



저작자표시-비영리-변경금지 2.0 대한민국

이용자는 아래의 조건을 따르는 경우에 한하여 자유롭게

- 이 저작물을 복제, 배포, 전송, 전시, 공연 및 방송할 수 있습니다.

다음과 같은 조건을 따라야 합니다:



저작자표시. 귀하는 원저작자를 표시하여야 합니다.



비영리. 귀하는 이 저작물을 영리 목적으로 이용할 수 없습니다.



변경금지. 귀하는 이 저작물을 개작, 변형 또는 가공할 수 없습니다.

- 귀하는, 이 저작물의 재이용이나 배포의 경우, 이 저작물에 적용된 이용허락조건을 명확하게 나타내어야 합니다.
- 저작권자로부터 별도의 허가를 받으면 이러한 조건들은 적용되지 않습니다.

저작권법에 따른 이용자의 권리는 위의 내용에 의하여 영향을 받지 않습니다.

이것은 [이용허락규약\(Legal Code\)](#)을 이해하기 쉽게 요약한 것입니다.

[Disclaimer](#)

공학석사 학위논문

평탄빙 상태에서 쇄빙연구선 ARAON호의  
선체 강도 평가

Evaluation of Hull Strength for IBRV ARAON  
under the Level Ice Condition

지도교수 최 경 식



한국해양대학교 대학원

해양공학과

박 영 진

本 論 文 을 朴 榮 鎭 의 工 學 碩 士 學 位 論 文 으 로 認 准 함.

위원장 : 공학박사 서 영 교 (인)

위 원 : 공학박사 김 성 찬 (인)

위 원 : 공학박사 최 경 식 (인)



한국해양대학교 대학원

해양공학과

박 영 진

# Evaluation of Hull Strength for IBRV ARAON under the Level Ice Condition

by  
*YOUNG-JIN PARK*

Department of Ocean Engineering  
Graduate School of Korea Maritime University

## ABSTRACT

As the oil price soars and the Russian economy revives, new orders of icebreaking cargo vessels increased and that trend becomes an important issue in the world's shipbuilding market. One of the technical problems concerned during navigation in ice-covered waters is an accurate estimation of ice load exerted on ship's hull. However, that still remains as a rather difficult task in the design of icebreaking vessels.

To correctly estimate ice load on ship's hull, it is essential to carry out full-scale ice field trials to measure hull responses under given ice conditions. And it is necessary to gather sea ice information in understanding the ice-ship interaction dynamics. The first Korean-made icebreaking research vessel ARAON had an ice field trial in the Arctic Ocean during the summer season of 2010. The data gathered from the ice field trial in Chukchi Sea and Beaufort Sea during the Arctic voyage of ARAON includes material properties of sea ice such as ice temperature, density and salinity, compressive strength of sea ice as well as ship's hull responses such as strain gauge records.

This study focuses on two issues ;

Firstly, the procedures of ice field trial of ARAON and the collected sea ice data are described. Ice thickness is a primary parameter among various ice properties. Sea ice thickness in the summer season in the Arctic Ocean changes greatly year to year depending on prevailing weather conditions. The ice thickness at each test sites was less than 2m but sea ice was often superimposed hence the thickness sometimes exceeds 4m.

Ice strengths are also important factors in consideration of ice load on ship's hull. Compressive strength and flexural strength of sea ice were measured. Due to warm weather conditions, it was difficult to find a large ice floe to conduct a proper ice trial and the ice was generally weak.

Secondly, hull strength for the ARAON was analysed in consideration of a level ice conditions. The nonlinear FEA approach to analyse hull structural responses to the level ice load was described in this study. Concerning possible ice-ship interaction scenarios, the stresses and deformation of side hull structures were calculated using a commercial FEA program PATRAN

Based on an FMA Ice Class Rule "Tentative Guideline for Application of Direct Calculation Methods Longitudinally Framed Structure (FMA, 2003)", the estimated ice load was applied to ARAON's narrow horizontal strip areas of the side hull structures and the responses (i.e., maximum deformation at maximum ice pressure) were calculated according to loading and unloading paths.

Certain design requirements, such as frame spacing and shell thickness are discussed.

# 목 차

ABSTRACT .....	i
목 차 .....	iii
그 립 목 차 .....	v
표 목 차 .....	vii
제 1 장 서 론 .....	1
제 2 장 ARAON호의 북극해 실선시험 및 해빙의 재료특성 계측 .....	5
2.1 실선시험 현장 .....	6
2.2 해빙의 재료특성 계측 .....	9
2.2.1 해빙의 두께 측정 .....	9
2.2.2 온도 측정 .....	11
2.2.3 염분 측정 .....	13
2.2.4 밀도 계산 .....	13
2.2.5 압축강도 측정 .....	13
2.3 시험결과와 분석 .....	16
제 3 장 선체에 작용하는 빙하중 .....	25
3.1 선체의 손상 부위에 따른 빙하중 시나리오 .....	25
3.2 선체의 구조 안전성 평가 .....	32
제 4장 ARAON호의 평탄빙 하중에 의한 구조해석 .....	38
4.1 쇄빙연구선 ARAON호의 제원 .....	38

4.2	경계조건 및 하중조건 .....	39
4.2.1	경계조건 .....	40
4.2.2	빙하중(Ice pressure) 산정 .....	41
4.3	구조해석 모델링 .....	47
4.4	구조해석 결과 .....	55
제 5 장 결 론 .....		62
참 고 문 헌 .....		64



## 그 립 목 차

Fig. 1-1 Northern Sea Route (NSR) .....	1
Fig. 2-1 Ice field test sites .....	6
Fig. 2-2 Profiles of ice thickness (August 3, 2010) .....	8
Fig. 2-3 Profiles of ice thickness (August 4, 2010) .....	8
Fig. 2-4 Profiles of ice thickness (August 5, 2010) .....	9
Fig. 2-5 Augering for ice thickness measurement .....	10
Fig. 2-6 Thickness measurement using ice gauge .....	10
Fig. 2-7 Coring with 3" ice corer .....	12
Fig. 2-8 Ice temperature measurement .....	12
Fig. 2-9 Compressive strength measurement .....	15
Fig. 2-10 Profiles of ice temperature (Arctic 8/3~8/5, 2010) (박영진 외, 2010) .....	18
Fig. 2-11 Profiles of ice salinity (Arctic 8/3~8/5, 2010) (박영진 외, 2010) .....	19
Fig. 2-12 Profiles of ice density (Arctic 8/3~8/5, 2010) (박영진 외, 2010) .....	20
Fig. 2-13 Profiles of ice compression strength (Arctic 8/3~8/5) (박영진 외, 2010) .....	21
Fig. 2-14 Profiles of sea ice properties (Likhomanov, 2010) .....	23
Fig. 3-1 Positions on the sea ice and ship collisions (Daley et al., 2008) .....	27
Fig. 3-2 Sea ice and ship interaction scenarios (Daley, 2006) .....	28
Fig. 3-3 Reflected impact at the midship after glancing impact (Daley et al., 2008) .....	31



Fig. 3-4 Flow chart of analysis procedure .....	37
Fig. 4-1 General arrangement of the IBRV ARAON (한진중공업, 2009) .....	38
Fig. 4-2 Boundary conditions .....	40
Fig. 4-3 Load path (loading and unloading phases) .....	44
Fig. 4-4 Idealization of the structure .....	48
Fig. 4-5 Regions of ice strengthening for on icebreaker (Russian Maritime Register of Shipping, 2005) .....	49
Fig. 4-6 Local area adopted in the analysis for the IBRV ARAON ..	50
Fig. 4-7 Global model of the IBRV ARAON .....	51
Fig. 4-8 Local model of the IBRV ARAON .....	51
Fig. 4-9 Deformation at local area .....	52
Fig. 4-10 Deformation at forward .....	52
Fig. 4-11 Deformation at midship .....	53
Fig. 4-12 Deformation at aft .....	53
Fig. 4-13 Deformation according to load ratio for forward .....	56
Fig. 4-14 Deformation according to load ratio for midship .....	56
Fig. 4-15 Deformation according to load ratio for aft .....	57
Fig. 4-16 Stress wave propagation according to the load ratio .....	58

## 표 목 차

Table 2-1 Average ice thickness in Chukchi Sea (Ostreng et al., 1999) .....	6
Table 2-2 Physical-mechanical ice properties .....	16
Table 3-1 Ice conditions and various ice-ship interaction modes (정성 업, 2008) .....	26
Table 3-2 Various ice and ship parameters needed to determine ice failure modes and ice loads (정성업, 2008) .....	26
Table 4-1 Principal dimension of the IBRV ARAON .....	38
Table 4-2 Material properties of steel .....	40
Table 4-3 Coefficient of $C_1$ for different location .....	42
Table 4-4 h values for different ice classes .....	43
Table 4-5 Line load for different location .....	43
Table 4-6 Maximum ice pressure at shell plate .....	45
Table 4-7 Data of a, b for different location and k .....	45
Table 4-8 Deformation at maximum pressure .....	55
Table 4-9 Stress at maximum pressure .....	58
Table 4-10 Principal dimensions of a chemical tanker .....	59
Table 4-11 Modeling range of a chemical tanker (최경식 외, 2010) .....	60
Table 4-12 Deformation at maximum pressure for the IBRV ARAON and chemical tanker .....	60

## 제 1 장 서 론

최근 들어 지구 온난화로 인한 북극지역의 자원개발 및 수송여건이 크게 개선됨에 따라 러시아, 노르웨이, 덴마크, 미국, 캐나다 등 북극해 연안국들은 국가적 차원에서 북극지역 자원개발과 인프라 건설사업을 활발히 추진하고 있다. 또한 북극해 연안국들은 북극지역을 자국의 미래 전략적 자원공급지역으로 지정하고, 북극지역 경제, 에너지 개발 프로그램을 진행하고 있다.

북극해 해빙의 축소로 인해 북극해 항로라는 새로운 수송로가 발견되면서 북극항로를 통한 석유, 천연가스 수송 가능성도 크게 높아지게 되었다. 특히 러시아 북극지역에서 블라디보스토크까지 이어지는 북극해 항로 (NSR)의 상업적 이용은 북극지역에서 생산되는 대규모 석유, 천연가스 물량의 대 동북아시아 공급이 충분히 경제성을 갖게 하였다. 또한 북극항로가 열림으로써 지구 반대편에 있는 두 해운물류지, 즉 극동과 유럽을 북극항로라는 단축된 수송로를 통해 현재의 수에즈운하 경유항로보다 선박 운항시간 및 운항비를 절감할 수 있게 되었다.



Fig. 1-1 Northern Sea Route (NSR)

향후 북극권의 석유, 천연가스의 수공과 자원개발 사업 참여와 관련하여 국내 기업들의 쇄빙선박, 해양플랜트 수출이 증대가 예상되는데, 북극해 연안국들의 북극해 개발 전략, 그리고 최근 기후온난화에 따른 자원개발 및 수송여건 변화에 대한 분석이 요구된다.

USGS(2008)의 조사에 의하면, 북극지역에는 전세계 미발견 석유, 천연가스의 22%가 부존되어 있는 것으로 확인되었다. 최근 탐사, 시추기술의 발달과 지구 온난화로 인한 해빙의 감소 등이 고유가 상황과 맞물리면서 북극지역에서의 석유나 천연가스 탐사활동이 활발히 이루어지고 있으며, 특히 러시아 West Siberian Basin과 East Barents Basin, 그리고 미국 Alaska에 집중되어 있다.

러시아는 북극해 연안국 가운데 가장 적극적으로 북극지역에서 자원개발 사업을 전개하고 있다. 육상 매장지역에서는 파이프라인을 통해 석유와 천연가스가 국내는 물론 해외로 수출되고 있다. 2020년 정도면 북극해 연안에 LNG 생산기지가 건설되어 유럽, 미국, 동북아시아 지역으로 공급될 계획이다. 특히 혹독한 환경조건으로 인해 그간 개발이 지연되어 왔던 북극지역이 기술의 발전으로 그 중요성이 점차 부각되고 있으며, 극지 빙해역을 운항하는 선박의 건조 또한 활발해지고 있다.

국내의 경우, 북극항로에 투입할 수 있는 쇄빙유조선 Vasily Dinkov호가 삼성중공업에서 2007년 건조되었다. 이 선박은 자체적으로 쇄빙기능이 있는 7만 DWT급의 DAT 형식의 쇄빙이다. 순수 국내 기술로 제작한 쇄빙연구선으로 ARAON호는 2009년에 건조돼 현재 남극 및 북극 탐사에 투입되고 있다. 독자적으로 남·북극해를 포함한 극지 빙해역을 독자적으로 운항하면서 해양과학조사와 극지 기지보급을 비롯한 연구지원활동을 수행할 수 있다는 점에서 그 중요성이 있으며, 따라서 극지 빙해역에서의 운항 시 얼음과의 충돌에 대비한 안전성 검토가 필요하다.

ARAON호는 선박의 건조 후 쇄빙성능 평가를 위해 2010년 7월부터 2010년 8월까지 북극해 현장에서 실선시험을 수행하였으며, ARAON호의 시운전 및 빙하중 추정을 위한 작업의 일부로서 해빙의 재료특성을 조사한 바 있다.

본 논문에서는 먼저 쇄빙연구선 ARAON호에 승선하여 북극해에서 실선시험을 수행한 내용 중 빙하중 추정에 관련된 기초조사로서 해빙의 재료특성에 대한 데이터를 정리하였다. 또한 ARAON호의 북극해 실선시험을 통해 해빙의 재료특성을 계측하기 위한 Auger, Corer, Ice gauge 등 제반 장비의 사용방법과 표준화된 계측방법을 획득할 수 있었다. 2010년 8월은 북극해의 해빙이 예상보다 훨씬 빠른 속도로 녹고 있는 상태를 감안하면, 얼음의 구조도 심하게 약화된 것으로 추정할 수 있고, 이런 결과로 북극해의 해빙에서 얻어진 온도, 염도 및 강도특성을 남극 등 다른 지역에서 계측된 값에 비해 상당히 낮은 상태임을 알게 되었다.

쇄빙연구선 ARAON호의 경우 두께 1m의 평탄빙에서 연속쇄빙이 가능하도록 설계되어 있으며 선체구조는 빙충격에 견딜 수 있도록 내빙구조로 보강되어 있다. 본 논문에서는 쇄빙연구선 ARAON호를 대상으로 설계조건인 평탄빙에서 빙하중을 받을 때 선체구조의 안전성을 평가하였다. 이를 위하여 유한요소해석은 MSC/NASTRAN, 전후처리는 MSC/PATRAN을 사용하였다. Loading과 Unloading 과정에 따른 빙하중을 받을 때의 선체 변형거동 특성을 파악하고 충격하중에 의한 선체구조의 비선형 해석을 시도하였다.

빙상조건에 따라 해빙의 재료특성치가 달라지므로 정확한 수치해석을 위해서는 그 특성을 정확히 파악해야 한다. 또한 비선형 수치해석을 수행하기 위해 빙-선체 충격상태를 미리 예측할 수 있는 시나리오가 선행되어야 한다. 본 논문에서는 평탄빙에서 선체에 작용하는 빙충격 하중을 통하여 ARAON호의 선체 강도 평가를 수행하고, 특히 최대 하중 하에서 선체에 발생하는 변형의 크기를 검토하여 선체의 안전성 평가를 위한 기초자료로 활용하였다.

본 논문에서 수행하고자 하는 세부내용은 다음과 같다.

- 쇄빙연구선 ARAON호의 선체에 작용하는 빙충격 하중 선정

FMA 선급규정에 의해 쇄빙연구선 ARAON호의 선체에 작용하는 빙충격 하중을 산출하였다. 빙등급은 선급규정은 IA Super로 하였으며, FMA Tentative Guideline이 제시한 식에 의거하여  $p_{max}$ 를 구하고 최종적으로 선체에 작용하는 Line load(Q)를 구하였다.

- 빙충격 하중에 의한 선체의 비선형 유한요소해석 수행

전선구조 모델을 이용한 해석은 시간이 많이 소요된다. 따라서 이를 해결하고자 부분구조 모델을 사용하였다. 본 논문에서는 ARAON호의 전선구조 모델 중 홀수 7.6m 양단의 Deck frame 7100 ~ 9900 부분을 사용하였으며 선수, 중앙부, 선미로 나누어 해석하였다. 실제 해빙조건에 해당하는 Ice pressure에 따른 선체 각 부위의 변형을 파악하고 대변형이 발생할 가능성이 큰 Critical areas를 예측하였다.

평탄빙 상태에서 쇄빙연구선 ARAON호의 선체 강도 평가에 관한 본 연구는 2장에서 쇄빙연구선 ARAON호의 북극해 실선시험을 통하여 북극해 해빙의 재료특성 데이터에 대해 연구, 분석하였으며 이어서 3장에서는 쇄빙선박에 작용하는 빙하중 문제의 이해를 위해 손상 부위에 따른 빙하중 시나리오에 대해 설명하였다.

4장에서는 쇄빙연구선 ARAON호의 충격하중 하에서의 비선형 구조해석을 위해 쇄빙연구선 ARAON호에 Tentative Guideline을 적용하여 빙하중을 산정하였다. 그리고 쇄빙연구선 ARAON호의 비선형 구조해석 과정과 계산결과를 설명하였다. 시간에 따른 비선형 해석을 통해 하중을 점진적으로 적용 (loading과 unloading) 하였다. 본 논문의 구조해석 결과를 토대로 Chemical tanker에 대한 해석결과와 비교하였다. 마지막 결론에서는 지금까지 수행한 목적과 본 논문을 통해 달성한 결과를 언급하였다.

## 제 2 장 ARAON호의 북극해 실선시험 및 해빙의 재료특성 계측

우리나라는 남극조약 회원국 20개 국가 중 유일하게 폴란드와 함께 쇄빙선박이 없는 나라였다. 그동안 남극 세종과학기지의 물자 보급과 남극에서의 연구활동을 위해서는 다른 나라 쇄빙선박을 임차해 사용할 수밖에 없어서 극지연구의 질적인 수준 저하는 물론, 임차를 위해 많은 경비가 소요되는 제약이 따랐다. 그리고 북극해를 품고 있는 러시아의 경제적 호황에 따라 북극해 항로를 통한 물류 이동도 증가하고 북극해 빙해역에서의 석유와 천연가스 자원개발에도 투자가 진행됨에 따라 북미와 유럽에서는 쇄빙선박 운항이 증가하게 되었다.

국내에서는 조선산업의 장점을 가지고 있으면서도 그간 쇄빙선박을 보유하지 못하였으나 2009년 우리나라 최초의 쇄빙연구선으로 “ARAON호”가 국내 기술력으로 설계 건조되어 한국극지연구소에 인도된 바 있다. 쇄빙연구선 ARAON호는 2010년 1월 남극해와 2010년 8월 북극해에서 해빙의 재료강도특성 실선시험을 수행하였으며, 본 논문은 2010년 7월 15일에서 2010년 8월 14일까지 ARAON호의 북극해 항해 중 특정 기간에 수행한 해빙의 재료특성을 시험, 분석한 결과를 정리하였다. 그리고 빙해역 현장에서의 해빙에 대한 정보는 얼음의 분포와 형태, 재료특성과 강도에 관한 정보를 축적함으로써 향후 북극해 항로 개척을 위한 예비조사에 활용될 수 있으며 이 논문 또한 북극해 항로 개척을 위한 시발점이라 할 수 있다.

본 논문을 통해서 극지항로를 안전하게 운항할 수 있는 빙해선박과 북극항로 및 북극해 빙상조건과 해빙에 대한 기초자료를 획득하는 것이며 향후 북극해나 남극해에서의 실선시험을 보다 더 충실하게 할 수 있도록 대비하기 위한 것이다. 또한 극지를 운항하는 선박은 해빙과의 충돌은 피할 수 없으므로 해빙에 대한 정보를 얻는 것은 중요한 사실이다. 이를 위하여 본 연구는 8월 3일에서 8월 5일 동안 총 3차례의 현장시험을 수행하였고 이 시험을 통해 북극해 해빙



의 두께에 따른 온도, 염분, 밀도, 강도를 측정하고 그 데이터를 분석하였다 (이춘주 외, 2010).

## 2.1 실선시험 현장

시험이 이루어진 곳은 북극해 중 Chukchi Sea로서 서쪽은 East Siberian Sea, 남쪽은 Bering Sea, 동쪽은 Beaufort Sea와 접하며 겨울철에는 대부분 결빙하고 6월 중순부터 쇄빙선박을 이용한 항해가 가능하다. Table 2-1은 Chukchi Sea의 빙상환경에 대해 관측된 자료를 통해 겨울철 평균 해빙의 두께를 예측하기 위한 자료이며 실선시험이 수행된 2010년 8월의 해빙두께와 비교하기 위한 것이다 (Ostreneg et al., 1999). 이 자료에 따르면 Chukchi Sea는 10월부터 다음해 5월까지 결빙하며 이후 9월까지 해빙하여 최저가 되는 10월의 평균 해빙 두께는 22cm로 나타나 있다.

Table 2-1 Average ice thickness in Chukchi Sea (Ostreneg et al., 1999)

Oct	Nov	Dec	Jan	Feb	Mar	Apr	May
22cm	51cm	83cm	110cm	132cm	150cm	160cm	168cm



Fig. 2-1 Ice field test sites



해빙의 재료특성을 조사하기 위한 시험장소는 쇄빙연구선 ARAON호의 쇄빙능력 주행 테스트를 할 수 있는 상태(본선 길이의 2.5 ~ 3배, 폭은 1.5 ~ 2배)의 해빙에서 수행되었다. Table 2-1에서 알 수 있듯이 여름철 해빙 두께가 비교적 얇고 해빙이 많이 녹아있는 상태여서 적합한 빙판을 찾는데 상당히 어려움이 있었다.

1차 시험은 2010년 8월 3일 현지시간 13:00시에 77°01N, 159°56W 위치에서 수행하였고 사용된 빙판의 크기는 200m × 80m(길이×폭) 정도였으며 평균 두께는 2.2m였다. Fig. 2-2는 8월 3일 현장시험 주행구간에서의 얼음 두께 데이터이다. 그 중에서 0m, 80m, 160m 위치가 두께를 측정한 장소이며, 이 빙판은 2년생 빙으로 여러 겹의 얼음이 Rubble 형태로 겹쳐 있었다.

2차 시험은 8월 4일 현지시간 15:00시에 첫 번째 시험구역 근처인 77°02N, 159°49W 위치에서 수행하였고 해빙의 크기는 첫 번째 시험보다 큰 280m × 100m였으며, 평균두께는 1.88m로 비교적 얇았다. 두께 측정(Fig. 2-3)은 0m, 100m, 150m에서 실시하였다. 얼음의 상태는 2년생빙으로 1차 시험 때와 동일하였으며, 2m 전후의 균일한 두께를 가진 얼음이었다. 또한 Rubble 형태의 얼음이 없어서 시험을 하기에 비교적 좋은 조건이었다.

3차 시험은 8월 5일 현지시간 16:00시에 앞서 수행한 시험구역보다 북으로 약 1° 더 올라간 77°59N, 159°38W 위치에서(Fig. 2-1) 수행하였으며, 빙판의 크기는 지금까지 시험한 것 중에서 가장 큰 것으로 300m × 110m이고 평균두께는 2.46m였다. 빙판 두께의 측정은 0m, 100m, 200m에서 실시하였으며, 빙판은 물웅덩이(Puddle)의 크기가 작았고 2년생빙의 겹쳐진 Rubble 형태로 되어 있어서 얼음의 두께가 균일하지 못하다는 단점이 있었다.

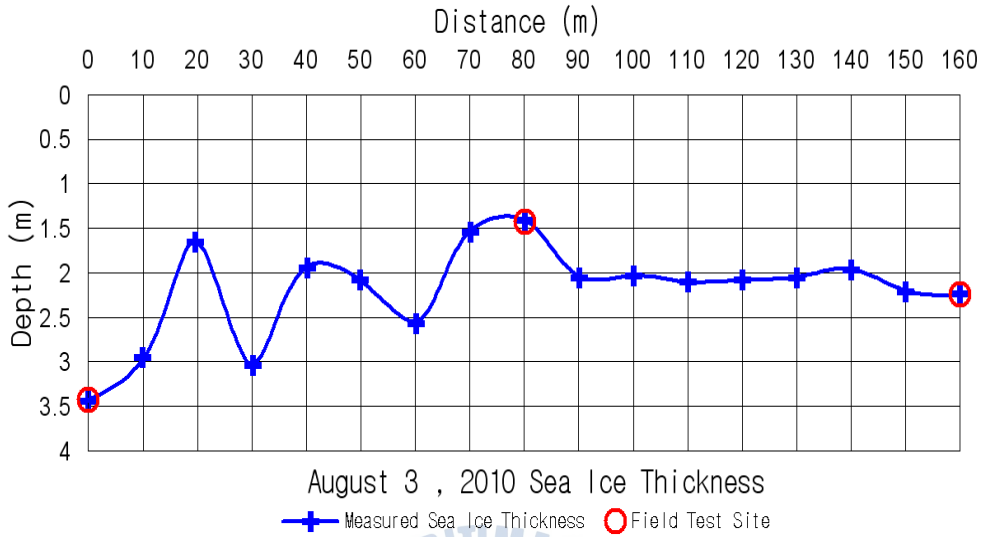


Fig. 2-2 Profiles of ice thickness (August 3, 2010)

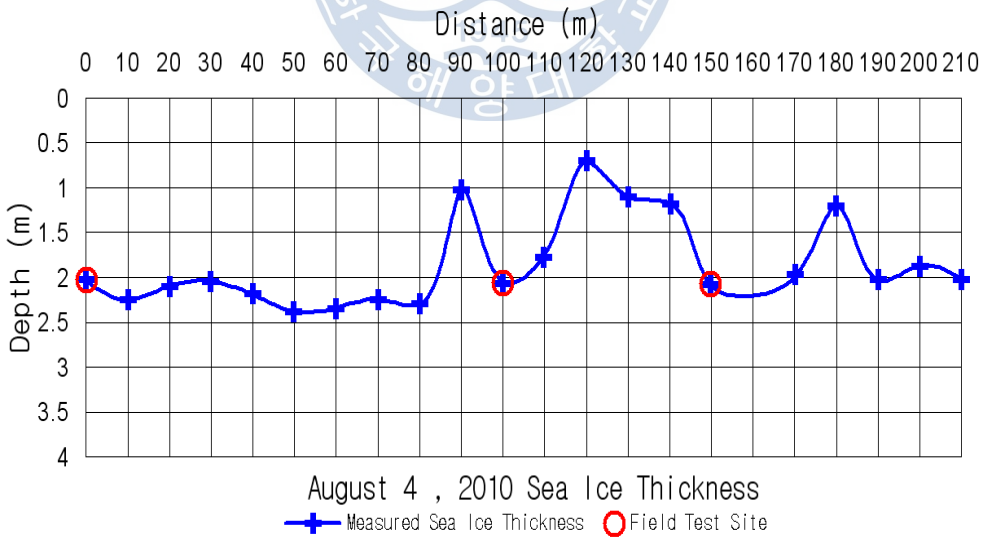


Fig. 2-3 Profiles of ice thickness (August 4, 2010)

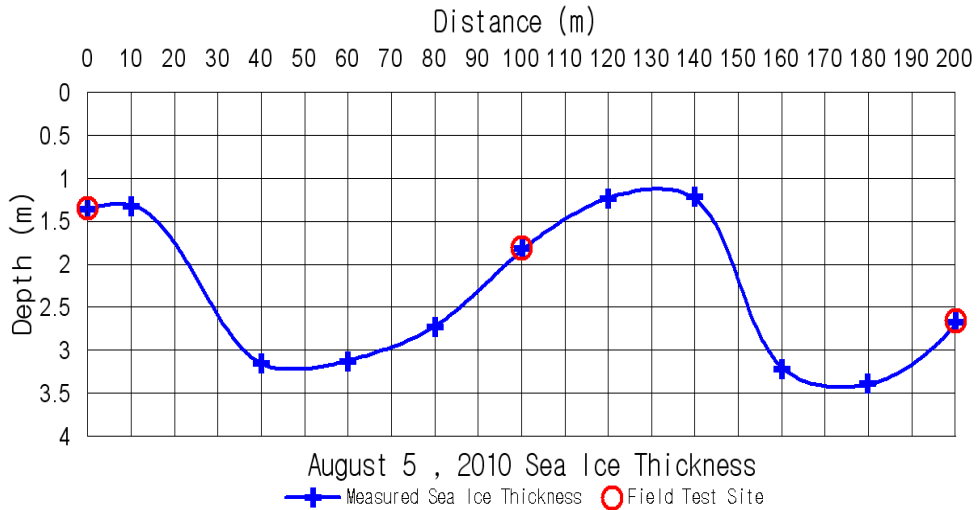


Fig. 2-4 Profiles of ice thickness (August 5, 2010)

## 2.2 해빙의 재료특성 계측

### 2.2.1 해빙의 두께 측정

현장 쇄빙시험을 하기 위해서 먼저 얼음의 두께를 측정하는 것이 필요하다.

#### ■ Auger를 사용하는 방법

Auger를 전기모터에 연결하여 지름 5cm (2인치) 정도의 구멍을 뚫고 특별한 줄자(Ice gauge)를 이용하여 두께를 잰다.

Ice gauge는 끝단에 약간의 하중을 주면 접어지도록 고안된 장치로서 이 줄자를 구멍 속으로 해빙의 아랫부분과 해수면이 만나는 부분까지 내린 후 끌어 올리면 구멍에 걸리게 된다. 이런 원리를 이용하여 얼음의 두께를 측정할 수 있고 측정이 끝나면 약간의 힘을 주어 밖으로 빼주면 된다.



Fig. 2-5 Augering for ice thickness measurement



Fig. 2-6 Thickness measurement using ice gauge

### ■ EM 31 장비를 이용하는 방법

EM 31 장비의 원리는 900kHz의 전자기파를 발생시켜 서로 다른 매질의 경계층에서 반사되어 되돌아오는 정보를 통해 두께를 추정하는데 일반적으로 매질의 상태가 서로 상이한 경우 형성되는 전도도(Conductivity) 값의 차이를 이용하여 해빙의 두께를 측정한다.

### 2.2.2 온도 측정

온도를 측정하기 위해서는 얼음시편을 추출해야 하며 그러기 위해서는 Coring 장비를 이용한다. 추출된 시편으로 압축강도를 측정해야 할 시편의 온도 측정을 한다. 온도 측정은 측정하려는 얼음의 상하단을 임의로 선택해 측정하는 방법이다. 이때의 시편의 크기는 20cm 정도 자른 후 시편절단기로 시편을 가공한다.

온도 측정에 필요한 장비로는 시편 절단용 보조 장비, 수동 드릴과 온도계이다. 여기서 시편절단용 보조 장비는 해빙 위에서 시험할 때 정확한 길이로 시편을 절단하기 위해 사용한다. 주의할 사항은 짧은 시간 안에 측정해야 정확한 값을 알 수 있기 때문에 드릴로 작은 구멍을 뚫은 직후 바로 온도센서를 넣어서 값을 확인해야 한다.



Fig. 2-7 Coring with 3" ice corer



Fig. 2-8 Ice temperature measurement

### 2.2.3 염분 측정

염분 측정을 위해서는 온도 측정을 위해 사용된 20cm의 압축강도 시편을 이용한다. 압축시험을 하고 난 시편을 플라스틱 용기에 넣어 실내 보관한다. 하루 정도 지나면 얼음이 모두 녹기 때문에 녹은 얼음을 가지고 염도측정기를 이용해 염분을 측정한다.

### 2.2.4 밀도 계산

본 시험에서 밀도 측정은 버니어캘리퍼스와 저울을 이용하여 얼음 시편의 크기와 무게를 측정하였으며, 밀도는  $\rho = \frac{W}{V}$  로 직접 계산하였다. 여기서  $w$ 는 시편의 무게,  $v$ 는 시편의 부피이다. 주의할 사항은 시편의 직경 및 길이를 잴 경우 버니어캘리퍼스의 표면이 금속이기 때문에 얼음과 닿을 경우 얼음의 표면이 녹을 수 있으므로 되도록 빠른 시간 안에 측정해야 정확한 값을 얻을 수 있다. 또한 수치가 조금만 달라도 밀도 계산에 큰 영향을 미치기 때문에 정확한 값을 얻는 것이 중요하다. 무게를 측정할 때는 오차 1g 수준의 정밀한 저울을 사용해야 보다 정확한 값을 얻을 수 있다.

### 2.2.5 압축강도 측정

구조물의 설계 빙하중에서 제일 관심이 가는 것은 얼음의 압축강도와 굽힘강도이다. 선박의 경우 선수부 경사에 의해 빙판을 파괴한다는 의미에서는 얼음의 굽힘강도가 문제가 되지만 수로 사이에 측면부 선각이 끼인 상태에서 압축을 받게 되면 이때는 얼음의 압축강도가 중요해진다. 해빙에 대한 설계 압축강도로 보통 1~6MPa 정도를 사용하고 있다.



본 연구에서 사용된 압축시험기로는 Fig. 2-9와 같으며, 하중뿐 아니라 얼음이 파괴 될 때의 변위도 측정할 수 있다. 시험에 사용된 시편은 19cm × 7.5cm (길이 × 직경) 로 Coring 장비를 이용하여 채취한 얼음을 상중하로 나눠서 각 부분에서 하나씩 채취하였다.

이렇게 채취한 얼음을 일정 길이로 잘라서 압축시험기로 측정을 시작한다. 여기서 주의할 사항으로는 압축할 시편이 가운데에 오지 않고 옆으로 올 경우에는 정확한 값이 측정되지 않기 때문에 되도록 가운데에 맞추도록 해야 한다. 또한 얼음은 미끄러지기 때문에 상 하단에 표면이 거친 재료를 붙여서 실험을 하면 더 좋은 결과를 얻을 수 있다. 압축강도는 다음과 같은 식으로 정의된다.

$$\sigma_c = \frac{P}{A} \quad (2-1)$$

여기서 P는 Peak값에 도달했을 때의 하중이고, A는 접촉 단면적을 나타낸다. Coring 장비의 직경이 7.5cm이지만 실제로 버니어 캘리퍼스를 이용하여 측정할 경우 이보다 작은 7.1cm 전후로 나오기 때문에 실값을 이용하여 정확한 데이터를 얻을 수 있다.

실험에 사용된 압축시험기는 200kg이 나가는 중장비로 이동시 소요시간이 많이 소비되고 또한 가동할 수 있는 전력의 공급을 위해서는 선내에서 전기를 끌어와야 하는 번거로움 때문에 본 연구에서는 압축장비를 이동시키지 않고 선상 바깥쪽에 고정 시켜 놓았다. 따라서 압축시험을 위해서는 가공된 얼음을 아이스박스에 보관 후 압축시험 이외의 실험이 종료된 후에 압축시험기로 아이스박스 보관된 얼음을 이용하여 실험을 수행하였다.





Fig. 2-9 Compressive strength measurement

### 2.3 시험결과와 분석

현장시험을 통해서 얻은 해빙의 재료특성 데이터는 다음과 같다.

Table 2-2 Physical-mechanical ice properties

Date	Core site	Temp. (°C)	Salinity (‰)	Density (g/cm <sup>3</sup> )	Compression Strength (MPa)
2010.08.03	0m	-0.74	1.81	0.87	1.40
	80m	-0.70	1.63	0.90	1.55
	160m	-0.88	2.50	0.95	1.84
	Mean	-0.77	1.98	0.91	1.60
2010.08.04	0m	-0.76	1.98	0.95	1.37
	100m	-0.79	2.01	0.89	1.67
	150m	-1.07	3.53	0.95	1.60
	Mean	-0.87	2.51	0.93	1.55
2010.08.05	0m	-1.06	2.60	0.89	2.70
	100m	-1.34	2.53	0.92	2.43
	200m	-0.59	1.05	0.91	1.91
	Mean	-1.00	2.06	0.90	2.35

북극해에서 계측된 재료특성 데이터를 이용하여 북극해 해빙의 두께방향 깊이 별 온도, 염분, 밀도, 압축강도 변화를 Fig. 2-10 ~ Fig. 2-13에 나타내었다.

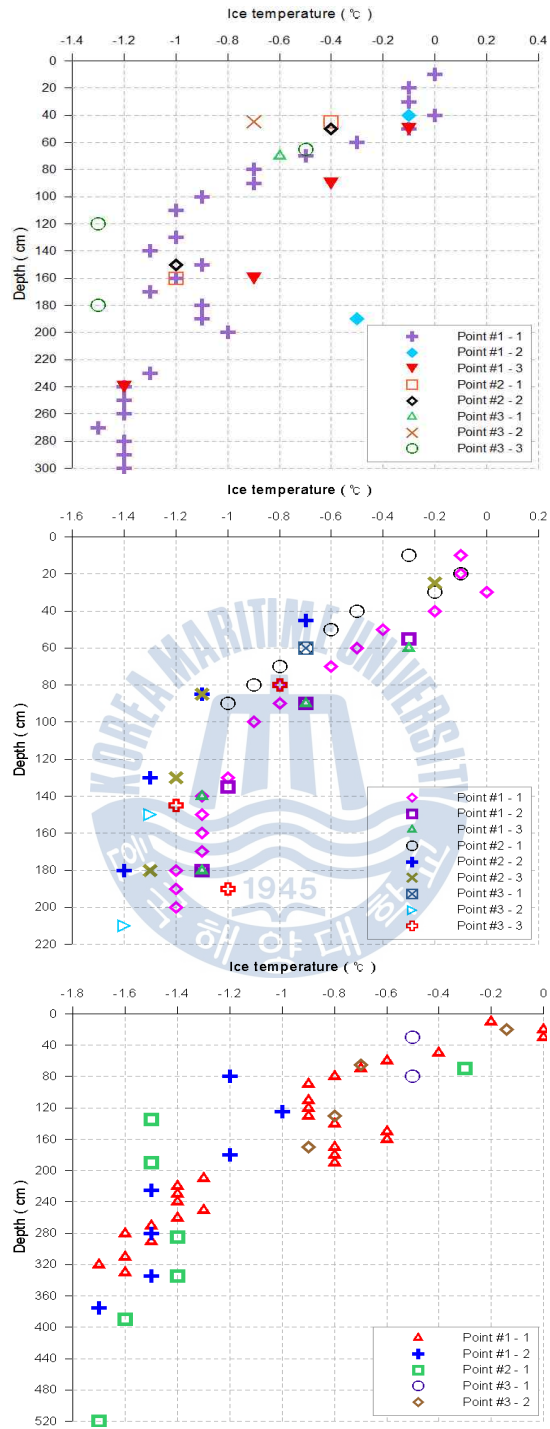
해빙의 깊이에 따른 온도 변화를 보면 Fig. 2-10에서 알 수 있듯이 이 시기의 북극해에서는 깊이가 증가함에 따라 온도가 감소하다가 200cm 아래에서는 -1.5 ~ -1.7°C로 일정하였다. 이러한 이유는 현장시험이 수행되었던 곳의 대기온도가 전반적으로 0°C로 대체로 포근해 해빙 표면온도가 높은 반면 해수와 접하는 아랫면의 온도는 표면온도보다 비교적 낮아서 깊이에 따라 온도가 감소한 것으로 보인다.

다음으로 Fig. 2-11에서 해빙의 깊이별 염분 변화를 확인할 수 있다. 바닷물이 얼어서 된 해빙은 염분을 함유하고 있는데 해빙에 포함된 염분의 양은 기본적으로 결빙속도에 좌우된다. 물과 얼음이 섞여 있는 표층수가 임계동결온도에 이르면 급속한 동결과정을 통해 결빙되기 때문에, 표층에서의 염분은 비교적 높은 8~12%이고 해빙의 아래쪽으로 내려갈수록 결빙속도가 느려져서 결빙과정에서 해수로부터 염분이 쉽게 석출되기 때문에 5~8% 정도이다. 하지만 북극해에서의 데이터는 해빙의 깊이에 따라 염분이 증가함을 확인할 수 있었다.

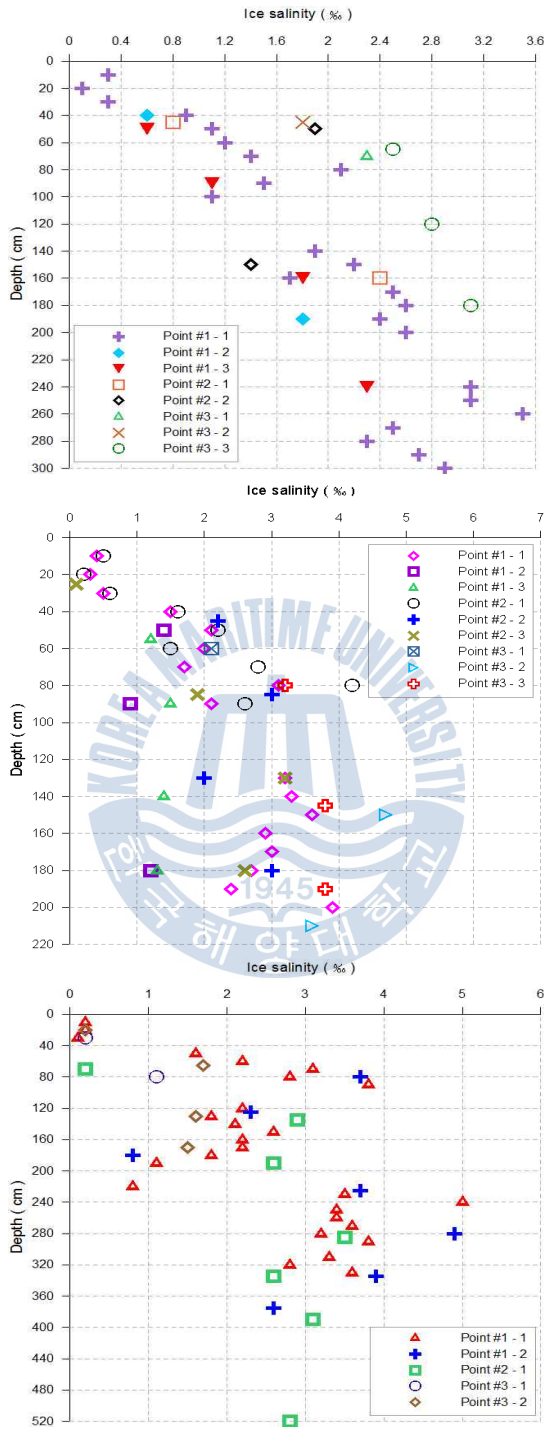
이러한 이유는 북극해에서의 해빙은 다년생빙으로 먼저 1년생빙이던 얼음의 표면이 모두 녹아 염분 함유량이 적은 아랫부분이 드러난 후 겨울철 표면온도가 급격히 떨어짐으로써 결빙속도가 빨라 염분 함유량이 증가했다고 볼 수 있다.

Fig. 2-12는 해빙의 깊이별 밀도 변화를 보여주고 있다. 얼음 속에 함유된 염수 맥과 기포 때문에 해빙은 기포가 없는 순수 담수빙의 밀도( $0.917\text{g/cm}^3$ )와는 다르지만 실제로는 염수맥과 기포의 밀도에 대한 영향이 서로 상쇄되어, 전형적인 해빙의 밀도는 순수한 얼음에 가까운  $0.915\sim 0.920\text{g/cm}^3$  정도이다. 해빙의 표면에서의 밀도는 쌓인 눈이나 비로 인해 일반적으로 낮게 나타나는데 Fig. 2-12에서 볼 수 있듯이 해빙 표면의 밀도가 다른 부위보다 낮다는 것을 알 수 있다.

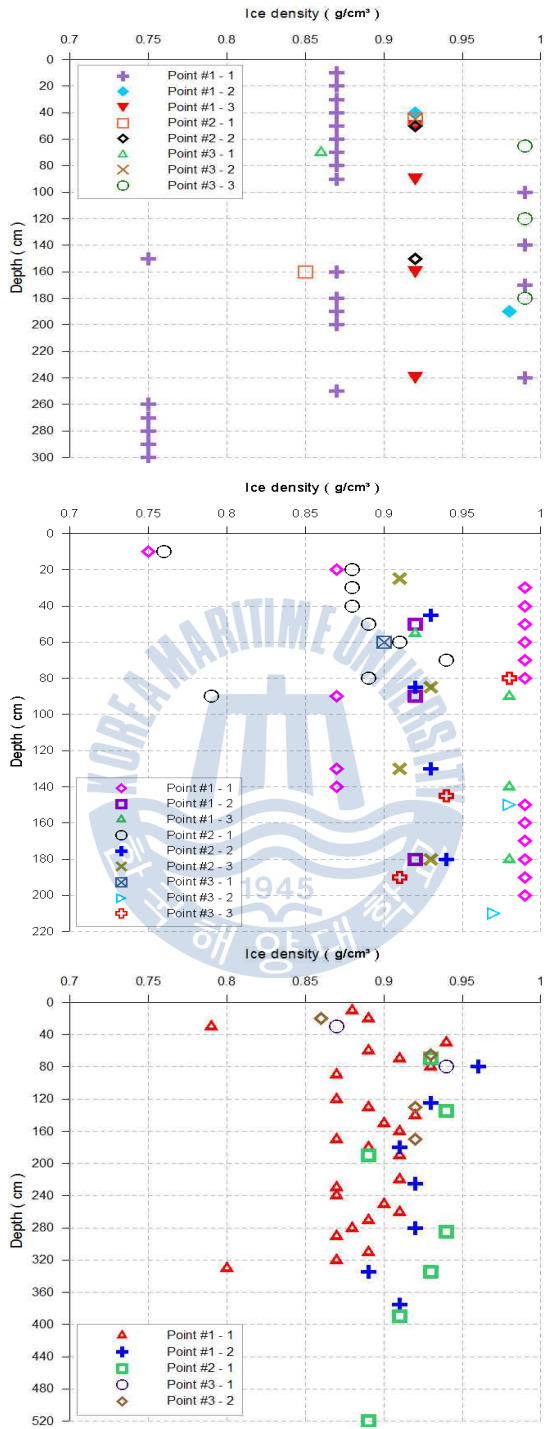
그리고 압축강도는(Fig. 2-13) 얼음의 재료특성에 있어 중요한 변수이다. 얼음은 일반 구조용 재료와는 달리 온도, 염분, 결정입자의 크기, 결정축의 방향과 분포, 변형률속도 등에 따라 파괴모드가 달라진다. 본 연구에서는 횡방향이 구속되지 않은 1축 시험만을 했고 압축시험이 진행되는 동안 Peak load값을 측정하였다. 시험을 통해 평균 압축강도는  $1.83\text{MPa}$ 이었으며 고위도로 갈수록 온도가 낮아 다른 지역보다 높게 나타나는 것을 알 수 있었다.



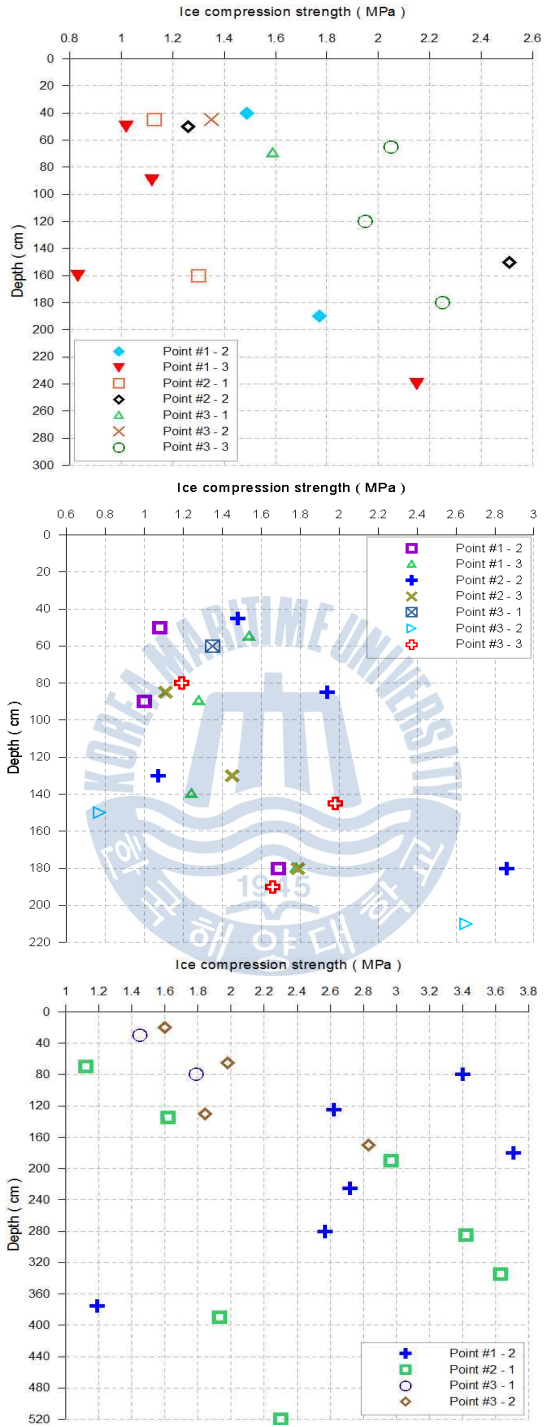
**Fig. 2-10** Profiles of ice temperature (Arctic 8/3~8/5, 2010) (박영진 외, 2010)



**Fig. 2-11** Profiles of ice salinity (Arctic 8/3~8/5, 2010) (박영진 외, 2010)



**Fig. 2-12** Profiles of ice density (Arctic 8/3~8/5, 2010) (박영진 외, 2010)



**Fig. 2-13** Profiles of ice compression strength (Arctic 8/3~8/5) (박영진 외, 2010)

한편 2010년 8월에 측정된 북극해에서의 자료와 비교를 위해 2010년 1~2월경 남극해에서 러시아의 AARI 연구팀이 작성한 쇄빙연구선 ARAON호의 쇄빙능력 테스트 결과보고서에서 인용한 남극 해빙의 두께별 온도, 염분, 밀도 데이터를 Fig. 2-14에 나타내었다.

해빙의 깊이에 따른 온도 변화를 보면 남극해에서의 데이터는 깊이가 증가함에 따라 조금씩 증가하는 것을 확인할 수 있는데, 이러한 이유는 남극에서는 여름철임에도 불구하고 대기온도가 해빙과 해수가 접하는 아랫면의 온도보다 낮아 점점 증가한 것이라고 본다. 그리고 남극해에서 실선시험에 사용된 해빙의 두께는 1.2m 내외로서 북극해 해빙의 두께 3~4m와는 차이가 있다는 점을 고려해야 할 것이다.

해빙의 염분 분포는 전형적인 1년생 빙에서 볼 수 있는 분포와 같은데 표층의 경우는 급속한 동결과정으로 염분이 비교적 높은 반면 해빙의 아래로 갈수록 결빙속도가 느려져서 염분의 양이 적다.

해빙의 밀도는 깊어질수록 표면에 비해 높다는 것을 알 수 있는데 이는 결빙하는 과정 중 눈이나 해수로 인해 표면에서 결빙되어 이와 같이 낮은 밀도를 보인다.



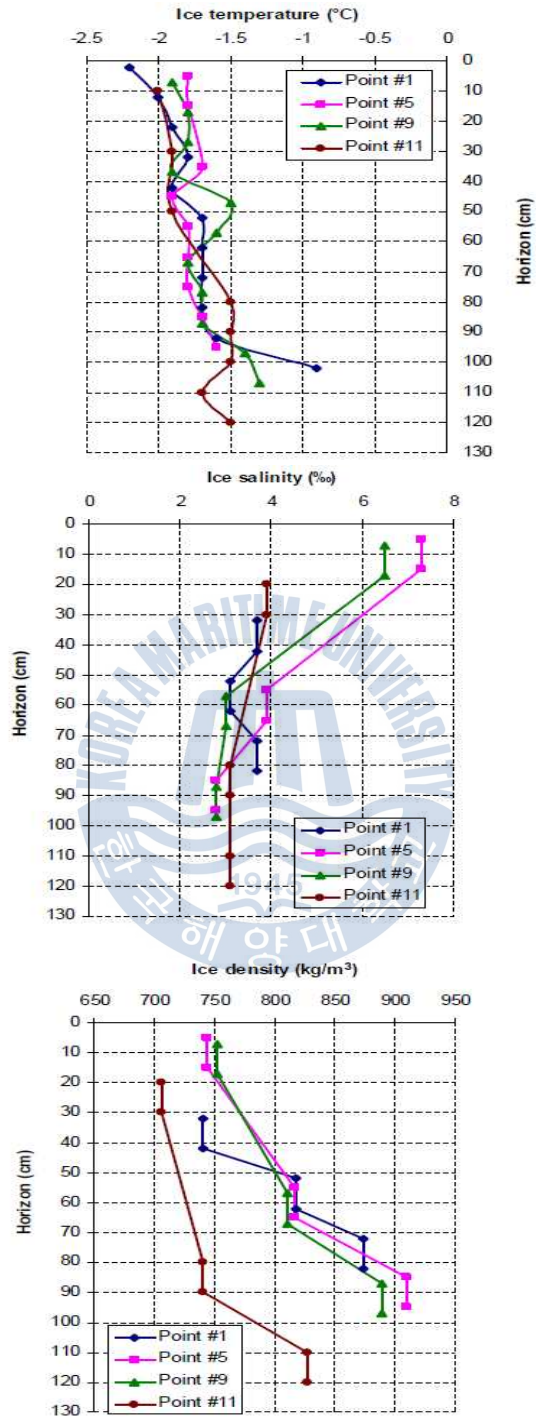


Fig. 2-14 Profiles of sea ice properties (Likhomanov, 2010)

지금까지 북극해에서 얻은 Data를 분석하고 남극과 비교하였다. 쇄빙연구선 ARAON호의 북극해 현장시험을 통해서 해빙의 재료특성을 연구하고, 또한 층분하지는 않지만 이 해역의 해빙에 대한 재료특성 데이터를 확보하고 이것을 체계적으로 분석할 수 있는 기법을 처음으로 적용해 보았다는 점에서 의의를 찾을 수 있다.



## 제 3 장 선체에 작용하는 빙하중

### 3.1 선체의 손상 부위에 따른 빙하중 시나리오

빙해역 항로를 통한 운항에선 파랑하중이나 슬래밍(Slamming)에 의한 힘보다 빙하중, 즉 얼음과 접촉하면서 받게 되는 힘이 월등히 크기 때문에 파랑하중의 크기는 거의 고려하지 않고 빙하중만을 주요 설계변수로 취급하고 있다. 선체가 받는 빙하중을 추정한다는 것은 빙해역에서 실선을 이용해 직접 계측하지 않는 이상 상당히 어려운 작업으로 무엇보다도 선박과 얼음 사이의 상호작용에 대한 이해가 필수적이다. 빙해역에서 선박이 받게 되는 빙하중은 얼음의 파괴 모드 및 파괴강도, 선체의 크기와 형상, 속도 및 운항방식에 따라 다르게 결정된다. 통상 쇄빙선박은 다음과 같은 운항방식에 의해 빙해역을 통과한다 (정성엽, 2008).

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

연속쇄빙이나 충격쇄빙 시 얼음이 깨지지 않아 선체가 얼음 위에 올라가 없이는 경우(Beaching)도 발생하며, 앞서가는 쇄빙선이 만들어 놓은 수로를 폭이 넓은 선박이 따라 가다 빙판 사이에 선박이 끼는 경우도 발생한다.

빙해역에서 운항함에 있어서 해빙과 선박의 상호작용을 설명하는 시나리오가 필요하게 되는데, Table 3-1에 제시한 것처럼 선박이 운항 중 만나게 되는 다양한 빙상상태에 따른 상호작용과 Table 3-2의 얼음과 선박의 변수 조합에 따라 다양한 빙-선체 상호작용 시나리오를 도입할 수 있다.

Table 3-1 Ice conditions and various ice-ship interaction modes (정성엽, 2008)

Ice Condition		Characteristics	Interaction Modes
Level Ice ( 平坦氷 ) [ includes land-fast ice ]		10/10 , FY	C, R, S, B
Ice Ridges ( 氷脈 )		single or multiple, FY or MY	R, S, B
Rubble Fields ( 얼음조각층 )		grounded or floating	R, S
Iceberg ( 氷山 )		single	R, S
Ice Floes ( 氷盤 )		single or multiple, FY	C, R, S, B
Pack Ice ( 流水 ) [ice ridges may exist]	Level 4 (very close pack ice)	9/10 - 10/10	C, R, S
	Level 3 (close pack ice)	7/10 - 8/10	C, R, S
	Level 2 (open pack ice)	4/10 - 6/10	C, S
	Level 1 (very open pack ice)	1/10 - 3/10	C, S
	Open water (ice free)	< 1/10	
Brash Ice [ broken ice pieces in channel ]		consolidated or loose	C, S
<b>Remarks</b>		<b>Ice Concentration</b> [ 0/10 - 10/10 ] <b>FY : First-year Ice</b> <b>My : Multi-year Ice</b>	<b>C : Continuous icebreaking</b> <b>R : Ramming</b> <b>S : Side hull compression</b> <b>B : Beaching on ice</b>

Table 3-2 Various ice and ship parameters needed to determine ice failure modes and ice loads (정성엽, 2008)

Ice Properties	Ship Properties	Ice Failure Modes
<ul style="list-style-type: none"> <li>• Ice Sheet Thickness</li> <li>• Flexural Strength</li> <li>• Crushing Strength</li> <li>• Ice Density</li> <li>• Young's Modulus</li> <li>• Poisson's Ratio</li> <li>• Friction Coefficient</li> <li>• Temperature</li> <li>• Grain Size/Orientation</li> <li>• Salinity</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Ship Speed</li> <li>• Displacement</li> <li>• Length</li> <li>• Breadth</li> <li>• Depth/Draft</li> <li>• Hull Form/Lines</li> <li>• Engine Power</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Crushing</li> <li>• Bending</li> <li>• Buckling</li> <li>• Spalling/Shear Failure</li> <li>• Circumferential and Radial Cracking</li> <li>• Creep</li> </ul>

Fig. 3-1을 통해 선체 손상부위는 크게 Bow, Shoulder, Midship, Bottom, Stern (Propeller, Steering gear 포함) 등에서 발생함을 알 수 있다. 이러한 선체 손상 부위를 참고하여 쇄빙이 주로 일어나는 Stem 부분과 Bilge 부분 손상을 생각하여 크게 7부분 (Stem, Bow, Shoulder, Midship, Bilge, Bottom, Stern)으로 나누어 각 부분과 얼음과의 상호작용을 고려한다.

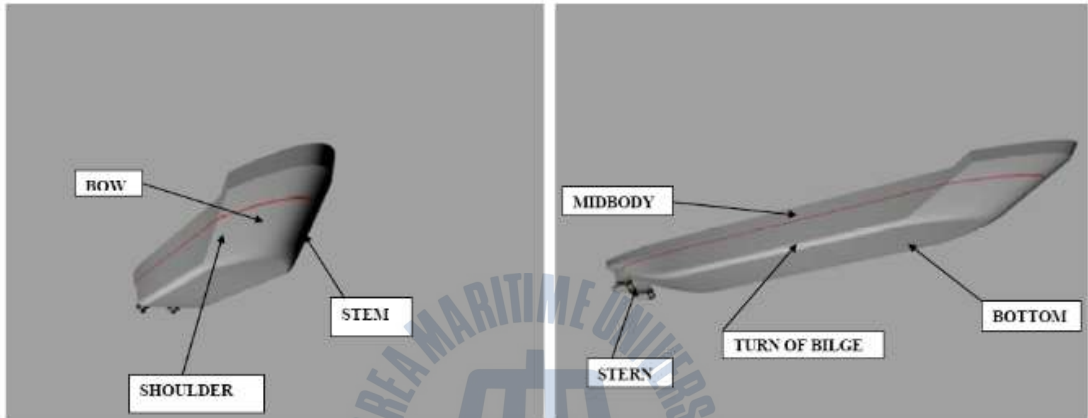


Fig. 3-1 Positions on the sea ice and ship collisions (Daley et al., 2008)

다음은 빙-선체 상호작용 모드를 아래와 같이 정리하였다.

Area 1 Stem : Ice breaking and Ramming (any large feature), Beaching

Area 2 Bow : Icebreaking, Glancing impact (any large feature), and Reflected impact

Area 3 Shoulder : Glancing impact, Reflected impact, and Wedging impact

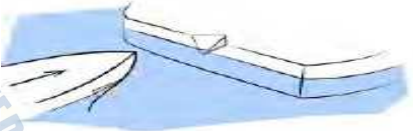
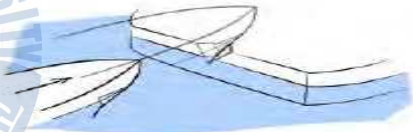
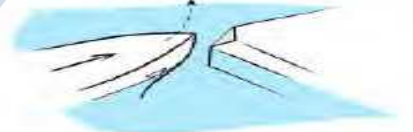
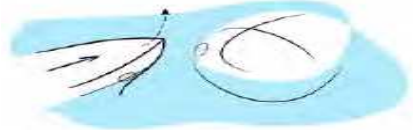
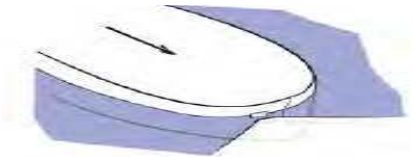
Area 4 Midbody : Glancing impact and Pressure loads

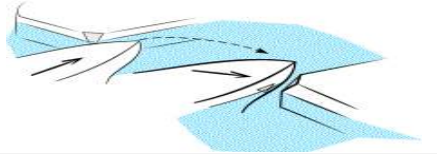
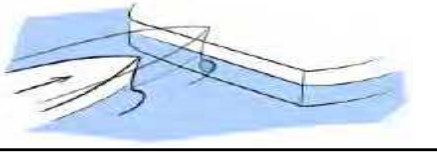
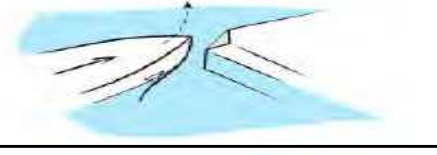
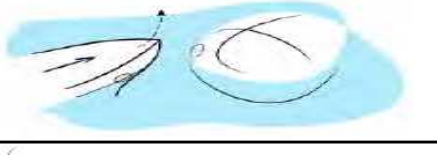
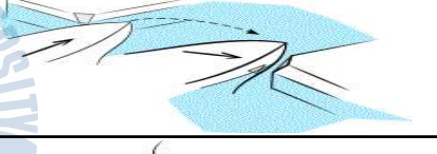
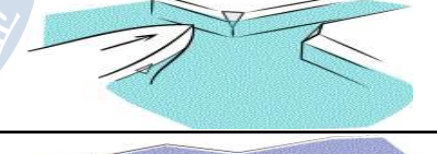
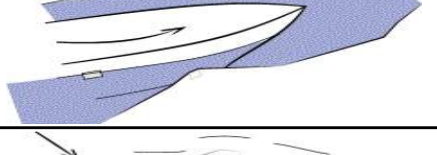
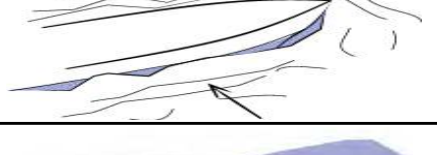
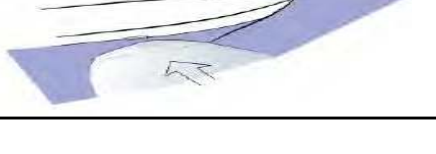
Area 5 Turn of Bilge : Impact with submerged pieces broken during

## icebreaking

Area 6 Bottom : Beaching loads and Impact with submerged pieces broken during icebreaking

Area 7 Stern : Backing loads (conventional), Icebreaking loads (double acting), Appendage impact loads, and Propeller-induced impact loads

Position	Loading Scenario	Picture
Stem	Ramming (thin, thick ice)	
	Beaching	
Bow	Glancing impact (thin, thick ice, ice mass)	
		
	Blunt bow impact	

	Reflected impact	
	Bulbous impact	
Shoulder	Glancing impact (thin, thick ice, ice mass)	
		
	Reflected impact	
	Wedging impact	
Midship	Glancing impact	
	Pressure loads (static)	
	Pressure loads (dynamic)	

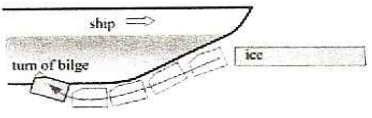
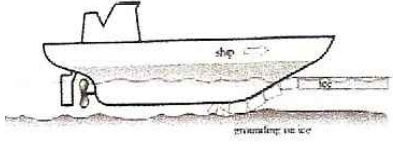
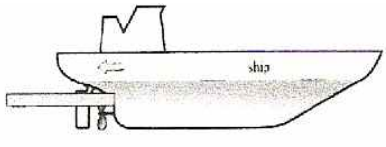

Turn of Bilge	Bilge impact	
Bottom	Bottom contact	
Stern	Propeller/Rudder contact	
		

Fig. 3-2 Sea ice and ship interaction scenarios (Daley, 2006)

Fig. 3-2와 같이 시나리오에 따라 선체의 Shoulder (또는 Bow) 부분에서의 Glancing impact 이후에 Midship 부분에서 Reflected impact가 발생하는 과정을 Fig. 3-3에서 보여준다. Midship에서의 충격 속도가 초기 Shoulder(또는 Bow)부분에서의 충격 규모와 위치에 따라 달라지고 초기 Glancing impact와 Reflected impact 사이의 시간은 수로 폭 또는 유빙 사이의 거리에 따라 결정된다. 이러한 상황에선 해빙과 충격으로 인해 선박의 6자유도 운동 중 Yaw와 Sway가 발생하는데 Yaw와 Sway가 동시에 동반될 때의 Reflected impact는 선체 중앙부의 앞쪽에서 크게 일어난다.



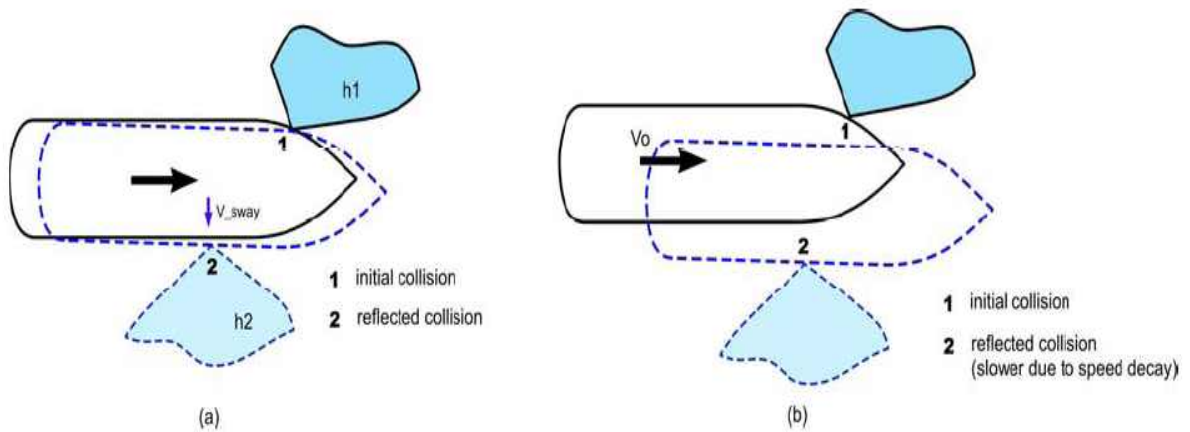


Fig. 3-3 Reflected impact at the midship after glancing impact (Daley et al., 2008)

2010년 7월에서 2010년 8월, 북극 해빙의 상태를 확인한 결과 평탄한 해빙이 주를 이루었으며, 실제로 ARAON호가 해빙을 뚫고 갔을 때는 넓은 평탄빙이었다. 그리고 ARAON호의 쇄빙능력은 1m 두께의 평탄빙을 연속쇄빙하여 갈 수 있도록 설계되었기 때문에 실제 해빙의 상태와 비슷하게 본 논문에서는 평탄빙 상태에서 부분구조 모델을 통한 선체의 부위별(선수, 중앙부, 선미) 빙충격 해석을 수행하였다.

또한 해빙과의 충돌과정에 대해서는 실제 빙해역에서 운항하게 될 경우를 고려하였다. 즉, 지속시간이 2초에서 3초 정도의 준정적(Quasi-static)인 상태의 평탄빙에 대한 하중을 선택하였다.

### 3.2 선체의 구조 안전성 평가

극지방의 개발자원을 수송하기 위한 쇄빙선박, 내빙선박 등 고부가가치 빙해선박의 선체구조 안전성과 신뢰성에 대한 연구가 필요하다.

빙해역을 항해하는 선박은 일반해역을 항해하는 선박과는 달리 얼음과 조우한다는 특수한 상황에 놓이게 된다. 얼음은 선체에 손상을 가하여 선박의 안전항해에 매우 위협적인 존재이다. 선체가 손상을 입으면 화물의 유실뿐만 아니라 청정해역인 극지방의 환경을 오염시키게 되어 그 피해는 상상하기 어려울 정도이기 때문이다. 따라서 빙해역을 항해하는 선박의 구조적 안전성은 필수적이다.

빙해선박의 구조 안전성을 보장하기 위해서는 상황에 맞는 빙하중을 적절하게 추정하여 설계에 반영하여야 하며 빙하중을 모니터링 할 수 있는 시스템을 설치하여 안전항해를 도와야 한다. 또한 극지방의 저온에서도 구조재의 적절한 성능보장을 할 수 있어야 한다. 이와 같은 배경으로 다음과 같은 기술들이 빙해선박 선체구조 안전기술의 핵심기술이라 할 수 있다 (한국산업기술평가원, 2006).

- 빙해선박 빙하중 추정 기술
- 유빙 충격하중 추정 기술
- 빙하중 모니터링 기술
- 빙해선박의 진동/소음 감소기술
- 저온용 구조용강 용접부 피로수명 증강 기술

#### ■ 빙해선박 빙하중 추정 기술

빙해지역을 운항하는 선박의 기능에 따라 필수적으로 여러 종류의 얼음을 만나게 되는데 얼음은 선박의 구조안전에 유해요소가 되기 때문에 이에 대한 대비책이 필요하다. 이를 위하여 빙하중을 적절하게 추정하여야 내빙구조의 신뢰성도 확보되고 안전운항도 보장받을 수 있다. 그러나 빙하중 추정 기술은 현재 정립되어 있지 않은 상태이기 때문에 이에 대한 기술 확보가 필요하다.

#### ■ 유빙 충격하중 추정 기술

내빙해역 중 얼음의 밀집도가 낮은 지역은 유빙이 많아 부딪치게 되면 선체손상 뿐만 아니라 화물의 유출 등 심각한 문제가 발생한다. 따라서 빙해지역 선박은 유빙을 회피하여 운항을 하고 있으나 모든 유빙을 피해 운항하기에는 어려움이 많다. 이에 유빙과 충돌을 하더라도 구조강도를 확보하도록 구조설계를 하는 것이 바람직하다. 그러기 위해서는 유빙에 의한 충격하중을 추정하고 이에 따른 선체의 내충돌 구조설계를 하는 기술이 필요하다.

#### ■ 빙하중 모니터링 기술

빙해역을 운항하는 선박의 안전성을 높이기 위하여 선체에 작용하는 빙하중을 계속 모니터링 할 필요성이 있다. 빙하중을 모니터링하면서 현재 작용하는 하중 수준을 파악할 뿐만 아니라 빙하중의 장단기 예측을 통하여 앞으로 과하중이 작용할 경우 구조적 위험성을 경고할 수 있는 과하중 경고 시스템 개발이 필요하다.

#### ■ 빙해선박의 진동/소음 감소 기술

빙해선박은 저속이면서 고풍력이 요구되기 때문에 선체의 안전성에 필수적인 저주파와의 공진회피가 필수적이다. 또한 쇄빙시 발생하는 소음과 진동에 의한 거주 및 작업환경의 쾌적성을 유지하기 위하여 선수 및 선루에 대한 Hammering 효과에 대한 진동해석과 소음전파에 대한 해석이 필요하다.

■ 저온용 구조용강 용접부 피로수명 증강 기술

용접부위 피로수명 향상은 선박의 안전운항 보장은 물론 사용기간의 연장을 통한 경제적 효과도 얻을 수 있다. 용접부 피로수명 증강기법 중 표면처리 기술은 설계, 제작 및 보수작업에 간단히 적용될 수 있고, 또한 높은 성과도 얻을 수 있는 효율적인 기술이다.

그리고 선박의 대형화 및 성능 향상에 따라 구성재료의 여러 가지 성질과 품질향상의 요구와 더불어, 새로운 재료의 개발 및 개량과 이에 따른 가공기술 향상이 요구되고 있다.

특히, 선체는 일반적인 육상의 구조물과 달리 대형이고 열악한 사용 상태에 놓여 있다. 따라서 선체에 사용되는 재질은 다음의 조건을 만족하여야 한다.

- 값이 싸며 강도 및 강성이 커야 한다.
- 가공성이 좋고, 용접이 용이해야 한다.
- 부식에 대해 충분히 견딜 수 있어야 한다.

이를 만족하는 일반적인 구조재료로 연강(Mild steel)이 있다. 하지만 연강이 주로 사용되는 일반 선박과는 다르게 ARAON호에서는 연강이 극히 제한된 구역에만 사용되었다. 운항해역이 극지이기 때문에 연강은 빙하중의 영향이 덜 받는 Deck부분에 주로 사용되었으며, 반대로 빙충격에 노출되어 있는 외부선체는 고장력강인 HT36을 주로 사용하고 있는 것이 특징이다.

선체의 구조적 안전성 평가에는 빙하중에 의한 선체구조 손상의 위험도 해석(Risk analysis)을 기본적으로 하되 빙하중의 확률적 분포와 구조강도의 확률분포도 동시에 고려해야 한다. 그러나 일반적으로 구조강도의 불확실성(Uncertainty)에 비하여 빙하중의 불확실성이 워낙 압도적으로 크기 때문에 빙하중의 확률분포에 대한 연구가 많이 수행된다.

일반적으로 구조신뢰성해석 기법은 다음과 같이 3가지로 크게 나눌 수 있다.  
(최경식 외, 2010)

- Level I

일반적으로 사용되는 결정론적 방법(Deterministic approach)을 말한다. 안전율(Safety factor)로써 불확실성에 대비한다.

- Level II

준확률적 방법(Semi-probability method)이라고 하며, 파괴경계면(Failure boundary)상의 한 점에서 Approximation method를 이용하여 신뢰성 해석을 수행한다. 확률적 설계변수의 평균치(1st moment)와 분산(Second moment)만을 이용하여 확률적 분포를 표현하기 때문에 Second moment method라고 하며 흔히 신뢰성 해석이라고 하면 이 방법을 일컫는 경우가 많다.

- Level III

완전확률적 방법(Fully probabilistic method)이라고 하며, 모든 설계변수들의 확률분포를 이용하여 파괴확률  $P_f$ 를 계산한다. 모든 설계변수에 대한 방대한 양의 다중적분이 필요하기 때문에 실제로는 적용이 거의 불가능하여 검증용으로 많이 사용된다.

이런 모든 확률적인 방법에는 여러 문제가 발생한다. 해빙은 장소에 따라 온도나 염분이 다르기 때문에 해빙의 강도가 달라짐으로 안전성을 평가하기란 쉬운 일이 아니다.

내빙선박의 경우 Ice class가 낮기 때문에 기존의 해양선박과 별 차이가 없어 큰 의미가 없을 뿐만 아니라 설계규정에 따라 설계하기 때문에 별문제가 없다고 생각하는 것이 국내의 실정이여서 향후 적극적으로 대처할 필요가 있다.

본 논문에서는 현재 많이 사용하고 있는 FMA Tentative Guideline의 지침에 의해 Ice class를 IA Super로 하여 선수, 중앙부, 선미부분에 빙충격 하중을 가해 Ice pressure에 따른 변위의 거동과 응력을 파악하였으며, 이 결과로부터 Critical areas 부분을 예측하고 변위의 거동으로부터 쇄빙연구선 ARAON호가 안전한 지를 살펴보았다.

특히 국내뿐 아니라 국외의 경우도 쇄빙선박에 대한 안전성 평가 기준이 정확하게 명시되어 있지 않은 현실이다.



본 연구에서 적용한 빙층돌 해석의 절차는 Fig. 3-4와 같다.

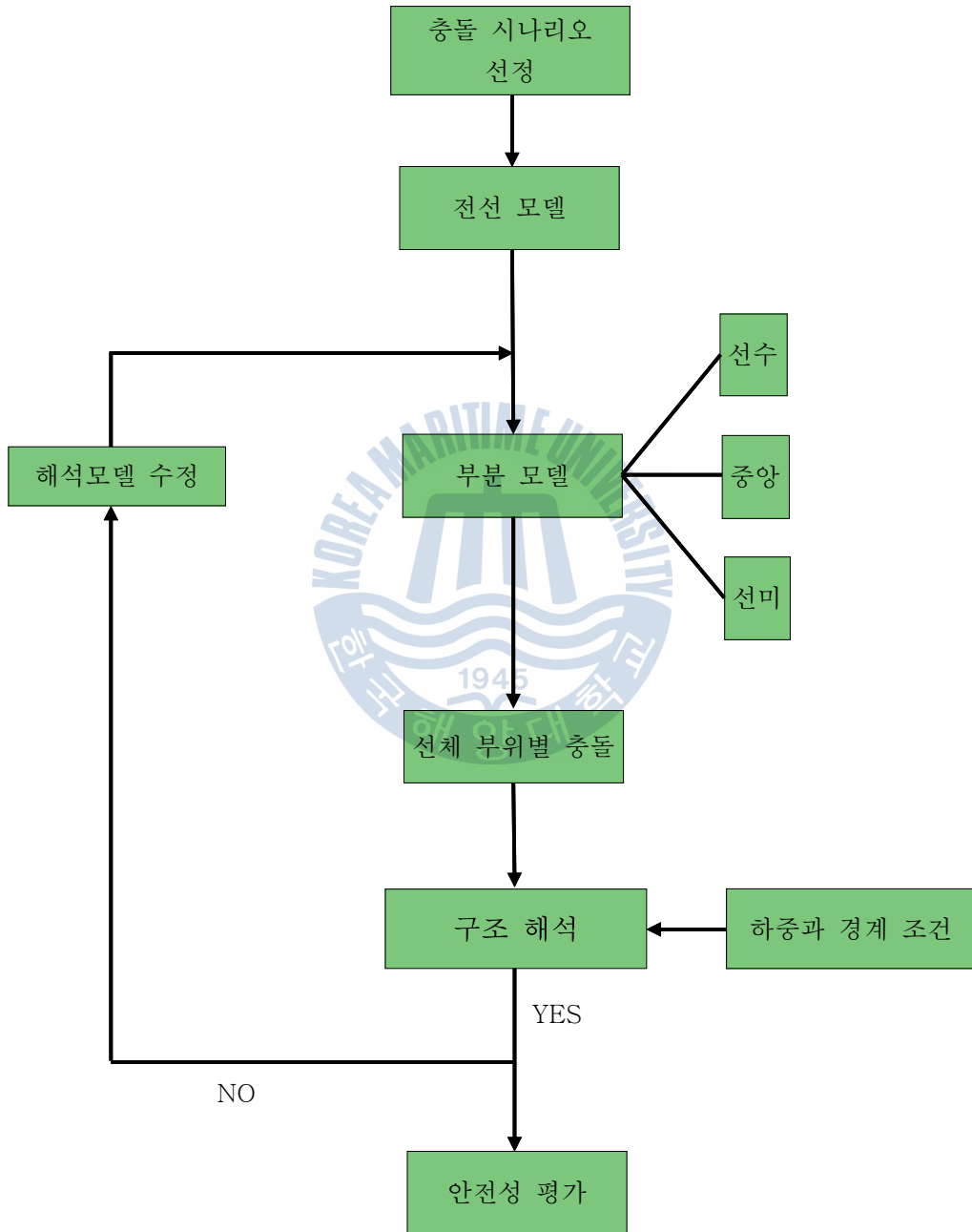


Fig. 3-4 Flow chart of analysis procedure

## 제 4장 ARAON호의 평탄빙 하중에 의한 구조해석

### 4.1 쇄빙연구선 ARAON호의 제원

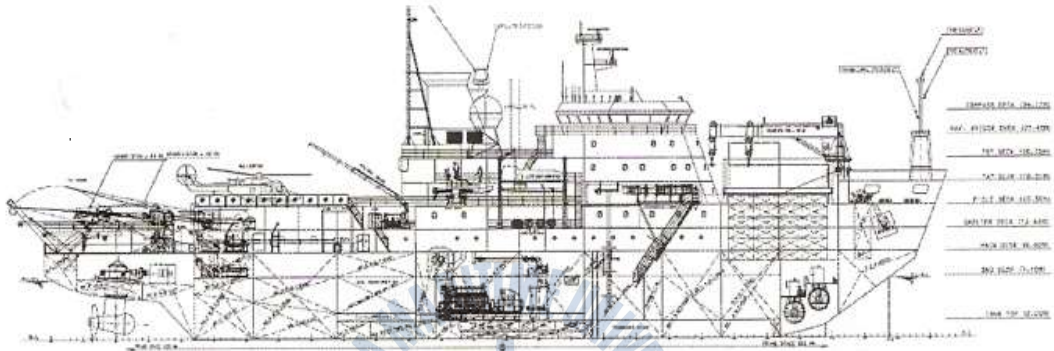


Fig. 4-1 General arrangement of the IBRV ARAON (한진중공업, 2009)

Table 4-1 Principal dimension of the IBRV ARAON

Length	O.A.	111.00 m
Length	B.P.	95.00 m
Length	(Scantling)	100.68 m
Breadth	(Moulded)	19.00 m
Depth	(Moulded)	9.90 m
Draft	(Scantling)	7.60 m
Cb	(Scantling)	0.614
Displacement		6950 ton
Speed		12knot (Max 16Knot)
Propulsion system		Azimuth Thruster 2기(5000Kw x 2), Tunnel Thruster 2기(1200kw x 2)
Icebreaking efficiency		1m 두께 얼음을 지속 5.5km로 연속 쇄빙



## 4.2 경계조건 및 하중조건

본 유한요소 모델은 Cartesian 오른손 좌표계를 이용하였으며 좌표원점은 (0,0)이다.

x축 : 종방향(선박의 길이 방향)으로서 양(+)의 방향은 선미에서 선수 방향

y축 : 횡방향(선박의 폭 방향)으로서 양(+)의 방향은 선체 중심선에서 좌현 방향

z축 : 수직방향(선박의 깊이 방향)으로서 양(+)의 방향은 선체 중심에서 상향

본 유한요소 모델에는 수밀격벽, 비수밀격벽, 늑판을 포함한 모든 주요 종부재 및 횡부재가 포함되었다. 그러나 전선 강도에 기여하지 않은 부재, 수밀이 되지 않은 늑판과 같이 하중에 직접적으로 노출되지 않은 구조의 보강재, 좌굴방지를 위한 보강재는 일부 생략하였다.

선체 외판, 갑판, 격벽 및 주요 스트링거와 웹 등과 같은 선체 주요 부재는 3절점 또는 4절점의 요소로 구성되었으며 결과의 정확도를 높이기 위해 사각형 요소를 사용하였다. 종 및 횡보강재, 수직보강재 등 하중에 직접적으로 노출되는 보강재는 2절점의 보 요소(Beam element)를 사용하였다.

요소의 크기는 국부적인 영역에서의 고응력과 대변형 등 비선형성을 표현하기 적당하도록 정하였으며 판 요소의 경우, 종방향은 프레임 간격(800mm)으로 하였고 횡방향 또는 수직방향으로는 종방향 보강재의 간격(650mm) 또는 종 방향 크기와 종횡비가 1:1에 가깝도록 격자를 생성하였으며 종횡비가 최대 1:4를 넘지 않도록 하였다.

본 해석에서 사용된 재료는 선형탄성 재료(Linear elastic material)로써 재료 물성치는 다음과 같다.

Table 4-2 Material properties of steel

Property	Mild steel	High strength steel (HT32)	High strength steel (HT36)
Young's modulus (MPa)	206000	206000	206000
Density (kg/m <sup>3</sup> )	7850.0	7850.0	7850.0
Poisson's ratio	0.3	0.3	0.3
Yield strength (MPa)	235.0	315.0	355.0

#### 4.2.1 경계조건

본 해석을 위해 유한요소 모델에 적용된 경계조건은 부분모델의 상부와 하부의 x, y, z 방향을 모두 고정시켰으며 (면 ADHE와 면 BCGF), Center line에 대해서는 y축에 대하여 대칭조건 (면 CDHG)을 만족시키도록 하였다.

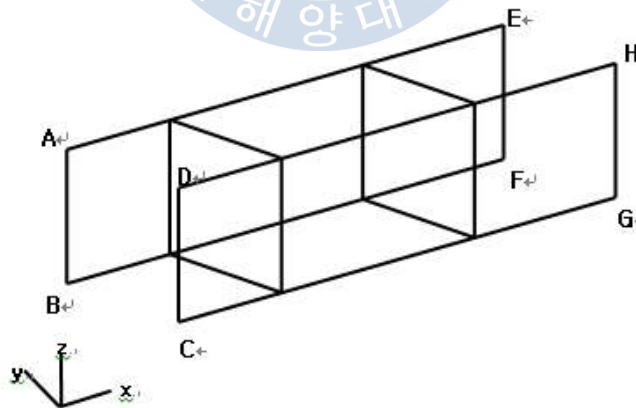


Fig. 4-2 Boundary conditions

## 4.2.2 빙하중(Ice pressure) 산정

Tentative Guideline은 Design ice pressure를 다음의 수식과 같이 적용하고 있다 (Finnish Maritime Administration, 2003).

$$p = c_d \times c_1 \times c_a \times p_0 \quad (4-1)$$

Design ice pressure를 적용하기 위해서 구조해석에 사용된 빙하중은 다음과 같이 Extreme ice pressure를 적용하고 있다.

$$p_{\max} = 3.37 \times c_d \times c_1 \times p_0 (1.059 - 0.175L) \quad (4-2)$$

여기서, 괄호안의 최대값은 1.0이다.

$C_d$  = a factor which takes account of the influence of the size and engine output of the ship.

$$c_d = \frac{a \times k + b}{1000} \quad (4-3)$$

$$k = \frac{\sqrt{\Delta \times P}}{1000} \quad (4-4)$$

여기서,

$\Delta$  = the displacement of the ship at maximum ice class draught [t]

P = the actual continuous engine output of the ship [kW]

$C_1$  = a factor which takes account of the probability that the design ice

pressure occurs in a certain region of the hull for the ice class in question.

Table 4-3 Coefficient of  $C_1$  for different location

Ice class	Region		
	Forward	Midship	Aft
IA Super	1.0	1.0	0.75
IA	1.0	0.85	0.65
IB	1.0	0.70	0.45
IC	1.0	0.50	0.25

$C_a$  = a factor which takes account of the probability that the full length of the area under consideration will be under pressure at the same time.

$$c_a = \frac{47 - 5l_a}{44} \quad (\text{maximum } 1.0, \text{ minimum } 0.6) \quad (4-5)$$

$p_0$  = the nominal ice pressure, the value 5.6MPa shall be used.

이렇게 얻어진  $p_{\max}$ 의 값을 이용하여 해석을 수행할 선측부에 Line load(Q)를 가하면 된다. Line load(Q)는 아래의 수식과 같이  $p_{\max}$ 와 Load height(h)의 곱으로 표현된다.

$$Q = p_{\max} \times h \quad [N/mm] \quad (4-6)$$

여기서  $h$ 는 Ice class에 따라 다음과 같이 정의 된다.

Table 4-4  $h$  values for different ice classes

Ice class	$h_0$ (m)	$h$ (m)
IA Super	1.0	0.35
IA	0.8	0.30
IB	0.6	0.25
IC	0.4	0.22

본 해석에 사용된 선박의 빙등급은 IA Super이다.

Line load( $Q$ )의 값은 다음과 같으며 이 값이 본 논문에 사용하게 된 충격하중이다.

Table 4-5 Line load for different location

Line load at shell plate		
	$p_{max}$	$Q$
Forward	5.478	1917
Midship	3.453	1208
Aft	2.590	906

본 해석에서 하중에 대한 시간적인 변화를 Fig. 4-3에서 보여주고 있다.

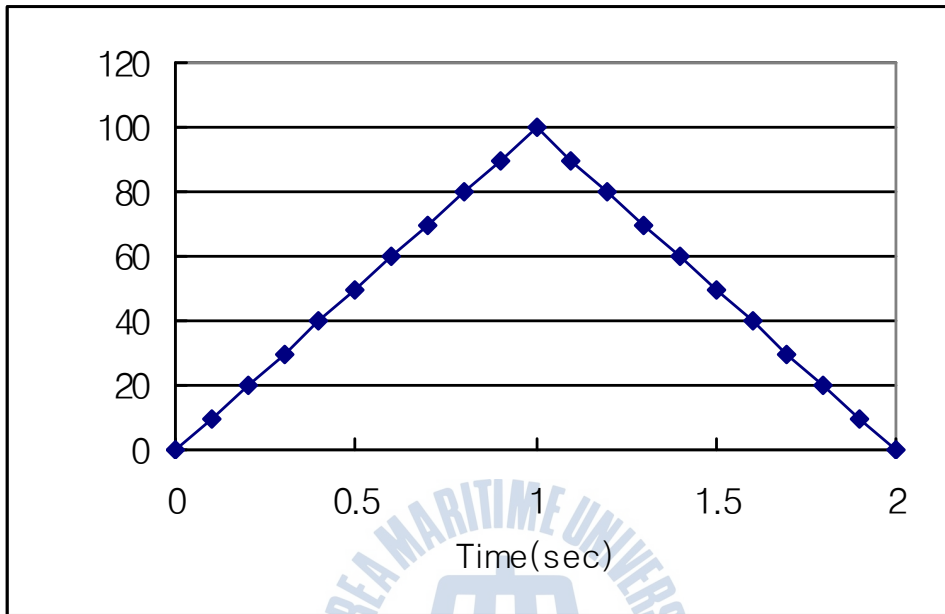


Fig. 4-3 Load path (loading and unloading phases)

Fig. 4-3과 같이 하중은 처음 1초동안 서서히 증가하다가 Max값 이후 1초간 감소한다. Loading ratio를 통하여 변위의 거동 특성을 파악하고 응력의 전파도 확인할 수 있었으며, 이를 통해 최대 하중에서의 변위 및 응력의 변화를 알 수 있다. Unloading은 최대 하중에서 발생된 변형이 어떠한 과정을 거쳐 변화되는 지 확인하기 위함이다.

쇄빙연구선 ARAON호의 부재 길이와 제원, Tentative Guideline을 통하여 해석에 사용한 수치는 다음과 같다.

- Span length : 2.1m
- $h_0$  : 1m
- $h_0/s$  : 1.250
- Displacement : 8000ton
- Power : 5000kW
- Ice class : IA Super

Table 4-6 Maximum ice pressure at shell plate

Ice pressure at shell plate										
Ice pressure	k	a	b	$c_d$	$c_1$	$l_a$	$c_a$	$p_0$	P	$P_{max}$
Forward	6.325	30	230	0.42	1.0	2.1	0.83	5.6	1.95	5.478
Midship	6.325	8	214	0.265	1.0	2.1	0.83	5.6	1.229	3.453
Aft	6.325	8	214	0.265	0.75	2.1	0.83	5.6	0.922	2.590

상수 a, b 는 다음과 같이 정의된다.

Table 4-7 Data of a, b for different location and k

	Region			
	Forward		Midship & Aft	
	$k \leq 12$	$k > 12$	$k \leq 12$	$k > 12$
a	30	6	8	2
b	230	518	214	286

본 해석을 위해 사용된 단위계로는 압력(Pressure) 및 응력(Stress)은  $\text{N/mm}^2$ , 힘(Force)은 N, 길이 및 두께는 mm를 사용하였으며, 질량의 경우 kg을 사용하였다.





### 4.3 구조해석 모델링

선체강도의 세부 계산은 외력이 부분적이거나 또는 전체적으로 가해지기도 할 뿐만 아니라 힘의 형태도 다양하므로 복잡하게 된다. 실제의 선체에 있어서는 다양한 부재들이 서로 연결되어 있으며, 각 부재들의 기능들도 단일하지 않기 때문에 어떠한 특정 부재에 걸리는 응력을 정확하게 구하기란 거의 불가능하다. 따라서 고려되어야 할 주안점은 선체의 각 부재가 그들이 사용되는 주목적을 수행할 만큼 충분히 강한가, 또 강도상 돌연한 불연속은 배제되었는가를 밝히는 데에 있다. 적합하게 설계된 선박에서는 항해 중 전체 구조가 외력에 대하여 하나의 탄성범위 내에서 응답하여야 하며, 각 부재는 발생하는 인장 하중 및 압축하중의 적당한 양을 감당할 수 있어야 하고, 어느 부재도 특별히 더 강하거나 더 무겁지 않은 상태이어야 한다.

특히, 선체는 부재수가 매우 많은 복잡한 구조물로서 개개의 부재 모두를 고려하여 해석하는 것은 비경제적이다. 그래서 해석의 대상, 목적, 구조물의 역학적 특성을 고려하여, 적당한 이상화와 적절한 해석법의 선택이 이루어져야 한다. 그리고 국부적인 해석과 전체 해석이 상호보완적이 되도록 계산을 진행해 나가야 한다. 즉, 국부적인 해석결과를 토대로 역학적 특성을 파악하여 보다 큰 구조물에서 구조부재의 이상화 과정에 반영한다든지, 또는 전체 해석에 의해 국부구조의 경계조건을 구해 국부 해석을 하는 등의 Cycle을 보다 효율적으로 나타낼 수 있도록 해야 한다. 구조의 이상화는 해석법의 선택, 계산시간, 정밀도 등과 밀접한 관계가 있어 많은 경험과 공학적인 감각이 필요하다 (Fig. 4-4).

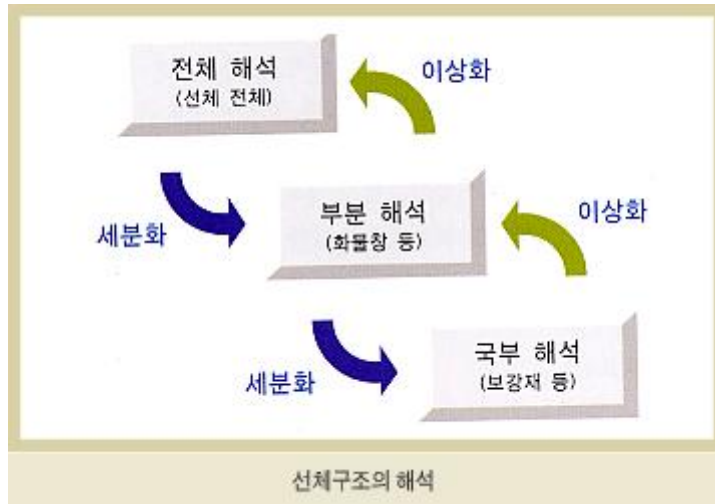


Fig. 4-4 Idealization of the structure

3차원 탄성체의 정적 응답은 물체 내부에서 힘의 평형에서 얻어지는 평형방정식과 변형의 기하학적 조건에서 얻어지는 변위와 변형도 관계식 및 재료의 특성을 표시하는 응력과 변형도 관계식을 주어진 경계조건 하에서 푸는 것이 일반적이다.

본 논문에서는 부분모델 해석을 통하여 전선모델 해석으로 다가갈 수 있도록 방향을 잡았다.

빙충격 하중을 가하기 전에 선수와 중앙부, 선미부분을 나눈다. 각각의 구역은 RMRS를 참고하였다. Fig. 4-5는 RMRS의 쇄빙선 내빙대 (Ice belt) 구역이다.

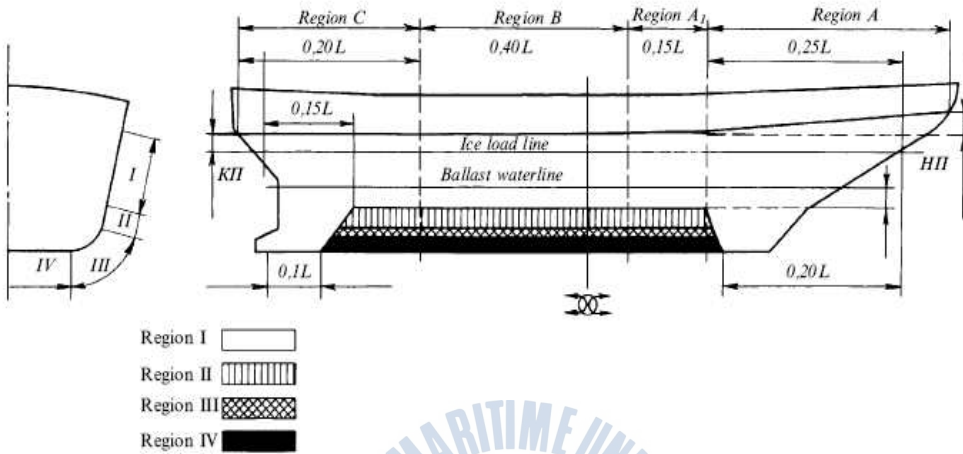


Fig. 4-5 Regions of ice strengthening for on icebreaker (Russian Maritime Register of Shipping, 2005)

- 여기서, Region A - 선수 구역
- Region A1 - 중간 구역
- Region B - 선체 중앙부
- Region C - 선미 구역

본 논문에서는 Region A1과 B를 중앙부로 하였다.

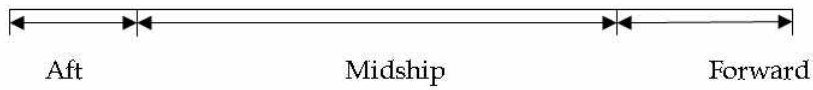
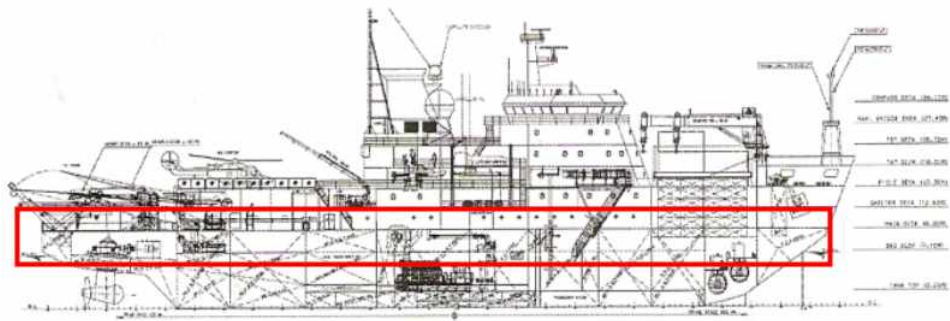
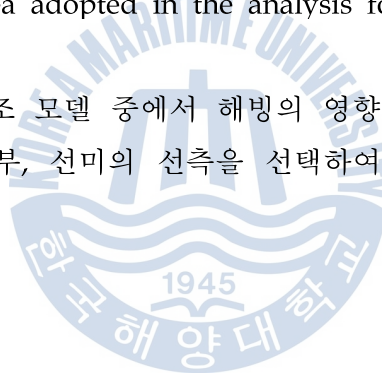


Fig. 4-6 Local area adopted in the analysis for the IBRV ARAON

구역을 나눈 후, 전선구조 모델 중에서 해빙의 영향을 크게 받는 내빙대 (Ice belt) 부분인 선수, 중앙부, 선미의 선측을 선택하여 해석을 수행하였다 (Fig. 4-6).



본 논문에 사용한 전선구조 모델과 부분구조 모델을 Fig. 4-7과 Fig 4-8에 각각 나타내었다.

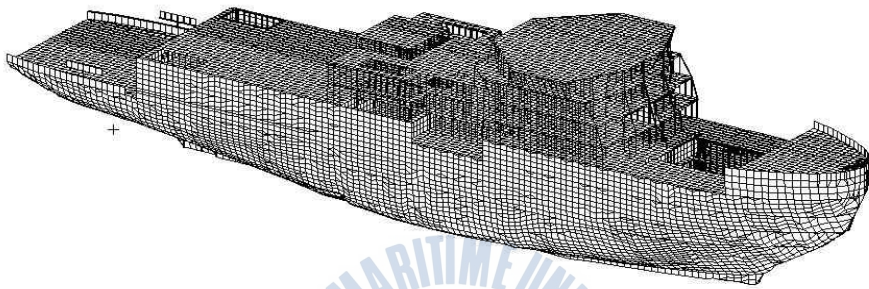


Fig. 4-7 Global model of the IBRV ARAON

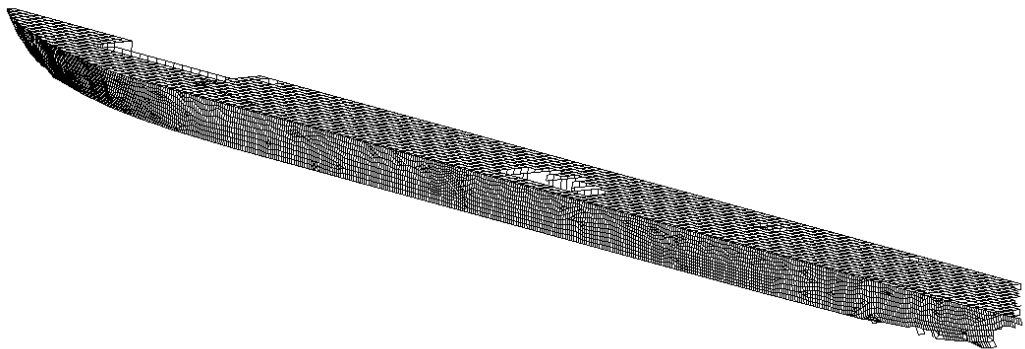


Fig. 4-8 Local model of the IBRV ARAON

선체에 빙 충격하중을 가하여 나타난 변위의 거동은 Fig. 4-9와 같다.

Petran 2008r2 28-Apr-11 16:05:45  
Deform: ICE, A1:Non-linear: 5. % of Load, Displacements, Translational, . (NON-LAYERED)

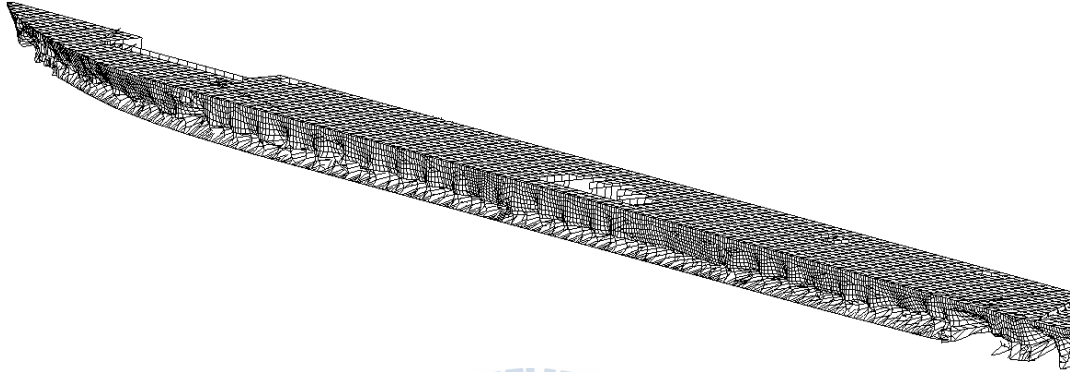


Fig. 4-9 Deformation at local area

다음은 각 부위별 변형 형상을 나타내었다.

Petran 2008r2 28-Apr-11 15:46:54  
Deform: ICE, A1:Non-linear: 100. % of Load, Displacements, Translational, . (NON-LAYERED)

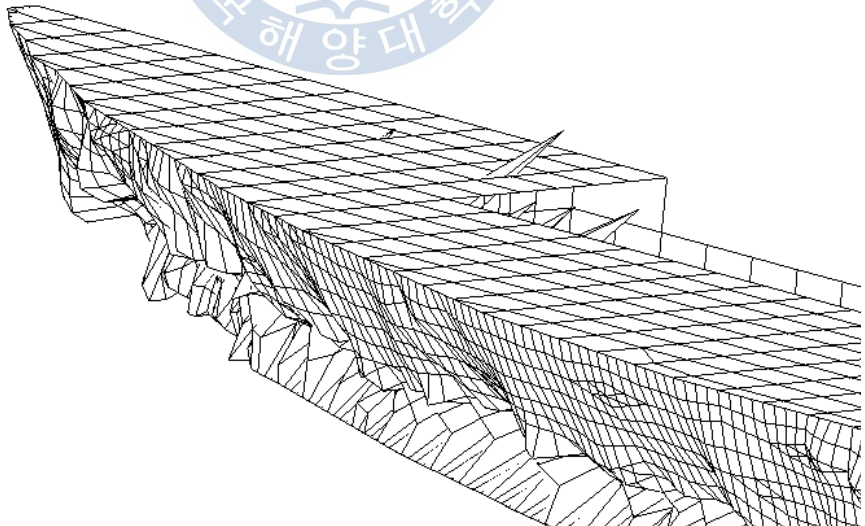


Fig. 4-10 Deformation at forward

Patran 2008r2 28-Apr-11 15:46:54

Deform ICE\_A1 Non-linear 100. % of Load, Displacements, Translational, (NON-LAYERED)

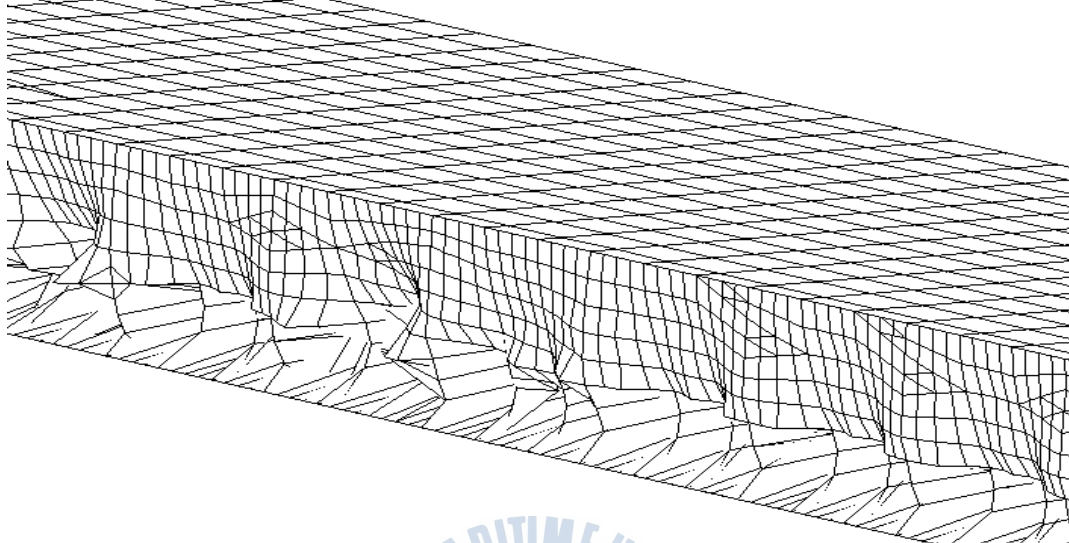


Fig. 4-11 Deformation at midship

Patran 2008r2 28-Apr-11 15:46:54

Deform ICE\_A1 Non-linear 100. % of Load, Displacements, Translational, (NON-LAYERED)

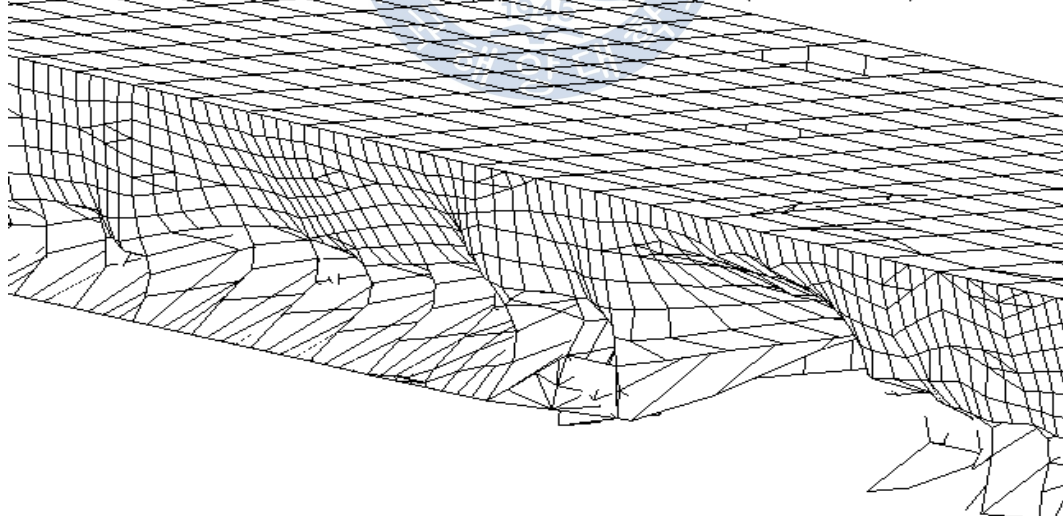


Fig. 4-12 Deformation at aft

다른 Section과 달리 측면 충돌의 경우에는 충돌면의 형상이 Flat하고 접촉면적도 상대적으로 넓다. 따라서 측면 부분은 조밀하게 요소를 나누어 충분히 충격하중 전달과 변형구동을 구현할 수 있게 하였다. 부분 해석 시, Shell, Beam을 사용하였으며 특히 충돌부위는 Shell 요소를 주로 사용하여 해석의 신뢰성을 높이도록 하였다.





#### 4.4 구조해석 결과

최대 충격하중이 가해졌을 때의 선수, 중앙부, 선미의 최대 변형은 Table 4-8과 같다.

Table 4-8 Deformation at maximum pressure

Model	Deformation at maximum pressure
Forward	12.8 mm
Midship	10.4 mm
Aft	9.22 mm

Table 4-8에서 알 수 있듯이 빙충격 하중이 큰 선수 쪽에 큰 변형이 일어나며, 선미 쪽에는 적게 일어난다.



Ice pressure에 따른 각 부분에서의 변형은 아래와 같다.

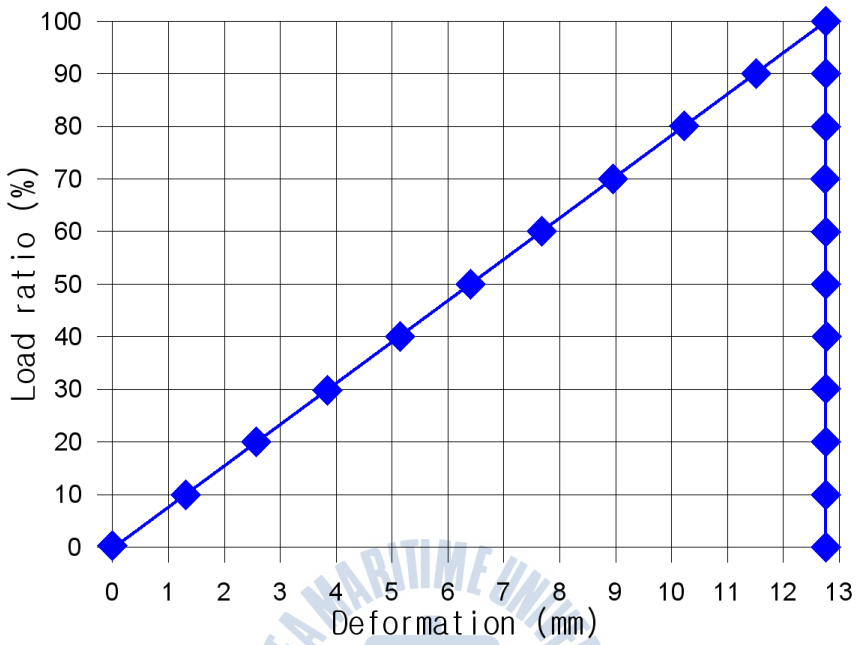


Fig. 4-13 Deformation according to load ratio for forward

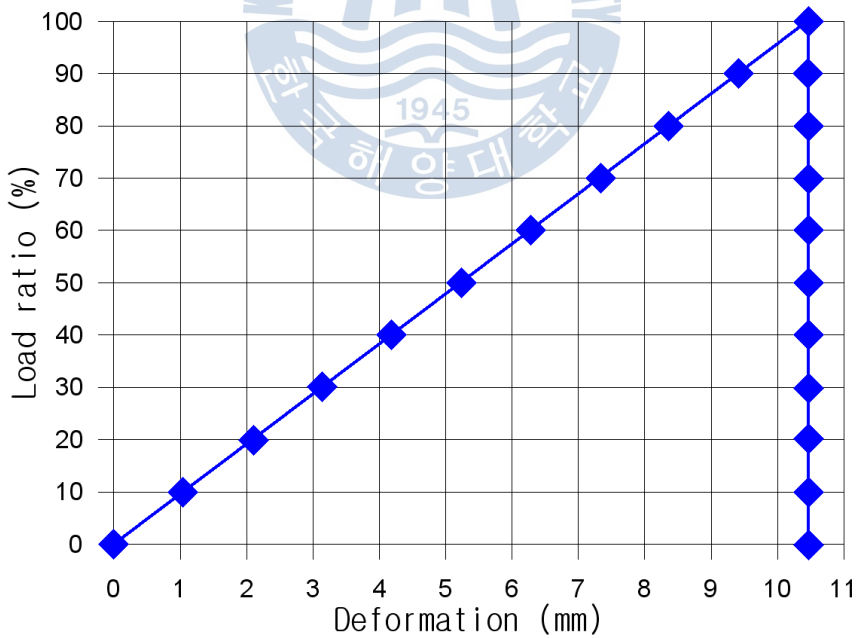


Fig. 4-14 Deformation according to load ratio for midship

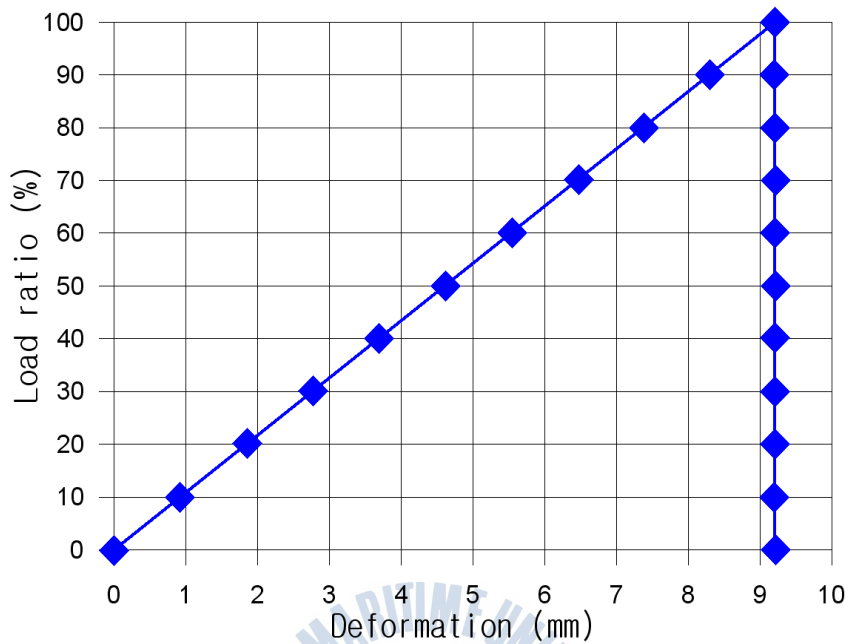


Fig. 4-15 Deformation according to load ratio for aft

본 결과 Load ratio가 100% 증가할 때까지는 변형이 계속하여 증가하였다. 하지만 Unloading 시 변위가 감소하고 마지막에는 최대 변위보다는 작은 영구변형이 남아야 정상이지만 해석결과 최대 하중에서의 변형이 계속 유지되었다. 이는 소성변형 후 그대로 잔류변형으로 남았다는 것을 의미하며 현재 계산된 변위의 거동을 기준으로 앞으로 쇠빙선박의 안전성을 평가해야 할 것이다.

다음은 Maximum ice pressure에서 선체의 응력분포를 나타내었다.

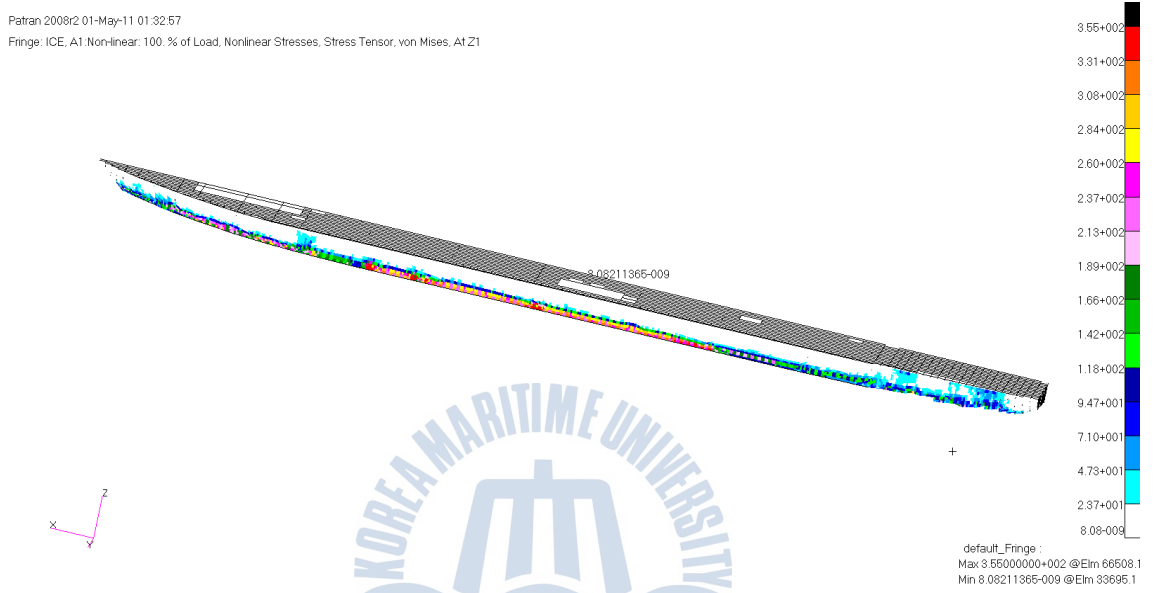


Fig. 4-16 Stress wave propagation according to the load ratio

Ice pressure에 따른 선체 위치별 최대 응력의 크기는 다음과 같다.

Table 4-9 Stress at maximum pressure

Model	Stress at maximum pressure
Forward	355 MPa
Midship	355 MPa
Aft	297MPa

현재 쇄빙연구선 ARAON호에 대한 본 연구의 해석결과와 직접 비교할 수 있는 실측 데이터는 없는 실정이다. 따라서 간접적으로 본 논문에 사용한 Tentative Guideline의 지침을 사용하여 변위의 거동을 파악한 사례인 Chemical tanker를 선택하여 변위의 거동을 비교하였다 (최경식 외, 2010).

■ Chemical tanker

비교해석에 사용된 Chemical tanker의 제원은 다음과 같다.

Table 4-10 Principal dimensions of a chemical tanker

Length	O.A.	183.00 m
Length	B.P.	174.00 m
Length	(Scantling)	172.61 m
Breadth	(Moulded)	32.20 m
Depth	(Moulded)	19.10 m
Draft	(Scantling)	13.20 m
Service	Speed (at NCR with 15% SM)	15.0 knots
Cb	(scantling)	0.8175
S.W.B.M	(Hogging)	101,500 t-m
S.W.B.M	(Sagging)	- 89,400 t-m
Web	Frame spacing	2.63 m for middle and fore-end 2.40 m for aft-end

이 해석결과에 따르면 3차원 모델이 4 web frame spacing 길이에 대해 만들어졌으며, 높이 방향으로는 2개의 Horizontal stringer 사이에 Ice belt zone을 포함하고 Hopper 상부를 대상으로 하고 있다. 횡방향으로 Double skin 영역에서는 Inner skin을 포함하고 Single skin 영역에서는 Main web frame을 포함하였다. 선택된 모델 범위는 다음과 같다.

Table 4-11 Modeling range of a chemical tanker (최경식 외, 2010)

Model	Longitudinal direction	Vertical direction
Forward	FR.86 ~ FR.90	Long no.27 ~ 29
Midship	FR.62.5 ~ FR.66.5	Long no.27 ~ 31
Aft	FR.11 ~ FR.22	Long no. 30-4 ~ 34

구조해석 모델에 포함된 부재는 Side shell plate, Side longitudinal frame, Inner skin plate, Longitudinal, Web frames, Web frame stiffeners 및 Brackets 등이다. 그리고 Line load가 적용된 영역의 요소는 쇠빙연구선 ARAON호와 같은 판 요소를 사용하였으며 Ice class는 IB를 적용하여 비선형 해석을 수행한 결과이다.

다음은 이 해석결과와 쇠빙연구선 ARAON호의 계산결과를 비교한 것이다.

Table 4-12 Deformation at maximum pressure for the IBRV ARAON and chemical tanker

	IBRV ARAON	chemical tanker
Fore	12.8 mm	56.2 mm
Midship	10.4 mm	30.9 mm
Aft	9.22 mm	15.2 mm

Table 4-12에서 보듯이 쇠빙연구선 ARAON의 변형이 Chemical tanker(최경식 외, 2010)보다 현저히 작음을 알 수 있다. 그 이유는 다음과 같이 설명할 수 있다.

첫째로 선체의 구조 차이에 기인한 것으로 판단 할 수 있다.

쇠빙연구선 ARAON은 Transverse 구조인데 반해, Chemical tanker는 Longitudinal 구조로 되어 있기 때문이다. 즉, Transverse의 구조가

Longitudinal의 구조보다 변형을 잘 견디주는 것을 예측할 수 있다.

둘째로 선박의 용도와 쇄빙등급의 차이에 따른 결과로 예상할 수 있다.  
우선 쇄빙연구선 ARAON은 상선인 Chemical tanker (Ice class IB)보다 쇄빙등급이 높은 IA Super이다. 즉, 그만큼 큰 하중에 견딜 수 있도록 건조되었고, 따라서 Chemical tanker보다 변형이 작게 발행하는 것을 예상할 수 있다.



## 제 5 장 결 론

본 논문의 목적은 G/T 6950톤급의 쇄빙연구선 ARAON호에 대하여 빙하중 하에서 선체 강도의 안전성을 평가하고 해석절차를 마련하는 것이다. 본 연구에서는 “Tentative Guideline for Application of Direct Calculation Methods Longitudinally Framed Structure”에서 제시한 Ice class, IA Super를 적용하여 두께 1m의 평탄빙 상태에서 비선형 해석을 통한 선체 변위와 강도특성을 살펴 보았다. 쇄빙선박에 대한 안전성 기준이 명확하지 않은 현 단계에서 안전성의 기준은 본 논문에서 적용한 비선형 하중해석과 그 결과로서 변위와 강도특성을 참고로 할 것을 제안한다.

본 논문에서는 빙충격 하중을 시간에 따라 Loading과 Unloading을 함으로써 Load ratio에 따른 변위의 거동을 확인하였다.

한편 본 연구를 통하여 얻은 결론은 다음과 같다.

- 쇄빙연구선 ARAON호의 빙충격 응답에 대한 해석수행

유한요소 해석 프로그램인 MSC/NASTRAN과 전후처리 MSC/PATRAN을 통하여 쇄빙연구선 ARAON호의 빙충격 하중에 대한 구조응답 해석절차를 제시 하였다.

쇄빙연구선 ARAON호와 같이 복잡하고 다양한 물성과 형상을 갖는 구조를 포함한 해석의 경우 부분해석을 수행하는 것이 보다 효율적인 방법이며, 이 결과를 바탕으로 전선해석을 시도하는 것이 효과적임을 확인할 수 있었다.

- 쇄빙연구선 ARAON호의 변형거동 특성 파악

선체에 Ice pressure를 가함으로서 변위의 거동을 확인할 수 있었다. 특히 쇄빙 연구선 ARAON호의 경우는 영구 소성변형이 발생함을 확인할 수 있었으며 변위의 Critical area가 나타날 부분을 예측할 수 있었다.



본 연구를 통하여 향후 극지역을 항해하는 쇄빙선박의 안전성 검토를 위한 기준과 기본적인 해석절차를 마련한 성과를 얻을 수 있었다.



## 참 고 문 헌

- [1] Daley, C. (2006), Ice Loads for Structural and Vibration Analysis of Large Arctic LNG Carriers - Phase II, BMT Fleet Technology Limited.
- [2] Daley, C. et al. (2008), Structural Integrity Assessment of Cargo Containment Systems in Arctic LNG Carriers under Ice Loads, ABS Technical Paper.
- [3] Finnish Maritime Administration (2003), Tentative Guideline for Application of Direct Calculation Methods Longitudinally Framed Structure.
- [4] Likhomanov, V. (2010), Full-Scale Ice Trials of the Korean Research Icebreaker Araon, Arctic and Antarctic Research Institute, Russian Antarctic Expedition Report.
- [5] Ostreng, W. et al. (1999), The Challenges of the Northern Sea Route - Interplay between Natural and Societal Factors, INSROP Working Paper No.167.
- [6] Russian Maritime Register of Shipping (2005), Rule for the Classification and Construction of Sea-Going Ships Volume 1.
- [7] 박영진, 김대환, 최경식 (2010), “쇄빙연구선 ARAON을 이용한 북극해 해빙의 재료특성 조사” 한국해양공학회 추계 학술대회논문집, pp.146~152.
- [8] 이춘주 외, (2010), 2010년 쇄빙연구선 ARAON호의 북극해 항해 실선계측 시험 결과보고서, 한국해양연구원.

- [9] 정성엽 (2008), 쇄빙상선의 빙하중 고찰 및 빙해역 항행 모델, 한국해양대학교 공학석사 학위논문.
- [10] 최경식 외, (2010), 빙해선박 선체구조 안전성 평가 기술, 지식경제부 산업원천과제 1차년도 보고서.
- [11] 한국산업기술평가원 (2006), 2006년도 산업기술동향분석 - 2. 빙해 (Ice Class) 선박 -.
- [12] 한진중공업 (2009), 6950ton Class 쇄빙 극지 연구조사선 전선구조해석 보고서.

