전자기 유도 장비를 이용한 북극해 해빙의 두께측정

정성엽^{1,†} · 이춘주¹
한국해양연구원 대덕분원¹

Measurement of Sea Ice Thickness in the Arctic Ocean Using an Electromagnetic Induction Instrument

Seong-Yeob Jeong^{1,†} · Chun-Ju Lee¹
Korea Ocean Research & Development Institute Daedeok Branch¹

Abstract

The ice trials of the first Korean icebreaking research vessel "ARAON" were performed at the Arctic Ocean in July–August 2010. The sea ice concentrations of Arctic Ocean were 4/10 to 10/10 and the range of sea ice thickness was roughly 1.0 to 3.5m. In this research, sea ice thickness characteristics at the old ice floes were determined from results of drill hole and apparent conductivity measurements. Especially we measured apparent conductivity using an electromagnetic induction instrument (EM31–MK2) and estimated the sea ice thickness through the empirical equation from Cold Regions Research & Engineering Laboratory, CRREL. The results of estimated sea ice thickness were compared to drill hole measurement results and then, we suggest the new empirical equation to estimate sea ice thickness of single layer type sea ice during the summer season of Arctic Ocean by curve fitting approach to these data.

Keywords : Sea ice concentration(해빙 집적도), Sea ice thickness(해빙 두께), Electromagnetic induction instrument(전자기 유도 장비), CRREL(미국 육군 한랭지연구소), Single layer type sea ice(단일층 구조 해빙)

1. 서 론

최근 북극해 주변 해빙의 분포가 지속적인 감소추세를 보이고 있어 북극해 항로에 대한 빙해선박의 운항 가능성은 점점 더 커지고 있다. 빙해선박의 운항조건 중 북극 해빙의 두께는 상당히 중요한 정보로서, 해빙두께는 선박의 쇄빙성능 및 설계강도를 결정하기 위한 자료로 활용된다. 해빙의 두께를 측정하는 가장 일반적인 방법은 쇄빙선을 이용한 실선계측이다. 캐나다의 경우 자국 해안 경비대(Canadian Coast Guard, CCG) 소속의 쇄빙선 "Amundsen" 호를 이용해 보퍼트해(Beaufort Sea)를 운항하면서 현장시험을 통해 해빙두께를 측정하고 정찰용 헬리콥터의 하부에 전자기 유도 장비를 부착한 후 해빙에서 겉보기 전도도(apparent conductivity, mS/m) 값을 측정한 후 자료 분석을 통해 해빙의 구조적 형태를 파악하고 있다(Holladay, et al., 2010).

또한 일본은 쇄빙선 "Shirase" 호의 선측에 전자기 유도 장비를 부착한 후 빙해역 운항을 통해 해빙의 두께에 관한 정보를 수집하고 있다(Uto, et al., 2006). 국내의 경우 그 동안 쇄빙연구선이 확보가 되질 않아 해빙의 두께에 관한 정보는 위성사진을 이용한 방법과 함께 국외의 자료를 활용하는 방법으로 제한되었지만, 국내 최초의 쇄빙연구선 "아라온" 호가 2009년 11월말에 건조가 완료됨으로서 국내에서도 북극해 빙상환경에 대한 조사 및

연구를 수행할 수 있는 기반이 구축되었다.

본 연구에서는 한국해양연구원 부설 극지연구소의 쇄빙연구선 "아라온" 호를 이용해 2010년 7월 15일부터 8월 13일까지 수행된 북극해 실선시험을 통해 추코트해(Chukchi Sea) 및 캐나다 보퍼트해 주변에서 해빙의 두께를 측정하였다. 우선 시험지역에서 시추장비(ice auger)를 이용해 해빙의 두께를 측정한 후 전자기 유도 장비(EM31–MK2)를 활용하여 해빙에서 겉보기 전도도 값을 측정하였다. 또한 측정된 결과를 바탕으로 미국 육군 한랭지연구소(Cold Regions Research & Engineering Laboratory, CRREL)에서 제안한 빙두께 추정식을 사용해 해빙의 두께를 추정하였고 실측 자료를 바탕으로 겉보기 전도도와 해빙 두께와의 관계 분석을 통해 북극해 여름철 단일층 구조를 가진 해빙의 두께를 추정하기 위한 새로운 경험식을 도출하였다.

2. 2010년 북극해 빙상환경

이번 북극해 계측시험에서는 여름철 북극해의 추코트해와 보퍼트해 부근을 운항하면서 해빙의 두께를 측정하였다. 1차 시험은 북위 73도 서경 168도 부근에서 수행되었으며, 2차와 3차 시험은 북위 77도 서경 159도 부근에서 수행되었다. 마지막 4차 시험은 북위 78도 서경 159도 부근에서 수행이 되었다. 실험역 빙

상정보 중 해빙의 집적도(sea ice concentration)는 선박이 운항하는 주변 수 km 이내에서 해면이 얼음으로 덮여있는 면적의 평균정도를 나타내는 것으로 0/10~10/10 단계로 표현할 수 있는데, 0/10 단계는 해빙이 존재하지 않는 개수역(open sea) 상태를 나타내고 10/10 단계는 전체 해면이 해빙으로 덮여있는 정도를 나타낸다(Choi, 2010). 1차 시험이 수행된 7월 20일의 경우 해빙의 집적도는 4/10~6/10 단계 정도였으며, 빙상환경은 주로 유빙(pack ice)과 얼음조각(rubble ice)으로서, 1년생 빙(first-year ice)과 2년생 빙(second-year ice)으로 구성되었고 해빙의 두께는 0.93~2.35m 정도였으며, 빙판의 크기는 길이와 폭이 130m, 100m 정도였다. 2차 시험이 수행된 8월 3일 해빙의 집적도는

Fig. 1 Test ice polygon #1 with ice thickness measurement location(20 July, 2010)

Fig. 2 Test ice polygon #2 with ice thickness measurement location(3 August, 2010)

Fig. 3 Test ice polygon #3 with ice thickness measurement location(4 August, 2010)

Fig. 4 Test ice polygon #4 with ice thickness measurement location(5 August, 2010)

또한 3차 시험이 수행된 8월 4일의 경우 해빙의 집적도는 7/10~8/10 단계 정도였고 해빙은 길이 280m, 폭 100m 정도로서 2년생 빙과 두꺼운 1년생 빙으로 구성되었으며, 해빙의 두께는 1.04~2.40m 정도였다. 마지막 4차 시험이 수행된 8월 5일의 경우 해빙의 집적도는 9/10~10/10 단계 정도였으며, 해빙은 길이 300m, 폭 110m 정도로서 2년생 빙과 두꺼운 1년생 빙, 빙맥(ice ridge) 등으로 구성되었고 해빙의 두께는 1.35~3.48m 정도였다(Jeong & Lee, 2010; Choi, et al., 2011).

7/10~8/10 단계 정도였고 대부분 2년생 빙과 두꺼운 1년생 빙으로 구성되었으며, 빙구(Hummock)의 분포 정도는 60% 정도였다. 또한 시험빙판의 크기는 길이와 폭이 각각 200m, 80m 정도였으며, 해빙의 두께는 1.43~3.45m 정도였다. 해빙의 융해정도(melting ratio)는 1~5단계로 구분할 수 있는데, 해빙의 표면 위에 생긴 물웅덩이의 정도로서 구분할 수 있다. 1~2단계는 해빙 표면이 대부분 눈으로 덮여있는 상태를 의미하고(Fig. 1) 3단계는 눈의 일부가 녹기 시작하는 단계를 나타내며(Fig. 4), 4~5단계는 눈이 녹으면서 표면에 물웅덩이가 본격적으로 생성되는 단계를 의미한다(Fig. 2, 3). 2, 3차 시험의 경우 해빙의 융해정도는 4~5단계로서 본격적인 융해 단계에 접어들었음을 알 수 있다.

3. 해빙의 두께 측정

북극해 빙상정보 중 가장 큰 비중을 차지하는 부분이 해빙의 두께이다. 이는 선박의 쇄빙과정에서 선측에 부착된 표식을 통해서 대략적인 확인이 가능하나 가장 정확한 방법은 직접 하선한 후 시추장비를 이용해 시추작업을 수행한 다음 해빙의 두께를 측정하는 것이다. 특히 해빙의 두께는 해빙의 강도 및 선박의 운항

가능여부 등을 추정할 수 있는 주요변수로서 본 연구에서는 아래와 같이 세 가지 방법을 이용해 해빙의 두께를 측정하였다.

- (1) 육안관측(ice watch)
- (2) 빙판의 시추작업(ice drilling holes)
- (3) 전자기 유도 장비를 이용한 계측(EM31-MK2 surface survey)

육안관측은 대년간의 경험을 가진 빙항법사(ice navigator)가 빙판에 직접 하선한 후 해빙의 빙질상태 및 발달정도, 물웅덩이(puddle)의 융해정도와 색상 그리고 빙맥 또는 빙구 등의 유무를 통해 해빙의 대략적인 두께를 파악한다. 하지만 이는 상당한 전문성이 요구되는 작업이다. 해빙의 두께를 측정하는 방법 중 직접 하선한 후 시추장비를 이용해 시추작업을 수행하고 빙두께를 측정하는 방법이 가장 정확한 방법이다. 특히 이 과정에서 해빙의 두께 계측 지점을 미리 선정된 후 선정된 지점에서 눈 두께(snow depth)를 우선적으로 측정한다. 그 다음 시추장비를 이용해 시추작업을 수행한 후 두께 측정용 줄자(ice thickness gauge)를 이용해 해빙의 두께를 측정한다. 또한 눈 두께를 제외한 해빙의 표면에서 해수면까지의 깊이(freeboard)도 함께 측정하며, 이를 통해 대략적인 해빙의 밀도를 파악할 수 있다. 하지만 이러한 방법은 해빙의 면적이 클수록 많은 시간이 소요되므로 최근 전자기 유도 장비(electromagnetic induction instrument)를 활용한 해빙의 두께 측정법이 많이 사용되고 있다.

특히 이번 북극해 실선시험에서는 효율적인 해빙의 두께 측정을 위해 전자기 유도 장비가 함께 사용되었다. 해빙의 두께 측정에 사용된 장비인 EM31-MK2는 캐나다 Geonics Ltd.의 제품으로 초기 지질조사를 위한 목적으로 제작된 전자기 장비의 일종이다. 하지만 최근 캐나다 해안경비대를 비롯해, 미국 육군 한랭지연구소 등에서는 전자기 유도 장비를 이용해 선체에 부착 또는 정찰용 헬리콥터에 설치한 후 빙해역을 운항하면서 해빙의 두께를 측정하고 있으며, 이를 통해 지속적으로 해빙의 두께에 대한 데이터베이스를 구축하고 있다(Holladay, et al., 2010). 전자기 유도 장비를 이용해 해빙 두께를 계측하는 경우 해빙에서 겉보기 전도도 값을 계측한 후 그 결과를 바탕으로 미국 육군 한랭지연구소에서 제안한 빙두께 추정법을 사용해 해빙의 두께를 추정하였다. 전자기 유도 장비를 이용한 해빙의 두께 측정 시 전자기 유도 장비가 해빙의 표면에 가까울수록 보다 정확한 겉보기 전도도 값이 측정되며, 쌍극자 모드(dipole mode)가 수평방향일 경우 코일의 방향이 해빙 표면과 수평한 방향에서 겉보기 전도도가 측정되고 해빙이 단일층(single-layer) 구조의 형태를 가질수록 보다 정확한 값이 측정된다. 그러나 해빙이 이중층 구조(double-layer) 또는 다중층 구조(multi-layer)일 경우 계측된 겉보기 전도도 값은 오차가 발생할 수 있으므로 이를 보완하기 위해 전자기 유도 장비로 계측한 지점에 대해서 일정간격으로 시추장비를 이용해 실측값을 함께 계측하는 방법도 사용되고 있다. 언급한 바와 같이 실험역에서 전자기 유도 장비를 이용한 해빙의 두께 측정 방법은 아래와 같으며, Fig. 5는 전자기 유도 장비를 이용해 해빙에서 겉

보기 전도도 값을 측정하는 모습을 보여주고 있다.

- (1) 두께 측정을 위해 선정된 지점에서 눈 두께를 측정한다.
- (2) 눈 두께 측정한 후, 시추장비를 이용해 시추작업을 수행하고 두께 측정용 줄자를 이용해 두께를 측정한다.
- (3) 그 다음 해빙의 표면으로부터 EM31-MK2 장비까지의 높이를 측정한 후 선정된 지점을 따라 쌍극자 모드를 수평방향으로 설정한 후 겉보기 전도도(apparent conductivity, mS/m) 값을 측정한다.
- (4) 마지막으로 측정된 겉보기 전도도 값을 바탕으로 경험식(CRREL-empirical equation)을 이용해 해빙의 두께를 추정한 후 실측치와 비교한다.

Fig. 5 Ice thickness measurement using an electromagnetic induction sensor, EM31-MK2

4. 해빙두께 측정결과 분석

이번 북극해 빙두께 계측시험에서는 총 4회에 걸쳐 해빙에 직접 하선한 후 시추장비를 이용해 시추작업을 수행하고 두께를 측정한 다음 전자기 유도 장비를 이용해 해빙에서 겉보기 전도도를 측정하였다. Table 1에는 시험이 수행된 시험빙판(old ice floe)에 대한 계측결과가 정리되어 있다.

4.1 시험빙판 1 (Old ice #1)

첫 번째 계측시험이 수행된 시험빙판 1은 73°02'29.34"N, 168°26'55.92"W 부근에 위치한 빙판으로서 길이는 130m, 폭 100m 정도였다. 우선 해빙의 두께 측정은 20m 간격으로 총 6개 지점에서 시추장비를 이용해 해빙의 두께를 측정하고 시추작업이 수행된 곳에서 전자기 유도 장비를 이용해 해빙에서 겉보기 전도도를 측정하였다. 또한 시추작업이 수행된 지점 부근에서 추가로 전자기 유도 장비를 이용해 겉보기 전도도를 측정하였다. Fig. 6에는 계측된 해빙의 두께와 함께 전자기 유도 장비에 의해 추정된 결과가 함께 도시되어 있다.

Fig. 6 Measured height vs. estimated height at old ice #1 with one to one curve

Fig. 6에서 Measured height (m)는 해빙의 두께와 눈 두께, 해빙의 표면과 EM31-MK2 장비까지의 거리 합을 나타낸다. 그리고 Estimated height, Z (m)는 경험식(CRREL-empirical equation, Eq. (1))을 이용해 해빙 하부의 바닥에서 전자기 유도 장비까지의 거리를 추정된 값이다. 그러므로 이러한 과정을 통해 실제 빙해역 현장에서 두께를 측정하기 위한 지역의 눈 두께에 대한 정보와 함께 해빙의 표면에서 전자기 유도 장비까지의 거리를 알면 대략적인 해빙의 두께를 추정할 수 있다.

첫 번째 계측시험에서 해빙의 빙상상태는 단일층 구조가 아닌 다중층 구조로서 실측치와 추정치를 비교할 경우 오차가 발생함을 알 수 있다. 이는 전자기 유도 장비의 계측방법에 따른 오차로서 겉보기 전도도 측정과정에서 해빙층 사이에 해수가 존재할 경우 계측된 겉보기 전도도 값은 해수층 부근에서 측정된 값이므로 자료 분석 시 오차가 포함될 수 있음에 유의해야 한다.

4.2 시험빙판 2 (Old ice #2)

두 번째 계측시험에서 시험빙판 2의 크기는 길이 200m, 폭 80m 정도로서 $77^{\circ}01'36.72''N$, $159^{\circ}53'22.26''W$ 부근에서 수행되었다. 두 번째 계측시험의 경우 10m 간격으로 총 17개 지점에서 시추장비를 이용해 해빙의 두께를 측정하였고 5m 간격으로 33개 지점에서 전자기 유도 장비를 이용해서 겉보기 전도도를 측정하였다. 또한 시험빙판 2의 3차원 형상을 대략적으로 파악하기 위해 폭 방향과 길이방향으로 각각 5m 간격으로 겉보기 전도도를 측정하였다. Fig. 7에는 계측된 해빙의 두께와 함께 전자기 유도 장비에 의해 추정된 결과가 함께 도시되어 있다. Fig. 7의 경우 실측값과 추정값은 비교적 좋은 상관관계를 보여준다. 특히 두 번째 계측시험의 경우 해빙의 빙상상태는 단일층 구조로 형성되어 전자기 유도 장비에 의해 계측된 결과가 실측값과 거의 유사함을 알 수 있다.

Fig. 8은 시험빙판 2의 단면형상을 도시한 그림이다. 여기서 20~40m 구간은 추정된 결과의 오차로 판단되며, 이 구간을 제외

Fig. 7 Measured height vs. estimated height at old ice #2 with one to one curve

Fig. 8 Sea ice thickness profiles of estimated and measured at old ice #2 along the distance

Fig. 9 3 Dimensional form of old ice #2

한 대부분의 구간에서 실측값과 추정값이 거의 유사함을 알 수 있다. Fig. 9는 전자기 유도 장비를 이용해 165개 지점에서 각각의 겉보기 전도도를 측정한 후 그 결과를 바탕으로 두 번째 계측시험이 수행된 시험빙판 2의 3차원 형상을 추정한 그림이다. Fig. 9에서 Distance가 0m인 지점은 St. 1을 나타내고 160m인 지점은 St. 17을 나타낸다. 또한 폭 방향에서 0m인 지점을 중심으로 길이방향으로 시추장비를 이용해 해빙의 두께를 측정하였다(Fig. 8 참조). 특히 폭 방향으로 -5m인 곳에서 길이방향으로 0~5m 구간과 50~65m 구간에 비교적 두꺼운 2년생 빙이 분포하고 있

음을 알 수 있다.

4.3 시험빙판 3 (Old ice #3)

세 번째 계측시험은 77°02'32.58"N, 159°46'57.24"W 부근에서 수행되었다. 시험빙판 3의 크기는 길이 280m, 폭 100m 정도였으며, 시추장비 및 전자기 유도 장비를 이용한 계측시험의 경우 10m 간격으로 해빙의 두께를 측정하였다. 하지만 50m 지점의 경우 큰 규모의 물웅덩이로 인해 두께측정은 수행하지 못하였다.

Fig. 10 Measured height vs. estimated height at old ice #3 with one to one curve

Fig. 11 Sea ice thickness profiles of estimated and measured at old ice #3 along the distance

Fig. 10은 세 번째 시험이 수행된 시험빙판 3에서 실측값과 추정값을 함께 도시한 것으로 역시 좋은 상관관계를 보여주고 있다. 또한 Fig. 11은 시험빙판 3에 대한 단면형상을 도시한 그림으로서, 세 번째 계측시험의 경우도 해빙이 단일층 구조로서 추정값의 정도는 상당히 높은 편임을 알 수 있다.

4.4 시험빙판 4 (Old ice #4)

네 번째 계측시험이 수행된 시험빙판 4는 77°59'26.22"N, 159°37'26.16"W 부근에 위치한 빙판으로서 길이가 300m, 폭

110m 정도였으며, 20m 간격으로 총 11개 지점에서 해빙의 두께를 측정하였다. 특히 시험빙판 4의 경우 첫 번째 해빙과 유사한 다중층 구조로서 이러한 경우 시추작업 과정에서 해빙의 상부층과 하부층이 분리가 되거나 두께 측정용 줄자를 이용한 해빙의 두께 측정 시 해빙층 사이에서 계측되는 경우가 많으므로 실측치 또한 오차를 포함하는 경우가 있다. Fig. 12는 시험빙판 4에서 계측된 실측값과 전자기 유도 장비를 이용해 추정된 값을 도시한 그래프이다. 여기서 실측값과 추정값은 일대일 직선 주위에 산재(scatter)되어 있음을 알 수 있다. 이는 언급한 바와 같이 실측과정 및 전자기 유도 장비를 이용한 데이터 취득 과정에서 발생한 오차로 판단된다.

Fig. 12 Measured height vs. estimated height at old ice #4 with one to one curve

이번 북극해 해빙의 두께 측정에서 두 번째와 세 번째의 빙판은 해빙의 구조가 단일층 구조로서 전자기 유도 장비에서 계측된 값과 거의 일치함을 알 수 있으나 첫 번째와 마지막 네 번째 시험이 수행된 빙판의 경우 해빙의 구조가 다중층 구조로서 전자기 유도 장비를 통해 계측된 결과와 다소 차이가 존재한다. 이는 시추장비를 이용해 시추 작업을 수행하는 과정에서 하부 층의 해빙이 밀려나거나 두께 측정용 줄자를 이용해 빙두께를 측정하는 과정에서 발생한 오차로 판단된다. 그러므로 다양한 해빙에 대한 전자기 유도 장비의 측정을 통해 겉보기 전도도 값을 측정함으로써 해빙의 바닥에서 전자기 유도 장비까지의 거리에 대한 경향을 파악할 수 있으며, 이를 바탕으로 선형회귀분석(linear regression analysis)을 통해 독자적인 경험식을 산출할 수 있다. 미국 육군 한랭지연구소에서 제안한 빙두께 추정식(Jones, et al., 2001)은 식(1)과 같으며, 이번 북극해 해빙 두께 계측 시험을 통해서 도출된 경험식은 식(2)와 같다.

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

$$Z = 7.945 - 1.028 \ln(\sigma) \quad (2)$$

여기서, Z 는 눈 두께와 해빙의 두께, 해빙의 표면에서 전자기

유도 장비까지 거리의 합을 나타내고 σ 는 계측된 겉보기 전도도 (apparent conductivity, mS/m) 값을 나타낸다.

본 북극해 계측 시험을 통해 도출된 추정식(식 2)과 미국 육군 한랭지연구소에서 제안한 추정식(식 1)의 관계를 Fig. 13에 도시하였다. Fig. 13에서 식 (1)과 식 (2)의 경향은 다소 차이가 존재하는데, 이번 북극해 계측시험이 여름철에 이루어졌으며, 해빙의 상태 또한 단일층 구조와 다중층 구조로 형성되어 전자기 유도 장비를 이용해 겉보기 전도도 값을 계측하는 과정에서 오차가 포함된 결과로 판단된다. 그러므로 단일층 구조를 가진 시험빙판 2와 시험빙판 3의 결과를 바탕으로 새롭게 도출한 추정식은 식 (3)과 같으며, 식 (3)과 식 (1)을 바탕으로 해빙의 두께에 대한 추정값과 측정결과를 Fig. 14에 도시하였다.

$$Z = 10.78 - 1.584 \ln(\sigma) \quad (3)$$

Fig. 13 Apparent conductivity vs. estimated height at four old ice floes

단, Fig. 14에서 추정값과 실측값은 해빙의 표면에서 전자기 유도 장비까지의 거리를 뺀 해빙의 두께와 눈 두께를 합한 결과이다. 단일층 구조에서 계측된 결과를 바탕으로 식(1)과 식(3)을 이용해 해빙의 두께를 추정하는 결과 두 경험식이 유사한 경향을 보이지만 새롭게 도출된 식 (3)이 해빙의 두께가 2.5m 이하인 경우 비교적 추정값이 실측값을 비교적 잘 반영하고 있으나, 빙두께가 2.5m 이상인 경우 추정값이 실측값 보다 다소 낮은 경향을 나타내므로 전자기 유도 장비의 계측 높이에 따른 영향 분석과 함께 도출된 추정식에 대한 추가적인 연구 및 검증이 필요할 것으로 판단된다.

언급한 바와 같이 북극해 빙판의 경우 단일층 또는 다중층 구조의 빙상조건이 존재하게 되는데, 이는 풍속과 해류에 의한 영향으로 빙판이 서로 적층되는 과정에서 다중층 구조의 빙판이 형성하게 되며, 주로 다년생 빙에서 관측될 가능성이 높다. 특히 다년생 빙은 1년생 빙과는 육안으로 쉽게 구분할 수 있지만, 이를 통해서 해빙의 구조적 형태를 판단하기는 쉽지 않다. 그러므로

Fig. 14 Comparison of Eq. (1) and Eq. (3) for measured height vs. Estimated height at old ice #2 and old ice #3

전자기 유도 장비를 이용해 해빙의 두께를 추정하는 경우 해빙의 발달정도 및 빙상상태를 함께 파악하는 것이 결과분석에 있어 보다 효율적임을 알 수 있다. 또한 전자기 유도 장비를 이용한 전도도 측정 시 측정간격 줄이고 전자기 유도 장비와 해빙 표면과의 거리를 줄이는 방법도 두께 추정 시 오차를 줄일 수 있을 것으로 판단된다. 이와 함께 다중층 구조의 경우 해빙층 사이에 해수층 또는 슬러시 타입의 해빙이 존재하므로 각각의 전도도 특성 분석과 함께 계절적 영향 및 빙상조건과 해빙의 발달정도 등을 고려한 별도의 관계식 도출에 관한 연구가 함께 수행되어야 할 것으로 판단된다.

5. 결 론

본 연구에서는 2010년 7월 15일부터 8월 13일까지 쇄빙연구선 "아라온" 호를 활용한 북극해 실선시험 계측기간 동안 총 4회에 걸쳐 북극해 해빙의 두께를 측정하였다. 계측과정에서 시추장비를 이용한 계측과 함께 전자기 유도 장비를 활용해 해빙의 두께를 추정하였으며, 그 결과를 정리하면 다음과 같다.

시험빙판 1과 시험빙판 4의 경우 해빙의 빙상상태는 1년생 빙과 2년생 빙으로 구성되었으며, 다중층 구조의 형태로 해빙층 사이에 해수가 존재할 경우 전자기 유도 장비에 의해 계측된 값을 통해 해빙의 두께를 추정하는 과정에서 실측치와 다소 차이가 발생함을 확인할 수 있다.

전자기 유도 장비를 사용해 겉보기 전도도 값을 측정하는 과정에서 빙판의 상층부와 하층부 사이에 해수층이 존재할 경우 겉보기 전도도 값에 오차가 포함될 수 있으므로 해빙의 구조적 형상에 따른 해빙의 두께 추정에 관한 연구가 추가 수행되어야 할 것으로 보인다. 하지만 단일층 구조의 형태를 가지는 시험빙판 2와 시험빙판 3에서는 계측된 결과와 추정치가 거의 유사함을 알 수 있는데, 본 연구를 통해 도출된 추정식의 경우 단일층 구조를 가

진 여름철 북극해 해빙의 두께 추정 시에 보다 적합할 것으로 판단되나, 향후 연구에서는 도출된 추정식에 대한 검증이 필요할 것으로 보인다.

아울러, 쇄빙연구선을 활용한 지속적인 북극해 해빙 두께 계측

시험과 함께 빙해역 운항 시 전자기 유도 장비의 선측 설치 및 정찰용 헬리콥터 하부 등에 설치함으로써 보다 광범위한 지역에 대한 해빙의 두께 자료를 확보한다면 북극해의 다양한 빙상환경에 대한 데이터베이스 구축이 가능할 것으로 판단된다.

Table 1 Summary of measured results for four old ice floes

Old ice	#1	#2	#3	#4
Coordinates	N 73°, W 168°	N 77°, W 159°	N 77°, W 159°	N 78°, W 159°
Test date	July 20, 2010	August 3, 2010	August 4, 2010	August 5, 2010
Sea ice concentration	4/10–6/10	7/10–8/10	7/10–8/10	9/10–10/10
Ice condition	Pack ice, rubble ice, first-year ice, second year ice	Thick first-year ice, second-year ice, hummock, melting pond	Thick first-year ice, second-year ice, melting pond	Thick first-year ice, second-year ice, ice ridge
Layer type of sea ice	Multi layer type	Single layer type	Single layer type	Multi layer type
Ice floe size (m) (length X width)	130 X 100	200 X 80	280 X 100	300 X 110
Stage of melting	1–2	4–5	4–5	3
Distance (m)	100	160	210	200
Measuring space (m)	20	10	10	20
Ice thickness (m)	0.93 to 2.35	1.43 to 3.45	1.04 to 2.40	1.35 to 3.48
Mean Freeboard (m)	0.46	0.28	0.25	0.35
Mean Snow depth (m)	0.15	0.09	0.08	0.10

후 기

본 논문은 지식경제부 산업원천기술개발사업인 "빙해선박의 극지항로 안전운항기술 및 극저온 빙성능 시험평가 기법 개발" 중 "극지용 저온 설계 및 Winterization 평가 기술 (PNS168C)" 과 한국해양연구원 대덕분원 일반과제인 "수조 및 대형터널의 새로운 시험기법 개발" (PES141A) 과제 및 "극지해역 해빙공학 특성 해석 및 계측기술 개발 (PES142C)" 과제의 연구비 지원으로 수행된 결과임.

참 고 문 헌

- Choi, K.S., 2010. Field Test Manual for Sea Ice Conditions and Ice Properties. *2010 Sea Ice Conditions and Sea Ice Properties Measurement Manual Report*.
- Choi, K.S. Lee, C.J. Rim, C.W. & Kim, H.S., 2011. Strength Characteristics of Arctic Sea Ice from Ice Field Tests of the Icebreaking Research Vessel ARAON. *Journal of Society of Naval Architects of Korea*, 48(3), pp.254–259.
- Holladay, S. Prinsenberg, S. & Peterson, I., 2010. Measuring Arctic Neasshore Properties with a Multi-Frequency Airborne Electromagnetic Sensor, *Proceedings of the 20th International Offshore and Polar Engineering Conference, ISOPE*, Beijing, China, pp.1134–1140.
- Jones, S.J. Kirby, C. Meadus, C. Tucker, W. Gagon, J. & Elder, B., 2001. Sea Ice Properties on the USCGC HEALY Ice Trials, *Proceedings of the 16th International Conference on Port and Ocean Engineering under Arctic Conditions, POAC*, Ottawa, Canada, pp.945–954.
- Jeong, S.Y. & Lee, C.J., 2010. Measurement of Sea Ice Thickness in the Arctic Ocean, July–August 2010, *2010 The Society Of Naval Architects of Korea*, Changwon, Republic of Korea, 21–22 October 2010.
- Uto, S. Shimoda, H. & Ushio, S., 2006. Characteristics of sea-ice thickness and snow-depth distributions of the summer landfast ice in Lu'tzow-Holm Bay, East Antarctica. *Annals of Glaciology*, 44(1), pp.281–287.