

쇄빙연구선 ARAON호의 남극해 쇄빙운항 중 계측된 스트레인게이지 데이터 분석

천은지¹·최경식^{1,†}·김호연¹·이탁기²
한국해양대학교¹
경상대학교²

Analysis of Strain Gauge Data Onboard the IBRV ARAON during Icebreaking Voyage in the Antarctic Sea Ice

Eun-Jee Cheon¹·Kyungsik Choi^{1,†}·Ho-Yeon Kim¹·Tak-Kee Lee²
Korea Maritime and Ocean University¹
Gyeongsang National University²

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.

Estimation of correct ice load under various operating conditions is important during the design and the operation stages of an icebreaker. Normal operating conditions are expected from the official field ice trials and also from general ice transit action. In this paper ice load for the Korean icebreaking research vessel, ARAON, under normal operating condition, is discussed. Published ice load data from full-scale sea trials of six icebreakers were analysed to derive an empirical ice load prediction formula. The IBRV ARAON had sea ice trials during 2010 and 2012 summer season. Strain gauge signal were recorded during her icebreaking voyage and the measured strain data were converted to the equivalent hull stress values. The effect of ARAON's speed in ice and the hull stresses are investigated. By comparing the empirical formula and ice load calculation based von measured data, it is recommended to use the empirical ice load estimation formula for the initial design stage.

Keywords : IBRV ARAON(쇄빙연구선 아라온호), Ice load under normal operating conditions(정상 운항상태에서의 빙하중), Strain gauge data(스트레인게이지 데이터), Official ice performance tests(공식 쇄빙시험), General ice transit(일반 이동운항)

1. 서론

빙해역을 운항하는 쇄빙선박에 있어서 빙하중의 정확한 산정은 매우 중요한 설계요소 중 하나인데 선체의 구조 및 선형, 출력기관의 선정이 선체에 작용하는 빙하중의 세기에 좌우되기 때문이다. 국내외에서 현재 빙하중 산정에 관한 연구는 경험적인 방법을 위시하여 현장시험, 모형실험, 수치해석 등 다방면으로 수행되고는 있지만 빙하중에 대한 개념이나 빙-선체 상호작용(ice-ship interaction)에 대한 해석이 아직 충분히 정립되어 있지 못한 현실이다. 선체에 작용하는 빙하중의 크기를 추정하는 방법으로는 빙해역을 운항하는 쇄빙선박에서 직접 계측되는 실선계측자료를 분석하는 것이 가장 적절하다고 볼 수 있지만 많은 비용과 노력에 비해 얻을 수 있는 데이터의 양은 제한적이다.

빙하중(ice load)은 빙해역을 운항하는 쇄빙선박 및 해양구조물 등이 얼음과 충돌 시 받는 힘을 말한다. 빙하중과 유사한 개념인

빙저항(ice resistance)은 선박의 전진에 대응하는 힘으로서, 선박이 얼음을 깨뜨리며 전진하는 동안의 시간평균 하중이라고 볼 수 있다. 반면 빙하중은 선체의 구조에 영향을 미치는 요소로서 선체가 손상을 받지 않고 견딜 수 있는 최대 하중의 관점이라고 구별할 수 있다. 선박의 추력이 빙-선체 상호과정에서 발생하는 힘(빙저항)보다 충분히 큰 경우 선박은 쇄빙을 통해 전진이 가능하지만 두꺼운 평탄빙 또는 빙맥, 빙산과의 충돌 시에는 연속쇄빙은 물론 충격쇄빙(ramming)으로 전진할 수 없는 경우도 있다. 따라서 빙저항과 마찬가지로 선박이 얼음을 깨고 진행하는 정상적인 운항상태(normal operating conditions)가 보다 일반적이긴 하지만, 선박이 빙판을 깨뜨리고 전진할 수 있는지 아닌지에 관계없이 선체는 항상 빙하중을 받게 되며, 극한 빙하중(extreme ice load)이라고 하는 것은 오히려 얼음이 깨지지 않는 경우에 발생한다고 볼 수 있다.

과거 실선시험이 수행된 쇄빙선박의 데이터를 분석한 선행연구를 통해 본 연구자들은 극한 빙하중 추정식 및 정상 운항상태

에서의 빙하중 추정식을 각각 제안한 바 있다 (Choi & Jeong, 2008; Choi, et al., 2009). 본 연구에서는 이 중 정상 운항상태 (normal operating conditions)에 적용되는 빙하중 추정식을 검증하기 위한 방법으로, 쇄빙연구선 ARAON호의 2012년 남극 아문젠해 쇄빙운항(icebreaking voyage) 시 계측된 해빙의 물성치와 선박 운항기록, 그리고 선체에 장착된 스트레인게이지 데이터를 분석하여 쇄빙충격 시의 빙하중과 선속과의 관계를 확인하였다. 이 분석을 통하여 앞서 제안된 정상 운항상태에서의 빙하중 추정식이 실제 설계 시 활용 가능성을 검토하였다.

2. 실선계측 데이터 분석을 통한 빙하중 추정식

빙해역 운항 시 쇄빙선박에 작용하는 빙하중은 크게 정상운항 상태에서 계측되는 빙하중과 극한 빙상환경(extreme condition)에서 발생하는 극한 빙하중으로 구분할 수 있다. 실제 빙해역 선급규정에서 사용되는 설계 빙하중은 선박이 심한 손상을 받는 극한 빙상상태에서의 운항보다는 정상 운항상태에서 선박에 요구되는 강도를 요구하고 있다.

본 연구자들은 선행연구를 통해 과거 실선시험이 수행된 바 있는 6척의 쇄빙선박에서 계측된 빙하중 데이터를 분석하여 식(1)과 같은 극한 빙하중 추정식을 제시한 바 있다 (Choi & Jeong, 2008).

$$F = 2.55 V \Delta^{0.4} \text{ [MN]} \quad (1)$$

여기서, V (m/s)는 선박의 속도, Δ (10^3 ton)는 선박의 배수량을 나타낸다. 수집된 6척의 쇄빙선박의 빙하중 데이터가 도시된 Fig. 1에 확인할 수 있듯이 식(1)은 선수부에 작용하는 빙하중의 최대한계를 선박의 충격속도(ramming speed) 및 배수량의 함수로서 나타낸 것이다.

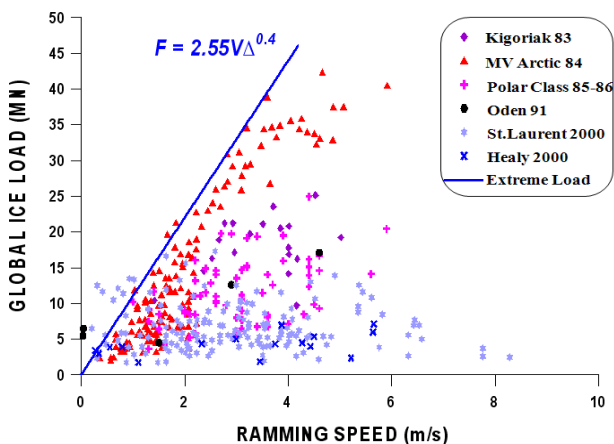


Fig. 1 Ice loads data and the extreme ice load prediction equation (Choi & Jeong, 2008)

하지만 제안된 최대 빙하중 추정식은 정상적인 운항상태라기 보다는 매우 극심한 빙상환경에서만 계측될 수 있는 극한 빙하중 (extreme ice load)에 대응하는 것으로 예상된다. 그 이유는 선박에 심각한 구조적 문제를 유발시키거나 선박의 안전에 결정적인 위험요인이 될 수 있다는 점에서 어떤 항해자도 선속이 높은 상태에서 극한 빙하중에 가까운 빙하중 데이터를 얻기 위한 실선시험을 수행하지는 않을 것이기 때문이다. 실제로 Fig. 1에 도시된 6척의 실선시험 데이터들은 MV Arctic의 모형시험 데이터(실선 대응속도 3m/s 이상에 해당)를 제외하고는 대부분 선속이 높아도 극한 빙하중에 훨씬 못 미치는 값임을 확인할 수 있다. 따라서 적당한 두께의 얼음속에서 정상운항하는 경우에는, 빙저항 추정기법과 유사하게, 빙하중의 크기는 선속과 배수량뿐만 아니라 선체형상과 얼음의 재료강도특성 등에 따라 달라질 수 있다.

정상 운항상태에서의 빙하중 추정식을 얻기 위하여 Fig. 1의 빙하중 실선데이터에서 MV Arctic의 모형시험 데이터를 제외한 나머지 자료를 Fig. 2에 log-log 그래프로 변환하여 도시하였다. 세로축은 $F/\Delta^{0.4}$ 으로 나타내었고 가로축에는 빙두께 h , 해빙의 굽힘강도 σ_f , 선속 V 과 선박의 선수각 α 을 고려한 $\sigma_f h^2 V \cos \alpha$ 를 사용하였다. 선행연구에서 제시된 빙하중과 선속과의 관계식은 식(2)와 같다 (Choi, et al., 2009).

$$F = 0.824 \Delta^{0.4} (\sigma_f h^2 V \cos \alpha)^{0.283} \text{ [MN]} \quad (2)$$

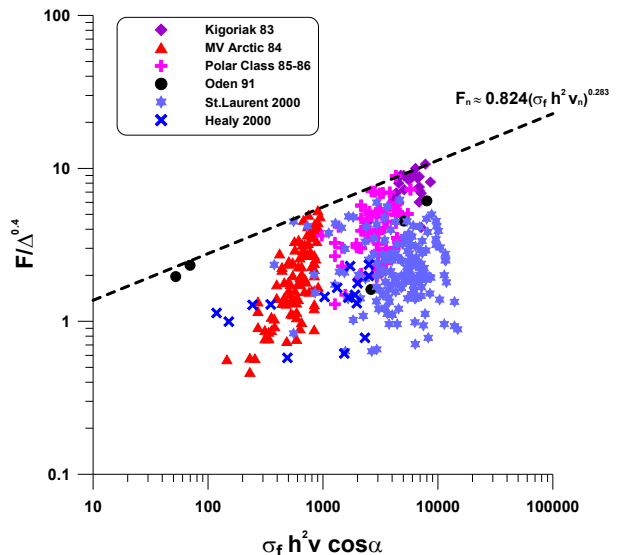


Fig. 2 Ice load data in log-log scale and the regression line obtained (Choi, et al., 2009)

식 (2)로부터 계산된 극한 빙하중 및 정상상태 빙하중 추정 결과를 캐나다의 쇄빙선 Louis S. St. Laurent호에 대하여 실선 빙하중 계측 데이터와 비교하여 Fig. 3에 나타내었다. 제안된 빙하중 추정식 (2)을 사용해 계산된 결과는 실측 데이터를 비교적 잘 반영하고 있음을 알 수 있다.

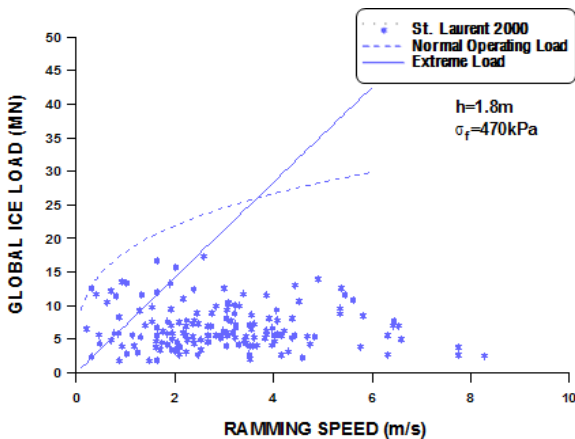


Fig. 3 Calculated ice load prediction formulas for the CCGS Louis S. St. Laurent (Johnston, et al., 2003)

3. ARAON호의 남극해 실선계측 시험

쇄빙연구선 ARAON호는 2009년 하반기 국내에서 건조된 직후 남극해 시운전(2010년 1월)을 거쳐 매년 북극과 남극을 1회씩 방문하여 극지연구를 수행하고 있다. 이중 2010년 7-8월에는 북극 보퍼트해(Beaufort Sea)에서, 2012년 2-3월에는 남극 아문젠해(Amundsen Sea)에서 본 연구자들에 의해 쇄빙성능을 검증하는 실선시험을 수행한 바 있다. 이 실선시험에서는 ARAON호의 출력과 선속을 계측하여 빙저항을 산정하기 위한 공식 쇄빙시험(official ice performance test)과 함께 얼음 시편을 채취하여 해빙의 재료강도특성을 측정하는 실험도 수행하였다. 아울러 ARAON호의 선체 외판부에 스트레인게이지를 설치하여 공식 쇄빙시험 뿐만 아니라 일반 이동운항(general ice transit) 중에 발생하는 국부 빙압력의 세기와 분포를 파악할 수 있도록 하였다.

북극해의 실선계측 데이터 분석은 쇄빙성능시험 및 해빙의 재료특성 그리고 스트레인게이지 분석에 대하여 각각 논문이 발표된 바 있다 (Choi, et al., 2011; Kim, et al., 2011; Lee, et al., 2013). 남극에서의 실선계측 데이터 분석결과 역시 쇄빙성능시험 및 해빙의 재료특성에 대하여 논문으로 발표된 바 있다 (Choi, et al., 2014; Kim, et al., 2012). 하지만 빙압력 추정을 위한 스트레인게이지 데이터 분석은 공식 쇄빙시험 결과에 대하여 일부 정리된 부분도 있으나 (Kim, et al., 2014), 추출된 데이터에 대한 전반적인 분석은 이루어지지 않았다. 본 논문에서는 ARAON호의 2012년 남극 아문젠해 항행 시의 공식 쇄빙시험뿐만 아니라 일반 이동운항 중에 계측된 스트레인게이지 데이터를 분석함으로써 ARAON호의 선속과 빙하중과의 관계를 밝히고 이 결과를 통해 앞서 제안된 빙하중 추정식의 활용 가능성을 타진하고자 하였다.

2012년 2-3월에 걸쳐 ARAON호는 남극 아문젠해에서 2회의 공식 쇄빙시험을 수행하였고 타 연구를 위해 정점을 이동하는 동안에도 얼음을 깨는 운항모드에서는 선체에 부착된 스트레인게이지를 통해 항상 선체의 변형도를 기록하였다.

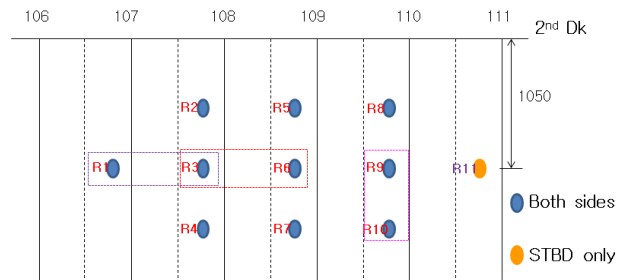
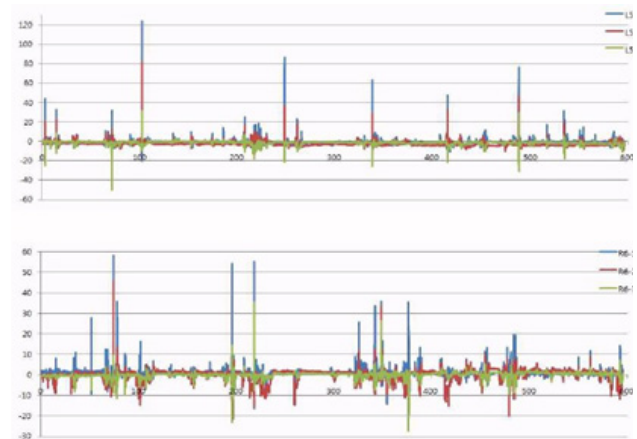


Fig. 4 Location of strain gauges between Fr. No.106-111

Fig. 4와 같이 스트레인게이지는 ARAON호의 선수격벽 바로 뒤쪽 thruster room 내의 외판에 부착되었는데 2nd 데크 하부 Frame No. 105~107 사이의 흘수부를 중심으로 좌현 10개, 우현 11개, 모두 21개의 3방향 로제트(rossette) 형식으로 총 63개 채널로 구성되었다. 공식적인 두 차례 쇄빙시험(sampling rate 50Hz, 약 100분 분량)과 함께 빙해역에서 ARAON호가 얼음을 깨고 운항하는 모든 시간 동안(약 32시간 분량) 스트레인게이지로부터 얻어진 데이터를 저장하였다. Fig. 5는 스트레인게이지로부터 얻어진 두 지점(6채널)에서의 변형도 신호를 보여주고 있다. 선체와 얼음의 상호작용에 기인한 변형도의 피크값이 간헐적으로 나타나고 있으며 그 순간도 스트레인게이지마다 차이를 알 수 있다.



Strain-gage Signal of ARAON (UTC 20120210 1900~1910)

Fig. 5 Typical record of strain gauge signals during the icebreaking voyages in Antarctic sea ice

본 연구에서는 빙하중의 크기와 선속과의 관계를 알고자하는 것이 목적이므로 매순간 각 위치마다 변하는 피크값 자체보다는, 선체와 얼음과의 충돌을 하나의 이벤트(event) 개념으로 접근하는 것이 바람직하다. 즉 선체가 얼음에 부딪치며 깨어진 빙편이 선체 표면을 따라 이동하며 사라지는 사이클을 하나의 이벤트로 정의하고 각 이벤트 안에서 빙하중(혹은 빙압력)의 피크값과 이에 대응하는 선속을 찾는 방법이다. Fig. 6에서 보듯이 하나의 이벤트 안에서 피크 하중에 대응하는 속도는 얼음에 충돌하기 직전의 선속에 해당한다. 선체와 얼음이 접촉한 후에는 선속은

감소하지만 하중은 오히려 증가한다. 충격에 의해서 얼음이 깨어 지지 못한 경우에는 선속은 0 이 되지만 이때 빙하중은 최대가 될 수도 있다. 이런 방법으로 쇄빙운항이 이루어지는 상황을 검토하여 이벤트를 구분하고 각 이벤트에서의 빙압력의 피크값과 대응속도를 결정하였다.

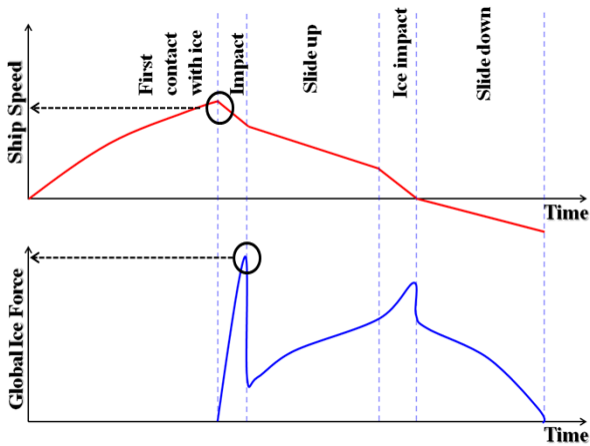


Fig. 6 Ship speed and ice load variation during a typical ramming event due to head-on impact (Keinonen, 1983)

로제트 형식 스트레인게이지에서 계측된 세 방향의 변형도를 이용하여 주변형도(SN1, SN2)를 계산하고, 여기서 선체 외판이 평면응력상태라 가정하고 주응력(SS1, SS2)과 등가응력(ES)으로 변환하였다. 등가응력은 Von Mises 기준으로 계산된 응력을 의미한다. 본 연구에서는 계측된 스트레인게이지 데이터를 Excel 시트의 수식연산 기능을 이용하여 등가응력을 계산하고, 이 결과로부터 하나의 빙하중 이벤트 구간 내에서 가장 큰 등가응력 값을 선택하였다. 한편 등가응력으로부터 영향계수행렬과 유한요소 해석을 이용하여 빙압력의 피크값을 계산할 수 있다. 선속은 ARAON 선내에 저장된 GPS 데이터 기록으로부터 빙하중 이벤트에 돌입하는 순간의 속도를 추출하였다.

4. ARAON호의 실선계측 데이터 분석

4.1 공식 쇄빙시험 데이터에 따른 빙하중 추정

앞에서 언급한 바와 같이 2010년 7-8월 북극 보퍼트해와 2012년 2-3월 남극 아문젠해에서 ARAON호의 쇄빙성능을 검증하는 실선시험을 수행한 바 있다. ARAON호를 이용한 공식 쇄빙 시험은 2010년 북극해에서 3회, 2012년 남극해에서는 각각 2회 실시되었는데 이때 확보한 선속에 관한 데이터 및 해빙의 재료강도와 두께에 관한 정보가 Table 1에 제시되어 있다. 본 연구에서는 여기에 제시된 자료를 이용하여 ARAON호의 공식 쇄빙시험 중 겪는 ARAON호 선수부 충격 빙하중을 계산해 보았다.

사용된 빙하중 계산식은 ABS 선급에서 개발, 사용하고 있는

프로그램으로서 선박이 가진 운동에너지가 얼음의 관입(indentation)시 crushing에 의한 파괴로 변환된다고 가정하고 이때 빙하중은 접촉면적에 얼음의 압축강도를 곱하여 계산한다 (Daley & Kendrick, 2006). 본 연구에서는 Table 1의 자료와 ARAON호의 제원에 대한 정보를 바탕으로 선수부 정면 충격(head-on collision)의 경우를 계산하였고 이 결과를 앞서 제안된 정상 운항상태의 빙하중 추정식 (2)와 함께 Fig. 7에 도시하였다.

Table 1 Ship speed and sea ice properties measured during the IBRV ARAON's official ice performance tests

	Ship Speed Observed during Ice Trials		Sea Ice Compressive Strength(MPa)	Sea Ice Thickness (m)
	knots	m/s		
Arctic Test #2 (Aug. 3, 2010)	4.78	2.46	1.63/1.28/1.21/1.88/2.10	2.25
Arctic Test #3 (Aug. 4, 2010)	3.71	1.91	1.26/1.46/1.84/1.45/1.71/1.61	1.91
Arctic Test #4 (Aug.5, 2010)	1.94	1.00	2.70	2.49
	2.78	1.43	2.43/1.62/2.06	
Antarctic Test #1 (Feb. 22, 2012)	2.93	1.51	1.30/1.41/1.64	1.45
	2.41	1.24	1.25/1.35	0.99
Antarctic Test #2 (Mar. 4, 2012)	3.01	1.55	1.72	0.93
	0.85	0.44	0.28/0.67/0.68	1.98
	1.93	0.99	1.40/2.26	1.92

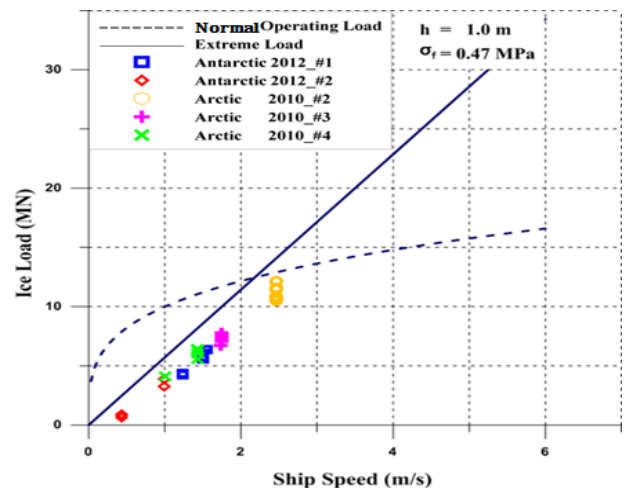


Fig. 7 Calculated ice loads vs. ship speed based on data measured during the IBRV ARAON's official ice performance tests

그림에서 보듯이 쇄빙연구선 ARAON호의 공식 쇄빙시험에서 예상되는 빙하중의 크기는 정상 운항상태의 빙하중 추정식(점선)보다 모두 아래쪽에 위치하는 것을 알 수 있다. 공식 쇄빙시험에서의 선속의 범위는 5knots 이하로 비교적 작은 값으로서 정상적인

운항상태의 한 부분이라고 보아도 무방할 것이다. Fig. 7에서 알 수 있는 것은 주어진 빙상상태에서 계산된 빙하중 추정치가 정상 운항상태의 빙하중 추정 경험식의 범주 안에 들어간다는 점이다.

4.2 실선계측 스트레인게이지 데이터 분석

쇄빙연구선 ARAON호의 두 차례의 남극해 공식 쇄빙시험 중 계측된 스트레인게이지 데이터(약 100분 분량)로부터 앞서 설명한 이벤트의 개념과 피크 빙압력 선택의 방법에 따라 골라내었고 이를 이벤트가 일어나는 순간의 선속과 함께 Fig. 8에 나타내었다. 이 때 피크 빙압력의 최대값은 3.7MPa 이었다.

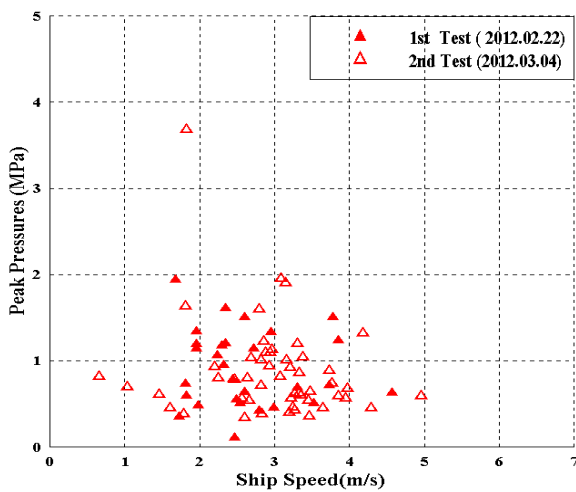


Fig. 8 Peak Pressure vs. ship speed for the IBRV ARAON during the official ice performance tests in the Amundsen Sea, Antarctica, 2012

일반 이동운항 중 계측된 자료는 32시간 분량의 총 19개 파일인데 그중 쇄빙에 의한 전진이 이루어지지 못한 3개 파일을 제외한 나머지 전체에 대하여 동일한 방법으로 피크 빙압력과 선속을 추출하여 이를 Fig. 9에 도시하였다. 이 때 피크 빙압력의 최대값은 공식 쇄빙시험과 조금 작은 3.4MPa 정도로 나타났다. 한 가지 주목할 것은 공식적인 쇄빙시험에서는 정해진 쇄빙능력을 검증하기 위해 속도 범위를 어느 정도 제한하게 되는데 비해서 일반 운항조건에서는 그 제한이 없기 때문에 속도가 높은 쪽의 데이터가 많다는 점이다.

Fig. 8 및 Fig. 9의 결과를 합쳐 하나로 나타낸 것이 Fig. 10인데 그 위에 정상 운항상태(normal operating condition)의 빙하중 추정식을 임의로 추가하였다. 여기서 선체에 작용하는 빙하중이 아니라 피크 빙압력(peak ice pressure)을 계산한 것이라서 앞서 제시한 빙하중 추정식과 직접 정량적인 비교를 할 수는 없으나 특별히 큰 값인 몇 개의 데이터를 제외한다면 선속이 증가하면서 빙하중(여기서는 등가응력)이 대수함수 형태로 증가하는 정상 운항상태의 추정식으로 나타낼 수 있다는 유추도 가능해진다. 즉 선속이 증가해도 빙하중이 지속적으로 증가하는 것이 아니라, 오히려 선속이 높아져도 빙하중은 어느 한계 이상 커지지 않는다. 이러한 유추를 가능하게 하는 또 다른 예가 Fig. 11에 나

타나 있는데, 러시아의 2만톤급 쇄빙상선인 SA-15 선박의 북극해 항행 시 계측된 빙하중과 선속과의 관계도 역시 본 연구에서 제시된 정상 운항상태의 추정식과 유사한 것을 알 수 있다.

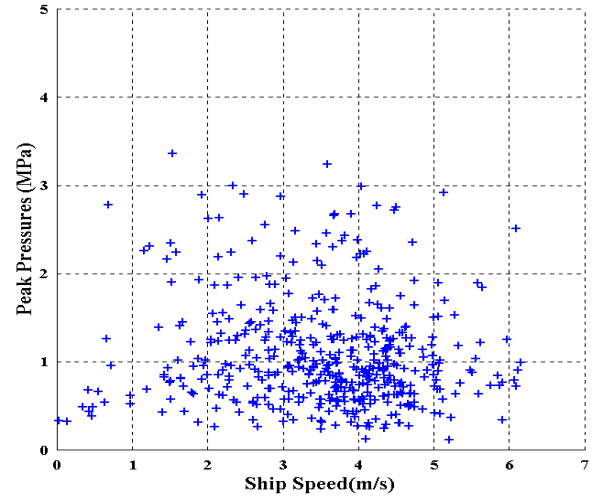


Fig. 9 Peak Pressure vs. ship speed for the IBRV ARAON during the general ice transit in the Amundsen Sea, Antarctica, 2012

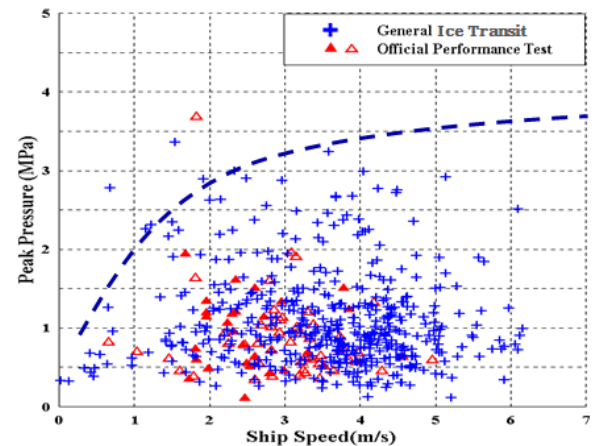


Fig. 10 Peak pressure data vs. ship speed during the IBRV ARAON's icebreaking voyage with an ice load prediction curve for normal operating conditions (data combining official ice performance tests and general ice transits)

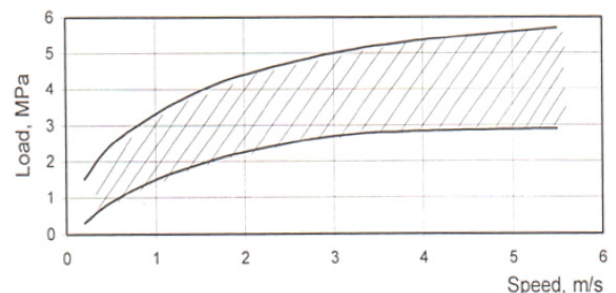


Fig. 11 Ice load vs. speed relations for the Arctic operation of SA-15 Class ships (Tsoy, 1998)

5. 결론

본 연구에서는 빙-선체 상호작용과 관련된 다양한 변수를 바탕으로 한 정상 운항상태의 빙하중 추정식 제안과 함께 쇄빙연구선 ARAON호의 2012년 남극해 실선시험 운항 시 예측한 스트레인게이지 데이터의 분석을 통해 다음과 같은 결론을 도출하였다.

- 1) 실선시험을 통해 예측된 해빙의 재료특성 및 선박의 운항정보를 바탕으로 계산된 빙하중 추정치는 정상 운항상태 빙하중 경험식의 범주 안에 있음을 확인하였다.
- 2) 스트레인게이지 데이터 분석을 통해 선속과 피크 빙압력의 관계를 추산한 결과 빙하중과 빙압력이 어느 정도 비례적이라 본다면 선속이 증가하면서 빙하중(여기서는 피크 빙압력)이 대수 함수 형태로 증가하는 정상 운항상태의 추정식 (2)를 따른다는 것을 확인할 수 있다. 즉 선속이 증가해도 빙하중이 지속적으로 증가하는 것이 아니라, 오히려 선속이 높아져도 빙하중은 어느 한계 이상 커지지 않는다.

후 기

본 논문은 산업통상자원부 산업원천기술개발사업인 “빙해선박 선체구조 안전성 평가기술 (Grant No.10033640)” 과제의 연구비 지원으로 수행된 결과임.

References

Choi, K. & Jeong, S.Y., 2008. Global ice load prediction for icebreaking vessels. *Proceedings of the 18th ISOPE Conference*, Vancouver, Canada, 6-11 July 2008, pp.638-643.

Choi, K. Jeong, S.Y. & Nam, J.H., 2009. Prediction of Design Ice Load on Icebreaking Vessels under Normal Operating Conditions. *Journal of the Society of Naval Architects of Korea*, 46(6), pp.604-611.

Choi, K., Kim, H.S., Ha, J.S. & Lee, C.J., 2014. IBRV ARAON's Ice Field Tests in the Amundsen Sea, Antarctica and the Comparative Analysis of Sea Ice Material Properties. *Journal of the Society of Naval Architects of Korea*, 51(3), pp.286-290.

Choi, K. Lee, C.J. Rim, C.W. & Kim, H.S., 2011. Strength Characteristics of Arctic Sea Ice from Ice Field Tests of the Icebreaking Research Vessel ARAON. *Journal of the Society of Naval Architects of Korea*, 48(3), pp.254-259.

Daley, C. & Kendrick, A., 2006. *Ice Loads for*

Structural and Vibration Analysis of Large Arctic LNG Carriers - Phase II, BMT Fleet Technology Ltd. ABS: Houston, USA.

Johnston, M. Frederking, R. Timco, G. & Miles, M., 2003. *Ice-Induced Global Loads on USCGC Healy and CCGS Louis S. St-Laurent as Determined from Whole-ship Motions, TP14291E, Technical Report CHC-TR-014*. Ottawa, Canada: NRC.

Keinonen, A., 1983. Ice load on ship in the Canadian Arctic. Ch.X. *Western European Graduate Education for Marine Technology*. Finland, March 1983,

Kim, H.S., Lee, C.J., Choi, K. & Kim, M.C., 2011. Study on Icebreaking Performance of the Korean Icebreaker ARAON in the Arctic Sea. *International Journal of Naval Architecture and Ocean Engineering*, 3, pp.208-215.

Kim, H.S., Choi, K. & Lee, C.J., 2012. Performance of the Korean research icebreaker Araon based on full-scale ice trials in the Amundsen Sea. *Proceedings of IceTech 2012*, Banff, 17-20 September 2012.

Kim, T.W. Kim, H.N. Choi, K. & Lee, T.K., 2014. Study on influence of ship speed on local ice loads on bow of the IBRV ARAON. *Proceedings of the 24th ISOPE Conference*, Busan, Korea, 18-23 May 2014, pp.1159-1164.

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), pp.82-87.

Tsoy, L.G., 1998. *Collection of SA-15 Operations Data. INSROP Working Paper No.107*. Lysaker, Norway: INSROP.



천은지

최경식

김호연

이탁기