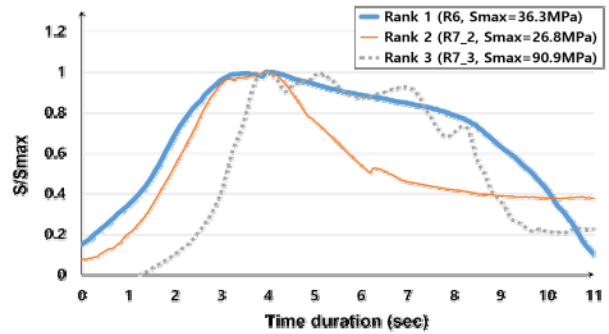


Fig. 10 Comparison of the top 3 on time duration profile

5. 2010년 연속쇄빙 시의 빙하중 계측 신호와의 비교

본 연구에서는 이전 연구 (Lee et al., 2016)에서 분석에 사용 하였던 2010년 북극에서 계측하였던 연속쇄빙 데이터와 비교하였다. 연속쇄빙 시 측정된 최대 응력은 155.52 MPa이며, 이는 신호유형 중 type III로 분류되었다. 또한, 두 번째로 높은 응력 144.34 MPa는 type II로 분류되었다. 본 연구에서 분석된 충격 쇄빙 시 측정된 최대 피크응력은 159.6 MPa이며, 두 번째로 높은 피크응력은 150.5MPa이다. 하지만 연속쇄빙과는 달리 최대 피크응력과 두 번째로 높은 피크응력의 신호유형은 type I로 분류되었다.

Fig. 7을 보면 상승시간이 2초 이상일 때는 대부분이 type V로 분류되었는데, 이렇게 긴 상승시간이 계측된 데이터는 2010년 북극해의 빙하중 신호를 분석한 자료에서는 전혀 없었던 것이다. 또한, 충격쇄빙 시에는 상승시간 0.4초를 기준으로 이전에는 type I, III 그리고 IV가 분포하였고, 이후에는 II, V가 분포하였다. 하지만 Fig. 11을 보면 연속쇄빙 시에는 상승시간 0.2초를 기준으로 충격쇄빙과 같은 분포경향이 보였다는 것을 알 수 있다. 충격쇄빙 시 계측된 120 MPa 이상인 데이터들은 상승시간 0.35초 이전에 분포한다. 하지만, 연속쇄빙 시 계측된 데이터들은 모두 상승시간 0.15초 미만에서 계측되었다. 그리고 전체적인 분포경향을 살펴보면 연속쇄빙 시 계측된 데이터는 모두 상승시간 0.5초 이전에 분포하고 있음을 알 수 있다.

Fig. 8을 보면 충격쇄빙 시에는 1/2 감쇄시간 0.4초 이전에 많은 데이터가 분포하고 있음을 알 수 있다. 또한, 1/2 감쇄시간 0.4초를 기준으로 분포경향이 나뉘지는 충격쇄빙과는 달리 0.15초를 기준으로 type별 분포경향이 나뉘지고 있다. 이전 연구 (Lee, et al., 2016)에서 제시한 Fig. 12를 살펴보면 type I, II는 기준 이전에만 분포하고 있으며, type IV, V는 기준 이후에만 분포하고 있다. 하지만, type III은 기준과는 무관하게 0.25초 이전에만 분포하고 있음을 알 수 있었다. 한편, Fig. 11과 12의 범례에서 triangle type은 type I, w/ int. peak in rising type은

type II, w/ int. peak in decaying type은 type III, w/ int. peak in rising & decaying type은 type IV, 그리고 special type은 type V를 가리킨다.

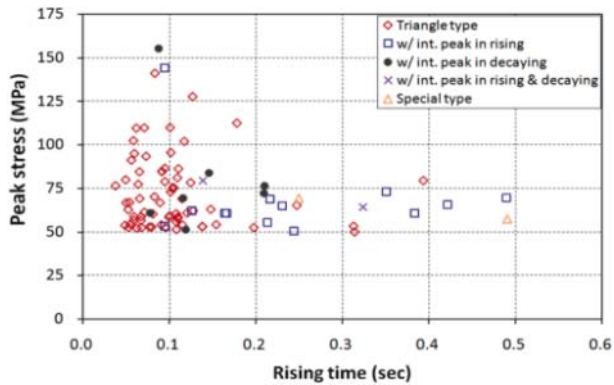


Fig. 11 Relationship between stresses and rising time (Lee, et al., 2016)

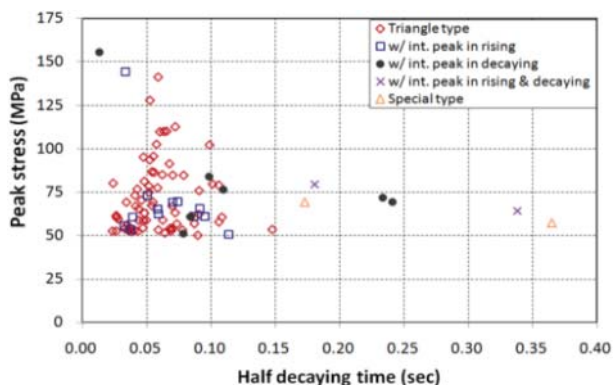


Fig. 12 Relationship between stresses and half-decaying time (Lee et al., 2016)

6. 결론

본 논문에서는 2012년 쇄빙연구선 아라온호를 이용한 남극 아문젠 해의 빙해역에서의 충격쇄빙 시 계측된 데이터를 바탕으로 비교적 높은 응력 수준인 20 MPa을 넘는 데이터를 추출하여 그 신호의 파형 분석을 시도하였으며, 이전 연구 (Lee et al., 2016)에서 분석한 데이터와 비교하였다. 본 연구를 통하여 다음과 같은 결론을 얻을 수 있다.

(1) 데이터 분류 결과, 가장 일반적인 형태인 type I이 약 53.3%로 가장 많이 측정되었다. Type II의 경우 약 12.4%, type III의 경우 약 12.4%, type IV의 경우 약 4.6%, type V의 경우 약 17.3%로 이전 연구(Lee et al., 2016)에서 측정된 것과 많은 차이가 있다. 또한, 충격쇄빙을 진행하며 충격지속시간이 길 경우 type V의 유형이 빈번히 계측되었다. 충격지속시간은 최대 14.077초까지 계측되었으며, 이전의 고찰과 연속쇄빙에서의 분석에서 지속시간 범위로 파악된 0.5초를 초과하는 경우도

상당히 많아 2초 이상인 경우만도 25회나 관찰되었다.

(2) 충격쇄빙에서는 type I, V의 신호유형이 가장 많이 나타났다. 지속시간이 짧은 경우 type I이 지배적이었다. 지속시간이 길 경우 type V가 지배적이었다는 것을 알 수 있다.

(3) 연속쇄빙 시 계측된 데이터를 상승시간 관점에서 분석한 결과, 충격쇄빙과 달리 2초 이상인 데이터는 분석할 수 없었다. 또한, 0.2초를 기준으로 type I, III 그리고 IV가 분포하였고, 이후에는 II, V가 분포하였다. 충격쇄빙 시 계측된 120 MPa 이상인 데이터들은 상승시간 0.35초 이전에 분포한다. 하지만, 연속쇄빙 시 계측된 데이터들은 모두 상승시간 0.15초 미만에서 계측되었다. 그리고 0.5초 이전에 모든 데이터가 분포하고 있었다.

(4) 연속쇄빙 시 계측된 데이터를 1/2 감쇄시간 관점에서 분석한 결과, 충격쇄빙과는 달리 0.15초를 기준으로 type별 분포경향이 나뉘었다. Type I, II는 기준 이전에만 분포하고 있으며, type IV, V는 기준 이후에만 분포하고 있다. 하지만, type III은 기준과는 무관하게 0.25초 이전에만 분포하였음을 알 수 있었다.

추가적으로 선속 및 해빙특성을 고려한 빙하중 상관성 연구를 수행함으로써, 향후 빙해 운항 선박에 필수적으로 탑재되는 빙하중 모니터링 시스템을 통해 보다 질 높은 빙하중 분석 자료를 선박 운전자에게 제공할 수 있으리라 기대된다.

후기

본 연구는 한국연구재단의 BK21 플러스 프로그램의 후원과 2015년도 경상대학교 연구년제연구교수 연구지원비에 의하여 수행된 연구결과이며, 연구비 지원에 감사드립니다. 또한, 연구 데이터 정리 작업을 도와준 배태훈과 이주영에게 감사를 포함합니다.

References

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), pp.489-494.

Choi, K., Cheon, E.J., Kim, H.Y., Nam, J.H. & Lee, T.K., 2015. Comparison of peak ice pressures on the IBRV ARAON during the planned and the unusual ice transits. *The Twenty-third Port and Ocean Engineering under Arctic Conditions*, Trondheim, Norway.

Choi, K., Kim, H.S., Ha, J.S. & Lee, C.J., 2014. A comparative analysis of sea ice material properties in the Amundsen Sea, Antarctica. *Journal of the Society of Naval Architects of Korea*, 51(3), pp. 254-258.

Hysing, T. et al., 1979. *Ice loads on marine*

- structures, marine structures and ships in ice*, A Joint Norwegian Research Project Report No.79-02. cited in Choi, K., 2015. *Ice loads on icebreaking vessels*. Munundang.
- Jeon, Y.J., Rim, C.W. & Lee, T.K., 2013. Profile analysis on signal measured local ice load during icebreaking in Arctic Sea. *Journal of Navigation and Port Research*, 37(2), pp.143-148.
- Kim, H.Y., 2014. *Analysis of strain gauge data and estimation of ice load on the IBRV ARAON in the Antarctic Sea*. Master Thesis. Korea Maritime & Ocean University, Department of Ocean Engineering.
- Kwon, Y.H., Lee, T.K. & Choi, K., 2015. A study on measurements of local ice pressure for ice breaking research vessel "ARAON" at the Amundsen Sea. *International Journal of Naval Architecture and Ocean Engineering*, 7(3), pp.490-499.
- Lee, J.H., Kwon, Y.H., Rim, C.W. & Lee, T.K., 2016. Characteristics analysis of local ice load signals in ice-covered waters. *International Journal of Naval Architecture and Ocean Engineering*, 8(1), pp.66-72.
- Lee, M.W., Kwon, Y.H., Rim, C.W. & Lee, T.K., 2015. A comparative study on ice load characteristics between general and ice-breaking operations in ice-covered water. *Journal of Ocean Engineering and Technology*, 29(1), pp.35-40.
- Lee, T.K., Lee, J.H., Kim, H. and Rim, C.W., 2014. Field measurement of local ice pressures on the ARAON in the Beaufort Sea. *International Journal of Naval Architecture and Ocean Engineering*, 6(4), pp.788-799.
- Stena Bulk, 2013. *Northern sea route map*. [Online] Available at : <http://www.stenanorthernsearoute.com/northern-sea-route/> [Accessed 12 September 2013]
- The Korea Post News, 2017. *The IBRV ARAON*. [Online] Available at : http://www.nzkoreapost.com/bbs/board.php?bo_table=news_focus&wr_id=510 [Accessed 21 March 2017].

