

工學碩士 學位論文

무한 빙판에서 쇄빙선박에 의한
쇄빙능력 산정에 관한 연구

A Study on Icebreaking Capability
of Ice-Strengthened Ships on Infinite Ice Plate

指導教授 崔 慶 植

2006年 2月

韓國海洋大學校 大學院

海 洋 開 發 工 學 科

李 振 勁

A Study on Icebreaking Capability of Ice-Strengthened Ships on Infinite Ice Plate

by

Jin-Kyoung Lee

Department of Ocean Development Engineering
Graduate School of Korea Maritime University

ABSTRACT

Natural resources development in Sakhalin area and the Sea of Okhotsk requires proper means of sea transportation from Russian Far East region and China. Sea routes in the Sea of Okhotsk are normally covered with sea ice of less than 1 m thickness from December to April and sea-going vessels should be equipped with sufficient icebreaking capability or at least ice-worthy hull structures.

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. 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 analytical solution for static load and observed pattern of ice sheet failure onboard an icebreaker. The meaning of sizes of ice rubble is discussed by comparing computed failure length with the characteristic length.

목 차

Abstract	.....	i
목 차	.....	ii
그림목차	.....	iii
표 목 차	.....	v
1. 서 론	.....	1
2. 무한 빙판의 굽힘파괴 거동	.....	3
2.1 탄성지지기반 위의 평판 해석	.....	4
2.2 탄성지지기반 위의 썩기보 해석	.....	13
3. 수치해석에 의한 쇄빙능력 산정	.....	16
3.1 충격하중에 의한 썩기보의 수치해석	.....	16
3.2 수치해석 결과	.....	21
4. 빙저항 산정 및 소프트웨어 “IceView”	.....	25
4.1 빙저항 산정식	.....	25
4.2 빙저항 산정 소프트웨어 “IceView”	.....	36
5. 결 론	.....	43
참고문헌	.....	45

그림 목 차

Fig. 2-1 Typical icebreaking pattern and side cusps

Fig. 2-2 Icebreaking pattern observed from the deck of USCGC POLAR SEA in level ice

Fig. 2-3 Curvatures of the ice plate and the free body diagram

Fig. 2-4 Failure model of the ice plate

Fig. 2-5 Idealization of ice plate as a wedge type ice beam

Fig. 2-6 Bending moment distribution in a wedge beam on elastic foundation (where $L=l_c$)

Fig. 3-1 Coordinate system and sign convention

Fig. 3-2 Wedge type model beam for sample calculation

Fig. 3-3 Bending moment variation at two positions of a model beam

Fig. 3-4 Bending moment variation at two positions of a model beam (detail)

Fig. 3-5 Failure length vs. ice thickness ($\phi = 30^\circ$ $L = 50m$)

Fig. 3-6 Failure time vs. ice thickness ($\phi = 30^\circ$ $L = 50m$)

Fig. 3-7 Vertical force vs. maximum ice thickness

Fig. 3-8 Non-dimensional failure load vs. non-dimensional area of distributed load, a for and infinite ice sheet

Fig. 3-9 Failure length vs. characteristic length

Fig. 4-1 Definition of angles

Fig. 4-2 Ice resistance vs. ship's speed based on Kashteljan's empirical formula with varying ice thickness

Fig. 4-3 Non-dimensional experimental continuous-mode ice resistance data vs. the product of non-dimensional beam and the volumetric number (Lewis and Edwards, 1970)

Fig. 4-4 Comparison of various continuous-mode ice resistance prediction methods with full-scale data (Lewis and Edwards, 1970)

Fig. 4-5 Non-dimensional ice resistance data of the Mackinaw vs. non-dimensional ship's speed (Edwards et al., 1972)

Fig. 4-6 Full-scale resistance data for CCGS Louis S. St. Laurent in snow covered ice with regression lines from combined data (Edwards et al., 1976)

Fig. 4-7 Analysis of Mackinaw data (Vance, 1975)

Fig. 4-8 Ice resistance vs. ship speed data for Mobile Bay

- Fig. 4-9 Estimated icebreaking resistance of a 60,000 DWT bulk carrier (Wartsila)
- Fig. 4-10 Estimated icebreaking resistance of a 60,000 DWT bulk carrier (ARCTEC)
- Fig. 4-11 Comparison between results from Eq. Low Friction and Eq. High Friction
and CCGS Pierre Radisson trials during 1978 (Spencer and Jones, 2001)
- Fig. 4-12 "IceView" ver 1.1 (Flowchart)
- Fig. 4-13 "IceView" ver 1.1 (Main)
- Fig. 4-14 "IceView" ver 1.1 (Ice Resistance)
- Fig. 4-15 "IceView" ver 1.1 (Open)
- Fig. 4-16 "IceView" ver 1.1 (Data)
- Fig. 4-17 "IceView" ver 1.1 (Calculation)
- Fig. 4-18 "IceView" ver 1.1 (Table)
- Fig. 4-19 "IceView" ver 1.1 (Graph)

표 목 차

Table 2-1 Maximum deflection of the ice plate under concentrated load

1. 서 론

알래스카, 캐나다 북부 그리고 시베리아 북부 연안지방을 포함하는 북극해 지역은 석유와 천연가스 등 각종의 천연자원이 풍부하게 매장된 것으로 알려져 있다. 더욱이 70년대 이후 북극자원의 개발이 활발해짐에 따라 채굴된 자원의 수송과 저장을 위한 배후거점 도시들이 북극해 연안을 따라 발달하고 있으며 또한 이들 지역과 동아시아, 북미, 유럽 등 중위도 소비지역을 연결하는 연안항로로서 북극해 항로가 개설되어 활용되고 있다. 이들 북극해 항로(Northern Sea Route, NSR)는 북극해 연안도시들에 대한 보급물자 수송의 목적에 사용될 뿐만 아니라 최근에는 동아시아와 대서양의 서유럽 국가를 연결하는 최단항로로서 범세계적인 무역루트로도 활용되는 추세이다.

그러나 북극해 항로는 빙해역이라는 열악한 빙상환경과 기후환경으로 일반 선박으로는 운항이 불가능하다. 이러한 빙해역 항로를 이용하기 위해서는 개수로의 유빙저항을 이겨낼 수 있는 내빙능력은 물론이고 얼음을 깨뜨리며 진행하기위한 쇄빙능력을 갖춘 쇄빙선박이 필요하다.

쇄빙선박에서 쇄빙능력이 우수하다고 할 때 이는 선박의 추진력에 의해 파괴시킬 수 있는 빙판의 두께가 큰 것을 의미한다. 물론 쇄빙능력이 좋다는 말이 선체의 쇄빙저항이 작다는 뜻으로도 받아들여 질 수 있으나 통상 쇄빙능력을 파괴시킬 수 있는 최대의 얼음 두께와 관련하여 생각한다. 쇄빙력은 선박이 빙판에 가하는 수직 하향력으로 계산되어 지므로 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 빙판의 크기 즉 파괴길이(failure length)와 빙판 두께의 상관관계를 조사하고 이를 여러 연구자들의 연구결과와 비교해 보았다.

쇄빙선박에서 빙판의 강도와 내하중 능력, 부서진 빙판의 크기를 결정하는 것이 중요한 이유는 선박의 쇄빙작용에 의해 빙판은 작은 빙판으로 부서지며 부서진 빙판은 선박의 측면과 밑면을 통과하여 선체 후미로 이동하면서 프로펠러와 선체 사이에 끼어들거나 프로펠러와 선체구조에 충격하중을 가하는 경우가 발생하기 때문이다. 이러한 프로펠러나 선체의 손상정도는 유입되어 온 빙판의 크기와 속도에 따라 결정된다.

탄성지지기반 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.

하중점을 중심으로 반경방향 1차균열이 형성된 빙판을 탄성지지기반 위의 썩기형 보로 취급하는 연구는 Nevel(1961)에 의해 처음 시도되었는데 그는 power series 를 사용하여 썩기형 보의 끝부분에 작용한 수직하중에 의해 유발되는 최대 굽힘모멘트의 위치와 그 크기를 구하였다. 이 연구는 탄성응답 자체에 관심을 두었기 때문에 최대 굽힘모멘트 발생위치를 썩기보가 파괴되는 위치와 연관시키지는 않았다.

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 썩기형 보의 굽힘 문제를 가정하였는데 본 연구에서는 쇄빙선박의 전진에 따른 수직방향의 충격하중에 의한 썩기형 빙판의 파괴와 동적 응답을 수치해석을 이용하여 구하였다. 여기서 썩기형 빙판에 작용한 굽힘모멘트에 의해 빙판의 어떤 위치에 발생한 최대 인장응력이 얼음의 굽힘강도에 도달할 때 그 부분에서 파단이 일어난다고 생각하여 부서진 빙판의 크기를 예측하였으며 이를 Nevel의 정적하중에 대한 계산 및 관측결과와 비교하였다.

쇄빙능력의 산정이 쇄빙선박이 평탄빙에서의 연속쇄빙 시 선박이 빙판에 가하는 수직하향력에 대한 해석이라면 빙저항은 선박의 전진에 반하는 수평방향의 저항성분으로 생각할 수 있다. 쇄빙선박 건조에 있어 기초가 되는 연구인 빙저항 산정은 쇄빙선박이 빙판을 깨뜨리며 전진하기 위하여 갖추어야 할 추진기관의 출력을 결정하기 위해서 필요한 사항이다.

본 논문의 4장에서는 60년대 후반부터 근래까지 발표된 빙저항 산정식을 정리하였다. 빙저항 산정은 많은 연구자들이 다루어온 주제이지만 얼음과 선체와의 상호작용에 불확실한 요소가 너무 많아 아직도 만족할 만큼 정확한 결과는 얻지 못하고 있다. 그리고 빙저항 산정식들이 각 연구자들이 확보한 몇몇 선박의 데이터만을 이용한 것이기 때문에 그와는 다른 선종 혹은 크기와 선형이 다른 선박에서는 적용하기에 부적합하다는 단점이 있다. 이러한 문제점을 해결하기 위하여 실무자들이 사용하기에 편리하도록 빙저항 산정 S/W인 “IceView”를 개발하였다. “IceView”는 비주얼 베이직을 이용하여 GUI 방식으로 쇄빙선박이 받는 빙저항을 계산하고, 도표, 그래프 등으로 나타내는 프로그램으로 여러 빙저항 산정식의 결과를 한 눈에 비교해 볼 수 있도록 하였다.

2. 무한 빙판의 굽힘파괴 거동

평탄빙에서의 쇄빙작용을 이해하기 위해서는 우선 쇄빙선박에 의해 빙판이 파괴되는 과정을 살펴 볼 필요가 있다. Fig. 2-1 에는 평탄빙에서의 전형적인 쇄빙형식을 보여주고 있다. 선박이 전진함에 따라 빙판에 충분한 크기의 수직방향 분력이 전해질 때까지 빙판을 누르게 되는데 이 힘은 선수부와 그 주변의 선각에 의해 빙판에 전달된다. 비교적 얇은 빙판의 경우 쇄빙작용은 주로 선수부에 의해 트림이 거의 없는 상태에서 진행되며 두꺼운 빙판의 경우는 선수부와 함께 선수측면부의 선각도 쇄빙작용에 중요한 역할을 담당한다.

선수부에서 전달된 수직하향력이 빙판에 과도한 굽힘작용을 주면 하중점을 중심으로 반경방향 균열이 전파되면서 빙판의 파괴과정이 시작된다. 이후 썩기형 빙판에 균열이 생길 때까지 빙판은 굽힘작용을 받으며, 결국 썩기보 형상의 빙판에 원주방향의 균열이 2차로 형성되어 빙판은 붕괴되며 다시 선박은 쇄빙을 위해 전진하는 과정이 되풀이 된다. 이 반복과정의 특성은 빙판의 두께와 선박의 속도, 수직하중의 크기 등에 의해 좌우되는 것으로 알려져 있다. 선박이 진행하는 동안 부서진 파편은 선측하부로 밀려나 선미부로 빠지거나 기존 빙판의 하부로 잠기며 개수로를 형성한다. 이상적인 경우 선수각이 작은 쇄빙선일수록 수직하중이 크기 때문에 더 큰 빙판을 형성한다. 한편 선체의 측면에서 부서진 빙편은 보통 반달모양(cusp)의 형상을 가지게 된다 (Fig. 2-2).

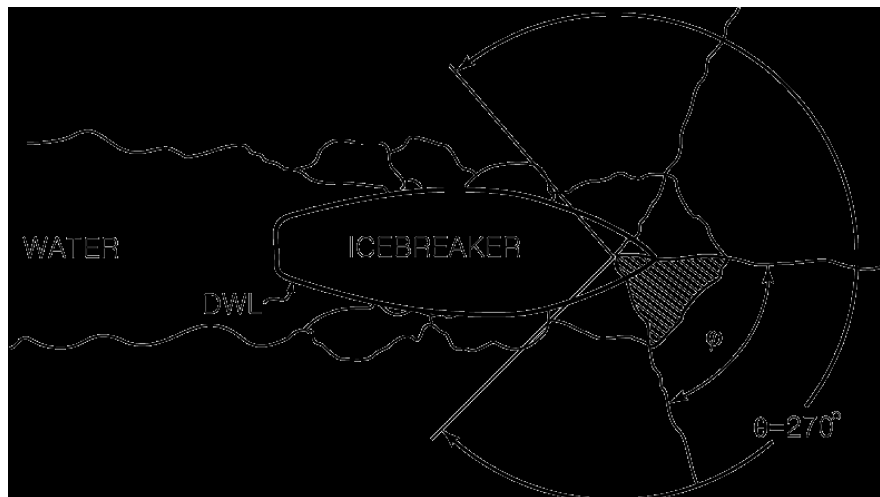


Fig. 2-1 Typical icebreaking pattern and side cusps

Korzhavin(1962)은 단순화된 가정하에 얼음의 굽힘파괴 양식을 탄성지지기반(elastic foundation) 위 평판의 거동에 관한 이론을 사용하여 해석한 바 있다. 원래 해석은 경사진 해양구조물에 빙판이 부딪치는 경우에 대한 것이지만 얼음의 굽힘파괴 양식에 관한 한 쇄빙선의 문제와 유사한 것으로 볼 수 있고 이러한 탄성지지기반 위의 무한 평판(infinite plate)으로 취급하는 해석

방법은 이후에도 계속 얼음의 재료특성이나 하중의 형태가 조금씩 바뀌어져도 그대로 적용되어 오고 있다.

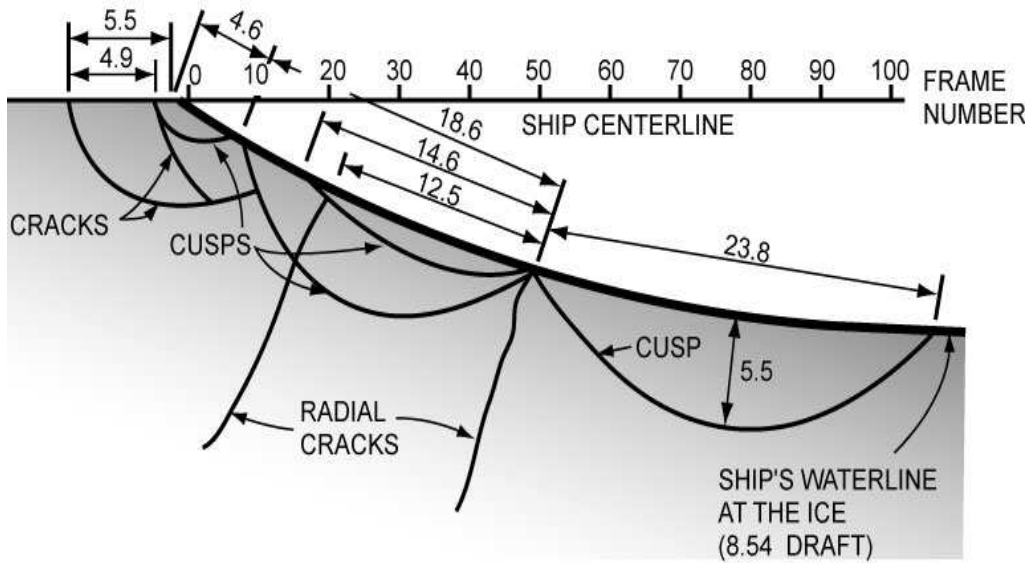


Fig. 2-2 Icebreaking pattern observed from the deck of USCGC POLAR SEA in level ice (Redrawn from Voelker et al., 1992)

2.1 탄성지지기반 위의 평판(plate) 해석

Fig. 2-3 과 같이 처짐이 없는 무한 평판의 중앙에 원점을 두고 중심에서 반경 방향으로 r 만큼 떨어진 지점에 아래로 향하는 처짐의 크기를 w 라 한다. 이 처짐곡선에 접한 A지점에서의 곡률은 다음 식으로 나타낼 수 있다.

$$\frac{1}{\rho_r} = -\frac{d^2w}{dr^2} = \frac{d\psi}{dr} \quad (2-1)$$

여기서 ψ 는 점 A에서의 처짐면의 법선과 수직축 OB와의 사이각이다. $\frac{1}{\rho_r}$ 은 처짐면 상의 점 A의 주곡률이라 할 수 있다.

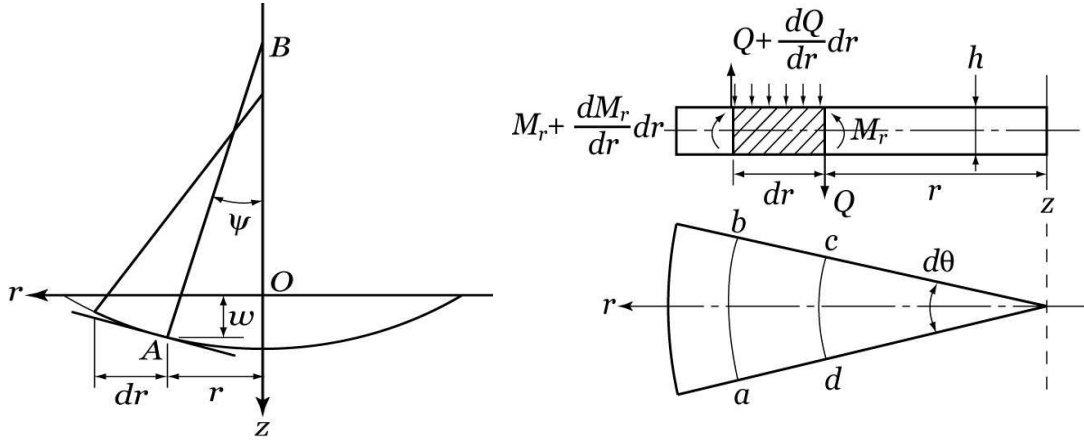


Fig. 2-3 Curvatures of the ice plate and the free body diagram

두 번째의 주곡률은 법선 AB를 통과하여 rz 평면에 수직인 단면상에서 $\frac{1}{\rho_t}$ 로 표시된다.

여기서 t 는 원주방향을 나타낸다.

$$\frac{1}{\rho_t} = -\frac{1}{r} \frac{dw}{dr} = \frac{\psi}{r} \quad (2-2)$$

빙판의 처짐곡선의 단면에 있고 중립축에서 z 만큼 떨어진 지점의 반경방향 (r)과 원주방향 (t) 의 변형도는 다음과 같다.

$$\epsilon_r = \frac{z}{\rho_r} \quad (2-3)$$

$$\epsilon_t = \frac{z}{\rho_t} \quad (2-4)$$

그리고 Hooke의 법칙에 따라 반경방향(r)과 원주방향(t)의 응력은 다음과 같다.

$$\sigma_r = \frac{Ez}{(1-\mu^2)} \left[\frac{1}{\rho_r} + \mu \frac{1}{\rho_t} \right] \quad (2-5)$$

$$\sigma_t = \frac{Ez}{(1-\mu^2)} \left[\frac{1}{\rho_t} + \mu \frac{1}{\rho_r} \right] \quad (2-6)$$

여기서 E 는 탄성계수이고 μ 는 Poisson 비이다.

곡률반경 ρ_t 가 포함된 단면을 따라서 단위길이 당 굽힘모멘트 M_r 가 작용하고 rz 단면을 따라서는 단위길이 당 굽힘모멘트 M_t 가 작용한다. 빙판 두께를 h 라 하면 전체 모멘트의 합은 다음과 같이 표현된다.

$$\int_{-\frac{h}{2}}^{+\frac{h}{2}} \sigma_r z r d\theta dz = M_r r d\theta \quad (2-7)$$

$$\int_{-\frac{h}{2}}^{+\frac{h}{2}} \sigma_t z dr dz = M_t dr \quad (2-8)$$

이상의 식을 대입하여 정리하면 처짐과 모멘트 사이의 식이 얻어진다.

$$M_r = -D \left(\frac{d^2 w}{dr^2} + \frac{\mu}{r} \frac{dw}{dr} \right) \quad (2-9)$$

$$M_t = -D \left(\frac{1}{r} \frac{dw}{dr} + \mu \frac{d^2 w}{dr^2} \right) \quad (2-10)$$

여기서 D 는 단위폭 평판의 굽힘강성(flexural rigidity)을 나타낸다.

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

한편 미소요소 $a-b-c-d$ 에 작용하는 모든 힘과 모멘트의 합으로부터 처짐 w 만으로 표시되는 평형방정식을 얻을 수 있다. 요소의 변 cd 에 작용하는 모멘트는 $M_r r d\theta$ 이고 변 ab 에 작용하는 모멘트는 $\left(M_r + \frac{dM_r}{dr} dr \right) (r + dr) d\theta$ 이다. 그리고 요소의 변 ad 와 bc 에 작용하는 모멘트는 각각 $M_t dr$ 로 평면 roz 방향으로의 성분은 $M_t dr d\theta$ 가 된다. 한편 요소의 변 cd, ab 에 작용하는 전단력은 각각 $Q r d\theta$ 와 $\left(Q + \frac{dQ}{dr} dr \right) (r + dr) d\theta$ 로서 미소량의 제곱항을 무시한다면 rz 평면 내에서 크기가 $Q r d\theta dr$ 인 모멘트를 발생한다. 변 ad 와 bc 에 작용하는 전단력은 서로 대칭이기 때문에 그로 인한 모멘트는 0 이다. 이상 네 종류의 모멘트와 전단력에 의한 미소요소 $a-b-c-d$ 의 평형방정식은 다음과 같다.

$$\left(M_r + \frac{dM_r}{dr} dr \right) (r + dr) d\theta - M_r r d\theta - M_t dr d\theta + Q r d\theta dr = 0 \quad (2-11)$$

이 식에서 제곱항의 미소량을 무시하고 정리하면

$$M_r + \frac{dM_r}{dr}r - M_t + Qr = 0 \quad (2-12)$$

여기서 M_r 과 M_t 에 (2-9)식과 (2-10)식을 대입하면

$$\frac{d^3w}{dr^3} + \frac{1}{r} \frac{d^2w}{dr^2} - \frac{1}{r^2} \frac{dw}{dr} = \frac{Q}{D} \quad (2-13)$$

하중의 세기 q 인 힘이 반경 r 위치의 원판 위에 분포하면 전단력 Q 와는 다음과 같은 관계로 표현된다.

$$Q2\pi r = \int_0^r q \cdot 2\pi r dr \quad (2-14)$$

이것을 (2-13)식에 대입해 양변을 r 로 미분하면 원판이 하중 q 를 받을 때의 처짐에 관한 미분방정식을 얻게 된다.

$$\left(\frac{d^2}{dr^2} + \frac{1}{r} \frac{d}{dr} \right) \left(\frac{d^2w}{dr^2} + \frac{1}{r} \frac{dw}{dr} \right) = \frac{q}{D} \quad (2-15)$$

여기서 연산자 $\nabla^2 = \frac{d^2}{dr^2} + \frac{1}{r} \frac{d}{dr}$ 를 이용하면 (2-15)식은 다음과 같이 된다.

$$\nabla^4 w = \frac{q}{D} \quad (2-16)$$

직교좌표계를 이용하면 (2-15)식은 다음과 같이 표현된다.

$$\frac{\partial^4 w}{\partial x^4} + 2 \frac{\partial^4 w}{\partial x^2 \partial y^2} + \frac{\partial^4 w}{\partial y^4} = \frac{q}{D} \quad (2-17)$$

여기서 물위에 떠 있는 빙판의 부력을 탄성지지기반으로 나타내면 빙판이 물에 잠긴 깊이, 즉 처짐의 크기 w 에 비례하는 부력을 받게 되므로 (2-15)식은 다음 식으로 나타낼 수 있다. 통상 지반계수(스프링상수)로 $k = \rho_w g \approx 1000\text{kg/m}^3$ 을 사용한다.

$$\left(\frac{d^2}{dr^2} + \frac{1}{r} \frac{d}{dr} \right) \left(\frac{d^2w}{dr^2} + \frac{1}{r} \frac{dw}{dr} \right) = \frac{q - kw}{D} \quad (2-18)$$

이 미분방정식의 일반해는 다음과 같이 구할 수 있다. 먼저 (2-18)식을 (2-15)식의 형태로

변형시킨다.

$$\nabla^4 w = \frac{k}{D} \left(\frac{q}{k} - w \right) \quad (2-19)$$

여기서 $\bar{w} = w - \frac{q}{k}$ 로 두면 \bar{w} 로 표시되는 미분방정식 (2-20)식을 얻게 된다.

$$\nabla^4 \bar{w} + \frac{k}{D} \bar{w} = 0 \quad (2-20)$$

한편 다음 (2-21)식으로 정의되는 빙판의 특성길이 l_c (characteristic length)와 반경에 대한 무차원 길이 $\chi = \frac{r}{l_c}$ 를 사용하여 \bar{w} , r 을 무차원화 시킬 수 있다.

$$l_c = \sqrt[4]{\frac{D}{k}} = \sqrt[4]{\frac{1}{k} \frac{Eh^3}{12(1-\mu^2)}} = \sqrt[4]{\frac{EI}{k(1-\mu^2)}} \quad (2-21)$$

이상 l_c, \bar{w}, χ 을 사용하면 다음 식을 얻는다.

$$\nabla_{\chi}^4 \bar{w} + \bar{w} = 0 \quad (2-22)$$

이 Bessel 방정식의 일반해는 Kelvin 함수인 $ber(\chi)$, $bei(\chi)$, $ker(\chi)$, $kei(\chi)$ 의 결합으로 표현할 수 있다.

$$\bar{w} = a_1 ber(\chi) + a_2 bei(\chi) + a_3 ker(\chi) + a_4 kei(\chi) \quad (2-23)$$

따라서 \bar{w} 와 w 관계를 이용하면 다음과 같은 일반해를 얻는다.

$$w = A_1 ber(\chi) + A_2 bei(\chi) + A_3 ker(\chi) + A_4 kei(\chi) + \frac{q}{k} \quad (2-24)$$

여기서 계수 A_1, A_2, A_3, A_4 는 빙판의 경계조건으로부터 결정되는 상수이다.

1) 빙판의 중앙에 집중하중이 작용하는 경우

무한 빙판의 중앙에 집중하중 P 가 작용하는 경우 식(2-24)는 다음 경계조건을 만족하여야 한다.

- 1) 하중점 $r = 0$ 에서 처짐 w 는 유한한 값이다. $\rightarrow A_3 = 0$
- 2) 무한 원방 $r = \infty$ 에서 처짐은 0 이다. $\rightarrow A_1 = A_2 = 0$
- 3) 하중점 이외의 지점 $r > 0$ 에서 하중은 $q = 0$ 이다.

이상 3개의 조건에서 다음 식을 얻는다.

$$w = A_4 \overline{kei}(\chi) \quad (2-25)$$

A_4 는 하중점 주위의 작은 원통면에 분포하는 전단력의 합이 P 와 같다는 조건으로부터 얻어진다.

$$Q = \frac{DA_4}{l_c^3} \overline{ker}^{(1)}(\chi) \quad (2-26)$$

$$P = 2\pi r \cdot \lim_{\chi \rightarrow 0} Q = -\frac{2\pi D}{l_c^2} A_4 \quad (2-27)$$

따라서

$$A_4 = -\frac{Pl_c^2}{2\pi D} \quad (2-28)$$

이고

$$w = -\frac{Pl_c^2}{2\pi D} \overline{kei}(\chi) \quad (2-29)$$

최대 처짐은 집중하중이 작용한 위치에 생기며 그 크기는 다음과 같다.

$$w_{\max} = \frac{Pl_c^2}{8D} \quad (2-30)$$

$$w_{\max} = \frac{P\sqrt{\frac{D}{k}}}{8D} = 0.433P\sqrt{\frac{1-\mu^2}{\rho_w g E h^3}} \quad (2-31)$$

여기서 빙판의 처짐은 집중하중 P 의 크기에 비례하고 빙판 두께의 $-3/2$ 승 즉 $h^{-3/2}$ 에 비례함을 알 수 있다. 거꾸로 빙판의 처짐을 실험을 통해 측정할 수 있다면 (2-31)식을 이용하여 탄성계수 E 를 구할 수 있다.

$$E = \frac{0.1875(1-\mu^2)}{\rho_w g h^3} \left[\frac{P}{w_{\max}} \right]^2 \quad (2-32)$$

굽힘모멘트와 전단력은 빙판의 처짐에 대한 (2-29)식을 이용하여 구할 수 있다.

$$M_r = \frac{P}{2\pi} \left(kei^{(2)}(\chi) + \frac{\mu}{\chi} kei^{(1)}(\chi) \right) \quad (2-33)$$

$$M_t = \frac{P}{2\pi} \left(\frac{1}{\chi} kei^{(2)}(\chi) + \mu kei^{(1)}(\chi) \right) \quad (2-34)$$

$$Q = -\frac{P}{2\pi l_c} kei^{(1)}(\chi) \quad (2-35)$$

여기서 첨자 (1), (2) 는 각각 한 번 및 두 번 미분을 의미한다. 식(2-31)로부터 Table 2-1 과 같은 결과를 얻게 되는데 여기서는 $k = \rho_w g \approx 1000\text{kg/m}^3$ 및 $\mu = 0.3$ 을 사용하였다.

Table 2-1 Maximum deflection of the ice plate under concentrated load

$E(\text{kg}/\text{cm}^2)$							
	100.	200.	500.	1000.	5000.	10000.	15000.
$h(\text{cm})$	$l_c(\text{m})$						
1.000	0.0968	0.116	0.146	0.174	0.260	0.309	0.342
2.000	0.165	0.196	0.246	0.293	0.437	0.520	0.576
3.000	0.223	0.265	0.333	0.397	0.593	0.705	0.780
4.000	0.277	0.329	0.414	0.492	0.736	0.875	0.968
5.000	0.327	0.389	0.489	0.582	0.870	1.034	1.145
6.000	0.375	0.446	0.561	0.667	0.997	1.186	1.312
7.000	0.421	0.501	0.630	0.749	1.119	1.331	1.473
8.000	.0465	0.553	0.696	0.827	1.237	1.472	1.629
9.000	0.508	0.604	0.760	0.904	1.352	1.507	1.779
10.000	0.550	0.654	0.823	0.978	1.463	1.740	1.925
20.000	0.925	1.100	1.383	1.645	2.460	2.926	3.238
40.000	1.556	1.850	2.327	2.767	4.137	4.920	5.445
60.000	2.109	2.508	3.154	3.750	5.608	6.69	7.381
80.000	2.617	3.112	3.913	4.653	6.958	8.275	9.158
100.000	3.093	3.679	4.626	5.501	8.226	9.783	10.826
150.000	4.193	4.986	6.270	7.456	11.150	13.259	14.674
200.000	5.203	6.187	7.780	9.252	13.835	16.452	18.207
250.000	6.150	7.314	9.917	10.937	16.355	19.449	21.524
300.000	7.052	8.386	10.545	12.540	18.751	22.229	24.678
	$w_{\max}/P(\text{cm}/\text{ton})$						
1.00000	1306.19980	923.62274	584.15031	413.05665	184.72455	130.61998	106.65077
2.00000	461.81137	326.54995	206.52832	146.03758	65.30999	46.18114	37.70674
3.00000	251.37827	177.75128	112.41978	79.49279	35.55026	25.13783	20.52495
4.00000	163.27498	115.45284	73.01879	51.63208	23.09057	16.32750	13.33135
5.00000	116.83006	82.61133	52.24799	36.94491	16.52227	11.68301	9.51913
6.00000	88.87564	62.84457	39.74639	28.10494	12.56891	8.88756	7.25667
7.00000	70.52816	49.87094	31.54115	22.30296	9.97419	7.05282	5.75860
8.00000	57.72642	40.81874	25.63520	18.25470	8.16375	5.77264	4.71334
9.00000	48.37777	34.20825	21.63520	15.29839	6.84165	4.83778	3.95003
10.00000	41.30566	29.20752	18.47245	13.06200	5.84150	4.13057	3.37259
20.00000	14.60376	10.32642	6.53100	4.61811	2.06528	1.46038	1.19239
40.00000	5.16321	3.65094	2.30906	1.63275	0.73019	0.51632	0.42157
60.00000	2.81049	1.98732	1.25689	0.88876	0.39746	0.28105	0.22948
80.00000	1.82547	1.29080	0.81637	0.57726	0.25816	0.18255	0.14905
100.00000	1.30620	0.92362	0.58415	0.41306	0.18472	0.13062	0.10665
150.00000	0.71101	0.50276	0.31797	0.22484	0.10055	0.07110	0.05805
200.00000	0.46181	0.32655	0.20653	0.14604	0.06531	0.04618	0.03771
250.00000	0.33045	0.23366	0.14778	0.10450	0.04673	0.03304	0.02698
300.00000	0.25138	0.17775	0.11242	0.07949	0.03555	0.02514	0.02052

2) 빙판의 중앙에 원형의 분포하중이 작용하는 경우

무한 빙판의 반경 a 안에 분포하중 q 가 작용하는 경우 빙판의 처짐은 다음 식으로 계산된다.

1) $r < a$ ($\chi < \alpha$) 일 경우 (여기서 $\alpha = a/l_c$)

$$w = \frac{q}{k} + \frac{q}{k} \alpha (ker^{(1)} \alpha ber \chi - kei^{(1)} \alpha bei \chi) \quad (2-36)$$

2) $r > a$ ($\chi > \alpha$) 일 경우

$$w = \frac{q}{k} \alpha (ber^{(1)} \alpha ker \chi - bei^{(1)} \alpha kei \chi) \quad (2-37)$$

빙판의 최대 처짐은 하중의 중심점 ($r = 0 : \chi = 0$) 에서 발생하며 그 크기는

$$w_{max} = \frac{P[1 + \alpha ker^{(1)} \alpha]}{\pi k \alpha^2 l_c^2} \quad (2-38)$$

이 된다. 여기서 $P = \pi a^2 q$ 는 전체 하중을 나타낸다. 최대 굽힘 모멘트 역시 하중의 중심점 ($r = 0$)에서 생기고, 그 크기는 다음과 같다.

$$M_{rmax} = M_{tmax} = \frac{(1 + \mu) kei^{(1)} \alpha \cdot P}{2\pi \alpha} \quad (2-39)$$

한편 이 빙판의 굽힘강도를 σ_f 라 하면 단위폭 ($b = 1$)에 대한 굽힘 모멘트는 다음 식으로 계산된다.

$$M = \frac{1}{6} h^2 \sigma_f \quad (2-40)$$

이상 (2-39)식과 (2-40)식으로부터 빙판을 굽힘에 의해 파괴시키는 하중을 다음과 같이 계산할 수 있다.

$$P = \frac{\pi \alpha \sigma_f h^2}{3(1 + \mu) kei^{(1)} \alpha} \quad (2-41)$$

2.2 탄성지지기반 위의 썰기보 해석

무한한 빙판에 하중이 작용하는 경우 하중이 증가함에 따라 빙판의 처짐이 점차 증가하는데 빙판의 하부에 인장력이 발생하면서 그 결과 먼저 반경방향(radial direction)의 균열이 형성된다. 그리고 하중이 더욱 증가하면 굽힘에 의해 빙판의 상부에 인장력이 발생하면서 두 번째로 반경방향(circumferential direction)의 균열이 발생하면서 최종적으로 빙판은 파괴된다 (Fig. 2-4). 따라서 빙판이 받을 수 있는 최대하중은 그림과 같이 1차로 반경방향의 균열이 발생 후 생겨난 개별적인 썰기보가 받을 수 있는 최대하중으로 볼 수 있다. 이런 이유로 썰기형 빙판의 끝에 분포하중이 작용하는 경우로 가정하여 빙판의 내하중 능력을 검토하는 경우가 많이 있다 (Nevel, 1961; Fig. 2-5).

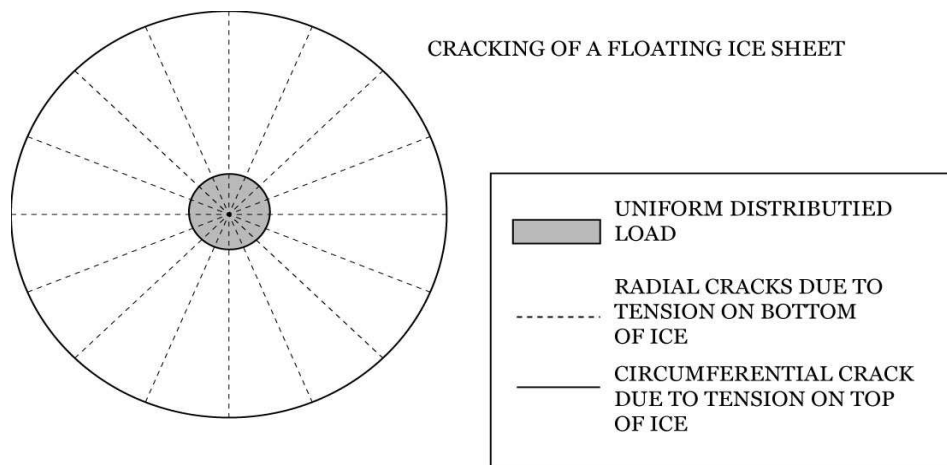


Fig. 2-4 Failure model of the ice plate

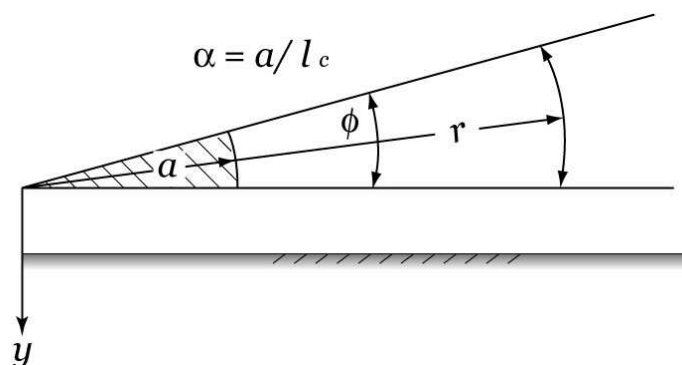


Fig. 2-5 Idealization of ice plate as a wedge type ice beam

이 경우 빙판의 처짐에 대한 지배방정식은 다음과 같다.

$$\frac{d^4 w}{d\chi^4} + \frac{2}{\chi} \frac{d^3 w}{d\chi^3} + w = \frac{q}{k} \quad (2-42)$$

여기서 $\chi = r/l_c$, r 은 반경방향의 거리이고 $\alpha = a/l_c$, a 는 하중반경이다. 그리고 식 (2-42)를 풀기 위해 도입되는 변수로 특성길이(characteristic length)는 다음과 같이 정의된다.

$$l_c = \sqrt[4]{\frac{Eh^3}{12k}} \quad (2-43)$$

따라서 식(2-42)의 해는 다음 식으로 표현된다.

$$w = \left[aDn_0(\chi) + bDn_1(\chi) + cDn_2(\chi) + dDn_3(\chi) + \frac{2}{\alpha^2} \right] \frac{P}{2 \tan(\frac{\phi}{2}) k l_c^2} \quad (2-44)$$

여기서 P : 췌기보에 작용한 전체 하중

ϕ : 췌기보의 각도

$2 \tan(\phi/2)$: $r = 1$ 에서 췌기보의 폭

$Dn_0(\chi) \sim Dn_3(\chi)$: Nevel(1961)이 정의한 함수.

$a \sim d$: 경계조건에 의해 결정되는 상수

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 빙판의 크기가 커진다는 것을 의미한다.

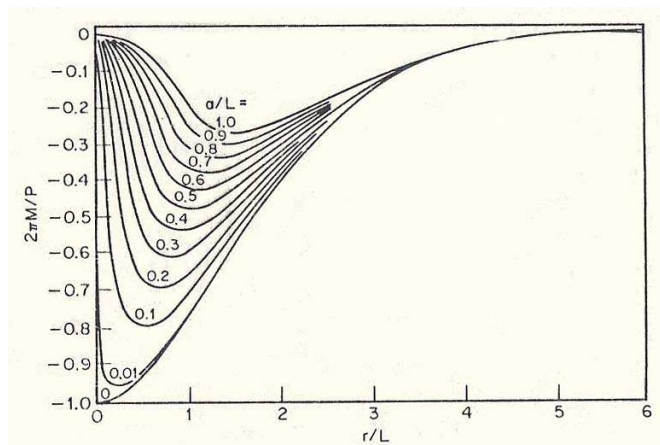


Fig. 2-6 Bending moment distribution in a wedge beam on elastic foundation where $L = l_c$ (Redrawn from Nevel, 1961)

한편 하중점을 중심으로 반경방향 균열이 전파된 빙판을 탄성지지된 썩기형 보로 취급하는 연구가 Nevel(1961)에 의해 수행되었는데 그는 power series 를 사용하여 썩기형 보의 끝부분에 작용한 수직하중에 의해 유발되는 최대 굽힘 모멘트의 위치와 크기를 근사적으로 구하였다. 그러나 이 연구에서는 탄성응답 자체에 관심을 두었기 때문에 최대 굽힘 모멘트의 위치와 썩기보가 파괴되는 위치를 연관시키지 않았다. 이와 유사하게 탄성지지된 평판의 이론을 사용하여 얼음의 내하중 능력 (bearing capacity) 을 추정하려는 연구가 보고된 바 있는데 이러한 대부분의 연구들은 정적인 하중이나 혹은 준정적하중이 빙판에 작용하는 경우를 주로 다루고 있다 (Kerr, 1978).

3. 수치해석에 의한 쇄빙능력 산정

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 접촉이후 짧은 시간 동안에 최대치에 이르렀다가 균열의 전파 그리고 빙판의 파괴와 함께 급격히 감소되는 충격하중으로 생각할 수 있다. 또한 수평하중과 수직하중이 동시에 존재함으로써 빙판의 응력분포를 변화시킬 수도 있다.

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

3.1 충격하중에 의한 썩기보의 수치해석

본 논문에서는 쇄빙선박이 평탄빙에서 연속쇄빙을 하고 있는 상황을 탄성지지기반을 가진 기초 위에 놓인 유한 길이의 썩기형 변단면보의 문제로 가정한다. 이 문제는 선박의 전진속도에 따른 수직방향의 충격하중에 의한 탄성지지기반에 놓인 Timoshenko 보의 2차원(보의 길이와 시간에 따른) 동적응답을 구하는 문제로 귀결된다. 여기에서 얼음보에 작용한 굽힘 모멘트에 의해 어떤 위치에서 발생한 최대 인장응력이 얼음의 굽힘 파괴강도에 도달한다면 그 부분에서 파단이 일어날 가능성이 가장 높다고 판단할 수 있다. 여기에서 탄성기반의 복원력은 변위에 비례하고 기진력은 시간에 따라 변하는 함수로 생각한다.

수치해석을 위해 택한 좌표축과 변수들의 정의는 Fig. 3-1 에서 보여주고 있다. 그림과 같이 좌표축을 선정하고 변단면보의 미소요소 dx 를 따로 떼어 자유물체도를 그리면 미소요소에 대한 운동방정식은 다음과 같이 얻어진다.

Dynamic Force Equilibrium:

$$m\ddot{y} + ky - \frac{\partial V}{\partial x} = F(x, t) \quad (3-1)$$

Dynamic Moment Equilibrium:

$$I_z \ddot{\Phi} - V + \frac{\partial M}{\partial x} = 0 \quad (3-2)$$

Moment-Curvature Relation:

$$M = -EI \frac{\partial \Phi}{\partial x} \quad (3-3)$$

Shear-Slope Relation:

$$V = \kappa AG \gamma \quad (3-4)$$

$$\frac{\partial y}{\partial x} = \gamma + \Phi \quad (3-5)$$

여기서

- $m(x)$: 보의 단위길이당 유효질량 (effective mass)
- k : 탄성지지기반의 단위길이당 강성계수 ($= \rho_w g$)
- $I_z(x)$: 단면의 회전관성모멘트
- $EI(x)$: 굽힘강성 (bending rigidity)
- $\kappa AG(x)$: 전단강성 (shear rigidity)
- $F(x, t)$: 단위길이당 하중 (external force)
- $y(x, t)$: 변위 (displacement)
- $\Phi(x, t)$: 굽힘에 의한 각변위 (bending slope)
- $\gamma(x, t)$: 전단에 의한 각변위 (shear slope)
- $M(x, t)$: 굽힘모멘트 (bending moment)
- $V(x, t)$: 전단력 (shear force)

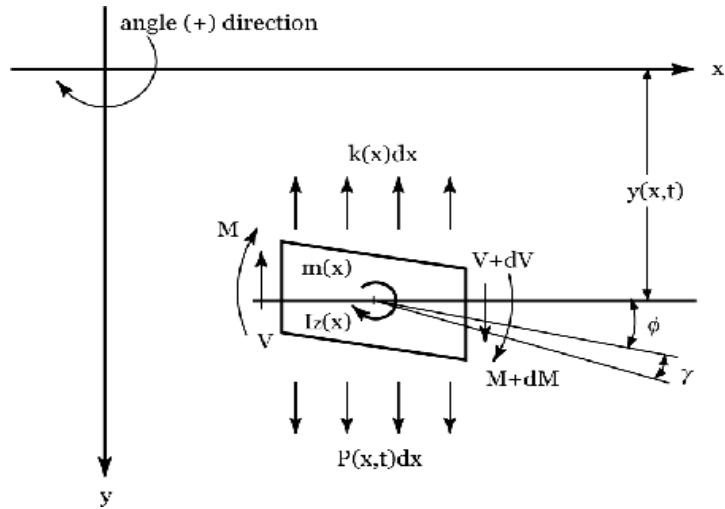


Fig. 3-1 Coordinate system and sign convention

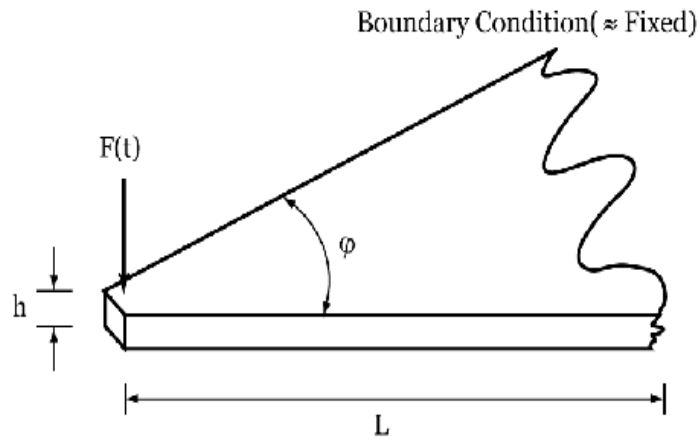


Fig. 3-2 Wedge type model beam for sample calculation

위에 정의된 변단면보의 탄성 및 관성 특성치들은 보의 길이에 따라서 변하기 때문에 앞서의 운동방정식 식(3-1) ~ 식(3-5)의 엄밀해는 균일단면보와 같은 특수조건이 아니면 구할 수 없다. 따라서 수치적인 방법으로 본 연구에서는 유한차분법(finite difference method)을 이용하였다. 연속계에 대한 미분방정식을 동등한 차분식으로 나타내기 위해서는 연속계를 집중질량계로 이산화시켜야 하는데 가장 손쉬운 방법은 분할된 요소의 중앙에 보의 특성치들이 집중되어 있다고 보는 것이다. 즉 변단면보를 n 개의 등간격 요소로 분할하고 분할된 단면을 $n = 0, 1, 2 \dots$ (station) 라 표시하고 각 단면 사이의 중간점을 half-station 이라 표시하면 보의 특성치들은 이들 station 과 half-station 위치에 집중된다.

유한차분법은 경계치문제로 표현된 미분방정식의 해를 근사적으로 구하는 수치해석적 방법의

하나로 미분방정식을 등가의 연립 대수방정식으로 바꾸어 해를 구하는 방법이다. 앞서 구한 운동방정식은 독립변수 2개 (x, t)의 연립 편미분방정식이므로 차분식 역시 보의 길이와 시간에 대해 모두 적용된다. 특히 시간에 대한 차분식은 초기조건을 갖는 시간적분을 의미하는데 Runge-Kutta 계산법을 사용하여 시간의 변화에 따른 보의 동적응답을 계산하였다. 본 연구와 같이 시간에 따른 비정상 수치해석 문제를 취급함에 있어서 보통 시간간격을 작게 잡거나 implicit method 에 의한 시간적분을 택하게 되지만, 수치결과의 안정성(stability) 문제와 함께 계산의 정확성, 신속성을 동시에 고려해야 하는 어려움이 발생하기 때문에 적절한 시간적분법을 선택해야 할 필요가 있다. 여기서 운동방정식을 푸는데 Runge-Kutta 계산법을 사용한 이유는 이 방법이 explicit method 이기 때문에 계산량을 줄일 수 있으면서 또한 보통의 Euler 차분식에 의한 방법보다 시간간격을 비교적 크게 취할 수 있는 장점이 있기 때문이다.

앞에서 주어진 운동방정식 (3-1)식 ~ (3-5)식을 수치적으로 풀어서 빙판의 충격응답과 파괴의 특성을 해석하기 위해 본 연구에서는 해빙에 관해 다음과 같은 재료특성치들을 선택하였다.

$$\text{해빙의 밀도 : } \rho = 918 \text{ kg/m}^3$$

$$\text{해빙의 굽힘강도 : } \sigma_f = 0.5 \text{ MPa}$$

$$\text{탄성계수 : } E = 2.0 \text{ GPa}$$

$$\text{Poisson's ratio : } \nu = 0.33$$

$$\text{전단탄성계수 : } G = 0.767 \text{ GPa}$$

$$\text{Equivalent Shear Area Coefficient : } \kappa = 0.851$$

$$\text{얼음과 선체 사이의 동마찰계수 : } \mu = 0.2$$

$$\text{해수의 밀도 : } \rho_w = 1,025 \text{ kg/m}^3$$

한편 빙판의 두께 h 와 길이 L , 사이각 ϕ 등 췌기형 변단면보의 제원과 선수부의 형상 즉 선수 각 및 충격하중의 크기와 지속시간에 관한 정보는 parametric study 를 통해 수치계산에 도입되도록 하였다. 선수부의 형상과 쇄빙능력 그리고 빙판의 파괴특성 사이의 관계를 파악하기 위하여 우선 대표적인 조건을 선택하여 계산을 수행하였다. 췌기보의 길이는 50 m 와 100 m 를 선택하였는데 이 수치는 실제 무한한 길이의 평탄빙에서의 쇄빙시 전파되는 반경방향 균열의 길이를 가정하여 결정하였고 따라서 그 경계조건으로 하중이 작용하는 지점은 자유단(free end)을 가정하고 췌기보의 뿌리부분은 고정단(fixed end)을 가정하였다. 탄성지지된 외팔얼음보에서 고정단이라는 가정이 실제 현상을 얼마만큼 정확히 대변하는지에 대해서는 명확히 밝혀진 것은 없으나 단순지지에서 완전고정 사이의 중간정도의 구속조건을 가지는 것으로 추측된다. 한편 췌기형 보의 사이각으로 30° 와 45° 그리고 60°를 선택하였다. 빙판이 반경방향의 균열에 의해 형성되는 부채꼴 형상의 사이각으로 Kashteljan et al.(1968) 은 현장관측을 통해 약 67.5° 정도의 값을 보고하고 있다.

수치계산의 예로서 Fig. 3-3 과 Fig. 3-4 는 사이각 60° 길이 50 m 두께 1 m 의 빙판에 충격하

중 0.2 MN 이 0.25초 동안 작용할 때 췌기보의 두 지점(끝부분에서 2 m 와 10 m 지점)에서 계산되는 굽힘 모멘트의 변화를 보여주고 있다. 계산된 굽힘 모멘트가 빙판의 상부에 균열을 발생시킬 수 있는 크기에 이르는 순간 빙판은 붕괴되는 것으로 생각하였다. 이 경우 보의 끝부분으로부터 약 2 m 위치에 시간 0.004초 지난 후 최초의 균열이 발생하고 빙판은 파괴에 이르는 것으로 계산되었다.

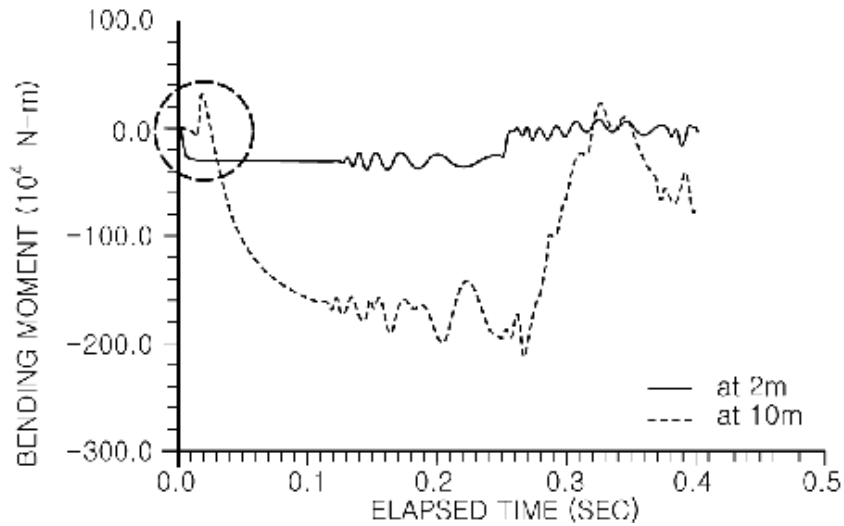


Fig. 3-3 Bending moment variation at two positions of a model beam

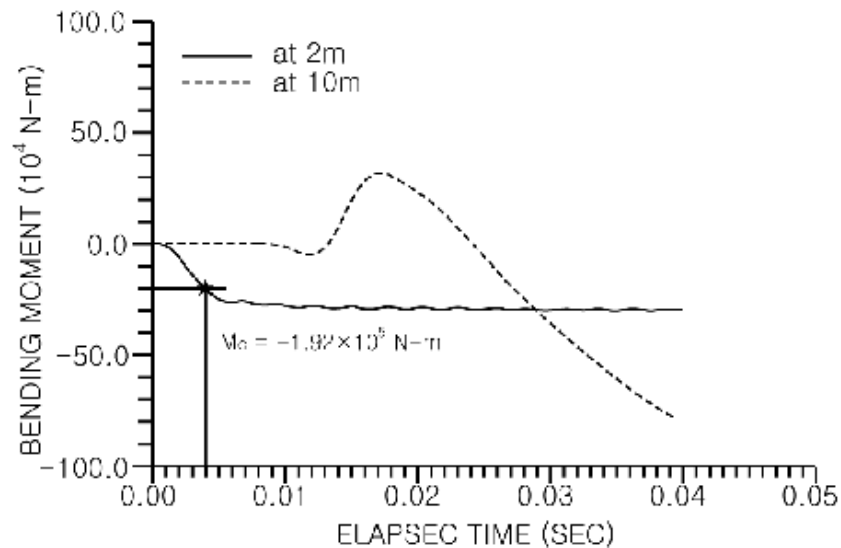


Fig. 3-4 Bending moment variation at two positions of a model beam (detail)

3.2 수치해석 결과

Fig. 3-5 에서는 사이각 30° 에 50 m 길이의 썰기보에 대하여 빙판의 두께를 변화시키면서 굽힘파괴가 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.

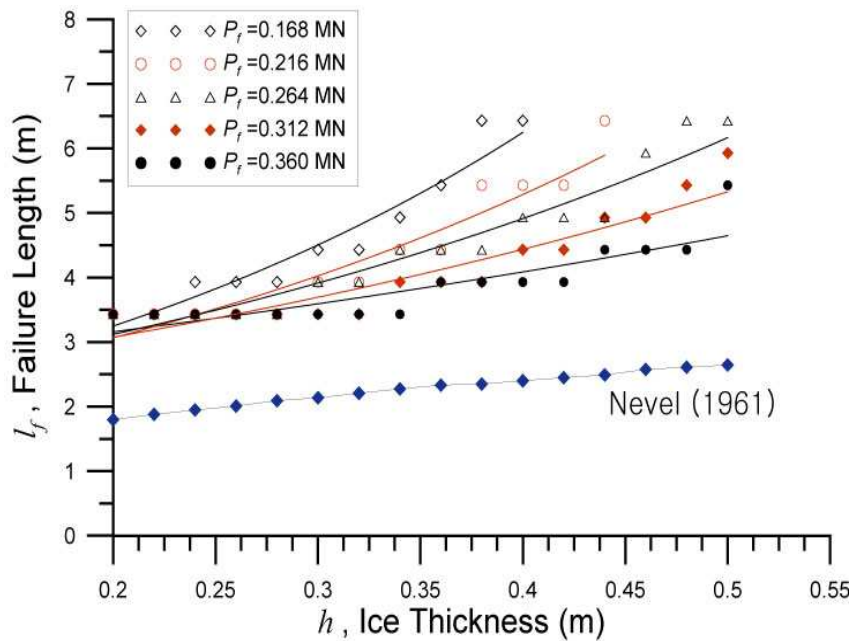


Fig. 3-5 Failure length vs. ice thickness ($\phi = 30^\circ$ $L = 50m$)

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. 3-5 에는 정적 하중에 대한 Nevel(1961)의 해석결과(Fig. 2-6)를 이용해 새로이 계산한 파괴길이도 함께 도시되어 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 썰기보의 끝보다는 보의 중간부분에서 끝부분에 걸쳐 일어나고 있다. 파괴 길이가 빙판의 두께에 비해 충분히 큰 값을 나타내고 있다. 한편 Fig. 8 에 제시된 수치는, 정량적인 값으로 직접 비교는 될 수는 없지만 쇄빙선박에서의 실제 관측결과인 Fig. 2 에서 볼 수 있는 빙판의 크기인 5.5 m 와 비교할 수 있다.

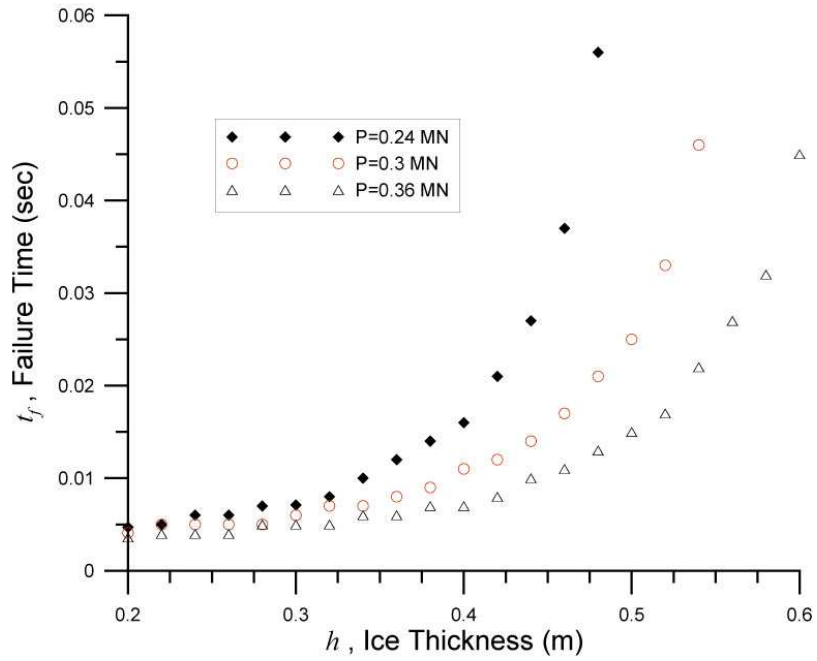


Fig. 3-6 Failure time vs. ice thickness ($\phi = 30^\circ$ $L = 50m$)

한편 Fig. 3-6 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.

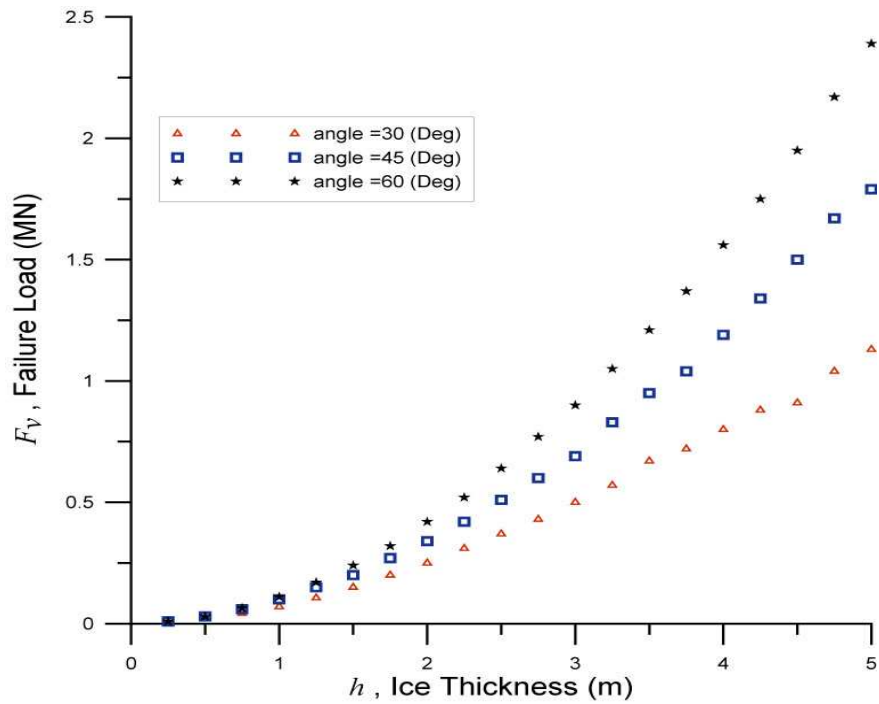


Fig. 3-7 Vertical force vs. maximum ice thickness

한편 Fig. 3-7 에는 충격하중의 크기에 따라 파괴 가능한 빙판의 최대두께를 도시하였다. 충격하중의 크기는 선수각의 크기로 대표되고 파괴 가능한 빙판의 최대 두께는 곧 쇄빙능력을 의미하므로 이 그림은 선수형상의 변화에 따른 쇄빙능력의 변화를 간접적으로 나타내고 있다고 볼 수 있다. 하중이 증가할수록 파괴될 수 있는 빙판의 두께도 증가하고 있다. 식 2-41 에 나타난 바와 같이 1차로 반경방향 균열에 의한 빙판의 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 빙판의 파괴 역시 이러한 관계로 표시되는데 Fig. 3-7 은 빙판의 파괴하중과 빙판 두께와의 이러한 관계를 잘 나타내고 있다고 보인다. 본 연구의 수치 데이터는 $P_f = 0.77h^{1.82}$ 로 표현된다. Fig. 3-7에서 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 $P_f = 12F_V$ 로 계산할 수 있다.

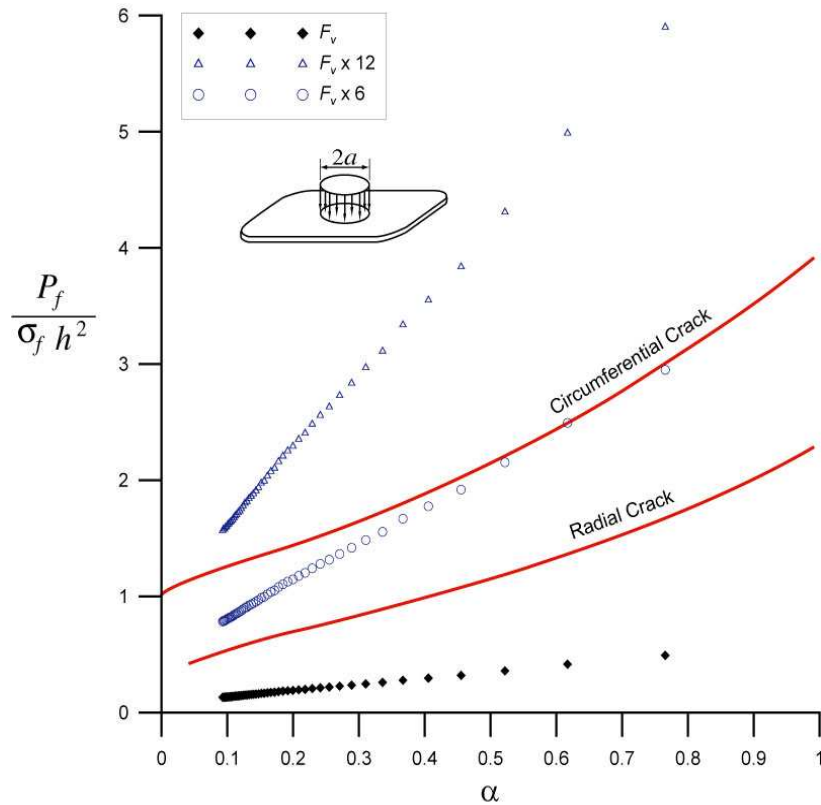


Fig. 3-8 Non-dimensional failure load vs. non-dimensional area of distributed load, α for an infinite ice sheet

한편 Fig. 3-8 은 무한빙판의 반경 a 안에 균일분포하중 P_f 가 작용하는 경우, 무차원화된 파괴하중 $\frac{P_f}{\sigma_f h^2}$ 와 $\alpha = a/l_c$ 사이의 관계를 나타낸 것이다. 실선은 각기 1차 반경방향 균

열이 발생하는 하중인 식 2-41 과 2차 원주방향 균열이 발생하는 하중(Nevel의 해석결과)을 나타내고 있다. 검은 사각형으로 표시된 데이터는 원주방향 균열이 발생하는 경우 사이각이 30° 인 썰기보에 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 정적하중에 대한 결과와 충격하중에 의한 문제와의 차이로 이해하는 것도 가능하리라 판단된다. 하지만 이에 대한 실측결과는 아직 확보된 것이 없기 때문에 추후 계속 검토가 필요하다.

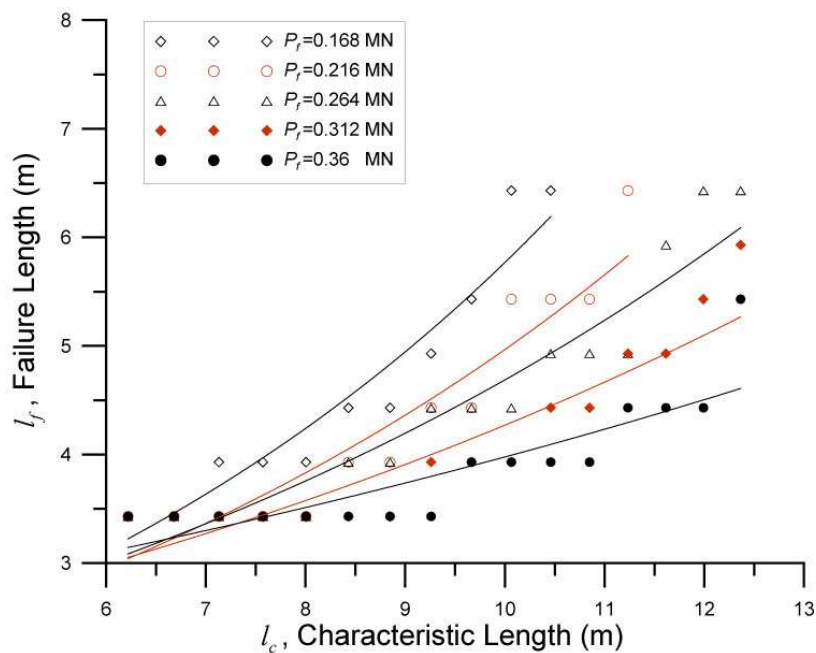


Fig. 3-9 Failure length vs. characteristic length

Fig. 3-9 에는 본 연구에서 계산된 결과인 빙판의 파괴길이 l_f 와 식 (2-21) 으로 정의되는 특성길이 l_c 와의 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.

4. 빙저항 산정 및 소프트웨어 “IceView”

쇄빙선박이 받는 빙하중에 대하여 이해하기 위해서는 먼저 선박의 전체 추력(thrust)의 관점에서 보는 빙저항(ice resistance)의 개념과 선체구조가 손상을 입지 않는 한도 내에서 지탱해야 할 빙하중(ice load)이란 개념을 구별해야 한다. 빙저항이란 쇄빙선박이 빙판을 깨뜨리며 전진하기 위하여 갖추어야 할 추진기관의 출력을 결정하기 위해서 필요한 사항이며, 이 때 선박은 강체(rigid body)로 가정되며 선체구조의 변형은 생각하지 않는 것이 보통이다. 반면 선체구조가 받는 빙하중이란 선박의 종강도 혹은 횡강도 측면에서 구조부재가 받는 전체 하중(global loads) 혹은 구조부재에 직접 작용하여 탄성 혹은 탄소성 변형을 유발시키는 국부 하중(local loads)을 의미한다. 실제 빙해역의 빙상상태는 평탄빙(level ice)이나 다년생 빙맥(multi-year ridge), 얼음조각층(ice rubble field) 등 매우 다양한 조건을 찾아볼 수 있으나, 대부분의 연구는 평탄빙에서의 빙저항을 다루고 있다. 이는 평탄빙에서의 빙저항 해석이 가장 기본이 되며 또한 제일 용이하게 수행할 수 있다는 점 때문일 것이다.

앞서 2, 3장에서 다룬 쇄빙력은 선박과 빙판의 상호작용 시 수직방향의 하중성분으로 생각하여 연구를 수행하였으나 빙저항은 수평방향의 저항성분으로 이해하여야 할 것이다. 본 4장에서는 평탄빙에서 연속쇄빙 시 선체와 빙판과의 상호작용에 따라 선체가 받게 되는 빙저항에 대하여 60년대 후반부터 근래까지 발표된 연구 중 중요한 결과에 대하여 년도 순으로 정리하였다. 그리고 정리된 빙저항식을 자료로 하여 빙저항 산정 소프트웨어를 개발하였으며 이를 간단히 소개하고자 한다.

4.1 빙저항 산정식

Kashteljan et al.(1968)

평탄빙에서의 빙저항을 처음으로 세심하게 해석한 것은 Kashteljan et al.(1968)로서 제시된 빙저항식은 다음과 같다.

$$R_i = K_1 \mu_0 B^\sigma h + K_2 \mu_0 B \rho_i h^2 + K_3 B^{K_4} h V^{K_5} / n_2 \quad (ton) \quad (4-1)$$

여기서

$$\sigma = \text{얼음의 강도} (ton/m^2)$$

h = 빙판의 두께(m)

B, V = 선박의 폭(m)과 속도(m/s)

ρ_i = 얼음의 밀도(ton/m^3)

μ_0, n_2 = Shimansky 계수 ($\mu_0 = 1 + \frac{\tan\alpha}{\tan\beta}$, $n_2 = \frac{1}{\tan\alpha}$)

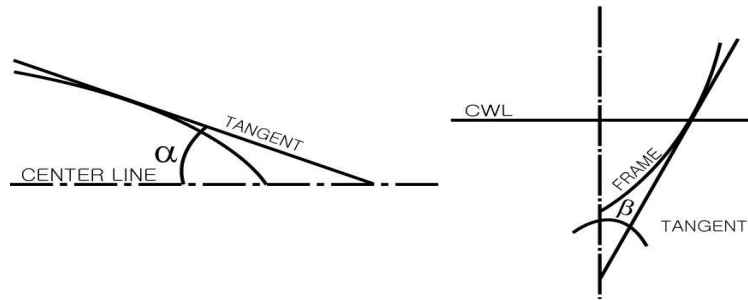


Fig. 4-1 Definition of angles in Shimansky's coefficients

α, β 는 수선면에서의 접선각으로 Fig 4-1에 정의된 바와 같다. K_1, K_2, K_3, K_4, K_5 는 러시아의 소형 쇄빙선 Ermak의 1:50 모형 및 실선시험에서 결정된 상수로 각각 0.004, 3.6, 0.25, 1.65, 1.0 이다.

Fig. 4-2 는 Kashteljan의 식을 쇄빙선 Ermak에 대하여 빙판 두께와 선박의 속도를 다르게 적용하여 계산한 결과를 보여주고 있다. 여기서 1941년에 수행했던 Ermak의 실선시험 결과와 모형시험 결과를 실선 크기로 변환하되 유체저항 성분은 무시하고 있다. Kashteljan의 식을 사용할 때의 유의점은 구 소련의 중소형 쇄빙선 Ermak 등의 실선 및 모형선 자료 이용한 것으로 대형선에는 부적합하다.

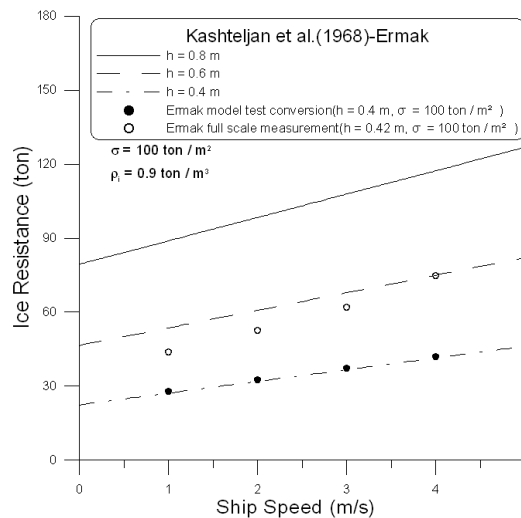


Fig. 4-2 Ice resistance vs. ship's speed based on Kashteljan's empirical formula with

varying ice thickness

Lewis and Edwards(1970)

1960년대 미국 해안경비대(USCG)에서는 보유한 쇄빙선을 이용하여 빙해역에서 실선시험과 모형시험을 수행하여 많은 실측자료를 확보하였다. Lewis and Edwards(1970)는 Kashteljan의 평탄빙 쇄빙현상에 관한 연구를 재검토하면서 다음과 같은 형태로 빙저항식을 제안하였다.

$$R_{im} = C_0 \sigma h^2 + C_1 \rho_i g B h^2 + C_2 \rho_i B h V^2 \quad (4-2)$$

여기서 σ = 얼음의 굽힘강도, g = 중력가속도이고 나머지 변수들은 앞과 동일하다. 그들은 식 (4-2)를 σh^2 로 나누어 무차원화 하였으며 USCG Wind class 쇄빙선 등의 모형시험 및 실선시험 자료를 이용해 계수를 $C_0 = 0.146$, $C_1 = 8.840$ 및 $C_2 = 5.905$ 로 결정하였다. 제안된 식의 타당성 확인을 위해 Wind class 쇄빙선 등 가능한 모든 선박의 모형 및 실선 실험 자료를 무차원화 하여 Fig. 4-3 과 같이 나타내었다. Fig. 4-4 는 다중회귀분석을 통한 실선과 모형시험 결과와 Kashteljan 및 White의 식과 비교한 결과이다.

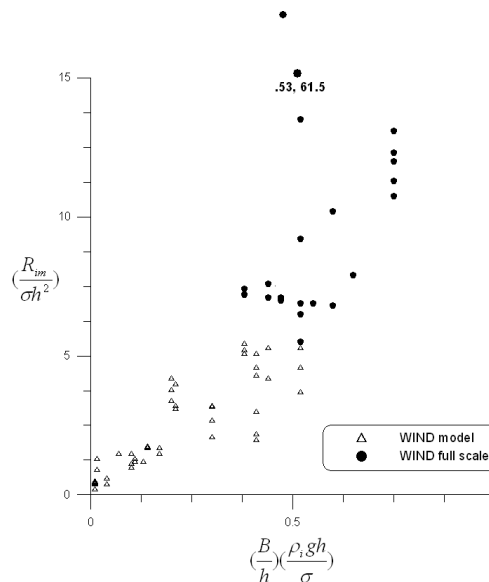


Fig. 4-3 Non-dimensional experimental continuous-mode ice resistance data vs. the product of non-dimensional beam and the volumetric number (Lewis and Edwards, 1970)

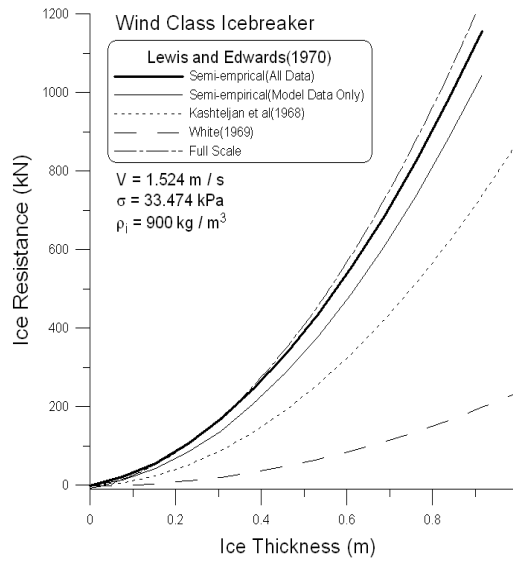


Fig. 4-4 Comparison of various continuous-mode ice resistance prediction methods with full-scale data (Lewis and Edwards, 1970)

Edwards et al.(1972)

Edwards et al.(1972)은 위의 Lewis and Edwards(1970)식을 σh^2 대신 $\rho_w g B h^2$ 으로 나누어 무차원화 시켰는데 회귀분석을 사용하여 실측자료에 대해 다음과 같은 두 개의 식을 얻었다.

$$\frac{R}{\rho_w g B h^2} = 5.2594 + 4.3500 \frac{v}{\sqrt{gh}} + 1.6760 \frac{v^2}{gh} + 5.4635 \frac{SC}{h} ; \frac{\sigma}{\rho_w g h} < 380 \quad (4-3)$$

$$\frac{R}{\rho_w g B h^2} = 3.2625 + 1.6538 \frac{v^2}{gh} + 0.0194 \frac{v}{\sqrt{gh}} \cdot \frac{\sigma}{\rho_w g h} + 22.6187 \frac{SC}{h} ;$$

$$570 < \frac{\sigma}{\rho_w g h} < 1100$$

여기서

σ = 얼음의 굽힘강도

h = 빙판의 두께

ρ_w = 해수의 밀도

v = 선속

SC = 적설층 두께

g = 중력가속도

이 식들은 USCG Wind Class 쇄빙선 Staten Island와 Mackinaw 자료로부터 유도됨. 높은 $\frac{\sigma}{\rho_w g h}$ 실선자료에 대해서는 그다지 잘 맞지 않는 단점이 있다. Fig 4-5는 Mackinaw 실선 시험으로부터 얻은 무차원 자료와 위의 두 식의 평균값을 적용한 결과이다.

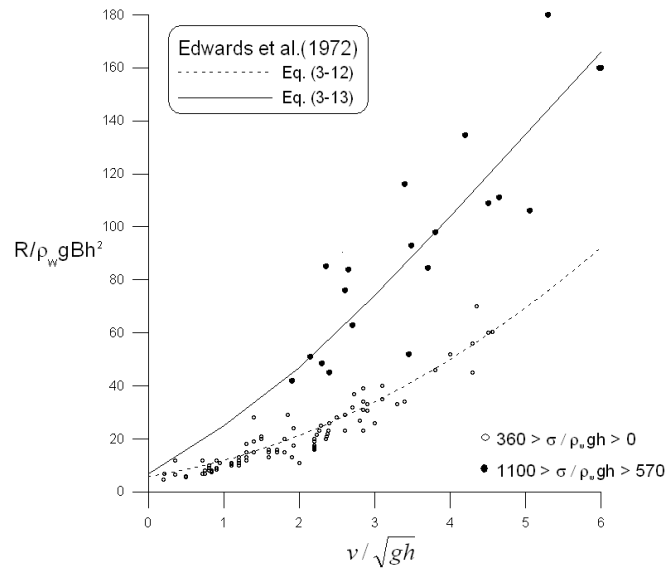


Fig. 4-5 Non-dimensional ice resistance data of the Mackinaw vs. non-dimensional ship's speed (Edwards et al., 1972)

Vance(1975)

Vance(1975)는 모형시험 및 실선자료(Mackinaw, Moskva class, Finncarrier, Staten Island 및 Ermak)로부터 선체 빙저항에 대하여 다음과 같은 최적회귀방정식을 얻은 바 있다.

$$R = C_s \rho_w g B h^2 + C_b \sigma B h + C_v \rho_i V^2 L h^{0.65} B^{0.35} \quad (4-4)$$

여기서

C_s = 압침저항계수 (submergence coefficient) = 16.91

C_b = 쇄빙저항계수 (breaking coefficient) = 0.034

C_v = 속도저항계수 (velocity coefficient) = 0.165

L = 선박의 길이

σ = 얼음의 굽힘강도

- h = 빙판의 두께
- ρ_i = 얼음의 밀도
- ρ_w = 해수의 밀도
- V = 선속
- B = 선폭
- g = 중력가속도

위의 각 항은 빙판의 침수 및 중력 성분, 순수 쇄빙저항, 그리고 속도에 관계하는 성분을 나타낸다. Fig. 4-7은 3가지 빙판 두께에 대한 빙저항 결과를 보여주고 있다. Mackiaw의 실선자료(FS)가 full-scale regression(FSR)과 일치하고, 모형시험 자료와 model-scale regression(MSR)이 일치함을 보여주고 있다.

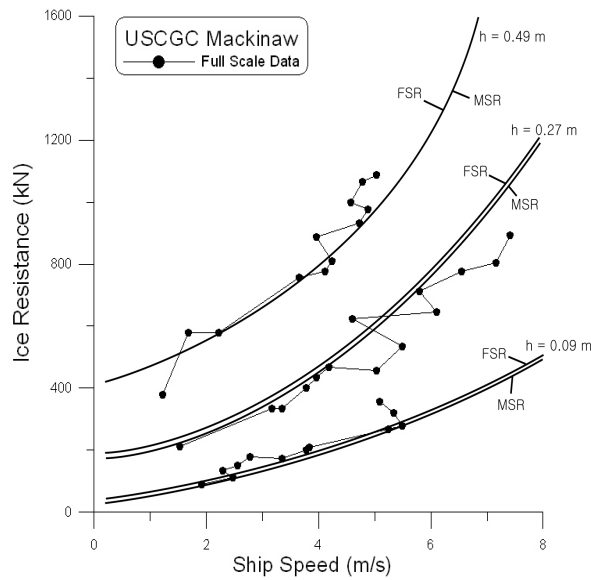


Fig. 4-7 Analysis of Mackinaw data (Vance, 1975)

Edwards et al.(1976)

무차원식을 사용하여 쇄빙선 Louis S. St. Laurent 에 대한 충격 쇄빙 실선자료를 분석하여 다음과 같이 속도에 선형적으로 비례하는 식을 제안하였다. Fig. 4-6은 Edwards et al.(1976) 식에 대해 5개의 Course 별로 실선시험을 통해 얻어진 실제의 빙두께와 빙강도를 사용하여 그린 것이다. 가장 잘 맞지 않는 곳은 A1과 A2인데 예상치보다 높은 빙저항을 보이는 이유는 얼음이 실선시험 동안 약간의 압력 하에 있었을 수도 있고 태양에 의해 눈이 녹아 선체-빙 마찰력이 커진 결과라고 설명이 가능하다.

$$\frac{R}{\rho_w g B h^2} = 4.24 + 0.05 \frac{\sigma}{\rho_w g h} + 8.9 \frac{V}{\sqrt{gh}} \quad (4-5)$$

여기서

σ = 얼음의 굽힘강도

h = 빙판의 두께

ρ_w = 해수의 밀도

V = 선속

B = 선폭

g = 중력가속도

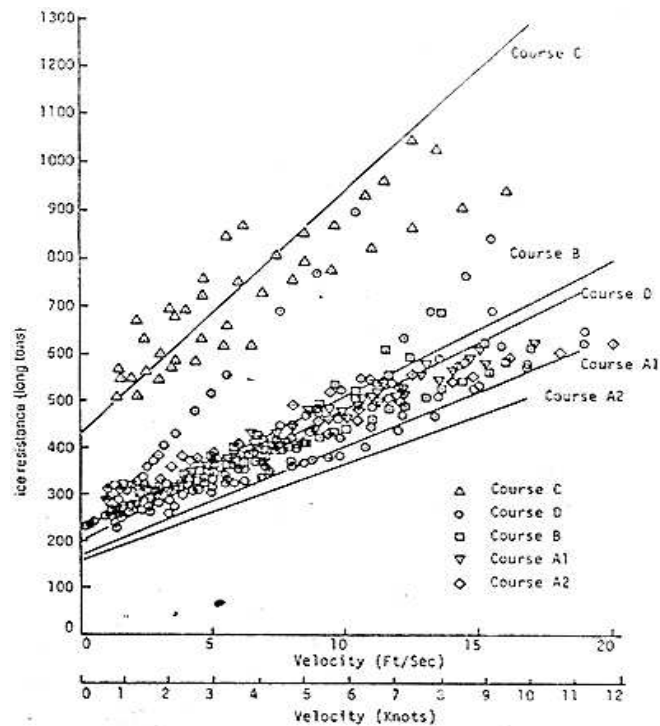


Fig. 4-6 Full-scale resistance data for CCGS Louis S. St. Laurent in snow covered ice with regression lines from combined data (Edwards et al., 1976)

Wartsila(1973)

통상 전체 빙저항은 빙파괴항, 침수항, 속도의존항의 세 개로 가정하지만 Wartsila(1973)는 다른 두 항에 비해 실선시험 저항이 작기 때문에 빙파괴항을 무시하였고 회귀분석을 통해 다음과 같은 실선 저항식을 유도하였다.

$$R_{ice} = Bh^2 \rho_{\Delta} g C_u (C_s + C_v) \quad (4-6)$$

$$C_u = [1.0347 + 0.009087\phi + 0.0000445(\frac{L}{B})]$$

$$C_s = [60.64\phi^{-0.72571} \times (\frac{B}{h})^{(0.00679\phi + 0.14115\sqrt{L/B})}]$$

$$C_v = [20068.3\phi^{-1.77088} \times (\frac{v^2}{Bg})^{0.77867\sqrt{B/L}} \times (\frac{B}{h})^{0.0144\phi}]$$

여기서

L = 수선면에서의 길이

B = 수선면에서의 폭

ρ_{Δ} = 얼음의 밀도와 해수 밀도의 차

ϕ = 선수각(deg)

하지만 Wartsila 식은 다음 조건에만 적용이 가능하고 뿔뿔한 선수 형태의 선박에는 사용할 수 없다.

velocity : 2.3 to 13.8 mph for 1-ft ice thickness

2.3 to 10.4 mph for 2-ft ice thickness

2.3 to 6.9 mph for 3-ft ice thickness

stem angle : 30 to 82 deg

L/B : 4.33 to 9.54

B : 50 to 120 ft

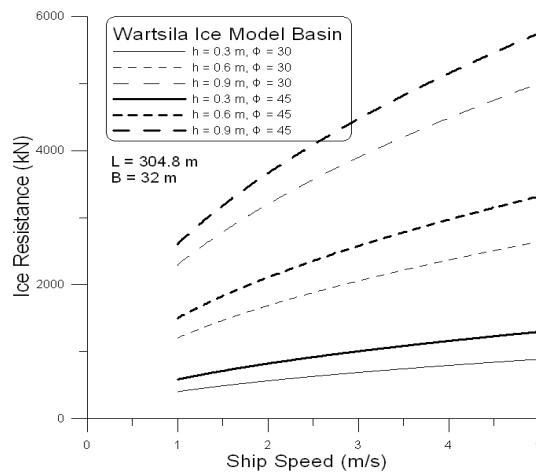


Fig. 4-9 Estimated icebreaking resistance of a 60,000 DWT bulk carrier (Wartsila)

Arctec Inc.(1974)

ARCTEC에서의 모형시험에서는 빙저항에서의 L/B 에 따른 변화에 주목하였다.

$$R = 1.5767\rho_w g B h^2 + 0.9114\rho_w g L h^2 + 3.1059\rho_w B h v^2 + 0.0252\sigma_f B h \quad (4-7)$$

여기서

L = 선박의 길이

h = 빙판의 두께

σ_f = 얼음의 굽힘강도

ρ_w = 해수의 밀도

v = 선속

B = 선폭

g = 중력가속도

ARCTEC 식은 다음 조건에만 적용가능 하다.

$$2B \leq L \leq 8B$$

$$0.17\sqrt{gh} \leq v \leq 2.63\sqrt{gh}$$

$$34\rho_w g h \leq \sigma_f \leq 289\rho_w g h$$

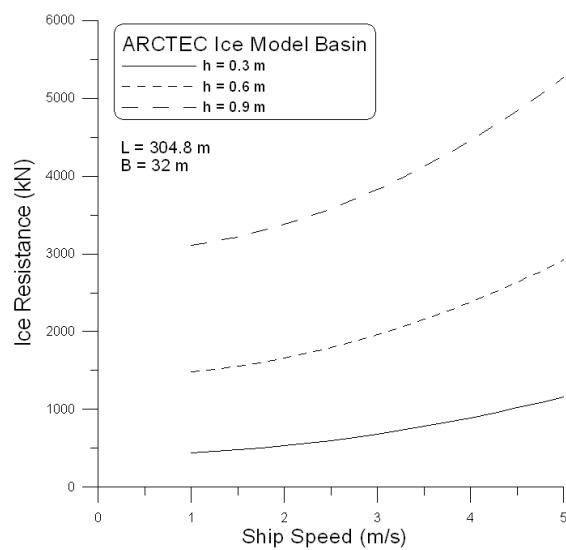


Fig. 4-10 Estimated icebreaking resistance of a 60,000 DWT bulk carrier (ARCTEC)

Arctec Canada Ltd.(1984)

Arctec Canada Ltd.(1984)에서는 1986년 개조된 bulk carrier MV Arctic의 모형시험 결과 이용하여 다음의 식을 제안하였다.

$$R = 0.00008385\sigma h + 0.1525 v h + 0.5517 h^2 \quad (\text{MN}) \quad (4-8)$$

여기서

σ = 얼음의 굽힘강도(kPa)

h = 빙판의 두께(m)

v = 선속(knots)

Baker and Nishizaki(1986)

Baker and Nishizaki(1986)는 북극해용 bulk carrier인 MV Arctic에 대한 선수형상에 대하여 타 연구자들의 모형시험 결과와 비교하였다. MV Arctic은 1978년에 Arctic Class 2 선박이었지만 선주의 요구로 1985/86년에 선수형상 변화와 Arctic Class 4 로의 업그레이드를 하게 된다. 새로운 선수형상의 설계를 위해 광범위한 빙수조 실험이 Arctec Canada Ltd.(ACL), 독일의 HSVA, 핀란드의 WARC에서 각각 수행되었다.

이들은 플레어각 및 수선면각이 빙저항에 미치는 영향을 조사하기 위해 무차원의 선수부 길이와의 비교를 통해 새로운 선수부 형상을 설계하고자 하였고 이 과정에서 새로운 선체형상으로 선수부 설계를 맡았던 Melville사의 이름을 따서 "Melville bow"가 결정되었다.

ACL은 회귀분석을 통해 두 개의 선수형상에 대해 다음과 같은 실선 빙저항 추정식을 얻었다.

$$R_T = 1.771 u_{12}^{0.965} L^{1.036} h^{1.5} + 1.095 C_{bf}^{2.92} v h^{1.436} + 7.59 \sigma^{0.75} h + 3.342 v^{2.5} \quad (\text{N}) \quad (4-9)$$

여기서

σ = 얼음의 굽힘강도(kPa)

C_{bf} = forward block coefficient

L = 선박의 길이(m)

h = 빙판의 두께(m)

v = 선속(m/s)

μ_{12} = 선체 마찰계수

Zahn et al.(1987)

Zahn et al.(1987)는 평탄빙에서 쇄빙선 Mobile Bay를Mackinaw에 의해 예인하는 저항시험을 수행하였다. 그리고 측정된 빙저항 자료 분석을 통해 유도된 무차원 변수들을 가지고 다음과 같은 빙저항식을 제안하였다.

$$\frac{R_i}{\rho_w g B h^2} = C_0 + C_1 \left(\frac{V^2}{gB} \right) \left(\frac{L}{h} \right)^3 \quad (4-10)$$

여기서

$$C_0 = 4.25, \quad C_1 = 3.96 \times 10^{-5}$$

L = 선박의 길이

h = 빙판의 두께

ρ_w = 해수의 밀도

V = 선속

B = 선폭

g = 중력가속도

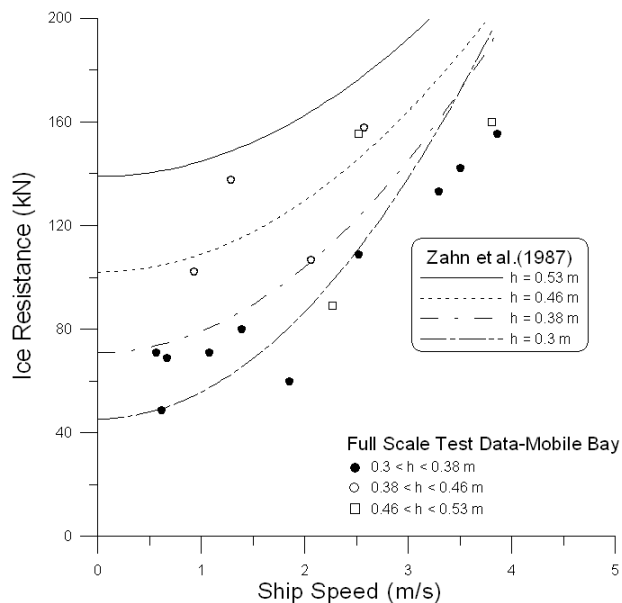


Fig. 4-8 Ice resistance vs. ship speed data for Mobile Bay

Spencer and Jones(2001)

Spencer and Jones(2001)는 캐나다 해안경비대(CCG)의 R-Class 쇄빙선 Pierre Radisson 및 Sir John Franklin에 대한 모형시험을 1978, 1979, 1991년에 실행되었던 실선시험과 비교하였다. Spencer and Jones는 1:20의 크기와 0.09의 높은 마찰계수를 갖는 모형과 동일한 크기와 0.03의 낮은 마찰 계수를 갖는 모형으로 시험을 수행한 결과를 가지고 두 가지 빙저항식을 유도하였다.

$$\text{Low Friction : } R_f = 0.90 F_h^{-0.739} \rho_i B h_i V^2 + 1.08 S_N^{-1.672} \rho_i B h_i V^2 + 1.31 \Delta \rho g h_i B T \quad (4-11)$$

$$\text{High Friction : } R_f = 2.03 F_h^{-0.971} \rho_i B h_i V^2 + 2.19 S_N^{-1.579} \rho_i B h_i V^2 + 2.67 \Delta \rho g h_i B T$$

여기서

$$F_h = \frac{V}{\sqrt{g h_i}} : \text{Froude Number}$$

$$S_N = \frac{V}{\sqrt{\frac{\sigma_f h_i}{\rho_i B}}} : \text{Strength Number}$$

h_i = 빙판의 두께 σ_f = 얼음의 굽힘강도

ρ_i = 얼음의 밀도 $\Delta \rho$ = 얼음의 밀도와 해수 밀도의 차

V = 선속 B = 선폭

T = 흘수 g = 중력가속도

Fig. 4-11 은 1978년의 Pierre Radisson에 관한 실선시험과 모형시험 자료를 위의 두식에 대입하여 계산된 결과의 상관관계를 보여주고 있다. 완벽한 상관관계를 가지는 1:1 대응 직선이 모형시험으로부터 나온 직선의 마찰계수 0.03과 0.09 직선 사이에 놓여있음을 알 수 있다.

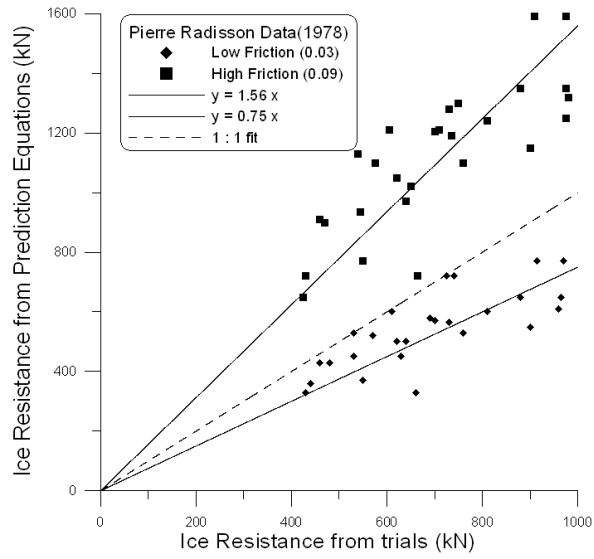


Fig. 4-11 Comparison between results from Eq. Low Friction and Eq. High Friction and CCGS Pierre Radisson trials during 1978 (Spencer and Jones, 2001)

4.2 빙저항 산정 소프트웨어 “IceView”

"IceView" 프로그램은 비주얼베이직을 이용하여 GUI 방식으로 쇄빙선박이 받는 빙저항을 계산하거나, 도표, 그래프 등으로 나타내는 프로그램으로서 60년대 후반부터 근래까지 발표된 빙저항 산정식을 이용하도록 고안되었다. 본 프로그램의 구성과 자료처리 절차에 대한 flow chart 는 다음과 같다.

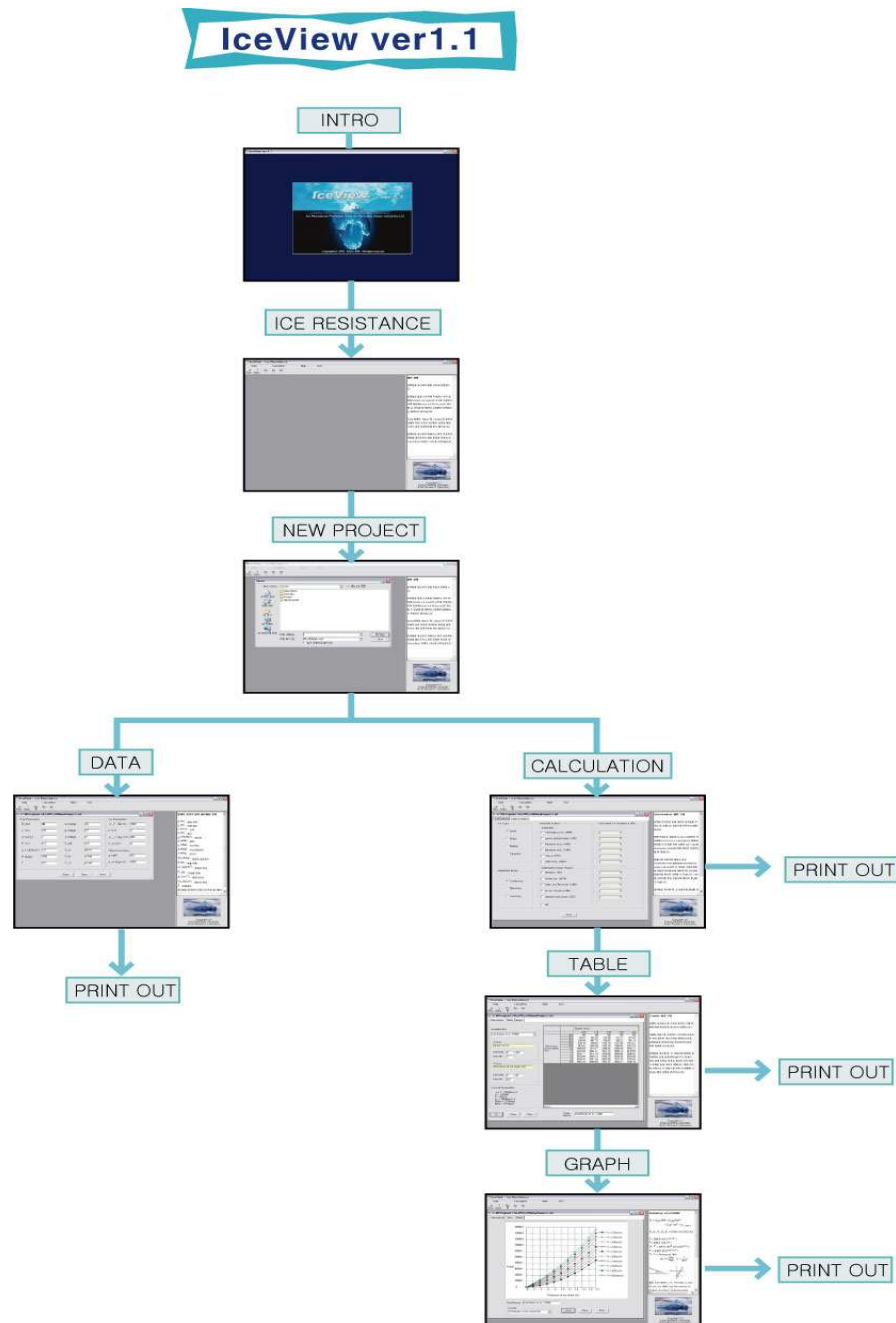


Fig. 4-12 "IceView" ver 1.1 (Flowchart)

다음은 프로그램을 실행했을 때 나타나는 첫 화면이다.

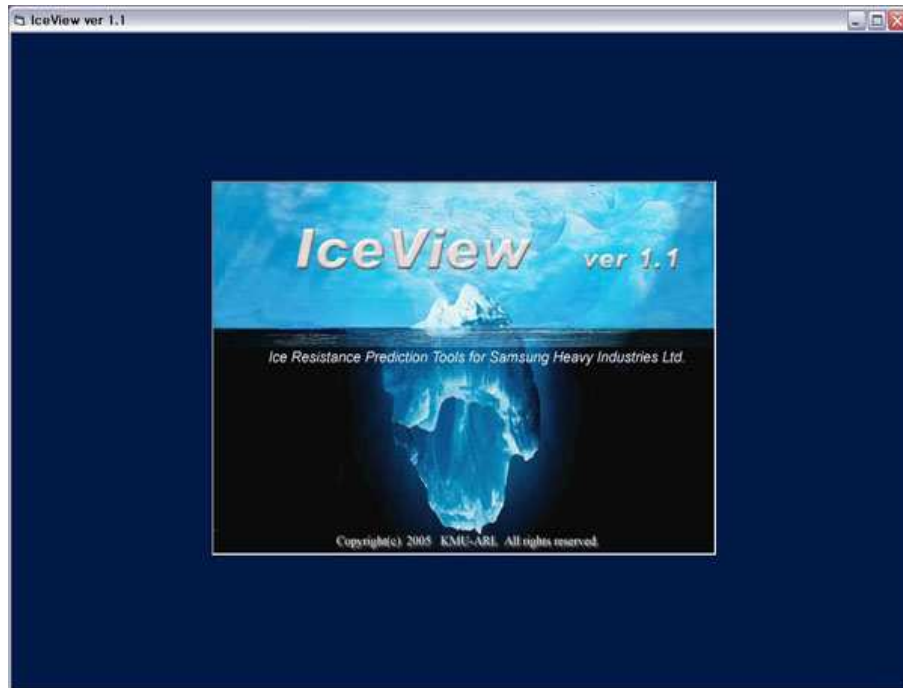


Fig. 4-13 "IceView" ver 1.1 (Main)

본래 이 프로그램은 쇄빙선박이 받는 빙저항/빙하중을 산정하기 위한 것만이 아니고 빙해역의 빙상환경과 항로에 대한 GIS 정보, 빙해역을 운항하는 선박의 Ice Transit Model, 빙저항/빙하중 산정, 그리고 쇄빙선박의 DB 및 선형, 구조설계 등 빙해역의 쇄빙선박에 관한 포괄적인 정보를 제공하기 위한 것이다.

그 다음 두 화면은 빙저항을 계산하기 위한 도입부 화면이다. 빙저항과 함께 선수부에 작용하는 수직 빙하중(Global Ice Load)과 선각에 작용하는 국부 빙압력(Local Ice Pressure)도 계산할 수 있도록 할 계획이나 현재의 버전(ver 1.1)에서는 준비되지 않았다.

Data 아래의 <New> 및 <Open>은 프로젝트별로 이미 저장된 설계 파라미터 파일을 불러오거나 새로 입력하도록 하는 메뉴이다. 빙저항을 계산하기 위해서는 먼저 프로젝트 파일을 불러오거나 새로 만들어 저장한 후 Calculation 아래의 <IR>을 선택한다.

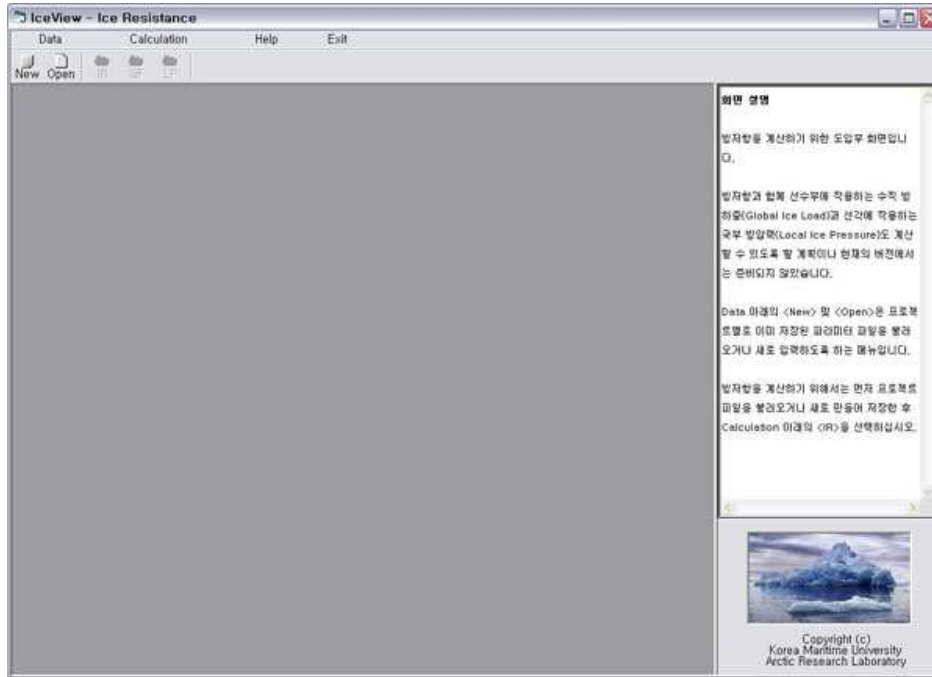


Fig. 4-14 "IceView" ver 1.1 (Ice Resistance)

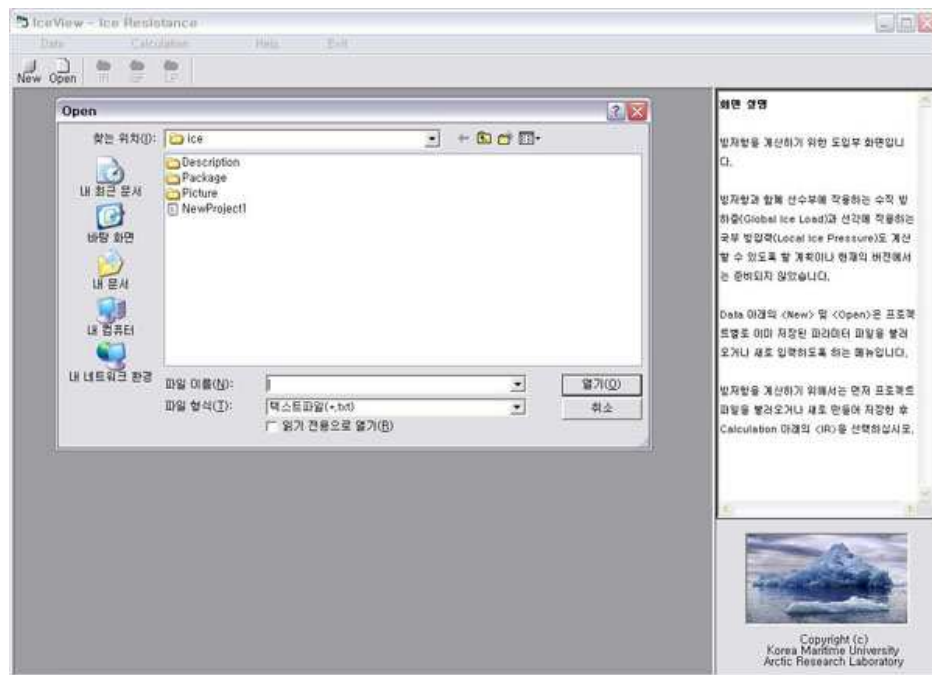


Fig. 4-15 "IceView" ver 1.1 (Open)

<Data> 화면은 빙저항 산정식에 필요한 설계 파라미터를 입력하는 화면이다.

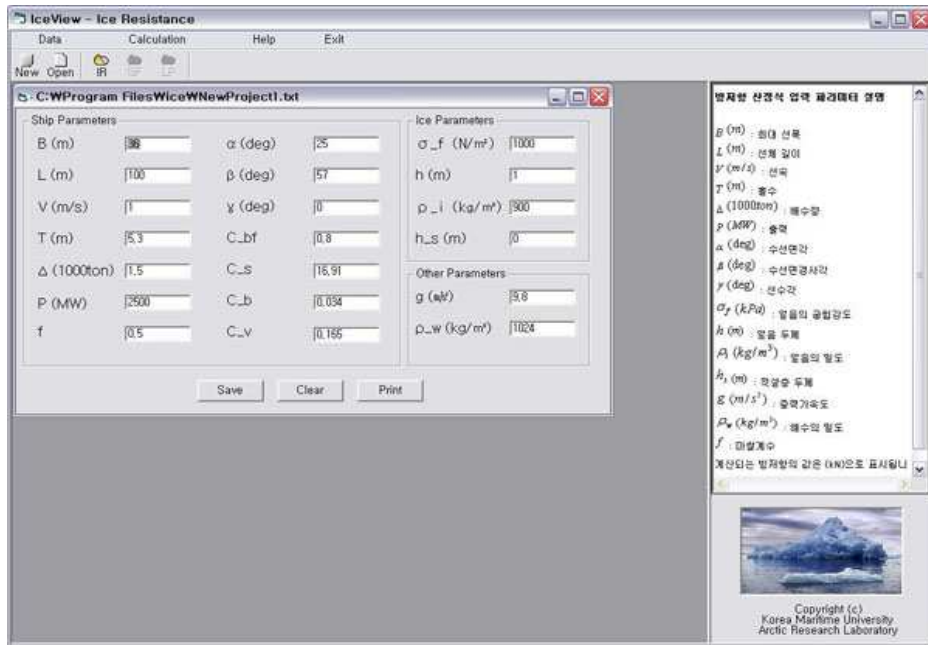


Fig. 4-16 "IceView" ver 1.1 (Data)

사용된 설계 파라미터는 다음과 같다.

- B (m) : 최대 선폭
- L (m) : 선체 길이
- V (m/s) : 선속
- T (m) : 흘수
- Δ (1000 Ton) : 배수량
- P (MW) : 출력
- α (deg) : 수선면각
- β (deg) : 수선면경사각
- γ (deg) : 선수각
- σ_f (kPa) : 얼음의 굽힘강도
- h (m) : 얼음 두께
- ρ_i (kg/m³) : 얼음의 밀도
- h_s (m) : 적설층 두께
- g (m/s²) : 중력가속도
- ρ_w (kg/m³) : 해수의 밀도

f : 마찰계수

계산되는 빙저항 값은 (kN)으로 표시된다.

<Calculation> 화면은 입력된 파라미터에 대하여 빙저항을 구하는 데 사용되는 경험식을 선택하는 화면이다. 현재는 평탄빙(Level Ice)에서의 연속쇄빙(Continuous Icebreaking) 문제만 처리할 수 있으며 추후 나머지 Ice Type과 Interaction Mode에 대한 계산이 가능하도록 할 것이다.

경험식은 전형적인 쇄빙선 형상(icebreakers)과 쇄빙상선(icebreaking cargo vessels)의 두 가지로 구분하였으며 동일한 파라미터에 대하여 하나 이상의 경험식을 복수로 선택할 수 있다. <All>을 선택하면 모든 경험식에 대하여 계산할 수 있다. 빙저항을 계산할 때, 각 경험식에 필요한 파라미터의 값을 입력하지 않았거나 한계치 밖의 값을 입력한 경우는 계산이 되지 않거나 정확한 값을 구하지 못한다.

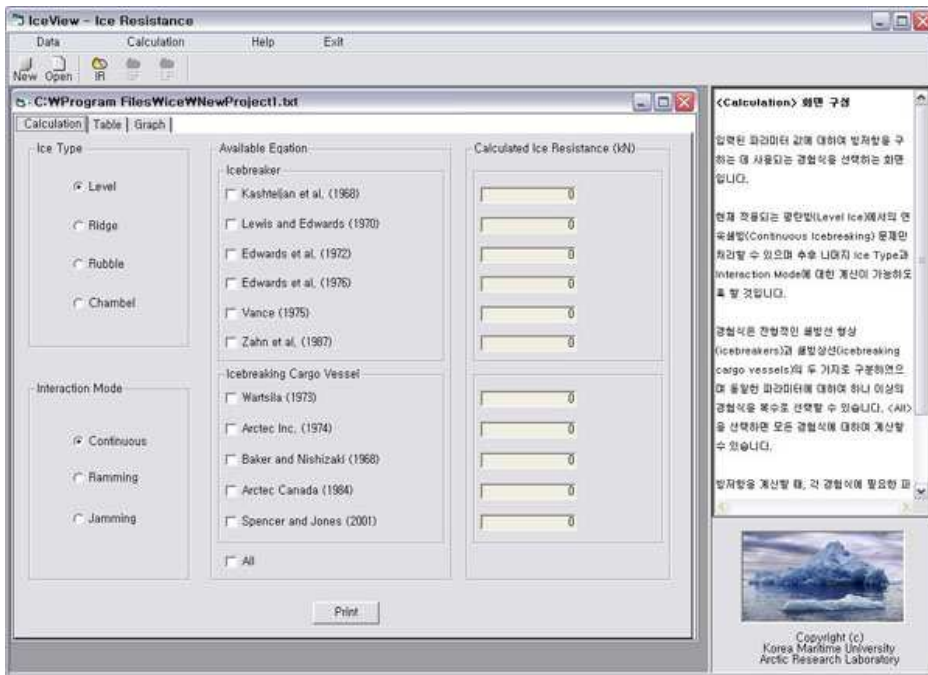


Fig. 4-17 "IceView" ver 1.1 (Calculation)

<Table> 화면은 입력된 파라미터 중 선속과 빙판의 두께 변화에 따른 빙저항을 계산하는 화면이다. 사용할 경험식을 선택하고 가로축과 세로축의 계산 범위와 계산간격을 결정하면 표가 만들어 진다. 입력자료 중 변하지 않는 파라미터의 값은 왼쪽 아래에 나타난다. 빙저항을 계산할 때, 각 경험식에 필요한 파라미터의 값을 입력하지 않았거나 한계치 밖의 값을 입력한 경우는 계산이 되지 않거나 정확한 값을 구하지 못하는데 제한 조건에 대해서는 각 경험식을 선택 시 화면에 나타나는 배경 설명을 참조한다.

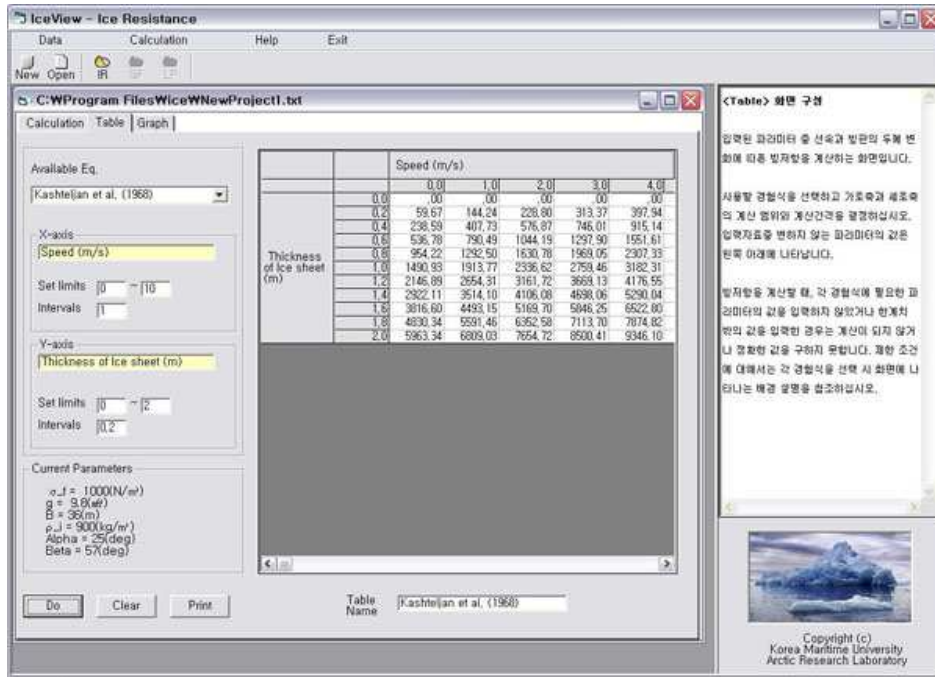


Fig. 4-18 "IceView" ver 1.1 (Table)

<Graph> 화면은 앞서 표로 나타낸 빙저항 계산값을 그래프로 나타내는 화면이다.

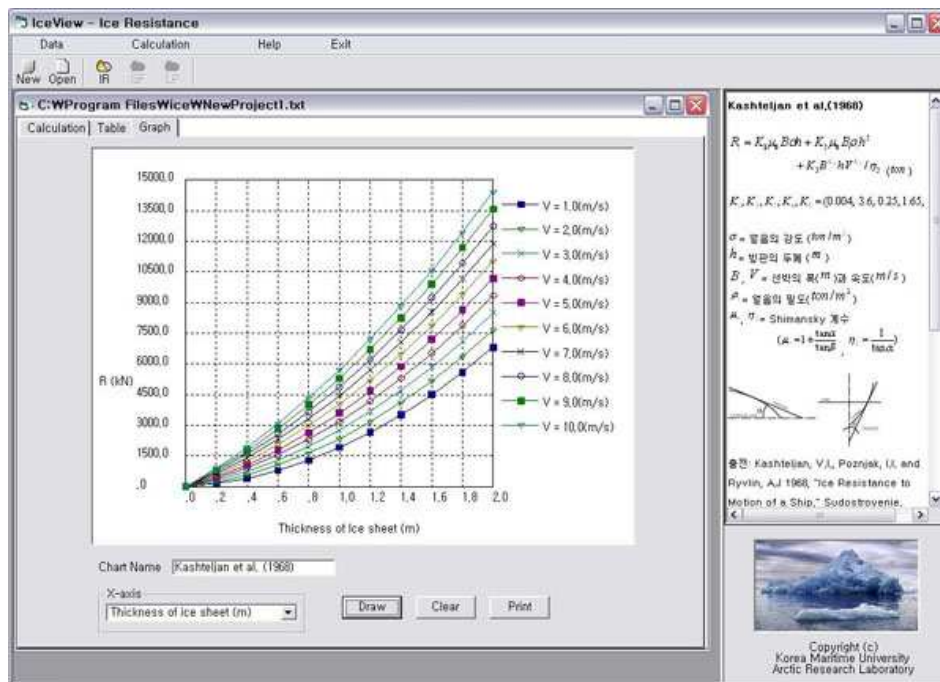


Fig. 4-19 "IceView" ver 1.1 (Graph)

5. 결 론

본 논문에서는 쇄빙선박이 평탄빙에서 연속쇄빙을 할 때 선박과 빙판의 상호작용으로 인한 수직방향과 수평방향의 하중성분에 대해 각각 쇄빙능력과 빙저항의 관점에서 연구를 수행하였다.

먼저 쇄빙능력의 산정을 위해 탄성지지기반 위에 놓인 유한 길이의 썰기형 변단면보가 충격하중을 받을 때의 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. 빙판의 파괴하중은 $P_f = 0.77h^{1.82}$ 의 형태로 표현된다.

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.

4장에서는 빙저항과 빙저항 산정 소프트웨어에 대해 언급하였다. 현재까지 빙저항 산정을 위해 많은 경험식과 실험식이 제안된 바 있다. 하지만 이들 빙저항 산정식들은 제한된 선박의 데이터만을 이용한 것이기 때문에 크기와 선형이 다른 선박에 대해서는 적용하기에 부적합하다. 더욱이 문헌에 나타난 여러 빙저항 산정식들이 서로 다른 단위계를 사용하기 때문에 산정식들을 비교분석하기에 많은 어려움이 있었다. 본 논문에서는 문헌에 제안된 각 빙저항 산정식의 단위를 통일하였고 아울러 Kashteljan et al.(1968) 이후 최근까지 발표된 빙저항 산정식 중 비교의 의미가 있는 것을 선택하여 정리하였다. 그리고 이를 이용하여 현장의 설계 실무자가 편리한 방법으로 빙저항을 계산할 수 있도록 Visual Basic을 이용한 GUI 소프트웨어 프로그램 IceView 를 개발하였다

IceView 프로그램은 각 빙저항 산정식을 이용하여 적용할 선박의 종류에 따라 쇄빙선/예인/보급선 및 쇄빙상선으로 구분하여 선박의 속도, 얼음의 두께에 관한 빙저항 계산값을 표와 그래프로 보여준다. 이 프로그램을 통해 각 쇄빙선박의 선종별로 빙저항 산정식을 적용하는 데 따른 장단점을 서로 비교할 수 있게 되었다. 빙하중 산정식은 제안자에 따라 편차가 크기 때문에 쇄빙선박의 설계 시 각 공식에 적용된 기본적인 가정과 적용한계 등을 명확히 파악하고 사용할 필요가 있다. 현재의 버전(ver 1.1)에서는 빙저항 산정만이 가능하나 추후 빙상환경과 항로에 대한 GIS 정보, 빙해역을 운항하는 선박의 Ice Transit Model, 빙저항/빙하중 산정, 그리고 쇄빙선박의 DB 및 선형, 구조설계 등 빙해역의 쇄빙선박에 관한 포괄적인 정보를 제공할 수 있도록 개발하는 것이 과제로 남아있다.

참 고 문 헌

- [1] 이우람, 2005, 쇄빙선박의 빙저항 및 빙하중 산정식에 대한 연구, 한국해양대학교 석사학위 논문.
- [2] 최경식, 손창배, 팽은경, 1992, “빙해항행선박의 선수부 형상과 쇄빙능력에 관한 연구” 대한조선학회논문집 제 29권, 제 4호, pp. 87-97.
- [3] Assur, A., 1956, "Airfields on Floating Ice Sheets with Supplements", SIPRE Report 36.
- [4] Baker, D. and Nishizaki, R., 1986, "The MV Arctic-New Bow Form and Model Testing," SNAME Transactions, Vol.94, pp.57-74.
- [5] Edwards, R.Y., Lewis, J.W., Wheaton, J.W., Coburn, J., 1972, "Full-Scale and Model Tests of a Great Lakes Icebreaker," SNAME Transactions, Vol.80, pp.170-207.
- [6] Edwards, R.Y., Major, R.A., Kim, J.K., German, J.G., Lewis, J.W. and Miller, D.R., 1976, "Influence of Major Characteristics of Icebreaker Hulls on Their Powering Requirements and Maneuverability in Ice," SNAME Transactions, Vol.84, pp.364-407.
- [7] 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.
- [8] 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.
- [9] Gold, L.W., 1971, "Use of Ice Covers for Transportation", Canadian Geotech. J., Vol. 8, pp. 170-181.
- [10] Hetenyi, M., 1947, Beams on Elastic Foundation, University of Michigan Press, Ann Arbor, Michigan.

- [11] 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.
- [12] Kashteljan, V.I., Poznjak, I.I. and Ryvlin, A.J 1968, "Ice Resistance to Motion of a Ship," Sudostroyenie, Leningrad.
- [13] Kerr, A.D. and Palmer, W.T., 1972, "The Deformations and Stresses in Floating Ice Plates," Acta Mechanica, Vol. 15, pp. 57-72.
- [14] 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.
- [15] Levine, G.H., Voelker, R.P. and Mentz, P.B., 1974, "Advances in the Development of Commercial Ice-Transiting Ships," SNAME Transactions, Vol.82, pp.313-343.
- [16] Lewis, J.W. and Edwards, R.Y., 1970, "Methods for Predicting Icebreaking and Ice Resistance Characteristics of Icebreakers," SNAME Transactions, Vol.78, pp.213-249.
- [17] Meyerhof, G.G., 1962, "Bearing Capacity of Floating Ice Sheets", Transaction ASCE, Vol. 127, Pt. 1, pp. 490-508.
- [18] Michel, B., 1978, Ice Mechanics, Laval University Press, Quebec, Canada.
- [19] Nevel, D.E., 1961, "The Narrow Free Infinite Wedge on an Elastic Foundation," Cold Regions Research and Engineering Laboratory Report 79, Hanover, New Hampshire.
- [20] Spencer, D. and Jones, S.J., 2001, "Model-Scale/Full-Scale Correlation in Open Water and Ice for Canadian Coast Guard "R-Class" Icebreakers," Journal of Ship Research, Vol.45, No.4, pp.249-261.
- [21] 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.

[22] Timoshenko, S. and Woinowski-Krieger, S., 1959, Theory of Plates and Shells, McGraw Hill Inc., New York,

[23] Vance, G.P., 1975, " A Scaling System for Vessels Modelled in Ice," Proceedings of SNAME Ice Tech. Symposium, Montreal, Paper H.

[24] Voelker, R. et al., 1992, "Eight Years of Performance Measurements aboard USCG Polar Class Icebreakers, SNAME Transaction, Vol. 100.

[25] Zahn, P.B., and Phillips, L., 1987, "Full-Scale Towed Resistance Trials of the USCGC Mobile Bay in Uniform Ice", SNAME Transactions, Vol.95, pp.45-77.