여름철 Chukchi Borderland 부근 해빙 재료특성 계측

정성엽^{1,†} · 최걸기¹
한국해양연구원 대덕분원¹

A Measurement of Sea Ice Properties at Chukchi Borderland During the Summer

Seong-Yeob Jeong^{1,†} · Gul-Gi Choi¹
Korea Ocean Research & Development Institute Daedeok Branch¹

Abstract

Sea ice properties have been considered a key indicator in the structural design criteria of icebreaking vessels and arctic offshore platforms to estimate design ice load and resistance for their safety management in Arctic Ocean. A measurement study of sea ice properties was conducted during July to August of 2011 with the Korean icebreaking research vessel "Araon" around Chukchi Borderland. The sea ice concentration appears to be rapidly decreasing during this cruise. Ice condition seems to be thick second-year ice and multi-year ice and then, a lot of melt ponds were observed in the surface of ice floe. Calculated flexural strength of sea ice was about 250~550kPa, ice thickness was roughly 1.3~3.0m. In this research we performed field experiment to measure ice temperature along the depth, thickness, density, salinity, brine volume ratio and crystal structure. Apparent conductivities derived with the electromagnetic induction instrument were compared to drill hole measurement results and accuracy of sea ice thickness estimation formula was discussed.

Keywords : Sea ice property(해빙 특성), Field experiment(현장 시험), Electromagnetic induction instrument(전자기 유도 장비)

1. 서 론

현재 북극지역의 해빙은 온실가스 증가와 지구온난화 등의 요인으로 인해 두께와 분포 등을 포함한 해빙특성에 있어 변화가 나타나고 있다. 특히 극지해역에서 해빙의 두께는 대기와 해양의 열 교환에 의한 산물로서 기후변화를 나타내는 중요한 척도이고(Holt, et al., 2009), 해수의 운동량에 영향을 주어 궁극적으로 지구의 기후시스템에 영향을 미치게 된다(Maykut, 1986). 한 때 극지 해빙의 분포는 지구 전체 표면적의 3~6%에 달하기도 했는데(Comiso, 2003), 콜로라도 대학 부설 국립 설빙 자료 센터(National Snow and Ice Data Center, NSIDC)의 최신 연구결과에 따르면 북극해 해빙의 분포면적은 지난 9월 9일이 올해 들어 가장 낮았으며(4.33 million square kilometers), 이는 인공위성을 이용한 관측결과 2007년 이후 두 번째로 낮은 수치이다(NSIDC, 2011). 이처럼 북극 해빙의 두께가 점차 얇아지고 분포 또한 급격히 감소함에 따라 동아시아와 서유럽 간 항로 개발의 가능성을 증대시키고 있으며, 조선현장에서는 새로운 쇄빙선박 및 구조물 개발 연구에 박차를 가하고 있어 이를 위한 기반 연구로서 해빙

의 재료특성에 관한 연구의 필요성이 지속적으로 제기되고 있는 상황이다. 특히 빙해역에서의 해빙특성 자료는 빙해수조에서 수행되는 모형빙과 쇄빙선박 또는 극한지 해양구조물과의 상호작용 해석을 검증하고 선박과 구조물에 작용하는 빙저항/하중 추정을 위한 기초 자료로 활용된다. 아울러, 실험규모(full-scale) 쇄빙성능 평가 및 모형시험 결과에 대한 상관관계 분석을 통해 보다 정확한 빙저항/하중 추정이 가능하므로 실험해 해빙특성 계측이 필수적으로 요구된다. 하지만 국외에서 수행되는 연구과제의 경우 계측된 결과는 향후 국가 연구과제(national research project)의 기반 자료로 활용되는 실정이므로 자료공개가 상당히 제한적이라는 어려움이 있다. 최근 국내에서도 빙해수조와 저온 콜드룸, 쇄빙연구선, 해양위성센터 등 극지관련 연구를 수행하기 위한 인프라가 확보됨에 따라서 상기 기술에 관한 연구를 통해 극한지 분야관련 핵심 기반기술 개발이 시급할 것으로 판단된다(Jeong, et al., 2011).

본 연구에서는 국내 쇄빙연구선 "아라온" 호를 이용해 북극해 지역에서 해빙특성 변화가 가장 심한 Chukchi Borderland 지역 부근에서 빙해역 현장계측 시험을 통해 해빙의 깊이별 온도, 밀도, 두께, 염도, 염수 체적비, 결정구조 등을 계측하였고 해빙의 굽힘강도를 추정하였다. 또한 자료 분석을 통해 여름철 북극

Chukchi Borderland 부근 해빙의 재료특성을 분석하였다. 아울러, 전자기 유도 장비를 이용한 해빙의 겉보기 전도도(apparent conductivity) 측정을 통해 Jeong and Lee (2010)가 제안한 빙두께 추정식의 정도를 검증하였다.

2. 국내·외 해빙특성 연구

이번 연구항해의 경우 북극 Chukchi Borderland 부근에서 해양환경 및 해양생태계와 극지기후변화, 해빙의 동역학·열역학적 특성 연구 등의 다양한 분야에서 연구가 수행되었다. 연구항해의 경우 아래 Fig. 1과 같이 각 정점(station)으로 이동한 후 연구가 수행되었다. 해빙특성 현장시험 및 실선 빙성능 시험은 S11 지점 부근에서 수행되었으며, 현장시험을 위한 시험빙판을 선정하기 위해 러시아 북극·남극 연구소(Arctic and Antarctic Research Institute, AARI) 극지연구(Polar Research)팀에 소속된 빙항법사(Ice navigator)의 도움을 받았다.

Fig. 1 2011 Arctic cruise course of IBRV araon

언급한 바와 같이 이번 연구항해 기간 동안 해빙의 동역학·열역학적 특성 연구와 함께 합성 개구 레이더(Synthetic Aperture Radar, SAR) 자료를 이용한 해빙의 두께 및 성장정도를 분석하기 위한 연구가 수행되었다. 국내의 경우 현장계측 결과와 위성 관측 자료의 정도를 검증하기 위해 헬리콥터 하부에 GPS 장비와 디지털카메라, airborne SAR 시스템(helicopter-based airborne SAR system)이 적용되었다.

특히 airborne SAR 시스템의 경우 일반 위성 영상 레이더 시스템(spaceborne SAR system)보다 고정도 이미지 자료를 제공하는 장점을 가지고 있는데, 이번 해빙탐사의 경우 해빙의 크기와 집적도, 물웅덩이(melting pond)의 형상 관측에 있어 매우 유용한 정보를 제공하였다. 그러므로 이러한 시스템을 사용할 경우 해빙의 크기 분석과 함께 빙판선정 및 위치추적이 용이하므로 향후 북극항해에서는 이러한 방법을 이용하면 보다 효율적인 해빙 탐사 작업이 이루어 질 수 있을 것으로 판단된다. 또한 해빙의 두께와 함께 온도, 습도, 해빙 이동 등을 계측하기 위한 부이(ice buoy)가 연구항해 기간 중 북위 77도 서경 166도 부근 2년생 빙에 설치되었다.

북극해 해빙특성 관련 국제 연구 동향을 살펴보면 스코틀랜드 국립 해양연구소(The Scottish Association for Marine Science, SAMS)와 미국 육군 한랭지 연구소(Cold Region Research Engineering Laboratory, CRREL), 스페인 우주과학 및 해양기술 연구소(Spanish National Research Council (CSIC) Institute for Space Sciences (ICE) and Marine Technology Unit (UTM)) 등에서는 해빙의 두께와 적설량, 염도, 기상조건, 해빙의 수평방향과 수직방향 등의 운동특성과 변형정도, 해빙의 열류(heat flux)를 계산하기 위한 결빙 및 용해(melting) 과정 계측과 극지 해양순환 모델 개발을 위해 조석과 해류 계측하기 위한 다양한 형태의 부이(ice buoy)를 설치하였다.

또한 '아라온' 호의 선수부에 GPS 장비와 레이저 센서, 레이더 고도계(radar altimeter), 저속도 카메라(time-lapse camera)를 설치해서 항해기간 동안 선박의 위치정보와 운동성능, 해빙정보 등을 관측하기 위한 시스템을 개발하였고 성능검증을 수행한 바 있다. 이처럼 미국, 스페인, 스코틀랜드 등에서는 북극해 빙상정보 계측에 관한 다양한 연구가 활발히 진행되고 있으므로 이러한 국외동향 분석을 통해 차년도 북극항해 시 다양한 계측시스템 구축이 가능하다면 보다 심도 있는 연구가 진행될 수 있을 것으로 판단된다(Jeong, et al., 2011).

3. 실해역 해빙특성 계측

북극해에서 해빙은 6월에서 8월 사이 녹았다가 10월부터 다시 결빙이 발생하는데, 해수의 표면이 대기로부터의 에너지 손실에 의해 온도가 -1.89°C 부근까지 낮아지게 되면 다시 결빙이 시작된다. 이번 연구항해는 북극해 여름철 중반에 해당함에 따라 첫 번째 해빙군은 작년과 달리 북위 73도, 서경 166도 부근에서 출현하였다. 또한 1년생 빙(first-year ice)의 경우 대부분 녹고 있는 단계였으며, 2~4m 정도의 2년생 빙(second-year ice)과 7~12m 정도의 빙맥(ice ridge)과 함께 빙판위에 많은 물웅덩이들이 관측되었다.

빙상정보 계측은 해빙의 육안 관측(ice floe observation)과 함께 빙 두께/눈 두께 측정, 시편 채취를 통한 재료특성 계측으로 구분하여 수행하였다. 또한 해빙의 온도(temperature, $^{\circ}\text{C}$), 염도(salinity, ‰), 밀도(density, g/cm^3)를 계측한 후 경험식을 이용해 해빙의 굽힘강도(flexural strength, KPa)를 추정하였고 편광 장비(polariscope)를 이용해서 해빙의 상부(surface or top)와 하부(bottom) 부분의 결정구조(crystal structure)를 촬영하였다.

해빙두께 측정의 경우 시추장비(2 inch ice auger)와 전자기 유도 장비(electromagnetic induction instrument, EM31-MK2)를 사용해 해빙의 두께를 측정하고 해빙에서 겉보기 전도도를 계측하였다. 현장시험에서는 깊이별 해빙의 온도와 밀도, 염도를 계측한 후 Timco and O'Brien (1994)이 제안한 해빙의 굽힘강도 추정식을 이용해 대략적인 해빙의 굽힘강도를 추정하였다. 또한 해빙시편의 상부와 하부부분에서 수평방향(horizontal direction)과 수직방향(vertical direction)에 대한 결정구조 촬영을 통해 해

빙의 성장과정을 분석하였다. 식 (1)에는 Timco and O'Brien (1994)이 제안한 해빙의 굽힘강도 추정식이 정리되어 있다.

$$\sigma_f = 1.76 e^{-5.88 \sqrt{\nu_b}} \quad (1)$$

σ_f : 해빙의 굽힘강도 (MPa)

$\nu_b = \rho S_i / F_1(T_i)$: 염수 체적비 (무차원)

ρ : 해빙의 밀도 (g/cm^3)

S_i : 해빙의 염도 (%)

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

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

현장시험이 수행된 시험빙판 1(old ice #1)의 폭은 45m, 길이는 100m 정도였으며, 시험빙판 2(old ice #2)는 폭 55m, 길이 110m 정도였다. 또한 시험빙판 모두 2년생 빙으로서 빙판에 표면에 물웅덩이가 다수 분포되어 있었다. Fig. 2와 Fig. 3에는 현장시험이 수행된 빙판의 모습을 보여주고 있다.

Fig. 2 The first old ice floe for field test(11 August, 2011)

Fig. 3 Second old ice floe for field test(12 August, 2011)

깊이별 해빙온도 계측의 경우 코어 장비(3 inch ice core)를 이용해 해빙 시편을 추출한 다음 깊이방향으로 10cm 간격으로 온도를 계측하였다. 온도를 계측하는 과정에서는 수동드릴을 이용해 코어 부근에 구멍(hole)을 만든 다음 디지털 온도계(TPI 376D,

accuracy $\pm 0.1\%$)의 서미스터 프로브(thermistor probe) 삽입해서 온도를 계측하였다. 온도 계측의 경우 하부에서 상부 쪽으로 계측을 해야 하지만 코어 장비를 이용해 한 번에 전체 해빙시편 추출이 불가능하므로 시편이 추출되는 순서대로 시편의 상부부터 하부 쪽으로 최대한 빠른 시간 내에 시편의 온도를 계측하였다. 또한 해빙의 염도와 밀도를 계측하기 위해 시험빙판의 시작지점과 중간지점, 종로지점에서 깊이방향으로 각 시편을 제작한 다음 밀봉한 후 아래온 선내로 가져와서 계측하였다. 일반적으로 해빙의 밀도는 염도, 결정구조 속에 포함된 기포 등과 밀접한 관련이 있으며, 기포가 없는 경우 밀도는 대략 $0.919 \sim 0.974 \text{g/cm}^3$ 정도이다(Cox & Weeks, 1982). 본 연구에서 밀도는 시편의 질량과 부피의 관계를 통해 계산하였고 염도 계측 시에는 밀도 계측에 사용된 시편의 겉 표면을 일부 제거시킨 다음 중간부분에 해당하는 시편을 밀봉하고 녹인 후 염도계(YSI Model 30, accuracy $\pm 0.1\%$)를 이용해서 계측하였다. 이는 시편의 외부 표면이 해수에 노출되어 염도 계측 시 오차가 발생할 수 있으므로 이러한 오차를 줄이기 위해서이다. 이 과정에서 계측된 밀도는 시편 채취 과정에서 염수 배출(brine drainage)이 발생하므로 실제 현장(in situ)에서 계측된 밀도와 다소 차이가 날 수 있는데, Timco and Frederking (1996)에 따르면 이러한 염수 배출을 고려하더라도 실제 해빙의 밀도보다 $0.01 \sim 0.02 \text{g/cm}^3$ 정도 작은 값이므로 이 영향은 무시할 수 있다. 또한 해빙의 결정구조를 파악하기 위해 현장에서 채취된 시편을 선내로 가져와서 -20°C 냉동고에서 몇 시간 결빙시킨 다음 3mm 정도의 두께로 자른 후 Pounder and Stalinski (1960)가 제안한 방법으로 상온의 철판위에서 살짝 녹여 1~2mm 이내로 얇게 만든 다음 편광 장비를 이용해 촬영하였다. Table 1과 Fig. 4에는 시험빙판 1과 시험빙판 2의 해빙재료 특성에 관한 결과가 정리되어 있다.

Fig. 4 Vertical profiles of salinity, temperature and density for old ice #1 and #2 around Chukchi Borderland

Table 2에는 시험빙판 #1과 #2에서 계측된 눈 두께, 해빙의 표면에서 해수면까지의 거리(freeboard), 빙 두께 정보가 정리되어 있다. 일반적으로 1년생 빙의 경우 해빙의 염도는 표면에 가까운 상부와 하부 부근에서 높게 나타나지만(Weeks & Lee, 1958), 2년생 빙 또는 다년생 빙(multi-year ice)의 경우 해빙의 깊이별 염도 분포는 일반화된 경향을 나타내기 보다는 깊이에 따라 염도가 불균일하게 변화하는 특징을 가지고 있다(Cox &

Weeks, 1974).

Fig. 4에서 해빙의 염도는 깊이가 깊어짐에 따라 약간의 경향 차이는 있지만 대체적으로 염도가 증가하는 경향을 보여주고 있다. 이는 2년생 빙의 경우 해빙이 녹고 재 결빙되는 과정에서 상부 쪽에서 빠진 염수가 아래로 이동한 것으로 판단된다. 염도는 대략 상부에서 0.23%, 중간부분에서 1.35%, 하부에서 1.78% 정도가 계측되었다.

Table 1 Sea ice properties of old ice #1 and #2

Location at the old ice #1	Depth (cm)	Temperature (°C)	Salinity (%)	Density (g/cm ³)	ν_b	Cal. Flexural Strength (kPa)
Start Point	10	-0.8	0.2	*	*	*
	70	-1.7	1.4	0.872	0.039	554.472
	160	-1.4	2.6	0.908	0.093	293.840
Middle Point	10	0.2	0.1	0.738	*	*
	110	-0.8	1.6	0.889	0.111	248.337
	260	-1.5	1.9	0.912	0.063	402.680
End Point	10	-0.1	0.2	0.746	*	*
	80	-0.8	1.1	0.918	0.079	338.011
	114	-0.5	1.5	0.932	*	*

Location at the old ice #2	Depth (cm)	Temperature (°C)	Salinity (%)	Density (g/cm ³)	ν_b	Cal. Flexural Strength (kPa)
Start Point	25	-0.1	0.1	0.738	*	*
	95	-0.7	1.2	0.889	0.100	274.268
	150	-1.0	1.4	0.912	0.075	352.776
Middle Point	20	-0.1	0.7	0.746	*	*
	90	-1.0	2.1	0.918	0.113	244.239
	150	-1.4	2.0	0.932	0.073	358.702
End Point	10	0.1	0.1	0.882	*	*
	70	0.0	0.7	0.889	*	*
	160	-1.2	1.3	0.902	0.055	443.020

The mark "*" means no measured data or calculated results.

Table 2 Measured snow depth, freeboard and ice thickness of old ice #1 and #2

Location No.	Snow Depth (cm)		Freeboard (cm)		Ice Thickness (cm)	
	Old ice #1	Old ice #2	Old ice #1	Old ice #2	Old ice #1	Old ice #2
0	9.0	10.0	7.0	10.5	170	115
1	14.0	8.5	12.5	7.0	210	162
2	12.7	11.5	21.6	13.5	262	169
3	16.0	9.5	6.5	5.5	245	102
4	14.0	11.0	20.5	8.5	230	145
5	16.5	12.0	29.7	17.0	295	158
6	17.0	12.0	27.5	15.5	295	157
7	12.0	10.5	27.5	21.0	216	167
8	10.5	10.5	18.5	17.5	205	140
9	8.0	10.2	5.0	15.5	130	150
10	8.0	13.5	9.0	16.0	133	129

평균적인 해빙의 깊이별 온도는 상부에서 -0.13°C, 중간부분에서 -0.83°C, 하부에서 -1.17°C로 해수면과 맞닿는 아래쪽으로 내려갈수록 온도가 낮아짐을 알 수 있는데, 이는 현장시험 과정에서 대기온도가 대략 1~2°C인 반면, 해수의 온도가 -1.7°C 정

도였기 때문에 이러한 영향을 받은 것으로 판단된다. 밀도는 결정 구조 속에 포함된 기포와 밀접한 관련이 있는데, 기포가 다량으로 포함된 경우 밀도는 0.840g/cm³ 정도이고 상부 표면의 눈이 포함된 해빙의 경우 밀도는 0.770g/cm³ 까지 감소하게 된다(Wadhams, 2000).

이번 현장시험에서 계측된 밀도는 해빙의 상부 쪽은 눈이 일부 포함되어 있어 $0.738\sim0.882\text{g/cm}^3$ 였고 중간부분은 결정구조 속에 포함된 기포의 영향으로 인해서 $0.872\sim0.918\text{g/cm}^3$ 정도였으며, 하부는 $0.902\sim0.932\text{g/cm}^3$ 정도를 나타내었다. 결정구조는 해빙의 성장과정 및 강도특성과 관련이 깊은데, 일반적으로 해빙의 결정구조에서 상부는 입자형(granular) 구조를 나타내며, 하부는 기둥형(columnar) 구조를 나타내는 특성을 가지고 있다.

또한 해빙의 결정구조가 입자형 보다는 기둥형 구조가 강도특성이 다소 낮은 특징을 나타내는데, 이는 쇄빙과정에서 해빙이 굽힘에 의한 파괴현상이 지배적이기 때문이다. 이번 해빙특성계측 과정에서는 시작지점과 중간지점, 종료지점에서 상부와 하부 부분으로 구분하여 편광 장비를 이용해 해빙시편의 수직방향과 수평방향의 결정구조를 촬영하였다. 전반적으로 해빙의 결정구조는 Fig. 5와 같이 수평방향에서는 입자형 구조로서 입자의 크기는 대략 $1\sim3\text{mm}$ 정도였으며, 수직방향에서는 기둥형 구조를 나타내었고 기포가 함께 관측되었다. 또한 수직방향에서도 결정구조가 입자형 구조를 나타내는 경우도 일부 관측되었다.

Fig. 5 Crystal structure of cored sea ice sample (top: horizontal section, bottom: vertical section)

Toyota, et al. (2004)에 따르면 입자형 구조의 경우 정빙(frazil ice)이 응집되는 과정에서 형성된 형태이며, 기둥형 구조는 얼음이 하부 쪽으로 성장하는 과정에서 나타나는 현상으로 이때 염수액과 기포의 관측이 가능한데, 여름철에 해빙이 녹고 겨울철에 다시 결빙되는 과정에서 입자형 구조와 기둥형 구조가 함께 나타나는 경우가 발생하게 된다. 그러므로 복합적인 결정구조가 관측된 이유는 여름철 해빙의 성장과정에 따른 영향으로 판단된다.

이번 연구항해에서는 빙판 선정 후 장비를 하역한 다음 선정된 빙판 위에 해빙의 특성을 계측할 지점을 미리 선정하고 시추장비를 이용해 해빙을 시추(drilling)한 다음 빙 두께 측정용 줄자(ice thickness gauge)를 이용해 해빙의 두께와 함께 눈 두께, 눈 두께를 제외한 해빙의 표면에서 수면까지의 깊이를 측정하였다. 아래 Fig. 6은 해빙과 전자기 유도 장비의 관계에 따른 두께 정보를 보여주고 있다. 해빙의 두께 측정은 선박의 쇄빙성능시험(icebreaking performance test)을 위한 항주구간(running track)을 기준으로 10m 간격으로 측정하였다. 아울러, 전자기 유도 장비(EM31-MK2) 장비를 이용한 해빙의 겉보기 전도도 측정을 통해 대략적인 해빙의 두께를 추정하였다. 특히 전자기 유도 장비를 이용해 해빙에서 겉보기 전도도를 측정한 다음 지난 북극항해시 도출된 빙두께 추정식(Jeong & Lee, 2010)을 이용해서 해빙의 두께를 추정하였다. 식 (2)에는 Jeong and Lee (2010)가 제안한 빙두께 추정식이 정리되어 있다.

$$Z_t = 10.78 - 1.584 \ln(\sigma_i) \quad (2)$$

Fig. 6 The schematic drawing of sea ice thickness and electromagnetic induction instrument

여기서, Z_t 는 전자기 유도 장비에서 해빙의 바닥까지의 거리를 나타내며, σ_i 는 해빙에서 계측된 겉보기 전도도를 나타낸다. 또한 Z_s 는 눈 두께를 나타내고, Z_f 는 해빙의 두께, Z_i 는 눈 두께를 제외한 해빙의 표면에서 해수면까지의 깊이, Z_a 는 해빙의 표면에서부터 전자기 유도 장비까지의 높이를 나타낸다. 그러므로 계산된 Z_t 에서 Z_a 를 빼주면 실제 해빙의 전체 두께를 알 수 있

다(Fig. 6 참조). Jeong and Lee (2010)는 해빙층 사이에 해수층(sea water layer)이 존재하지 않는 단일층(single layer)의 경우 빙두께 추정식은 계측결과와 거의 일치함을 증명하였다. 시험빙판 1(old ice #1)의 경우 해빙은 단일층 구조로서 시추장비를 이용해 계측된 결과와 전자기 유도 장비를 이용해 계측된 겉보기 전도도를 바탕으로 해빙의 두께를 추정한 결과가 거의 일치함을 알 수 있다. 시험빙판 2(old ice #2) 역시 단일층 구조로서 30m 구간과 80m 구간을 제외한 지역에서 실측결과와 추정결과가 거의 유사한 경향을 나타내었다. 그러므로 도출된 빙두께 추정식의 경우 여름철 단일층 구조의 해빙에서 전자기 유도 장비를 이용한 두께 추정 시 정도가 상당히 높음을 알 수 있다. 아래 Fig. 7과 8에는 시험빙판 1과 2에 대한 시추장비와 전자기 유도장비에 의한 두께 결과와 함께 해빙의 단면형상이 도시되어있다.

Fig. 7 Sea ice thickness profiles of measurement vs. estimation at ice floe #1

Fig. 8 Sea ice thickness profiles of measurement vs. estimation at ice floe #2

4. 결 론

2011년 7월과 8월 쇄빙연구선 “아라온” 호를 활용해 여름철 북극 Chukchi Borderland 부근에서 해빙특성계측 현장시험이 수행되었다. 우선 해빙의 두께와 눈 두께, 해빙의 표면에서 해수면까지의 거리 자료(freeboard)는 선박에서 해빙의 프리보드 계측

을 통한 해빙의 두께 추정에 관한 연구에 적용시킬 수 있으며, 실험적 해빙특성 자료는 빙해선박 또는 극한지 해양구조물의 구조설계 및 빙저항/하중 산정에 도움이 될 수 있는 자료로서 활용도가 높을 것으로 판단된다. 본 연구를 통해 수행된 결과를 정리하면 다음과 같다.

본 연구항해에서 해빙의 집적도는 작년보다 급격히 줄어들었고 현장시험이 수행된 빙판의 경우 두께는 1.3~3.0m 정도로서 주로 2년생 빙에서 계측시험이 수행되었다. 빙해역 현장시험을 통해 해빙의 재료특성을 분석한 결과 해빙의 표면 부근을 제외한 염도는 평균 1.35~1.78% 정도였으며, 해빙이 성장하는 과정에서 염수 배출로 인해 깊이가 깊어짐에 따라 증가하는 경향을 나타내었고 해빙의 깊이별 온도 분포는 $-0.13 \sim -1.17^{\circ}\text{C}$ 정도로서 깊어질수록 온도가 낮아지는 결과를 보였다. 또한 밀도는 상부표면에서는 눈이 일부 포함되어 평균 $0.770\text{g}/\text{cm}^3$, 중간부분에서는 $0.896\text{g}/\text{cm}^3$, 하부에서는 $0.916\text{g}/\text{cm}^3$ 정도가 측정되었다. 결정구조의 경우 입자형과 기동형 구조를 나타내었으며, 성장과정에 따라 두 가지 구조가 혼합된 형태도 관측되었다. 또한 경험식을 통해 계산된 굽힘강도는 대략 250~550kPa 정도를 나타내었다.

특히 빙해선박의 극지해역 운항 시 선박에 작용하는 빙저항 성분 중 쇄빙과정 시 발생하는 저항이 전체저항에 가장 큰 영향을 미치게 되는데, 이 때 빙판의 굽힘강도 및 두께가 쇄빙저항 추정 시 주요변수로 작용하게 된다(Spencer & Jones, 2001). 또한 극한지 해역에 설치되는 극지용 해양구조물의 경우 빙판의 관입 시 구조물에 작용하는 수평 빙하중은 구조물에 작용하는 빙압력과 빙판의 두께, 압축강도가 주요변수로 작용하는데, 이들의 관계를 통해 구조물의 설계 빙하중을 산정할 수 있다(American Petroleum Institute, 1995).

그러므로 본 연구를 통해 계산된 굽힘강도와 해빙 두께 실측결과 및 실험적 해빙의 압축강도 자료의 추가 확보를 통해 Chukchi Borderland 지역에서 제반활동을 수행하는 구조물 또는 이 해역을 통항하는 빙해선박에 작용하는 빙하중/저항 산정을 위한 기초 자료로 활용할 수 있을 것으로 판단된다. 아울러, 전자기 유도 장비를 이용해 해빙에서 겉보기 전도도 측정을 통해 빙두께를 추정하였고 실측결과와의 비교분석을 통해 빙두께 추정식의 정도를 검증한 결과 도출된 빙두께 추정식의 경우 신뢰성이 상당히 높음을 입증하였다.

향후 연구에서는 지속적인 실험적 현장시험을 통한 해빙의 재료특성 DB 구축과 함께 해빙의 성장과정과 염도, 염수 체적비, 공극률 변화, 해빙의 열전도도 등에 따른 해빙 재료특성의 상관관계 분석을 통해 해빙의 두께 및 강도 예측 모델 개발이 추가적으로 수행되어야 할 것으로 판단된다.

후 기

본 논문은 한국해양연구원 대덕분원 일반과제인 “극지해역 해빙공학 특성 해석 및 계측기술 개발 (PES142C)” 과제의 연구비 지원으로 수행된 결과임.

참 고 문 헌

- American Petroleum Institute, 1995. *Recommended Practice for Planning, Designing, and Constructing Structures and Pipelines for Arctic Conditions*. ANSI/API RP 2N, Washington, DC.
- Cox, G.F.N. & Weeks, W.F., 1974. Salinity variations in sea ice. *Journal of Glaciology*, 13, pp. 109–120.
- Cox, G.F.N. & Weeks, W.F., 1982. Equations for determining the gas and brine volumes in sea ice samples. *Cold Region Research and Engineering Laboratory*, Report 82–30, Hanover, NH.
- Comiso, J.C., 2003. Large-scale characteristics and variability of the global sea ice cover, in *Sea Ice, An Introduction to its Physics, Chemistry, Biology, and Geology*. edited by D. Thomas and G. S. Dieckman, pp. 112–140, Blackwell Publishing, Malden, USA.
- Holt, B. Kanagaratnam, P. Gogineni, S.P. Ramasami, V.C. Mahoney, A. & Lytle, V., 2009. Sea ice thickness measurement by ultrawideband penetrating radar: First results. *Cold Regions Science and Technology*, 55, pp.33–46.
- Jeong, S.Y. & Lee, C.J., 2010. Measurement of Sea Ice Thickness in the Arctic Ocean, *The Proceedings of the Autumn Meeting of the Society Of Naval Architects of Korea*, Changwon, Republic of Korea, 21–22 October 2010.
- Jeong, S.Y. Choi, G.G. & Kim, S.H., 2011. Sea Ice Material Properties of Chukchi Sea. *The Proceedings of the Autumn Meeting of the Society Of Naval Architects of Korea*, Mokpo, Republic of Korea, 3–4 November 2011.
- Maykut, G.A., 1986. The surface heat and mass balance. *The Geophysics of Sea Ice*, NATO ASI Series B: Physics, 146, *Plenum Press*, New York, 395–464.
- NSIDC, 2011. *National Snow and Ice Data Center* <http://nsidc.org/arcticseaicenews>
- Pounder, E.R. & Stalinski, P., 1960. General Properties of Arctic Sea Ice. *Paper to be presented to International Union of Geodesy and Geophysics*, July 1960, pp.25–34.
- Spencer, D. & Jones, S.J., 2001. Model-Scale/Full-Scale Correlation in Open Water and Ice for Canadian Coast Guard "R-Class Icebreakers. *Journal of Ship Research*, 45(4), pp.249–261.
- Timco, G. & O'Brien, S., 1994. Flexural strength equation for sea ice. *Cold Regions Science and Technology*, 22, pp. 285–298.
- Timco, G.W. & Frederking, R.M.W., 1996. A review of sea ice density. *Cold Regions Science and Technology*, 24(1), pp.1–6.
- Toyota, T.T. Kawamura, K.I. Ohshima, H. Shimoda & Wakatsuchi, M., 2004. Thickness distribution, texture and stratigraphy, and a simple probabilistic model for dynamical thickening of sea ice in the southern Sea of Okhotsk. *Journal of Geophysical Research*, 109, C06001.
- Weeks, W.F. & Lee, O.S., 1958. Observations on the Physical Properties of Sea-ice at Hopedale Labrador. *Arctic*, 11, pp. 134–155.
- Wadhams, P., 2000. *Ice in the Ocean*. Gordon and Breach Science Publishers, 2000.

정 성 엽

최 걸 기