

추코트와 보퍼트 해에서 계측된 해빙 두께와 건현과의 관계

정성엽^{*} · 최경식^{**} · 조성락^{*} · 강국진^{*} · 이춘주^{*}

^{*}한국해양과학기술원 부설 선박해양플랜트연구소

^{**}한국해양대학교 해양공학과

Relation Between Measured Sea Ice Thickness and Freeboard on Chukchi and Beaufort Seas

Seong-Yeob Jeong^{*}, Kyungsik Choi^{**}, Seong-Rak Cho^{*}, Kuk-Jin Kang^{*} and Chun-Ju Lee^{*}

^{*}Korea Research Institute of Ships and Ocean Engineering, Daejeon, Korea

^{**}Department of Ocean Engineering, Korea Maritime and Ocean University, Busan, KOREA

KEY WORDS: Sea ice thickness 해빙 두께, Freeboard 눈 두께 제외한 해빙의 표면에서 해수면까지의 깊이, Hydrostatic equilibrium 정역학적 평형

ABSTRACT: The thickness of Arctic sea ice is a particularly significant factor in Arctic shipping and other ice-related research areas such as scientific sea ice investigations and Arctic engineering. In this study, the relation between the measured sea ice thickness and freeboard on the Chukchi and Beaufort Seas during the 2010 and 2011 Arctic cruise of the icebreaking research vessel "Araon" were considered. An assumption of hydrostatic equilibrium was used to estimate the ice thickness as a function of the freeboard. Then, to examine the degree of error, a sensitivity analysis of the thickness estimation of the sea ice was conducted. The error in the density and depth of the snow and the error in the density of the seawater were subordinate parameters, but the density of the ice and the freeboard were the primary parameters in the error calculation. The presented relation formula showed fairly close agreement between the calculated and measured results at a freeboard of >0.24 m.

1. 서 론

북극 해빙의 두께는 대기와 해양간의 열 교환과 해수면 복사 열 및 해수의 유동과 관련이 있고 해빙의 열역학적 상태에 따라 알베도(Albedo)에 영향을 미쳐 두께가 변하게 된다. 최근 북극 해빙의 두께를 측정하기 위해 실선을 이용한 현장시험과 함께 레이더 또는 고도계를 이용해 계측된 해빙의 건현 결과를 해빙의 두께로 환산하는 방법이 사용되고 있는 추세이다. 현장시험에서는 전자기 유도 장비를 이용한 겉보기 전도도 측정을 통해 해빙의 두께를 추정하는 방법과 Upward looking sonar(ULS) 장비를 이용해 수중에서 해빙의 두께를 추정하는 방법이 사용되고 있는데, 이러한 해빙의 두께 측정기술은 시추 장비를 이용해 해빙을 시추한 후 두께를 측정하는 계측기법보다 효율적이기 때문에 방법적인 측면에서 장점을 가지고 있다. 또한 고도계를 이용해 해빙의 건현을 측정하고 빙 두께를 추정

하는 방법은 주로 인공위성 또는 항공기를 이용하는 경우에 적합한 방법으로서 실해역 현장시험에서 자주 사용되고 있다.

Giles et al.(2007)에 따르면 해빙의 두께 추정 시 눈 두께와 밀도, 해빙의 밀도 등은 해빙의 부력과 건현을 변화시키는 주요 원인인데, 빙 밀도는 해빙의 성장정도에 따라 다르고 눈의 밀도나 두께는 북극해의 계절적인 영향이 큰 변수이므로 이러한 정보를 이용해 해빙의 두께를 추정하는 방법은 오차를 일부 포함하지만 현장시험의 시 · 공간적 제약성이 크기 때문에 해빙의 두께와 건현의 관계 분석에 대한 연구가 활발히 진행되고 있는 상황이다. Alexandrov et al.(2010)은 해빙을 1년생 빙(First-year ice)과 다년생 빙(Multi-year ice)으로 구분한 다음 레이더 고도계를 이용해 계측된 건현 자료를 두께로 환산한 후 현장시험 결과와의 비교를 통해 해빙의 두께와 건현에 대한 관계를 분석하였다. 또한 Forsstrom et al.(2011)은 바렌츠(Barents Sea) 해와 스발바르(Svalbard) 해역에서의 현장시험과 함께 위성자료를 이용해 해빙

Received 9 July 2014, revised 25 August 2014, accepted 24 October 2014

Corresponding author Seong-Yeob Jeong: +82-42-866-3432, jsyeop@kriso.re.kr

© 2014, The Korean Society of Ocean Engineers

It is noted that this paper is revised edition based on research report of KRISO 2012.

두께와 건현의 상관관계에 대한 해석을 수행한 바 있다. 지난 2010년과 2011년 7월, 8월 북극 추코트 해(Chukchi Sea)와 보퍼트 해(Beaufort Sea) 부근에서 쇄빙연구선 “아라온” 호를 이용한 실해역 현장시험을 통해 해빙의 재료특성 계측을 수행하였고 전자기 유도 장비와 해빙 시추장비, 빙 두께 측정용 줄자를 이용해 빙 두께와 건현, 눈 두께 등을 함께 측정하였다.

본 연구에서는 현장시험을 통해 계측된 여러 결과들 중에서 해빙의 두께와 건현, 눈 두께 자료를 이용해 정역학적 평형(Hydrostatic equilibrium) 가정을 바탕으로 이들의 관계를 해석하고 해빙의 두께 추정 시 주요 오차원인을 분석하였다. 또한 기 발표된 해빙의 두께와 건현과의 관계식과 실해역 현장시험 결과와의 비교·분석과 함께 새로운 해빙의 두께와 건현과의 관계식을 도출하였고 이를 관계를 검토를 통해 향후 북극해 운항 시 선박에서 해빙의 건현 계측을 통한 해빙의 두께 추정 및 DB 구축의 가능성을 확인하였다.

2. 북극 실해역 현장시험

실해역 현장시험은 2010년과 2011년 7, 8월 북극 추코트 해와 보퍼트 해 주변에서 수행되었으며, 해빙의 온도, 두께, 눈 두께, 염도, 밀도, 결정구조, 강도 등이 계측되었다. 우선 2010년 북극 해 현장시험에서는 총 4회에 걸쳐 현장시험을 수행하였다. 1차 시험은 북위 73도 서경 168도 부근에서 수행되었는데, 해빙의 집적도는 대략 4/10 ~ 6/10 정도였으며, 유빙(Pack ice)과 얼음 조각(Rubble ice)이 다수 분포되어 있었다. 또한 빙상조건은 1년 생 빙과 2년생 빙(Second-year ice)으로 구성되었고 해빙의 두께는 1.20m ~ 3.32m 정도였다. 2차와 3차 시험은 북위 77도 서경 159도 부근에서 수행되었는데, 이 때 해빙의 집적도는 7/10 ~ 8/10, 9/10 ~ 10/10 정도였으며, 해빙의 두께는 각각 2.37m

~ 4.38m, 1.04m ~ 2.40m 정도였다. 또한 빙판에는 다양한 형태의 빙구(Hummock)가 분포되어 있었고 전반적으로 빙판의 표면 위에 물웅덩이(Puddle)가 다수 분포되어 있었다. 4차 시험은 북위 80도 서경 159도 부근에서 수행이 되었는데, 해빙의 집적도는 9/10 ~ 10/10 정도로서 대부분의 해역이 해빙으로 덮혀있었고 1.35m ~ 3.48m 정도의 두꺼운 2년생 빙으로 구성되어 있었다(Jeong et al., 2010).

2011년 북극해 현장시험은 총 2회가 수행되었는데 1, 2차 현장시험 모두 북위 78도, 동경 173도 부근에서 수행되었다. 특히 현장시험이 수행된 북극 Chukchi Borderland 지역은 현재 해빙의 분포 및 두께 변화가 가장 심한 지역으로서 해빙의 두께 및 집적도 변화 등의 다양한 해빙특성 연구에 있어 관심 지역이다. 1차 현장시험이 수행된 시험빙판의 경우 두께는 1.3m ~ 2.95m 정도였고 2차 시험이 수행된 빙판의 두께는 1.02m ~ 1.69m 정도였다. 현장시험의 경우 대부분의 1년생 빙은 녹고 있는 단계였으며, 2 ~ 4m 정도의 2년생 빙과 7m ~ 12m 정도의 빙맥(Ice ridge)도 함께 계측되었고 빙판위에 많은 물웅덩이들이 관측되었다(Jeong and Choi, 2011). 아래 Fig. 1에는 현장시험에 수행된 빙판의 크기와 모습을 보여주고 있다.

실해역 현장시험에서 계측된 항목은 해빙의 두께, 눈 두께, 해빙의 건현, 온도, 염도, 밀도, 결정구조 등으로서 해빙의 두께와 건현과의 관계를 분석하기 위해 빙 두께와 건현, 눈 두께 자료를 별도로 분리해서 해석을 수행하였다. 이 때 계측된 해빙의 두께와 건현 자료를 바탕으로 계측 오차로 판단되는 값은 제외시킨 후 자료 해석 작업을 수행하였다. 또한 이들의 관계 분석을 위해 북극해 여름철 해수와 눈의 밀도는 문헌에서 사용된 값을 사용하였다(Alexandrov et al., 2010). 특히 현장시험 자료는 북극해의 여름철인 7월과 8월 사이에 관측된 결과로서 해빙의 두께를 측정하기 위해 빙판 위에서 10m 또는 20m

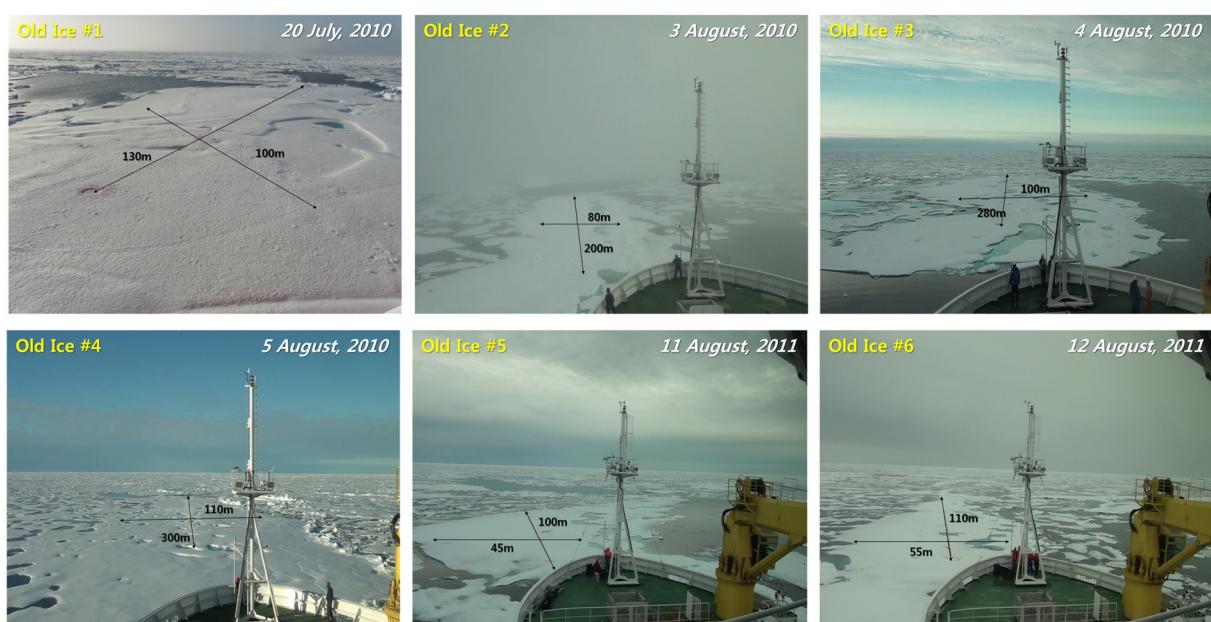


Fig. 1 Old ice floes at field measurement(July-August, 2010-2011)

Table 1 Measured snow depth, freeboard and ice thickness for old ice floes #1, #2, #3, #4, #5 and #6

Location	Month [Year]	Old Ice No.	Snow depth [cm]	Freeboard [cm]	Ice Thickness [cm]
N73°02'489, W168°26'932	7(2010)	#1	17.0	16.0	124.0
N77°01'615, W159°53'368	8(2010)	#2	9.0	34.0	296.0
N77°01'625, W159°53'359	8(2010)	#2	9.0	35.0	258.0
N77°01'645, W159°53'340	8(2010)	#2	7.0	28.0	212.0
N77°01'651, W159°53'336	8(2010)	#2	8.0	24.0	197.0
N77°01'654, W159°53'335	8(2010)	#2	7.7	26.0	222.0
N77°01'659, W159°53'332	8(2010)	#2	13.0	25.0	224.0
N77°02'563, W159°46'930	8(2010)	#3	9.0	27.0	208.0
N77°02'570, W159°46'921	8(2010)	#3	10.0	31.0	231.0
N77°02'589, W159°46'890	8(2010)	#3	7.3	29.0	237.0
N77°02'590, W159°46'890	8(2010)	#3	6.3	30.0	225.0
N77°02'596, W159°46'885	8(2010)	#3	5.5	25.0	228.0
N77°02'617, W159°46'859	8(2010)	#3	6.5	11.0	116.0
N77°02'622, W159°46'858	8(2010)	#3	7.0	11.0	123.0
N77°59'418, W159°37'509	8(2010)	#4	11.0	36.0	276.0
N77°59'402, W159°37'567	8(2010)	#4	11.0	40.0	335.0
N77°59'396, W159°37'589	8(2010)	#4	10.0	52.0	348.0
N77°59'389, W159°38'014	8(2010)	#4	11.0	34.0	265.0
N77°59'56.32", E173°55'08.31"	8(2011)	#5	14.0	12.5	210.0
N77°59'56.10", E173°54'57.27"	8(2011)	#5	12.0	27.5	216.0
N77°59'09.74", E173°53'29.27"	8(2011)	#6	10.0	10.5	115.0
N77°59'11.08", E173°53'32.40"	8(2011)	#6	12.0	17.0	158.0
N77°59'11.36", E173°53'33.06"	8(2011)	#6	12.0	15.5	157.0
N77°59'11.63", E173°53'33.36"	8(2011)	#6	10.5	21.0	167.0
N77°59'11.85", E173°53'33.89"	8(2011)	#6	10.5	17.5	140.0
N77°59'12.15", E173°53'34.49"	8(2011)	#6	10.2	15.5	150.0

간격으로 계측지점을 표시한 다음 철직자를 이용해 적설층의 깊이를 측정하였다. 그리고 빙판위에 눈을 치운 다음 시추장비(2 inch ice auger)를 이용해 빙판을 시추하고 빙두께 측정용 줄자(Ice thickness gauge)를 이용해 해빙의 두께와 건현을 측정하였다. 일반적으로 해빙의 건현은 레이더 또는 레이저 고도계를 이용하면 쉽게 계측할 수 있는데, 정역학적 평형 가정을 이용하면 해빙의 건현을 두께로 환산할 수 있다. 본 연구에서는 총 26 개 지점에서의 현장시험 결과를 바탕으로 해빙의 두께와 건현과의 관계를 분석하였다. Table 1에는 현장시험에서 계측된 눈 두께와 건현, 해빙의 두께 결과가 정리되어 있다.

3. 눈과 해빙의 재료특성 자료

3.1 눈 두께와 밀도

북극해에서 빙판 위의 눈은 이른 여름철부터 녹기 시작하는데, 눈이 녹으면서 빙판의 표면에 물웅덩이를 형성시키고 이러

한 물웅덩이들에 의해 해빙의 상부표면과 하부가 급격하게 녹기 시작한다. 특히 해빙 표면에 눈이 존재할 경우 눈의 단열효과에 의해 해빙 하부의 해수가 결빙되는 것을 방해하지만 눈의 높은 알베도 효과에 의해 여름철 기간 동안 해빙의 표면이 녹는 속도를 낮추기도 한다. 대체적으로 눈의 두께는 북극해 지역의 겨울철에 해당하는 4월과 5월이 가장 두꺼우며, 여름철인 7월과 8월사이가 가장 얇은 특징을 나타낸다. 북극해 중앙부에 위치한 다년생 빙의 경우 5월 달의 평균적인 눈 두께는 0.34m 정도로서 불확실성(Uncertainty)은 0.06m 정도이다. 1년생 빙의 경우 이보다 훨씬 적은 편인데, 해빙의 두께가 1.6m 이하인 경우 눈 두께는 0.05m 정도이며, 이보다 두꺼운 해빙의 경우 눈 두께는 0.08m 정도이다. 또한 북극해에서 3월부터 5월까지 1년생 빙에서 눈의 밀도는 대략 $0.324 \pm 0.050 \text{ g/cm}^3$ 정도이고 다년생 빙에서는 $0.320 \pm 0.020 \text{ g/cm}^3$ 로서 큰 차이가 없는 편이므로 1년생 빙과 다년생 빙의 눈의 재료특성은 눈의 밀도가 아닌 두께와 관련이 있음을 알 수 있다(Warren et al., 1999).

3.2 해빙의 밀도

해빙의 밀도는 염분과 함께 결정구조 속에 포함된 기포와 밀접한 관련이 있다. 특히 기포가 없는 해빙의 경우 밀도는 대략 $0.919\sim0.974\text{g}/\text{cm}^3$ 정도인 반면, 기포가 다량으로 포함된 경우 밀도에는 $0.840\text{g}/\text{cm}^3$ 정도이고 상부 표면의 눈이 포함된 해빙의 경우 밀도는 $0.770\text{g}/\text{cm}^3$ 까지 감소하게 된다(Wadhams, 2000). 또한 Timco and Frederking(1996)의 연구결과에 따르면 1년생 빙의 경우 해빙의 밀도는 $0.900\sim0.940\text{g}/\text{cm}^3$ 정도이고 다년생 빙은 $0.720\sim0.910\text{g}/\text{cm}^3$ 정도인데, 특히 해수면 윗부분에서 채취된 시편의 경우 1년생 빙보다 밀도가 낮은 이유는 1년생 빙보다 다년생 빙안에 많은 미세 기포가 포함되어 있기 때문이다. 해빙의 밀도는 자료해석 과정에서 중요한 정보 중 하나로서 밀도 값에 따라 해석 결과에 영향을 미치게 된다. 현재 사용되고 있는 해빙의 밀도를 측정하는 방법은 아래와 같이 크게 네 가지로 구분할 수 있다.

- (1) 해빙의 질량과 부피와의 관계
- (2) 해빙의 침수법(Submersion method)
- (3) 비중(Specific gravity) 측정
- (4) 해빙의 두께와 건현과의 관계

위에서 언급한 방법들의 경우 각각의 장·단점을 가지고 있는데, 본 연구에서는 해빙의 밀도를 계산하기 위해 정역학적 평형 가정을 바탕으로 건현과의 두께의 관계를 통해 밀도를 계산하였다. 아래 식 (1)에는 해빙의 밀도를 계산하는 식이 정리되어 있으며, Fig. 2에는 해빙과 눈에 대한 변수들이 정리되어 있다.

$$\rho_i = \rho_w - \frac{\rho_w F_i + \rho_{sn} H_{sn}}{H_i} \quad (1)$$

여기서, 해빙의 두께(H_i), 건현(F_i), 눈 두께(H_{sn})는 현장시험 자료를 이용하였고 눈의 밀도(ρ_{sn})와 해수의 밀도(ρ_w)는 각각 $0.320\pm0.020\text{g}/\text{cm}^3$ 과 $1.024\pm0.001\text{g}/\text{cm}^3$ 을 사용하였으며, 식 (1)을 통해 계산된 다년생 빙의 밀도는 $0.888\pm0.010\text{g}/\text{cm}^3$ 이다.

3.3 해빙의 두께 추정 시 오차 분석

언급한 바와 같이 정역학적 평형 가정을 통해 해빙의 두께를 계산할 수 있다. 앞서 정리한 변수들을 바탕으로 식 (1)을 해빙의 두께와 건현, 눈의 두께 관계로 다시 정리하면 식 (2)와 같이 표현되는데, 식 (2)는 흔히 레이더 고도계를 이용한 해빙의 건현 계측을 통해 두께 추정 시 사용되는 식이다(Forsstrom et al., 2011).

$$H_i = \frac{\rho_w}{(\rho_w - \rho_i)} F_i + \frac{\rho_{sn}}{(\rho_w - \rho_{sn})} H_{sn} \quad (2)$$

여기서, 해수의 밀도와 눈의 밀도는 앞서 언급했던 값을 이용하였고 해빙의 밀도와 건현, 눈 두께는 현장시험 결과를 사용하였다. Giles et al. (2007)은 레이저 고도계를 이용해 건현을 측정

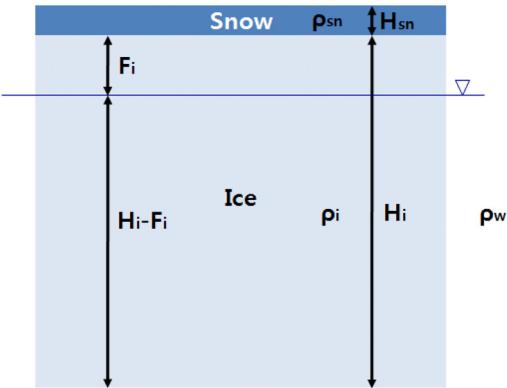


Fig. 2 The schematic drawing of sea ice and snow (KRISO, 2012)

함에 있어서 빙 두께 추정 시 오차를 식 (3)과 같이 정의하였다.

$$\begin{aligned} \epsilon_r^2 = & \epsilon_{F_i}^2 \left(\frac{\rho_w}{(\rho_w - \rho_i)} \right)^2 + \epsilon_{H_{sn}}^2 \left(\frac{\rho_{sn}}{(\rho_w - \rho_i)} \right)^2 \\ & + \epsilon_{\rho_{sn}}^2 \left(\frac{H_{sn}}{(\rho_w - \rho_i)} \right)^2 \\ & + \epsilon_{\rho_w}^2 \left(\frac{F_i}{(\rho_w - \rho_i)} - \frac{F_i \rho_w}{(\rho_w - \rho_i)^2} - \frac{H_{sn} \rho_{sn}}{(\rho_w - \rho_i)^2} \right)^2 \\ & + \epsilon_{\rho_i}^2 \left(\frac{F_i \rho_w}{(\rho_w - \rho_i)^2} + \frac{H_{sn} \rho_{sn}}{(\rho_w - \rho_i)^2} \right)^2 \end{aligned} \quad [cm^2] \quad (3)$$

여기서 ϵ_{ρ_i} , ϵ_{ρ_w} , $\epsilon_{\rho_{sn}}$ 은 해빙과 해수, 눈의 밀도에 대한 불확실성을 나타내고 $\epsilon_{H_{sn}}$, ϵ_{F_i} 는 눈 두께와 해빙의 건현에서의 불확실성을 나타낸다.

아래 Table 2에는 빙 두께 추정 시 오차계산을 위해 건현과 눈 두께, 해빙 밀도, 눈 밀도, 해수의 밀도에 대한 대표값(Typical value)과 불확실성(Uncertainty) 정도가 정리되어 있는데, 여기서 불확실성(Uncertainty)은 표준편차를 의미한다.

또한 Fig. 3에는 식 (3)을 통해서 계산된 오차 정도가 도시되어 있다. Fig. 3에서 보면 해빙 두께의 오차는 건현의 힘수로 나타낼 수 있는데, 해빙의 두께 계산 시 발생하는 오차들 중에서 해빙의 밀도와 건현 계측 시 불확실성이 매우 큼을 알 수 있고 눈이나 해수의 밀도, 눈 두께에 따른 오차는 상대적으로 작음을 알 수 있다. 그러므로 해빙의 밀도와 건현의 불확실성이 해빙

Table 2 Typical values and uncertainties for 2010 & 2011 field test results

Parameter	Field test results	
	Typical value	Uncertainty
Ice freeboard [cm]	23.960	8.745
Snow depth [cm]	9.860	2.683
Ice density [g/cm^3]	0.888	0.010
Snow density [g/cm^3]	0.320	0.020
Sea water density [g/cm^3]	1.024	0.001

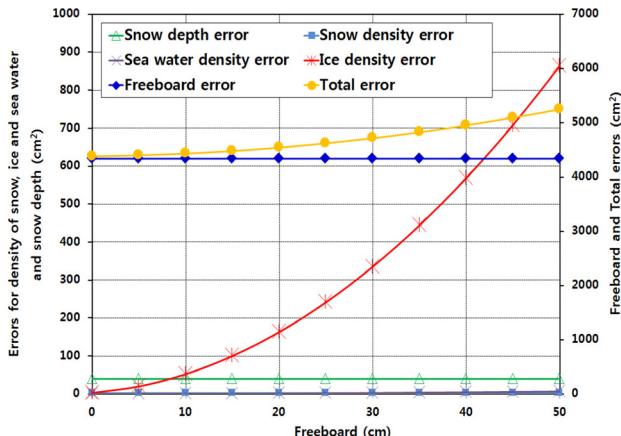


Fig. 3 Error terms in the ice thickness calculation

두께 계산 시 주요 오차 원인임을 알 수 있다. 아울러, 해빙의 밀도는 계절적인 영향이 큰 변수이므로 오차 추정이 각 계절별로 수행된다면 보다 신뢰성이 높아질 수 있을 것으로 판단된다.

언급한 바와 같이 해빙의 두께는 건현에 대한 1차 함수로 표현할 수 있는데, Table 2에 정리된 건현과 눈 두께, 해빙 밀도, 눈 밀도, 해수의 밀도 값을 바탕으로 식 (2)를 통해 다년생 빙의 두께와 건현의 관계를 다음과 같이 표현할 수 있다.

$$H_i = 7.53F_i + 0.05 \quad (4)$$

여기서 해빙의 두께와 건현의 단위는 m이다.

4. 해빙두께와 건현과의 관계 비교분석

해빙의 두께와 건현의 관계에 대한 연구는 주로 위성을 이용한 해빙의 두께 또는 건현 측정 시 수행되었다. 기 수행된 연구를 살펴보면 러시아 Mironov and Sen'ko(1995)는 북극점(North Pole-29) 부근에서 1987년 7월부터 1년 동안 해빙의 두께, 눈 두께, 밀도 등을 계측하였고 이를 통해 1년생 빙(식 (5))과 다년생 빙(식 (6))에 대한 해빙의 건현과 두께의 관계를 다음과 같이 정의하였다.

$$H_i = 11.0F_i - 0.12 \quad (5)$$

$$H_i = 15.29F_i - 0.657 \quad (6)$$

또한 Wadhams(2000)는 그린란드 북쪽에서 다년생 빙에 대한 에어본 라이더(Airborne lidar)와 잠수함의 소나 자료의 분석을 통해 건현과 빙 두께의 관계를 다음과 같이 나타내었다.

$$H_i = 9.04F_i \quad (7)$$

Giles et al.(2007)은 Warren et al.(1999)의 연구결과를 바탕으로 두께와 건현의 관계식을 다음과 같이 표현하였다.

$$H_i = 9.42F_i + 0.88 \quad (8)$$

아울러, Alexandrov et al.(2010)은 Tonboe et al.(2009)에서 정리된 건현의 불확실성과 대표값, 해수의 밀도, 눈 두께, 해빙의 밀도에 대한 정보를 바탕으로 1년생 빙(식 (9))과 다년생 빙(식 (10))에 대한 두께와 건현의 관계를 다음과 같이 정의하였다.

$$H_i = 9.46F_i + 0.15 \quad (9)$$

$$H_i = 6.24F_i + 1.07 \quad (10)$$

Forsstrom et al.(2011)은 바렌츠해와 스발바르 부근 프람해협(Fram Strait)해역에서 1999년부터 2008년까지 계측된 현장시험 자료를 바탕으로 다음의 같은 관계식을 도출하였다. 또한 Fig. 4에는 식 (4)~(11)에 대한 해빙의 두께와 건현의 관계를 함께 도시하였다.

$$H_i = 7.37F_i + 0.44 \quad (11)$$

Fig. 4에서 2004년과 2006년 실해역 현장시험 자료는 노르웨이 쇄빙선 “R/V Lance”와 러시아 쇄빙선 “R/V Mikhail Somov” 호를 이용해 바렌츠 해 부근에서 계측된 결과이다 (Alexandrov et al., 2010). Fig. 4에서 보면 건현이 대략 0.24m 이하인 경우 Mironov and Sen'ko(1995)와 Alexandrov et al.(2010)이 도출한 관계식의 경향이 거의 유사함을 알 수 있는데, 현장시험 결과와도 비교적 유사함을 알 수 있다. 하지만 건현이 증가하는 경우(>0.24m) 실측 결과보다 과대평가(over estimated)된 결과를 보여주고 있다. 또한 Giles et al.(2007)이 제안한 건현과 두께와의 관계는 2010년과 2011년 현장시험 결과와 상당한 차이를 보여주고 있다. Wadhams(2000)는 그린란드 북쪽에서 빙판이 여러 층으로 적층된 형태의 빙상조건(Heavy deformed ice)에서 건현과 두께의 관계를 도출했기 때문에 현장시험 결과와 차이가 존재하는 것으로 판단된다. 또한 Forsstrom et al.(2011)의 관계식은 식 (4)와 유사한 경향을 나타

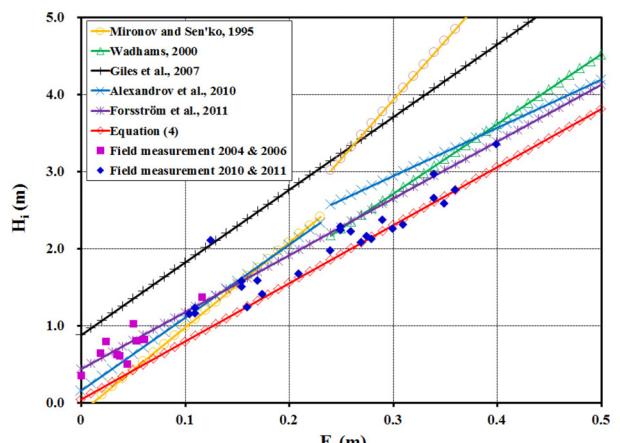


Fig. 4 Comparison for relation between ice thickness and freeboard

내지만, 건현이 0.24m 이하의 얇은 빙에서는 현장시험 결과와 유사한 경향을 나타내고 있으나, 건현이 0.24m 이상인 두꺼운 빙에서는 본 연구에서 도출된 식(4)가 현장시험 결과를 비교적 잘 반영하고 있음을 보여준다. 다만, 이는 2010년과 2011년 7월, 8월 북극 추코트 해와 보퍼트 해 부근에서 계측된 자료들의 특징이므로 도출된 식(4)에 대한 추가 검증이 필요할 것으로 판단된다. 북극해 항로 개방 시 빙해선박 또는 내빙선박의 운항은 주로 여름철에 빈번해 질 것으로 예상되는데, 이 때 빙상조건은 얇은 2년생 빙 또는 다년생 빙이 분포할 가능성이 높은 편이다. 특히 선박 운항 시 다년생 빙 구간 보다는 주로 2년생 빙 구간으로 우회하면서 운항할 것으로 가정하면, 본 관계식을 통해 도출된 해빙의 두께가 운항항로 선정 및 선속 결정에 있어서 중요한 정보로 사용될 수 있을 것으로 기대된다.

5. 결 론

본 연구에서는 2010년과 2011년 북극 추코트 해와 보퍼트 해 주변에서 수행된 현장시험 자료를 바탕으로 해빙의 두께와 건현의 관계를 분석하였고 기 발표된 관계식과의 비교 분석을 수행하였다. 현장시험 자료는 주로 2년생 빙 또는 다년생 빙에서 수행된 결과로서 정역학적 평형 가정을 바탕으로 현장시험 자료에 대한 해석 작업을 수행하였고 이를 통해 건현, 눈 두께, 빙 밀도에 대한 대표값과 불확실성 정도를 분석하였다. 그리고 눈의 밀도와 해수의 밀도는 문헌조사를 통해 입수된 값을 사용하였다. 우선 빙 두께 추정 시 오차 분석을 통해 해빙의 밀도와 건현 계측 시 불확실성 정도가 결과해석 시 주요 오차원인임을 입증하였다. 또한 기 도출된 건현과 두께의 관계식과 현장시험 결과의 비교·분석을 수행한 결과 건현이 0.24m 이하인 경우 현장시험 결과와 유사한 경향을 나타내었지만 건현이 0.24m 이상인 경우 다소 차이가 발생함을 확인하였다. 그리고 북극해 다양한 빙상환경에 따라 해빙의 밀도, 두께 등에 영향을 미쳐 실측 결과보다 다소 과대평가되는 경향을 보였다. 본 연구에서 도출된 관계식은 건현이 0.24m 이상인 경우 현장시험 결과를 비교적 잘 반영하고 있음을 확인하였으나, 이에 대한 추가 검증이 필요할 것으로 판단된다.

현재 북극해 주변 해빙의 두께를 측정하기 위해 현장시험과 함께 인공위성 또는 항공기에서 마이크로파 고도계를 이용해 준거 타원체면(Reference ellipsoid)으로부터 고도를 측정하고 해수면과 해빙 표면까지의 거리 측정을 통해 건현을 계측한 후 해빙의 두께를 추정하고 있다. 향후 연구에서는 보다 정도 높은 해빙의 두께를 추정하기 위해 다양한 빙상조건과 북극해 전체 계절에 대한 건현, 눈 두께, 해빙의 밀도에 대한 자료 확보 및 분석을 바탕으로 도출된 관계식에 대한 검증 및 보완작업이 필요할 것으로 판단되며, 선측에서 레이더 고도계를 이용한 해빙의 건현 계측 시스템이 구축된다면 차년도 북극해 운항 시 전체 항행 구간에 대한 해빙두께 DB 구축이 가능할 것으로 판단된다.

후 기

본 연구는 한국해양과학기술원 부설 선박해양플랜트연구소 주요과제(PES171C)의 연구결과 중 일부임을 밝히며, 연구비 지원에 감사드립니다.

References

- Alexandrov, V., Sandevn, S., Wahlin, J., Johannessen, O.M., 2010. The Relation between Sea Ice Thickness and Freeboard in the Arctic. *The Cryosphere Discuss*, 4(2), 641-661.
- Forsstrom, S., Gerland, S., Perersen, C.A., 2011. Thickness and Density of Snow-covered Sea Ice and Hydrostatic Equilibrium Assumption from in Situ Measurements in Fram Strait, the Barents Sea and the Svalbard coast. *Annals of Glaciology*, 52(57), 261-270.
- Giles, K.A., Laxon, S.W., Wingham, D.J., Wallis, D.W., Krabill, W.B., Leuschen, C.J., McAdoo, D., Manizade, S.S., Raney, R.K., 2007. Combined Airborne Laser and Radar Altimeter 15 Measurements over the Fram Strait in May 2002. *Remote Sensing of Environment* 111, 182-194.
- Jeong, S.Y., Lee, C.J., An, D.S., Hwang, P., 2010. Measurement of Sea Ice Thickness in the Arctic Ocean, July-August 2010. *The Society Of Naval Architects of Korea*, Changwon, Republic of Korea, 21-22 October 2010.
- Jeong, S.Y., Choi, G.G., 2011. A Measurement of Sea Ice Properties at Chukchi Borderland During the Summer. *The Journal of the Society of Naval Architects of Korea*, 49(1), 45-51.
- Korea Institute of Ocean Science & Technology(KIEST), Korea Research Institute of Ships and Ocean Engineering(KRISO), 2012. Research Report(BSPES149D-10196-6).
- Mironov, Y.U., Sen'ko, N.P., 1995. About Relation between Ice Thickness and Ice Draft. *Trudy Arkticheskogo I Antarkticheskogo Instituta*, 435, 47-54.
- Timco, G.W., Frederking, R.M.W., 1996. A Review of Sea Ice Density. *Cold Regions Science and Technology*, 24(1), 1-6.
- Tonboe, R.T., Pedersen, L.T., Haas, C., 2009. Simulation of the Satellite Radar Altimeter Sea Ice Thickness Retrieval Uncertainty. *The Cryosphere Discuss*, 3, 513-559.
- Warren, S.G., Rigor, I.G., Untersteiner, N., Radionov, V.F., Bryazgin, N.N., Aleksandrov, Y.I., Colony, R., 1999. Snow Depth on Arctic Sea Ice, *Journal of Climate*, 12, 1814-1829.
- Wadhams, P., 2000. *Ice in the Ocean*. Gordon and Breach Science Publishers.