

쇄빙상선의 빙하중 추정식 고찰

최경식^{†*}, 정성엽^{*}

한국해양대학교 해양개발공학부^{*}

Ice Load Prediction Formulas for Icebreaking Cargo Vessels

Kyungsik Choi^{†*} and Seong-Yeob Jeong^{*}

Div. of Ocean Development Engineering, Korea Maritime University^{*}

Abstract

One of the concerns that arise during navigation in ice-covered waters is the magnitude of ice loads encountered by ships. However, the accurate estimation of ice loads still remains as a rather difficult task in the design of icebreaking vessels. This paper focuses on the development of simple ice load prediction formulas for the icebreaking cargo vessels. The maximum ice loads are expected from unbroken ice sheet and these loads are most likely to be concentrated at the bow area. Published ice load data for icebreaking vessels, from the model tests and also from full-scale sea trials, are collected and then several ice load prediction formulas are compared with these data. Finally, based on collected data, a semi-empirical ice load prediction formula is recommended for the icebreaking cargo vessels.

※ Keywords: Icebreaking cargo vessels(쇄빙상선), Design ice load(설계 빙하중), Model test data(모형선 실험자료), Full scale sea trial data(실선 계측자료), Semi-empirical(반-경험적), Ice load prediction formula(빙하중 추정식)

1. 서론

최근 전 세계적으로 원유가의 상승 추세가 오래 지속되고 있다. 이러한 고유가 추세는 과거 유가가 하향 안정적이었던 시절, 경제성이 떨어져 외

면해 왔던 극지에서의 자원개발을 가능케 하는 원동력이 되고 있으며, 특히 고유가로 인한 러시아 경제력의 확대는 북극해에 의한 시베리아의 개발과 북극해 항로 이용에 적극적인 노력을 기울이게 하였다.

접수일: 2007년 10월 23일, 승인일: 2008년 3월 20일

† 교신저자, kchoi@hhu.ac.kr, 051-410-4234

빙해역 운송의 기존 방법은 유도쇄빙선에 의한 항로 개설인데 유도되는 선박의 크기가 유도하는

쇄빙선의 크기를 초과할 수 없기 때문에 북극해 항로에서 운용하게 될 선박이 지금까지 보다 규모가 더 증가한다면 Arktika class와 같은 원자력 쇄빙선조차도 유도쇄빙선의 역할을 하기 어려워질 것이다. 따라서 현재의 빙해용 대형 쇄빙선박의 부족현상은 북극해 항로에서 독립적으로 운용할 수 있는 쇄빙상선의 설계와 건조가 곧 필요하리라는 점을 시사하고 있다.

현재 빙해역 운항 선박의 대부분을 차지하고 있는 러시아의 쇄빙선단은 노후화되어 중장기적으로 새로운 쇄빙상선에 대한 수요가 창출될 것이라는 예측이다. 국내 조선사의 추정에 따르면 국제 원유/천연가스 가격의 상승으로 오는 2012년까지 쇄빙유조선 40척 가량이 발주될 것으로 보고 있다. 이는 50억불 이상의 새로운 시장이 탄생하는 것이며 또 극지용 선박 시장은 쇄빙유조선 외에 쇄빙LNG선, 쇄빙컨테이너선 등으로 확대될 전망이다. 이러한 상황은 고부가가치 전략을 기조로 하고 있는 현재의 국내 조선산업에 좋은 기회가 될 수 있을 것이다. 현재 국내 조선사가 수주하는 선박의 약 25%는 빙해역에서 운항할 수 있는 Ice Class 선박이며 이 비율은 계속 증가하고 있는 추세이다(ITEP 2006).

본 논문에서는 쇄빙선박에 작용하는 빙하중 산정의 문제를 다루고 있다. 쇄빙선박 설계에 필요한 빙하중을 100% 정밀하게 산정할 수 있는 방법은 아직은 정립되지 않았다고 말할 수 있다. 하지만 기 발표된 문헌과 자료의 분석을 통해, 빙하중 산정 문제를 이해하고 빙해역 선급규정의 이론적인 근거를 파악하는 일은 충분히 가능한 것으로 판단된다. 국내에서도 최근 들어 빙하중 산정에 관한 논문이 발표되고 있다(Choi and Lee 2004, Rim and Lee 2007).

빙하중을 산정하기 위해서는 빙/선체 상호작용에 관한 이해가 필수적이지만 이러한 과정은 매우 복잡하여 명확한 해석법이 아직까지는 없다. 선체에 작용하는 빙하중을 추정하는 가장 좋은 방법은 빙해역에서 실선을 이용해 직접 측정하는 것이다.

하지만 과도한 실측 비용과 함께 선체에 작용하는 실측 빙하중의 정확도에는 많은 문제가 있다.

본 연구에서는 쇄빙상선의 항행 시 선수부에 작용하는 빙하중을 추정하기 위해 발표된 문헌으로부터 실선 계측자료를 수집하고 아울러 빙하중 산정식을 분석하여 이로부터 쇄빙상선에 적용할 수 있는 새로운 빙하중 추정식을 제안하였다.

2. 실선의 빙하중 계측자료

쇄빙선박 건조 경험이 많았던 핀란드나 캐나다에서도 표준화된 빙하중 산정 방법을 정립하는 문제가 근래 시급하게 다루어지고 있다. 이를 위해 먼저 필요한 것은, 개별적으로 서로 다른 조건에서 계측된 빙하중 실측자료를 공유하고, 공통된 형식의 데이터베이스로 만들어 이를 바탕으로 설계 빙하중을 추정할 수 있는 경험식을 도출하는 것이다.

지금까지 수집된 빙하중 계측 자료는 계측 시의 환경조건과 계측 방법이 제각기 달라 공통적인 요소를 찾기가 무척 어렵다. 본 연구에서는 먼저 쇄빙선박의 실측 빙하중 데이터를 수집하여 분석하였다. 전체 빙하중은 충격쇄빙에서 선체가 받는 극한 빙하중(extreme ice load)으로 생각하고 빙하중과 충돌속도의 관계로 나타낼 수 있는 자료를 동일한 척도(scale)와 단위(unit)로 표시하였다, 국부 빙압력은 접촉면적의 함수로 제시된 것만을 정리하였다.

실선 빙하중 계측자료가 공개된 선박의 제원과 빙하중 데이터의 출처에 대하여 Table 1에 정리하였다. Fig. 1와 Fig. 2는 각각 수집된 전체 빙하중과 국부 빙압력 데이터의 원 자료를 보여주고 있다. Table 1에 언급된 쇄빙선박의 빙하중 데이터를 모두 모아 Fig. 3 및 Fig. 4에 정리하였다.

선체에 작용하는 전체 빙하중은 얼음의 두께와 강도, 얼음의 크기, 온도 등 빙상환경에 관련된 요소, 선박과 얼음의 상대속도, 선박의 크기와 선형

Table 1 List of icebreaking vessels for sea trial data measurement

Name of Ship	Type	Length (m)	Displacement (tons)	Data Source
Manhattan	oil tanker	307	115,000	Northwest Passage 1969
Canmar Kigoriak	icebreaker	79.3	8,550	Beaufort Sea 1981, 83
Polar Sea Polar Star	icebreaker	107.3	13,190	Beaufort Sea 1985, 86
MV Arctic	ore/bulk carrier	206	38,100	Baffin Bay 1984
Oden	icebreaker	107.8	13,000	Polar Crossing 1991
SA-15	multi-purpose cargo ship	159.6	25,900	Northern Sea Route 1983
Louis S. St. Laurent	icebreaker	110.3	12,875	Polar Crossing 1994
Sisu	icebreaker	96	-	Baltic Sea 1982
N. B. Palmer	research vessel	93.7	6,417	Antarctica 1992
Healy	icebreaker	120.8	15,965	Labrador Sea 2000

등 선박의 형상에 관한 요소에 의해 결정되는데, 빙저항과는 달리 쇄빙선박이 빙판을 깨뜨릴 수 있는지 아닌지에 관계없이 선체는 빙하중을 받게 되며, 그 최대값은 극한 빙하중으로서 보통은 얼음이 깨지지 않았을 경우에 발생한다.

따라서 최대 충격 빙하중 혹은 극한 빙하중은 큰 규모의 얼음에 선박이 충격쇄빙을 하게 되는 경우에 발생하는 문제이고 이 경우 선박의 속도와 선체의 크기가 빙하중 결정에 제일 중요한 요소라고 할 수 있다. 반면 규모가 작은 얼음에 선박이 충돌하는 경우는 얼음이 깨어질 가능성이 높고 이 경우는 얼음의 두께나 재료강도 등이 중요한 요소가 될 것이다.

전체 빙하중을 설명할 때 이 두 경우를 구분해야 하지만 수집된 전체 빙하중 실측 자료는 두 경우가 모호하게 섞여 구분하기 어려운 상태라고 생각된다. 실제로 쇄빙선박을 건조하여 실선 시험을 한다고 해도 선체의 큰 손상을 감수할 정도로 심각한 충격 상황에서 빙하중 계측이 이루어진 것은

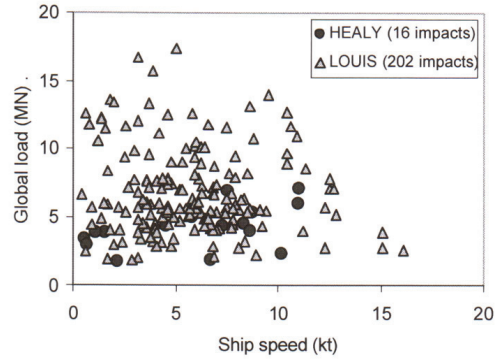


Fig. 1 Global ice loads measured on Healy and the Louis S. St. Laurent(Johnston et al. 2003)

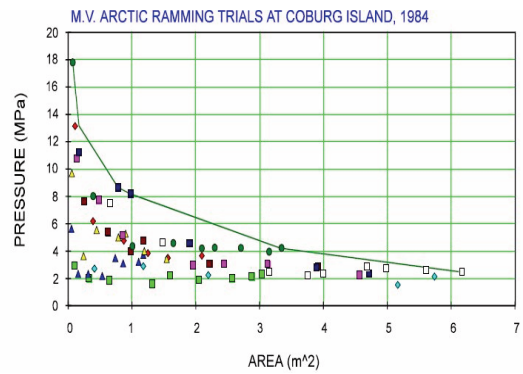


Fig. 2 Local ice pressure vs. contact area for 1984 MV Arctic sea trials(Daley 1994)

그다지 많지 않았을 것이며, 오히려 구조 강도 상 충분히 여유가 있는 정상적 운항 상태에서의 계측자료라 보아야 할 것이다. 바로 이점을 염두에 두고 수집된 전체 빙하중 자료를 이해할 필요가 있다.

국부 빙압력도 전체 빙하중과 마찬가지로 서로 다른 빙상조건과 서로 다른 선종의 계측 자료로부터 공통된 요소를 찾기가 어렵지만 대부분의 빙압력 데이터는 접촉면적의 함수로 제시되어 있어 빙압력과 접촉면적의 관계를 가지고 서로 비교할 수 있다. 여기서 수집된 국부 빙압력에 관한 일부 데

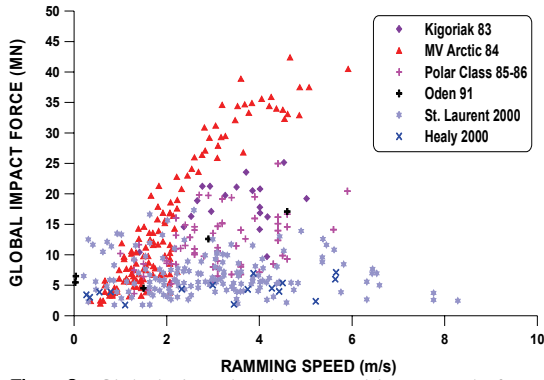


Fig. 3 Global ice loads vs. ship speed for icebreaking vessels

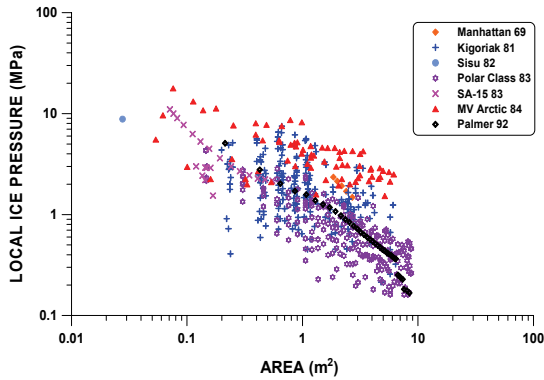


Fig. 4 Local ice pressure vs. contact area for icebreaking vessels

이러한 판단할 때 빙압력도 전체 빙하중과 같이 속도와 어느 정도 관련이 있다고 보이지만 모든 경우에 적용할 수는 없다. 또한 얼음의 강도 역시 빙압력을 결정하는 중요한 요소임에는 틀림없으나 서로 비교할 수 있는 공통된 자료가 부족하다.

3. 빙하중 추정식 고찰

선체구조에 작용하는 빙하중을 이해하기 위해서는 먼저 전체 빙하중(global ice loads)과 국부 빙압력(local ice pressures)을 구별할 필요가 있다. 이것은 기본적으로 선체와 얼음과의 접촉면적에 따른 구분이지만, 한편으로는 이들 하중을 받았을 때 선체구조의 거동을 구분하는 방법이기

도 하다. 즉 국부 빙압력은 선체 외판 및 그 주변 부재에 직접 작용하여 구조 손상을 유발시키며 전체 빙하중은 선체 전체를 하나의 구조부재로 보고 선체의 종강도나 선체운동을 다루게 된다.

앞서 쇄빙선박의 실선계측 자료를 데이터로 정리하였지만 데이터의 분량도 충분하지 않고 질적인 측면에서도 만족스럽지 않은 것이 사실이다. 본 연구에서는 과학적 근거를 갖춘 빙하중 산정 방법을 확보하기 위해서 실측 데이터를 바탕으로 빙하중을 추정할 수 있는 경험식을 도출하고자 한다.

전체 빙하중을 결정하는 데 있어 제일 중요한 요건은 빙판의 파괴모드(failure mode)이다. 선체와 얼음과의 상호작용 모드에 따라서 전체 빙하중 추정 방법을 달리 생각할 수 있다.

먼저 선수부에 작용하는 전체 빙하중을 추정하는 경험식에 대하여 조사하였다.

Johansson et al.(1981)은 Canmar Kigoriak(선수각 $\gamma = 23^\circ$)에 대하여 속도 V (m/s)와 배수량 Δ (천톤)의 함수로 빙하중 추정식을 제안하였다. 이 식은 선수부가 무한 빙판에 정면으로 충돌하는 극한 빙하중을 가정한 것이다.

$$F_{max} = V \Delta^{0.9} \text{ [MN]} \quad (1)$$

Johansson의 추정식은 저속에서는 Canmar Kigoriak의 실선 데이터보다 낮고 고속에서는 실선 데이터보다 높게 계산되는 경향을 보이고 있다. Canmar Kigoriak과는 다른 선형을 가진 선박에 대하여 위식은 $F_{max} = 2.5 V \sin \gamma \Delta^{0.9}$ 의 형태로 수정된다.

Tunik(1982)은 다음 추정식을 제안하였다.

$$F_{max} = 0.65 V^{1.5} \Delta^{2/3} \text{ [MN]} \quad (2)$$

Keinonen(1983)은 역시 Canmar Kigoriak의 실

선 데이터 분석을 통해 다음 추정식을 제안하였다 (Glen et al. 1985).

$$F_{max} = 0.48 V^{1.37} \Delta^{0.9} \text{ [MN]} \quad (3)$$

한편 Daley et al.(1984)는 빙하중 계산 전산 프로그램 "BAFFIN"과 쇄빙선 Polar Sea의 빙하중 데이터를 이용하여 다음과 같은 빙하중 추정식을 제안하였다.

$$F_{max} = 8 (V \cos \gamma)^{4/3} \left(\frac{\Delta}{1 + 2.65 \sin \gamma} \right)^{3/5} \quad (4)$$

Daley의 추정식은 속도가 큰 경우 매우 비현실적인 값이 계산되기 때문에 사용 시 주의가 필요하다.

한편 MV Arctic에 작용하는 빙하중을 추정하기 위하여 1:40 축척의 모형선을 이용한 모형시험이 수행되었는데 선속이 12knots 까지는 전체 빙하중과 선속과의 관계를 다음 식으로 나타낼 수 있다(Daley et al. 1986).

$$F_{max} = 1.132 V^{0.388} \Delta^{0.809} \text{ [MN]} \quad (5)$$

캐나다의 CASPPR(Canadian Arctic Shipping Pollution Prevention Regulations)은 1995년 개정되었는데 여기서 충격쇄빙 시 최대 빙하중으로 다음과 같은 추정식을 제시하고 있다. 여기서 Δ 는 배수량(천톤), P_S 는 축마력(MW)을 나타낸다.

$$F_{max} = 2.6 \Delta^{0.9} [1 + (P_S/\Delta^{2/3})^{1/3}] \quad (6)$$

한편 IACS-UR 규정에 따른 Polar class 쇄빙 LNG선의 개념설계를 수행한 것이 발표되었는데 이때 선체 구조설계를 위해 최대 빙하중을 추정하는 경험식을 제시하였다. 이 식은 Manhattan, MV Arctic, Canmar Kigoriak, Robert LeMeur, Polar Sea 등 5척의 실선 계측자료로부터 유추한 것이다 (Dick et al. 2006).

$$F_{max} = 1.6 V \Delta^{2/3} \text{ [MN]} \quad (7)$$

이상의 빙하중 추정식은 무한히 규모가 큰 얼음과의 충격쇄빙 시 선수부에서의 극한 빙하중을 계산하는 경험식으로 분류할 수 있는데 대체로 극한 빙하중을 선박의 속도와 배수량의 함수로 취급하고 있다.

반면 유한한 크기의 얼음, 빙판의 두께가 얇은 경우라면, 전체 빙하중은 속도와 함께 얼음의 두께 및 굽힘강도로 나타낼 수 있다. Daley et al.(1984)는 Polar Sea의 실선 계측 데이터를 이용하여 전체 빙하중에 대한 추정식을 다음과 같이 제시하였다.

$$F_{max} = 1.29 \rho g h^3 \left\{ \frac{\sigma_f}{\rho g h} \times \frac{V l}{\sqrt{g h}} \right\}^{1.4566} \quad (8)$$

여기서 V 는 선박의 속도, h 는 빙판의 두께, σ_f 는 얼음의 굽힘강도, ρ 는 물의 밀도이다. 그리고 방향여현 l 은 수선면각 α 와 플레어각(flare angle from the vertical) β 의 함수로서 Polar Sea의 경우 $\alpha=30^\circ$, $\beta=54^\circ$ 이고 $l=0.3$ 이다. 이 식에서 전체 빙하중이 $V^{1.4566}$ 에 비례한다는 관계와 함께 전체 빙하중이 $\sigma^{1.4566} h^{0.8151}$ 에 비례한다는 것도 나타내고 있다.

한편 평탄빙에서 굽힘파괴를 일으키는 문제를 빙판의 내하중 능력(bearing capacity)을 계산하여 선박이 받는 빙하중으로 추정하려는 방법도 있었는데 1960대부터 러시아 등지에서는 빙판의 굽힘 파괴 현상을 탄성지지기반 위의 평판의 거동에 관한 이론을 사용하여 해석한 바 있다. 이론적으로 볼 때 무한 빙판에 수직 하중이 작용하는 경우 하중이 증가함에 따라 빙판의 하부에 인장응력이 발생하면서 먼저 반경 방향의 균열이 형성된다. 하중이 더욱 증가하면 굽힘에 의해 빙판의 상부에 인장응력이 발생하면서 두 번째로 원주 방향의 균열이 발생하면서 최종적으로 빙판은 파괴된다. 따라서 빙판이 받을 수 있는 최대 하중은 반경 방향의 균열이 발생 후 생겨난 개별적인 썩기보가 받을 수 있는 최대 하중으로 볼 수 있다.

White(1970)는 수직 방향의 힘 F_V 과 파괴시킬 수 있는 빙판의 최대 두께 h 사이의 관계로 단순보 이론에 의해 다음과 같은 빙하중 추정식을 제안하였다.

$$F_V = 0.425 \sigma_f h^2 \quad [\text{lb}] \quad (9)$$

여기서 σ_f 는 빙판의 인장강도인데, 이식에서는 수직 방향 힘이 파괴되는 빙판의 최대 두께의 제곱에 비례한다는 관계를 주목할 필요가 있다.

이상과 같이 전체 빙하중을 추정하는 경험식에 대하여 정리해 보았지만 어떤 추정식이든 모든 실선 빙하중 데이터를 만족시키는 것은 하나도 없었고 추정식을 도출하는 데 사용된 선박의 빙하중 데이터만을 만족시키는 경우가 대부분이었다. Fig. 3에서 알 수 있는 것은 전체 빙하중과 선박의 충돌 속도와의 연관성이다. 즉 속도가 증가하면 전체 빙하중도 증가한다는 점이다.

Fig. 5에는 실선 빙하중 데이터와 함께 앞에서 정리된 몇 가지 빙하중 추정 경험식을 함께 도시하였다. 전체 빙하중 혹은 극한 빙하중은 속도의 함수이지만 동시에 배수량이나 얼음의 강도 및 두께의 함수이기 때문에 모든 추정식을 동시에 나타내기는 불가능하였다. 추정식에 따라 최대 빙하중 값에 큰 차이가 있음을 알 수 있는데 편차가 심하여 적당한 추정식을 선정하기가 어려운 것이 빙하중과 관련한 일반적인 현상이다. 실선 계측 자료도 그다지 많지 않은데다가 빙하중 추정식 자체가 일부 데이터에만 맞추어 얻어진 경험식이기 때문이다.

본 연구에서는 근래 많은 관심이 모아지는 MV Arctic 빙하중 데이터의 한계치에 대한 회기분석을 통해 간단하고 실용적인 형태로 다음과 같은 전체 빙하중 추정식을 제안하였다 (Fig. 6).

$$F_{\max} = 2.55 V \Delta^{0.4} \quad [\text{MN}] \quad (10)$$

한편 국부 빙압력(local ice pressure)의 경우는

기본적으로 crushing mode를 전제로 하고 있다. 많은 연구자들은 빙압력 계산에 있어서 선박의 속도나 선박의 크기에 따른 차이가 크지 않다고 생각해 왔으며 따라서 대부분의 연구도 평균 빙압력을 접촉면적의 함수로 다루고 있다.

Johansson et al.(1981)은 Canmar Kigoriak호의 데이터를 바탕으로 국부 빙하중의 극한값으로 $p_0 = 3 + 0.85(\Delta P_s)^{1/3}$ 을 제시하였다. Canmar Kigoriak호의 경우 $p_0 = 6.8\text{MPa}$ 이다. 여기서 Δ 는 선박의 배수량(1천톤)이고 P_s 는 선박의 축마력(MW)를 뜻한다. 한편 접촉면적 $A(\text{m}^2)$ 와 국부 빙압력 $P(\text{MPa})$ 와의 관계식을 얻기 위하여 다음 식을 제시하였다.

$$P = p_0 - \frac{p_0 - p_r}{A_r} A \quad (11)$$

여기서 $p_r(\text{MPa})$ 은 기준압력(reference pressure)으로 $p_r = F_{\max}/A_r$ 로 정의된다. $F_{\max}(\text{MN})$ 는 앞 절에서 설명된 선수부에 작용한 전체 빙하중 ($F_{\max} = V \Delta^{0.9}$) 이고 $A_r(\text{m}^2)$ 은 기준 면적으로서 $A_r = [12 F_{\max} + 81]^{1/2} - 9$ 로 정의된다.

핀란드의 VTT(Technical Research Center of Finland 1982)에서는 캐나다의 의뢰를 받아 Canmar Kigoriak호와 MV Arctic호의 빙하중 실선 계측장치를 개발했는데, 이 때 제시된 국부 빙압력과 접촉면적의 관계식은 다음과 같다.

$$P = 4.4 A^{-0.5} \quad \text{for Canmar Kigoriak} \quad (12)$$

$$P = 4.57 A^{-0.35} \quad \text{for MV Arctic} \quad (13)$$

한편 1995년 개정된 CASPPR에 제시된 방법은 최신의 실선 계측자료를 사용하여 국부 빙압력(local ice pressure)과 접촉면적(contact area)의 관계를 경험적으로 결정하는 것이었다. Glen et al.(1985)은 최대 빙하중의 크기 F_{\max} 를 이용하여 국부 빙압력의 경험식을 제시하였다. 여기서 A 는 접촉면

적(m^2)이고 앞 절에서 언급된 F_{max} 는 선박의 속도와 배수량의 함수이다.

$$P = \frac{F_{max}}{A} \left[1 - \frac{1}{1.24 \left(\frac{52A}{F_{max}} \right)^{0.85}} \right] \text{ [MPa]} \quad (14)$$

Masterson and Frederking(1993)은 앞에서 여러 번 언급한 쇄빙선박 Canmar Kigoriak, MV Arctic 실선 빙압력 데이터, 그리고 빙해역 현장 데이터 (Pond Inlet, Hobson's Choice, Resolute Flatjack Tests)를 빙압력-접촉면적의 그래프로 정리하였는데 평균값에 대한 표준편차의 2배를 표시

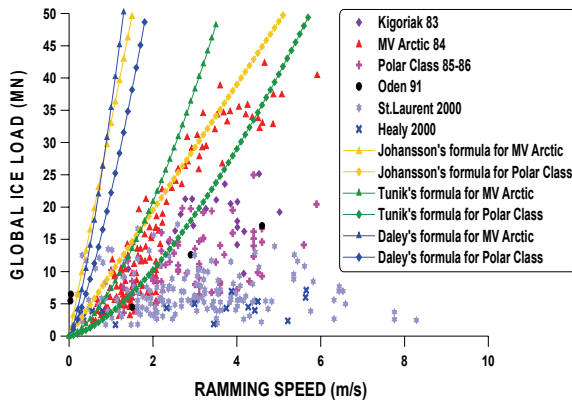


Fig. 5 Global ice loads vs. ship speed data and calculation of global ice load prediction equations

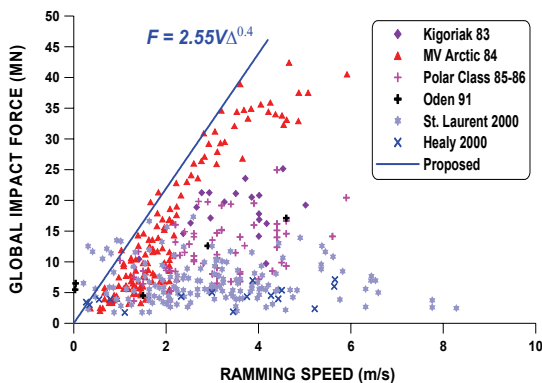


Fig. 6 Global ice loads vs. ship speed data and the proposed global ice load prediction equation

하는 직선의 식을 다음과 같이 나타내었다.

$$P = 8.1 A^{-0.572} \text{ for } A \leq 19m^2 \quad (15)$$

Sanderson(1988)은 선박 및 해양구조물의 빙해역 현장 데이터를 포함하여 실험실에서 수행된 관입(indentation)시험 데이터 등 당시까지 발표된 모든 실험자료를 정리하여 빙압력-접촉면적의 그래프를 작성하였다. 데이터에는 빙해역 현장의 1년생 해빙, 다년생 해빙, 그리고 담수빙도 모두 포함하고 있다. Sanderson은 이 데이터들의 상한선으로 관입압력을 $P = c A^{-1/2}$ 로 표시하였다. 이 상한선이 반드시 설계 빙압력을 나타내는 것은 아니지만 다양한 조건에서의 시험 결과임에도 불구하고 모든 데이터들이 접촉면적의 $-1/2$ 승에 비례한다는 것은 중요한 의미가 있다.

Fig. 7에 실선의 빙압력 데이터와 함께 앞에서 조사된 몇 가지 빙압력 추정식을 함께 도시하였다. 그림에서 국부 빙압력을 접촉면적의 함수로 나타내긴 하지만 접촉면적 이외에도 여러 가지 실험조건에 따라 빙압력이 달라지기 때문에 추정식에 따라 많은 차이가 있음을 알 수 있다.

본 연구에서는 근래 많은 관심을 갖는 MV Arctic과 같은 쇄빙상선의 데이터를 기준으로 다음과 같은 국부 빙압력 추정식을 제안하였다 (Fig. 8).

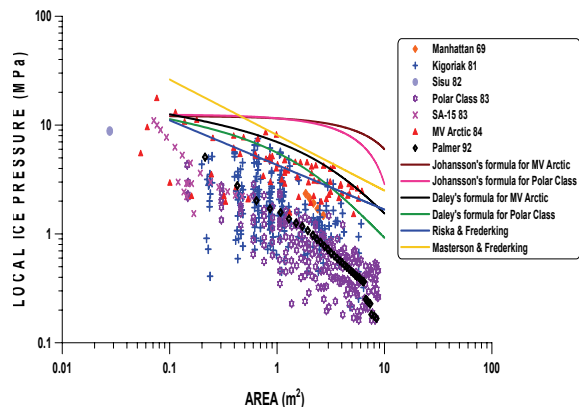


Fig. 7 Local ice pressure vs. contact area data and calculation of several prediction formulas

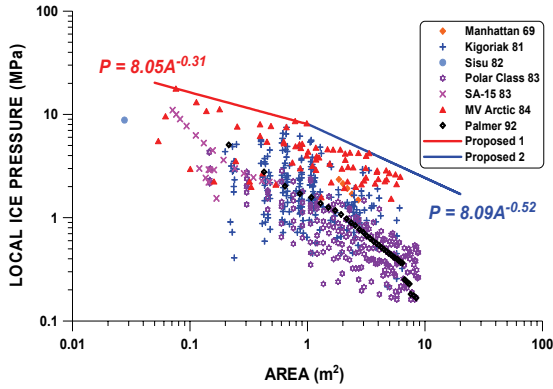


Fig. 8 Local ice pressure vs. contact area data and the proposed local ice load prediction

$$P = 8.05 A^{-0.31} \quad \text{for } A \leq 1\text{m}^2 \quad (16)$$

$$P = 8.09 A^{-0.52} \quad \text{for } A \geq 1\text{m}^2 \quad (17)$$

4 빙하중 추정식 검증

본 연구에서는 기발표된 추정식과 본 연구자가 제안한 빙하중 추정식을 바탕으로 실제 건조된 3척의 쇄빙상선으로, 러시아의 다목적 화물선 SA-15 class, 캐나다의 벌크선 MV Arctic, 그리고 2007년에 국내에서 건조된 북극해용 쇄빙유조선인 Vasily Dinkov 에 적용시켜 빙해역 항행 시 선박이 받게 되는 전체 빙하중과 국부 빙압력을 각각 추정해 보았다.

우선 Table 2에 제시된 선박 정보를 바탕으로 전체 빙하중과 국부 빙압력을 계산한 결과를 Table 3과 Table 4에 정리하였다.

Table 2 Parameters of icebreaking cargo vessels for ice load estimation

	SA-15	MV Arctic	Vasily Dinkov
Δ (10 ³ ton)	25.9	38.5	110.0
P (MW)	15.4	10.9	27
γ (deg)	30	30	35

전체 빙하중의 경우 충돌속도는 빙해역 항행 시 쇄빙선박의 일반적인 운항속도를 고려해 1m/s, 2m/s, 4m/s로 구분하였다. Table 3에서 보면 얼음과의 충돌속도와 선박의 크기가 증가함에 따라 전체 빙하중의 값이 증가함을 알 수 있다. 쇄빙유조선 Vasily Dinkov의 경우 다른 선박과의 현저한 배수량 차이로 인해 상당히 큰 빙하중 값이 계산되었는데, 실제 현장에서 계측된 데이터 범위를 크게 벗어나는 것을 알 수 있다. Fig. 9 ~ Fig. 11에 이 결과를 도시하였다.

Table 3 Global ice load calculation of icebreaking cargo vessels using prediction formulas (in MN)

추정식 \ 선박	SA-15			MV Arctic			Vasily Dinkov		
	1 m/s	2 m/s	4 m/s	1 m/s	2 m/s	4 m/s	1 m/s	2 m/s	4 m/s
Johansson 81	13	33	84	18	46	119	56	144	373
Tunik 82	6	16	46	7	21	59	15	42	119
Keinonen 83	9	23	60	13	33	86	33	85	221
Daley 84	28	71	178	45	113	284	59	149	375
Daley 86	16	21	27	22	28	37	51	66	87
CASPPR 96	68			87			232		
IACS-UR 06	14	28	56	18	36	72	37	73	147
Proposed 07	9	19	37	11	22	44	17	33	67

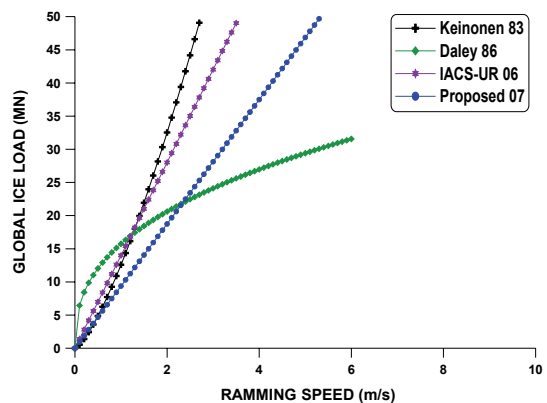


Fig. 9 Comparison of global ice load using 4 different prediction formulas (SA-15 class)

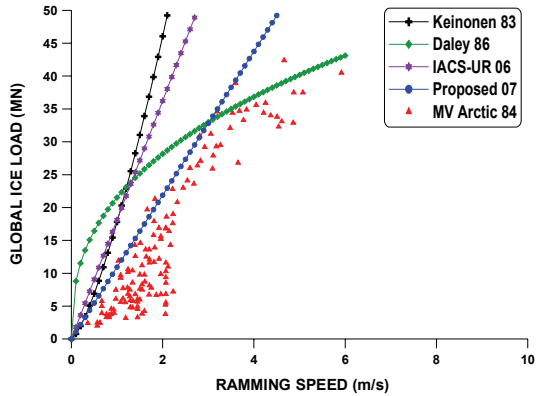


Fig. 10 Comparison of global ice load using 4 different prediction formulas (MV Arctic)

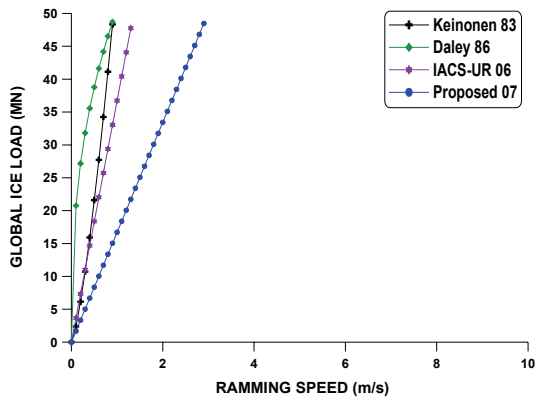


Fig. 11 Comparison of global ice load using 4 different prediction formulas (Vasily Dinkov)

국부 빙압력의 경우 선박의 속도나 선박의 크기에 따른 차이가 크지 않다고 보기 때문에 얼음과의 접촉면적을 고려해 $0.25m^2$, $2m^2$, $4m^2$ 으로 구분하여 국부 빙압력을 계산하였다. 그리고 CASPPR 96의 경우 F_{max} 값은 Daley et al.(1984)에서 계산된 전체 빙하중 값을 이용하여 계산하였다. Table 4에서 보면 국부 빙압력은 예상대로 선박과 얼음의 접촉면적이 커짐에 따라 감소한다는 것을 나타내고 있다. 하지만 선종에 대한 차이는 별로 없이 거의 비슷한 값으로 계산된 것을 알 수 있다.

Table 4 Local ice pressure calculation of icebreaking cargo vessels using ice pressure prediction formulas (in MPa)

추정식	선박	SA-15			MV Arctic			Vasily Dinkov		
		0.25 m ²	2.0 m ²	4.0 m ²	0.25 m ²	2.0 m ²	4.0 m ²	0.25 m ²	2.0 m ²	4.0 m ²
Riska & Frederking 87		5	4	4	5	4	4	5	4	4
Masterson & Frederking 93		18	5	4	18	5	4	18	5	4
CAS-PPR 96	1m/s	12	7	5	13	8	6	14	9	7
	2m/s	14	9	7	15	10	9	16	11	9
	4m/s	16	11	10	18	12	11	18	13	12
Frederking 03		17	5	3	17	5	3	17	5	3
Frederking 05		18	5	3	18	5	3	18	5	3
Frederking & Johnston 05		3	1	1	3	1	1	3	1	1
Proposed 07		12	6	4	12	6	4	12	6	4

5. 결론

이상의 고찰을 통해 빙하중과 빙압력 추정식에 관하여 다음과 같은 결론을 내릴 수 있다.

전체 빙하중 추정 경험식의 경우 조사된 추정식은 빙해역 운항 시 선박의 충돌속도와 배수량, 선수각, 엔진출력 등의 함수로 표현된다. 또한 추정식을 바탕으로 예측한 전체 빙하중은 제안된 식들 간에 상당한 차이가 존재한다. 전체 빙하중 추정식은 배수량이나 선속 등 기본적인 설계변수에 따라 영향을 받기 때문에 선박의 크기에 따른 빙하중 계산이 큰 차이가 있다. 따라서 쇄빙선과 쇄빙상선에 대한 별도의 추정식이 필요하다. 선형과 선체규모에 있어 쇄빙선과 쇄빙상선의 차이는 매우 크고, 대형화된 쇄빙상선에 적용할 수 있는 데이터의 양은 제한적이어서 재래식 쇄빙선 선형의 결과를 쇄빙상선에 일반화하기에는 미흡하기 때문이다.

본 연구에서 제안한 추정식은 여타 추정식 보다 배수량이 추정값에 영향을 미치는 정도를 적게 고려했기 때문에 대형 쇄빙상선의 경우 기존 전체 빙하중 추정식들의 추정값보다 상당히 현실적임을

알 수 있다. 하지만 쇄빙선박의 전체 빙하중 추정에 있어서 아직은 명확한 해법이 존재하지 않으므로 이를 보완하기 위해 좀 더 다양한 크기의 선박에 대해 실측 데이터의 분석이 필요하다.

국부 빙압력 추정 경험식의 경우 대부분이 얼음과의 접촉면적의 함수로써 표현된다. 그리고 지금까지 제안된 추정식들 간에 국부 빙압력 값의 범위는 크게 차이가 없음을 알 수 있다. 이는 국부 빙압력의 경우 전체 빙하중과는 달리 선박의 선수형상, 배수량, 엔진출력 등에 대한 영향보다 빙해역 항행 시 얼음과의 접촉면적이 보다 중요한 문제임을 시사한다.

후 기

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

참 고 문 헌

- Choi, K. and Lee, W.R., 2004, "Estimation of Design Ice Load on Icebreaking cargo Ships in Continuous Action on Level Ice," Proc. of Annual Autumn Meeting, SNAK, Sancheong, pp. 709-712.
- 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 International Conference on Ice Technology (ed. T.K.S. Murthy), pp. 349-363.
- Daley, C., 1994, MSI Ice Loads Data - Compilation of Medium Scale Ice Indentation Test Results and Comparison to ASPPR, Report to National Research Council Canada.
- Dick, R.A., Bell, M.H. and Prior, A., 2006, "A Proposed Icebreaker for Shipping LNG from Canadian Arctic", Proc. of IceTech '06 Symposium, Banff, Canada, Paper No.130-RF.
- 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.M.W., 2003, "Determination of Local Ice Pressures from Ship Transits in Ice," Proc. of the 13th ISOPE Conference, Honolulu, Hawaii, USA, pp. 484-488.
- Frederking, R., 2005, "Local Ice Pressures on the Oden 1991 Polar Voyage," Proc. of the 18th POAC Conference, Potsdam, NY, USA, pp. 353-363.
- Frederking, R. and Johnston, M., 2005, "Local Ice Pressures on the CCGS Terry Fox," Proc. of the 15th ISOPE Conference, Seoul, Korea, pp. 718-723.
- Glen, I.F., Daley, C.G. and Tam, G., 1985, "Analysis of the Structure of the Proposed CCG Polar Class 8 Icebreaker under Extreme Ice Loads," SNAME Transactions, Vol. 93, pp. 283-301.
- ITEP, 2006, Analysis of Industrial Technology Trend in 2006 - Ice Class Ships.
- Johansson, B., Keinonen, A., Mercer, B. and Stubbs, J., 1981, "Technical Development of an Environmentally Safe Arctic Tanker," Proc. of the IceTech '81, SNAME STAR Symposium, 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, WEGEMT, Finland.
- Masterson, D.M. and Frederking, R.M.W., 1993,

"Local Contact Pressures in Ship/Ice and Structure/Ice Interactions," Cold Regions Science and Technology, Vol.21, pp.169-185.

- Rim, C.W. and Lee, T.K., 2007, "Estimation of Ice Load on Bow of a Icebreaking Research Vessel", J. SNAK, Vol. 44, No.5, pp. 509-516.
- Riska, K. and Frederking, R, 1987, Modelling Ice Load during Penetration into Ice - Ice Load Penetration Model Report 2, Joint Research Project, NRC and TRC of Finland.
- Sanderson, T.J.O., 1988, Ice Mechanics - Risks to Offshore Structures, Graham & Trotman, London.
- Tunik, A.L., 1982, "Ultimate Safe Conditions for Ship's Operation in Ice," Proc. SNAME Arctic Section, Calgary.
- White, R.M., 1970, "Prediction of Icebreaker Capability," The Royal Institution of Naval Architects, Vol. 112, pp. 225-251.



< 최 경 식 >



< 정 성 엽 >