

무한 빙판에서의 쇄빙력과 파단 빙편의 크기 예측

최경식^{†*}, 이진경^{*}, 김현수^{**}, 전호환^{***}

한국해양대학교 해양개발공학부^{*}
삼성중공업 조선플랜트연구소^{**}
부산대학교 조선해양공학과^{***}

Estimation of Icebreaking Forces and Failure Length of Ice Rubbles on Infinite Ice Sheet

Kyungsik Choi^{†*}, Jin-Kyoung Lee^{*}, Hyun-Soo Kim^{**} and Ho-Hwan Chun^{***}

Div. of Ocean Development Engineering, Korea Maritime University^{*}
Shipbuilding & Plant R&D Institute, Samsung Heavy Industries^{**}
Dept. of Naval Architecture and Ocean Engineering, Pusan National University^{***}

Abstract

Ice rubble pieces broken by the bow impact load and side hull of an icebreaking vessel usually pass along the ship's bottom hull and may hit the propeller/rudder or other stern structures causing serious damage to ship's hull. Therefore it is important to estimate the size of broken ice pieces during the icebreaking process. The dynamic interaction process of icebreaker with infinite ice sheet is simplified as a wedge type beam of finite length supported by elastic foundation. The wedge type ice beam is loaded with vertical impact forces due to the inclined bow stem of icebreaking vessels. The numerical model provides locations of maximum dynamic bending moment where extreme tensile stress arises and also possible fracture occurs. The model can predict a failure length of broken ice sheet given design parameters. The results are compared to Nevel(1961)'s analytical solution for static load and observed pattern of ice sheet failure onboard an icebreaker. Also by comparing computed failure length with the characteristic length, the meaning of ice rubble sizes is discussed.

※Keywords: Infinite Ice Sheet (무한 빙판), Elastic Foundation (탄성지지기반), Ice Rubble (빙편), Wedge Type Beam (쐐기형 보), Failure Length (파괴길이), Numerical Analysis (수치해석)

접수일: 2004년 8월 20일, 승인일: 2004년 9월 30일

† 주저자, E-mail: kchoi@mail.hhu.ac.kr

Tel: 051-410-4324

1. 서 론

빙판이 해수면 위에 형성되어 있을 때 선박의 쇄빙작용에 의해 빙판은 작은 빙편으로 부서지며 부서진 빙편은 선박의 측면과 밑면을 통과하여 선체 후미로 이동하면서 프로펠러와 선체 사이에 끼어들거나 프로펠러와 선체구조에 충격하중을 가하는 경우가 발생한다. 프로펠러나 선체의 손상정도는 유입되어 온 빙편의 크기와 속도에 따라 결정되기 때문에 쇄빙선박에서 부서진 빙편의 크기를 결정하는 것이 중요하다.

Fig. 1 에 평탄빙에서의 전형적인 쇄빙형식을 볼 수 있다. 선박이 전진함에 따라 선수부와 그 주변의 선각에 의해 수직 하향력이 전해지면서 빙판을 누르게 된다. 선수부에서 전달된 힘이 빙판에 과도한 굽힘을 가하면 하중점을 중심으로 반경방향 균열이 전파되면서 빙판의 파괴과정이 시작된다. 이후 췌기보형상의 빙판에 원주방향의 균열이 2차로 형성되어 빙판은 붕괴되고 다시 선박은 쇄빙을 위해 전진하는 과정이 되풀이 된다.

선박이 진행하는 동안 부서진 파편은 선축하부로 밀려나 선미부로 빠지거나 기존 빙판의 하부로 잠기며 개수로를 형성한다. Fig. 2 와 같이 선체의 측면에서 부서진 빙편은 반달모양(cusp)의 형상을 가지게 된다.

탄성지지기반(elastic foundation) 위에 놓인 무한한 평판/보의 굽힘 문제는 전산기가 출현하기 오래 전부터 해석적인 방법이 주로 사용되어 왔다 (Hetenyi 1947, Timoshenko/Woinowski-Krieger 1959). 빙판 위에서의 작업이나 차량이동에 대한 안전한 빙판 두께를 찾기 위한 빙역학적 요구에 대하여 동일한 방법을 해수면상의 빙판의 굽힘 문제에 적용하게 되었는데 이러한 연구로 Assur(1956), Meyerhof(1962), Kerr(1983), Gold (1971), Kerr/Palmer(1972), Frederking/Gold(1976), Squire/Dixon(2000) 등의 논문이 발표되었다.

한편 하중점을 중심으로 반경방향 2차균열이 형성된 빙판을 탄성지지기반 위의 췌기형 보로 취급하는 연구는 Nevel(1961)에 의해 처음 시도되었는데 그는 power series 를 사용하여 췌기형 보의 끝부분에 작용한 수직하중에 의해 유발되는 최대 굽힘모멘

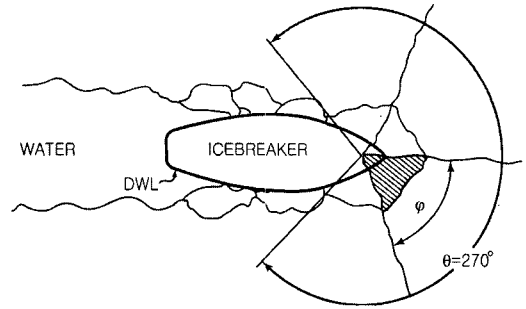


Fig. 1 Typical icebreaking pattern and side cusps (redrawn from Michel 1978)

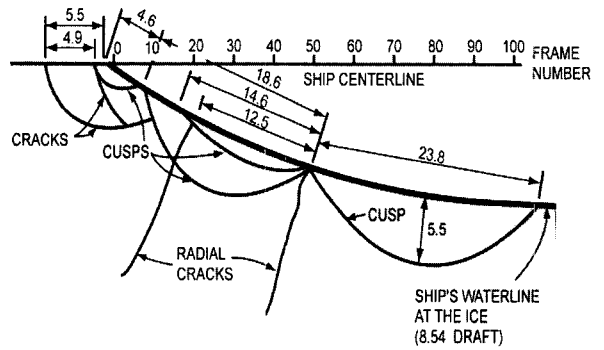


Fig. 2 Icebreaking pattern observed from the deck of USCGC POLAR SEA, in 0.76 m level ice (redrawn from Voelker 1992)

트의 위치와 그 크기를 구하였다 (Fig. 5 참조). 이 연구는 탄성응답 자체에 관심을 두었기 때문에 최대 굽힘모멘트 발생위치를 췌기보가 파괴되는 위치와 연관시키지는 않았다.

이러한 해석방법은 준정적하중이나 이동하중 등 하중의 형태가 조금씩 바뀌는 경우에도 빙판의 내하중 능력(bearing capacity of ice)을 구하는데 적용되어 오고 있다 (Hui/Xirouchakis 1981, Kerr 1983, Fransson 1985).

앞서 Nevel(1961)을 비롯한 여러 선행연구에서 빙판의 내하중 능력을 구하는 방법을 본 연구에서는 쇄빙선박이 평탄빙에서 연속쇄빙을 하고 있는, 상황에 적용하였다. 그리고 전과 마찬가지로 탄성지지기반 위에 놓인 유한 길이의 췌기형 보의 굽힘 문제를 가정하였는데 본 연구에서는 쇄빙선박의 전진에 따

른 수직방향의 충격하중에 의한 쇄기형 빙판의 파괴와 동적 응답을 수치해석을 이용하여 구하였다. 여기서 쇄기형 빙판에 작용한 굽힘모멘트에 의해 빙판의 어떤 위치에 발생한 최대 인장응력이 얼음의 굽힘강도에 도달할 때 그 부분에서 파단이 일어난다고 생각하여 부서진 빙편의 크기를 예측하였으며 이를 Nevel의 정적하중에 대한 계산 및 관측결과와 비교하였다.

선수각의 변화에 의해 빙판에 전달되는 충격하중의 크기가 달라지는데 하중이 증가할수록 파괴될 수 있는 빙판의 두께도 증가한다. 본 연구에서는 충격하중의 변화에 따른 파괴가능한 빙판의 최대 두께 즉 쇄빙능력을 계산해 보았다. 아울러 부서진 빙편의 크기 즉 파괴길이(failure length)와 빙판 두께의 상관관계를 조사하고 이를 여러 연구자들의 연구결과와 비교해 보았다.

탄성지지기반 위에 놓인 평판의 굽힘문제에서 하중의 영향범위를 나타내는 뜻으로 특성길이(characteristic length)라는 표현을 쓰는데 이는 평판에 수직하중이 작용할 때 평판의 변형에 직접적인 영향을 주는 범위를 나타내기 위해 설정한 기준반경이라는 의미이다. 특성길이가 실제로 빙판이 수직하중을 받아 생긴 원주방향 균열로 인해 붕괴되는 지점까지의 거리를 뜻하고 있지는 않지만 부서진 빙편의 크기를 예측하는 기준이 될 수 있다는 생각으로 본 연구에서는 빙편의 파괴길이와 특성길이와의 비교를 통해 그 물리적 의미를 검토해 보았다.

2. 무한빙판의 굽힘파괴 거동

2.1 탄성지지기반 위의 평판(plate) 해석

무한평판의 중앙에 원점을 두고 반경방향으로 r 만큼 떨어진 지점에서 아래로 향하는 처짐의 크기를 w 라 하면 평판의 굽힘문제는 다음 미분방정식으로 표현된다.

$$\frac{d^3w}{dr^3} + \frac{1}{r} \frac{d^2w}{dr^2} - \frac{1}{r^2} \frac{dw}{dr} = \frac{Q}{D} \quad (1)$$

여기서 Q 는 전단력, D 는 단위폭 평판의 굽힘

강성(flexural rigidity)을 나타낸다 (Timoshenko/Woinowski-Krieger 1959).

$$D = \frac{Eh^3}{12(1-\mu^2)} \quad (2)$$

여기서 h 는 빙판두께, E 는 빙판의 탄성계수, μ 는 Poisson 비를 나타낸다.

만일 단위면적당 세기 q 인 분포하중이 반경 r 인 원판에 균일하게 작용할 경우 처짐에 관해 다음 방정식을 얻게 된다.

$$\left(\frac{d^2}{dr^2} + \frac{1}{r} \frac{d}{dr} \right) \left(\frac{d^2w}{dr^2} + \frac{1}{r} \frac{dw}{dr} \right) = \frac{q}{D} \quad (3)$$

물위에 떠 있는 빙판의 부력을 탄성지지기반으로 나타내면 빙판이 물에 잠긴 깊이, 즉 처짐의 크기 w 에 비례하는 부력을 받게 되므로 탄성지지기반의 스프링 상수를 k 라 하면 (3)식은 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$\left(\frac{d^2}{dr^2} + \frac{1}{r} \frac{d}{dr} \right) \left(\frac{d^2w}{dr^2} + \frac{1}{r} \frac{dw}{dr} \right) = \frac{q - kw}{D} \quad (4)$$

이 미분방정식의 일반해는 modified Kelvin function 인 $ber(\chi)$, $bei(\chi)$, $ker(\chi)$, $kei(\chi)$ 의 결합으로 표현된다.

$$w = A_1 ber(\chi) + A_2 bei(\chi) + A_3 ker(\chi) + kei(\chi) + \frac{q}{k} \quad (5)$$

여기서 $\chi = \frac{r}{l_c}$ 는 길이에 대한 무차원 변수

이고 계수 A_1, A_2, A_3, A_4 는 빙판의 경계조건으로부터 결정되는 상수이다. 그리고 빙판의 특성 길이는 다음과 같이 정의한다.

$$l_c = \sqrt[4]{\frac{D}{k}} = \sqrt[4]{\frac{1}{k} \frac{Eh^3}{12(1-\mu^2)}} \quad (6)$$

무한빙판의 중앙에 집중하중 P 가 작용하는 경

우에 최대 처짐은 집중하중이 작용한 위치에 생기며 그 크기는 다음과 같이 계산된다.

$$w_{\max} = \frac{P\sqrt{\frac{D}{k}}}{8D} = 0.433P\sqrt{\frac{1-\mu^2}{\rho_w g E h^3}} \quad (7)$$

여기서 $k = \rho_w g$ 을 사용하였다. 빙판의 처짐은 P 에 비례하고 $h^{-3/2}$ 에 비례함을 알 수 있다. 빙판에 작용하는 굽힘모멘트와 전단력은 빙판의 처짐에 대한 (5)식을 미분하여 구할 수 있다.

한편 빙판의 중심 반경 a 안에 균일분포하중 q 가 작용하는 경우 빙판의 최대 처짐은 하중의 중심점($\chi = 0$)에서 발생하며 그 크기는 다음과 같다 (Fig. 3).

$$w_{\max} = \frac{P[1 + \alpha k e r^{(1)} \alpha]}{\pi k \alpha^2 l_c^2} \quad (8)$$

여기서 $P = \pi a^2 q$ 는 전체 하중을 나타내며 최대 굽힘모멘트도 역시 하중의 중심 위치에 발생한다. 식(8) 속의 첨자 (1)은 1차 미분을 의미한다.

$$M_{\max} = \frac{(1 + \mu) k e i^{(1)} \alpha \cdot P}{2 \pi \alpha} \quad (9)$$

여기서 빙판의 굽힘강도를 σ_f 라 하면 단위폭에 대한 굽힘모멘트는 $M = \frac{1}{6} h^2 \sigma_f$ 이므로 반경방향의 균열(radial crack) 발생에 의해 빙판이 파괴되는 하중은 다음과 같이 계산된다.

$$P_f = \frac{\pi \alpha \sigma_f h^2}{3(1 + \mu) k e i^{(1)} \alpha} \quad (10)$$

2.2 탄성지지기반 위의 썩기보 해석

무한한 빙판에 하중이 작용하는 경우 하중이 증가함에 따라 빙판의 처짐이 점차 증가하는데 빙판의 하부에 인장력이 발생하면서 그 결과 먼저 반경방향의 균열이 형성된다. 그리고 하중이 더욱

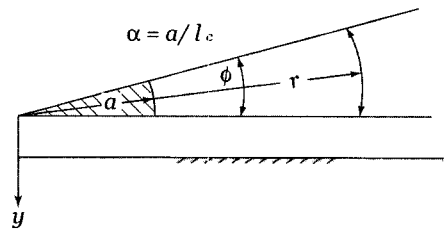


Fig. 3 Idealization of a cracked ice sheet as a wedge type ice beam

증가하면 굽힘에 의해 빙판의 상부에 인장력이 발생하면서 두 번째로 원주방향(circumferential direction)의 균열이 발생하면서 최종적으로 빙판은 파괴된다.

따라서 빙판이 받을 수 있는 최대 하중은 1차로 반경방향의 균열이 발생 후 생겨난 개별적인 썩기보가 받을 수 있는 최대 하중으로 볼 수 있다. 이런 이유로 썩기형 빙판의 끝에 분포하중이 작용하는 경우로 가정하여 빙판의 내하중 능력을 검토하는 경우가 많이 있다 (Nevel 1961, Fig. 3).

이 경우 빙판의 처짐에 대한 지배방정식은 다음과 같다 (Nevel 1961).

$$\frac{d^4 w}{d\chi^4} + \frac{2}{\chi} \frac{d^3 w}{d\chi^3} + w = \frac{q}{k} \quad (11)$$

여기서 $\chi = r/l_c$, r 은 반경방향의 거리이고 $\alpha = a/l_c$, a 는 하중반경이다.

식(11)의 해는 다음 식으로 표현된다.

$$w = \left[a D n_0(\chi) + b D n_1(\chi) + c D n_2(\chi) + d D n_3(\chi) + \frac{2}{\alpha^2} \right] \times \frac{P}{2 \tan(\frac{\phi}{2}) k l_c^2} \quad (12)$$

여기서 P 는 썩기보에 작용한 전체 하중, ϕ 는 썩기보의 각도, $2 \tan(\phi/2) : r = 1$ 에서 썩기보의 폭, 그리고 $D n_0(\chi) \sim D n_3(\chi)$ 는 Nevel(1961)이 정의한 함수이며 $a \sim d$ 는 경

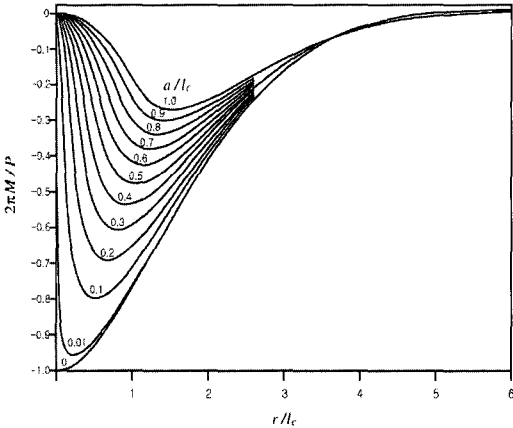


Fig. 4 Bending moment distribution in a wedge beam on elastic foundation (from Nevel, 1961)

계조조건에 의해 결정되는 상수이다.

Fig. 4의 계산결과를 보면 α 가 증가함에 따라 처짐의 크기나 굽힘모멘트의 크기는 다소 감소하지만 최대 굽힘모멘트가 발생하는 위치는 중심에서 조금 떨어진 곳으로 점차 이동한다. 즉, 분포하중의 범위가 넓어질수록 원주상의 균열이 생기는 반경이 점차 커지므로 이는 부서지는 빙편의 크기가 커진다는 것을 의미한다.

2.3 충격하중에 의한 썩기보의 수치해석

Nevel의 해석결과와 같이 이론식에 의해 쇄빙과정 중에 나타나는 균열의 크기를 예측할 수는 있지만 이 경우는 단지 정적인 수직하중만을 받는 빙판의 문제이기 때문에 실제 관측결과와는 적지 않은 차이가 있다. 쇄빙선박에 의한 연속쇄빙의 경우 선수부와 얼음과의 상호작용은 매우 복잡하여 실제로 수직하중은 일정하다고 볼 수 없다.

실선계측을 통해 얻어진 결과를 보면 선체와 얼음 사이의 상호작용이 선체와 얼음의 최초 접촉 이후 짧은 시간 동안에 최대치에 이르렀다가 균열의 전파 그리고 빙판의 파괴와 함께 급격히 감소되는 충격하중으로 생각할 수 있다. 또한 수평하중과 수직하중이 동시에 존재하므로써 빙판의 응력분포를 변화시킬 수도 있다.

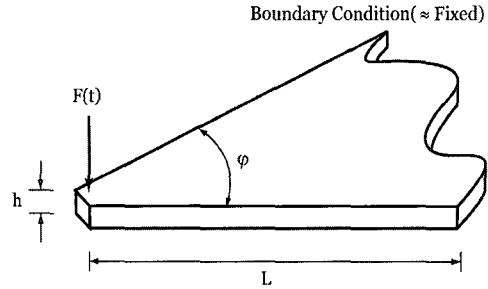


Fig. 5 Wedge type model beam

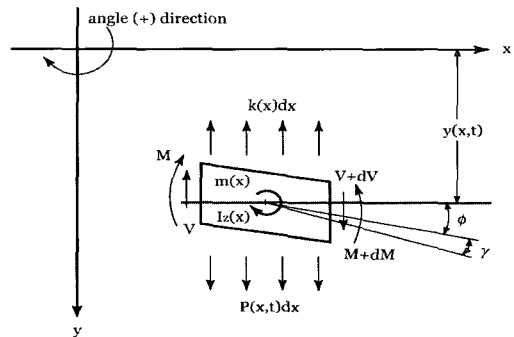


Fig. 6 Coordinate system

본 연구에서는 쇄빙선박이 평탄빙에서 연속쇄빙을 하고 있는 상황을 탄성지지기반을 가진 기초 위에 놓인 유한 길이의 썩기형 변단면 보의 문제로 다루었던 선행연구(최경식 등 1992)의 수치해석 방법을 보완하고 그 해석결과를 이론 및 관측결과 등과 비교 검토하며 빙편의 파괴길이에 대한 물리적 의미를 재해석하고자 한다.

수직방향의 충격하중에 의한 탄성지지기반에 놓인 변단면 보의 동적응답에 대한 지배방정식은 다음과 같다 (Fig. 5, Fig. 6 참조; Timoshenko/Woinowski-Krieger 1959).

$$m\ddot{y} + ky - \frac{\partial V}{\partial x} = P(x, t) \tag{13}$$

$$I_2\ddot{\phi} - V + \frac{\partial M}{\partial x} = 0 \tag{14}$$

$$M = -EI\frac{\partial \phi}{\partial x} \tag{15}$$

$$V = \kappa AG\gamma \tag{16}$$

$$\frac{\partial y}{\partial x} = \gamma + \phi \tag{17}$$

- m : 보의 유효질량
- k : 탄성지지기반의 강성계수
- I_z : 단면의 회전관성모멘트
- EI : 굽힘강성
- κAG : 전단강성
- P : 횡하중
- y : 보의 횡변위
- ϕ : 굽힘에 의한 경사각
- γ : 전단에 의한 경사각
- M : 굽힘모멘트
- V : 전단력

연립미분방정식 식(13)-(17)의 해를 구하기 위하여 본 연구에서는 유한차분법을 이용하였다. 그리고 빙판에 관해 다음과 같은 재료특성치들을 선택하였다.

- 해빙의 밀도 : $\rho_i = 918 \text{ kg/m}^3$
- 빙판의 굽힘강도 : $\sigma_f = 0.5 \text{ MPa}$
- 탄성계수 : $E = 2.0 \text{ GPa}$
- 전단탄성계수 : $G = 0.767 \text{ GPa}$
- 해수의 밀도 : $\rho_w = 1,025 \text{ kg/m}^3$

본 연구에서는 빙판의 두께 h 와 길이 L , 사이각 φ 등 쇄기보의 제원 및 선수 충격하중의 크기를 변화시켜가면서 최대 굽힘모멘트의 발생 위치를 조사하였다. 경계조건으로 하중이 작용하는 지점은 자유단(free end)을 가정하고 쇄기보의 뿌리부분은 고정단(fixed end)을 가정하였다.

Fig. 7 에는 사이각 60° 길이 50 m 두께 1 m 의 빙판에 충격하중 0.2 MN 이 0.25초 동안 작용할 때 쇄기보의 두 지점(끝부분에서 2 m 와 10 m 지점)에서 계산되는 굽힘모멘트의 변화를 보여주고 있다. 보의 끝부분으로부터 약 2 m 위치에 최초의 균열이 발생하고 빙판은 파괴에 이르는 것으로 계산되었다.

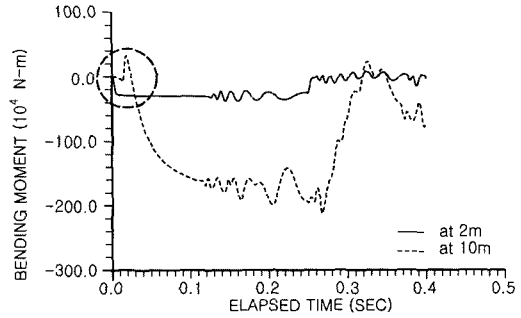


Fig. 7 Bending moment variation in a model beam

2.4 수치해석 결과

Fig. 8 에서는 사이각 60° 에 50 m 길이의 쇄기보에 대하여 빙판의 두께를 변화시키면서 굽힘 파괴가 일어나는 지점 즉, 빙판이 파괴되는 길이 (failure length)를 조사하였다. 차분법에 따라 분할된 요소 크기의 제한으로 인해 파괴길이는 계단식으로 나타나지만, 실선으로 표시된 추세선을 보면, 동일한 하중을 받을 때 빙판의 두께가 클수록 파괴되는 빙판의 크기가 커지는 것을 알 수 있다.

그리고 빙판의 두께가 같을 경우 하중이 클수록 파괴되는 얼음의 크기가 작아지는데, 이 결과는 하중이 클수록 굽힘모멘트의 한계치에 도달되는 시간이 짧기 때문에 응력파가 전달되는 거리가 작아지는 것과 관련된다고 판단할 수 있다. Fig. 8 에는 정적 하중에 대한 Nevel(1961)의 해석결과 (Fig. 4)를 이용해 새로이 계산한 파괴길이도 함께 도시되어 있다.

한편 Fig. 9 에는 같은 조건에서 굽힘파괴가 일어날 때까지의 시간(failure time)과 빙판의 두께 사이의 관계를 보여주고 있다. 빙판의 두께가 클수록 굽힘파괴에 이르는 시간이 커지는 것을 알 수 있다.

굽힘변형에 의한 2차균열의 형성에 있어서 전체적인 경향은 임의 두께의 빙판에서 하중이 점차 증가함에 따라 처음에는 파괴되지 않던 빙판이 깨어지기 시작하는데 이러한 순간에 빙판이 파괴되는 위치는 쇄기보의 끝보다는 보의 중간부분에서 끝부분에 걸쳐 일어나고 있다. 파괴길이가 빙판의 두께에 비해 충분히 큰 값을 나타내고 있다. 한

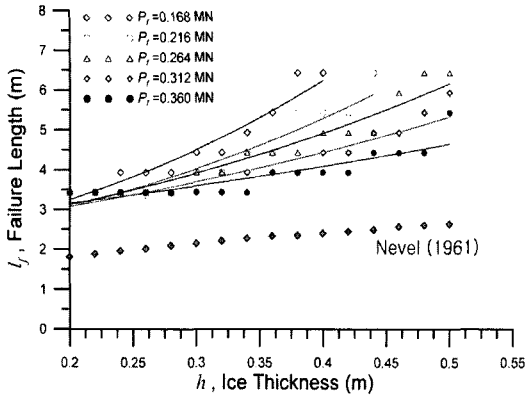


Fig. 8 Failure length vs. ice thickness ($\varphi = 60^\circ$, $L = 50$ m)

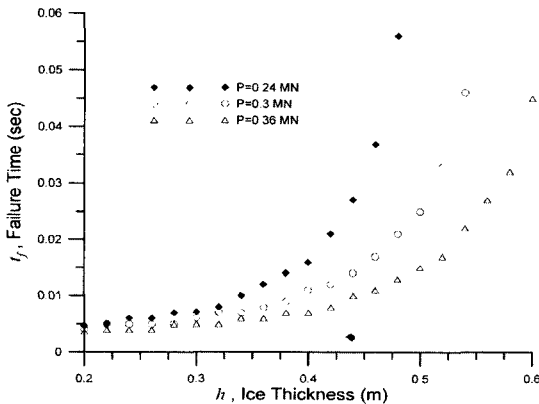


Fig. 9 Failure time vs. ice thickness ($\varphi = 60^\circ$, $L = 50$ m)

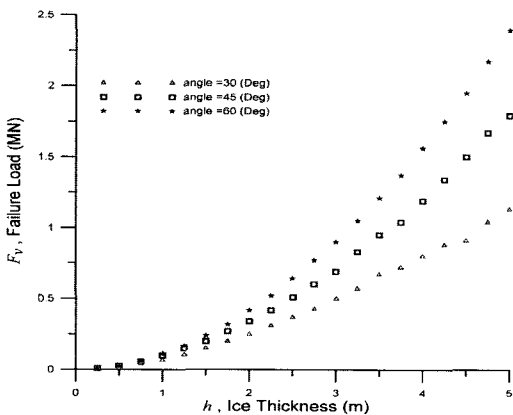


Fig. 10 Vertical force vs. maximum ice thickness

편 Fig. 8 에 제시된 수치는, 정량적인 직접 비교는 될 수 없지만, 쇄빙선박에서의 실제 관측결과인 Fig. 2 에서 볼 수 있는 빙편의 크기인 5.5 m 와 비교할 수 있다.

한편 Fig. 10 에는 충격하중의 크기에 따라 파괴 가능한 빙편의 최대두께를 도사하였다. 충격하중의 크기는 선수각의 크기로 대표되고 파괴 가능한 빙편의 최대 두께는 곧 쇄빙능력을 의미하므로 이 그림은 선수형상의 변화에 따른 쇄빙능력의 변화를 간접적으로 나타내고 있다고 볼 수 있다. 하중이 증가할수록 파괴될 수 있는 빙편의 두께도 증가하고 있다. 식(10)에 나타난 바와 같이 1차로 반경방향 균열에 의한 빙편의 파괴하중 P_f 은 빙판 두께 h 의 제곱에 비례하는 것으로 표현되지만 실제로는 $\alpha = a/l_c$ 속의 특성길이가 빙판 두께의 함수이기 때문에 $P_f = C_1 h^{5/4} + C_2 h^2$ 의 형태로 표현된다. 원주방향 균열에 의한 빙편의 파괴 역시 이러한 관계로 표시되는데 Fig. 10 은 빙판의 파괴하중과 빙판 두께와의 이러한 관계를 잘 나타내고 있다고 보인다. 원주방향 균열에 대하여 Fig. 10 에 표시된 본 연구의 수치 데이터는 빙판 두께의 함수로 나타낼 경우 간단히 $P_f = 0.77 h^{1.82}$ 로 표현된다. Fig. 10 에서 F_v 는 쇄기보 하나의 끝 부분에 작용한 하중이므로 전체 수직하중 P_f 를 쇄기보의 사이각에 따라 나누어 준 값과 같다. 즉 사이각이 30° 이면 $P_f = 12 F_v$ 로 계산할 수 있다.

한편 Fig. 11 은 무한 빙판의 반경 a 안에 균일분포하중 P_f 가 작용하는 경우, 무차원화 된 파괴하중 $\frac{P_f}{\sigma h^2}$ 와 $\alpha = a/l_c$ 사이의 관계를 나타낸 것이다. 실선은 각기 1차 반경방향 균열이 발생하는 하중인 (10)식과 2차 원주방향 균열이 발생하는 하중(Nevel의 해석결과)을 나타내고 있다. 검은 사각형으로 표시된 데이터는 원주방향 균열이 발생하는 경우 사이각이 30° 인 쇄기보에 작용한 수직하중 F_v 로서 전체 수직하중 P_f 로 환산하면 12배인 삼각형으로 표시된 데이터가 되는데, 이 수치는 원주방향 균열이 발생하는 해석결과보다 2배 정도 큰 값을 나타내고 있다. 오히려 원으로 표시된 데이터가 Nevel의 해석결과에 더 가깝다는 것을 알 수 있는데 이 차이를

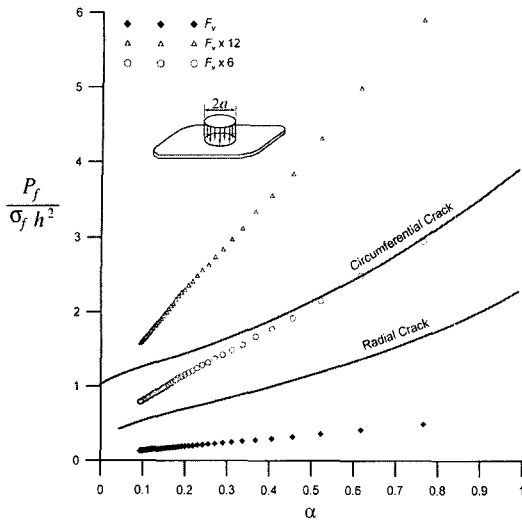


Fig. 11 Nondimensional failure load vs. non-dimensional area of distributed load, α for an infinite ice sheet

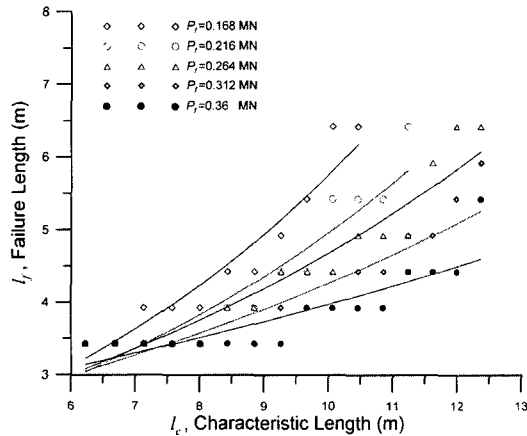


Fig. 12 Failure length vs. characteristic length

정적하중에 대한 결과와 충격하중에 의한 문제와의 차이로 이해하는 것도 가능하리라 판단된다. 하지만 이에 대한 실측결과는 아직 확보된 것이 없기 때문에 추후 계속 검토가 필요하다.

Fig. 12 에는 본 연구에서 계산된 결과인 빙판의 파괴길이 l_f 와 (6)식으로 정의되는 특성길이 l_c 와

의 비교를 나타내었다. 특성길이는 탄성지지기반 위에 놓인 평판에 수직하중이 작용할 때 변형에 직접적인 영향을 주는 범위를 나타내기 위해 설정한 기준반경이란 의미이다(action radius of the floating plate). 따라서 특성길이가 실제로 빙판이 수직하중을 받아 생긴 원주방향균열로 인해 붕괴되는 지점까지의 거리를 뜻하고 있지는 않지만 부서진 빙판의 크기를 예측하는 기준은 될 수 있다. 그림에서 보듯이 특성길이와 파괴길이의 비는 충격하중이 증가할수록 점차 커지는 것을 알 수 있다.

3. 결 론

본 논문에서는 쇄빙선박이 평탄빙에서 연속쇄빙을 하고 있는 상황을 탄성지지기반 위에 놓인 유한길이의 썩기형 변단면보의 문제로 취급하여 수치해석을 수행하였다. 빙판에 발생한 최대 굽힘응력이 빙판의 굽힘강도에 이르는 순간 빙판에 최초의 균열이 발생하며 빙판은 파괴에 이른다고 생각하여 빙판의 크기를 추정하였다. 본 수치 모델은 주어진 쇄빙선박의 쇄빙능력을 잘 예측하고 있다. 본 연구를 통하여 얻어진 결론은 다음과 같다.

1) 빙판의 파괴길이는 동일한 하중을 받을 때 빙판의 두께가 클수록 커지는 것을 알 수 있다. 빙판의 두께가 같을 경우 하중이 클수록 파괴되는 얼음의 크기가 작아지는데, 이 결과는 하중이 클수록 굽힘모멘트의 한계치에 도달되는 시간이 짧기 때문에 응력파가 전달되는 거리가 작아지는 것과 관련된다.

2) 파괴 가능한 빙판의 최대 두께는 쇄빙능력을 의미하는데 충격하중이 증가할수록 파괴될 수 있는 빙판의 두께도 증가한다. 원주방향 균열발생에 대응하는 빙판의 파괴하중은 본 연구에서는 간단히 빙판 두께를 이용하여 $P_f = 0.77h^{1.82}$ 의 형태로 표현할 수 있다.

3) 특성길이와 파괴길이의 비는 충격하중이 증가할수록 점차 커진다. 특성길이가 실제로 빙판이 붕괴되는 지점까지의 거리를 뜻하고 있지는 않지만 빙판의 파괴길이와 상관관계를 통하여 부서진 빙판의 크기를 예측하는 기준이 될 수 있다.

후 기

본 논문은 한국과학재단 지정 첨단조선공학연구센터 (ASERC:R11-2002-008-01002 -0)와 삼성중공업(주)의 연구비 지원으로 수행된 연구결과임.

참 고 문 헌

- 최경식, 손창배, 팽은경, 1992, "빙해항행선박의 선수부 형상과 쇄빙능력에 관한 연구," 대한조선학회논문집, 제 29권, 제 4호, pp. 87-97.
- Assur, A., 1956, Airfields on Floating Ice Sheets with Supplements, SIPRE Report 36.
- Fransson, L., 1985, "Load Bearing Capacity of an Ice Cover subjected to Concentrated Loads," Proc. of the 4th International Offshore Mechanics and Arctic Engineering Symposium, Dallas, Texas, Vol. 2, pp. 170-176.
- Frederking, R.M.W. and Gold, L.W., 1976, "The Bearing Capacity of Ice Covers under Static Loads," Canadian J. of Civil Engineering, Vol. 3, pp. 288-293.
- Gold, L.W., 1971, "Use of Ice Covers for Transportation," Canadian Geotech. J., Vol. 8, pp. 170-181.
- Hetenyi, M., 1947, Beams on Elastic Foundation, University of Michigan Press, Ann Arbor, Michigan.
- Hui, D. and Xirouckakis, P.C., 1981, Visco-elastic Deformations and Stresses of Floating Ice Plates, M.I.T. Dept. of Ocean Engineering Report 81-3.
- Kerr, A.D., 1983, "The Critical Velocities of a Load moving on a Floating Ice Plate that is Subjected to In-plane Forces," Cold Regions Science and Technology, Vol. 6, pp. 267-274.
- Kerr, A.D. and Palmer, W.T., 1972, "The Deformations and Stresses in Floating Ice Plates," Acta Mechanica, Vol. 15, pp. 57-72.

- Meyerhof, G.G., 1962, "Bearing Capacity of Floating Ice Sheets," Transaction ASCE, Vol. 127, Pt. 1, pp. 490-508.
- Michel, B., 1978, Ice Mechanics, Laval University Press, Quebec, Canada.
- Nevel, D.E., 1961, The Narrow Free Infinite Wedge on an Elastic Foundation, Cold Regions Research and Engineering Laboratory Report 79, Hanover, New Hampshire.
- Squire, V.A. and Dixon, T.W., 2000, "An Analytical Model for Wave Propagation across a Crack in an Ice Sheet," Int. J. of Offshore and Polar Engineering, Vol. 10, No. 3, pp. 173-176.
- Timoshenko, S. and Woinowski-Krieger, S., 1959, Theory of Plates and Shells, McGraw Hill Inc., New York.
- Voelker, R., 1992, "Eight Years of Performance Measurements aboard USCG Polar Class Icebreakers," SNAME Transaction, Vol. 100, pp. 123-131.



< 최 경 식 >



< 이 진 경 >



< 김 현 수 >



< 전 호 환 >