

쇄빙선박에 작용하는 빙하중 실측 데이터

최경식, 정성엽(한국해양대학교 해양개발공학부)

1. 서론

국내 조선사의 추정에 따르면 국제 원유/천연가스 가격의 상승으로 오는 2012년까지 쇄빙유조선 40척 가량이 발주될 것으로 보고 있다. 또한 극지용 선박 시장은 쇄빙유조선 외에 쇄빙LNG선, 쇄빙컨테이너선 등으로 확대될 전망이다.

1980년대 후반부터 국내 조선사들은 북유럽의 발틱해나 바렌츠해를 운항하는 Sub-Arctic Class (1A 혹은 1A Super Class) 내빙선박을 건조한 경험을 갖고 있으며 최근 들어서는 북극해를 단독으로 운항할 수 있는 본격적인 Arctic Class 유조선이나 일반 화물선도 건조하기 시작하였다. 예를 들어 삼성중공업은 러시아 최대 국영해운사인 소브코플로트(Sovcomflot) 사로부터 7만 톤급 극지운항 쇄빙유조선 3척을 수주하여 2007년에 1호선을 건조한 바 있다. 현재 국내 조선사가 수주하는 선박의 약 25%는 빙해역에서 운항할 수 있는 Ice Class 선박이며 이 비율은 계속 증가하고 있는 추세이다 (한국산업기술평가원 2006).

국내 조선사에서 필요로 하는 쇄빙선박의 요소 설계기술에는 쇄빙선형, 선체구조, 추진기관 선정과 관련된 여러 가지 사항을 생각할 수 있다. 이와 관련하여 쇄빙선박에 작용하는 빙하중 산정의 문제는 현재 대부분의 국내 조선사에서 고민하고 있는 주제로서 선박의 운항 조건에 따른 정확한 빙하중의 크기를 알아야만 선체구조와 선형, 출력기관의 선정 등이 순차적으로 결정되기 때문이다.

현재 조선 현장에서는 수주한 쇄빙선박 건조 시

러시아나 핀란드 등 해당 선급의 규정을 일방적으로 따라가고 있는 것으로 판단된다. 최근 개정된 이들 선급규정은 과거의 부정확한 규정을 많이 수정 보완하였다. 그렇지만 축적된 경험에 근거하긴 했어도 일부는 명확한 근거가 없이 과도한 설계조건을 조선사들에게 요구하고 있다고 판단된다.

빙하중은 파랑하중이나 슬래밍(slamming)에 의한 힘보다 월등히 크기 때문에, 많은 경우 빙해역에서는 파랑하중의 크기는 별로 고려하지 않고 빙하중만을 주요 설계변수로 취급하고 있다. 하지만 선체가 받는 빙하중을 추정한다는 것은 상당히 어려운 작업으로 무엇보다도 선체와 얼음 사이의 상호작용에 대한 이해가 필수적이며 아직까지도 빙하중 산정에 대한 명확한 해결 방법은 제시할 수 없는 현실이다. 빙하중을 이해하는 가장 좋은 방법은 빙해역에서 실선을 이용해 직접 계측하는 일이다. 하지만 경제적인 측면과 함께 선체 광범위한 부분에 작용하는 빙하중의 크기와 분포를 파악하는 데 많은 기술적인 문제가 남아 있다.

쇄빙선박이 받는 빙하중에 대하여 이해하기 위해서 먼저 선박의 추력(thrust) 개념으로 보는 빙저항(ice resistance)과, 선체구조가 손상을 입지 않는 한도 내에서 지탱해야 할 빙하중(ice loads)이란 개념을 구별해야 한다. 통상 쇄빙성능의 척도로 말하는 것 중 하나로 두께 1m 얼음에서 3knots의 속도로 연속쇄빙 할 수 있다는 뜻은 선체가 손상을 입지 않고 견딜 수 있는 최대 빙하중의 관점이 아니라, 선



박이 빙판을 깨뜨리며 일정하게 전진하기 위해 필요한 추진기관의 출력을 정하기 위한 빙저항의 관점에서 보는 것이다. 빙저항 계산에서는 선체를 강제로 취급하며 선체구조의 변형은 생각하지 않는다.

선박의 추력이 수평 방향의 빙저항 성분보다 충분히 큰 경우 선박은 균일한 두께의 평탄빙에서 연속쇄빙이 가능하다. 반면 바람과 해류 등에 의해 얼음이 겹쳐 쌓인 두꺼운 빙맥(ice ridge)을 만나면 연속쇄빙은 불가능하고 후진, 전속력 충돌, 후진을 반복하는 충격쇄빙(ramming)이 행하여진다. 통상 충격쇄빙에서 최대 빙하중이 예측된다. 개수로(open sea) 또는 유빙(pack ice) 상태에서 만나게 되는 대형 빙반(ice floe)과 빙산(iceberg)의 경우는 비교적 빠른 속도로 선박이 충돌하는 문제로서 선체에는 대단히 큰 빙하중이 작용하게 된다.

따라서 빙저항을 추정하는 문제라면 특정 두께의 빙판을 특정 속도로 쇄빙한다는 것이 의미가 있으나 빙하중을 다루는 차원에서는 그렇지 않다. 쇄빙선박이 빙판을 깨뜨릴 수 있는지 아닌지에 관계없이 선체는 빙하중을 받게 되며, 극한 빙하중(extreme ice load)은 보통 얼음이 깨지지 않았을 경우에 발생한다. 그리고 이때 얼음의 종류도 특정 두께의 빙판을 뜻하는 것이 아니라 빙산이나 빙맥, 두꺼운 평탄빙 등 선박이 만날 수 있는 모든 종류의 얼음이 극한 빙하중의 대상이 된다.

본고에서는 쇄빙선박에 작용하는 빙하중 문제를 이해하기 위하여 기 발표된 문헌과 자료로부터 빙하중 실선 계측 데이터를 수집 정리하였다. 이를 통해 빙해역 선규규정의 이론적인 근거를 파악하고 쇄빙선박에 사용되는 빙하중 추정식을 제안할 수 있는 근거를 마련하였다.

2. 전체 빙하중과 국부 빙하중

선체구조에 작용하는 빙하중을 이해하기 위해서는 먼저 전체 빙하중(global ice loads)과 국부 빙하중(local ice loads)을 구별할 필요가 있다. 이것은

기본적으로 선체와 얼음과의 접촉면적에 따른 구분 이긴 하지만, 한편으로는 이들 하중을 받았을 때 선체구조의 거동을 구분하는 방법이기도 하다. 즉 국부 빙하중은 선체 외판 및 그 주변 부재에 직접 작용하여 구조 손상을 유발시키며 전체 빙하중은 선체 전체를 하나의 구조부재로 보고 선체의 종강도나 선체운동을 다루게 된다.

실험실에서의 얼음은 압력 10-20MPa 에서 파괴되지만 현장 계측에서는 얼음이 약 3MPa 이내에서 파괴된다. 쇄빙선박에서 실측된 국부 빙하중 데이터를 보면 빙압력(ice pressure)은 측정 부위의 면적에 크게 좌우된다. 즉 접촉면적이 넓을수록 빙압력은 낮아진다 (Sanderson 1988).

충격쇄빙 과정에서 선체의 거동과 빙하중의 변동 상황을 Fig. 1에 개략적으로 나타내었다. 처음 선수부가 얼음과 부딪히는 순간부터 충격에 의한 빙하중의 세기는 급격하게 높아지기 시작하며 이 단계는 선수부가 얼음 위로 미끄러져 올라가기 시작하는 순간까지 지속된다. 주로 선수부에 극한 빙하중이 발생하는 이 단계는 지속시간이 0.5초에서 1초 이내의 짧은 시간에 발생하는 동적 프로세스라고 할 수 있다. 그 사이에 선박의 전진속도는 감소하며, 선수부가 얼음 위로 밀려 올라감에 따라 대신 수직속도 성분이 최대에 이른다. 얼음과 선체와의 접촉면적도 점차 커져 최대치에 이른다. 이때 얼음의 파괴는 압축(crushing) 모드에 의한 것이다.

선수부가 얼음 위로 올라가면서 선박의 속도는 점차 감소하다가 ice knife에 얼음이 걸리면서 정지 상태에 이르고 선체는 또 다른 peak 빙하중을 맞이하게 된다. 이때 전체 빙하중의 크기는 초기 충격단계에서 맞게 되는 빙하중 수준에 버금가지만 지속시간이 2-3초 이상으로 비교적 길어서 정적 혹은 준정적(quasi-static)인 프로세스로 취급할 수 있다. 이때 얼음의 파괴는 기본적으로 굽힘(bending) 모드에 의한 것이다.

3. 빙하중 시나리오

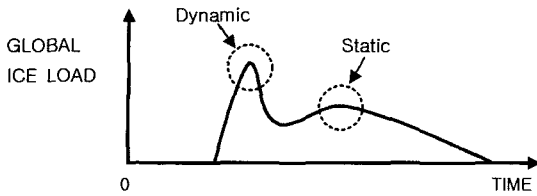


Fig. 1 Characteristics of global ice load history on ship's bow

빙해역에서 선박이 받게 되는 빙하중은 얼음의 파괴모드 및 파괴강도, 선체의 크기와 형상, 속도 및 운항 방식에 따라 다르게 결정된다. 통상 쇄빙 선박은 다음과 같은 몇 가지의 운항 방식에 의해 빙해역을 통과한다.

- 평탄빙에서의 연속쇄빙
- 두꺼운 빙맥에서의 충격쇄빙
- 유도쇄빙선 후방의 넓혀진 수로 내에서의 운항 (motion in broken channel)
- 유빙군 내에서 운항 (motion in drifting ice field or open pack ice)

Table 1에 선박이 운항 중 만나게 되는 다양한 빙상상태에서 고려해야 할 여러 가지 상호작용 모드를 정리하였다. 그리고 Table 2에는 얼음의 파괴모드와 그에 따른 빙하중 추정 방법에 영향을 주는 얼음과 선박의 파라미터를 정리하였다. 그러므로 Table 1과 Table 2의 조합에 따라 다양한 빙하중 시나리오를 도입할 수 있다.

선체가 받는 빙하중은 충격쇄빙(ramming)에 의해 선수부가 가장 큰 하중을 받게 되며 시간이 지나면 선체가 얼음 위에 올라 좌초된 상태에서 선체 중앙부가 큰 하중을 받게 되며(beaching), 선체의 측면 부위는 외판이 빙판 사이에 끼어 압축을 받게 되는 경우(jamming)가 주로 문제가 된다.

평탄빙에서의 연속쇄빙은 빙해역 항행 시 가장 흔하게 겪게 되는 운항 방식이지만 빙하중의 크기가 대체로 작기 때문에 큰 주의는 요구되지 않는다.

Table 1 Ice conditions and various ice-ship interaction modes

Ice Condition	Characteristics	Interaction Modes
Level Ice	10/10, FY	C, R, S, B
Ice Ridges	single or multiple FY or MY	R, S, B
Rubble Fields	grounded or floating	R, S
Iceberg	single	R, S
Ice Floes	single or multiple, FY	C, R, S, B
Pack Ice		
1) very close pack ice	9/10 - 10/10	C, R, S
2) close pack ice	7/10 - 8/10	C, R, S
3) open pack ice	4/10 - 6/10	C, S
4) very open pack ice	1/10 - 3/10	C, S
5) open water	< 1/10	
Brash Ice	consolidated or loose	C, S
Remarks	Ice Concentration [0/10 - 10/10] FY: First-year Ice MY: Multi-year Ice	C: Continuous icebreaking R: Ramming S: Side hull compression B: Beaching on ice

발틱해와 같이 광범위한 평탄빙 해역에서는 연속쇄빙 시의 빙하중이 중요하지만 대부분의 빙해역에서는 불규칙하고 두꺼운 빙판이나 빙맥도 만나게 되므로 ramming과 beaching 그리고 jamming에 의한 빙하중 산정을 우선적으로 고려한다.

4. 실선의 빙하중 계측자료

실선 빙하중 계측자료가 공개된 선박의 제원과 빙하중 데이터의 출처에 대하여 Table 3에 정리하였다. Table 3에 언급된 쇄빙선박의 빙하중 데이터를 전체 빙하중과 국부 빙압력으로 나누어 정리하였다. 서로 다른 빙상조건과 서로 다른 선종의 계측 자료



Table 2 Various ice and ship parameters needed to determine ice failure modes and ice loads

Ice Properties	Ship Properties	Ice Failure Modes
Ice Sheet	Ship Speed Displacement Length Breadth Depth/Draft Hull Form/Lines Engine Power	Crushing Bending Buckling Spalling/Shear Failure Circumferential and Radial Cracking Creep
Thickness		
Flexural Strength		
Crushing Strength		
Ice Density		
Young's Modulus		
Poisson's Ratio		
Friction Coefficient		
Temperature		
Grain Size and Orientation		
Salinity		

로부터 빙하중에 관해 필요한 지식을 이끌어 내기 위해서는 모든 정보가 공통된 형식의 데이터베이스로 구성되어야만 가능한데, 지금까지 수집된 빙하중 계측 자료는 계측 시의 환경조건과 계측 방법이 제각기 달라 공통적인 요소를 찾기는 어렵다.

4.1 전체 빙하중 (Global Ice Load)

전체 빙하중 데이터는 대부분의 문헌에서와 마찬가지로 1차적으로 선박의 속도에 대한 함수로 정리되었다 (Fig. 2 - Fig. 7). 여기서는 앞서 언급된 여러 선박의 실측 자료 중에서 전체 빙하중과 충돌속도의 관계로 나타낼 수 있는 6척의 대표적인 자료만을 선택하여 동일한 척도(scale)와 단위(unit)로 표시하였다. Fig. 8은 이들 개별 쇄빙선박의 전체 빙하중 실측 데이터를 모두 종합한 것이다.

선체에 작용하는 전체 빙하중은 얼음의 두께와 강도, 얼음의 크기, 온도 등 빙상환경에 관련된 요소, 선박과 얼음의 상대속도, 선박의 크기와 선형 등 선박의 형상에 관한 요소에 의해 결정되는데, 빙저항과는 달리 쇄빙선박이 빙판을 깨뜨릴 수 있는

Table 3 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 1983, 84
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

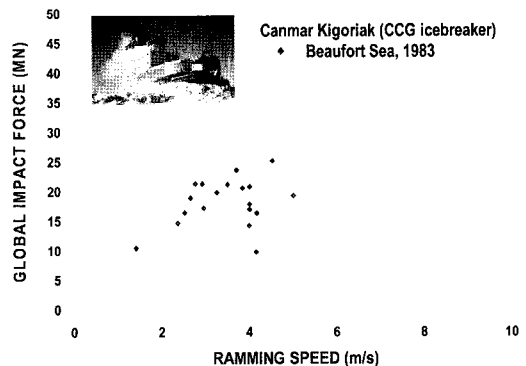


Fig. 2 Global ice loads vs. ship speed for Canmar Kigoriak (Ghoneim et al. 1984)

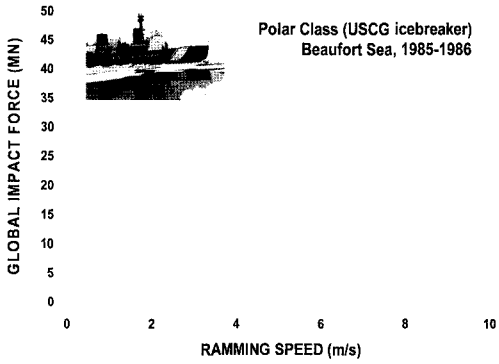


Fig. 3 Global ice loads vs. ship speed for Polar class icebreakers (Minnick et al. 1990)

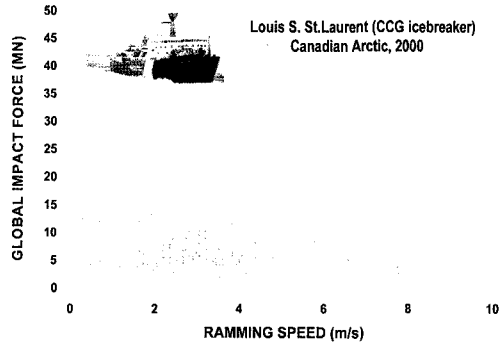


Fig. 6 Global ice loads vs. ship speed for icebreaker Louis S. St. Laurent (Johnston et al. 2003)

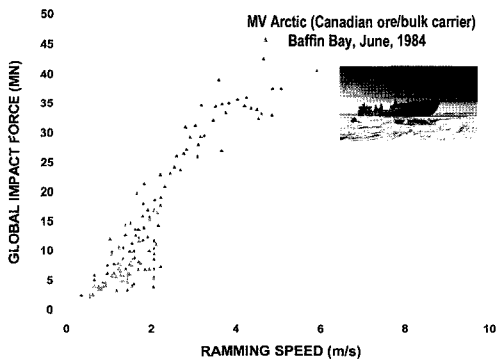


Fig. 4 Global impact forces vs. ship speed for MV Arctic (Daley 1986, Masterson and Frederking 1993)

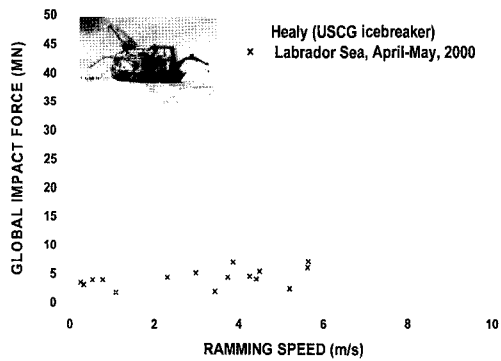


Fig. 7 Global ice loads vs. ship speed for icebreaker Healy (Johnston et al. 2003)

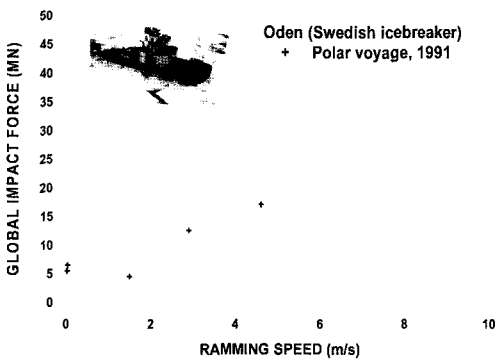


Fig. 5 Global ice loads vs. ship speed for Swedish icebreaker Oden (Frederking 1999, 2005)

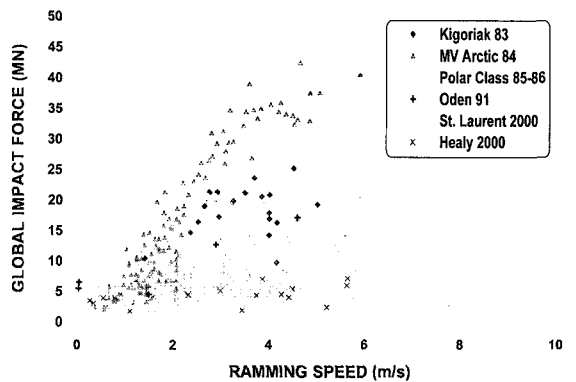


Fig. 8 Global ice loads vs. ship speed for six icebreaking vessels



지 아닌지에 관계없이 선체는 빙하중을 받게 되며, 그 최대값이 극한 빙하중으로서 보통 얼음이 깨지지 않았을 경우에 발생한다.

따라서 최대 충격 빙하중 혹은 극한 빙하중은 큰 규모의 얼음에 선박이 충격쇄빙을 하게 되는 경우에 발생되는 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 또한 중요한 요소가 된다.

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 그다지 많지 않았을 것이며 오히려 구조 강도상 충분히 여유가 있는 정상적 운항 상태에서의 계측자료라 보아야 할 것이다. 바로 이 점을 염두에 두고 수집된 전체 빙하중 자료를 이해할 필요가 있다.

4.2 국부 빙압력 (Local Ice Pressure)

국부 빙압력 데이터는 대부분의 문헌에서와 마찬가지로

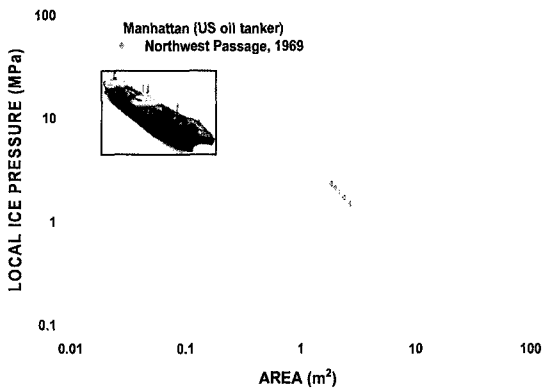


Fig. 9 Local ice pressure vs. contact area for US oil tanker Manhattan (St. John et al. 1990)

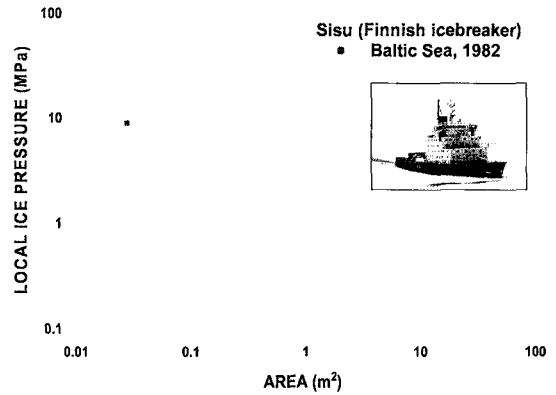


Fig. 10 Local ice pressure vs. contact area for Finnish icebreaker Sisu (St. John et al. 1990)

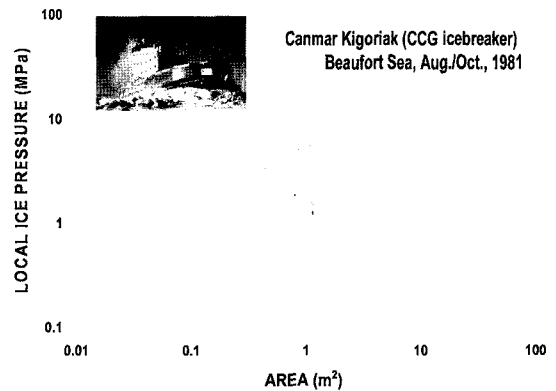


Fig. 11 Local ice pressure vs. contact area for Canmar Kigoriak (Daley 1994)

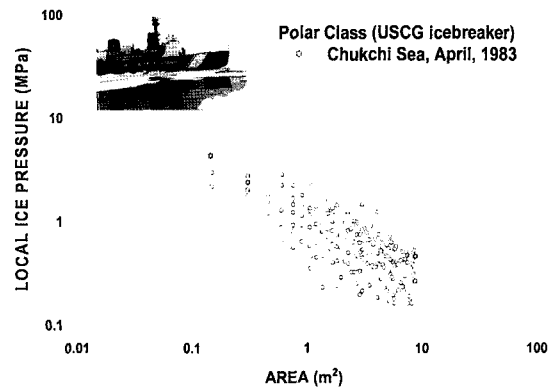


Fig. 12 Local ice pressure vs. contact area for Polar class icebreakers (St. John et al 1990, Daley 1994)

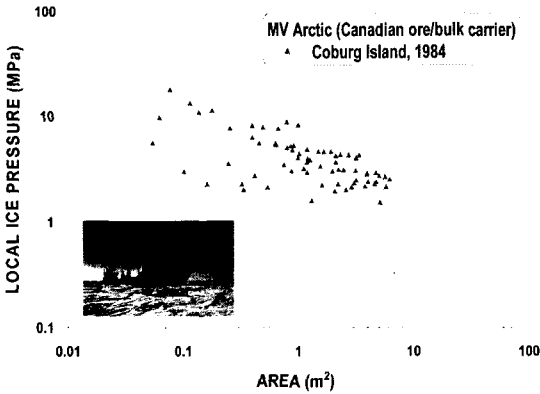


Fig. 13 Local ice pressure vs. contact area for 1984 MV Arctic (Daley, 1994)

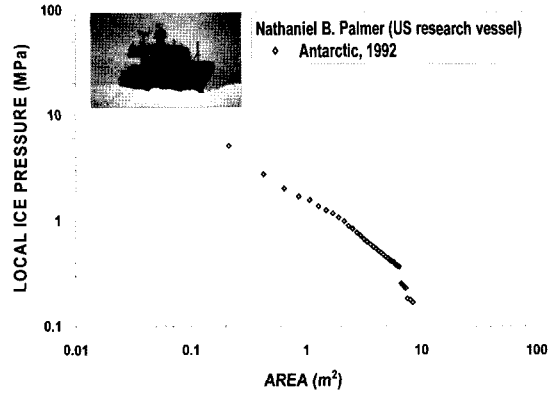


Fig. 15 Local ice pressure vs. contact area for Nathaniel B. Palmer (St. John and Minnick 1995)

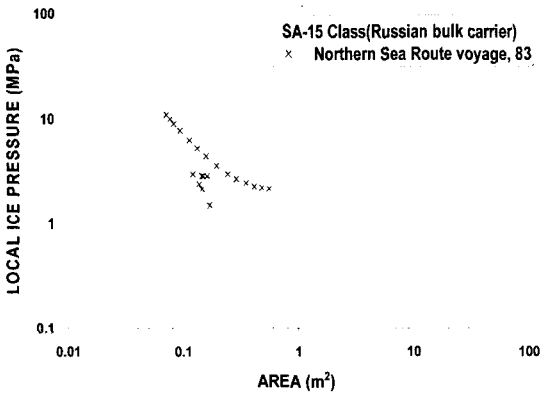


Fig. 14 Local ice pressure vs. contact area for SA-15 class ships (Tsoy et al. 1998)

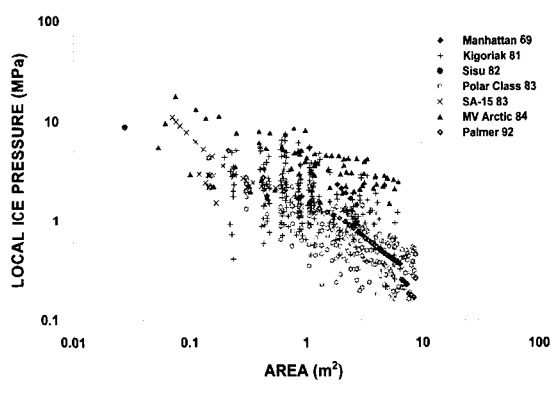


Fig. 16 Local ice pressure vs. contact area for icebreaking vessels

가지로 1차적으로 접촉면적에 대한 함수로 정리되었다 (Fig. 9 - Fig. 15). 여기서는 앞서 언급된 여러 선박의 실측 자료 중에서 국부 빙압력과 접촉면적의 관계로 나타낼 수 있는 7척의 대표적인 자료만을 선택하여 동일한 척도(scale)와 단위(unit)로 표시하였다. Fig. 16은 이들 개별 쇄빙선박의 국부 빙압력 실측 데이터를 모두 종합한 것이다.

국부 빙압력 실측 데이터 역시 전체 빙하중과 마찬가지로 서로 다른 빙상조건과 서로 다른 선종의 계측 자료로부터 공통된 요소를 찾기가 어렵지만 대부분의 빙압력 데이터는 접촉면적의 함수로 제시

되어 있어 빙압력과 접촉면적의 관계를 가지고 서로 비교할 수 있다. 여기서 수집된 국부 빙압력에 관한 일부 데이터로 판단할 때 빙압력도 전체 빙하중과 같이 속도와 어느 정도 관련이 있다고 보이지만 모든 경우에 적용할 결론으로 볼 수는 없다. 또한 얼음의 강도 역시 빙압력을 결정하는 중요한 요소임에는 틀림없으나 서로 비교할 수 있는 공통된 자료는 매우 부족하다.

5. 결론

이상 빙하중과 빙압력 실측 데이터 분석을 통하

여 다음과 같은 결론을 내릴 수 있다.

먼저 쇄빙선과 쇄빙상선에 대한 별도의 추정식이 필요하다. 그 이유는 선형과 선체규모에 있어 쇄빙선과 쇄빙상선의 차이는 매우 크고, 대형화된 쇄빙상선에 적용할 수 있는 데이터의 양은 제한적이어서 재래식 쇄빙선 선형의 결과를 쇄빙상선에 일반화하기에는 미흡하기 때문이다.

둘째로 쇄빙선박에 대한 추가적인 실측 데이터 확보가 중요하다. 확률적 접근법이나 Risk Analysis를 위해서는 장기적인 실측 데이터 확보가 절대적으로 필요하기 때문이다. 이를 위하여 현재 국내에서 건조 중인 쇄빙연구선이나 쇄빙상선의 건조 단계에서 향후 시운전이나 실선 운항 시 빙하중 데이터를 수집할 계획이 사전에 수립되어야 할 것이다.

셋째, 실측 데이터의 분석과 함께 방-구조물 상호작용 수치 시뮬레이션 모델링을 병행할 필요가 있다.

참고문헌

1. 한국산업기술평가원, 2006, 2006년도 산업기술동향분석 - 빙해(Ice Class) 선박.
2. 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.
3. 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.
4. 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, pp.349-363.
5. Daley, C., 1994, MSI Ice Loads Data - Compilation of Medium Scale Ice Indentation Test Results and Comparison to ASPPR, Report submitted to National Research Council Canada.
6. Frederking, R., 1999, "The Local Pressure-Area Relation in Ship Impact with Ice", Proc. of the 15th POAC Conference, Helsinki, Finland, pp.687-696.
7. Frederking, R., 2005, "Local Ice Pressures on the Oden 1991 Polar Voyage", Proc. of the 18th POAC Conference, Potsdam, NY, USA, pp.353-363.
8. 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.
9. 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.
10. 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.
11. Minnick, P., St. John, J., Cowper, B. and Edgcombe, M., 1990, Global Ice Forces and Ship Response to Ice, Report No. SSC-341, Ship Structural Committee.
12. Sanderson, T.J.O., 1988, Ice Mechanics - Risks to Offshore Structures, Graham & Trotman, London.
13. St. John, J.W., Daley, C. and Blount, H. 1990, Ice Loads and Ship Response to Ice - Summer 1982/Winter 1983 Test Program, Report No. SSC-329, Ship Structural Committee.
14. St. John, J.W. and Minnick, P.V., 1995, Ice Load Impact Study on the National Science Foundation's Research Vessel Nathaniel B. Palmer, Report No. SSC-376, Ship Structural Committee.
15. Tsoy, L.G. et al., 1998, Collection of SA-15 Operations Data, INSROP Working Paper 107. ⚓

최 경 식 | 한국해양대학교 해양개발공학부 교수



- 1957년생
- 1989년 M.I.T 공학박사
- 관심분야: 극지공학: 쇄빙선박과 극지용 해양구조물
- E-mail: kchoi@hhu.ac.kr

정 성 엽 | 한국해양대학교 해양개발공학과 박사과정



- 1981년생
- 2008년 한국해양대학교 공학석사
- 관심분야: 극지공학: 빙하중 계측과 수치 모델링
- E-mail: jsyeop81@hhu.ac.kr