

경험식을 이용한 유빙 얼음에서의 도달 속도 추정

김현수¹ · 한동화^{2,†} · 이재빈² · 정성엽³
인하공업전문대학 조선해양과¹
인하대학교 조선해양공학과²
선박해양플랜트 연구소(KRISO)³

An Estimation of Attainable Speed in Brash Ice using Empirical Formula

Hyun soo Kim¹ · Donghwa Han^{2,†} · Jae-Bin Lee² · Seong-Yeob Jeong³
Dept. of Naval Architecture and Ocean Engineering, Inha Technical College, Incheon, Korea¹
Dept. of Naval Architecture and Ocean Engineering, Inha University, Incheon, Korea²
Korea Research Institute of Ships & Ocean Engineering(KRISO), Deajeon, Korea³

This is an Open-Access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution Non-Commercial License(<http://creativecommons.org/licenses/by-nc/3.0>) which permits unrestricted non-commercial use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.

As ships operating on the Arctic route are exposed to various ice environments such as level ice, pre-swain, pack ice, ice ridge and brash ice, it is essential to estimate the ice resistance according to the ice environment. Methods for estimating the ice resistance include a method using mathematical model, numerical simulation, and a method using empirical formula. In this study, empirical formulas are used to estimate the ice resistance. The purpose of this study is to develop the ice resistance and attainable speed estimation program(I-RES) for brash ice. To develop the Brash ice attainable speed estimation algorithm, the environmental characteristics of the brash ice were analyzed, and the results of I-RES were evaluated by comparing the model test results of brash ice. The accuracy of I-RES for brash ice is around 20% in this study but it will be more developed near future with accumulating more model test results and calculation results.

Keywords : Brash ice(유빙 얼음), Brash ice resistance(유빙 얼음 저항), Attainable speed(도달 속도), Ice model test(얼음 모형 시험)

1. 서론

지구 온난화로 인한 환경 변화, Yamal LNG 선박의 성공적인 건조와 북극해 시운전, 러시아의 자원 개발 의지, 해운 및 물류 분야에서 북극해를 운하처럼 활용하고자 하는 시도 등 복합적인 요인으로 북극 항로에 대한 관심이 증대되고 있다.

조선의 관점에서 북극 항로를 운항하는 선박들은 얼음이 없는 항로를 운항하는 선박과 달리 얼음과의 충돌, 마찰, 방한 설비 등이 다양한 얼음 환경에 노출된다. 일반적으로 얼음에 의한 빙저항은 얼음이 없는 지역의 선체 저항에 비해 큰 값을 가지며, 선박의 초기 설계 단계에서 얼마만한 용량의 엔진이 필요한지를 결정하는 것이 가장 중요한 것으로 알려져 있다. 이를 위해 해석적인 방법과 모형시험 등 다양한 공학적인 방법이 동원되고 있다.

북극권에는 빙산(iceberg)이 있는 지역이외에 선박이 운항 가능한 지역에 다양한 얼음이 분포하고 있는데 넓은 지역에 평평하게 얼어있는 평탄빙(level ice), 크기가 다른 얼음 조각들이 떠있는 빙편 얼음(pack ice), 빙편과 평탄빙이 서로 겹치면서 형성되

는 빙맥(ice ridge), 선박이 자주 다니는 항로에 작은 얼음들이 서로 중첩되어 쌓여 있는 유빙 얼음(brash ice) 등 다양한 형태의 얼음이 존재한다. 얼음 형태 혹은 종류에 따라 빙저항은 매우 다른 값을 가지므로 얼음의 형태 혹은 종류에 따라 빙저항을 추정하는 방법의 정립이 절실하다.

빙저항을 추정하는 방법은 시뮬레이션을 이용한 방법, 경험식을 이용한 방법이 있다. 시뮬레이션을 이용한 방법은 비교적 정확한 결과를 얻을 수 있고, 결과 분석 또한 용이하다는 장점이 있다. 하지만 이 방법들은 선박과 얼음의 형상과 특성을 정의하는데 많은 시간이 소모 된다. 따라서 본 연구에서는 빙저항 추정을 위해 빠른 시간 안에 빙저항을 추정할 수 있는 경험식을 이용한 방법을 사용하였다.

본 연구의 목적은 기존 연구에서 평탄빙을 대상으로 개발되었던 빙저항 및 도달 속도 추정 프로그램(이하에서 "I-RES"라 명명함)의 적용 범위를 유빙 얼음까지 확장하여 빙저항을 추정하고 추정된 빙저항 값으로부터 엔진의 출력을 추정하고, 엔진과 추진기의 관계로부터 나오는 특성곡선으로부터 정해진 엔진 출력에서 선박이 낼 수 있는 도달 속도(attainable speed)를 추정하

는 과정을 정리하였다. 선행 연구에서 진행 되었던 연구 결과의 정확성과 타당성을 검증하기 위해 평탄빙, 미리 자른 얼음 (pre-swan), 빙편 얼음 환경에서의 모형 시험 결과와 I-RES 프로그램 결과를 비교하였다.

유빙 얼음의 빙저항 추정은 유빙 얼음의 환경 특성 분석을 통하여 유빙 얼음 빙저항 추정 알고리즘을 개발하였으며, 모형 시험과 비교를 통하여 경험식을 이용한 유빙 얼음 하에서 선박의 속도 추정 알고리즘을 검증하였다. 검증된 알고리즘을 반영하여 보완 개발된 I-RES 프로그램으로 북극항로를 운항하는 선박의 최대 엔진 출력의 결정할 수 있고, 해당 선박들의 쇄빙 성능을 고려하여 정해진 출력에서 도달 속도 추정 및 최적 항로의 결정과 운항 시간의 결정 등 북극항로를 운항하는 선박에 다양한 정보를 제공할 수 있도록 하였다.

2. 빙저항 추정 및 도달 속도 추정 프로그램 'I-RES'

2.1 'I-RES' 계산 과정

I-RES 프로그램은 Spencer (1992)의 경험식과 여러 경험식 (Shimansky, 1938; Enkvist, 1972; Poznyak & Ionov, 1981)을 이용하여 빙저항을 추정하고 이를 바탕으로 해당 선박의 도달 속도를 추정하는 프로그램이다. Fig. 1과 같이 이 프로그램은 빙저항 및 도달 속도를 추정하기 위해 4단계로 분류된다.

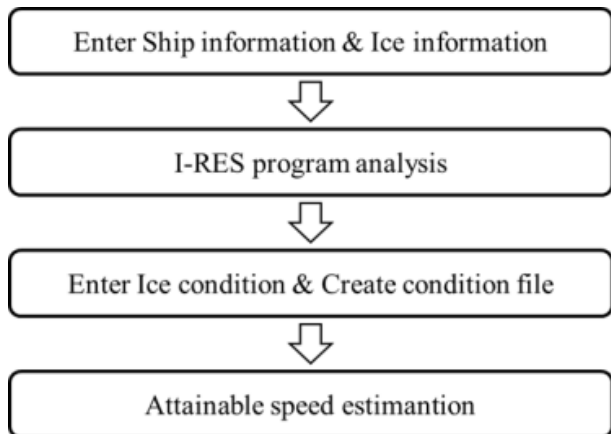


Fig. 1 Attainable speed estimation process

첫 번째 단계는 선박의 형상과 얼음을 정의하는 단계이다. 선박의 주요 치수, 선체의 설계 속도, 선체 표면 노드들의 좌표 값과 해당 좌표에서의 선체 표면에 대한 법선벡터 집합과 같은 정보를 *.igs 파일 또는 *.DA 파일(HCAD의 선형 정의 데이터 파일 확장자)로부터 추출한다. 또한, 빙 강도, 빙 밀도, 빙 두께와 같은 얼음 정보를 입력 할 수 있다.

두 번째 단계는 평탄빙 저항을 추정하는 단계이다. 첫 번째 단계와 같은 선형의 기하학적 정보와 얼음 정보를 바탕으로 경험식에 의거하여 평탄빙에 대한 빙저항을 추정한다.

세 번째 단계는 얼음 환경 조건을 정의(ice condition)하는 단계로 얼음 환경 조건에 따른 상관 계수를 정의 한다. I-RES 프로그램에서 제공하는 GUI(Graphical User Interface)를 이용해 평탄빙, 미리 자른 얼음, 빙편 얼음, 빙맥, 유빙 얼음과 같은 얼음의 환경 조건을 선택한 뒤 얼음 상태 파일을 생성한다.

네 번째는 도달 속도를 추정하는 단계이다. 생성된 얼음 상태 파일을 바탕으로 얼음을 위해 사용 가능한 여유 추진력을 계산하고, 주어진 엔진 출력에서 도달 가능한 속도를 계산 할 수 있다.

2.2 좌표계

사용된 좌표계 시스템은 Fig. 2과 같다. 기준점은 길이 방향(-x)은 선수 수선(FP, Fore Perpendicular), 폭 방향(y)은 중심선(center line), 깊이 방향(z)은 기선(base line)을 기준으로 하였다.

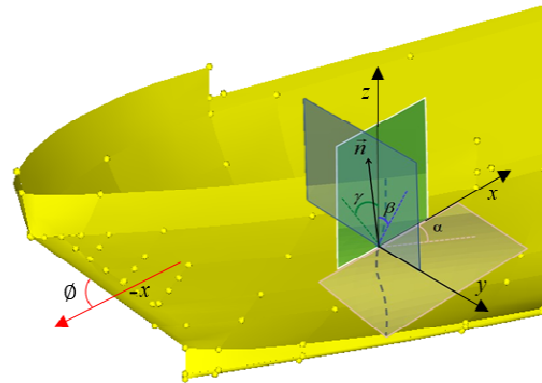


Fig. 2 Coordinate system

x-y 평면에서 수선의 임의의 점에서 접선(tangent line)을 그어 접선과 x축이 이루는 각을 α (수선면 각, water line angle)로 정의하였고, y-z 평면에서 정면도의 임의의 단면에서 접선을 그어 그 접선과 z축이 이루는 각을 β (종단면 각, section angle or frame angle)로 정의하였고, x-z 평면에서 임의의 횡단면에서 접선을 그어 그 접선과 z축이 이루는 각을 γ (횡단면 각, buttock angle)로 정의하였다. 또한 선수 형상(profile)을 x-z 평면에 그려서 선수 형상과 x축이 이루는 각도를 ϕ (선수각, profile angle)으로 정의하였다. 선체 표면의 임의의 점에서 법선 벡터(normal vector)를 \vec{n} 로 정의하였고, 각각의 x, y, z 방향 단위 벡터를 각각 $\vec{n}_x, \vec{n}_y, \vec{n}_z$ 로 정의하였다.

2.3 빙저항 추정 방법

Spencer에 따르면 전체 빙저항(R_T)은 물에 의해 발생하는 유체저항(R_{OW}), 얼음을 깰 때 발생하는 쇄빙저항(R_{Br}), 선저로 들어간 얼음의 부력에 의해 발생하는 빙 부력저항(R_{Bu}) 그리고 얼음 조각들을 밀어내는 빙 제거저항(R_{Cl}) 4가지 성분의 합으로 나타낼 수 있다 (Spencer, 1992).

$$R_T = R_{OW} + R_{Br} + R_{Bu} + R_{Cl} \quad (1)$$

Spencer 분류 방법으로 여러 학자들이 경험식을 제한하였고 본 연구에 적용된 방법은 다음과 같다. 쇄빙저항은 Shimansky (1938) 쇄빙저항 추정방법을 보완 없이 그대로 적용하였고, 빙 부력저항은 Enkvist (1972)가 평균 수심을 사용한 부력저항을 사용한 반면 본 연구에서는 계산의 정도를 높이기 위해 빙편 각각의 부력중심을 사용하여 부력저항을 계산하는 방법을 적용하였다. 빙 제거저항의 경우 Poznyak and Ionov (1981) 빙 제거저항 추정방법을 보완하여 사용하였다.

Poznyak and Ionov (1981) 방법은 약간의 보정을 통해 적용되었다. 'I-RES'는 선미 쇄빙도 가능하도록 구성되어 있는데 추진기가 두개 혹은 세 개가 장착되는 경우 끝단 부분에서 제거되는 평면이 진행 방향과 직각($\alpha = 90^\circ$)이 되면서 적분 값이 발산하는 문제를 해결하기 위해 실제 빙제거가 일어나는 평면이 고안되었다. Ionov는 만재흘수선(DLWL, Design Load Water Line) 평면에서 접선을 사용하여 접선과 x 축이 이루는 각도로 빙제거가 일어나는 것으로 생각하였으나, 본 연구에서는 Fig. 3와 같이 x 축과 벡터 \vec{d}_w 가 이루는 각 θ 를 이용하여 빙 제거 저항을 계산하였으며, 도출과정은 다음과 같다.

Fig. 3의 임의의 선박에서 만재흘수선 상의 한 점에서 한 번의 길이가 ds 인 미소 면적을 정의하고, 이 미소면적에 수직으로 작용하는 벡터를 빙 제거 벡터(clearing vector) \vec{d} 라 정의하고 벡터 \vec{d} 를 $X-Y$ 평면에 투영하여 구한 벡터를 \vec{d}_w 라하고, $Y-Z$ 평면에 투영하여 구한 벡터를 \vec{d}_s 라고 정의한다.

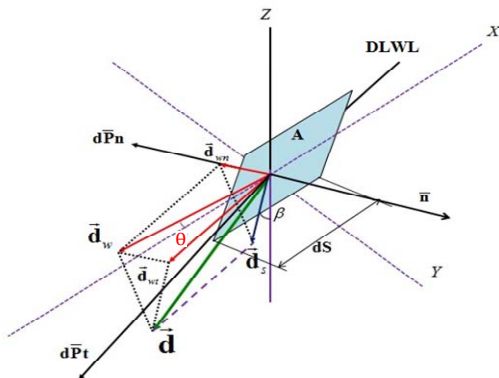


Fig. 3 Definition of clearing vector acting on micro area

벡터 \vec{d}_w 를 DLWL의 임의의 점에서 선체 표면 곡선에 대한 법선 방향과 빙 제거되는 방향에 대한 접선 방향으로 나누어 서로 직교하도록 표현하면 \vec{d}_{wn} 과 \vec{d}_{wt} 로 표현할 수 있다.

이 미소면적에 작용하는 압력을 P 라하고 빙 제거 시 발생하는 미소 압력을 dP 라고 하면 이 압력의 법선과 접선 방향 압력은 각각 dP_n 과 dP_t 로 정의할 수 있다. 또한 미소 면적에 x 방향

으로 작용하는 미소 압력을 dP_x , y 방향으로 작용하는 미소 압력을 dP_y 라고 하고 x 축과 벡터 \vec{d}_w 가 이루는 각을 θ 라 정의하면 식 (2)를 구할 수 있다.

$$dP_x = dP_n \sin\theta + dP_t \cos\theta \quad (2)$$

식 (2)은 물리적으로 빙 제거 상황에서 미소 면적에 작용하는 법선 및 접선 방향의 빙저항 성분을 의미하여 법선 방향은 압력항(pressure), 접선방향은 마찰항(friction)을 의미한다. 따라서 식 (2)를 x 의 변화에 따라 선수 끝단에서 선체중양부까지 적분하면 식 (5)와 같은 빙 제거 저항을 구할 수 있다. 위와 같이 새로 정의된 식 (5)는 적분 식에 포함된 θ 는 선형의 형상의 정체점(stagnation point)에서 θ 가 0이 되는 부분을 배제하고, $y'(x)$ 가 임의의 값을 가지기 때문에 선형 끝단에서도 계산이 가능하다.

본 연구에서는 위와 같이 수학적인 방법을 적용하여 빙 제거 저항 계산 시 발생하는 θ 의 발산 문제를 해결하였으며, 각 빙저항 요소에 대한 추정 식을 식 (3)~(5)에 나타내었다. 식 (3)~(5)에 따르면 쇄빙저항은 선수의 형상 및 각도에 의해서 영향을 받지만, 식 (3) Shimansky의 쇄빙저항은 속도에 영향 없이 순수하게 얼음이 전단에 의해서 파괴되는 저항값을 정의하고 있다. 쇄빙저항은 선속에 의해서는 영향을 받지 않으므로, 선속의 변화에 대해서는 상수 값을 가진다. 그리고 식 (5)와 같이 빙 제거저항의 경우 수선면에서의 선박과 얼음의 상호 작용만 고려한다.

$$R_{Br} = C\lambda\sigma_f h^2 B \frac{\int_0^{L/2} \frac{\tan^2\alpha \sqrt{1+\tan^2\alpha}}{1+\tan^2\alpha+\tan^2\beta} dx}{\int_0^{L/2} \frac{\tan\alpha \tan\beta \sqrt{1+\tan^2\alpha}}{1+\tan^2\alpha+\tan^2\beta} dx} \quad (3)$$

$$R_{Bu} = \frac{\rho g h \sum_0^{L/2} L_j \sum_0^B s_i b_i}{L/2} + f g \rho h \sum_0^{L/2} L_j \sum_0^B b_i \sin\beta \quad (4)$$

$$R_{Cl} = 2\rho g h B F n_B \left[K_3' \int_0^{L/2} \frac{[y'(x)]^2}{\cos\theta} dx + K_3'' f \int_0^{L/2} \frac{y'(x)}{\cos\theta} dx \right] \quad (5)$$

- | | |
|------------------------|--------------------------|
| C : 얼음 응착계수 | g : 중력가속도 |
| λ : 축적비 | L_j : 스테이션 간 길이 |
| σ_j : 얼음의 굽힘 강도 | s_i : 얼음 조각의 깊이 |
| h : 얼음의 두께 | b_i : 노드 간 둘레 |
| L : 선체의 길이 | f : 얼음의 마찰계수 |
| B : 선체의 폭 | $F n_B$: 선체 폭에 대한 프루드 수 |
| ρ : 얼음의 밀도 | K_3', K_3'' : 유체 상수 |

2.4 도달 속도 추정 방법

FMA(Finnish & Swedish Maritime Association)에서 규정하는 최소 요구 마력 (Minimum power requirement, Ice Class Regulation, 2010)의 계산 결과는 폭이 40 m 이상의 상용 선박에서는 IA class의 경우 과도한 추정 결과를 주어 조선소에서는 규정에 의한 계산 결과를 사용한 엔진 선정을 하지 않는다. 따라서 40 m 이상이 폭을 갖는 선박의 경우에는 모형시험을 수행하여 별도의 방법으로 FMA에 승인절차를 따르며 모형시험을 수행하고 결과를 얻는 과정은 다음과 같다.

첫째, 빙 등급 별(IA super, IA, IB, IC)로 규정에서 정의하는 두께 별로 속도를 5 knots로 고정된 상태에서 유빙 얼음 채널(channel)을 만들고 빙저항을 측정하는 모형시험을 수행한다.

둘째, 설계된 프로펠러 단독시험(Propeller Open Water test, POW) 결과를 사용하여 임의의 회전수(rpm) 혹은 전진비에서 추력과 토크(torque) 곡선 및 선박에 장착되는 엔진의 특성 곡선을 준비한다.

셋째, 프로펠러 단독시험, 자항시험 결과, 엔진 특성 곡선, 일반 해역(open sea) 상태에서 선박의 저항과 자항요소인 반류계류(w), 추력감소계류(t), 프로펠러 정보 등을 사용하여 빙저항을 위해 사용할 수 있는 여유 추력 혹은 속도별 발생 추력에서 유체 저항을 극복하는데 필요한 추력을 제외한 나머지 추력(available net thrust)을 계산한다.

Fig. 4와 Fig. 5는 위와 같은 절차를 바탕으로 계산된 아라온(Araon)의 추진기 날개 회전수에 따른 실험 결과와 선속에 따른 허용 추력 결과를 나타내고 있으며, I-RES 프로그램에서는 아라온에 대한 도달 속도를 추정하기 위해 Fig. 4를 사용 하였다.

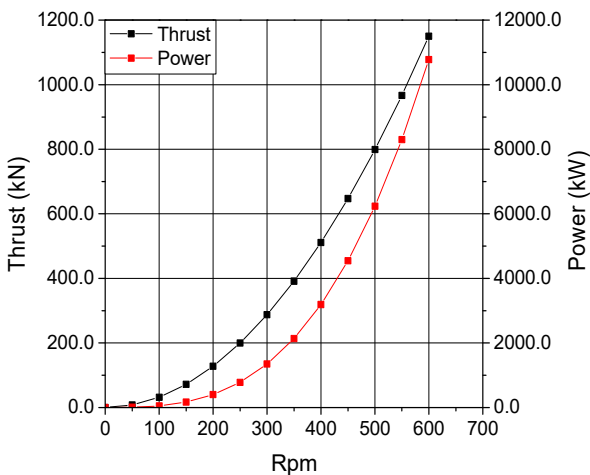


Fig. 4 Bollard pull test results of Araon vessel

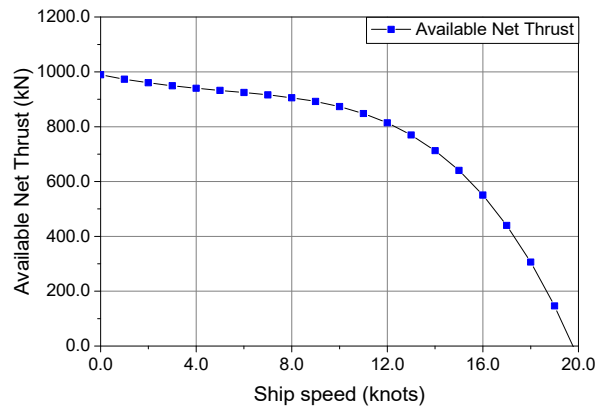


Fig. 5 Available net thrust for two thrust of Araon vessel

3. 'I-RES' 프로그램의 검증

'I-RES' 프로그램의 정확성을 판단하기 위해 평탄빙, 빙편 얼음, 미리 자른 얼음에 대해 검증을 진행하였다. 본 연구에서는 I-RES 프로그램 검증을 위해 국내 최초 쇄빙 연구선 아라온을 바탕으로 모형 시험을 실시하였다. Table 1은 아라온의 선형 정보를 나타내고 있다 (Kim et al., 2011).

Table 1 Araon information

Length, O.A. (m)	Length, B.P.(m)	Design Draft (m)	Propulsion Motor (MW)
111	95	6.8	10 (2 Set)

3.1 평탄빙 & 미리 자른 얼음

평탄빙과 미리 자른 얼음의 경우 빙 강도 746 KPa, 빙 두께 0.56 m, 선속 1, 3, 5 knots에서 실험을 실시하였고, 모형 시험 결과와 I-RES 프로그램을 통해 추정된 빙저항 결과를 Fig. 6과 Table 2에 나타내었다. 평탄빙은 전체 빙저항(R_T)으로 미리 자른 얼음의 경우는 전체 빙저항(R_T)에서 쇄빙저항(R_{Br})을 제외한 값으로 나타내었다.

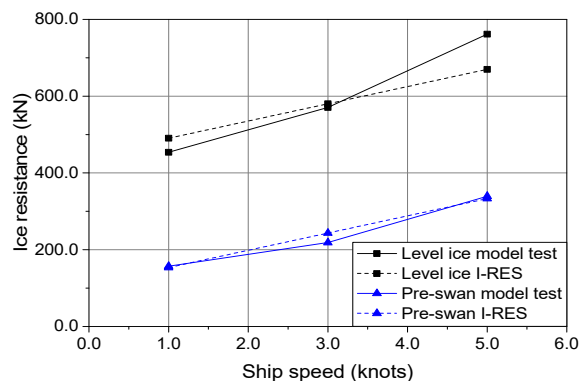


Fig. 6 Level ice & Pre-swain resistance comparison between I-RES and model test

평탄빙의 경우 선속이 3 knots 이상일 경우 오차율 증가하는 경향을 보이며, 미리 자른 얼음의 경우는 모형 시험과 비슷한 경향을 보여준다. I-RES 프로그램의 최대 오차율은 평탄빙 선속 5 knots에서 약 12% 내외로 발생했으며, 선속 및 얼음 두께에 대한 영향을 함께 고려하여 I-RES에 대한 타당성을 확보하였다.

Table 2 Level ice & pre-swam comparison of model test and I-RES

	Ship speed (knts)	Level ice resistance (kN)	Pre-swam resistance (kN)
Model test	1	454	157
	3	571	219
	5	761	340
I-RES	1	490	154
	3	580	243
	5	670	333
Error	1	-7%	2%
	3	-1%	-11%
	5	12%	1%

3.2 빙편 얼음(pack ice)

빙편 얼음의 경우 빙 강도 1157 KPa, 빙 두께 1.06 m, 선속 1, 3, 5 knots, 빙 집적도 60, 80, 90%에서 실험을 실시하였고, 모형 시험 결과와 I-RES 프로그램을 통해 추정된 빙저항 결과를 Table 3에 나타내었다. 빙편 얼음의 경우는 미리 자른 얼음과 마찬가지로 전체 빙저항(R_T)에서 쇄빙저항(R_{Dr})을 제외한 값으로 나타내었다. 그리고 빙편 얼음의 모형 시험 결과는 도달 속도 (Attainable speed)를 구하기 위해 편의상 17 knots까지 확장하였고, 빙 집적도와 선속의 관계에 따라 Fig. 7와 같이 상관 계수를 도출하여 적용하였다.

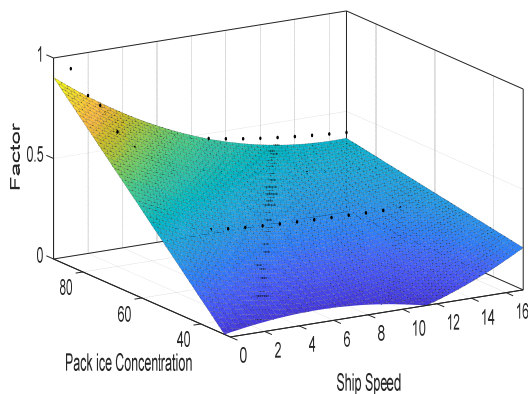


Fig. 7 Pack ice correlation coefficient

빙편 얼음에 대한 모형 시험과 I-RES 프로그램의 최대 오차율은 약 51%로 이는 선속 1 knots, 빙 집적도 60%의 경우로

모형 시험 환경 구축 시 발생한 오차율로 검증 결과에서 제외시켰다.

빙 집적도 80%, 90%에서 I-RES의 결과는 모형 시험 결과보다 작은 저항 값을 나타내며, 최대 오차율은 약 20%이다. 이는 제한된 실험 조건에서 빙 집적도와 선속을 확장시켜 상관계수를 도출하였기 때문에 나타나는 오차율로 판단된다.

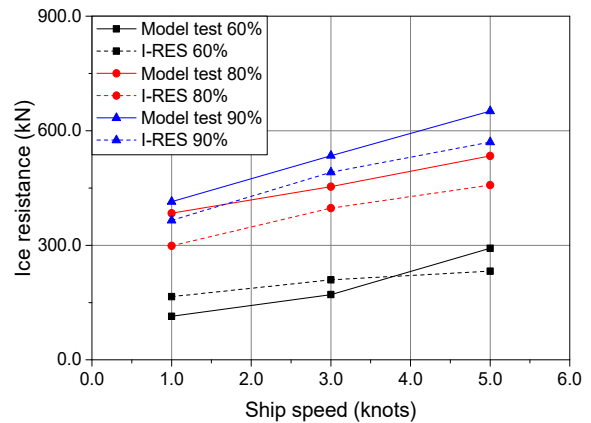


Fig. 8 Pack ice resistance comparison between I-RES and model test

Table 3 Pack ice comparison of model test and I-RES

	Ship speed (knts)	Pack Ice resistance each concentration (kN)		
		60%	80%	90%
Model test	1	114	384	414
	3	171	454	535
	5	292	534	651
I-RES	1	165	299	365
	3	209	397	491
	5	232	458	570
Error	1	51%	-21%	-11%
	3	22%	-10%	-6%
	5	-11%	-9%	-8%

4. 유빙 얼음(Brash ice) 알고리즘 개발 및 검증

4.1 유빙 얼음 모형 시험

모형 시험은 실선 속도 1, 3, 5 knots, 유빙 얼음의 두께 0.86m, 1B 환경에서 수행하였다. Fig. 9는 선박해양플랜트 연구소(KRISO)에서 모형 시험을 수행하는 사진으로 모형 시험의 변수는 Table 4에 실선 스케일로 나타내었다.

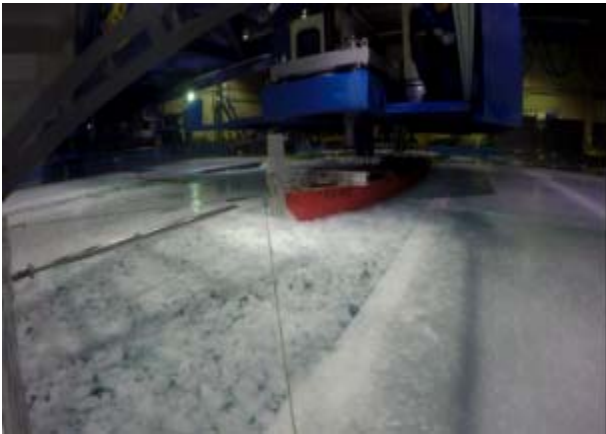


Fig. 9 Photo of brush ice test

Table 4 Model test parameters

Parameter	Value
Scale factor	18.667
Friction coefficient (Ship and Ice)	0.05
Friction coefficient (Ice and Ice)	0.08
Ice density (kg/m ³)	865
Flexural strength of ice (KPa)	1,049
Elastic modulus (GPa)	2,829
Avg. Brush ice thickness (m)	0.86
Target brush ice condition	IB

유빙 얼음의 모형 시험을 위해서는 Fig. 10과 같은 형상으로 제작 되어야 하며, 목표로 하는 빙등급, 채널의 폭에 따라 투입 해야 하는 얼음의 양은 부피 계산을 통해 결정 할 수 있다. 또한 평균 채널의 두께는 식 (5)로 구할 수 있다 (Kim et al., 2015).

$$H_{ave} = H_M + \frac{B}{4} \tan \gamma = H_M + 8.73 \times 10^{-3} B \quad (5)$$

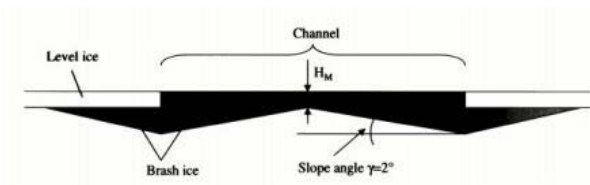


Fig. 10 Shape of Brush ice channel

유빙 얼음의 모형 시험을 위한 빙 두께는 목표 빙등급에 따라 0.5 m ~ 1.0 m를 사용한다. 본 연구에서는 시험 방법의 확보와 시스템 전체에 대한 검증을 수행하는 목적으로 0.86m에 대해 모형 시험을 수행하였으며, 유빙 얼음의 채널을 만드는 과정은 절차에 따라 Fig. 11에 정리하였으며, 다음과 같다 (Kim et al., 2015).

먼저 평탄빙을 목표 값까지 성장 시키고, 필요한 얼음 양을 계산한다. 그리고 3개의 얼음 푸셔(ice pusher)를 이용하여 평탄빙을 부순다. 깨진 작은 얼음 조각들은 규칙적인 분포를 가지고 있으므로 얼음 푸셔를 사용하여 불규칙적이고 현실적인 유빙 얼음 채널을 만든다. 마지막으로 얼음 푸셔를 사용하여 깨진 유빙 얼음을 압축한 다음 필요한 얼음 양을 추가적으로 유입시켜 목표 쇄빙 두께의 유빙 얼음을 만든다 (Jeong et al., 2017).

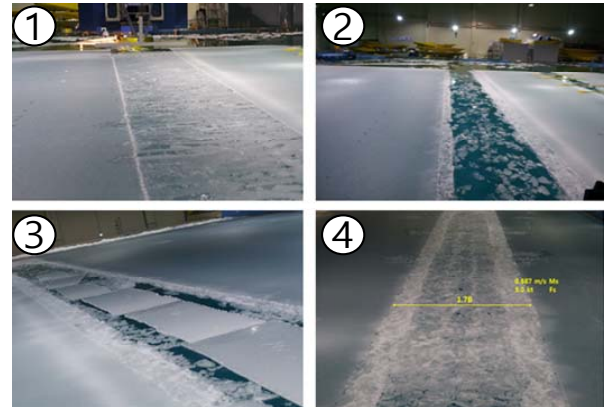


Fig. 11 Process of Brush ice channel preparation

4.2 유빙 얼음하 저항추정 알고리즘 개발 및 검증

본 연구의 목적은 평탄빙을 대상으로 개발 되었던 빙저항 추정 프로그램의 적용 범위를 유빙 얼음까지 확장하는 것이다. 평탄빙의 빙저항 추정 방법을 유빙 얼음 환경으로 확장하기 위해 유빙 얼음은 빙편 얼음 환경과 같이 전체 빙저항(R_T)에서 쇄빙 저항(R_B)을 제외한 값을 사용하였다.

유빙 얼음에 대한 모형 시험은 실선 속도 1, 3, 5 knots, 유빙 얼음의 두께 0.86 m, IB 환경에서 수행되었고, 유빙 얼음 환경에서 아라온이 최대 파워로 운항 시 가능한 도달 속도를 추정하기 위해 모형 시험 결과를 바탕으로 실선 속도를 17 knots 까지 확장하여 Fig. 12에 나타내었다. 확장된 유빙 얼음 저항을 바탕으로 I-RES 프로그램 결과와 비교하여 선속, 유빙 얼음 두께에 따른 상관 계수를 도출하였으며 이를 Fig. 13에 나타내었다.

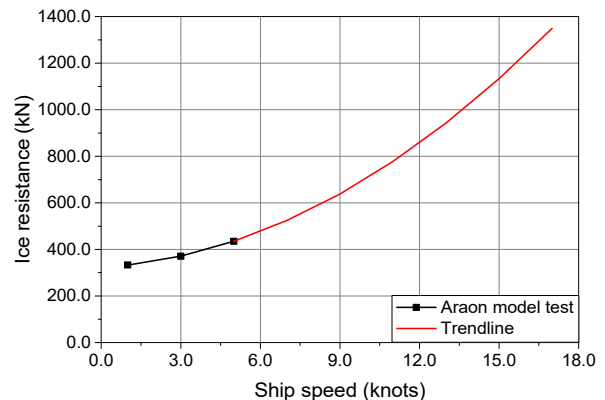


Fig. 12 Graph of ship speed vs. ice resistance

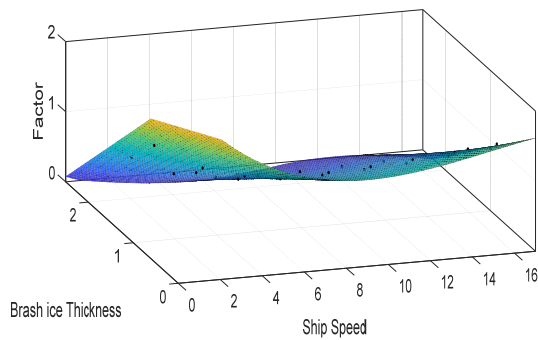


Fig. 13 Brash ice correlation coefficient

모형 시험과 I-RES 프로그램의 결과 비교는 Table 5, Table 6, Fig. 14에 나타내었다. I-RES 프로그램 해석 결과와의 최대 오차율은 약 5.6%이고, IA 환경 조건에서 도달 속도는 10.2 knots이다.

Table 5 Brash ice resistance comparison between model test and I-RES

	Ship speed (knts)	Brash ice resistance (kN)
Model test	1	333
	3	371
	5	435
I-RES	1	314
	3	391
	5	438
Error	1	-5%
	3	5%
	5	0.8%

Table 6 Estimation of attainable speed of Brash ice(IA)

Brash ice Strength (kPa)	Brash ice Thickness (m)	Attainable Speed (knots)	Cal. Input Power (KW)
1049	1.0	10.2	5629

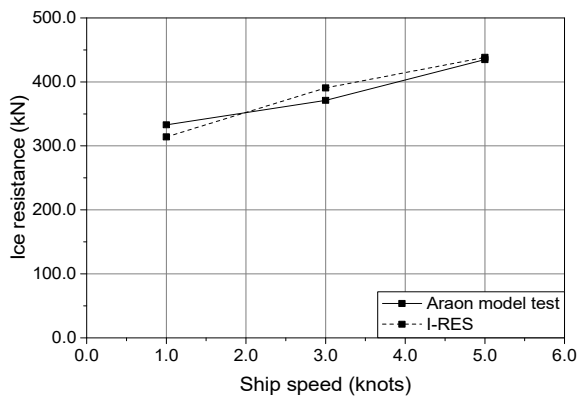


Fig. 14 Brash ice resistance comparison between I-RES and model test

유빙 얼음의 경우 현재까지 진행된 모형 시험은 동일한 두께에서 선속의 변화에 따라 진행되어 유빙 얼음 두께에 따른 상관 계수 도출은 I-RES의 결과를 바탕으로 상관 계수 도출이 이루어졌다. 따라서 추후 유빙 얼음 두께와 선속에 다른 추가적인 실험을 통해 검증이 요구되며, 이를 바탕으로 상관계수를 도출하면 유빙 얼음에 대한 정확도를 향상시킬 수 있을 것으로 판단된다

5. 결론

본 연구에서는 유빙 얼음 환경 특성을 분석하였고, 이를 바탕으로 선형 연구를 통해 개발되었던 I-RES 프로그램의 적용 범위를 유빙 얼음까지 확장할 수 있는 방법론을 제시하였다. 유빙 얼음의 빙저항은 전체 빙저항(R_T)에서 쇄빙저항(R_{Br})을 제외한 빙 부력저항(R_{Bu})과 빙 제거저항(R_G)의 합으로 표현할 수 있고, 선속에 따른 상관 계수를 도출하여 빙저항 및 도달 속도를 추정하였다.

유빙 얼음 검증에 앞서 평탄빙, 미리 자른 얼음, 빙편 얼음 환경에서의 아라온 모형 시험과 I-RES 프로그램의 계산 결과 비교를 통해 I-RES 프로그램의 정도와 타당성에 대한 검증을 수행하였다. 같은 과정으로 유빙 얼음에 대한 검증을 수행한 결과 최대 오차율 약 5% 이내로 일치 하는 결과를 확인하였다. 또한, 아라온의 경우 유빙 얼음 IA 환경 조건에서 5 knots 이상을 만족한다.

하지만 본 연구에서 상관 계수 도출은 유빙 얼음의 두께 변화를 반영하지 않았으므로 추가적인 모형 시험을 통해 정확한 검증이 요구되며, 추후 유빙 얼음 두께와 선속에 변화에 따른 모형 시험과 상관 계수 도출을 통해 I-RES 프로그램의 정확도를 향상시키고 활용성을 증대시킬 예정이다.

후기

본 논문은 해양수산부 해양안전 및 해양교통시설기술개발 사업인 '북극항로 운항선박용 항해안전시스템 개발' 과제 및 산업통상자원부 산업핵심기술개발 사업인 '위치유지와 계류 시스템을 적용하여 ARC7 조건에서 연중운용이 가능한 북극해 기반 부유식 해양구조물 형상 개발' 과제의 연구비 지원으로 수행된 결과로 연구 지원에 감사드립니다.

References

Enkvist, E., 1972. *On the ice resistance encountered by ships operating in the continuous mode of ice breaking*, Report No.24. The Swedish Academy of Engineering Sciences in Finland, Helsinki.

Jeong, S.Y., Jang, J.H., Kang, K.J. & Kim, H.S., 2017. Implementation of ship performance test in brash ice channel. *Ocean Engineering*, 140,

pp.57-65.

Kim, H.S., Lee, C.J., Choi, K.S. & Kim, M.C., 2011. Study on icebreaking performance of the KOREA Icebreaker ARAON in the ARCTIC sea. *International Journal Naval Architecture and Ocean Engineering*, 3, pp.208-215.

Kim, H.S., Lee, C.J., Kang, K.J., Jeong, S.Y., Yum, J.G. & Jeong, U.C., 2015. Study on the equivalent model test and analysis method of brash ice at KRISO ice tank. Proceedings of the 23rd international conference on Port and Ocean Engineering under Arctic Conditions. Trondheim, Norway, 14-18 June 2015.

Poznyak, I.I. & Ionov, B.P., 1981. The division of ice breaking resistance into components. *Proceedings of the Sixth STAR Symposium*. SNAME, NewYork, 17-19 June 1981, pp.249-252.

Regulation, 23 Nov. 2010. *Ice Class Regulation 2010 "Finnish-Swedish ice class rules 2010"*, 23.11.2010 Trafi/31298/03.01.01.00/2010

Shimansky Y.A., 1938. *Conditional standards of ice qualities of a ship, northern sea route administration publishing house leningrad*. Trans. Arctic Research Institute, Northern Sea Route Administration Publishing House, Vol. 130, Leningrad. Translation T-381-01 by Engineering Consulting and Translation Center (ECTC), P.O. Box 1377, Jackson Heights, New York, NY 11372.

Spencer, D., 1992. A standard method for the conduct and analysis of ice resistance model tests. *Proceedings of the 23rd ATTC Symposium*, 30 July 1993, pp.301-307.

