



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 원 저작자를 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 권리와 책임은 위의 내용에 의하여 영향을 받지 않습니다.

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

[Disclaimer](#)



工學碩士 學位論文

쇄빙연구선 ARAON호의 북극해 현장계측시험을
통한 해빙의 재료특성에 관한 연구

Material Properties of Arctic Sea Ice during 2010 Summer
Arctic Voyage of the Icebreaking Research Vessel ARAON

指導教授 崔 慶 植



2012年 2月

韓國海洋大學校 大學院

海 洋 工 學 科

金 大 煥

本 論文을 金大煥의 工學碩士 學位論文으로 認准함.

委員長：工學博士 徐 榮 敦 (印)

委 員：工學博士 金 錢 淳 (印)

委 員：工學博士 崔 慶 植 (印)



2012年 2月

韓國海洋大學校 大學院

海 洋 工 學 科

金 大 煥

Material Properties of Arctic Sea Ice during 2010 Summer Arctic Voyage of the Icebreaking Research Vessel ARAON

by

DAE-HWAN KIM

Department of Ocean Engineering
Graduate School of Korea Maritime University

ABSTRACT

To correctly estimate ice load and ice resistance on ship's hull, it is essential to understand the material properties of sea ice during ice field trials and to perform the proper experimental procedure by gathering ice strength data. The first Korean-made icebreaking research vessel ARAON had her second sea ice trial in the Arctic Ocean during July and August, a summer season of 2010. This study describes test procedures to obtain proper sea ice strength data which provides the basic information to ship's performance in ice-covered sea and to estimate the correct ice load and ice resistance on the IBRV ARAON. The data gathered from three sea ice field trials during the Arctic voyage of the ARAON includes ice temperature, ice salinity, ice density, ice compressive strength, ice flexural strength and failure strain of sea ice through the sea ice thickness. This study analyses the gathered sea ice data in comparison with data from the first voyage of the ARAON during her Antarctic Sea ice trial in January, 2010, sea ice field tests in Svalbard in April, 2010 and another Arctic sea ice trial in August, 2011.

목 차

ABSTRACT	i
목 차	ii
그 림 목 차	iv
표 목 차	vii
 1. 서 론	1
 2. IBRV ARAON호 북극해 현장계측시험	5
2.1 현장계측시험 일자 및 장소	5
2.2 현장계측시험 항목	6
2.2.1 밀집도	7
2.2.2 두께	13
2.2.3 염도	15
2.2.4 온도와 밀도	17
2.2.5 결정구조	19
2.2.6 압축강도 및 파괴변형도	21
2.2.7 굽힘강도	24
2.3 현장계측시험 절차	27
2.3.1 시험장소 선정 및 해빙 두께 측정	27
2.3.2 해빙 시추	30
2.3.3 해빙 온도, 밀도 측정 및 압축강도 시편 가공	32
2.3.4 해빙 압축강도 측정 및 결정구조 편광 촬영	35
2.3.5 해빙 염도 및 굽힘강도 측정	36

3. 북극해 현장계측시험 결과	37
3.1 밀집도 및 두께	37
3.2 온도, 밀도, 염도	41
3.3 압축강도 및 굽힘강도	44
3.4 결정구조	49
4. 현장계측시험 데이터 비교 분석	51
5. 결 론	62
참 고 문 헌	64



그 림 목 차

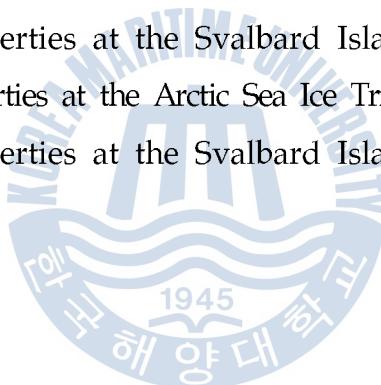
Fig. 1-1 Northern Sea Route and Northwest Passage in Arctic Ocean ..	1
Fig. 1-2 Northern Sea Route and Far East / Europe Sea Route	1
Fig. 1-3 Aerial Photo of ARAON during Antarctic Field Test(Jan. 2010) ..	4
Fig. 1-4 Aerial Photo of ARAON during Arctic Field Test(Aug. 2010)	4
Fig. 2-1 Field Tests Route	5
Fig. 2-2 Arctic Sea Ice Concentration(2010.07.26)	8
Fig. 2-3 Chukchi Sea Ice Concentration(2010.07.20)	9
Fig. 2-4 Sea Ice Concentration within 0-1/10 and 10/10	10
Fig. 2-5 Sea Ice Concentration 2/10	12
Fig. 2-6 Sea Ice Concentration 7/10	12
Fig. 2-7 Sea Ice Concentration 9/10	12
Fig. 2-8 Ice Thickness Measuring Apparatus	14
Fig. 2-9 Auger	14
Fig. 2-10 Tape Measure	14
Fig. 2-11 Electromagnetic Induction	14
Fig. 2-12 Crystal Structure of Sea Ice(Horizontal direction)	16
Fig. 2-13 Salinometer	16
Fig. 2-14 Brine Volume of Sea Ice(S=1%)	16
Fig. 2-15 Hand Drill	18
Fig. 2-16 Digital Probe Thermometer	18
Fig. 2-17 Hand Scale	18
Fig. 2-18 Crystal Structure of Sea Ice	20
Fig. 2-19 Cross-polarized Light Photographic Apparatus	20
Fig. 2-20 Strain Rate vs. Sea Ice Compressive Strength	21

Fig. 2-21 Uniaxial Compression Tester	22
Fig. 2-22 Cantilever Flexural Strength Test Diagram of Sea Ice	25
Fig. 2-23 Cantilever Flexural Strength Test of Sea Ice	25
Fig. 2-24 Test Course Marking	27
Fig. 2-25 Auger Electrical-mechanical Drill	28
Fig. 2-26 Ice Thickness Measurement with Tape Measure	28
Fig. 2-27 Ice Thickness Measurement using an Electromagnetic Induction Sensor(EM31)	29
Fig. 2-28 3-inch Diameter Kovacs Corer	30
Fig. 2-29 Coring with 3-inch Diameter Kovacs Corer	30
Fig. 2-30 Collected Sea Ice Core Samples	31
Fig. 2-31 Sea Ice Temperature Measurement using Probe Type Thermometer ..	32
Fig. 2-32 Sea Ice Weight Measurement	32
Fig. 2-33 Sea Ice Core Sample Cutting Machine	34
Fig. 2-34 19cm Sea Ice Core Sample Cut with the Cutting Machine ..	34
Fig. 2-35 Uniaxial Compression Test on the Deck of ARAON	35
Fig. 2-36 Crystal Structure of Cored Sea Ice Sample	35
Fig. 2-37 Salinity Measurement of Sea Ice	36
Fig. 3-1 Field Test Site #1	39
Fig. 3-2 Field Test Site #2	39
Fig. 3-3 Field Test Site #3	39
Fig. 3-4 Sea Ice Thickness at the Field Test Site #1	40
Fig. 3-5 Sea Ice Thickness at the Field Test Site #2	40
Fig. 3-6 Sea Ice Thickness at the Field Test Site #3	40
Fig. 3-7 Sea Ice Properties at the Field Test Site #1	43
Fig. 3-8 Sea Ice Properties at the Field Test Site #2	43

Fig. 3-9 Sea Ice Properties at the Field Test Site #3	43
Fig. 3-10 Variation of Compressive Strength with Strain Rate	46
Fig. 3-11 Variation of Flexural Strength as a Function of Brine Porosity ..	46
Fig. 3-12 Sea Ice Strength at the Field Test Site #1	47
Fig. 3-13 Sea Ice Strength at the Field Test Site #2	47
Fig. 3-14 Sea Ice Strength at the Field Test Site #3	47
Fig. 3-15 Failure Strain	48
Fig. 3-16 Crystal Structure(Vertical direction, site #3(3.7m, 1.2m), grid size: 1cm)	50
Fig. 3-17 Crystal Structure(Horizontal direction, site #1(0.4m, 1.5m), grid size: 1cm)	50
Fig. 4-1 Sea Ice Properties at the Antarctic Sea Field Test Site #1	52
Fig. 4-2 Sea Ice Properties at the Antarctic Sea Field Test Site #2	52
Fig. 4-3 Sea Ice Properties at the Antarctic Sea Field Test Site #3	52
Fig. 4-4 Field Test Site at the Arctic Sea Field Test Site in August, 2011 ..	53
Fig. 4-5 Sea Ice Thickness at the Arctic Sea Field Test Site #1 in August, 2011 ..	54
Fig. 4-6 Sea Ice Thickness at the Arctic Sea Field Test Site #2 in August, 2011 ..	54
Fig. 4-7 Sea Ice Properties at the Svalbard Island in April, 2010	57
Fig. 4-8 Sea Ice Strength at the Svalbard Island in April, 2010	57
Fig. 4-9 Sea Ice Compressive Strength vs. Porosity	60

표 목 차

Table 2-1 Field Test Date and Location	6
Table 2-2 Sea Ice Concentration of Ice Features	10
Table 3-1 Sea Ice Condition at the Field Test Sites	37
Table 3-2 Sea Ice Properties at the Field Test Sites	41
Table 3-3 Sea Ice Strength at the Field Test Sites	44
Table 4-1 Sea Ice Properties at the Antarctic Sea Ice Trial in January, 2010 ..	51
Table 4-2 Sea Ice Condition at the Arctic Sea Ice Trial in August, 2011	54
Table 4-3 Sea Ice Properties at the Arctic Sea Ice Trial in August, 2011	55
Table 4-4 Sea Ice Properties at the Svalbard Island in April, 2010	56
Table 4-5 Sea Ice Properties at the Arctic Sea Ice Trial in August, 2010	59
Table 4-6 Sea Ice Properties at the Svalbard Island in April, 2010	60



1. 서 론

극지역은 전 세계 석유 매장량의 25%, 천연가스 매장량의 30%가 매장되어 있는 지구상에 남은 마지막 자원부존 지역이다. 과거 원유가가 하향 안정적인 추세가 지속되었을 때 극지역의 자원개발은 경제성이 떨어지는 점과 열악한 기후 및 빙상환경 등으로 인해 접근이 어렵다는 점 때문에 외면되어 왔다. 하지만 최근 전 세계적으로 원유가의 상승 추세에 따른 경제성장 둔화 및 자원고갈에 대한 우려로 인해 극지역의 미개발 에너지 자원에 관한 관심이 증가되고 있다. 동시에 예전 북극해 항로의 경우 여름철에도 상당 부분의 해역에 해빙(Sea ice)이 존재하여 쇄빙선의 도움 없이는 선박의 항행이 많은 어려움이 있었지만 최근 지구온난화로 인해 여름철 해빙이 예상보다 훨씬 빠른 속도로 녹고 있어 일반 선박의 항행이 가능해지고 있다.

북극해를 이용하는 항로는 캐나다의 북서항로(Northwest Passage)와 러시아의 북동항로(Northern Sea Route; 북극해항로)로 크게 2개로 나눌 수 있다(Fig. 1-1).

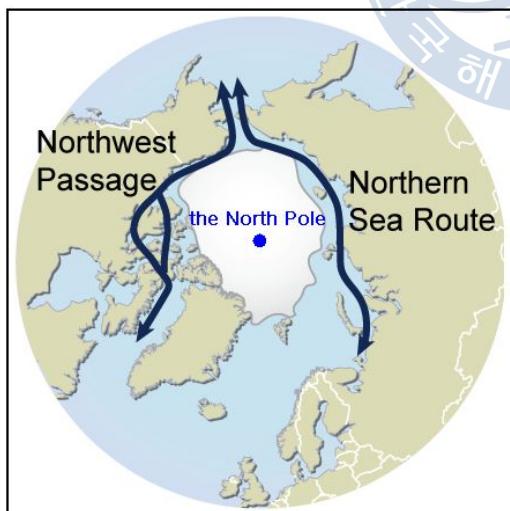


Fig. 1-1 Northern Sea Route and Northwest Passage in Arctic Ocean

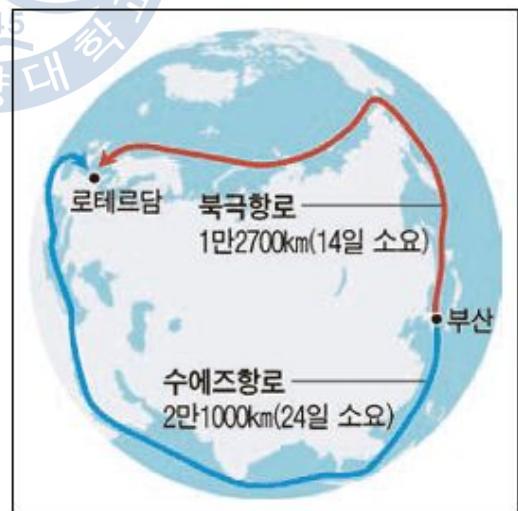


Fig. 1-2 Northern Sea Route and Far East / Europe Sea Route

국내에서 큰 관심을 받고 있는 항로는 러시아의 북동항로(NSR)로 동아시아와 북유럽을 연결하는 최단 항로이다. 이 북극해항로를 이용하였을 경우 기존 국내 부산항에서 북유럽의 네덜란드 로테르담까지의 극동-유럽항로(약 2만 1000km) 운항시간 24일보다 10일 단축한 14일(약 1만 2700km)이 소요된다(Fig. 1-2). 이렇듯 북극해항로 이용 시 운항거리 및 운항시간을 약 40% 단축할 수 있고 선박 한 척당 15억~30억원의 연료비를 절약할 수 있는 큰 장점을 가지고 있다(최경식 외, 2003). 이에 따라 자원의 탐사와 채굴을 위한 각종 해양플랜트 및 보급, 수송을 위한 쇄빙선박의 건조가 증가하는 추세이다.

북극해항로를 이용하는데 있어서 빙해역이라는 열악한 환경 때문에 기술적으로 큰 어려움이 있다. 특히 극지역에서 활동하는 쇄빙선박은 해빙과 접촉하면서 발생하는 빙하중을 받게 되는데 이러한 빙하중은 해빙의 재료특성과 빙상환경 그리고 쇄빙선박의 쇄빙모드에 따라 달라진다. 특히 빙하중을 정확히 산정하는 문제는 조선사에서 상당히 고심하고 있는 주제로 활동지역의 운항조건에 따른 정확한 빙하중의 크기를 알아야만 선체구조와 선형, 기관출력 등이 순차적으로 결정되기 때문이다. 여기서 빙하중은 파랑하중에 의한 힘보다 월등히 크기 때문에 빙해역에서는 빙하중을 가장 중요한 설계변수로 취급한다.

빙해역 운항 시 선체에 작용하는 빙하중은 크게 정상운항 상태의 빙하중과 극한 빙상환경에서의 극한 빙하중으로 구분하는데 실제 빙해역 선급규정에서 사용되는 설계 빙하중은 선박이 손상을 받는 극한 빙하중이 발생하는 운항보다는 정상운항 상태에서 선박에 요구되는 설계강도를 제시하고 있다. 하지만 선체가 받는 빙하중을 추정하는 것은 상당히 어려운 작업으로 무엇보다도 선체와 해빙 사이의 상호작용에 대한 이해가 필수적이며 아직까지도 빙하중 산정에 대한 명확한 해결 방법은 제시할 수 없는 현실이다. 빙하중을 이해하기 가장 좋은 방법은 빙해역에서의 실선시험을 통해 직접 계측하는 일이지만 경제적인 측면과 함께 선체 광범위한 부분에 작용하는 빙하중의 크기와 분포를 파악하는데 많은 기술적인 문제가 남아있다. 현재 북극해 및 주변 해역의 선진 국가들은 실선실험이나 모형실험을 통해 쇄빙선박의 설계에 관한 기초자료를 확보하고

있지만 현재 공개된 자료는 극히 일부분으로서 국내외 학계의 쇄빙선박에 관한 연구들은 이들 제한된 실험자료에만 의존하는 현실이다. 이러한 현실 속에 국내에서도 극지 연구가 활발하게 진행되면서 2009년에는 국내 최초의 쇄빙연구선 ARAON호를 국내 기술력으로 설계 건조하였다.

ARAON호의 '아라'는 순수한 우리말로 바다를 뜻하고 '온'은 전부라는 뜻으로 '전 세계의 모든 바다를 누비라'라는 의미를 담고 있으며, 총 7,487톤 규모로 길이 111m, 폭 19m, 최대속도 16knot, 1m 두께의 해빙을 3knot 속도로 연속쇄빙 할 수 있도록 설계되었다. 최대 승선인원은 85명이며 약 2만해리(약 70일)의 거리를 연속항해 할 수 있고 헬기 격납고 및 착륙장을 갖추고 있어 쇄빙연구선이 접근할 수 없는 지역에도 연구 및 물자지원이 가능하고 CTD 등 해양연구 장비 및 음파탐지 장비, 지구물리 탐지장비 등 다양한 연구장비를 갖추고 있다. 쇄빙연구선 ARAON호는 2009년 건조 이후 2010년 1월 남극항해 시 러시아의 AARI 연구팀이 승선하여 현장계측시험을 수행하였고 2010년 8월과 2011년 8월 북극항해 시에는 국내 연구진이 직접 현장계측시험을 수행하였다.

본 논문은 2010년 7월 15일에서 8월 14일까지 약 한 달간 ARAON호에 승선하여 북극해의 Chukchi Sea/Beaufort Sea 빙해역에서 세 차례 현장계측시험을 수행하였는데, 이 실측에서 얻어진 해빙의 재료특성 시험결과를 정리, 분석한 것이다(이춘주 외, 2010). 그리고 얻어진 데이터를 토대로 2010년 1월 남극해 시험결과(Likhomanov, 2010)와 2010년 4월 노르웨이 스발바르에서의 시험결과, 2011년 8월 북극해 시험결과와 비교, 분석하였다.



Fig. 1-3 Aerial Photo of ARAON during Antarctic Field Test(Jan. 2010)
(Courtesy of KOPRI)



Fig. 1-4 Aerial Photo of ARAON during Arctic Field Test(Aug. 2010)
(Courtesy of KOPRI)

2. IBRV ARAON호 북극해 현장계측시험

2.1 현장계측시험 일자 및 장소

2010년 ARAON호 여름철 북극해 현장계측시험이 이루어진 곳은 미국 알래스카와 러시아 동시베리아 사이의 Chukchi Sea와 Beaufort Sea 근해로 7월 15일부터 8월 14일까지 약 한 달 동안의 ARAON호 이동경로와 세 차례 실선시험이 수행된 장소를 Fig. 2-1에 개략적으로 표시하였다(김대환 외, 2010). 세 차례 실선시험에 앞서 7월 20일 $73^{\circ}02'N$ $168^{\circ}26'W$ 부근 해역에서 현장계측시험이 수행되었으나 장비 테스트 및 계측 시스템을 점검하기 위한 목적으로 실시되어 이때 얻어진 데이터는 일관성이 없는 자료로 본 논문에서는 다루지 않았다.

빙해역 현장계측시험은 ARAON호의 쇄빙능력테스트를 겸하여 실시하였다. 선박의 주행시험을 위해서는 선박 길이의 2.5~3배, 폭 1.5~2배 크기의 해빙이 필요한데 2010년 여름철 북극해는 평균 대기온도가 0.67°C 를 보이며 해빙의 용융점보다 높아 해빙은 상당히 용융이 진행되어 있어 주행시험을 할 수 있는 크기의 해빙을 찾는 데 많은 어려움이 있었다.



Fig. 2-1 Field Tests Route

Table 2-1 Field Test Date and Location

No.	Test Date	Location
1	2010.08.03	77°01N,159°56W
2	2010.08.04	77°02N,159°49W
3	2010.08.05	77°59N,159°38W

현장계측시험은 Table 2-1과 같이 총 세 차례 진행하였다. 해빙 위에서의 현장 조사는 우선 ARAON호 쇄빙능력테스트를 위한 주행구간을 직선으로 표시한 후 10m 또는 20m 간격으로 구멍을 뚫고 해빙의 두께를 측정하고 주행구간의 양 끝과 중간에서 해빙을 두께 방향으로 시추하여 해빙의 코어를 추출하고 온도, 밀도, 염분 측정을 위한 시편과 1축 압축시험을 위한 시편으로 가공하는 순서로 진행하였다.

2.2 현장계측시험 항목

북극해 현장계측시험 과정에서 해빙의 재료강도특성에 관한 시험 항목은 해빙의 강도특성에 영향을 주는 주된 물리적(Physical) 혹은 기계적(Mechanical) 인자들인 해빙의 두께와 해빙의 깊이에 따른 온도와 염도 및 밀도, 그리고 해빙의 결정구조이다. 그리고 해빙의 강도와 관련된 항목은 압축강도와 굽힘강도이다. 선박의 경우 선수부 경사에 의해 해빙을 파괴한다는 의미에서 해빙의 굽힘강도가 문제가 되지만 수로 사이에 측면부 선각이 끼인 상태에서 압축을 받게 되면 이 때는 해빙의 압축강도가 중요해진다. 본 현장계측시험에서는 해빙의 압축강도는 직접 계측하였지만 굽힘강도는 직접 계측하지 않고 해빙의 온도와 밀도 그리고 염도에 따라 결정되는 경험식(Timco and O'Brien, 1994)을 이용하여 간접적으로 추정하였다.

2.2.1 밀집도(Sea Ice Concentration)

빙해역 빙상정보에서 제일 먼저 파악할 사항은 해빙의 밀집도이다. 여기서 해빙의 밀집도란 특정한 빙해역에 덮여있는 해빙 면적의 평균 정도를 10단계 또는 백분율로 나타낸 것으로 Chukchi Sea나 Beaufort Sea 등 빙해역의 대단히 넓은 규모에 대해서 말할 수도 있지만 대체로 수 km 혹은 수십 km 정도의 면적에 대하여 정의하는 경우가 많다.

Fig. 2-2는 2010년 7월 26일 북극해 전체 해빙의 밀집도를 보여주는 위성사진이고 Fig. 2-3은 2010년 7월 20일 Chukchi Sea 해빙의 밀집도를 보여준다. 이렇듯 선박이 빙해역을 항행하기 위해서는 해빙의 밀집도에 대한 정확한 실시간 정보가 필수적이며 이를 위하여 지구상의 빙해역 대부분에 대한 빙상지도(Ice Chart)가 시간(hour) 또는 일(day) 단위로 제공되고 있다. 이들 빙상지도는 RADARSAT 등 인공위성 정보와 기타 관측수단을 통해 얻어진 정보를 전문가의 분석을 거쳐 제공하는 것으로서 비교적 넓은 범위의 빙해역에 대한 밀집도 정보를 알 수 있다. 하지만 인공위성을 통한 밀집도 정보는 격자 간격의 크기가 비교적 커서 선박이 운항하는 주변 수 km 이내의 국지적인 밀집도에 대한 정보는 선상관측자의 육안 판단에 따를 수밖에 없다. 특히 인공위성을 통한 밀집도 정보에서는 해빙의 두께에 대한 정보가 없어서 항해 시 육안 판단에 의존할 수밖에 없다. 그리고 다년생 해빙 표면이 녹아서 물웅덩이(puddle)로 바뀌어 있는 경우 외관상 분리된 해빙처럼 보이나 실제로 해빙 아래 부분은 완전히 연결되어 밀집도가 10/10에 가까울 수 있다.

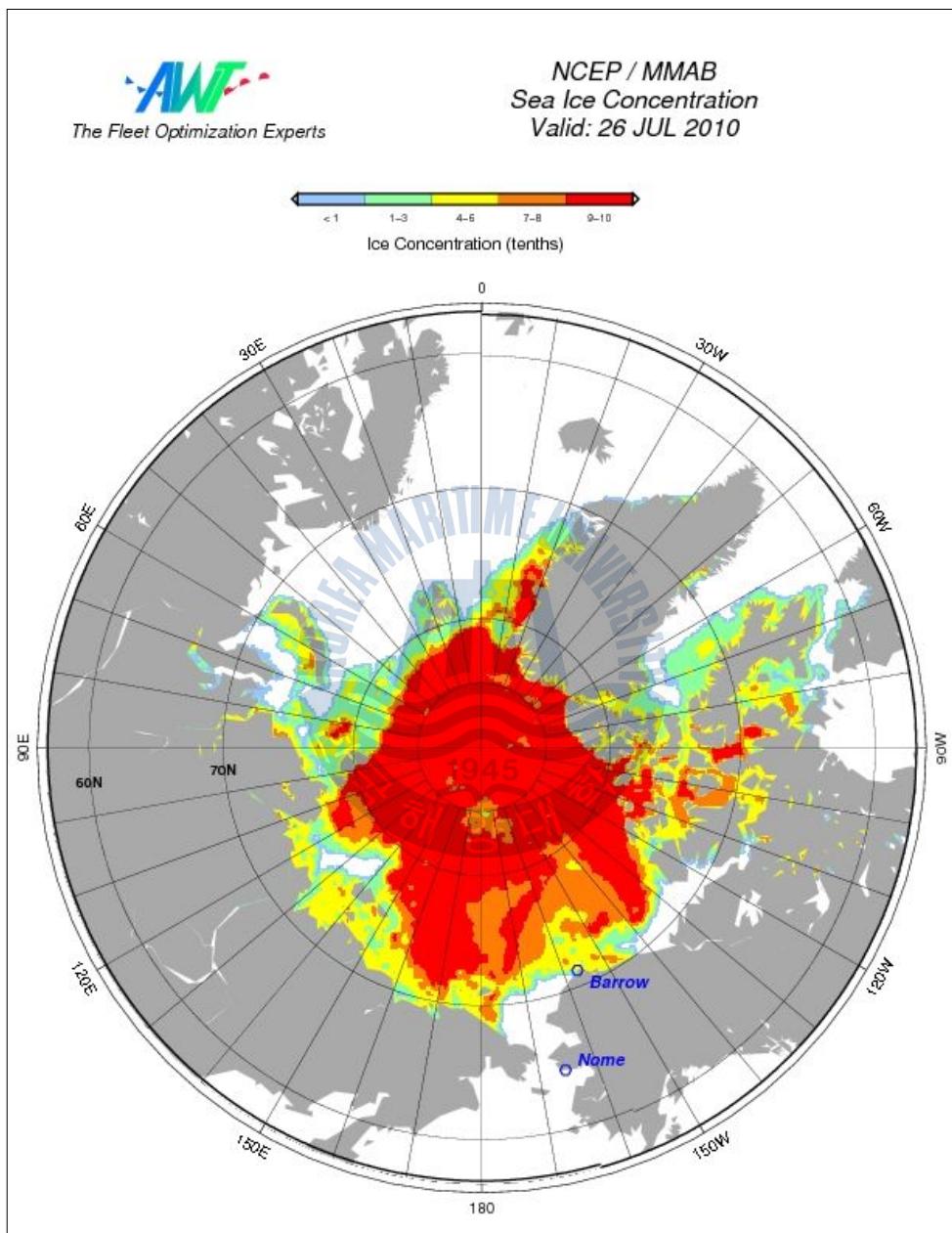


Fig. 2-2 Arctic Sea Ice Concentration(2010.07.26)

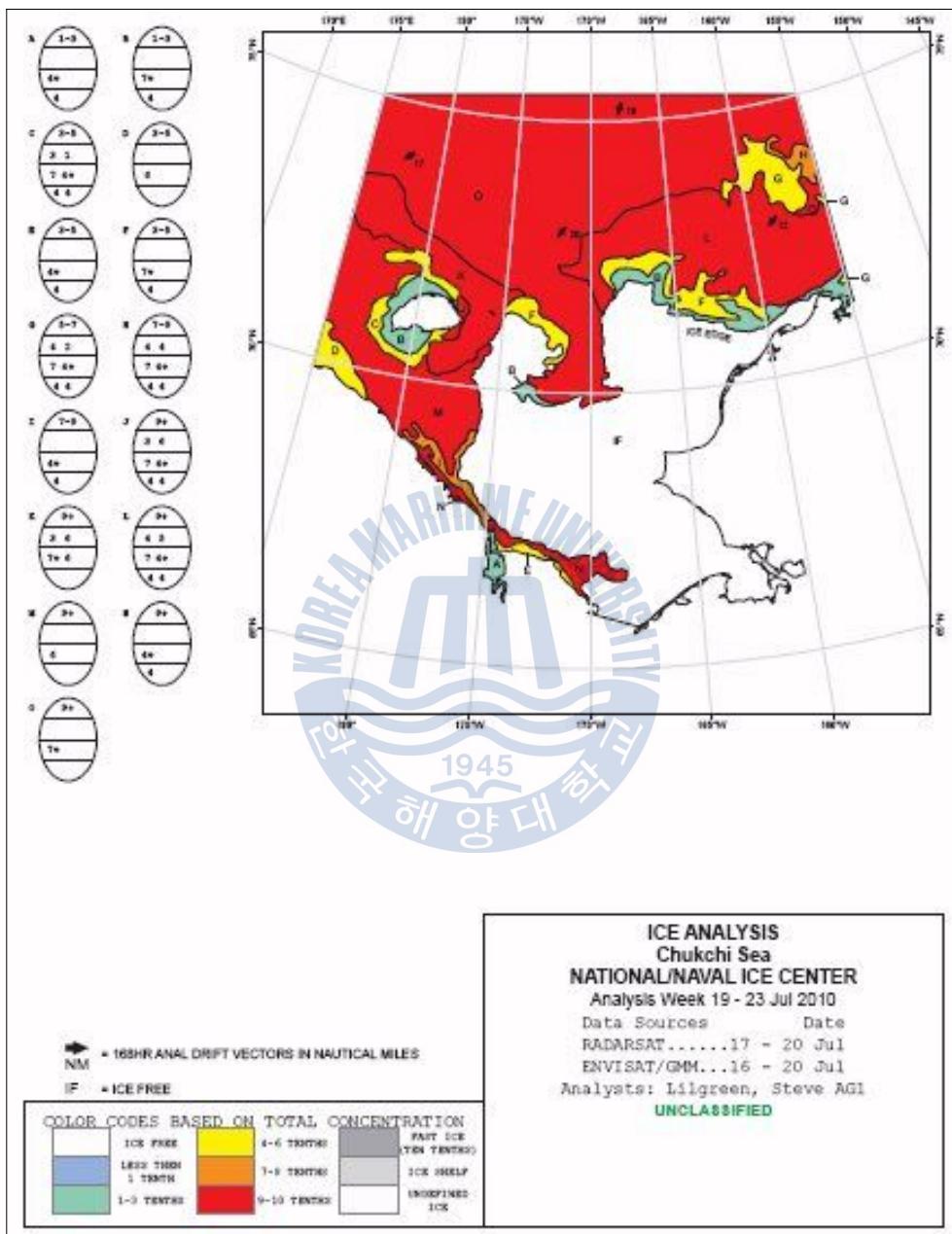


Fig. 2-3 Chukchi Sea Ice Concentration(2010.07.20)

세계기상기구(WMO)에서 규정하는 해빙의 밀집도는 다음과 같다.

Table 2-2 Sea Ice Concentration of Ice Features

Sea Ice Features	Concentration
Open Water	< 1/10
Very Open Pack Ice	1/10 ~ 3/10
Open Pack Ice	4/10 ~ 6/10
Close Pack Ice	7/10 ~ 8/10
Very Close Pack Ice	9/10
Compact Pack Ice and Consolidated Ice	10/10

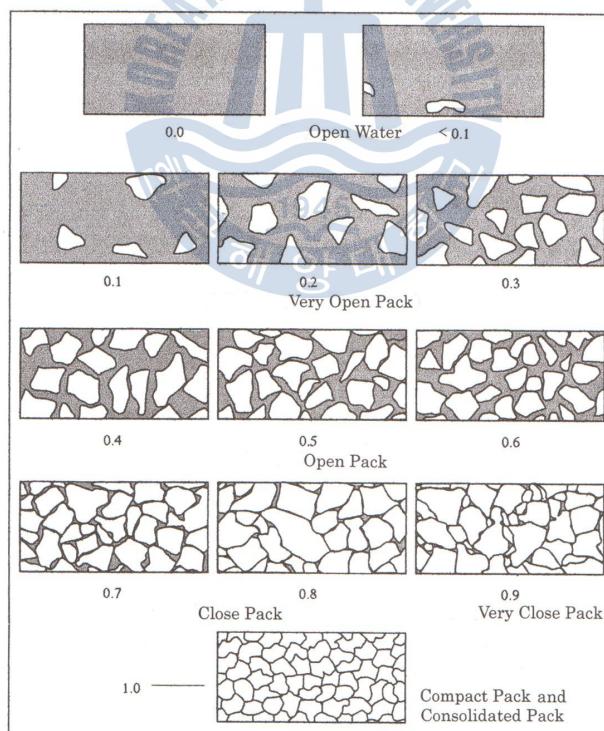


Fig. 2-4 Sea Ice Concentration within 0-1/10 and 10/10

- Open Water
 - 항해가 가능한 넓은 해역으로 해빙이 존재하지만 1/10이하의 밀집도를 보인다.
- Very Open Pack Ice
 - 해빙의 밀집도는 1/10~3/10로 해빙보다 개수면이 훨씬 넓다.
- Open Pack Ice
 - 해빙의 밀집도는 4/10~6/10로 많은 개수로나 물웅덩이(pubble)가 존재하는 부유빙이 존재하며 이때 해빙은 보통 불어 있지 않다.
- Close Pack Ice
 - 해빙의 밀집도는 7/10~8/10을 보이며 해빙은 대체로 불어 있다.
- Very Close Pack Ice
 - 해빙의 밀집도 9/10인 해빙 분포를 보인다.
- Compact Pack Ice and Consolidated Ice
 - 해빙의 밀집도 10/10인 해빙 분포를 말하며 해수면이 거의 보이지 않는다.

이러한 내용을 바탕으로 2010년 8월 여름철 ARAON호 북극해 항해 시 촬영한 사진을 이용하여 북극해 해빙의 밀집도를 나타내어 보았다.



Fig. 2-5 Sea Ice Concentration 2/10



Fig. 2-6 Sea Ice Concentration 7/10



Fig. 2-7 Sea Ice Concentration 9/10

2.2.2 두께(Sea Ice Thickness)

해빙의 두께는 빙하중과 빙저항의 추정에 있어서 가장 핵심이 되는 빙상정보이다. 해빙은 해수의 밀도, 결빙온도와의 관계에 따라 담수빙보다 성장이 느리며 대기온도 외에도 태양으로부터의 방사열, 바람, 해빙 위의 눈 및 해빙 아래의 해수 유동이나 열 공급 등이 해빙의 성장에 크게 영향을 미친다. 특히 북극해는 지구 자전축(약 23°)으로 인해 공전궤도 위에서의 추분점에서 춘분점 사이기간, 즉 북극해 겨울철은 반년 동안 밤이 길고 낮이 짧게 되는데 이때 기온이 계속 낮아져서 해빙의 결빙이 촉진되는 동시에 융해가 억제된다. 반대로 춘분점과 추분점 사이의 기간에는 밤보다 낮이 길어지는 백야현상이 발생하는데 비록 태양광선의 입사각이 작지만 대기온도 및 수온이 증가하여 해빙의 융해가 진행된다.

해빙의 두께를 측정하는 방법은 선박이 항해 중에는 Fig. 2-8처럼 선수부 측면에 설치한 막대형 측정기구(1칸, 20cm)를 통해 해빙이 쇄빙되어질 때 육안으로 두께를 측정하는 방법이 있다. 이러한 방법으로 항해하는 동안 항해구간의 해빙 두께를 측정할 수 있다. 현장계측시험에서는 시추장비(Auger, Fig. 2-9)를 이용해 구멍을 뚫고 해빙의 아래면에 걸리도록 고안된 경첩형식의 줄자(Fig. 2-10)를 넣어 직접 해빙의 두께를 측정하거나 서로 다른 매질의 전도도(Conductivity) 값을 통해 해빙 두께를 계측할 수 있는 휴대용 EM 전자기유도장비(Electromagnetic induction, Fig. 2-11)를 사용하여 미국 육군 한랭지연구소(Cold Regions Research & Engineering Laboratory, CRREL)에서 제안한 해빙 두께 추정식 (2-1)을 이용해 해빙의 두께를 계측한다(Jones et al., 2001).

$$Z = 8.11 - \ln(\sigma - 54.7) / 0.872 \quad (2-1)$$

여기서, Z 는 눈 두께와 해빙의 두께, 해빙의 표면에서 전자기유도 장비까지 거리의 합을 나타내고 σ 는 계측된 전도도(Apparent conductivity) 값을 나타낸다.



Fig. 2-8 Ice Thickness Measuring Apparatus



Fig. 2-9 Auger



Fig. 2-10 Tape Measure



Fig. 2-11 Electromagnetic Induction

2.2.3 염도(Sea Ice Salinity)

해수는 담수와 달리 여러 가지 염분이 녹아 있어 해빙은 기본적으로 염분을 포함하고 있다. 해수가 결빙온도에 도달하면 해수 속의 담수 부분이 얼기 시작하는데 표면부터 기둥형으로 결빙한다. 이때 기둥형 결정 사이의 공간에 놓축된 염수(Brine)가 남게 되는데 Na이나 Cl 등 원소가 이온 상태로 녹아 있다 (Fig. 2-12). 해빙의 온도가 내려가면 염수 속에서 염분이 석출되고 시간이 경과 할수록 해빙의 아래쪽으로 이동하여 해수로 방출된다. -54°C 에 달하면 액체인 염수는 거의 없어지고 담수와 고체인 염분만 남는다. 이렇듯 염수는 온도에 따라 변화하게 되는데 염수는 해빙 결정 사이의 빈 공간을 의미하기 때문에 염수의 함유율이 작을수록 강도가 커짐을 짐작할 수 있다. 즉 염수의 체적에 따라 해빙의 강도특성이 달라진다. 이것은 다년생빙이 1년생빙보다 강도가 높아지는 원인 중 하나이다.

염수의 체적은 해빙의 염도와 온도에 따른 Frankenstein and Garner(1967) 경험식으로 계산할 수 있다.

$$\nu_b = 0.001S_i \left(\frac{49.185}{|T_i|} + 0.532 \right) \quad (2-2)$$

여기서 ν_b : 염수 체적 (무차원)

S_i : 해빙의 염도 (%)

T_i : 해빙의 온도 ($^{\circ}\text{C}$)

한편 해빙의 온도, 염도, 밀도에 따른 Timco and O'Brien(1994) 경험식을 사용하기도 한다.

$$\nu_b = \rho S_i / F_1(T_i) \quad (2-3)$$

여기서 ρ : 해빙의 밀도 (g/cm^3)

S_i : 해빙의 염도 (%)

$$F_1(T_i) = -4.732 - 22.45 T_i - 0.6397 T_i^2 - 0.01074 T_i^3 \quad (-0.6^{\circ}\text{C} \geq T_i \geq -22.9^{\circ}\text{C})$$

Frankenstein and Garner(1967)의 경험식 (2-2)을 이용해 염도 1% 해빙의 온도에 따른 염수의 체적을 그래프로 나타내어 보았다(Fig. 2-14). 해수의 결빙온도는 -1.6°C 에서 -2°C 사이인데 Fig. 2-14에서 보면 알 수 있듯이 이 부근에서 염수의 부피 변화가 가장 심하다. 이렇듯 온도에 따른 염수 체적의 변화 및 해빙의 염도는 해빙의 성질에 큰 변화를 주기 때문에 중요하다.

해빙의 염도는 현장계측시험이 끝난 후 해빙의 깊이에 따라 분류하여 플라스틱 용기에 넣어 녹인 후 염도계(Fig. 2-13)를 이용하여 염도를 측정한다.

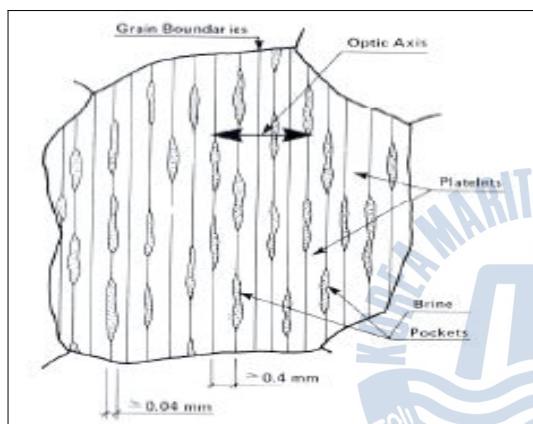


Fig. 2-12 Crystal Structure of Sea Ice
-Horizontal direction(Lainey and Tinawi, 1984)



Fig. 2-13 Salinometer

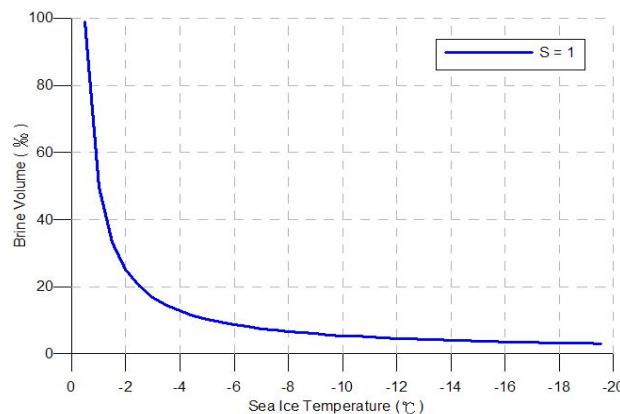


Fig. 2-14 Brine Volume of Sea Ice($S=1\%$)

2.2.4 온도와 밀도(Sea Ice Temperature and Density)

해빙의 온도는 강도에 결정적인 영향을 주는 인자로 해빙의 깊이에 따른 온도변화는 거의 선형적이다. 해빙은 열전도율이 높아 대기와 맞닿아 있는 해빙의 상층부는 대기온도에 따라 온도가 변하게 되고 또한 해수와 맞닿아 있는 하층부 역시 해수의 온도에 따라 민감하게 변한다. 그리고 해빙은 평상시에 절대 온도가 용융점에 거의 근접하는 범위에서 존재하기 때문에 용융점 가까이에 있는 고온의 금속재료에서 흔히 볼 수 있는 크리프 현상을 관찰할 수 있다.

해빙의 밀도는 해빙 속에 함유된 염수(Brine)와 기포 때문에 기포가 없는 순수 담수빙의 밀도(0.917g/cm^3)와는 다른 값을 갖는다. 실제로는 염수와 기포의 밀도에 대한 영향은 서로 상쇄되어, 전형적인 해빙의 밀도는 순수한 얼음에 가까운 $0.915\sim0.920\text{g/cm}^3$ 정도이다. 그리고 해빙의 깊이 0.2m 부위의 밀도는 표면에 쌓인 눈이나 표층수 때문에 $0.89\sim0.90\text{g/cm}^3$ 정도로 낮은 수치를 보인다.

현장계측시험에서 해빙의 온도를 측정하기 위해서는 우선 해빙 시편을 시추한 다음 해빙 깊이에 따라 인정한 간격으로 핸드 드릴(Fig. 2-15)을 이용하여 구멍을 낸 후 프로브(Probe)형 휴대용 온도계(Fig. 2-16)를 사용하여 온도를 계측한다. 해빙의 온도 변화가 크지 않기 때문에 정밀한 온도계를 사용할 필요가 있다. 해빙의 밀도는 해빙 시편의 온도를 측정한 후 일정간격으로 절단하여 휴대용 저울(Fig. 2-17)을 이용하여 중량을 계측하고 시편의 단면적과 길이를 버니어캘리퍼스를 이용하여 부피를 측정하여 밀도를 계산한다. 이때 계측 정밀도는 0.1g 단위 이상으로 유지하는 것이 필요하다.



Fig. 2-15 Hand Drill



Fig. 2-16 Digital Probe Thermometer

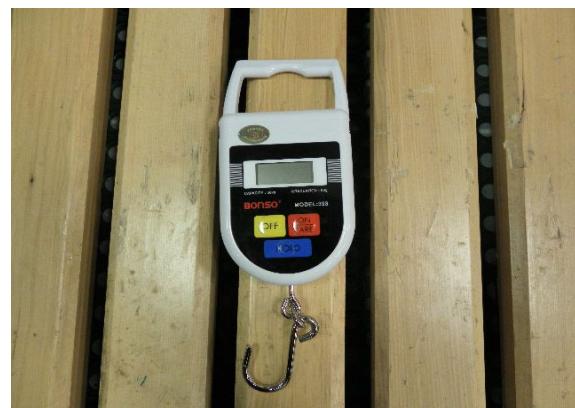


Fig. 2-17 Hand Scale

2.2.5 결정구조(Crystal Structure of Sea Ice)

해수 표면이 냉각되면 밀도차로 인해 해수의 연직대류가 일어난다. 해수가 결빙온도(약 -1.9°C)에 이르면 표면부터 얼기 시작한다. 이때 빙정(Frazil Ice)라고 불리는 가는 바늘 모양의 해빙이 생성된 후 이러한 빙정들이 모여 기름띠 모양의 층을 만드는데 이것을 Grease Ice라 한다. 이 Grease Ice가 파도에 의해 움직이면서 서로 부딪혀 가장자리가 두툼하고 원반 모양을 보이는 Pancake Ice를 형성하는데 이러한 Pancake Ice로 인해 파도와의 마찰이 생겨 파도가 점점 진정되고 유빙끼리 서로 얼어붙어 해빙의 두께와 강도가 커진다.

해빙의 수직방향의 단면은 표면에서는 결정이 일정하지 않는 구조를 보이고 해수와 맞닿는 해빙의 하층부까지 기둥형 결정을 보인다(Fig. 2-18). 동시에 서로 이웃한 해빙 결정 사이에 농축된 해수인 염수(Brine)와 기포가 가늘고 긴 대롱 모양으로 가두어진다. 이것이 담수빙과는 다른 해빙의 독특한 특징이다.

해빙의 수평방향의 단면은 순수한 얼음과 결정사이에 갇혀있는 염수 또는 기포층이 반복되는 구조를 보인다(Fig. 2-18). 순수한 얼음 부분은 여러 층으로 나란히 놓여 있고, 그 사이에 염수나 기포가 채워져 있다. 이렇게 나란히 놓여져 있는 부분을 해빙의 결정입자라 한다. 인접한 결정입자는 서로 다른 방향으로 놓여 있다. 따라서 해빙은 여러 방향으로 놓인 결정입자들의 집합체라 할 수 있다. 염수의 간격은 북극해 해빙에서 $0.2\sim0.8\text{mm}$, 평균 0.45mm 를 보이는데 해빙이 두꺼워지면 이 간격도 커진다(Weeks and Lee, 1958).

해빙의 결정구조를 관측하기 위해서는 편광기를 이용한다(Fig. 2-19). 두 장의 편광필름을 90° 방향으로 겹쳐서 빛의 편광을 이용해 해빙의 결정구조 및 입자 크기(grain size)를 볼 수 있도록 고안한 실험기구로 해빙을 5mm 이내로 얇게 가공한 후 스크린에 올려 사진촬영을 한다. 해빙의 입자크기 역시 강도에 영향을 주는 인자로 입자의 크기는 보통 $1\sim10\text{cm}$ 로서 육안이나 혹은 확대경을 이용하여 확인할 수 있다.

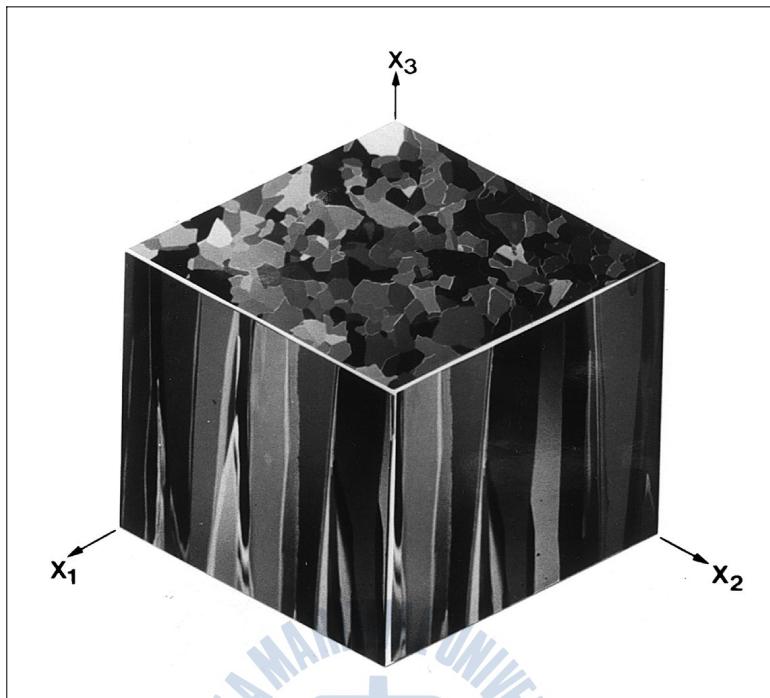


Fig. 2-18 Crystal Structure of Sea Ice(Schluson, 2001)

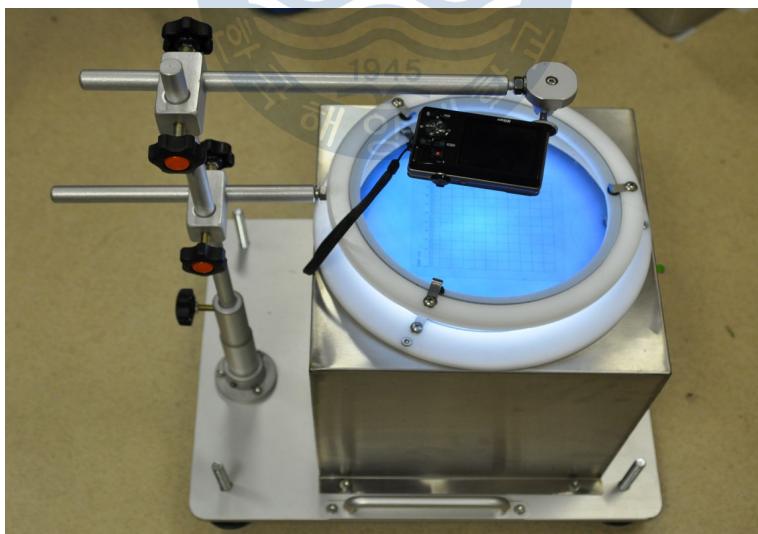


Fig. 2-19 Cross-polarized Light Photographic Apparatus

2.2.6 압축강도 및 파괴변형도(Sea Ice Compressive Strength & Failure Strain)

앞서 설명했듯이 빙해역에서 활동하는 해양구조물이나 쇄빙선박의 설계 빙하 중에서 제일 중요시 되는 것은 해빙의 압축강도와 굽힘강도이다.

선박의 경우 측면부 선각이 수로 사이에 놓이면 해빙의 압축을 받게 된다. 이때 해빙의 압축강도가 중요한데 여기서 압축강도의 의미는 더 이상 하중을 증가시킬 수 없는 순간에 도달한 때의 하중, 즉 해빙의 연성파괴가 아닌 취성파괴로 인한 압축응력을 말한다. 빙해역에서의 해빙에 대한 설계 압축강도는 보통 1~6MPa 정도를 사용하고 있다.

일반적으로 해빙의 압축응력은 하중속도 즉 변형률속도($\dot{\varepsilon}$ =하중속도/시편길이)에 따라 달라지는데 $\dot{\varepsilon} = 10^{-3}/\text{sec}$ 을 기점으로 연성파괴에서 취성파괴로 바뀌는 연성-취성 천이(ductile-to-brittle transition) 현상이 관찰된다(Fig. 2-20). 즉 해빙은 온도가 낮고 하중 속도가 빠를수록 취성적 성질이 뚜렷하게 나타나며 온도가 용융점에 가깝고 하중 속도가 느릴수록 크리프 변형을 나타내며 연성거동을 보인다.

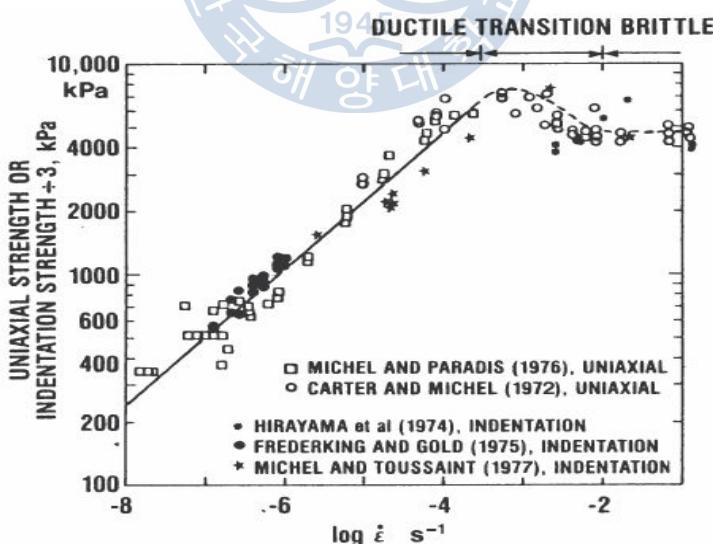


Fig. 2-20 Strain Rate vs. Sea Ice Compressive Strength(Michel and Toussaint, 1977)

만일 염수 체적(ν_b)와 변형률속도($\dot{\varepsilon}$)를 아는 경우 다음 경험식을 사용하여 해빙의 압축강도를 간접적으로 계산할 수 있다(Timco and Frederking, 1986).

$$\sigma_c = 37\dot{\varepsilon}^{0.22} \left[1 - \sqrt{\frac{\nu_b}{0.27}} \right] \text{ (MPa)} \quad - \text{ Horizontal Strength} \quad (2-4)$$

$$\sigma_c = 160\dot{\varepsilon}^{0.22} \left[1 - \sqrt{\frac{\nu_b}{0.20}} \right] \text{ (MPa)} \quad - \text{ Vertical Strength} \quad (2-5)$$

해빙의 압축강도 시험은 일반 재료의 강도시험과 마찬가지로 압축시험기(Fig. 2-21)를 이용하는데 실험현장까지 운반이 가능한 유압식 혹은 전동식 소형 압축시험기가 적당하다. 압축강도는 원기둥의 해빙 시편을 축방향으로 하중을 가하여 파괴되는 순간의 하중을 계측하는데 해빙의 특성상 수직방향으로는 기둥형 결정구조로 되어있는 반면 수평방향으로는 등방성 결정구조로 인해 일반적으로 수평방향의 압축강도가 수직방향의 압축강도보다 3~4배 크다. 따라서 해빙의 압축강도 측정 시 해빙 결정구조에 따른 시편 방향을 고려해야 한다.

해빙의 압축강도는 압축시험기를 통해 얻어진 압축하중과 해빙 시편의 단면적을 통해 얻어진다.



Fig. 2-21 Uniaxial Compression Tester

$$\sigma_c = \frac{P}{A} \quad (2-6)$$

여기서 σ_c : 해빙의 압축강도 (MPa)

P : 최대 압축하중 (N)

A : 해빙 시편 단면적 (m^2)

또한 압축강도 시험 시 최대하중이 가해지는 순간의 최대변위를 통해 파괴변형도(Failure Strain)를 구할 수 있는데 여기서 파괴변형도란 해빙 시편이 최대 압축하중을 받아 파괴되는 순간의 변형도를 의미하며 파괴변형도 계산식은 다음과 같다.

$$\varepsilon = \frac{l' - l}{l} \quad (2-7)$$

여기서 ε : 해빙의 파괴변형도 (무차원)

l : 해빙 시편 길이 (mm)

l' : 변위 (mm)

Mellor and Cole(1982)에 따르면 담수빙의 파괴변형도는 대략 1%, 즉 0.01임을 보였다. 해빙은 담수빙과 달리 결정입자 크기가 크고 불균질하여 담수빙보다 쉽게 파괴되는 경향이 있어서 0.01보다 작은 변형도 값에서 발생한다.

2.2.7 굽힘강도(Sea Ice Flexural Strength)

빙해역에서 쇄빙선박은 선수부의 각도와 자중을 통해 해빙을 깨어가며 운항하게 되는데 이때 해빙은 굽힘에 의해서 파괴된다. 이렇듯 해빙의 굽힘강도는 쇄빙선박 설계에 있어서 중요한데 일반적으로 쇄빙선박 설계 시 사용되는 굽힘강도는 500~600kPa이다.

빙해역 현장에서 사용되는 대표적인 해빙의 굽힘강도 시험법으로는 외팔보 측정법이 있다. 이 방법은 Fig. 2-22과 같이 해빙의 세 변을 전기톱을 이용하여 자르고 나머지 부분을 지지단으로 보는 외팔보 형태로 이때 해빙의 끝에 집중하중 P를 가하여 굽힘에 의해 파괴가 일어나도록 고안한 방법이다. 지지된 변 AB가 충분히 유지되고 또 외팔보가 굽힘으로 인한 파괴 전까지 탄성 상태를 유지한다고 가정하면 해빙의 굽힘강도는 다음과 같이 계산된다.

$$\sigma_f = \frac{6Pl}{bh^2} \quad (2-8)$$

여기서 σ_f : 해빙의 굽힘강도 (MPa)

l : 외팔보 길이

b : 외팔보 폭

h : 외팔보 두께

이 방법은 시험편이 자연환경 그대로의 상태에서 시험이 진행됨으로 해빙의 온도변화가 없이 실험이 가능하다는 장점이 있다. 하지만 빙해역 현장에서는 빙판의 두께에 비례하여 외팔보를 가공해야 한다는 점과 집중하중을 줄 수 있는 유압잭 장치(Fig. 2-23)를 준비해야 하는데 중량이 커서 이동하기 쉽지 않다는 점 등으로 인해 실제 외팔보 시험을 하기가 쉽지 않다. 이런 점들을 고려하여 해빙의 굽힘강도 계측을 위한 좀 더 실용적이고 경량화된 시험기법이 고안되어야 한다.

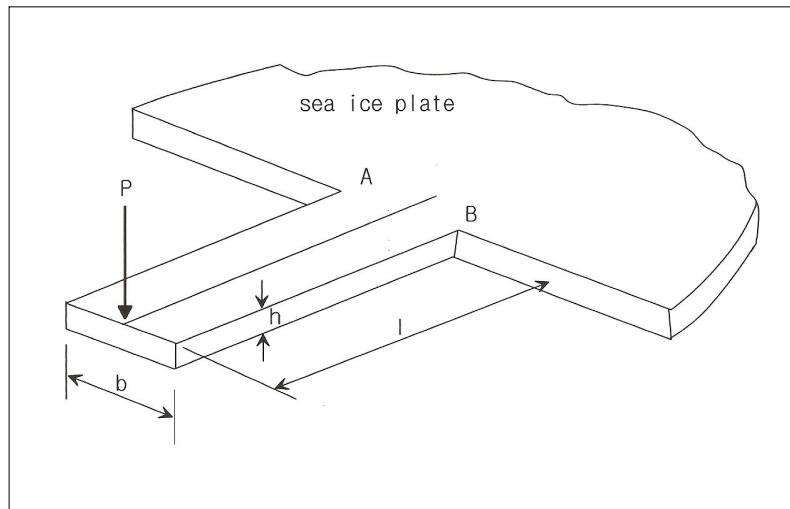


Fig. 2-22 Cantilever Flexural Strength Test Diagram of Sea Ice



Fig. 2-23 Cantilever Flexural Strength Test of Sea Ice

이번 북극해 현장계측시험에서는 해빙의 온도, 밀도, 염도에 따른 경험식 (Timco and O'Brien, 1994)을 이용하여 해빙의 굽힘강도를 간접적으로 추정하였다. 여기서 해빙의 온도에 따라 식 (2-11) 값이 결정되는데 해빙의 온도가 최고 -0.6°C보다 높을 경우 사용할 수 없다. 실제로 계측된 해빙 시편 중 온도가 해빙의 용융점에 가까워 계산하지 못하는 경우도 있었다.

$$\sigma_f = 1.76 e^{-5.88 \sqrt{\nu_b}} \quad (2-9)$$

$$\nu_b = \rho S_i / F_1(T_i) \quad (2-10)$$

$$F_1(T_i) = -4.732 - 22.45 T_i - 0.6397 T_i^2 - 0.01074 T_i^3 \quad (2-11)$$

$$(-0.6^\circ\text{C} \geq T_i \geq -22.9^\circ\text{C})$$

여기서 σ_f : 해빙의 굽힘강도 (MPa)

ν_b : 염수 체적 (무차원)

ρ : 해빙의 밀도 (g/cm^3)

S_i : 해빙의 염도 (%)

T_i : 해빙의 온도 ($^\circ\text{C}$)

2.3 현장계측시험 절차

2.3.1 시험장소 선정 및 해빙 두께 측정

북극해 빙해역 현장계측시험은 ARAON호 쇄빙능력 주행시험과 더불어 진행되어야 해서 선박이 주행할 때 해빙이 현장에서 벗어나지 않을 정도의 크기를 찾는게 중요하다. 앞서 설명하였지만 선박의 주행시험을 위해서는 선박 길이의 2.5~3배, 폭 1.5~2배 크기의 해빙이 필요하다. 하지만 2010년 여름철 북극해의 평균대기온도가 해빙의 용융점보다 높은 수치를 보여 주행시험을 위한 평坦한 크기의 해빙을 찾는데 많은 어려움이 있었다. 현장계측시험을 위한 장소를 찾기 위해서 Fig. 2-2, 2-3의 해빙 밀집도 위성사진을 참고하여 헬리콥터나 조타실(Wheel house)에서 관측을 통해 주행시험에 알맞은 크기의 해빙을 찾았다.

현장계측시험 장소가 선정이 되면 시험을 위한 장비와 물자를 크레인이나 헬리콥터를 이용하여 운반한 후 주행시험을 위한 주행구간을 멀리에서도 인식이 가능하도록 스프레이를 뿌려 표시한다(Fig. 2-24). 그리고 해빙의 두께 측정과 시추를 위해 10~20m 간격을 표시한다.



Fig. 2-24 Test Course Marking

다음으로 해빙의 두께를 측정하기 위해 먼저 눈 두께를 측정한 다음 Fig. 2-9의 Auger를 전기드릴에 연결하여 해빙의 각 지점에서 지름 약 5cm(2in) 크기의 구멍을 낸 후 Fig. 2-10의 줄자를 이용하여 각 지점의 시추공에 넣어 해빙의 두께를 측정한다(Fig. 2-25, 2-26). 그 다음 휴대용 EM 자기유도장비(Fig. 2-11)를 이용하여 각 지점에서의 측정된 전도도 값과 장비 측정높이와 계측한 눈높이를 이용하여 앞서 제시한 해빙 두께 추정식 (2-1)을 통해 해빙의 두께를 계측하여 실측한 데이터와 비교한다(Fig. 2-27).



Fig. 2-25 Auger Electrical-mechanical Drill



Fig. 2-26 Ice Thickness Measurement with Tape Measure

해빙의 두께 정보는 그 자체로서 해당 빙해역의 중요한 데이터가 될 뿐만 아니라 쇄빙선박의 쇄빙능력 주행시험과 해빙의 현장계측시험이 이루어지는 해빙에 대한 기본 정보를 얻는다는 점에서 의미가 있다.



Fig. 2-27 Ice Thickness Measurement using an Electromagnetic Induction Sensor(EM31)

2.3.2 해빙 시추

본격적인 해빙의 재료특성시험을 위해 해빙의 코어(Core)를 시추한다. 해빙의 코어를 시추하기위해 미국 Kovacs Enterprise사의 해빙 시추장비(Corer, Fig. 2-28)를 사용하는데 이 장비는 원기둥 모양의 해빙 코어를 추출할 수 있도록 직경 3인치(약 7.5cm), 길이 1m의 원통형 드릴비트로 구성되어 있고 드릴비트 안쪽 밑 부분에 접이식 해치가 있어 절삭된 해빙이 밑으로 빠지지 않도록 되어 있다. 연결봉을 이용하면 최대 3m 깊이의 해빙까지 시추할 수 있다. 그리고 시추 시 시간을 단축하기 위해 회전력이 큰 휘발유 엔진을 사용한다(Fig. 2-29).



Fig. 2-28 3-inch Diameter Kovacs Corer



Fig. 2-29 Coring with 3-inch Diameter Kovacs Corer

주행구간의 처음, 중간, 끝 지점에서 해빙 깊이에 따른 온도, 밀도 측정용 해빙 코어와 압축강도 시험용 해빙 코어를 각각 시추한 다음 시추장비와 엔진 드라이브 사이를 분리시켜 해빙 코어를 10cm 간격으로 표기된 반원통형 운반대 (Fig. 2-30)에 부러지지 않도록 추출한다. 그리고 해빙의 깊이에 따른 코어 상태와 길이 등을 확인 후 시험지에 표기한다.



Fig. 2-30 Collected Sea Ice Core Samples

2.3.3 해빙 온도, 밀도 측정 및 압축강도 시편 가공

먼저 각 시추 장소에서 깊이에 따른 해빙 상태를 알아보기 위해 온도, 밀도 측정용 코어를 1~3개 정도를 추출한 다음 10cm 간격마다 핸드 드릴(Fig. 2-15)을 이용하여 구멍을 낸 후 프로브(Probe)형 휴대용 온도계(Fig. 2-16)를 사용하여 해빙의 내부온도를 계측한다(Fig. 2-31). 해빙의 높은 열전도율로 인해 대기와 접하게 되면 내부온도가 변하게 되므로 해빙 코어가 준비되면 단시간에 온도를 계측하여야 한다. 특히 핸드 드릴로 구멍을 낸 후 온도센서를 바로 삽입해야만 온도에 대한 오차를 줄일 수 있다.



Fig. 2-31 Sea Ice Temperature Measurement using Probe Type Thermometer



Fig. 2-32 Sea Ice Weight Measurement

해빙의 온도 계측이 끝나면 밀도를 계산하기 위해 해빙 코어를 10cm 간격으로 잘라 버니어캘리퍼스를 이용하여 해빙 코어 직경을 계측하여 단면적과 길이를 통해 부피를 구하는데 해빙의 직경을 측정한 결과 평균 7.1cm를 보였다. 그리고 각각의 시편을 일회용 팩에 담아 휴대용 저울(Fig. 2-17)을 통해 시편의 중량을 계측하여 밀도를 계산한다(Fig. 2-32). 온도와 밀도 계측이 완료되면 계측하였던 해빙 코어를 차후 염도 측정을 위해 일회용 팩에 넣어 아이스박스에 담아 보관하여 작업을 마친 후에 선실 안으로 운반한다.

온도, 밀도 측정용 해빙 코어를 계측 후에는 압축강도 시험용 해빙 코어를 시추한다. 추출된 해빙 코어에서 상태가 양호한 부분을 선택한 후 2중 회전톱으로 구성되어있는 시편절단기(Fig. 2-33)를 이용하여 압축강도 시편을 가공한다. 이 시편절단기는 2개 원형 톱날을 회전시켜 톱날 사이 간격만큼의 해빙 코어를 가공하는 장치다.

해빙의 압축강도 시험에 있어 시편의 길이는 시편 직경의 약 2.6~3.2배를 사용하는데 본 논문에서는 2.7배인 19cm로 두고 시편을 가공하였다(Timco and Weeks, 2010). 보통 깊이별 3~4개 정도의 시편을 가공하는데 시편 가공에 앞서 해빙 코어 추출 후 예상되는 시편 위치의 바로 아래 부분 혹은 윗 부분의 온도를 측정하고 시편을 가공한다(Fig. 2-34). 그 다음 가공된 시편을 일회용 팩에 담아 앞서 동일한 방법으로 중량을 측정하고 아이스박스에 보관한다. 그리고 편광기(Fig. 2-19)를 통한 해빙의 결정구조를 확인하기 위해 시편절단기 양단에 잘려진 부분을 1cm 두께로 가공하여 이 역시 일회용 팩에 담아 아이스박스에 보관한다. 이렇게 가공된 시편들 역시 작업을 마친 후 압축강도 시험 및 결정구조 확인, 염도 측정을 위해 선박으로 운반한다. 이때 아이스박스 내의 시편이 녹지 않도록 유의해야 한다.



Fig. 2-33 Sea Ice Core Sample Cutting Machine



Fig. 2-34 19cm Sea Ice Core Sample Cut with the Cutting Machine

2.3.4 해빙 압축강도 측정 및 결정구조 편광 촬영

현장계측시험을 마친 후 아이스박스에 보관한 압축시험용 시편을 선박으로 운반하여 선박 외곽 통로에 설치한 압축강도시험기(Fig. 2-21)을 통해 앞서 설명했듯이 해빙의 취성파괴를 압축강도로 보고 해빙의 연성-취성 천이(ductile-to-brittle transition) 현상이 발생하는 변형률 속도인 $\dot{\varepsilon} = 10^{-3}/\text{sec}$ 보다 큰 하중 속도를 주어 해빙 시추공 위치와 깊이에 따른 해빙의 압축하중 및 파괴변위를 계측한 후 해빙 시편의 단면적과 압축하중을 통해 압축강도(식 2-6)를 계산하고 시편의 길이와 파괴변위를 통해 파괴변형도(식 2-7)를 계산한다(Fig. 2-35).

그 다음 앞서 압축시험용 시편을 가공할 때 함께 가공하였던 1cm 두께의 편광시험용 시편을 약 5mm의 두께로 녹인 후 편광기(Fig. 2-19)를 이용하여 깊이 별 해빙의 결정구조를 확인한다.(Fig. 2-36).



Fig. 2-35 Uniaxial Compression Test on the Deck of ARAON

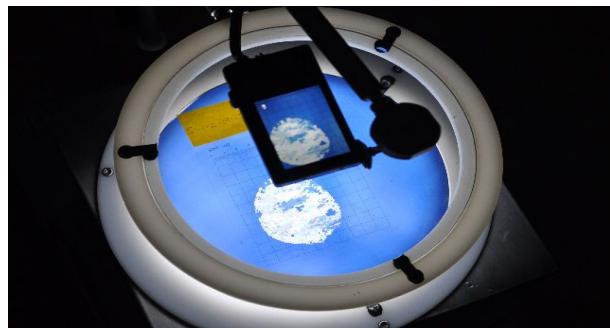


Fig. 2-36 Crystal Structure of Cored Sea Ice Sample

2.3.5 해빙 염도 및 굽힘강도 측정

현장계측시험을 마친 후 선박에 다시 승선하여 해빙의 압축강도 계측을 한 후 해빙의 염도를 측정하기 위해 앞서 해빙의 온도, 밀도를 계측하였던 시편과 압축강도 계측 후의 시편을 시추공 위치와 해빙 깊이에 따라 분리하여 플라스틱 용기에 넣어 녹인 후 염도계(Fig. 2-13)를 사용하여 염도를 측정한다(Fig. 2-37).

해빙 염도 측정이 완료되면 앞서 소개한 식 (2-9) 해빙의 굽힘강도 경험식을 통해 해빙의 깊이에 따라 측정한 온도, 밀도, 염도 데이터를 이용하여 해빙의 굽힘강도를 간접적으로 추정한다.



Fig. 2-37 Salinity Measurement of Sea Ice

3. 북극해 현장계측시험 결과

3.1 밀집도 및 두께

Table 3-1 Sea Ice Condition at the Field Test Sites

No.	Date (Lat., Long.)	Concentration (%)	Size of Sea Ice Floe (m ²)	Air Temp. (°C)	Ice Thickness (average, m)	
					Measure	EM31
1	2010.08.03 (77°01N, 159°56W)	70 ~ 80	200 × 80	-2	2.24	2.24
2	2010.08.04 (77°02N, 159°49W)	70 ~ 80	280 × 100	2	1.88	1.92
3	2010.08.05 (77°59N, 159°38W)	90 ~ 100	300 × 110	2	2.46	-

다음 Table 3-1에 2010년 여름철 북극해에서 세 차례 실시되었던 현장계측시험 장소에 대해 간략하게 정리하였다.

1차 시험(Fig. 3-1)은 현지 시간으로 2010년 8월 3일 13:00시경 77°01N, 159°56W 부근에서 실시하였다. 해빙의 밀집도는 70~80%, 대기온도는 -2°C를 보였고 해빙의 크기는 200m×80m 규모였다. 선박 주행거리를 160m로 정하고 주행거리를 표시한 후 처음 구간부터 10m 간격으로 160m까지 Auger장비와 줄자(Fig. 2-10), 그리고 휴대용 EM 자기유도장비(Electromagnetic induction, Fig. 2-11) 이용하여 해빙 두께를 측정하였다. 직접 줄자를 사용해 측정한 결과 평균 2.24m로 1.43~3.45m 분포를 보였다. 또한 EM장비로 측정된 해빙의 두께 역시 평균 2.24m로 같았고 1.82~3.00m 분포를 보이며 비교적 일치됨을 보였다(Fig. 3-4).

2차 시험(Fig. 3-2)은 2010년 8월 4일 15:00시경 1차 시험과 비슷한 위치에서 실시하였으며 해빙의 밀집도는 70~80%를 보였고 대기온도는 2°C로 대체로 포근하였다. 해빙의 크기는 280m×100m 규모였고 주행거리를 210m로 정하였다. 이 곳 또한 1차 시험과 마찬가지로 10m 간격으로 210m까지 줄자와 EM장비를 이용하여 해빙 두께를 측정하였다. 직접 계측한 결과 평균 1.88m로 0.70~2.40m의 분포를 보였고 EM장비는 평균 1.92m로 1.23~2.24m 분포를 보였다(Fig. 3-5).

마지막 3차 시험은(Fig. 3-3) 2010년 8월 5일 16:00시경 2차 시험 장소에서 위도 약 1° 올라간 위치에서 실시하였고 해빙의 밀집도는 거의 100%를 보였다. 대기온도는 전날 시험장소의 대기온도와 같은 2°C를 보였다. 해빙의 크기는 300m×110m였고 주행거리를 200m로 정하고 시험을 실시하였으며 처음 구간부터 20m 간격으로 줄자와 EM장비를 사용하여 해빙 두께를 측정하였다. 직접 계측한 결과 1, 2차 시험장소보다 비교적 두꺼운 평균 2.46m로 1.35~3.48m 분포를 보였다(Fig. 3-6). 하지만 이곳의 해빙은 단일층이 아닌 다중층을 보이는데 해빙 사이에 수층이 존재하여 서로 다른 매질의 전도도를 이용하는 EM장비의 특성상 큰 오차가 발생하여 3차 시험에서 측정된 데이터는 일관성이 없다고 판단하여 제외하였다.



Fig. 3-1 Field Test Site #1



Fig. 3-2 Field Test Site #2



Fig. 3-3 Field Test Site #3

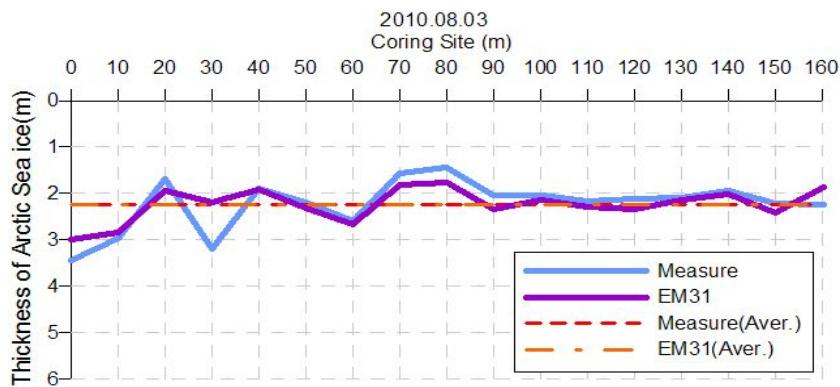


Fig. 3-4 Sea Ice Thickness at the Field Test Site #1

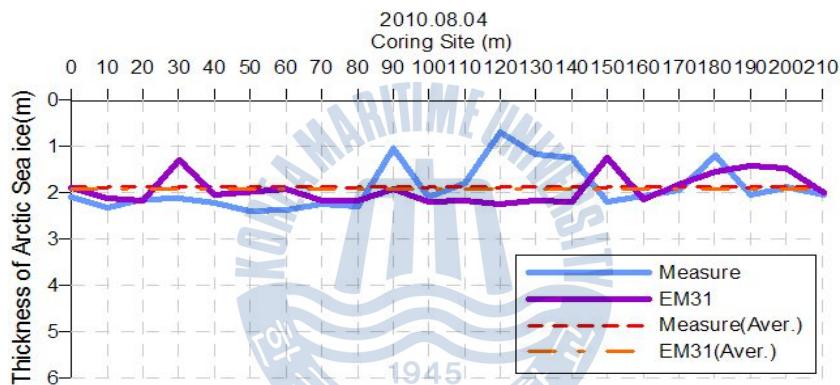


Fig. 3-5 Sea Ice Thickness at the Field Test Site #2

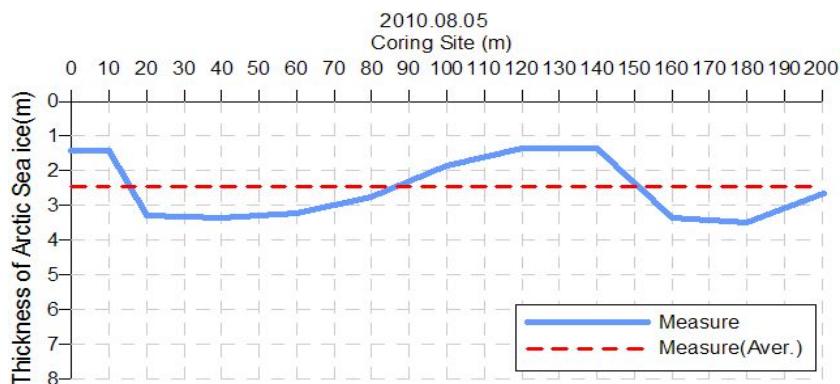


Fig. 3-6 Sea Ice Thickness at the Field Test Site #3

3.2 온도, 밀도, 염도

Table 3-2 Sea Ice Properties at the Field Test Sites

NO.	Coring Site(m)	Temp.(°C)	Salinity(‰)	Density(g/cm³)	ν_b
1	0	-0.74	1.81	0.87	0.14
	80	-0.70	1.63	0.90	0.14
	160	-0.88	2.50	0.95	0.16
	Average	-0.77	1.98	0.91	0.15
2	0	-0.76	1.98	0.95	0.16
	100	-0.79	2.01	0.89	0.14
	150	-1.07	3.53	0.95	0.18
	Average	-0.87	2.51	0.93	0.16
3	0	-0.59	1.05	0.91	0.12
	100	-1.06	2.60	0.89	0.13
	200	-1.34	2.53	0.92	0.10
	Average	-1.00	2.06	0.90	0.11

시험 일자별 해빙 시추 장소에 따른 온도, 밀도, 염도 그리고 Timco and O'Brien(1994)의 식 (2-10)을 통해 계산된 염수 체적을 Table 3-2에 정리하였다.

1차 시험 장소에서는 처음, 중간, 끝점(0m, 80m, 160m) 부근에서 압축시험용 시편 포함하여 총 8개의 해빙 코어를 채취하였다. 해빙의 외형과 시편을 조사한 것으로 판단할 때 이 해빙의 하부에 여러 겹의 얼음이 겹쳐진 형태로 분포되어 있었고 1년생빙은 아닌 것으로 판단되었다.

2차 시험은 처음, 중간(0m, 100m, 150m) 부근에서 총 9개의 해빙의 코어를 채취하였고 해빙 하부의 시편을 조사한 결과 이 곳 역시 여러 겹의 얼음이 겹쳐진 형태의 2년생빙 이상임을 확인하였다.

3차 시험은 처음, 중간, 끝점(0m, 100m, 200m) 부근에서 총 5개의 코어를 채취하였다. 이곳은 1차, 2차 시험장소와 마찬가지로 2년생빙 이상으로 추정되었는데 해빙의 두께는 최대 3.5m까지 보였다.

해빙의 깊이에 따른 온도는 1차 시험의 경우 0~1.3°C 분포를 보였고 위치가 비슷한 2차 시험의 경우 0~1.4°C로 비슷한 분포를 보였다. 반면 1,2차 장소보다 위도 1° 위쪽에서 실시한 3차 시험은 0~1.7°C 분포를 보였다. 세 차례 시험 모두 대기온도가 전반적으로 0°C를 보이며 대기와 맞닿는 상층부는 대기온도와 비슷한 수치를 보이고 반면에 대기온도보다 낮은 온도의 해수와 맞닿는 하층부는 상층부 보다 낮은 온도 수치를 보이며 해빙 깊이에 따라 대체로 낮아짐을 보였다(Fig. 3-7, 3-8, 3-9).

해빙의 염도는 1차 시험 0.1~3.5‰, 2차 시험 0.1~4.7‰, 3차 시험 0.1~5‰의 분포를 보였으며 세 차례 시험 모두 깊이에 따라 대체로 증가 추세를 보였다. 해수가 결빙되어 생성된 해빙은 염분을 함유하고 있는데 이때 염분의 함유량은 기본적으로 결빙속도에 좌우된다. 보통 1년생 해빙의 경우 표층수가 임계동결 온도에 이르면 급속한 동결과정을 통해 결빙되어 표층에서의 염분은 비교적 높은 8~12‰이고 해빙의 깊이가 증가할수록 결빙속도가 느려져 결빙과정에서 해수로부터 염분이 쉽게 석출되기 때문에 5~8‰ 정도를 보인다. 하지만 이번 북극해에서 계측된 데이터는 해빙의 깊이에 따라 염분이 증가함을 확인할 수 있는데 이러한 이유는 세 차례 시험이 실시된 해빙은 다년생빙으로 1년생빙 일 때의 표면이 모두 녹아 염분 함유량이 적은 아랫부분이 드러난 후 겨울철 표면 온도가 급격히 떨어짐으로써 결빙속도가 빨라져 해빙 깊이가 증가할수록 염분 함유량이 증가되었다고 추정하였다.

해빙의 깊이별 밀도 변화를 보면 1차와 2차 시험에서는 $0.75\text{--}0.99\text{g/cm}^3$, 3차 시험에서는 $0.79\text{--}0.96\text{g/cm}^3$ 분포를 보였고 3곳의 평균 밀도는 $0.90\text{--}0.93\text{g/cm}^3$ 를 보였다. 기포가 없는 순수 담수빙의 밀도의 경우 0.917g/cm^3 를 보이는데 해빙 역시 해빙 속에 함유된 염수액과 기포 때문에 서로 상쇄되어, 전형적인 해빙의 밀도는 순수한 얼음의 밀도와 비슷한 수치를 보였다. 특히 해빙 표면의 밀도가 쌓인 눈이나 비 등으로 인해 다른 부위보다 대체로 낮은 값을 보였다.

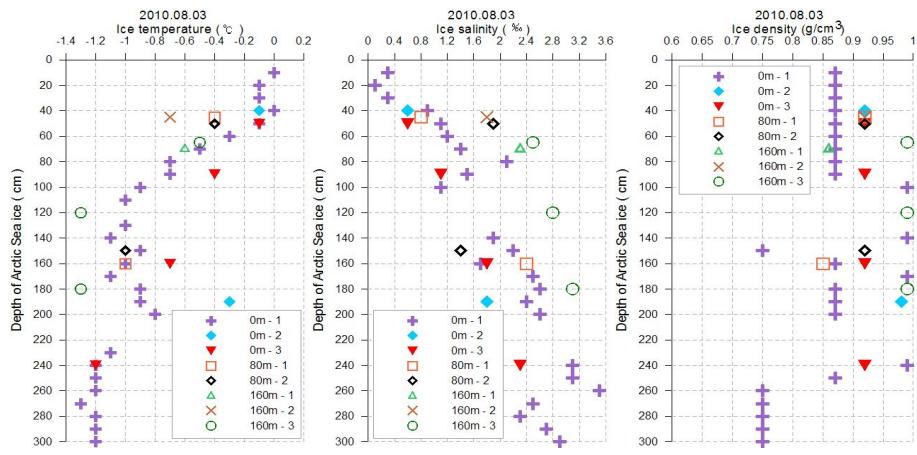


Fig. 3-7 Sea Ice Properties at the Field Test Site #1

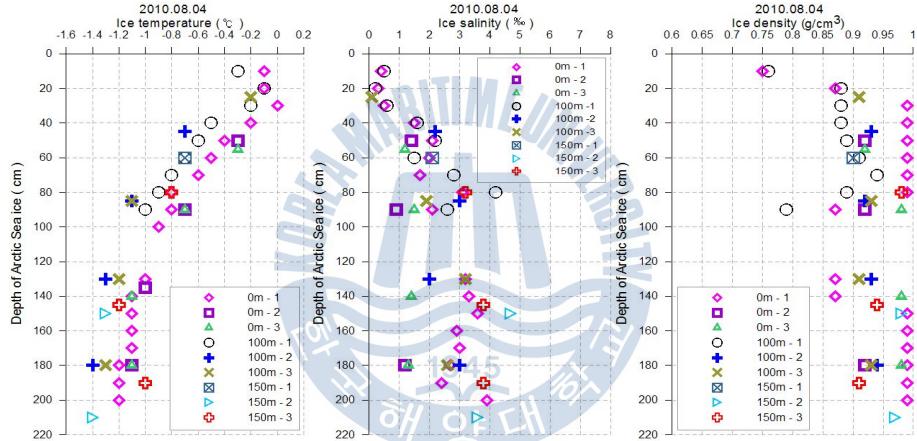


Fig. 3-8 Sea Ice Properties at the Field Test Site #2

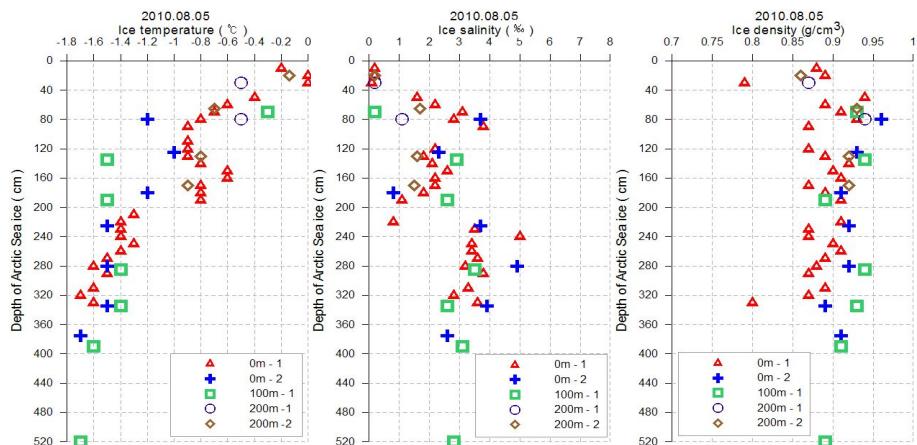


Fig. 3-9 Sea Ice Properties at the Field Test Site #3

3.3 압축강도 및 굽힘강도

Table 3-3 Sea Ice Strength at the Field Test Sites

NO.	Coring Site(m)	Compressive Strength(MPa)	Flexural Strength(MPa)
1	0	1.40	0.16
	80	1.55	0.19
	160	1.84	0.15
	Average	1.60	0.17
2	0	1.37	0.16
	100	1.67	0.18
	150	1.60	0.14
	Average	1.55	0.16
3	0	2.70	0.21
	100	2.43	0.29
	200	1.91	0.26
	Average	2.35	0.25

세 차례의 시험에서 얻어진 해빙의 압축강도 및 굽힘강도는 Table 3-3과 같다. 해빙의 압축강도는 앞서 제시한 압축시험기(Fig. 2-21)을 통해 얻었고 굽힘강도는 온도, 밀도, 염도에 따른 경험식(Timco and O'Brien, 1994)를 이용하여 해빙의 굽힘강도를 간접적으로 추정하였다.

1차 시험에서의 해빙의 압축강도는 0.83~2.51MPa로 평균 1.60MPa을 보였고 굽힘강도는 평균 170kPa로 최대 360kPa을 보였다.

2차 시험의 압축강도는 0.77~2.86MPa로 평균 1.55MPa을 보였고 굽힘강도는 평균 160kPa, 최대 340kPa을 보였다.

마지막 3차 시험에서의 압축강도는 1.12~3.71MPa로 평균 2.35MPa을 보였고 굽힘강도는 평균 250kPa, 최대 660kPa을 보였다.

세 차례 시험의 평균 강도 값을 볼 때 쇄빙선박 설계시 사용되는 압축강도 1~6MPa, 굽힘강도 500~600kPa 보다 작은 강도 값을 보였다. 그리고 해빙의 깊이에 따른 압축강도 및 굽힘강도(Fig. 3-12, 3-13, 3-14)는 깊이가 증가 할수록 대체로 증가됨을 확인할 수 있는데 여기서 보면 해빙의 밀도, 염도보다 온도가 해빙의 강도를 결정하는 주요인이라고 볼 수 있었다. 즉 해빙의 온도가 낮을수록 강도값이 커짐을 알 수 있었다. 또한 세 차례 시험 중 비교적 위치가 비슷했던 1, 2차 시험의 강도 값과 위도 1° 위쪽에서 실시한 3차 시험의 강도 값을 비교 했을 때 고위도로 갈수록 해빙의 강도가 커짐을 짐작할 수 있었다.

압축강도 계측결과를 비교 검증하기 위해 Fig. 3-10의 연구결과를 사용하였다 (Mellor, 1983). 서로 온도 및 결정입자의 정보가 달라 직접적인 비교는 곤란하지만 앞서 제시한 압축강도의 범위(0.77~3.71MPa)와 압축시험 변형률속도 범위 ($0.5\sim 1.0 \times 10^{-4}/s$)를 이용하여 Fig. 3-10에 음영구간으로 표시하였다. 한편 앞서 제시한 Timco and Frederking(1986)은 해빙의 압축강도를 추정하는 경험식을 제안하면서 검증을 위해 Exxon사의 1980~1981년도 북극해 해빙의 계측시험자료(large-scale test)를 제시하였는데 이에 따르면 변형률속도 $0.92 \times 10^{-5}/s \sim 7.5 \times 10^{-4}/s$ 범위에서 측정된 압축강도의 범위는 1.0~3.53MPa이었다. 척도효과(Scale effect)와 온도의 차이를 고려하면, 변형률속도가 비슷한 범위의 자료만 비교 시 본 논문의 압축강도는 Exxon사 데이터보다 약간 작은 값을 알 수 있었다.

다음으로 굽힘강도 계측결과를 타 연구자의 북극해 실측 시험결과인 Fig. 3-11에 실선으로 함께 표시하여 비교하였다(Mellor, 1983). 본 논문의 굽힘강도는 실측 데이터가 아니라 경험식을 사용했기 때문에 그림에서 실선은 식 (2-9)과 일치한다. 한편 비교자료와 동일한 실험조건이 아니기 때문에 직접 비교는 곤란하지만 해빙 속의 염분 함유량에 따라 감소하는 굽힘강도 추세는 잘 나타내고 있음을 알 수 있었다.

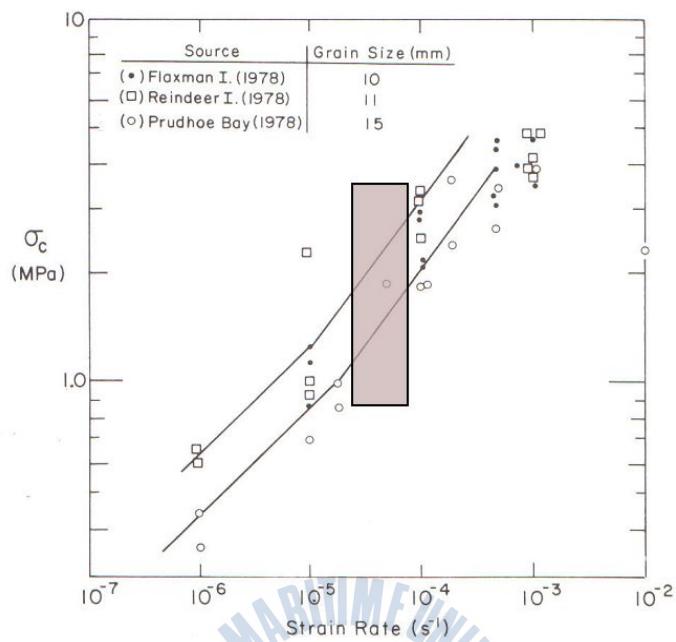


Fig. 3-10 Variation of Compressive Strength with Strain Rate(Mellor, 1983)

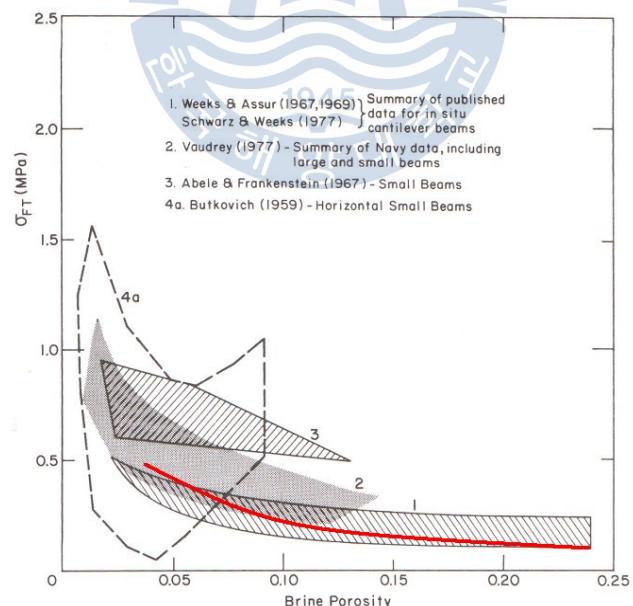


Fig. 3-11 Variation of Flexural Strength as a Function of Brine Porosity(Mellor, 1983)

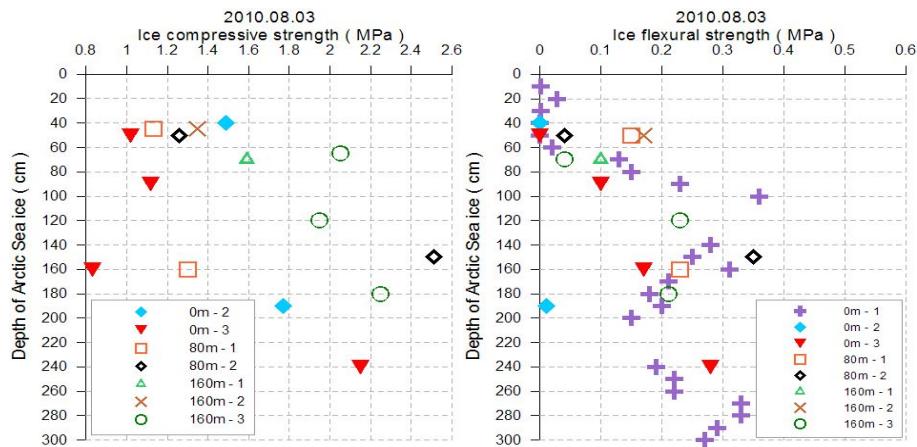


Fig. 3-12 Sea Ice Strength at the Field Test Site #1

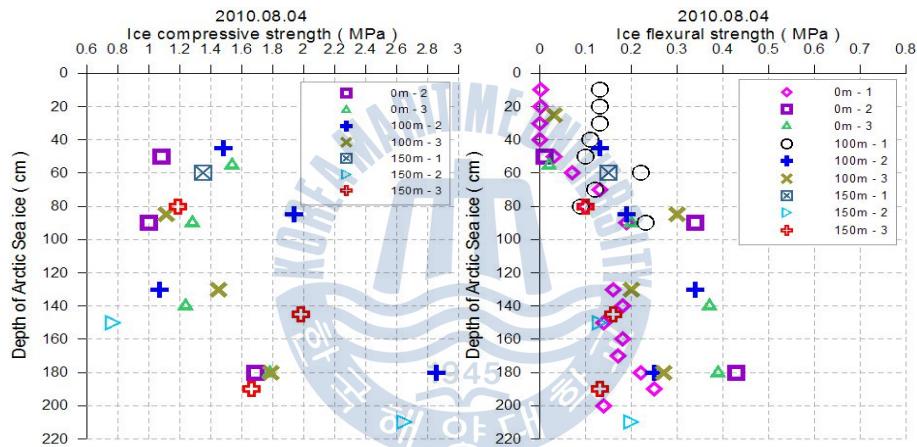


Fig. 3-13 Sea Ice Strength at the Field Test Site #2

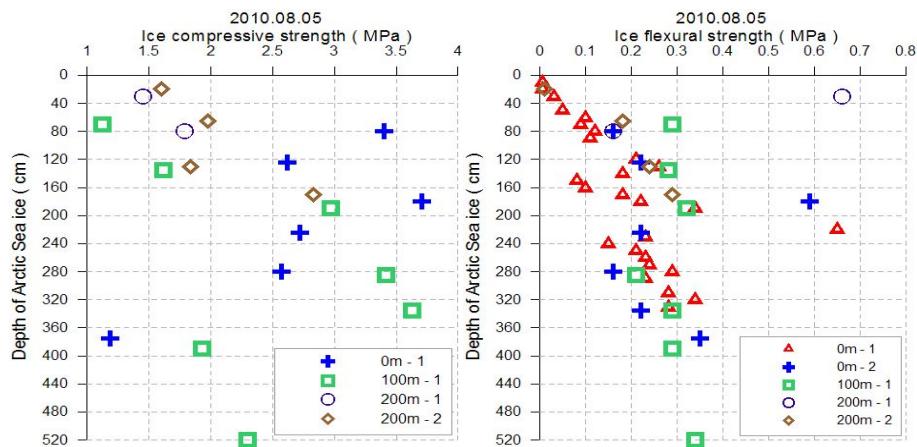


Fig. 3-14 Sea Ice Strength at the Field Test Site #3

다음으로 압축시험을 통한 해빙의 깊이에 따른 파괴변형도(Failure Strain)를 알아보았다. 앞서 설명했듯이 파괴변형도는 해빙의 압축시험 시 최대하중을 받아 파괴되는 순간의 변위를 통해 구할 수 있다. Fig. 3-15에는 해빙의 깊이(좌)와 압축강도(우)에 따른 파괴변형도를 나타내었다. 1차 시험 파괴변형도 평균값은 0.015, 2차 시험은 0.011을 보였으며 마지막 3차 시험은 0.017을 보였다. 세 차례 시험의 파괴변형도는 해빙의 깊이나 압축강도와 무관하게 0.005~0.015 부근에 밀집되어 있는 것을 확인 할 수 있었다. 앞서 설명하였듯이 실험실에서 측정된 담수빙의 파괴변형도는 대략 0.01 근방으로(Mellor and Cole, 1982) 해빙의 경우 결정입자의 크기가 담수빙보다 불균일하고 압축강도가 낮아 해빙의 파괴변형도는 담수빙에 비해 데이터의 분산이 크지만 거의 일정한 변형도에서 해빙의 압축파괴가 일어남을 알 수 있었다.

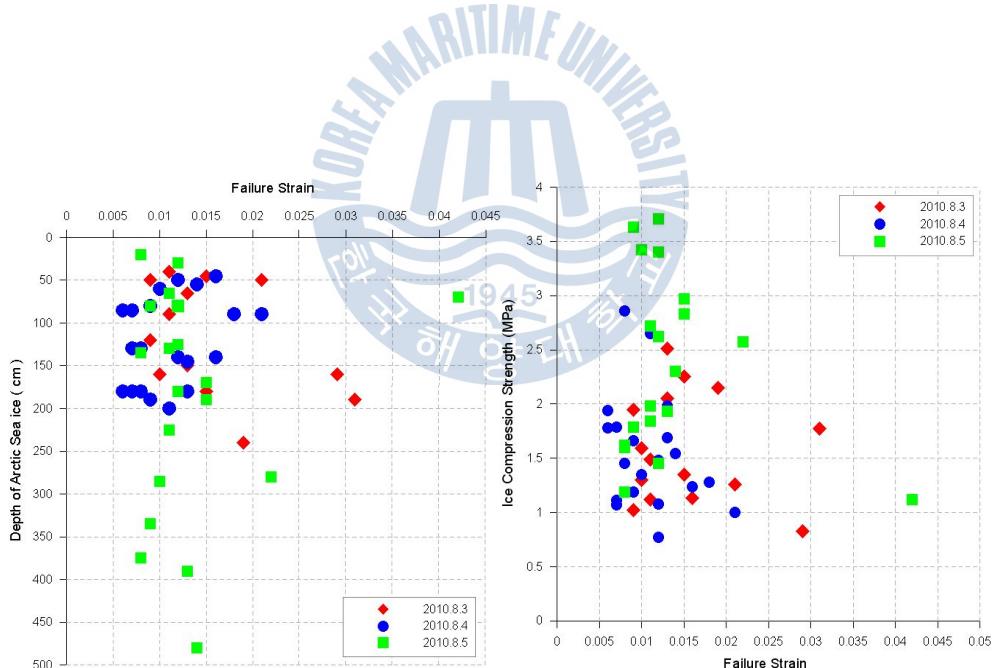


Fig. 3-15 Failure Strain

3.4 결정구조

해빙의 깊이별 결정구조를 확인하기 위해 시편 단면을 얇게 가공하여 편광기 (Fig. 2-19)를 통해 편광촬영을 하였다. Fig. 3-16는 3차 시험 장소의 첫 번째 시 추공(0m)에서 추출한 해빙의 깊이 1.2m(우), 3.7m(좌) 부근에서의 수직방향 단면을 편광 촬영한 사진이다. 해빙은 일반적으로 수직방향으로 보았을 때 표층에서는 입자형(Granular) 구조를 보이다가 기동형(Columnar) 구조를 보이는데 이때 해빙이 두꺼워지면 기동형 구조의 간격이 커지면서 수평방향 해빙의 결정이 커지게 된다. 하지만 이번 북극해 해빙의 경우 Fig. 3-16처럼 해빙 깊이와 관계없이 복합적인 결정구조를 보였는데 이러한 이유는 해빙의 성장과정에 따른 영향으로 앞서 해빙의 옆도 부분에서 설명했듯이 세 차례 실시한 시험장소의 해빙은 보통 2년생빙 이상으로 여름철 1년생빙 표면이 녹아 결정구조가 큰 아랫부분이 드러난 후 겨울철 표면온도가 급격히 떨어져 해빙의 아랫부분에서 다시 결빙하여 작은 크기의 결정구조가 관측된 것으로 보았다. 그리고 큰 결정구조를 보인 1.2m(우) 깊이 해빙의 경우 압축강도는 2.62MPa로 결정이 보다 작은 3.7m 깊이의 해빙의 압축강도 1.19MPa보다 큰 값을 보였는데 이는 기동형 구조의 특성상 결정크기가 클수록 수직방향의 압축강도 값은 커짐을 의미한다.

다음으로 1차 시험 장소 첫 번째 시추공의 0.4m(우), 1.5m(좌) 깊이의 해빙의 수평방향의 단면을 편광 촬영하였다(Fig. 3-17). 해빙의 전형적인 특징인 기동형 구조가 관측되었는데 이 역시 해빙의 깊이와 관계없이 1.5m 깊이의 해빙보다 0.4m 깊이의 해빙의 기동 간격이 큰 복합적인 결정구조를 확인하였다.

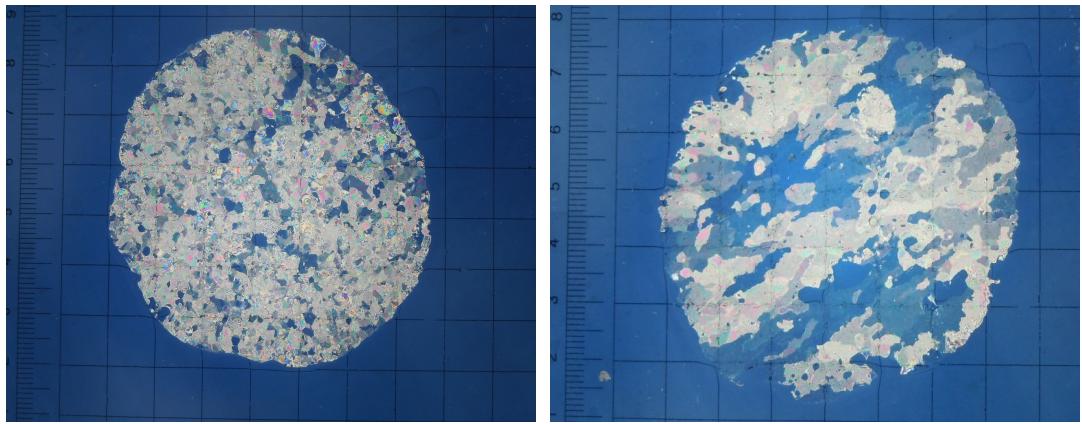


Fig. 3-16 Crystal Structure(Vertical direction, site #3(3.7m, 1.2m), grid size: 1cm)

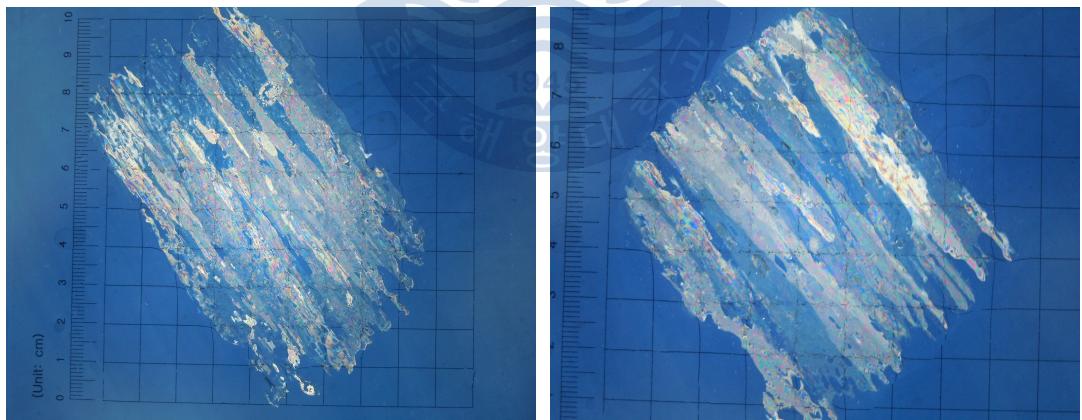


Fig. 3-17 Crystal Structure(Horizontal direction, site #1(1.5m, 0.4m), grid size: 1cm)

4. 현장계측시험 데이터 비교 분석

이번 2010년 8월에 있었던 ARAON호 북극해 현장계측시험 데이터를 토대로 2010년 2월 ARAON호 남극에서 계측한 데이터와 2010년 4월 16일 노르웨이 스발바르, 2011년 8월 북극해 현장계측시험에서 계측한 데이터를 비교 분석하였다.

Table 4-1은 2010년 2월 ARAON호 남극해 시운전 시 러시아 연구팀(Arctic and Antarctic Research Institute, AARI)이 계측한 데이터를 정리한 것이다 (Likhomanov, 2010). 총 여섯 차례의 현장계측시험이 실시되었고 그 중 세 차례 데이터를 정리하였다. 남극 해빙은 2010년 8월의 북극해빙과 다르게 평균 1m 두께를 보이는 전형적인 1년생빙을 보였고 해빙의 굽힘강도는 2010년 북극 해 현장계측시험에서 사용하였던 경험식(Timco and O'Brien, 1994)을 통해 간접적으로 추정하였다.

Table 4-1 Sea Ice Properties at the Antarctic Sea Ice Trial in January, 2010

NO.	Date (Lat., Long.)	Ice Thickness (m)	Coring Site (m)	Temp. (°C)	Salinity (‰)	Density (g/cm³)	Flexural Strength (MPa)
1	2010.01.26 (74°47'S, 137°22'W)	0.60~1.80 (0.96)	0	-1.64	3.67	0.78	0.29
			200	-1.62	1.83	0.79	0.49
			500	-1.90	5.83	0.88	0.19
			Average	-1.74	3.98	0.82	0.32
2	2010.01.27 (74°25'S, 137°59'W)	0.70~1.05 (0.91)	0	-1.99	5.37	0.79	0.24
			200	-1.93	3.85	0.87	0.29
			500	-2.10	3.28	0.77	0.40
			700	-1.75	5.20	0.84	0.20
			Average	-1.92	4.44	0.81	0.29
3	2010.01.29 (74°25'S, 137°59'W)	0.85~1.25 (1.01)	0	-1.74	3.50	0.81	0.31
			200	-1.77	4.67	0.82	0.24
			400	-1.67	4.10	0.82	0.26
			500	-1.69	3.37	0.76	0.33
			Average	-1.72	3.91	0.80	0.28

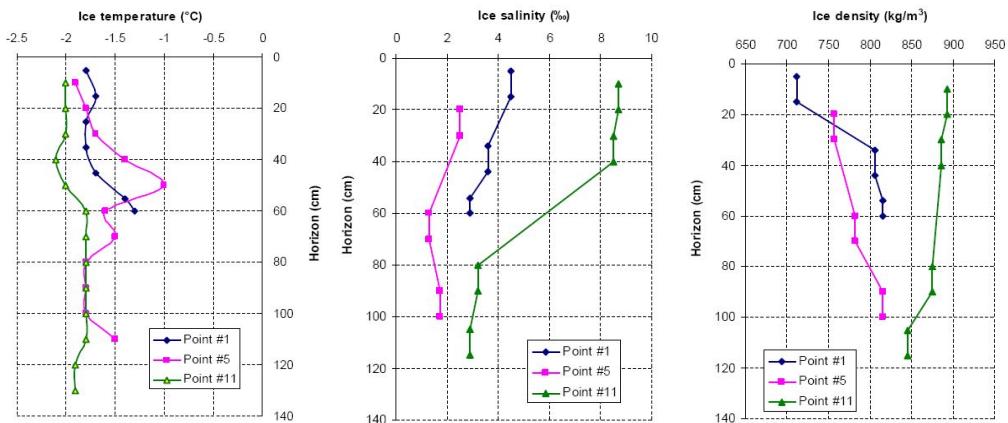


Fig. 4-1 Sea Ice Properties at the Antarctic Sea Field Test Site #1

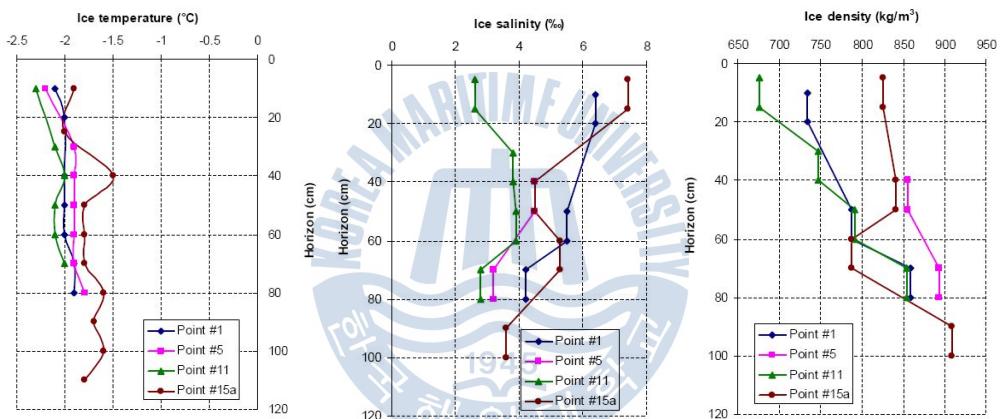


Fig. 4-2 Sea Ice Properties at the Antarctic Sea Field Test Site #2

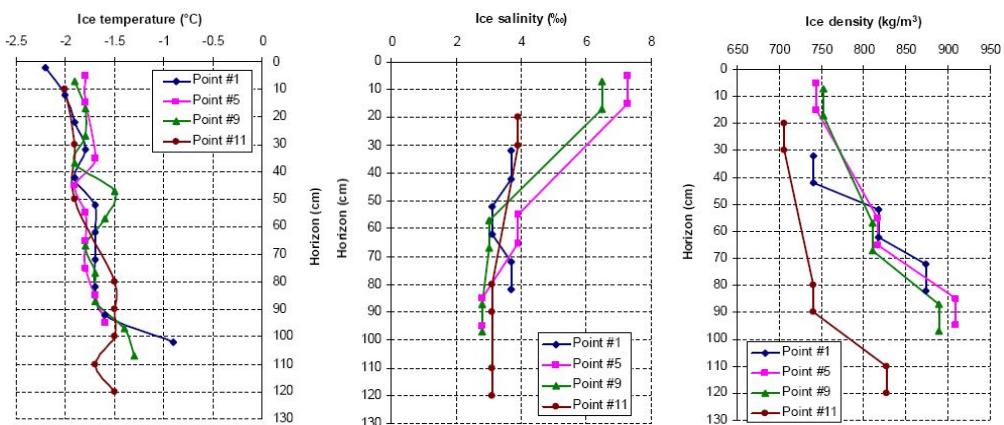


Fig. 4-3 Sea Ice Properties at the Antarctic Sea Field Test Site #3

Fig. 4-1, 4-2, 4-3에 2010년 2월 남극해 해빙의 깊이에 따른 온도, 염도, 밀도 분포를 정리하였다. 해빙 온도의 경우 2010년 8월 북극해 해빙의 온도 분포와 다르게 해빙의 상층부에서 하층부로 갈수록 온도가 대체로 증가하였는데 대기 온도가 해수온도보다 낮아 이러한 분포를 보인 것으로 추정하였다.

염도 분포를 보면 해빙 깊이에 따라 대체로 감소함을 보이는데 이를 통해 전형적인 1년생빙임을 확인할 수 있었다. 그리고 해빙 밀도의 경우도 결빙속도가 대체로 빠른 상층부에서 기포 및 염수로 인해 낮은 값을 보이며 전형적인 1년생빙의 밀도 분포를 보였다.

다음은 2011년 8월 ARAON호 북극해 항해 시 국내연구진을 통해 얻어진 현장계측시험 데이터를 정리하였다. 총 두 차례 시험을 실시하였으며 계측시험이 실시된 해빙의 상태를 Fig. 4-4와 Table 4-2에 보였다. 이 곳 역시 2010년 8월 북극해 현장계측시험이 실시되었던 북극해의 Chukchi Sea/Beaufort Sea 부근 빙해역으로 북위 약 78° 부근에서 해빙의 압축시험을 제외한 해빙의 재료특성을 조사하였다.



Fig. 4-4 Field Test Site at the Arctic Sea Field Test Site in August, 2011

Table 4-2 Sea Ice Condition at the Arctic Sea Ice Trial in August, 2011

No.	Date (Lat., Long.)	Size of Sea Ice Floe (m ²)	Ice Thickness(average, m)	
			Measure	EM31
1	2011.08.11 (78°00'N, 173°54'E)	100 × 45	2.17	2.28
2	2011.08.12 (77°59'N, 173°53'E)	110 × 55	1.45	1.74

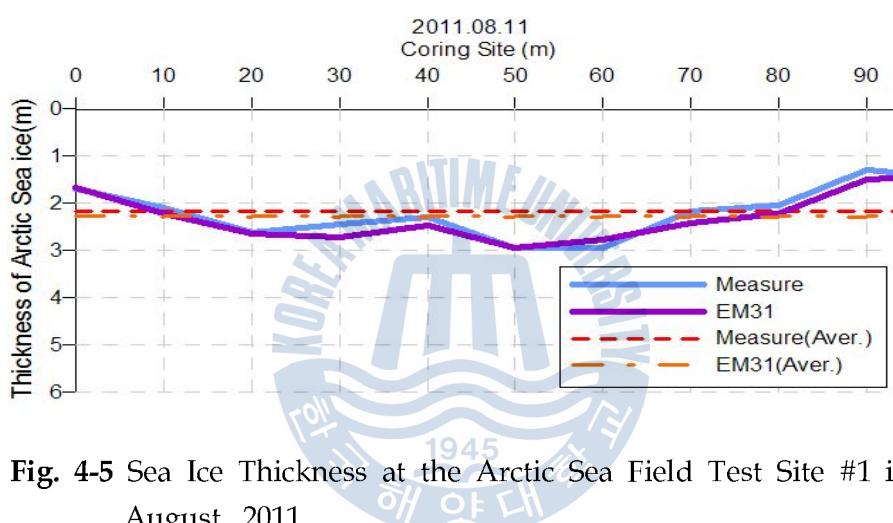


Fig. 4-5 Sea Ice Thickness at the Arctic Sea Field Test Site #1 in August, 2011

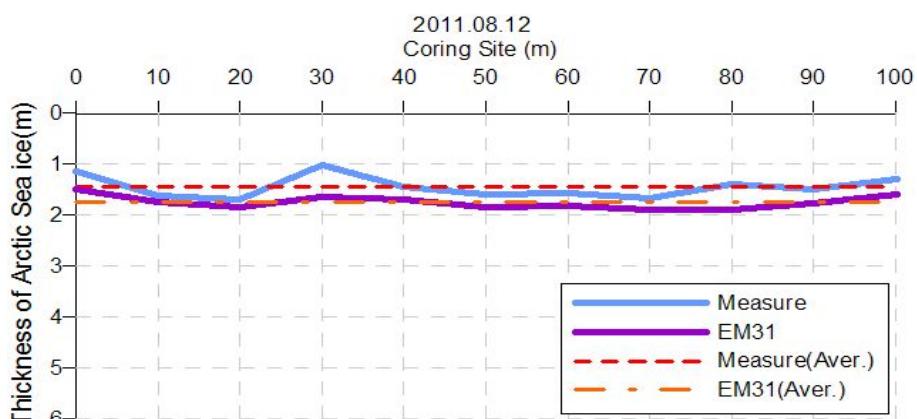


Fig. 4-6 Sea Ice Thickness at the Arctic Sea Field Test Site #2 in August, 2011

Table 4-3 Sea Ice Properties at the Arctic Sea Ice Trial in August, 2011

NO.	Coring Site (m)	Depth(cm)	Temp.(°C)	Salinity(‰)	Density(g/cm³)	Flexural Strength (MPa)
1	0	10	-0.80	0.20	-	-
		70	-1.70	1.40	0.87	0.55
		160	-1.40	2.60	0.91	0.29
	50	10	0.20	0.10	0.74	-
		110	-0.80	1.60	0.89	0.25
		260	-1.50	1.90	0.91	0.40
	90	10	-0.10	0.20	0.75	-
		80	-0.80	1.10	0.92	0.34
		114	-0.50	1.50	0.93	-
Average			-0.82	1.18	0.86	0.37
2	10	25	-0.10	0.10	0.74	-
		95	-0.70	1.20	0.89	0.27
		150	-1.00	1.40	0.91	0.35
	50	20	-0.10	0.70	0.75	-
		90	-1.00	2.10	0.92	0.24
		150	-1.40	2.00	0.93	0.36
	90	10	0.10	0.10	0.88	-
		70	0.00	0.70	0.89	-
		160	-1.20	1.30	0.90	0.44
Average			-0.60	1.07	0.87	0.33

Fig. 4-5, 4-6은 해빙의 두께를 직접 계측한 결과와 EM장비를 사용하여 식(2-1)을 통해 간접적으로 추정한 결과를 그래프로 작성한 것이다. 2010년 8월 북극해 해빙의 경우 해수층이 존재하는 다중층을 보이며 직접 계측한 결과와 EM장비를 통해 추정한 해빙의 두께는 다소 차이를 보였지만 2011년 8월의 북극해 해빙의 경우 단일층을 보이며 직접 계측한 결과와 EM장비를 통해 얻어진 해빙의 두께는 거의 일치하였다. 그리고 해빙의 깊이에 따른 온도, 염도, 밀도의 경우 2010년 8월 북극해 해빙의 재료특성과 비슷한 분포를 보였으며 식(2-9)를 통한 해빙의 굽힘강도 역시 비슷한 수치를 보였다.

Table 4-4 Sea Ice Properties at the Svalbard Island in April, 2010

NO.	Date	Coring Site	Temp. (°C)	Salinity (%)	Density (g/cm³)	Compressive Strength (MPa)	Flexural Strength (MPa)
1	2010.04.16	1	-4.13	4.15	0.95	2.46	0.47
		2	-4.75	4.33	0.95	2.46	0.49
		3	-5.13	4.08	0.95	1.94	0.53
		4	-4.53	4.41	0.97	4.42	0.45
		5	-4.77	4.30	0.96	3.19	0.50
		6	-4.33	4.60	0.97	2.57	0.43
		Average	-4.61	4.31	0.96	2.84	0.48

다음으로는 2010년 4월에 노르웨이 스발바르에서 국내 연구진이 실시했던 현장계측시험의 결과데이터를 토대로 2010년 8월 북극해 해빙 압축강도 데이터와 비교하였다. 총 여섯 장소에서 시험이 실시되었으며 해빙의 깊이에 따른 온도, 염도, 밀도 그리고 해빙의 수직방향의 압축강도를 계측하였다(Table 4-4). 그리고 해빙의 온도, 염도, 밀도를 토대로 식 (2-9)를 통해 해빙의 굽힘강도를 간접적으로 계산해 보았다.

해빙의 온도의 경우 앞서 본 논문에서 소개했던 해빙의 온도보다 낮은 -7.5~3.1°C(평균 -4.61°C) 분포를 보였고 염도는 4.02~5.07%(평균 4.31%)을 보이며 높은 수치를 보였다(Fig. 4-7). 이러한 이유로 인해 해빙의 온도, 염도, 밀도에 의해 결정되는 식 (2-9)를 통해 얻어진 굽힘강도 값은 0.37~0.61MPa(평균 0.48MPa)을 보였고 수직방향의 압축강도는 1.02~5.71MPa(평균 2.84MPa)을 보였다(Fig. 4-8).

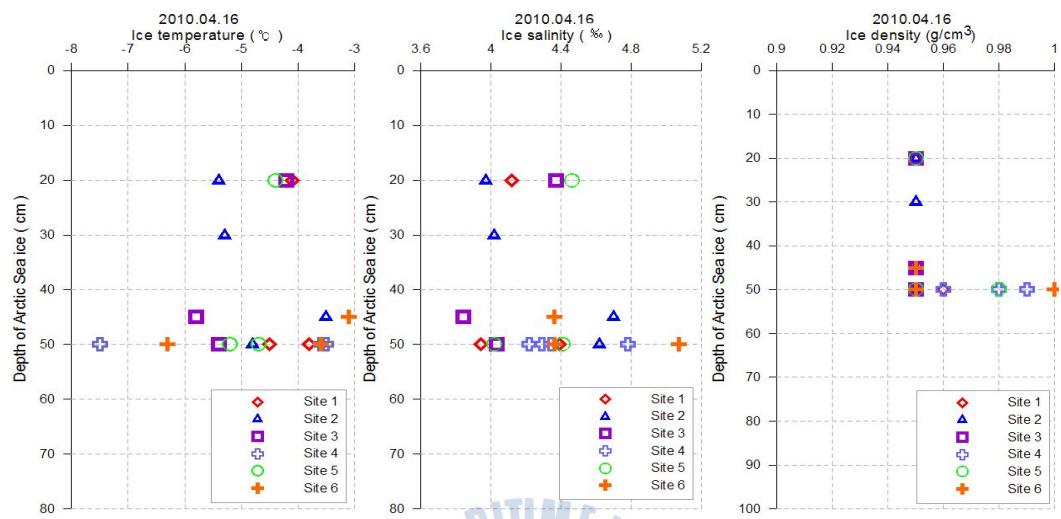


Fig. 4-7 Sea Ice Properties at the Svalbard Island in April, 2010

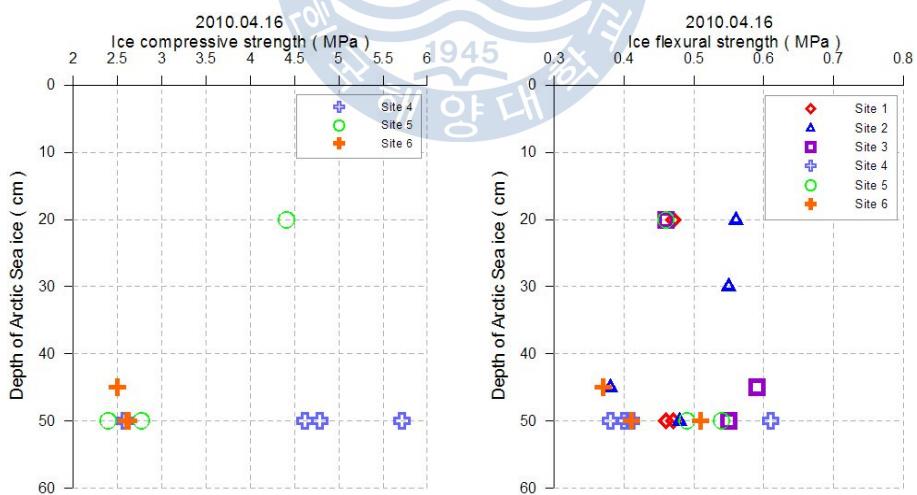


Fig. 4-8 Sea Ice Strength at the Svalbard Island in April, 2010

해빙의 압축강도는 해빙의 공극률(Porosity, ν_T)에 따라 결정되는데 여기서 공극률은 해빙의 기포에 따른 체적 ν_a 와 염수에 따른 체적 ν_b 로 나눌 수 있다. 공극률을 결정하는 식은 다음과 같다(Cox and Weeks, 1983). 해빙은 보통 공극률이 작을수록 해빙의 강도가 크다.

$$\nu_T = \nu_a + \nu_b = 1 - [\rho/\rho_i(T_i)] + [\rho S_i/F_1(T_i)][1 + F_2(T_i)] \quad (4-1)$$

$$\nu_a = 1 - [\rho/\rho_i(T_i)] + [\rho S_i F_2(T_i)/F_1(T_i)] \quad (4-2)$$

$$\nu_b = \rho S_i / F_1(T_i) \quad (4-3)$$

$$\rho_i(T_i) = 0.917 - 1.403 \times 10^{-4} T_i \quad (4-4)$$

$$F_1(T_i) = -4.732 - 22.45 T_i - 0.6397 T_i^2 - 0.01074 T_i^3 \quad (4-5)$$

$$F_2(T_i) = 8.903 \times 10^{-2} - 1.763 \times 10^{-2} T_i - 5.33 \times 10^{-4} T_i^2 - 8.801 \times 10^{-6} T_i^3 \quad (4-6)$$

$$(-0.6^\circ\text{C} \geq T_i \geq -22.9^\circ\text{C})$$

여기서 ν_T : 해빙의 전체 공극률 (무차원)

ν_a : 기포 체적 (무차원)

ν_b : 염수 체적 (무차원)

ρ : 해빙의 밀도 (g/cm^3)

S_i : 해빙의 염도 (%)

T_i : 해빙의 온도 ($^\circ\text{C}$)

2010년 4월 노르웨이 스발바르, 2010년 8월 북극해 해빙의 온도, 염도, 밀도를 통해 공극률(ν_T)을 계산하여 해빙의 수직방향 압축강도와의 관계를 알아보았다(Table 4-5, 4-6). 2010년 4월 스발바르에서의 해빙의 경우 공극률이 작을수록 강도가 대체로 커지는 분포를 보이는 반면 2010년 여름철 북극 해빙의 경우 공극률과 관계없는 분포를 보였다.

Table 4-5 Sea Ice Properties at the Arctic Sea Ice Trial in August, 2010

No.	Temp.(°C)	Salinity(‰)	Density(g/cm³)	ν_T	Compressive Strength (MPa)
1	-1.1	0.98	1.3	0	1.78
2	-1.1	0.98	1.4	0.01	1.24
3	-1.2	0.91	0.8	0.05	3.71
4	-1.3	0.99	2.8	0.05	1.95
5	-1.1	0.92	1.2	0.06	1.69
6	-1.3	0.93	2	0.07	1.07
7	-1.3	0.99	3.1	0.07	2.25
8	-0.7	0.92	0.9	0.08	1
9	-0.7	0.98	1.5	0.08	1.28
10	-1	0.92	1.4	0.08	2.51
11	-1.7	0.91	2.6	0.09	1.19
12	-1.5	0.94	2.9	0.09	1.62
13	-1.4	0.93	2.6	0.09	3.63
14	-1.1	0.93	1.9	0.09	1.11
15	-1.4	0.97	3.6	0.09	2.65
16	-0.9	0.92	1.5	0.1	2.83
17	-1.4	0.94	3	0.1	2.86
18	-1.3	0.93	2.6	0.1	1.79
19	-1.6	0.91	3.1	0.11	1.93
20	-1.2	0.92	2.3	0.11	2.15
21	-1	0.93	2.3	0.12	2.62
22	-1.5	0.89	2.6	0.12	2.97
23	-1.4	0.94	3.5	0.12	3.42
24	-1.7	0.89	2.8	0.12	2.3
25	-0.8	0.92	1.6	0.12	1.84
26	-1.5	0.92	3.7	0.13	2.72
27	-1.2	0.96	3.7	0.14	3.4
28	-0.7	0.93	1.7	0.15	1.98
29	-1.3	0.98	4.7	0.15	0.77
30	-1.1	0.92	3	0.16	1.94
31	-1.2	0.91	3.2	0.16	1.45
32	-1.2	0.94	3.8	0.16	1.98
33	-0.7	0.92	1.8	0.17	0.83
34	-0.7	0.92	1.8	0.17	1.35
35	-1.5	0.92	4.9	0.18	2.57
36	-0.7	0.93	2.2	0.2	1.48
37	-0.8	0.98	3.2	0.2	1.19
38	-0.7	0.9	2.1	0.21	1.35
39	-1	0.85	2.4	0.21	1.3
40	-1	0.91	3.8	0.23	1.66
41	-0.6	0.86	2.3	0.32	1.59
Average	-1.14	0.93	2.53	0.12	1.97

Table 4-6 Sea Ice Properties at the Svalbard Island in April, 2010

No.	Temp.(°C)	Salinity(‰)	Density(g/cm³)	ν_T	Compressive Strength (MPa)
1	-3.5	0.98	4.34	0.01	4.78
2	-3.5	0.96	4.22	0.02	4.62
3	-4.4	0.95	4.46	0.02	4.41
4	-4.7	0.95	4.41	0.02	2.39
5	-3.6	0.96	4.78	0.03	2.58
6	-3.6	0.95	4.36	0.03	2.6
7	-3.1	0.95	4.36	0.04	2.5
Average	-3.77	0.96	4.42	0.02	3.41

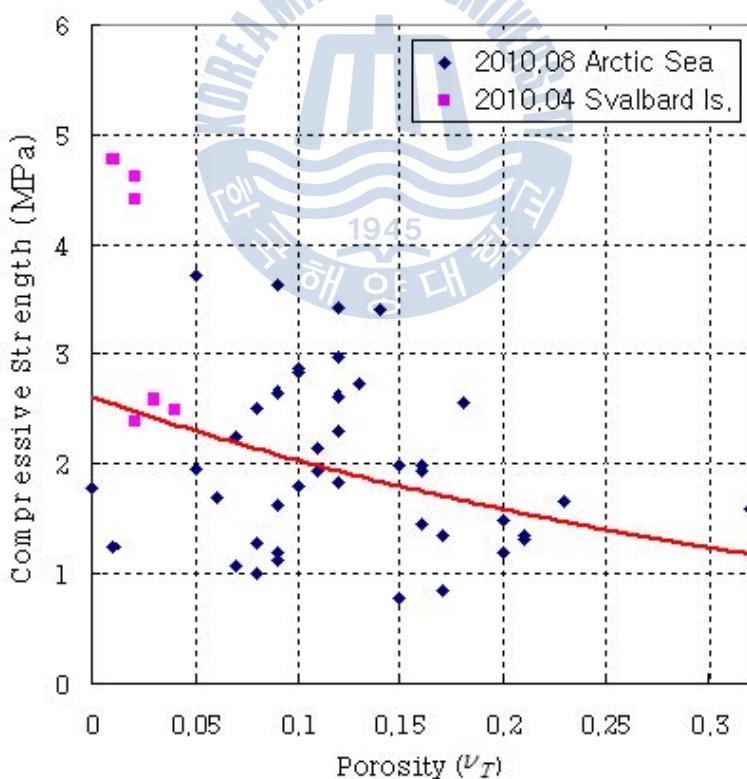


Fig. 4-9 Sea Ice Compressive Strength vs. Porosity

해빙의 압축강도 시험이 실시되었던 두 장소는 북극해 빙해역으로 지역적으로 일관성 있는 곳으로 보고 해빙 식 (4-1)을 통해 계산한 공극률과 압축강도 데이터를 토대로 정리하였다(Fig. 4-9). 그리고 이러한 데이터를 통해 해빙의 공극률에 따른 수직방향의 압축강도 추정식 (4-7)을 제시해 보았다.

$$\sigma_{c,v} = 2.6133e^{-2.5112\nu_T} \quad (4-7)$$

여기서 $\sigma_{c,v}$: 해빙 수직방향 압축강도 (MPa)

ν_T : 해빙의 전체 공극률 (무차원)



5. 결 론

본 논문은 2010년 여름 ARAON호의 북극해 항해에 동승하여 북극해의 Chukchi Sea/Beaufort Sea 등지의 빙해역에서 세 차례 실선시험을 통해 수집된 북극해 해빙에 대한 재료강도 특성을 정리하여 2010년 2월 ARAON호 남극해 항해에서 러시아 연구팀(AARI)이 계측한 데이터와 2010년 4월 노르웨이 스발바르, 2011년 8월 ARAON호 북극해 항해에서 국내 연구진이 계측한 데이터를 바탕으로 비교, 분석한 것이다.

이번 현장계측시험을 통해 북극해 해빙의 전반적인 자료는 아니지만 해빙 깊이에 따른 물성치 및 강도 데이터를 독자적으로 확보할 수 있었다. 세 차례 실시된 시험 장소의 해빙은 단일층으로 구성된 1년생빙이 아닌 수층이 존재하는 다중층을 보이는 2년생빙 이상으로 판단되었다. 해빙의 온도의 경우 시험 당시 대기온도는 평균 0.67°C 로 비교적 높은 온도를 보이면서 해빙의 깊이가 증가할수록 감소 추세를 보인 반면 해빙 염도의 경우 눈과 비 등의 영향으로 표층부분에서는 낮은 수치를 보이고 겨울철 해수부분과 맞닿는 부분에서 재결정이 이루어지면서 높은 염도 수치를 보였다. 이 뿐만 아니라 강도 변화도 확인할 수 있었다. 세 차례 시험의 해빙 평균 압축강도는 1.83 MPa , 평균 굽힘강도는 190kPa 로 쇄빙선박 설계 시 사용되는 압축강도 $1\sim 6\text{ MPa}$ 과 굽힘강도 $500\sim 600\text{kPa}$ 에 포함되는 수치를 보였는데 기존 문헌의 해빙의 압축강도 자료와 비교했을 때 비교적 낮은 값을 보였다. 또한 해빙의 온도, 밀도, 염도, 결정구조는 강도를 결정하는 주요 인자로 특히 온도가 낮거나 결정구조가 클 경우 뚜렷하게 큰 강도를 보였다. 비슷한 위도상의 해빙의 압축강도 및 굽힘강도는 비슷한 값을 보였지만 위도 1도 증가된 장소에서의 강도 값은 대체로 높은 값을 보임을 확인할 수 있었고 파괴변형도는 해빙의 깊이나 압축강도와 무관하게 $0.005\sim 0.015$ 값을 보였다. 그리고 해빙의 결정크기가 클수록 강도가 커짐을 확인하였고 2010년 2월 남극해, 2010년 4월 노르웨이 스발바르, 2011년 8월 북극해에서의 데이터를 비교분석함으로써 해빙의 상태 및 자연환경에 따라 해빙의 재료적 특성이 달라짐을 확인하였고 해빙의 온도, 염도, 밀도를 통해 얻을 수 있는 공극률을 바탕으로 해빙의 수직방향 압축강도와의 관계를 토대로 추정식을 제시할 수 있었다.

2010년 8월 여름철 북극해 현장계측시험은 북극해의 제한된 지역에서 실험을 했기 때문에 북극해 해빙의 재료강도 특성에 대한 전반적인 정보를 얻을 수는 없었지만 우리 연구진에 의해 독자적으로 시도된 이번 북극해 실선시험은 우리나라에서 건조된 쇄빙선박을 이용하였는데 가장 중요한 의미가 있고 향후 동선박을 이용하여 동일한 실선시험을 수행하기 위한 표준화된 실선시험 절차를 마련하는데 중요한 기여를 했다고 판단된다. 앞으로 북극과 남극의 실선시험을 통해 보다 많은 빙상정보 및 해빙의 재료특성 자료를 확보함으로써 북극해 항로 개척과 쇄빙선박의 건조에 있어서 기초자료가 될 것으로 본다.



참 고 문 헌

- [1] 김대환, 박영진, 최경식 (2011), “해빙의 재료강도 특성에 관한 북극해 현장 조사 연구”, 한국해양과학기술협의회 공동학술대회 논문발표집, pp.1791-1796.
- [2] 이춘주 외, (2010), “2010년 쇄빙연구선 ARAON호의 북극해 항해 실선계측 시험 결과보고서”, 한국해양연구원.
- [3] 최경식, 조성철 (2003), “북극해 항로의 전망과 쇄빙상선의 활용”, 한국해양 공학회지, 제17권 제6호, pp.96-100.
- [4] Cox, G.F.N. and Weeks, W.F. (1983), "Equations for Determining the Gas and Brine Volumes in Sea Ice Samples", Journal of Glaciology, Vol.29, No.102, pp.306-316.
- [5] Frankenstein, G.E. and Garner, R. (1967), "Equations for Determining the Brine Volume of Sea Ice from -0.5 to -22.9°C", Journal of Glaciology, Vol.6, No.48, pp.943-944.
- [6] Jones, S. J., Kirby, C., Meadus, C., Tucker, W., Gagon, J. and Elder, B. (2001), "Sea Ice Properties on the USCGC HEALY Ice Trials", Proc. of the 16th International Conference on Port and Ocean Engineering under Arctic Conditions, POAC, pp.945-954.
- [7] Lainey, L. and Tinawi, R. (1984), "The Mechanical Properties of Sea Ice - A Compilation of Available Data", Canadian Journal of Civil Engineering, Vol.11, pp.119-127.
- [8] Likhomanov, V. (2010), "Full-Scale Ice Trials of the Korean Research Icebreaker ARAON", Arctic and Antarctic Research Institute, Russian Antarctic Expedition Report.

- [9] Mellor, M. (1983), "Mechanical Behavior of Sea Ice", USACE, Cold Regions Research & Engineering Laboratory Monograph 83-1.
- [10] Mellor, M. and Cole, D.M. (1982), "Deformation and Failure of Ice under constant Stress or constant Strain-rate", Cold Regions Science and Technology, Vol.5, pp.201-219.
- [11] Michel, B. and Toussaint, N. (1977), "Mechanisms and Theory of Indentation of Ice Plates", Journal of Glaciology, Vol.19, No.81, pp.285-301.
- [12] Schulson, E.M. (2001), "Brittle Failure of Ice", Engineering Fracture Mechanics, Vol.68, pp.1839-1887.
- [13] Timco, G.W. and Frederking, R.M.W. (1986), "Confined Compression Tests: Outlining the Failure Envelope of Columnar Sea Ice", Cold Regions Science and Technology, Vol.12, pp.13-28.
- [14] Timco, G.W. and O'Brien, S. (1994), "Flexural Strength Equation of Sea Ice", Cold Regions Science and Technology, Vol.22, pp.285-298.
- [15] Timco, G.W. and Weeks, W.F. (2010), "A Review of the Engineering Properties of Sea Ice", Cold Regions Science and Technology, Vol.60, pp.107-129.
- [16] Weeks, W.F. and Lee, S.O. (1958), "Observations on the Physica Properties of Sea Ice at Hopedale", Arctic(II), pp.135-155.
- [17] WMO, "Sea Ice Nomenclature", Version 1.