

# 쇄빙연구선 ARAON호를 이용한 북극해 해빙의 재료특성 (1) - 해빙의 두께, 온도, 염도, 밀도 계측 -

박영진\* · 김대환\* · 최경식\*

\*한국해양대학교 해양공학과

## Material Properties of Arctic Sea Ice during 2010 Arctic Voyage of Icebreaking Research Vessel ARAON: Part 1 - Sea Ice Thickness, Temperature, Salinity, and Density -

Young-Jin Park\*, Dae-Hwan Kim\* and Kyungsik Choi\*

\*Department of Ocean Engineering, Korea Maritime University, Busan, Korea

**KEY WORDS:** Icebreaking research vessel ARAON 쇄빙연구선 아라온, Arctic voyage 북극해 항해, Material properties of sea ice 해빙의 재료특성, Thickness of ice 빙판 두께, Temperature 온도, Density 밀도, Salinity 염도

**ABSTRACT:** A field trial in an ice-covered sea is one of the most important tasks in the design of icebreaking ships and offshore structures. To correctly estimate the ice load and ice resistance of a ship's hull, it is essential to understand the material properties of sea ice during ice field trials and to use the proper experimental procedure for gathering effective ice data. The first Korean-made icebreaking research vessel, "ARAON," had her second sea ice trial in the Arctic Ocean during the summer season of 2010. This paper describes the test procedures used to obtain proper sea ice data, which provides the basic information for the ship's performance in an ice-covered sea and is used to estimate the correct ice load and ice resistance of the IBRV ARAON. The data gathered from the sea ice in the Chukchi Sea and Beaufort Sea during the Arctic voyage of the ARAON includes the temperature, density, and salinity of the sea ice, which was believed to be from two-year old ice floes. This paper analyses the gathered sea ice data in comparison with data from the first voyage of the ARAON during her Antarctic Sea ice trial.

### 1. 서 론

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

하지만 국내에서는 조선산업의 장점을 가지고 있으면서도 그간 쇄빙선박은 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 재료강도 특성 실선시험을 수행 하였는데, 이 논문은 2010년 7월 15일에

서 2010년 8월 14일까지 ARAON호의 북극해 항해 중 해빙의 재료특성을 시험, 분석한 결과를 정리한 것이다. 이런 빙해역 현장에서의 해빙에 대한 정보는 얼음의 분포와 형태, 재료특성과 강도에 관한 정보를 축적함으로써 향후 북극해 항로 개척을 위한 예비조사에 활용될 수 있다.

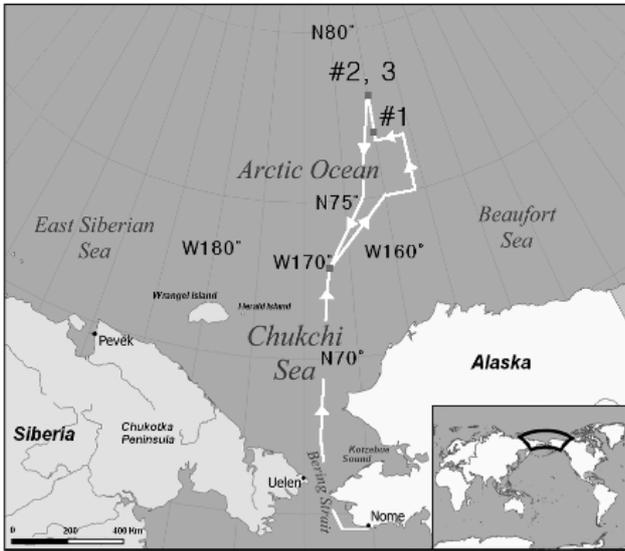
이 연구의 목적은 극지항로를 안전하게 운항할 수 있는 빙해선박과 북극항로 및 북극해 빙상조건과 해빙에 대한 기초자료를 획득하는 것이며 향후 북극해나 남극해에서의 실선시험을 보다 더 충실하게 할 수 있도록 대비하기 위한 것이다. 이를 위하여 본 연구는 8월 3~5일 동안 총 3차례의 현장 시험을 수행하였고 이 시험을 통해 북극해 해빙의 두께에 따른 온도, 염분, 밀도를 측정하고 그 데이터를 분석하였다 (이춘주 등, 2010).

### 2. 실선시험 현장

시험이 이루어진 곳은 북극해 중 Chukchi Sea로서 서쪽은 East Siberian Sea, 남쪽은 Bering Sea, 동쪽은 Beaufort Sea와 접

**Table 1** Average ice thickness in Chukchi Sea (cm) (Ostreng et al., 1999)

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



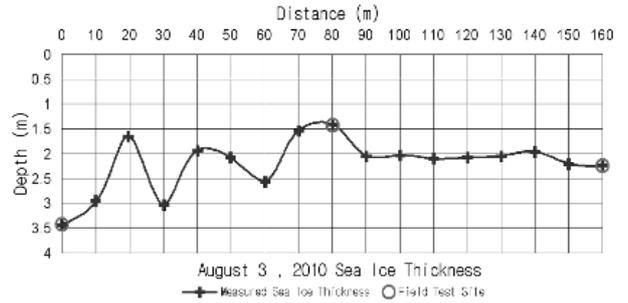
**Fig. 1** Ice field test sites

하며 겨울철에는 대부분 결빙하고 6월 중순부터 쇄빙선박을 이용한 항해가 가능하다. Table 1은 Chukchi Sea의 빙상환경에 대해 관측된 자료를 통해 겨울철 평균 해빙의 두께를 예측하기 위한 자료이며 실선시험이 수행된 2010년 8월의 해빙두께와 비교하기 위한 것이다 (Ostreng et al., 1999). 이 자료에 따르면 Chukchi Sea는 10월부터 다음해 5월까지 결빙하며 이후 9월까지 해빙하여 최저가 되는 10월의 평균 해빙 두께는 22cm로 나타나 있다.

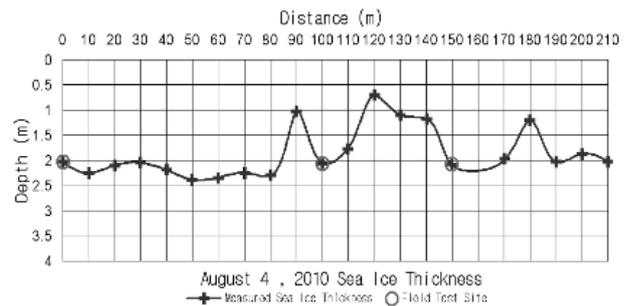
해빙의 재료특성을 조사하기 위한 시험장소는 “ARAON호”의 쇄빙능력 주행 테스트를 할 수 있는 크기(본선 길이의 2.5~3배, 폭은 1.5~2배)의 해빙에서 수행되었다. Table 1에서 알 수 있듯이 여름철 해빙 두께가 비교적 얇고 해빙이 많이 녹아있는 상태여서 적합한 빙판을 찾는데 상당히 어려움이 있었다.

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

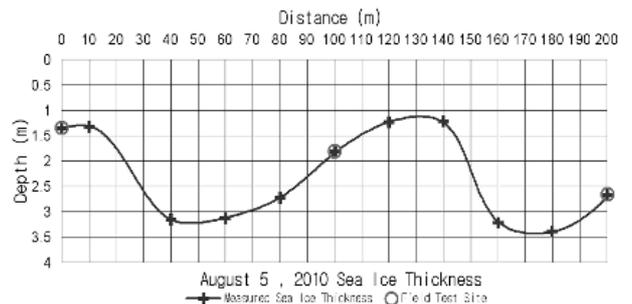
2차 시험은 8월 4일 현지시간 15:00시에 첫 번째 시험구역 근처인 77°02N, 159°49W 위치에서 수행하였고 해빙의 크기는 첫 번째 시험보다 큰 280m × 100m였으며 평균두께는 1.88m로 비교적 얇았다. 두께 측정(Fig. 3)은 0m, 100m, 150m에서 실시하였다. 얼음의 상태는 2년생빙으로 동일하였으며, 2m 전후의 균일한 두께를 가진 얼음이었다. 또한 Rubble 형태의 얼음이 없어서 시험을 하기에 비교적 좋은 조건이었다.



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



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



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

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

### 3. 시험방법

#### 3.1 해빙의 두께 측정

현장 쇄빙시험을 하기 위해서 먼저 얼음의 두께를 측정하는 것이 필요하다.

##### 3.1.1 Auger를 사용하는 방법

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



Fig. 5 Augering for ice thickness measurement



Fig. 7 Coring with 3" ice corer



Fig. 6 Thickness measurement using ice gauge



Fig. 8 Ice temperature measurement

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.

### 3.1.2 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 추정한다.

### 3.2 온도 측정

온도를 측정하는 것은 두 경우이다. 우선 온도를 측정하기 위해서는 얼음시편을 추출해야 하며 그러기 위해서는 Coring 장비를 이용한다. 추출된 시편으로 굽힘강도 계측 시 온도 측정을 하고, 둘째로 압축강도 측정 시 역시 온도 측정을 한다.

첫 번째 온도 측정은 채취된 얼음의 두께 방향 10cm 간격으로 온도를 측정하는 방법이고 두 번째의 온도 측정은 측정하려는 얼음의 상하단을 임의로 선택해 측정하는 방법이다. 이때의 시편의 크기는 20cm 정도 자른 후 시편절단기로 시편을 가공한다.

온도 측정에 필요한 장비로는 시편절단용 보조장비, 수동 드릴과 온도계이다. 여기서 시편절단용 보조장비는 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.

### 3.3 염도 측정

염분 측정을 위해서는 온도 측정을 위해 사용된 10cm, 20cm 길이로 표시된 시편을 이용한다. 10cm 간격으로 자른 얼음을 플라스틱 용기에 넣어 실내에서 보관 후 얼음을 녹인다. 마찬가지로 압축시험을 하고 난 시편도 플라스틱 용기에 넣어 실내 보관한다. 하루 정도 지나면 얼음이 모두 녹기 때문에 녹은 얼음을 가지고 염도측정기를 이용해 염도를 측정한다.

### 3.4 밀도 계산

본 시험에서 밀도 측정은 버니어캘리퍼스도 얼음 시편의 크기와 무게를 측정하여 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 수치

가 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.

### 4. 현장시험 결과와 데이터 분석

이번 현장시험을 통해서 얻은 해빙의 재료특성 데이터는 다음과 같다.

북극해에서 계측된 재료특성 데이터를 이용하여 북극해 해빙의 두께방향 깊이별 온도, 염분, 밀도 변화를 Fig. 9~11에 나타내었다. 해빙의 깊이에 따른 온도 변화를 보면 Fig. 9에서 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. 10에서 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 이르르면 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 1년 생빙이던 얼음의 표면이 모두 녹아 염분 함유량이 적은 아랫부분이 드러난 후 겨울철 표면온도가 급격히 떨어짐으로써 결빙속도가 빨라 염분 함유량이 증가했다고 볼 수 있다.

다음으로 Fig. 11은 해빙의 깊이별 밀도 변화를 보여주고 있다. 얼음 속에 함유된 염수액과 기포 때문에 해빙은 기포가 없

Table 2 Physical-mechanical ice properties

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

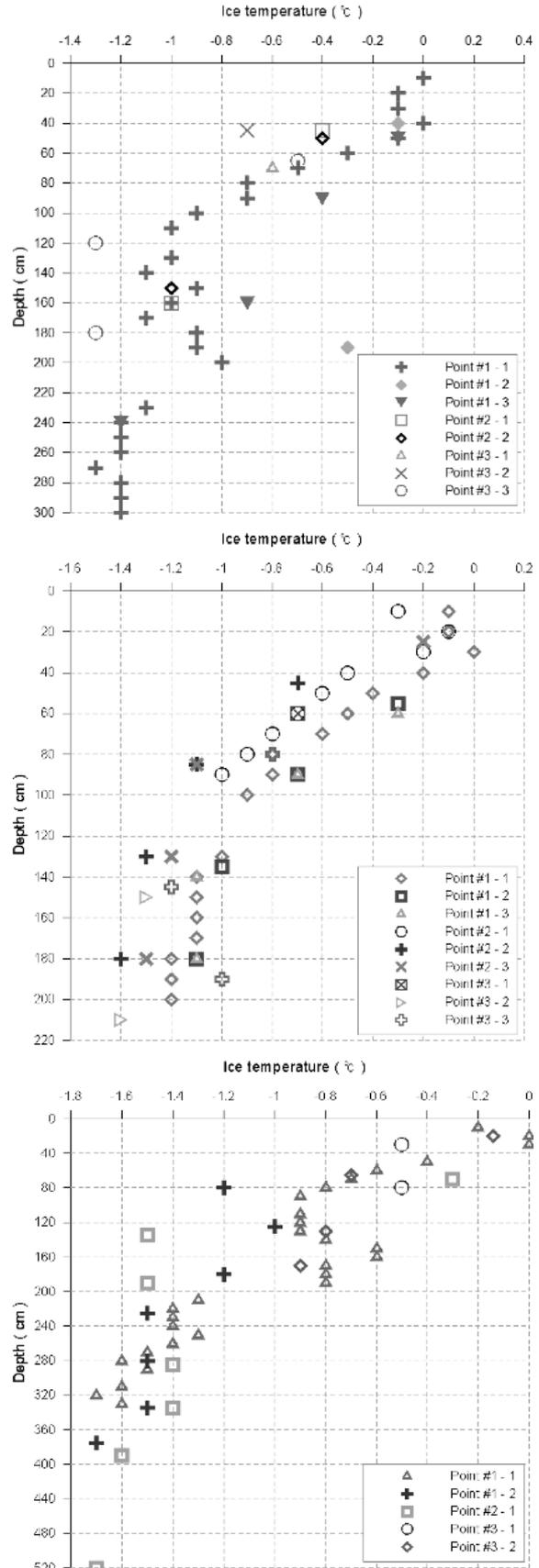


Fig. 9 Profiles of ice temperature (Arctic 8/3~8/5, 2010)

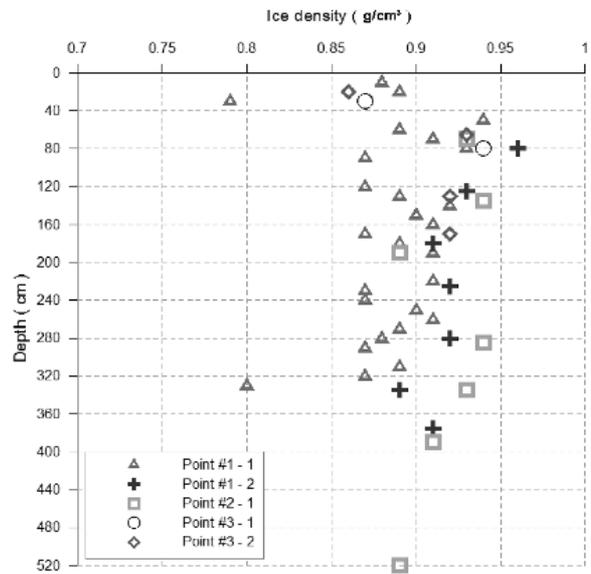
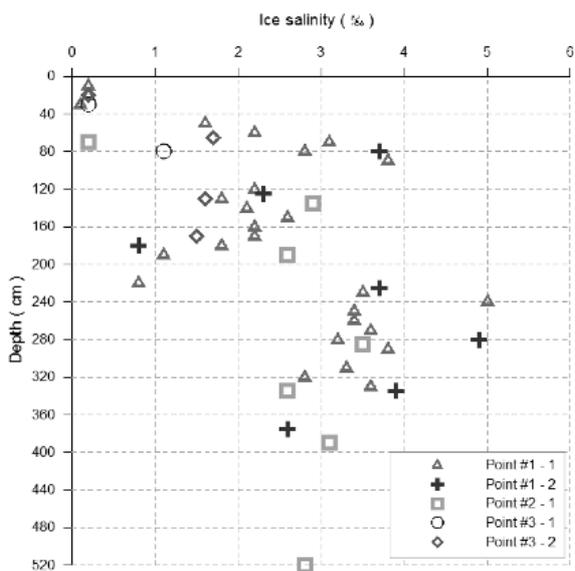
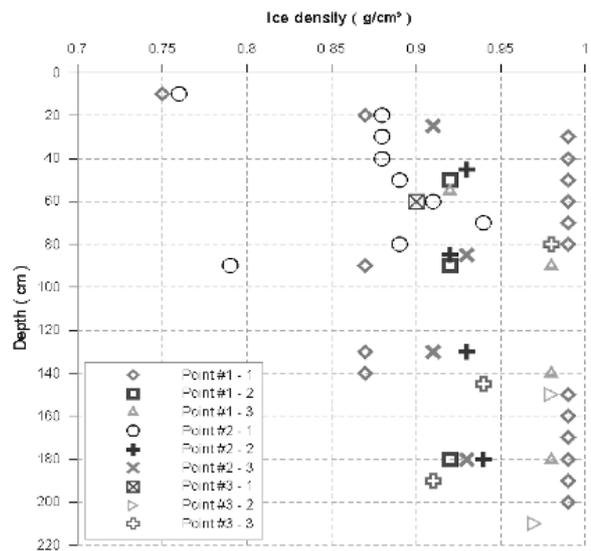
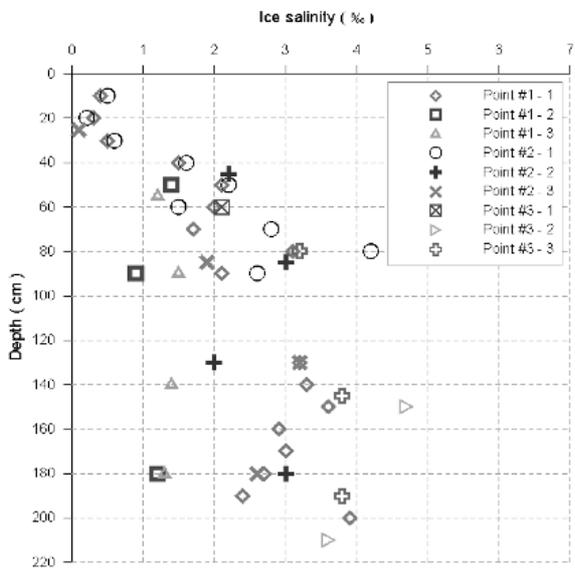
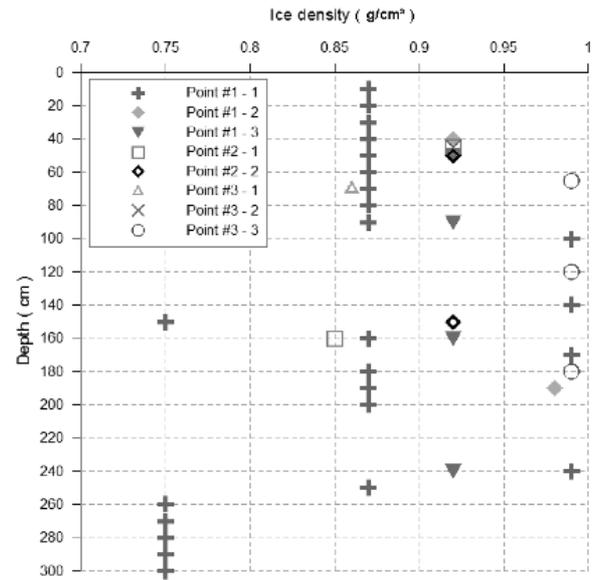
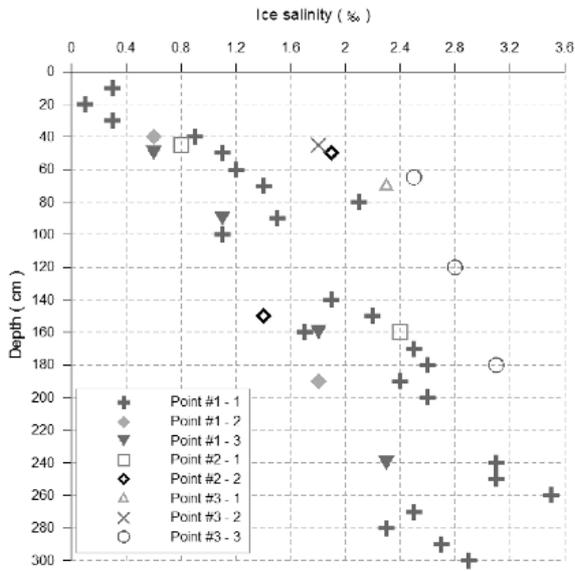


Fig. 10 Profiles of ice salinity (Arctic 8/3~8/5, 2010)

Fig. 11 Profiles of ice density (Arctic 8/3~8/5, 2010)

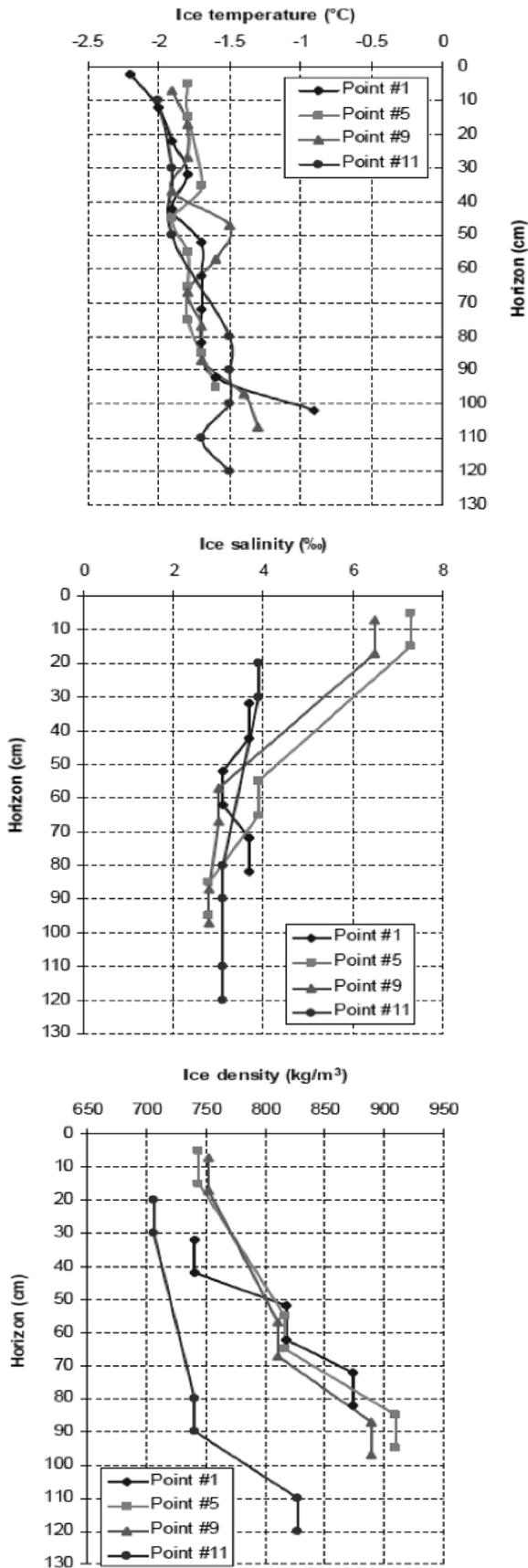


Fig. 12 Profiles of sea ice properties (Likhomanov, 2010)

는 순수 담수빙의 밀도( $0.917\text{g/cm}^3$ )와는 다르지만 실제로는 염수액과 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. 11에서 볼 수 있듯이 해빙 표면의 밀도가 다른 부위보다 낮다는 것을 알 수 있다.

한편 2010년 8월에 측정된 북극해에서의 자료와 비교를 위해 2010년 1~2월경 남극해에서 러시아의 AARI 연구팀이 작성한 ARAON호의 쇄빙능력 테스트 결과보고서에서 인용한 남극 해빙의 두께별 온도, 염분, 밀도 데이터를 Fig. 12에 나타내었다.

해빙의 깊이에 따른 온도 변화를 보면 남극해에서의 데이터는 깊이가 증가함에 따라 조금씩 증가하는 것을 확인할 수 있는데, 이러한 이유는 남극에서는 여름철임에도 불구하고 대기 온도가 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 1년생빙에서 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.

### 5. 결 론

본 연구는 2010년 7~8월에 있었던 우리나라 최초의 쇄빙연구선 ARAON호를 활용한 북극해 현장의 쇄빙시험을 통해서 수집된 해빙의 재료특성 데이터 중 빙판의 두께와 온도, 염도, 밀도에 관한 자료를 정리 분석한 것이다.

2010년 8월 현장시험이 수행된  $77\sim 78^\circ\text{N}$  해역에는 여름철에도 상당한 해빙이 존재하는 곳이지만 2010년에는 평년의 8월 예상치보다 더 얼음이 많이 녹아 있었고 이로 인해 ARAON호의 쇄빙능력시험을 수행하기 위한 적절한 빙상조건을 찾는 데 어려움이 있었다.

이 시기의 북극해에서는 깊이가 증가함에 따라 온도가 감소하다가 200cm 아래에서는  $-1.5\sim -1.7^\circ\text{C}$ 로 일정하였다. 현장시험이 수행되었던 곳의 대기온도가 전반적으로  $0^\circ\text{C}$ 로 해빙 표면온도가 높은 반면 해수와 접하는 아랫면의 온도는 표면온도보다 비교적 낮아서 깊이에 따라 온도가 감소한 것으로 보인다. 염도의 경우 북극해에서의 데이터는 해빙의 깊이에 따라 염분이 증가함을 확인할 수 있었다. 이러한 이유는 북극해에서의 해빙은 다년생빙으로 1년생빙 얼음의 표면이 모두 녹아 염분 함유량이 적은 아랫부분이 드러난 후 겨울철 표면온도가 급격히 떨어짐으로써 결빙속도가 빨라 염분 함유량이 증가했다고 볼 수 있다. 해빙의 표면에서의 밀도는 쌓인 눈이나 비로 인해 일반적으로 낮게 나타나는데 전체적으로 보면 염수액과 기포의 밀도에 대한 영향이 서로 상쇄되어, 해빙의 밀도는 순수한 얼음에 가까운

0.915~0.920g/cm<sup>3</sup> 정도이었다.

한편 북극해의 해빙에서 얻어진 온도, 염도의 데이터는 남극해에서 계측된 값에 비해서 상당한 차이를 보이고 있는데 이 차이는 8월초 북극해에서 해빙이 예상보다도 훨씬 빨리 녹고 있는 상태이고 얼음이 구조적으로 심하게 약화된 상태이기 때문으로 추정할 수 있다.

이번 ARAON호의 북극해 현장시험을 통해서 해빙의 재료특성을 계측하기 위한 Auger, Corer, Ice thickness gauge 등 제반의 장비의 사용방법과 표준화된 계측방법을 익힐 수 있었고 또한 충분하지는 않지만 이 해역의 해빙에 대한 재료특성 데이터를 확보하고 이것을 체계적으로 분석할 수 있는 기법을 처음으로 적용해 보았다는 점에서 의의를 찾을 수 있다. 아울러 향후 북극이나 남극에서의 실선시험을 지속하기 위해 표준화된 실험 절차에 관한 매뉴얼을 작성할 수 있었던 것도 본 연구를 통한 중요한 성과라고 할 수 있다.

## 후 기

본 논문은 2009년도 지식경제부 지원 산업원천기술과제 (Grant No. 10033640)와 한국연구재단 첨단조선공학연구센터 (ASERC)의 연구비(R11-2002-008-01002-0)지원으로 수행된 연구 결과임.

## 참 고 문 헌

- Likhomanov, V. (2010). Full-Scale Ice Trials of the Korean Research Icebreaker Araon, Arctic and Antarctic Research Institute Russian Antarctic Expedition Report, pp 84-98.
- Ostreg, W., et al. (1999). The Challenges of the Northern Sea Route - Interplay between Natural and Societal Factors, INSROP Working Paper No 167.
- 박영진, 김대환, 최경식 (2010). "쇄빙연구선 ARAON을 이용한 북극해 해빙의 재료특성 조사" 한국해양공학회 추계학술대회 논문집, pp 146-152.
- 이춘주 등 (2010). 2010년 쇄빙연구선 "ARAON호"의 북극해 항해 실선계측시험 결과보고서, 한국해양연구원.

---

2010년 12월 21일 원고 접수

2011년 3월 22일 심사 완료

2011년 4월 22일 게재 확정