
 論 文

大韓造船學會論文集
 第 29 卷 第 4 號 1992 年 11 月
 Transactions of the Society of
 Naval Architects of Korea
 Vol. 29, No.4, November 1992

빙해항행선박의 선수부 형상과 쇄빙능력에 관한 연구

최경식*, 손창배**, 팽은경**

A Study on Bow Hull Form and Icebreaking Capability of Icebreaking Vessels

by

K. Choi*, C.B. Son** and E.G. Paeng**

요 약

극지방의 천연자원의 수송에 필수적인 빙해항행선박은 금후 우리나라의 조선산업이 지향해야 할 기술집약형 선박중 하나로서 국제경쟁에 대비하여 독자적인 연구가 요구되는 분야이다. 본 연구는 빙해항행선박 기본설계의 중요한 인자인 선수부 형상과 평탄빙에서의 쇄빙능력 사이의 상관관계를 밝히는데 목적이 있다. 통상 평탄빙(level ice)에서 선박의 전진속도를 3-4 knots로 볼 때, 탄성으로 취급되는 얼음의 재료특성을 고려하여, 파괴시킬 수 있는 얼음의 최대두께와 파괴된 얼음의 특성길이를 수치적으로 추정하는데 주안점을 두고 있다. 본 연구에서는 빙해항행선박이 평탄빙에서 연속쇄빙을 하고 있는 상황을 탄성지지기반 위에 놓인 유한 길이의 쇄기보에 작용한 충격하중의 문제로 가정하고 굽힘모멘트에 의해 어떤 위치에서 발생한 최대인장응력이 얼음의 굽힘파괴강도에 도달한다면 그 부분에서 파단이 일어날 가능성이 가장 높다고 판단한다.

Abstract

Of various design factors affecting icebreaking capability of an icebreaker, the stem angle (i.e., angle between bow stem and ice sheet) is the most important one under continuous icebreaking operation. This study focuses on the relationship between the bow stem angle of an icebreaker and its icebreaking capability. Considering relatively high loading-rate conditions with typical advancing speed of 3 to 4 knots, the material properties and deformation

발 표: 1992년도 대한조선학회 춘계연구발표회('92. 4. 18.)

접수일자: 1992년 5월 18일, 재접수일자: 1992년 6월 29일

* 정회원, 한국해양대학교 해양공학과

** 한국해양대학교 해양공학과

characteristics of sea ice are regarded as entirely elastic and brittle. In this paper the interaction process of icebreaker with level ice is simplified as a beam of finite length supported by Winkler-type elastic foundation simulating water buoyancy. The wedge type ice beam is loaded by the vertical impact forces due to the inclined bow stem of icebreaking vessels. The numerical model provides locations of maximum bending moment where extreme tensile stress arises and also possible fracture occurs. The model can predict a characteristic length of broken ice sheet upon the given environmental and design parameters.

1. 서 론

북극권은 지구상에 남은 최후의 자원부존지역으로서 석유와 천연가스를 비롯한 각종 천연자원이 풍부하게 매장되어 있는 것으로 알려져 있고 북극해에 인접한 미국, 소련, 캐나다를 포함한 선진 제국은 고도의 기술과 자본을 이용하여 이들 자원의 개발에 중점을 두고 있는데, 현재 알래스카의 North Slope, Prudhoe Bay, 캐나다 북안의 Beaufort해, Labrador해, Hudson만, 소련의 Kara해, Barents해, 동 시베리아의 Okhotsk해, 유럽의 북해 등지에서 석유와 천연가스의 시추와 생산이 이루어지고 있다.

북극해는 주변이 대륙으로 싸인 폐쇄해역으로서 겨울에 -45°C 까지 내려가는 한랭한 대륙성 기후의 영향으로 인하여 북극해의 중심은 연중 녹지않는 다년생 극빙(polar pack ice)으로 이루어진다. 매년 가을부터 극빙의 주변에 해빙이 성장하여 다음해 5~6월까지의 북극해 전체가 얼음에 덮힌다. 지구의 자전으로 인하여 북극해의 얼음덩어리는 극점을 중심으로 서서히 시계방향으로 자전하며(Beaufort Gyre) 이러한 움직임으로 인하여 거대한 빙괴들 사이에 상호작용이 유발되어 극빙은 다양하고 이질적인 형태의 빙상을 보이게 된다. 한편 얼음덩어리의 움직임으로 인하여, 겨울동안 육지에서 생성하여 해안으로 발달하는 1년생 정착빙(land fast ice)과 극빙의 사이에는 shear zone을 형성하며, 하절기 동안 수많은 유빙조각이 떠있는 개수로(open lead)를 형성하여 짧은 기간 동안이나마 선박의 통행을 가능하게 한다. 북극해의 정착빙과 극빙의 경계구역은 약 30~60km 정도의 폭으로서 1년생빙, 다년생빙 그리고 두꺼운 빙맥 등 복잡하고 다양한 빙상이 혼재하는 지역으로서 해저자원 특히 석유와 천연가스의 매장이 풍부한 곳으로 알려져 있고 해양구조물과 쇄빙선의 활동이 빈번히 이루어지고 있다.

현재 자원개발이 가장 활발한 지역인 알래스카,

캐나다 북안의 Beaufort해의 경우 평탄빙의 두께는 1~2m, 최대 2~3m이고 영구극빙의 두께는 최대 3.5m, 빙맥은 보통 수면상부의 높이(sail)가 약 3~4m, 수면하부의 깊이(keel)가 이의 5배 정도되는 것이 발견되고 있다[1]. 시베리아의 자원개발과 관련하여 우리나라가 특별히 관심을 가져야 할 빙해지역으로는 소련의 극동지방과 사할린에의 수송로로 이용되는 Okhotsk해를 지적해야 할 것이다(Fig.1). 이 지역은 비록 북극권을 벗어난 sub-polar 지역이긴 하지만 연중 상당 기간(12월부터 다음해 4월까지 결빙)을 북극해에서 Bering 해협을 통해 남하한 크기 수백 m에서 수 km에 이르는 유빙과 빙판으로 덮혀 선박의 운항과 해양구조물의 활동에 장애가 되고 있다. 일본 북해도 북안에서 측정된 얼음의 최대두께는 0.4m, 소련 연안에서는 최대 1.1m의 얼음이 보고되었다[2]. 작업해역에 도달하기까지 항행선박은 얼음이 존재하는 해역을 저온 속에 장시간 노출되어야 하는 상황을 맞게 된다. 따라서 이 지역을 항해하는 선박의 구조는 빙피나 빙판과의 충돌에 대항할 수 있는 쇄빙 또는 내빙능력(ice-worthiness)을 갖춘 것이어야 한다.

빙해항행선은 일반 해역을 운항하는 선박에 비해 선형, 선체강도, 의장, 기관출력 등에서 최고도의 기술을 요구하는 선박으로서 부가가치가 매우 높은 선박중 한 가지라 할 수 있다. 그러나 자체의 설계능력과 건조실적을 보유하고 있는 나라는 현재 몇몇 선진 국가에 국한되어 있을 뿐이다. 이들 국가들은 북극해 및 주변 해역에서의 실선실험이나 모형실험을 통해 빙해항행선박의 설계에 관한 상당량의 기초 자료를 확보하고 있으나 현재 공개된 자료는 극히 일부분으로서 국내외 학계의 빙해용 선박에 관한 연구들은 이들 제한된 실험자료에만 의존하는 현실이다.

빙해항행선박의 쇄빙능력은 여러 가지로 평가할 수 있으나 기본적으로 항행가능해역의 결빙상태에

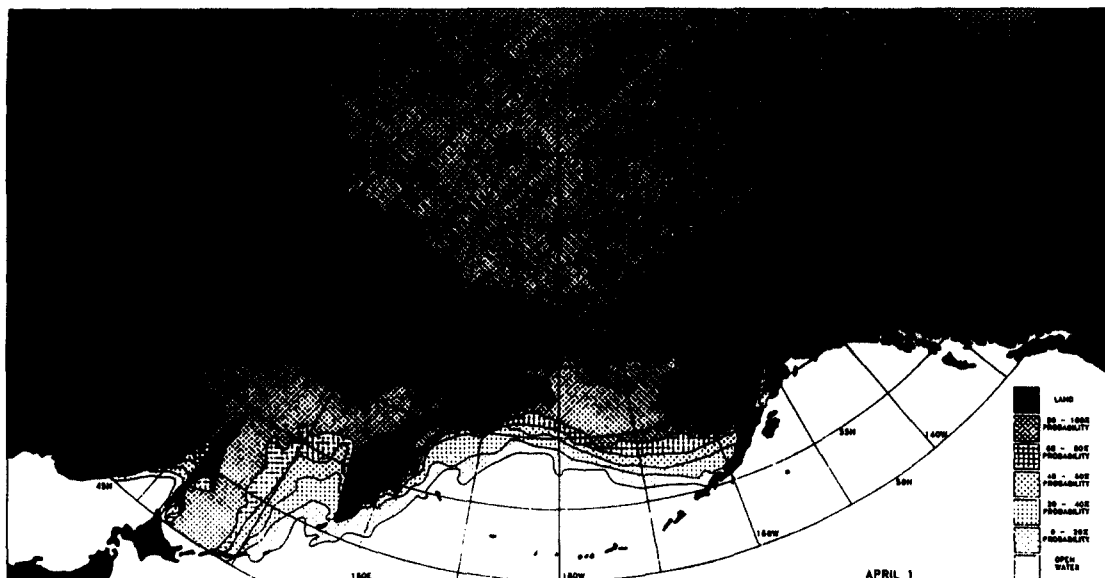


Fig.1 Occurrence of ice in the western arctic

다른 등급으로 나타내는 것이 무방할 것이다. 빙해역의 선박에 적용되는 대표적인 규정으로 캐나다의 CASPPR(Canadian Arctic Shipping Pollution Prevention Regulations)를 들 수 있다. 이는 빙해역에서 선박의 성능을 과신한 결과로 발생할 수 있는 충돌, 좌초에 기인한 해상오염을 방지하기 위해 빙해항행선박의 선체강도와 출력 그리고 빙해역의 빙상조건에 따라 9단계의 구분을 하였다[3]. CASPPR은 선박이 평탄빙에서 약 3knots의 속도로 연속쇄빙을 하면서 진행할 수 있는 최대의 얼음두께(ft)로써 그 단계를 정하고 있다. 규정의 등급이 높아질수록 건조비와 운항비가 늘어나며 반면 추진기관이 차지하는 공간에 의해 선박의 화물적재능력은 줄어들게 된다. 따라서 이러한 설계 규정의 적용은 이 지역의 자원개발의 방법과 시기를 결정하는데 중요한 영향을 주는 인자이다.

빙해항행선의 쇄빙능력을 좌우하는 여러 설계인자 중 선수부의 형상이 가장 중요한 것으로 알려져 있다. 그 형상은 실제로 얼음을 파괴시키는 방식과 쇄빙효율에 직접적으로 영향을 줄 뿐 아니라 설치된 추진기관의 출력과도 밀접하게 연관된다. 이중에서도 선수부와 빙판이 이루는 각도인 선수각(stem angle)이 빙판을 파괴하는 수직하중에 기여하는 바가 가장 크다. 얼음을 압축력에 의해 파괴하기 보다는 굽힘과 전단에 의해 파괴시키는 편이 적은 에너지가 소요되

기 때문에 선수각은 가능한 작은 값이 되어야 하지만 한편으로는 빙해역이 아닌 보통의 해역에서 선수부 슬래밍을 유발할 우려가 있으므로 적절한 각도의 선수각을 유지할 필요가 있다. 초창기의 쇄빙선형에서 보이는 비교적 큰 각도의 선수각이 근래에는 20° 정도로 점차 작아지는 경향이 있다.

빙해항행선에 관한 첫 연구는 19세기 말까지 거슬러 올라가지만, 그 이후 최근까지도 상식적인 수준 이상의 기술상의 진보란 별로 없었다고 보아도 옳을 것이다. 많은 수의 문헌이 실험과 경험적인 결과에 대해 논의하고 있으나 신뢰성있는 실선 데이터는 부족하여 취득가능한 자료에만 적용할 수 있는 여러 가지의 경험식이 존재하게 되었다[4,5].

빙해항행선박이 받는 쇄빙저항은 크게 보아 빙판을 깨뜨리면서 진행되는 과정에서 받는 저항성분과 깨어진 빙판을 진로 밖으로 밀어내는 과정과 선체와 얼음과의 표면마찰에 의한 저항성분으로 크게 볼 수 있는데 Kashteljan et al.[6]이 쇄빙저항 추정에 관한 경험식을 제시한 이래 상당수의 연구자들이 이와 유사한 방법으로 전체저항을 몇 가지 서로 다른 저항성분으로 나누어 계산식을 제시하였다. 이들 연구는 모형실험과 실선실험의 자료를 통계분석하여 쇄빙저항(ice resistance)의 이론적 추정을 시도하였다[7,8]. 특히 Milano[7]는 연속쇄빙시 소비된 전체에너지를 저항성분별로 구분하여 설명한 바

있다. 그러나 실험자료의 정확성에 많은 의문이 제시되기 때문에 이들 자료에 기초한 저항추정식도 신뢰성이 의문시되고 따라서 제안된 수 많은 저항추정식은 오히려 혼란을 가중시킬 우려도 있다. 한편 몇몇 연구는 기존의 실선 데이터를 사용하여 통계적인 처리에 의한 설계요소의 선택과 쇄빙능력의 향상을 시도하였다[9].

White[10]는 순전히 해석적인 방법을 사용하여 빙해항행선의 선수부 형상에 의한 쇄빙능력을 추정하였다. 이 연구에서는 평탄빙에서의 쇄빙능력을 증대시키기 위해 선수부의 stem angle을 작게 만드는 등 선수부 형상에 대한 제반의 수정안이 제시되었다. 한편 빙-구조물 상호작용의 관점에서 쇄빙작업에 따른 얼음의 충격과 선체구조의 전반적인 동적 거동을 다룬 연구도 보인다[11]. 또한 쇄빙선 선체구조에 대한 실선실험과 해석적 방법을 통한 결과를 제시하고 이를 이용하여 선체에 작용한 얼음의 충격하중을 추정한 연구도 보고된 바 있다[12]. 이 연구에서는 시간변화에 따른 충격하중의 추정치와 선체의 변형도를 직접 실선계측함으로써 쇄빙시의 선체구조의 동적거동을 예측할 수 있었다.

본 연구에서는 빙해항행선박 기본설계의 중요한 인자인 선수부 형상과 평탄빙에서의 쇄빙능력 사이의 상관관계를 밝히는데 그 목적이 있다. 또한 본 연구는 얼음의 재료특성을 고려하여 파괴시킬 수 있는 얼음의 최대두께와 파괴된 얼음의 특성길이(characteristic length)를 수치적으로 추정하는데 주안점을 두고 있다.

2. 쇄빙능력의 추정방법

얼음은 일반적인 구조용 재료와는 판이한 성질을 갖고 있으며, 이 재질적 특성에 영향을 미치는 인자가 아주 다양하고 복잡하다. 해빙의 시편을 채취하여 단순인장 혹은 압축시험을 한 결과에 따르면 해빙의 재료강도는 하중이 가해진 속도와 방향, 온도, 결정축의 방향, 결정입자의 크기, 그리고 염분과 같은 포함된 불순물의 분량에 따라 민감하게 달라진다. 이들 인자들이 해빙의 강도에 미치는 영향에 대한 상세한 실험결과는 참고문헌에 비교적 잘 정리되어 있다. 일반적으로 얼음은 깨지기 쉬운 취성(brittle) 재료로 인식되고 있으나 변형율이 느리고 온도가 용융점(0°C)에 가까울 경우 크리프와 같은 점성적 혹은 소성적인 변형현상을 나타내기도 한다. 보통변

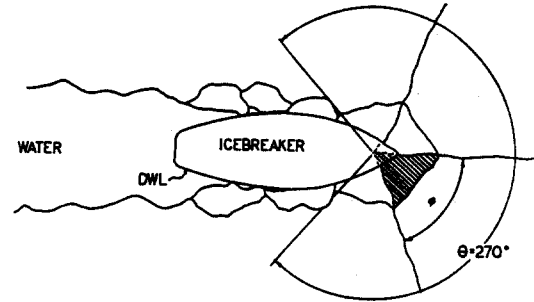


Fig.2 Radial cracks and circumferential cracks in icebreaking process

형율(strain-rate)이 $10^{-5}/s$ 보다 작은 경우 얼음의 변형은 완전소성재료로 보아도 무방하다[3]. 이러한 변형율은 하중이 가해지는 속도로 환산할 때 대략 초당 수 cm의 이동에 지나지 않는다. 그러나 본 연구에서와 같이 평탄빙에서 연속쇄빙시, 선박의 평균전진속도를 3~4knots 정도로 볼 때 선체가 얼음에 가하는 동하중의 속도는 충분히 빠른 값으로서, 이 경우 얼음의 재료적 성질은 탄성으로 처리되어야 할 것이다.

평탄빙에서의 연속쇄빙작용을 이해하기 위해서는 우선 빙해항행선박에 의해 빙판이 파괴되는 과정을 살펴볼 필요가 있다. Fig.2는 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 과다한 굽힘작용을 주면 하중점을 중심으로 반경방향 균열이 전파되면서 빙판의 파괴 과정이 시작된다. 이후 썰기형 보에 균열이 생길 때까지 빙판은 굽힘작용을 받으며, 결국 썰기보 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.

빙해항행선에서 보통 쇄빙능력이 우수하다고

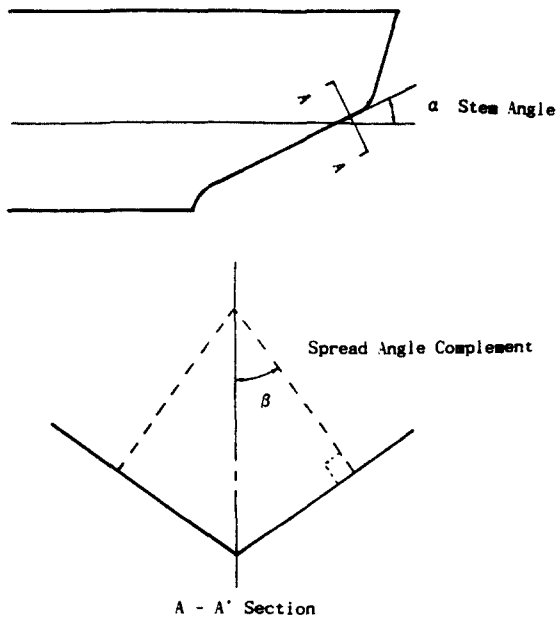


Fig.3 Definition of design parameters in an icebreaker bow

할 때 이는 선박의 추진력에 의해 파괴시킬 수 있는 얼음두께가 큰 것을 의미한다. 물론 쇄빙능력이 좋다는 말이 선체의 쇄빙저항이 작다는 뜻으로도 받아들여질 수 있으나 본 연구에서는 쇄빙능력을 단지 파괴시킬 수 있는 최대의 얼음두께와 관련하여 생각하기로 한다. Fig.3에 빙해항행선박의 선수부 설계에 관계되는 형상변수들을 도시하였다. 여기에서 선수각(stem angle)은 α , 전개여각(spread angle complement)은 β 로 정의하고 있다. 그외에도 flare angle이나 half entrance angle 등이 있으나 본 연구에서는, 쇄빙능력에 직접 영향을 주는 선수각의 중요성에 비하여, 다른 변수들은 무시하거나 고려하지 않았다. 선박의 기관과 프로펠러에 의한 추력은 연속쇄빙시 선수부에 통해 빙판에 전달된다. 그 추력의 수직성분이 바로 빙판을 굽힘에 의해 파괴시키는 힘인데 프로펠러의 추력과 선수부의 형상 그리고 수직하향력 사이의 관계는 상당수의 연구자들에 의해 경험식 혹은 이론식으로 표현된 바 있다[13].

예를들면 White[10]는 쇄빙과정에서 선박의 프로펠러 추력 T 를 빙판에 작용하는 수직하향력 F_v 와 서로 연결시키는 수학적 모델을 다음과 같이 제시하였다.

$$F_v = \frac{\cos\alpha(\cos\beta + \mu \sin\beta) - \mu \sin\alpha}{\sin\alpha(\cos\beta + \mu \sin\beta) + \mu \cos\alpha} T \quad (1)$$

여기서 μ 는 운동마찰계수에 해당한다. 식(1)은 쇄빙선의 쇄빙능력을 추정하는 유사한 식들에 비해 관계된 변수들 사이의 역학적인 관계가 비교적 정연하게 설명된 것이라 할 수 있다. 이 식에서 동일한 배수량에 동일한 추력을 가진 선박이라면 쇄빙능력을 좌우할 수직하향력은 선수부의 형태, 다시 말하면 선수각 α , 전개여각 β 의 값에 의해 결정됨을 알 수 있다. 선수각과 전개여각이 작을수록 수직하향력이 커지고 또한 쇄빙능력도 증대된다는 결론인데(β 의 영향은 비교적 작다), 실제로는 이들 각도가 작아짐으로써 선수부의 형태는 평판에 가까운 꼴이 되어 유체저항이나 조종성능 등 많은 문제점이 발생할 수 있으므로, 쇄빙능력을 증대시키는 효과는 반감된다.

한편 연속쇄빙을 속도가 일정한 정상상태로 가정할 때 (1)식으로 계산되는 수직하향력 F_v 는 시간에 관계없는 일정한 값을 의미한다. 그러나 연속쇄빙이라 하더라도 선수부와 얼음과의 상호작용은 매우 복잡하고 순간적이어서 실제로 이 힘은 일정한 값으로 볼 수 없다. 실선계측을 통해 얻어진 결과는 선체와 얼음사이의 상호작용력이 톱니형태의 주기적인 하중으로서 선체와 얼음의 최초 접촉이후 아주 짧은 시간동안에 최대치에 이르렀다가 균열의 전파 그리고 빙판의 파괴와 함께 급격히 감소되는 충격하중으로 생각할 수 있다. 본 연구에서는 이러한 관점에서 White가 유도한 공식을 쇄빙능력을 추정하는 기본식으로 사용하였으며 (1)식에서 계산된 수직하향력은 일정한 크기가 아니라 짧은 순간만 작용하는 충격하중이라 가정하였다. 또한 White는 수직방향힘 F_v 와 파괴시킬 수 있는 빙판의 최대두께 h 사이의 관계를 다음과 같은 경험식으로 다루고 있다.

$$F_v = c \sigma_t h^2 \quad (2)$$

여기서 c 는 상수로서 해빙의 인장강도 σ_t , 빙판의 두께 h 에 대하여 0.425로 사용하고 있다. 식(2)에서는 상수자체의 중요성보다는 파괴되는 빙판의 최대두께가 수직방향힘의 제공근에 비례한다는 관계를 주목할 필요가 있다.

한편 하중점을 중심으로 반경방향 균열이 전파된 빙판을 탄성지지된 썩기형 보로 취급하는 연구도 Nevel[14]에 의해 수행되었는데 그는 급수(power

series) 전개를 사용하여 썩기형 보의 끝부분에 작용한 수직하중에 의해 유발되는 최대굽힘모멘트의 위치와 크기를 근사적으로 구하였다. 그러나 이 연구에서는 탄성응답 자체에 관심을 두었기 때문에 최대 굽힘모멘트의 위치와 썩기보가 파괴되는 위치를 연관시키지 않았다. 한편 탄성지지된 썩기보의 문제와 관련하여, 얼음을 소성재료로 취급하여 소성힌지의 발생에 따른 빙판의 파괴 가능성을 다룬 연구결과도 보고된 바 있다[17,18]. 이와 유사하게 탄성지지된 평판의 이론을 사용하여 얼음의 내하중능력 (bearing capacity)을 추정하려는 연구가 보고된 바 있는데 이러한 대부분의 연구들은 정적인 하중이나 혹은 준정적하중이 빙판에 작용하는 경우를 주로 다루고 있다[15].

3. 충격응답의 수치 모델링

선수각의 크기에 따라 평판빙과의 접촉면에 수평방향과 수직방향의 분력이 작용하고 그 중 수직방향의 분력은 얼음에 횡방향의 굽힘모멘트를 작용시킴으로써 압축에 의한 파괴보다 굽힘에 의한 파괴를 용이하게 한다. 본 연구에서는 빙해항행선박이 평판빙에서 연속쇄빙을 하고 있는 상황을 탄성지지기반을 가진 기초 위에 놓인 유한 길이의 썩기보의 문제로 가정한다. 이 문제는 선박의 전진속도에 따른 수직방향의 충격하중에 의한 탄성지지기반에 놓인 변단면보의 2차원(보의 길이와 시간에 따른) 동적응답을 구하는 문제로 귀결된다. 여기에서 얼음보에 작용한 굽힘모멘트에 의해 어떤 위치에서 발생한 최대인장응력이 얼음의 굽힘파괴강도에 도달한다면 그 부분에서 파단이 일어날 가능성이 가장 높다고 판단할 수 있다.

본 수치해석을 위해 택한 좌표축과 변수들의 정의는 Fig.4에 보여주고 있다. 여기서는 굽힘모멘트에 의해 보의 중간에 파단이 일어나는 순간까지의 탄성응답만을 고려한다. 미소요소 dx에 대한 운동방정식은 다음과 같이 얻어진다.

Dynamic Force Equilibrium :

$$m\ddot{y} + c\dot{y} + ky - \frac{\partial V}{\partial x} = P(x,t) \tag{3}$$

Dynamic Moment Equilibrium :

$$I_z \ddot{\phi} - V + \frac{\partial M}{\partial x} = Q(x,t) \tag{4}$$

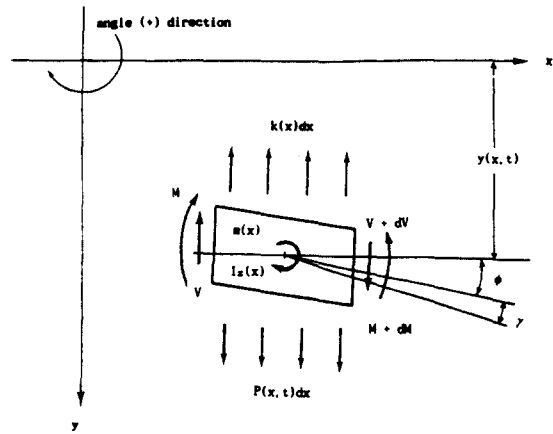


Fig.4 Coordinate system and sign convention

Moment-Curvature Relation :

$$M = -EI \frac{\partial \phi}{\partial x} \tag{5}$$

Shear-Slope Relation :

$$V = \kappa AG \gamma \tag{6}$$

$$\frac{\partial y}{\partial x} = \gamma + \phi \tag{7}$$

여기서,

- m(x) : 보의 단위길이당 유효질량(effective mass)
- c(x) : 단위길이당 감쇠력계수(damping coefficient)
- k(x) : 탄성지지기반의 단위길이당 강성계수(=ρ_w · g)
- I_z(x) : 단면의 회전관성모멘트
- EI(x) : 굽힘강성(bending rigidity)
- κAG(x) : 전단강성(shear rigidity)
- P(x,t) : 단위길이당 하중(external force)
- Q(x,t) : 단위길이당 외부모멘트(external moment)
- y(x,t) : 변위(displacement)
- φ(x,t) : 굽힘에 의한 각변위(bending slope)
- γ(x,t) : 전단에 의한 각변위(shear slope)
- M(x,t) : 굽힘모멘트(bending moment)
- V(x,t) : 전단력(shear force)

위에 정의된 변단면보의 탄성 및 관성특성치들은 보의 길이에 따라서 변하기 때문에 앞서의 운동방정식 (3)-(7)의 엄밀해는 균일단면보와 같은 특수조건이 아니면 구할 수 없다. 따라서 수치적인 방법을

선택하였는데 본 연구에서는 유한차분법을 이용하였다. 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 본 연구에서는 4차의 Runge-Kutta 적분법을 사용하여 시간의 변화에 따른 보의 동적응답을 계산하였다.

4. 계산결과 및 고찰

빙해항행선박의 평탄빙에서의 연속쇄빙시, 선수부에서 전달된 수직하향력이 빙판에 충격하중으로 작용하면 하중점을 중심으로 부채꼴 모양의 반경방향 균열이 전파됨으로써 빙판의 파괴과정이 시작되고, 이후 썰기보 형상의 빙판에 원주방향의 2차균열이 형성되어 완전히 붕괴될 때까지 빙판은 하중을 지탱하게 되고 따라서 선박은 전진이 억제된다. 이러한 상황을 전제로 하여 본 연구에서는 Fig.5와 같은 모양의 썰기형 보를 대상으로 수치계산을 수행하였다. 해빙에 관해서는 다음과 같은 재료특성치들을 선택하였다.

- 해빙의 밀도: $\rho=918\text{Kg/m}^3$
- 해빙의 굽힘강도: $\sigma_f=0.5\text{MPa}$
- 탄성계수: $E=2.0\text{GPa}$
- Poisson's ratio: $\nu=0.33$
- 전단탄성계수: $G=0.767\text{GPa}$
- Equivalent Shear Area Coefficient: $\kappa=0.851$
- 얼음과 선체 사이의 운동마찰계수: $\mu=0.2$
- 해수의 밀도: $\rho_w=1025\text{Kg/m}^3$

한편 빙판의 두께h와 길이L, 사이각 ϕ 등 썰기형 변단면보의 제원과 선수부의 형상 즉 α, β 및 충격

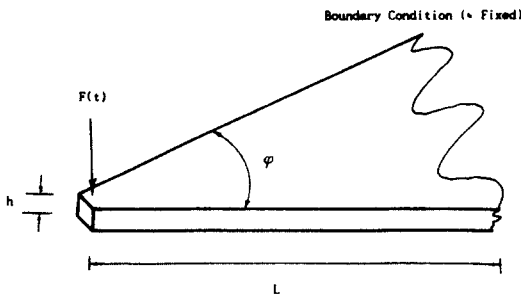


Fig.5 Wedge type model beam for sample calculation

하중의 크기 F_v 에 관한 정보는 parametric study를 통해 수치계산에 도입되도록 하였다. 변수를 변화시키는 방법은 다양하지만 연구의 목적인 선수부의 형상과 쇄빙능력 그리고 빙판의 파괴특성 사이의 관계를 파악하기 위하여 우선 대표적인 조건을 선택하여 계산을 수행하였다. 썰기보의 길이는 50m와 100m를 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 썰기보의 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(비교 목적으로 무한한 길이의 썰기보를 참고할 수는 있을 것임; 참고문헌[17]). 한편 썰기형 보의 사이각으로 30°와 45° 그리고 60°를 임의로 선택하였다. 빙판이 반경방향의 균열에 의해 형성되는 부채꼴 형상의 사이각으로 Kashteljan et al.[6]은 현장관측을 통해 약 67.5° 정도의 값을 보고하고 있다.

본 연구에서는 이상과 같이 선정된 자료를 이용하여 빙판의 두께를 변화시키면서 굽힘모멘트에 의한 파괴가 일어나는 지점을 찾아냈으며 또한 선박의 선수부 stem angle의 변화에 따른 수직하향력에 의해서 파괴시킬 수 있는 최대의 얼음두께를 계산한 결과를 Fig.6-Fig.10에 수록하였다.

먼저 Fig.6은 선수각의 변화에 따른 수직하향력의 크기를 전개여각과 프로펠러의 추력을 일정하게 고정시킨 상태에서 계산한 것으로 White의 식(1)을 사용한 결과를 보여주고 있다. 이 계산에서 사용

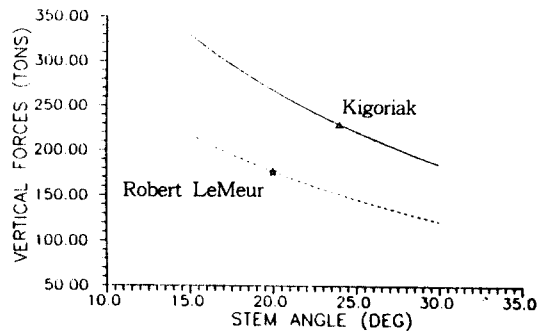


Fig.6 Vertical impact forces against bow stem angles

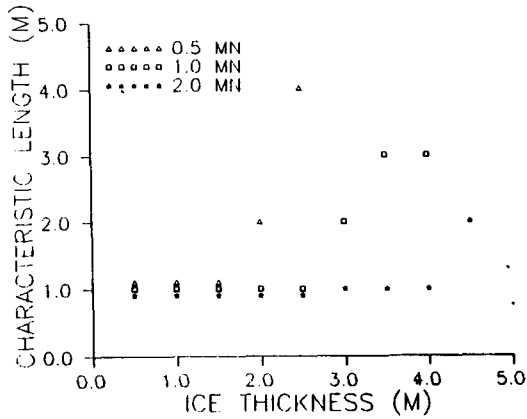


Fig.7 Characteristic length versus ice thickness ($\varphi=60^\circ$ L=50m)

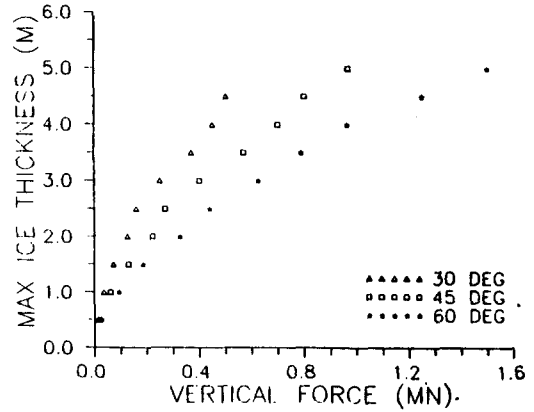


Fig.9 Maximum ice thickness broken versus vertical forces(L=50m)

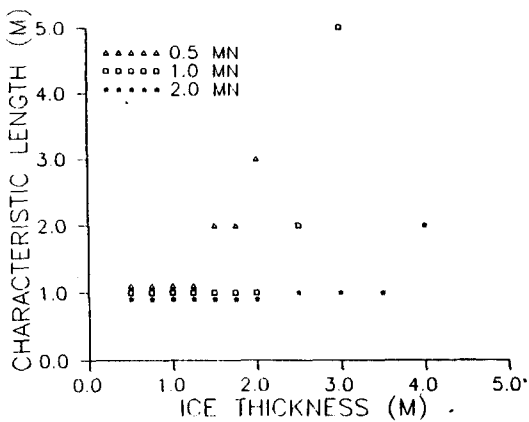


Fig.8 Characteristic length versus ice thickness ($\varphi=60^\circ$ L=100m)

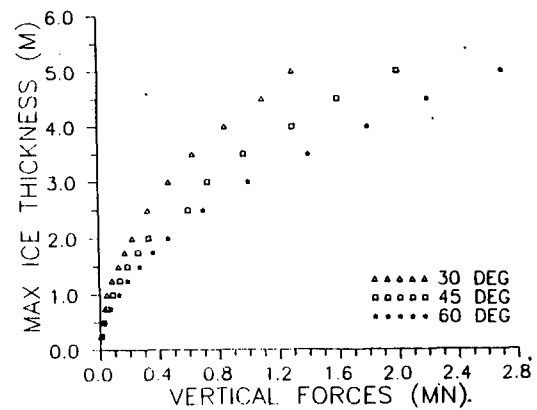


Fig.10 Maximum ice thickness broken versus vertical forces(L=100m)

한 전개여각 β 와 추력 T의 값은 캐나다가 보유하고 있는 쇄빙형 보급선인 Kigoriak호와 Robert LeMeur 호의 실선설계치에서 인용한 것으로서 [12][16], Fig. 6에서는 그 선수각의 크기만을 변화시킨 것이다. 이 두 선박은 추마력(shp)이 각각 16,400마력과 9500마력으로서(프로펠러의 최대추력은 162ton과 107ton) 쇄빙능력은 각각 1.81m와 1.58m인 것으로 알려져 있다. 그림에서 볼 수 있듯이 수직하향력의 크기 F_v 는 두 선박에 대하여 각각 230ton과 179ton으로 계산된다. 그러나 이만한 크기의 충격하중이 한꺼번에 쇄빙형 빙판의 끝부분에 작용한다면 이론상 계산되는 쇄빙능력은 실제의 쇄빙능력보다 월등히 큰 것으로 나타난다. 이러한 모순은 선박의 선수 부에서 가해지는 수직하향 충격력이 여러개의 쇄기

보에 분배되어 작용한다는 점을 생각하면 곧 해결된다. 쇄기보의 사이각을 30° 에서 90° 사이라고 가정할 때 선박이 빙판 하나에 작용하는 수직하향력은 전체 하중의 $\frac{1}{9} \sim \frac{1}{3}$ 정도에 지나지 않으므로 이러한 감소된 충격하중에 의해 계산되는 두 선박의 쇄빙능력은 실선계측의 결과와 그다지 큰 차이를 보이지 않는다. 한편 이론상 최고의 쇄빙능력을 얻기 위해서는 선수각이 아주 작아야 하지만 가장 적절한 크기의 선수각은 쇄빙능력과 함께 빙해역이 아닌 해역에서의 선박의 조종과 저항, 슬래밍과 같은 사항을 고려해서 결정된다.

Fig.7와 Fig.8에는 60° 사이각을 갖는 쇄기보의 50m와 100m 길이에 대하여 빙판의 두께를 변화시키

면서 굽힘파괴가 일어나는 지점 즉, 얼음이 파괴되는 길이(특성길이)를 계산하였다. 동일한 하중을 받을 때 빙판의 두께가 클수록 파괴되는 빙판의 크기는 커지는 것을 알 수 있다. 그리고 빙판의 두께가 같을 경우 하중이 클수록 파괴되는 빙판의 크기가 작아지는데, 이 결과는 하중이 클수록 굽힘모멘트의 한계치 M_c 에 도달되는 시간이 짧기 때문에 응력파가 전달되는 거리가 작아지는 것과 관련된다고 판단할 수 있다. 이 결과를 통해 알 수 있는 전체적인 경향은, 임의 두께의 빙판에 있어서 하중이 점차 증대됨에 따라 처음에는 파괴되지 않던 빙판이 깨어지기 시작하는데 이러한 순간을 전후하여 얼음이 파괴되는 위치는 쇄기보의 끝부분 근처에서 보다는 보의 중간부분에서 끝부분에 걸쳐 불규칙하게 일어나고 있으며 이 순간의 시간은 쇄기보의 고유 진동주기의 $\frac{1}{2}$ 이후에 발생하고 있다. 그리고 하중이 더욱 증가하면서 빙판의 균열 위치와 파괴되는 시간은 보의 끝부분에 가까운 위치에서 아주 짧은 순간에 이루어진다.

한편 Fig.9와 Fig.10에는 충격하중의 크기 F_v 에 따라 파괴가능한 빙판의 최대두께 h_{max} 를 도시하였다. 충격하중의 크기는 선수부 stem angle의 값으로 대표되고 파괴가능한 빙판의 최대두께는 곧 쇄빙능력을 의미하므로 이 두 그림은 선수형상의 변화에 따른 쇄빙능력의 변화를 간접적으로 나타내고 있다고 볼 수 있다. 그림에 의하면 하중이 증가할수록 파괴될 수 있는 빙판의 두께도 비선형적으로 증가하고 있다.

탄성지지된 평판에서 하중의 영향범위를 나타내는 기준거리로 간혹 특성길이(characteristic length)라는 표현을 쓰기도 하는데 여기서 말하고 있는 특성길이는 $l = (D/k)^{1/2}$ 로 정의되는 값으로서 탄성지지된 평판에 수직하중이 작용할 때 평판의 변형에 직접 영향을 주는 범위를 나타내기 위해 설정한 기준반경이라는 의미이다(action radius of the floating plate). 여기서 D 는 굽힘강성을 나타내고 k 는 탄성지지기반의 강성계수($=\rho_w g$)를 나타내고 있다. 그러나 본 연구에서 사용하고 있는 특성길이는 이러한 정의와는 달리 실제 빙판이 수직하중을 받아 생긴 원주방향 균열로 인해 붕괴되는 지점까지의 거리를 뜻하고 있다. 실제로 원주방향의 균열은 보통 빙판의 두께의 3배 내지 6배 정도의 거리에서 발생되는 것으로 관측되고 있으며 또한 파괴되는 빙판의 최대두께는

수직하중 크기의 제곱근에 비례한다는 관계가 보고된 바 있다. 이런 점을 감안할 때 본 연구의 수치계산 결과는 관측되는 얼음의 특성길이와 최대얼음의 두께와 큰 차이를 보이지 않는 것을 알 수 있다.

5. 결 론

본 연구는 빙해항행선박 기본설계의 중요한 인자인 선수부 형상과 평탄빙에서의 쇄빙능력 사이의 상관관계를 이론적으로 밝히는데 그 목적이 있다. 또한 얼음의 재료적 성질을 고려하여 파괴시킬 수 있는 얼음의 두께와 파괴된 얼음의 특성길이를 수치적으로 추정하는데 주안점을 두고 있다. 본 연구에서는 반경방향의 균열이 전파된 빙판을 탄성지지기반 위에 놓인 쇄기형의 변단면보로 간주하여 이 외팔보의 한 쪽 끝에 빙해항행선박의 선수부에 의한 충격하중이 가해진 경우에 빙판에 발생하는 굽힘파괴의 가능성을 살펴 보았다. 본 연구를 통해 얻어진 결론은 다음과 같다.

1) 동일한 하중을 받을 때 빙판의 두께가 클수록 파괴되는 빙판의 크기는 커진다. 빙판의 두께가 같을 경우 하중이 클수록 파괴되는 빙판의 크기가 작아지는데, 이는 하중이 클수록 굽힘모멘트의 한계치에 도달되는 시간이 짧기 때문에 응력파가 전달되는 거리가 짧아지는 것과 관련된다.

2) 임의 두께의 빙판에 있어서 하중이 점차 증대됨에 따라 처음에는 파괴되지 않던 빙판이 깨어지기 시작하는데 이러한 순간을 전후하여 얼음이 파괴되는 위치는 쇄기보의 끝부분 보다는 보의 중간부분에서 끝부분에 걸쳐 불규칙하게 일어나고 있으며 이 순간의 시간은 쇄기보의 고유진동주기의 $\frac{1}{2}$ 이후에 대부분 발생하고 있다. 그러나 하중이 더욱 증가하면서 빙판의 균열 위치와 파괴되는 시간은 거의 균일한 값으로 보의 끝부분에 가까운 위치에서 아주 짧은 순간에 이루어진다.

3) 하중이 증가할수록 파괴될 수 있는 빙판의 두께도 증가하고 있는데 빙판의 최대두께가 수직하중 크기의 제곱근에 비례한다는 보고와 비슷한 비선형적인 관계를 나타내고 있다.

얼음의 존재는 인간의 활동을 제약하고 구조물에 손상을 주는 환경하중일 수도 있으나 한편으로는 동절기 도로나 비행장 활주로 그리고 건축자재로도 사용할 수 있어 얼음의 내하중능력이 필요할 때가

있다. 공학적 관심에서 볼 때 국내의 극지공학현실은 겨우 개념 정립의 단계에 와 있다고 볼 수 있다. 그러나 남극기지 건설과 시베리아 개발에의 참여를 통하여 극지공학에 대한 필요성이 점차 높아지는 현 시점에서 볼 때, 빙해항행선박에 관한 본 연구는 극지환경을 극복하기 위한 기초작업으로서 의미가 있다.

빙해항행선박은 금후 우리나라의 조선산업이 지향해야 할 고도의 기술집약형 선박중 하나로서, 빙해항행선의 설계와 건조는 축적된 기술과 자료에 의해서만 가능하기 때문에 이론적 접근과 함께 실험에 의한 신뢰성있는 자료를 축적해야 한다. 이를 위해서 선진 각국에서는 빙해수조의 건조와 빙역학 실험실의 건립을 위한 투자가 활발히 이루어지고 있다. 특히 캐나다와 미국, 핀란드와 소련을 중심으로 쇄빙선의 모형실험과 쇄빙저항 추정에 필요한 실험자료를 많이 축적하고 있다. 일본에서의 빙해항행선, 극지공학 관련 연구도 상당히 활발하며, 1981년에 이미 최고 수준급의 빙해수조의 완공과 더불어 여러 척의 빙해항행선을 보유하고 있다. 또한 일본선박진흥회의 연구보조사업으로 빙해용선박 및 구조물의 설계 건조에 관한 연구가 장기계획으로 수행된 바 있다[19]. 현재 국내에서의 극지공학, 빙해항행선에 관한 연구는 선진국에서 수행된 연구나 실험의 state-of-the-art 를 고찰하는 초보적인 단계에 머무르고 있는 상태로써 학계나 산업계의 인식도 역시 미미한 실정이다[20-22]. 시베리아 자원개발에 관심을 가진 우리로서는 가까운 장래에 있을 극지관련 기술의 국제경쟁에 대비하여 독자적인 연구실적과 요소기술의 축적이 절실히 요구되는 시기라 할 수 있다.

끝으로 본 연구는 1990년도 한국학술진흥재단의 연구비 지원으로 수행된 연구결과임을 밝힌다.

참 고 문 헌

- [1] Sanderson, T.J.O., *Ice Mechanics/Risks to Offshore Structures*, Graham and Trotman, London, 1988.
- [2] Cammaert, A.B. and Muggeridge, D.B., *Ice Interaction with Offshore Structures*, Van Nostrand Reinhold, New York, 1988.
- [3] Michel, B., *Ice Mechanics*, Les Presses De L'universite Laval, Quebec, Canada, 1978.
- [4] Glen, I.F., "The Canadian Arctic Marine Technology R & D Program: A Review", *Marine Technology*, Vol.21, pp. 242-255, 1984.
- [5] Jones, S.J., "A Review of Ship Performance in Level Ice", *Proceedings of the 8th International Conference on Offshore Mechanics and Arctic Engineering*, The Hague, Vol.IV, pp. 325-342, 1989.
- [6] Kashteljan, V.I., Poznyak, I.I. and Ryvlin, A.J., "Ice Resistance to Motion of a Ship", *Sudostroyeniye*, Leningrad, 1968.
- [7] Lewis, J.W. and Edwards, R.Y., "Methods for Predicting Icebreaking and Ice Resistance Characteristics of Icebreakers", *Society of Naval Architects and Marine Engineers Transactions*, Vol.78, pp.213-249, 1970.
- [8] Milano, V.R., "Ship Resistance to Continuous Motion in Ice", *Society of Naval Architects and Marine Engineers Transactions*, Vol.81, pp.274-306, 1973.
- [9] Dick, R.A. and Laframboise, J.E., "An Empirical Review of the Design and Performance of Icebreakers", *Marine Technology*, Vol.26, pp.145-159.
- [10] White, R.M., "Prediction of Icebreaker Capability", *The Royal Institution of Naval Architects*, Vol.112, pp.225-251, 1970.
- [11] Vaughan, H., "Flexural Response of Ice-Breaking Ships to Impact Loads", *The Royal Institution of Naval Architects*, Vol.128, pp. 259-267, 1986.
- [12] Ghoneim, G.A.M., Johansson, B.M., Smyth, M.W. and Grinstead, J., "Global Ship Ice Impact Forces determined from Full-scale Tests and Analytical Modeling of the Icebreakers Canmar Kigoriak and Robert LeMeur", *Society of Naval Architects and Marine Engineers Transactions*, Vol.92, pp.253-282, 1984.
- [13] Scarton, H.A., "On the Role of Bow Friction in Icebreaking", *Journal of Ship Research*, Vol. 19, pp.34-39, 1975.
- [14] Nevel, D.E., "The Narrow Free Infinite Wedge on an Elastic Foundation", *Cold Regions Transactions of SNAK*, Vol. 29, No. 4, November 1992

- Research and Engineering Laboratory, Hanover, New Hampshire, Report 79, 1961.
- [15] Kerr, A.D., "On the Determination of Horizontal Forces a Floating Ice Plate exerts on a Structures", *Journal of Glaciology*, Vol.22, pp.123-134, 1978.
- [16] Tue-Fee, K.K. and Keinonen, A.J., "Full-Scale Maneuvering Tests in Level Ice of Canmar Kigoriak and Robert LeMeur", *Marine Technology*, Vol.23, pp.131-138, 1986.
- [17] Banerjee, S., Rigid-Plastic Analysis of Wedge Shape Floating Beams, Doctoral Dissertation, M.I.T., Cambridge, MA, 1985.
- [18] Wierzbicki, T., Xirouchakis, P. and Choi, S.K., "Flexural Failure of Softening Ice Sheets", *Proceedings of the 5th International Conference on Offshore Mechanics and Arctic Engineering*, Tokyo, Japan, Vol. IV, pp.497-506, 1986.
- [19] 驅野啓介, "碎氷船", 日本造船學會誌, No.603, pp.458-466, 1979.
- [20] 한국기계연구소, 빙의 파괴강도에 관한 연구 (1,2), 과학기술처 연구 보고서 UDC551.46, 1987, 1989.
- [21] 대우조선선박해양설비연구소, 빙해 항행선에 관한 연구, 연구보고 D-015, 1985.
- [22] 고상용, 쇄빙선의 쇄빙능력 추정과 선수형상 설계에 관한 연구, 한국해양대학교 석사학위논문, 1991.