

정상운항 상태에서 쇄빙선박에 작용하는 설계 빙하중 추정

최경식^{†*}, 정성엽^{**}, 남종호^{***}

한국해양대학교 해양공학과^{*}
한국해양연구원 해양시스템안전연구소^{**}
한국해양대학교 조선해양시스템공학부^{***}

Prediction of Design Ice Load on Icebreaking Vessels under Normal Operating Conditions

Kyungsik Choi^{†*}, Seong-Yeob Jeong^{**} and Jong-Ho Nam^{***}

Dept. of Ocean Engineering, Korea Maritime University^{*}
Maritime & Ocean Engineering Research Institute, KORDI^{**}
Div. of Naval Architecture & Ocean Systems Engineering, Korea Maritime University^{***}

Abstract

Ice load is one of the important design parameters for the construction of icebreaking vessels. In this paper, the design ice load prediction for the icebreaking vessels under normal operating condition in ice-covered sea is discussed. The ice loads under normal operating condition are expected from sea trials in moderate ice conditions. In this sense the extreme ice loads during heavy ramming or accidental collision are not considered. Current study describes the global ice load on the hull of the icebreaking vessels. Available ice load data from full-scale sea trials are collected and analyzed according to various ship-ice interaction parameters including displacement, stem angle, speed of a ship and flexural strength and thickness of sea ice. The ice load prediction formula is compared with the collected full-scale sea trials data and it shows a good agreement.

※Keywords: Icebreaking vessels(쇄빙선박), Design ice load(설계 빙하중), Global ice load(전체 빙하중), Normal operating conditions(정상운항 상태)

1. 서론

최근 전 세계적으로 원유가의 상승 추세가 오래 지속되고 있다. 특히 고유가로 인한 러시아 경제력의 확대는 북극해에 연한 시베리아의 개발과 북극해 항로 이용에 적극적인 노력을 기울이게 하였다.

빙해역 운항 시 쇄빙선박에 작용하는 빙하중은 크게 정상운항 상태에서 계측되는 빙하중과 극한 빙상환경에서 발생하는 극한 빙하중으로 구분할 수 있다. 특히 극한 빙하중의 경우 두꺼운 평탄빙 또는 빙맥, 빙산과의 충돌 시 발생하는데, 실제 빙해역 선급규정에서 사용되는 설계 빙하중은 선박이 심한 손상을 받는 조건에서의 운항보다는 정상운항 상태에서 선박에 요구되는 설계강도를 제시하고 있다.

본 연구에서는 정상운항 상태에서 쇄빙선박에 작용하는 전체 빙하중을 추정하기 위해 기 수집된 실선 빙하중 계측 데이터를 분석하고 선박의 배수량, 선수각, 선박의 속도, 해빙의 굽힘강도 및 빙두께 등과 같은 빙-선체 상호작용과 관련된 다양한 변수들을 바탕으로 새로운 설계 빙하중 추정식을 제안하였다. 아울러 제안된 추정식은 6척의 실선 빙하중 계측 데이터와의 비교/분석을 통해 설계 빙하중 추정식의 적용 가능성을 검증하였다.

2. 빙하중 추정식

최근 빙해역을 운항하는 선박에 작용하는 빙하중 추정에 관한 연구가 활발히 진행되고 있다. 하지만 쇄빙선박 설계 시 정확한 빙하중 산정은 상당히 복잡한 과정이며, 이는 빙-선체 상호작용에 대한 이해가 필수적이다. 또한 빙하중을 이해하고 분석하는데 있어서 가장 좋은 방법은 실선을 이용해 직접 계측하는 것이지만, 빙해역 운항 시 선체에 작용하는 빙하중의 분포를 정확히 파악하는 것은 매우 어려운 작업이다.

본 연구자들은 쇄빙선박 6척에 대한 실선 빙하중 계측자료 및 모형시험 데이터를 정리한 바 있다 (Choi and Jeong 2008). 식(1)은 본 연구자들이 제안한 최대 빙하중 추정식으로서 빙하중을 선

박의 속도 및 배수량의 함수로 간단하고 실용적인 형태로 나타내었다.

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

여기서 $V(\text{m/s})$ 는 선박의 충돌속도이고 $\Delta(10^3 \text{ ton})$ 는 선박의 배수량을 나타낸다. Fig. 1에는 기 수집된 빙하중 데이터와 함께 본 연구자가 제안한 최대 빙하중 추정식이 함께 도시되어있다. 여기서 제안된 빙하중 추정식은 정상운항 상태라기보다는 극심한 빙상환경에서 계측된 극한 빙하중으로서 이는 얼음의 파괴 유무와 상관없이 발생하며 이는 선박에 심각한 구조적 문제를 유발시킨다. 다시 말해 극한 빙하중은 선박이 두꺼운 빙판이나 빙맥과 충돌하는 경우 선체에 작용하는 힘으로서, 보통 얼음이 깨어지지 않는 경우에 발생한다. 특히 극한 빙하중은 선박의 운동에너지와 밀접한 관련이 있으므로 선체에 작용하는 극한 빙하중을 추정함에 있어 선박의 충돌속도와 선박의 크기는 중요한 변수가 된다.

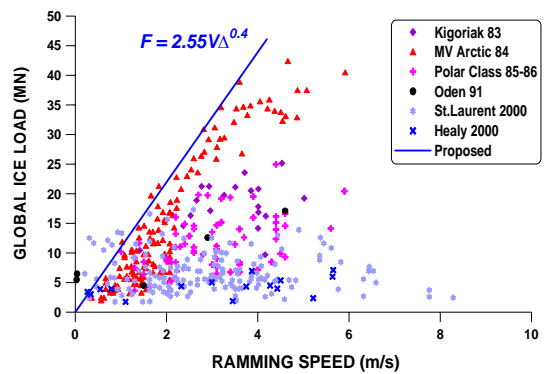


Fig. 1 Collected global ice loads data and a proposed ice load prediction equation for the Canadian icebreaking bulk carrier, MV Arctic (modified from Choi and Jeong 2008)

북극해에서 쇄빙선박의 항행 시 가장 일반적인 운항방식은 평탄빙에서의 연속쇄빙 또는 충격쇄빙으로서 이러한 경우 선박에 발생하는 빙하중은 그리 크지 않은 편이다. 그러나 극한 빙상상태에서

의 충격쇄빙이나 얼음과의 충돌속도가 빠른 경우 매우 큰 빙하중이 발생하지만 이는 쇄빙선박의 설계 시 반영되는 설계 빙하중의 관점과는 다소 차이가 있다.

언급한 바와 같이 Fig. 1에는 실선시험을 통해 계측된 빙하중 데이터가 도시되어 있는데, 이들 자료가 극한 빙하중을 나타내는 것은 아니다. Fig. 1에서 정리된 데이터들은 선박이 손상받을 정도의 운항조건에서 계측된 극한 빙하중이라기 보다는 정상적인 운항 상태에서 발생한 빙하중 데이터로 보는 것이 보다 정확하다.

일반적으로 빙해역 운항 시 선박의 추력이 선체에 발생하는 빙저항보다 충분히 크다면 선박은 연속쇄빙을 통해서 운항할 수 있다. 하지만 선박이 두꺼운 빙맥이나 빙산을 만나면 연속쇄빙을 통한 운항은 불가능하며, 이러한 경우 쇄빙선박은 충돌쇄빙을 통해 운항을 지속하거나 정지하게 된다.

그러므로 특정 빙두께에서 특정 속도로 정상운항하는 경우 빙저항 추정 문제와 상당히 유사한데, 정상운항 상태에서 쇄빙선박에 작용하는 빙하중은 빙저항 추정에서와 같이 선체형상과 얼음의 재료특성 및 강도특성 등 주요 변수에 좌우된다.

3. 실선 빙하중 계측자료 분석

본 연구자들은 기존의 연구자들이 제안한 다양한 형태의 빙하중 추정식을 정리한 바 있다 (Choi and Jeong 2008). 특히 Johansson et al.(1981) 과 Tunik(1982), Keinonen(1983), Daley et al.(1984) 등은 선수부에 작용하는 최대 빙하중 추정식을 제안하였다.

캐나다의 CASPPR(Canadian Arctic Shipping Pollution Prevention Regulations)의 경우 충격쇄빙 시 발생하는 최대 빙하중 추정에 관한 규정을 가지고 있으며, IACS(International Association of Classification Societies) 또한 최대 빙하중을 추정하는 독자적 경험식을 제시하고 있다.

하지만 이러한 대부분의 빙하중 추정식들은 특정 쇄빙선박에 대한 실선 계측 데이터를 바탕으로 도출되었으며, 이들은 정상운항 상태에서 쇄빙선

박에 발생하는 빙하중이기 보다는 극한 빙하중을 나타낸다. 또한 제안된 빙하중 추정식의 경우 속도가 빠른 구간에서는 빙하중이 다소 높게 추정되는 경향을 가지고 있다.

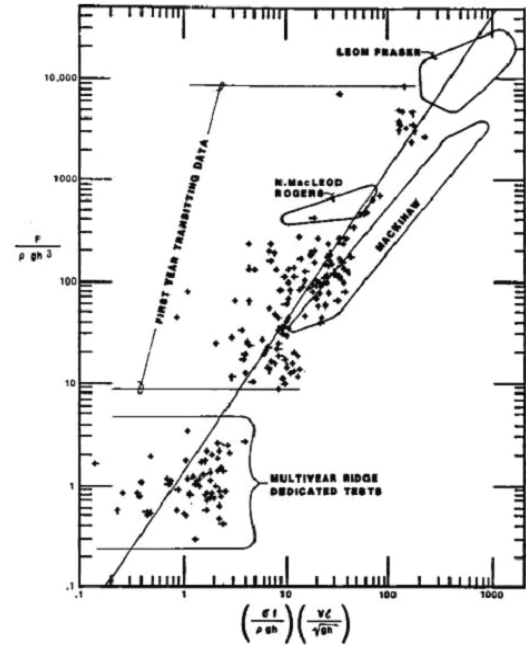


Fig. 2 Non-dimensional relationship between force and normal velocity times flexural strength for the Polar Sea 1983 measured data (from Daley et al. 1990)

만약 얼음이 무한히 크고 얇은 빙판인 경우 선박에 작용하는 전체 빙하중은 얼음의 두께 및 굽힘강도, 배수량, 선박의 속도 등의 함수로 표현할 수 있다. Daley et al.(1990)는 쇄빙선 Polar Sea의 빙하중 실선계측 데이터를 바탕으로 무한히 큰 빙판에 대한 최대 빙하중 추정식을 제안하였다.

$$F_{max} = 1.29\rho gh^3 \left\{ \frac{\sigma_f}{\rho gh} \times \frac{Vl}{\sqrt{gh}} \right\}^{1.4566} \quad (2)$$

여기서 V (m/s)는 선박의 쇄빙속도, h (m)는 얼음의 두께, σ_f (MPa)는 얼음의 굽힘강도, ρ (kg/m^3)는 해수의 밀도, l 은 플레어각과 수선면각의 함수

이다 (Fig. 2).

Daley et al.(1990)가 제안한 빙하중 추정식(2)는 힘을 수직방향의 속도성분과 해빙의 굽힘강도와 곱으로 나타내었으며 이들을 각각 무차원화시켰는데, 이러한 빙-선체 상호작용과 연관된 변수들의 함수관계를 통해 최대 전체 빙하중을 추정하는 방법은 상당히 논리적이다. 식(2)의 경우 선박의 속도가 저속인 구간에서는 실선계측 자료와 상당히 유사한 결과를 나타내지만 속도가 빠른 구간에서는 $V^{1.4566}$ 의 성분 때문에 빙하중이 급격히 증가하는 것을 알 수 있는데, 이는 전체 빙하중의 경향과 차이가 있음을 알 수 있다.

본 연구에서는 보다 현실적인 최대 빙하중 추정식을 제안하기 위해 선박의 속도성분과 함께 빙두께, 해빙의 굽힘강도, 선수각, 선박의 배수량 등과 같은 변수들을 고려하였으며, 도출된 빙하중 추정식의 결과를 쇄빙선박 6척의 기 수집된 실선 빙하중 데이터와 비교/분석하였다.

Fig. 3에는 Fig. 1의 실선 빙하중 및 실선으로 확장된 모형시험 데이터들을 정리해 실선계측 자료만으로 구분하여 재배치하였다. 특히 Fig. 3에서 MV Arctic(Daley et al.,1986)의 경우 속도가 2m/s 이상인 구간은 ACL(Arctec Canada Ltd.)에서 수행한 1:40의 모형선 시험결과를 실선으로 확장한 값이기 때문에 그 자료들은 제외시켰다. Fig. 3에서 일부 데이터들은 선박의 충돌속도가 증가함에 따라 선체에 작용하는 빙하중도 증가하는 경향을 나타낸다. 그러나 대부분의 빙하중 계측 데이터가 전 속도구간에 걸쳐 분포되어있고 속도가 빠른 구간에서 계측된 빙하중의 경우 그 값은 그리 크지 않다. 이것은 속도가 3~4m/s를 넘는 구간에서 계측된 빙하중 값이 극한 빙하중이 아니라는 것을 입증한다.

이를 통해 정리된 빙하중 데이터들은 쇄빙선박이 손상을 받는 상황에서 얻어진 데이터가 아닌 선박의 구조적 안전성이 충분히 확보되는 정상운항 상태에서 계측된 데이터라는 것을 알 수 있다.

본 연구자들은 Fig. 3에서 정리된 빙하중 실선 계측자료를 바탕으로 새로운 변수 $F_{max}/\Delta^{0.4}$ 와 $\sigma_f h^2 \cos \alpha$ 를 이용해 log-log 그래프로 변환시켜 Fig. 4에 도시하였다. 하지만 여기서 사용된 변수

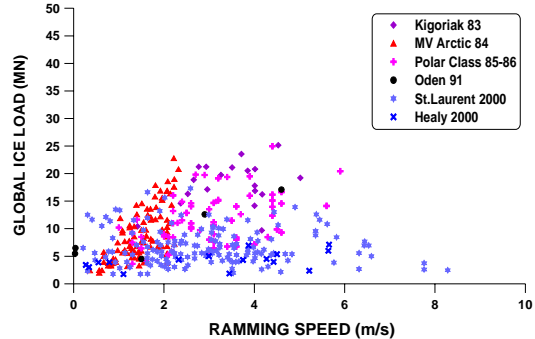


Fig. 3 Rearranged global ice load data for six icebreaking vessels

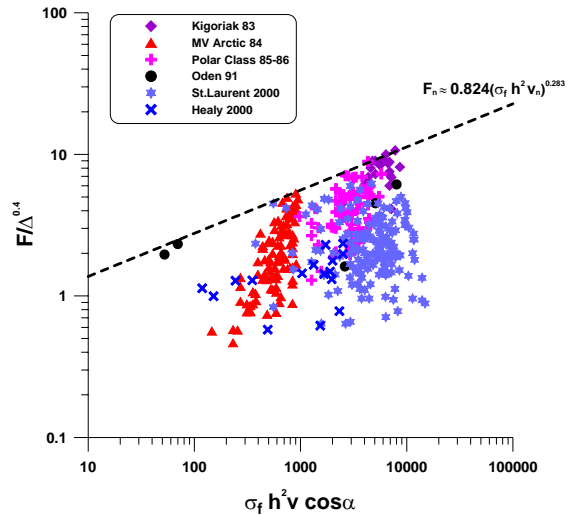


Fig. 4 Global ice load data for six icebreaking vessels in log-log scale plot and a regression line obtained, $F_{max} = 0.824\Delta^{0.4}(\sigma_f h^2 V \cos \alpha)^{0.283}$

들을 별도로 무차원화 시키진 않았다. log-log로 변환된 빙하중 계측 데이터를 바탕으로 빙하중의 최대값에 대한 선형회귀 직선을 얻을 수 있다. 여기서 빙두께, 해빙의 굽힘강도, 선박의 배수량, 선수각을 고려한 최대 빙하중과 선박의 속도에 관한 최종적인 함수관계는 다음과 같다.

$$F_{max} = 0.824\Delta^{0.4}(\sigma_f h^2 V \cos \alpha)^{0.283} \quad [MN] \quad (3)$$

여기서 $V(m/s)$ 는 선박의 속도, $\alpha(deg)$ 는 선박의

선수각, Δ (10³ton)는 선박의 배수량, h (m)는 빙 두께, σ_f (MPa)는 해빙의 굽힘강도를 나타낸다. 특히 식(3)에서 $\Delta^{0.4}$ 성분은 전체 빙하중 추정식에서 선박의 크기에 따른 영향을 고려하기 위해 적용시켰으며, 이는 식(1)의 극한 빙하중 추정식과 연관이 있다. 또한 $V^{0.283}$ 성분을 통해 선박의 속도가 빠른 구간에 대한 영향을 고려하였으며, 선수각 $\cos \alpha$ 성분을 통해 얼음과의 충돌 시 수직 방향의 속도성분을 고려하였다.

Table 1 Principal dimension and the sources of collected ice load data for six ships

Data source	Ship type	L (m)	B (m)	T (m)	α (deg)	Δ (tons)
Canmar Kigoriak (Beaufort Sea 1981, 83)	IB	79.3	17.3	8.5	24.0	8,550
Polar Sea/ Polar Star (Beaufort Sea 1985, 86)	IB	107.3	25.5	8.5	22.5	13,190
MV Arctic (Baffin Bay 1984)	IBC	206.0	22.9	11.1	30.0	38,100
Oden (Polar Crossing 1991)	IB	107.8	25.0	7.0	22.0	13,000
Louis S. St. Laurent (Polar Crossing 2000)	IB	110.3	23.3	8.5	17.0	12,875
Healy (Labrador Sea 2000)	IB	120.8	24.2	8.5	19.0	15,965
Araon	IB	95.0	19.0	6.8	34.0	7,520
Vasily Dinkov	IBC	257.0	34.0	8.0	35.0	110,000
Remarks	IBC: Icebreaking Cargo Vessel IB: Icebreaker					

4. 설계 빙하중 추정식 검증

정상운항 상태에서의 쇄빙선박에 발생하는 최대 빙하중은 식(3)을 사용해서 추정할 수 있다. 본 연구에서는 식(3)으로부터 추정된 최대 빙하중 결과를 Canmar Kigoriak, 캐나다 bulk/ore carrier MV Arctic, USCG 쇄빙선 Polar Sea/Polar Star, 스웨덴 쇄빙선 Oden, CCG 쇄빙선 Louis S. St. Laurent, USCG 쇄빙선 Healy 등 6척의 실선 빙하중 계측 데이터와 비교하였다.

우선 Table 1에는 6척의 선박에 대한 주요 제원 및 자료출처가 정리되어있다. Fig. 5~10에는 제안된 빙하중 추정식에 의해 계산된 전체 빙하중의 추정값과 극한 빙하중 값을 6척의 실선 계측결과와 함께 도시하여 비교하였다. 또한 Fig. 11~12에는 현재 국내에서 건조 중인 쇄빙연구선 Araon과 2007년 국내 조선소에서 건조된 쇄빙유조선 Vasily Dinkov에 대한 정상운항 상태에서의 빙하중과 극한상태에서 선박에 발생하는 극한 빙하중을 식(3)을 이용하여 추정하였다.

Fig. 5와 Fig. 6, Fig. 7 그리고 Fig. 9를 보면 제안된 빙하중 추정식을 통해 얻어진 결과는 실측 데이터를 비교적 잘 반영하고 있음을 알 수 있다. Fig. 8의 경우에는 실선 계측자료가 부족하여 직접적인 비교는 어렵지만 전체 빙하중을 추정함에 있어 경향은 실측 데이터와 유사함을 알 수 있다.

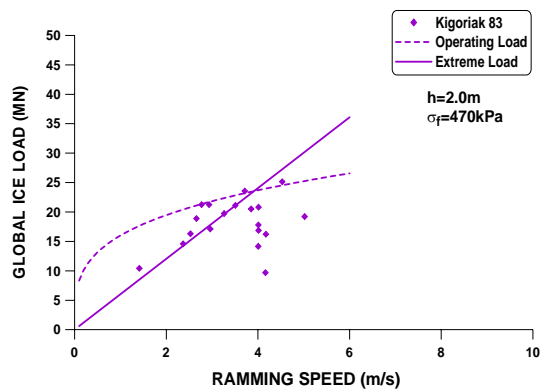


Fig. 5 Global ice loads vs. ship speed for Canmar Kigoriak (Ghoneim et al. 1984)

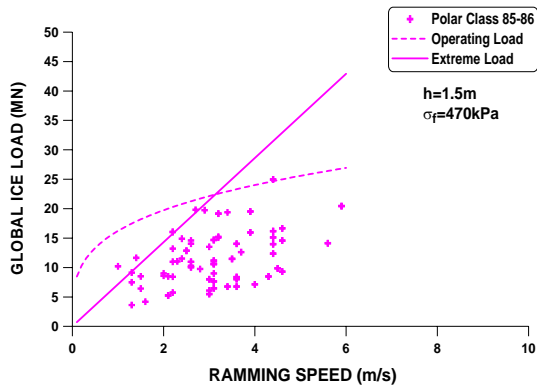


Fig. 6 Global ice loads vs. ship speed for Polar class icebreakers (Minnick et al. 1990)

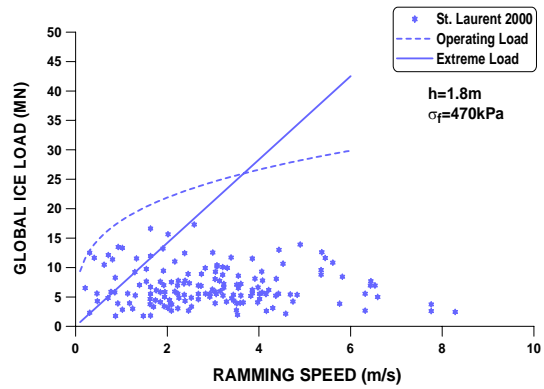


Fig. 9 Global ice loads vs. ship speed for icebreaker Louis S. St. Laurent (Johnston et al. 2003)

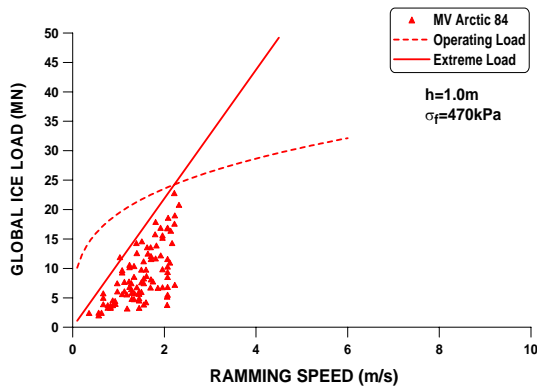


Fig. 7 Global ice loads vs. ship speed for MV Arctic (German & Milne/VTT 1985)

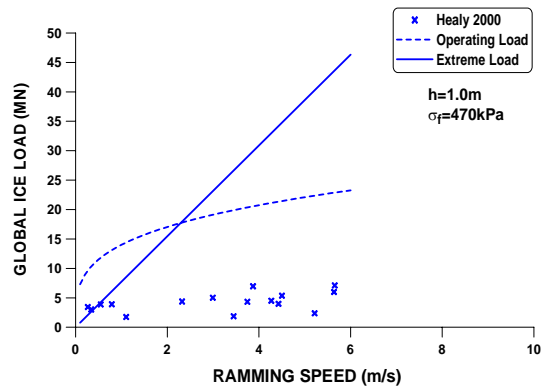


Fig. 10 Global ice loads vs. ship speed for icebreaker Healy (Johnston et al. 2003)

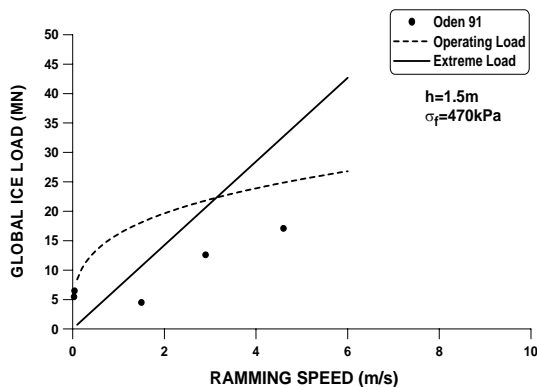


Fig. 8 Global ice loads vs. ship speed for Swedish icebreaker Oden (Frederking 1999, 2005)

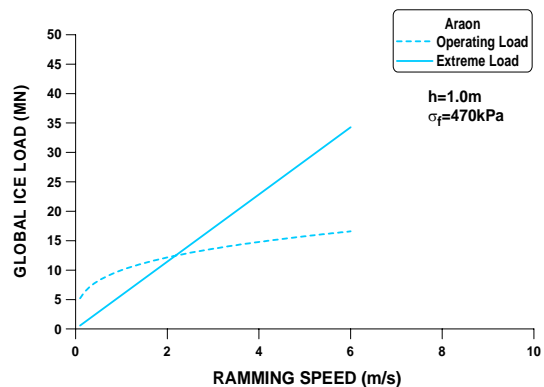


Fig. 11 Global ice loads vs. ship speed for a Korean icebreaking research vessel, Araon

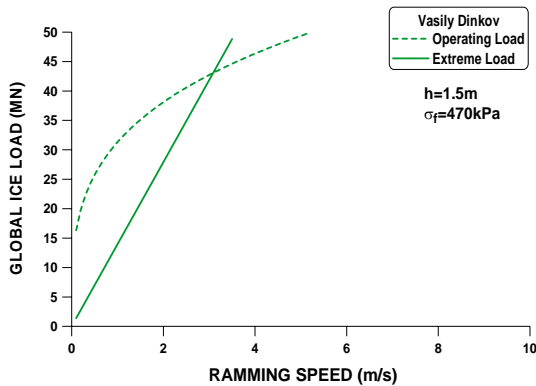


Fig. 12 Global ice loads vs. ship speed for an Arctic oil tanker, Vasily Dinkov

Fig. 10의 경우 쇄빙선 Healy의 빙하중 데이터는 빙상조건이 보다 온화한 상태에서 계측된 결과이기 때문에 추정식과 다소 차이가 존재하지만 다른 결과들과 비교해 볼 때 정상운항 상태에서 전체 빙하중의 경향은 유사함을 알 수 있다.

Fig. 11과 Fig. 12의 경우 아직 실선 빙하중 계측 데이터가 없어 추정식을 통해 계산된 결과만을 도시하였다. 국내 최초의 쇄빙연구선인 Araon은 쇄빙선 Kigoriak과 선박의 제원 및 형상이 거의 유사하고 빙하중 경향 또한 거의 유사함을 알 수 있다. 쇄빙유조선 Vasily Dinkov의 경우 선박의 크기가 여타 선박에 비해 월등히 크기 때문에, 속도가 저속인 구간에서 추정되는 빙하중 값도 상당히 높음을 알 수 있다.

5. 결론

본 연구에서는 정상운항 상태에서 선박에 작용하는 설계 빙하중 추정에 관한 연구를 수행하였으며, 다음과 같은 결론을 내릴 수 있다.

정상운항 상태에서 선박에 작용하는 전체 빙하중은 북극해의 일반적인 빙상조건에서 실선시험시 계측되는 결과로서 극한 빙상환경에서 선박에 구조적 손상이 발생하는 극한 빙하중과는 차이가 있다. 본 연구에서는 쇄빙선박 6척에 대한 실선 빙하중 계측자료를 정리한 후 선박의 배수량, 선수각, 충돌속도, 해빙의 굽힘강도, 빙두께 등과 같

은 다양한 선체-빙 상호작용과 관련된 변수를 이용해 전체 빙하중의 경향을 파악하였다.

정리된 실선 빙하중 데이터를 log-log 그래프로 변환시킨 후 계측된 빙하중의 최대값을 바탕으로 선형회귀분석을 통해 최종적으로 다음과 같은 추정식을 도출하였다.

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

본 연구에서 제안한 전체 빙하중 추정식은 정상운항 상태에서 선박에 발생하는 빙하중으로서 추정식에 의해 계산된 결과를 쇄빙선박 6척의 실선 계측자료와 비교해본 결과 실선자료를 비교적 잘 반영하고 있으며, 전체 빙하중의 경향과도 유사함을 알 수 있다.

선박의 선형이 다양화 되고 크기가 점차 대형화됨에 따라 특정선형이나 소형 쇄빙선박으로부터 도출된 빙하중 추정식을 대형 쇄빙선박에 적용시키기에는 무리가 있으므로 추정식의 수정 및 보완이 필요하다. 본 연구에서 제안한 최대 빙하중 추정식은 소형 및 대형선박에도 적용이 가능하며, 선박의 제원 및 빙상조건에 대한 정보를 포함하고 있어 기존의 추정식보다 현실적이다.

본 연구에서 제안된 정상운항 상태의 빙하중 추정식에 대한 검증을 위해서 현재 쇄빙선상에 대한 빙하중 데이터가 현저히 부족한 실정이므로 향후 건조될 대형 쇄빙선박에 대한 실선 빙하중 계측자료 확보가 필요하다.

후 기

본 논문은 한국과학재단 지정 첨단조선공학 연구센터(ASERC R11-2002-008-01002-0)의 연구비 지원으로 수행된 연구결과임.

참 고 문 헌

- Choi, K. and Jeong, S.Y., 2008, "Global ice Load Prediction for Icebreaking Vessels," Proc. of the 18th ISOPE Conference, Vancouver, Canada, pp. 638-643.

- Daley, C.G., St. John, J.W., Seibold, F. and Bayly, I., 1984, "Analysis of Extreme Ice Loads Measured on USCGC Polar Sea," SNAME Transactions, Vol. 92, pp. 241-252.
- Daley, C.G., Phillips, L.D. and McCallum, J.S., 1986, "Dynamic Ship/Ice Impact - Results of Parametric Model Testing," Proc. of the First Int. Conf. on Ice Technology (ed. T.K.S. Murthy), pp. 349-363.
- Daley, C.G., St. John, J.W., Brown, R., Meyer, J. and Glen, I., 1990, Ice Loads and Ship Response to Ice - A Second Season, Report No. SSC-339, Ship Structural Committee.
- Frederking, R., 1999, "The Local Pressure-Area Relation in Ship Impact with Ice," Proc. of the 15th POAC Conference, Helsinki, Finland, pp. 687-696.
- Frederking, R., 2005, "Local Ice Pressures on the Oden 1991 Polar Voyage," Proc. of the 18th POAC Conference, Potsdam, NY, USA, pp. 353-363.
- German & Milne/VTT, 1985, M.V. 'Arctic' Test Results and Analysis, Final Report to Transport Canada, Coast Guard Northern Report No. TP6270 E.
- Ghoneim, G.A.M., Johansson, B.M., Smyth, M.W. and 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, Vol. 92, pp. 253-282.
- Johansson, B., 1981, "Technical Development of an Environmentally Safe Arctic Tanker," Proc. of IceTech '81, SNAME/STAR Symp., Ottawa, Canada.
- Johnston, M., Frederking, R., Timco, G. and Miles, M., 2003, Ice-Induced Global Loads on USCGC Healy and CCGS Louis S. St-Laurent as Determined from Whole-Ship Motions, TP14291 E, Technical Report CHC-TR-014, National Research Council of Canada.
- Keinonen, A., 1983, "Ice Loads on Ships in the Canadian Arctic," Ch.X, Western European Graduate Education for Marine Technology, March 1983, Finland.
- Minnick, P. and St. John, J.W., 1990, Global Ice Forces and Ship Response to Ice, Report No. SSC-343, Ship Structural Committee.
- Tunik, A.L., 1982, "Ultimate Safe Conditions for Ship's Operation in Ice," SNAME Arctic Section, Calgary, Canada.



< 최 경 식 >



< 정 성 엽 >



< 남 종 호 >