

쇄빙 과학조사선 선수부에 작용하는 빙하중 추정

임채환^{†*}, 이탁기^{*}

한국기계연구원 시스템엔지니어링연구본부^{*}

Estimation of Ice Load on Bow of a Icebreaking Research Vessel

Chae-Whan Rim^{†*} and Tak-Kee Lee^{*}

Korea Institute of Machinery & Materials^{**}

Abstract

Ice load acting on a icebreaking research vessel is estimated. Existing measured ice loads are used to get the global load and the local load. The global load is for analyzing the bending behavior of the vessel during ice breaking operation mode and the local load for estimating the bow structural behavior. In the paper, the global load is predicted using the data from analysis of ship motion during ice breaking. And the local load is predicted using the data from strain gage attached to bow frames.

※Keywords: Icebreaker(쇄빙선), Ice load(빙하중)

1. 서언

쇄빙선에 작용하는 하중을 정확하게 추정할 수 있는 일반적인 방법은 아직 이론의 여지가 많다. 본 논문에서는 구조해석을 위한 하중을 추정하기 위하여 쇄빙선의 실선계측 자료를 이용하였다. 그러나 쇄빙선의 빙하중 계측 자료가 많지 않고 이들 계측 자료마저도 데이터의 분석에 따라 여러 가지의 하중 예측 방법이 제시되어 있는 실정이다.

본 논문에서는 최근 분석된 CCGS Louis S. St-Larent호의 계측 데이터를 이용하여 조사선에 작용하는 선수부 빙하중과 국부 압력을 추정하였다.

대상 선박은 해양수산부가 개발하는 7,000톤급 해양과학 조사선이다. 해양과학 조사선은 남북극을 향해 하면서 해양과학 조사와 극지기지의 보급 물자 수송 등 연구지원 활동을 하여야하기 때문에 쇄빙기능이 필수적이다. 해양과학 조사선은 한국 선급규정에 따라 설계 되었으며 빙하중의 영향을 받는 부분에 대해서는 DnV의 POLAR-10 규정에 따라 설계 되었다.

접수일: 2007년 2월 21일, 승인일: 2007년 10월 3일

† 교신저자: cwrim@kimm.re.kr, 042-868-7415

2. 실선 계측 자료

쇄빙선에 작용하는 빙하중은 선체 전체의 거동 해석을 할 수 있는 전체 빙하중(global ice load)과 국부 구조의 거동해석을 할 수 있는 국부 빙하중(local ice load)으로 나눌 수 있다.

쇄빙선체에 작용하는 빙하중 계측은 계속 이어져 왔지만 본격적으로 시작된 것은 최근의 일이다. 빙하중 계측은 1960년대 러시아에서 시작되었으며 1970-90년대에는 미국과 캐나다에서 일반 쇄빙선, USCGC Polar Sea, 쇄빙연구선 Polarstern호 등에 대한 계측을 하였다. 핀란드에서는 1980-90년대에 걸쳐 쇄빙선 Sisu호와 Chemical tanker Kemira에 대한 계측을 하였다. 그리고 이들 계측 데이터의 분석은 주어진 시간에 대하여 극하중(extremal load)의 굼벨분포(Gumbel Distribution)에 대하여 집중되었다.

최근의 계측으로서는 1998년 4월-5월에는 M/T Ujku호에 43 채널의 스트레인게이지를 부착하여 Murmansk를 출발하여 Kara Sea까지 왕복하는 동안 빙하중을 측정하였다. 계측된 하중은 선수에서 2200kN/m, 어깨부근(shoulder) 부근에서 2900kN/m이었다. 이 데이터는 추후 장단기 빙하중 모니터링 프로그램 개발에 사용되었다(Kujala 1999, Hanninen and Lensu 2002).

USCGC Healy호의 빙하중이 2000년 4월과 5월에 캐나다의 데이비스 해협(Davis Strait)과 배핀만(Baffin Bay) 해역에서 계측되었다. 이 계측은 길이방향으로 4m 정도의 범위에 있는 10개의 횡프레임에 스트레인 게이지를 부착하여 선수 어깨부위의 빙하중을 계측하는 것이었다. 이 데이터는 얼음 두께, 선속, 운항 모드 등을 기본정보로 하여 주어진 채원주기에서의 최대 빙하중을 추정하는 데이터로 사용되었다(Hanninen et al. 2001).

계측 데이터를 분석한 결과 각 프레임에 작용하는 빙하중들의 상관관계(correlation)는 인접한 2-3개의 프레임에서 강하게 나타나고 멀어 질수록 약해진다고 나타났다. 또한 중요한 결과로서 계측 결과 각 프레임에 같은 시간에 작용하는 하중을 합하여 계산한 최대 패널하중은 빙하중이 작용하는 프레임 수에 큰 관계가 없이 일정하다는

것이다. 다시 말하면 길이당 최대 패널하중(q_{max})은 하중길이(L)에 반비례한다($q_{max} \sim 1/L$)는 것이다. 이와 더불어 최대 패널 압력(p_{max})도 작용면적(A)에 반비례 하는 것으로 나타났다($p_{max} \sim 1/A$).

Johnston et al.(2003-1)등은 운동계측시스템 MOTAN을 이용하여 쇄빙선 선박에 작용하는 전체 빙하중을 계측하였다. 선체는 강체라 가정하고 선체운동계측시스템 MOTAN을 이용하여 6자유도의 선체운동을 계측하였으며 이 운동을 이용하여 선체가 얼음과 충돌할 때 발생하는 각 방향별 하중을 계산하였다. 이 시스템을 CCGS Louis S. St. Laurent호에 설치하여 2000년 10월 캐나다 극해(75N, 93W)에서 항해하는 동안 운동을 계측하여 약 200여개의 충격하중 자료를 수집하였다. 전체 빙하중은 3방향 하중의 합으로 추정하였으며 그 결과 Fig. 1에 보인 것 같이 이 합력의 대부분의 크기는 수직방향으로 밝혀졌다. 추정된 하중의 크기는 5.7-17.3MN이며 선속은 1.4-10.9kt이다(Fig. 2 참조). 그리고 2년생 빙과 다년생 빙 구역에서 충돌운항(ramming operation) 할 때 여러 차례의 충격하중이 기록되었으며 이 충격하중의 최대하중은 17.3MN이다. Fig. 2에 의하면 거친 다년생 빙(Rough MYI)에 의한 하중은 2년생 빙맥(Ridged SYI)에 의한 하중과 거의 비슷한 수준임을 보여주고 있으며, 전체 하중과 선속과의 관계는 특정한 경향을 나타내지 않는다는 것을 보여주고 있다.

위의 MOTAN 시스템을 이용하여 Johnston et al.(2003-2)은 USCGC Healy호와 또 다른 항해에서의 CCGS Louis S. St-Laurent호의 전체 빙하중 계측데이터를 분석하였다. Healy호는 주로 1년생 평탄빙이나 1년생 빙맥(level or ridged first-year ice(FYI))에 의한 결과이고 Louis호는 중간-두꺼운 두께의 2년생 빙(medium to thick second-year(SYI)) 또는 다년생 빙(multi-year ice(MYI))에 의한 결과이다. 두꺼운 1년생 빙을 쇄빙할 때 Healy호와 Louis호는 거의 비슷한 하중 수준을 보인다(Fig. 3). 또한 전반적으로 Healy호와 Louis호에서의 1년생 빙에 의한 하중은 1.7-7.0MN 범위에 있으며 이때의 선속은 최대 11kt이다.

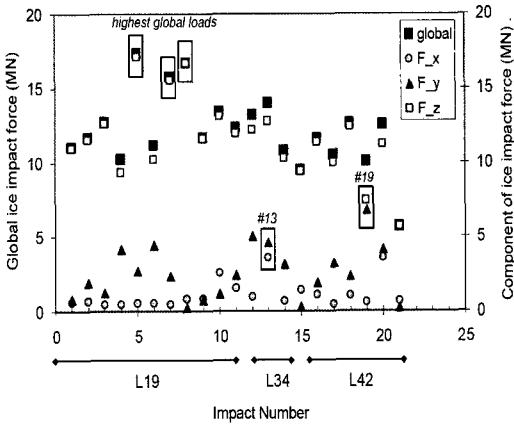


Fig. 1 Components of ice global load (Johnston et al. 2003-1)

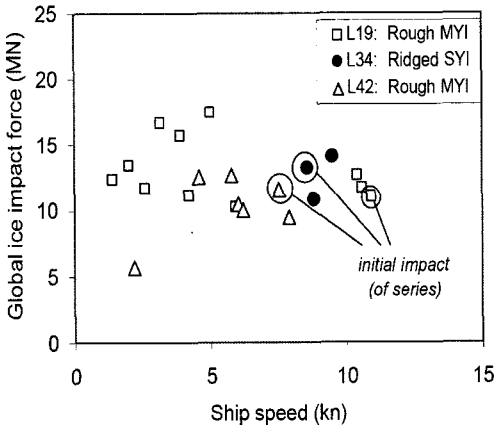


Fig. 2 Global ice load versus ship speed (Johnston et al. 2003-1)

늦겨울의 2년생 빙과 다년생 빙에 의한 전체하중은 1.9-17.3MN이고 선속은 0.6-16.6kt이다 (Fig. 4). 그림에서 보면 분포가 상당히 흩어져 있으나 두꺼운 2년생 빙에 대해서는 선속이 증가함에 따라 하중이 증가하는 것으로 보인다. 그러나 다년생 빙의 경우는 그러한 경향은 보이지 않는다. 그리고 중간 두께의 2년생 빙에서는 오히려 감소하는 경향이 보인다.

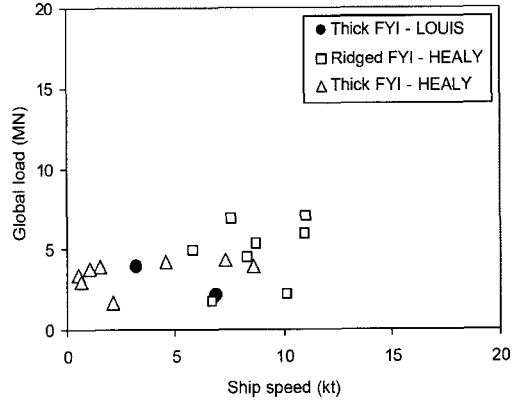


Fig. 3 Global ice loads of first-year ice on the Healy and Louis (Johnston et al. 2003-2)

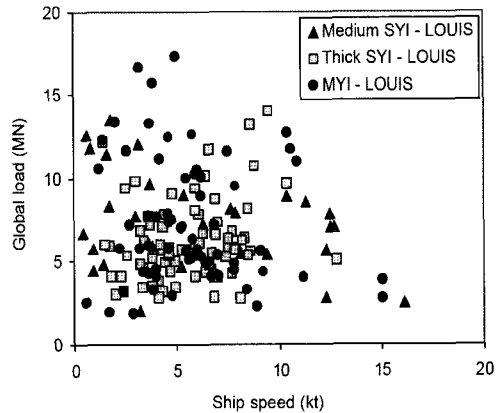


Fig. 4 Global ice loads of second-year ice on the Healy and Louis (Johnston et al. 2003-2)

결론적으로 다년생 빙과의 충돌에서 선속이 증가함에 따라 선체에 작용하는 하중이 증가하는 것이 뚜렷하지만 두꺼운 2년생 빙에서는 상관관계가 적어지고 1년생 빙과 중간 두께의 2년생 빙에서는 상관관계가 거의 없다.

3. 국부 빙하중의 극값 통계해석

Frederking(2000)은 Louis호의 1994년 알래스

카에서 북극을 거쳐 프랭 해협까지 항해하는 동안 계속한 하중자료를 분석하였다. 선수부 프레임에 스트레인게이지를 부착하여 스트레인을 계속하고 이 스트레인을 이용하여 선체에 작용하는 압력을 계산하였다. 하중은 Jordaan et al.(1993)이 제시한 극값(extreme value) 통계분석을 이용하여 압력을 분석하여 추정하였다.

Jordaan et al.(1993)이 제시한 하중의 크기를 산정하기 위한 방법은 1년에 어떤 확률 이상을 초과하여 발생(annual exceedance value)할 확률을 이용하였다. 우선 1년간 극값 하중 Z 가 다음과 같이 주어진다고 가정한다.

$$Z = \max(X_1, X_2, \dots, X_N)$$

여기서 N 은 1년 동안의 사건 X_i 의 수이다. Z 의 최대값의 분포는 다음과 같이 공벨분포로 정의 된다.

$$F_Z(Z) = \exp^{-\exp\{(z-x_0-x_1)/\alpha\}}$$

여기서 x_0 와 α 는 공벨계수이고, $x_1 = \alpha \ln(n)$, n 은 사건 수이다.

이 식을 극값 z_e 가 주어진 초과확률(probability of exceedance) $[1-F_Z(z_e)]$ 를 나타낼 수 있도록 나타내면 다음과 같다.

$$z_e = x_0 + \alpha\{-\ln[-\ln(1 - F_Z(z_e))]\} + \ln(n)$$

Frederking(2000)은 1년 동안의 초과확률이 1%면 선체가 움푹 들어가지만(denting) 부서지거나(failure) 갈라짐(breaching)이 발생하지 않을 적절한 확률이라고 하였다. 1% 초과확률을 갖는 빙하중은 다음과 같이 구한다.

$$z_{0.01} = x_0 + \alpha\{4.6 + \ln(n)\} \quad (1)$$

여기서 n 은 1년 동안 발생할 극값의 횟수이다.

Frederking(2000)은 Louis호의 계속값에서 500시간의 운항시간동안 1730회의 극값을 구하였고 이것을 Louis의 1년 동안 항해시간을 1000시간으로 추정하여 약 3500회의 얼음과 충돌이 발생한

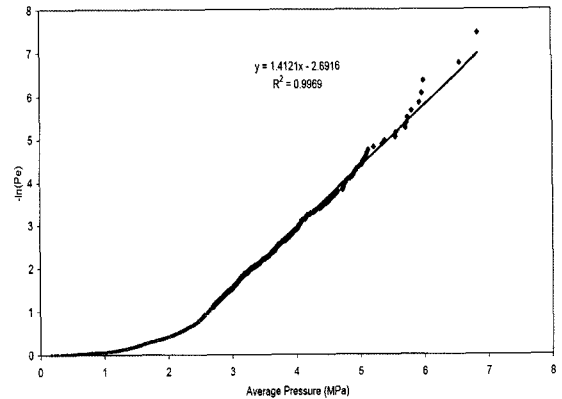


Fig. 5 Extreme value analysis of pressure for area=1.2m x 0.6m(Frederking 2000)

Table 1 Coefficients for extreme value analysis(Frederking 2000)

Area(m2)	α	x_0	Pressure (MPa)
0.72	0.709	-0.372	8.7
2.88	0.326	-0.417	3.7
6.48	0.195	-0.478	2.0
11.52	0.127	-0.495	1.1

다고 하였다.

여기서 x_0 와 α 는 Fig. 5에서와 같이 계속값을 극치분석 한 자료에서 구하는데 그 예로 Frederking(2000)이 계산한 α , x_0 와, 이를 이용하여 계산한 빙압력을 Table 1에 보였다.

이 값을 이용하여 Frederking은 압력 p 와 면적 A 와의 관계를 다음과 같이 나타내었다.

$$p = 7.3A^{-0.7} \quad (2)$$

4. 쇄빙 과학조사선에 작용하는 빙하중 추정

일반적으로 선박에 작용하는 쇄빙하중은 선형,

배수량, 샤프트 마력 등 여러 가지 요소와 관계가 있다. 특정한 선박의 결과를 다른 선박에 직접 적용하기는 우리가 있지만 본 선박에 적용할 적절한 데이터가 없는 상황이기 때문에 가능한 합리적인 가정을 이용하여 추론하기로 한다.

4.1 전체 빙하중 추정

비교 대상 선박과 과학조사선의 특징을 Table 2에 비교하였다. Healy호와 Louis호는 미국과 캐나다의 해안 경비대 소속의 대형의 쇄빙선이며 이들의 임무는 얼음을 깨 선박의 항로를 터주는 역할 뿐만 아니라 해양 조사선으로서 한겨울에 얼음으로 덮인 북극을 항해하기도 한다. 따라서 조사선보다 선체가 클 뿐만 아니라 이에 따른 엔진 출력 또한 크다. Healy호와 Luis호의 shaft power는 각각 22.4MW와 20.1MW이고 조사선은 10.0MW이다.

Healy호와 Louis호의 계측결과에서 얼음두께 1m 내외의 얼음의 경우 1년생 평탄빙이거나 1년생 빙맥이다. 2년생 얼음들은 두께가 1.2m 이상 이어서 조사선의 쇄빙 범위를 벗어나기 때문에 고려 대상에서 제외한다. 1년생 얼음의 경우 초겨울 얼음의 경우 두께가 1.0-1.2m, 늦겨울 얼음일 경우 1.2-1.8m이다. 이때의 빙하중은 1.7-7.0MN 범위에 있으며 선속은 최대 11kt까지 이다(Fig. 3).

1년생 빙과 2년생 빙에 의한 하중 차이는 상당히 크다. 계측된 최대 하중은 17.5MN으로서 1년생 최대 빙하중 7.0MN 보다 상당히 커 1년생 빙의 쇄빙시 최대 마력을 내지 않을 것으로 예상된다. 1년생 얼음의 최대 빙하중과 2년생 얼음의 최대 빙하중의 비는 $7.0/17.5=0.4$ 로 두 하중의 비는 40% 수준이다. 빙하중과 추진마력이 비례한다고 가정하고 최대 빙하중 작용시 최대 추진마력이 사용된다고 가정한다. 과학조사선의 최대 추진마력은 10MW이기 때문에 이에 따른 전체 빙하중은 Healy호의 결과를 이용하면 7.81MN이고, Louis호의 결과를 이용하면 4.98MN로 추정 할 수 있다.

또한 전체 빙하중은 스템각의 영향을 받기 때문에 이를 고려하였다. Healy호와 Louis호의 스템각은 각각 19°, 17°이고 과학조사선의 스템각 34°이

Table 2 Comparison of ship characteristics

	Healy	Louis	해양과학 조사선
LOA(m)	128	120	109.0
LBP(m)	120.85	110.32	95.0
B(m)	25	24.8	19
T(m)	8.9	9.9	6.8
Disp(ton)	16300	11,441	7,520
Shaft Power(MW)	22.4	20.1	10.0
V (knots)	17	20	12
Icebreaking Capability	1.37m level ice, 3 knots 2.44m, backing and ramming	1.8m level ice Ice Class: 100A	1m level ice, 3knots
Waterline Angle(°)	33	22	37
Stem Angle(°)	19	17	34

기 때문에 과학조사선의 빙하중 쪽이 커진다. 따라서 스템각의 차이를 고려하면 Healy호와 Louis호의 빙하중을 이용하면 과학조사선에 작용하는 전체 빙하중은 각각 8.90MN, 5.73MN으로 추정할 수 있다.

4.2 국부 빙하중

국부 빙하중 추정을 위하여 Frederking(2000)이 제시한 식 (2)를 쓰지 않고 Frederking(2005)의 추후 논문에 보인 과정을 따라 식을 수정하였다. 이를 위하여 굴뚝분포 계수 x_0 를 다시 구하였으며 결과를 Table 3에 보였다. 이 계수들을 이용하여 압력 p 와 면적 A 와의 관계를 다시 구하면 다음과 같다.

Table 3 Modified coefficients

Area (m ²)	Frederking(2000)			Present Analysis		
	α	x_0	Pressure (MPa)	α	x_0	Pressure (MPa)
0.72	0.709	-0.372	8.7	0.709	-0.504	8.5
2.88	0.326	-0.417	3.7	0.326	-0.194	4.0
6.48	0.195	-0.478	2.0	0.195	-0.077	2.4
11.52	0.127	-0.495	1.1	0.127	-0.029	1.6

$$p = 7.2A^{-0.59} \quad (3)$$

식 (2)와 식 (3)의 결과를 Fig. 6에 나타내었는데, 식 (3)으로 추정된 빙압력은 작용면적 A 가 커지면 커 질수록 식 (2)에 의한 추정식보다 크게 추정하고 있음을 알 수 있다.

위 식(3)은 Frederking(2005)이 다른 쇄빙선 Oden의 계측자료에서 구한 압력과 면적과의 관계 식

$$p = 7.8A^{-0.6}$$

과 거의 비슷한 식이다.

Masterson and Frederking(1993)과 Riska(1987)에 의하면 빙압력은 $A^{-0.4} \sim A^{-0.5}$ 에 비례한다 하였고 이 압력관계는 본 논문에서 수정한 압력식 (3)과도 유사하다.

위에 나타난 식 (3)은 이미 언급한 바와 같이 1년 동안 빙압력에 노출될 횟수를 1000시간동안 3500회로 계산한 식이다. 본 논문의 대상선인 과학조사선의 운항 계획에 따라 약 360시간(15일)으로 하면 이 기간 동안 빙압력이 발생할 횟수는 1260회가 된다. 이 횟수를 반영하여 식 (1)에 $n=1260$ 을 대입하여 식 (3)을 수정하면 수정한 압력식은 다음 식 (4)와 같고 이 식을 Fig. 7에 보였다.

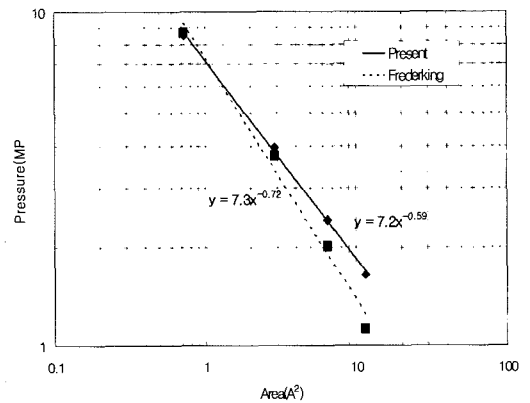


Fig. 6 Comparison of Frederking(2000) and present Pressure-Area relationship

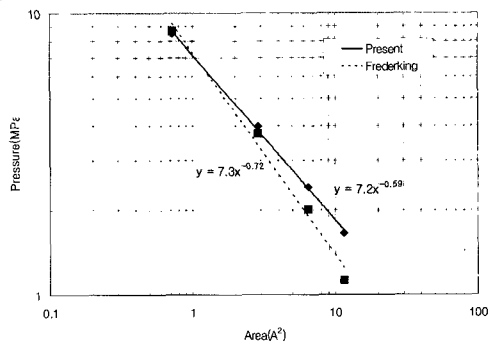


Fig. 7 Modified Pressure-Area relationship to the number of events

Table 4 Calculated local pressures.

Load Location	Pressure(MPa)
Between stiffeners	10.3
Between frames	6.8
Between bulkheads	1.9

$$p = 6.2A^{-0.59} \quad (4)$$

식 (4)를 이용하여 과학조사선에 작용하는 국부 빙압력을 추정하면 Table 4와 같다. 이 압력은 과학조사선 선수부가 얼음과 직접 접촉하는 부위의 선체 외판에 적용할 수 있는 빙압력이다.

5. 결 언

쇄빙 과학조사선에 작용하는 빙하중을 추정하기 위하여 기존의 실선 계측 자료를 이용하였다. 하중을 빙하중에 의한 선체의 굽힘거동을 파악을 위한 전체 빙하중과 선수부 구조물의 국부거동 파악을 위한 국부 빙하중으로 나누어 추정하였다. 전체 빙하중 추정은 선체운동을 이용한 빙하중 계측 결과를 이용하였고 국부 빙하중은 선수 프레임에 스트레인게이지를 부착하여 측정된 국부하중을 이용하였다. 추정 결과 과학조사선에 작용하는 전체 빙하중은 5.73MN - 8.90MN으로 추정되었다. 그리고 국부 빙하중은 보강재 사이의 외판에 작용하는 하중은 10.3MPa, 프레임 사이에 작용하는 하중은 6.8MPa로 추정되었다.

쇄빙선에 작용하는 하중 추정은 설계 전에 모형 시험에 의하여 추정 될 수 있지만 추후에 설계 하중 추정이나 운항시 빙하중 추정을 위하여 쇄빙 과학 조사선에도 빙하중 모니터링 시스템을 설치하는 것이 바람직 할 것이다. 계측된 하중은 설계 나 해석에도 사용 될 수 있지만 운항중에도 빙하중의 장단기 예측을 하여 운항시 과도한 빙하중을

피할 수 있도록 도움을 줄 수 있다. 즉 빙하중 모니터링 시스템은 단순히 다음에 설계 될 쇄빙선에 대한 설계하중 추정에 쓰일 수 있을 뿐만 아니라 조사선의 안전운항에도 도움이 될 수 있는 시스템이다.

후 기

본 논문은 해양수산부 ‘쇄빙 과학 조사선 개발 사업’과 산업자원부 “선박 안전성 평가 및 방음/방진 기술 개발” 과제의 연구 성과 중 일부임을 밝혀 둡니다.

참 고 문 헌

- Frederking, R., 2000, Local Ice pressure from the Louis S. St. Laurent 1994 North Pole Transit, Canadian Hydraulic Center, Technical Report, HYD-TR-054.
- Frederking, R., 2005, "Local Ice pressure on the ODEN 1991 Polar Voyage," POAC'05, Vol. 1, pp. 353-363.
- Hanninen S., Lensu M., and Riska K., 2001, Analysis of the Ice Load Measurements During USCGC HEALY Ice Trials Spring 2000, Helsinki University of Technology, Ship Laboratory Report M-265.
- Hanninen S. and Lensu M., 2002, Aspect of Ice Load Monitoring analysis Using ARCDEV Ice Load Database, Helsinki University of Technology, Ship Laboratory Report M-274.
- Johnston M., Frederking R., Timco G.W. and Miles M., 2003-1, "MOTAN: A Novel Approach for Detecting Ice-Induces global Loads on Ships," MARI-TECH 2003.
- Johnston M., Frederking R., Timco G.W. and Miles M., 2003-2, Ice-Induced Global Loads on USCGC Healy and CCGS Louis S. St-Laurent as Determined from Whole-Ship Motions, Canadian Hydraulic Center, Technical

Report, CHC-TR-014.

- Jordaan, I.J., Maes, M.A., Brown, P.W. and Hermans, I.P., 1993 "Probabilistic analysis of Ice Pressure," Journal of Offshore Mechanics and Arctic Engineering, Vol. 115, pp. 83-89.
- Kujala, P. 1999, Statistical Analysis of the Ice Load Measurements Onboard MT Uikku during the ARCDEV-Voyage in 1998, Helsinki University of Technology, Ship Laboratory Report D-51.
- Masterson, D.M. and Frederking, R., 1993, "Local Contact Pressure in Ship/Ice and Structure/Ice Interactions," Cold Regions Science and Technology, Vol. 21, pp. 169-185.
- Riska, K., 1987, On the Mechanics of Ramming Interaction between a Ship and a Massive Ice Floe, Thesis for Degree of Doctor of Technology, Technical Research Center of Finland, Publication 43, Espoo, Finland.



< 임 채 환 >



< 이 탁 기 >