

## 다양한 pack ice 조건의 빙 저항 추정 프로그램 기능 확장 방법론 및 pre-sawn 모형시험 결과의 비교 분석

김현수(인하공업전문대학),  
안동현, 주수현, 신종계(서울대학교)

### 1. 서론

최근 지구 온난화로 인해 북극 항로의 중요성이 강조되고 있다. 북극 항로를 운항하는 선박은 운항 중에 얼음과의 충돌, 쇄빙, 마찰 등 다양한 과정을 통해 얼음으로부터 저항을 받게 된다. 얼음에 의한 빙 저항은 일반적인 유체저항에 비해 큰 값을 가진다. 따라서 북극 항로를 운항하는 선박에 대한 빙 저항을 추정하는 것은 매우 중요하다.

북극권에서의 얼음은 다양한 형태를 가진다. 넓은 지역에 평평하게 얼어있는 level ice, 평탄빙이 깨어진 얼음 조각들이 떠있는 pack ice, level ice가 서로 겹치면서 발생하는 두꺼운 형태의 ridged ice 등 다양한 형태의 얼음이 존재한다. 얼음에 의한 빙 저항은 얼음의 형태에 따라 매우 다른 값을 가지며, 따라서 선박이 운항 중에 경험하는 얼음의 종류에 따라 빙 저항을 다르게 추정하는 방법이 필요하다.

빙 저항을 추정하는 방법론으로는 크게 수학적 모델과 시뮬레이션을 이용한 방법과 경험식을 이용한 방법이 있다. 수학적 모델과 시뮬레이션을 이용한 추정 방법은 비교적 정확한 결과를 얻을 수 있으며, 결과 분석이 용이하다는 장점이 있다. 그러나 빙 저항 추정을 위한 모델링, 시뮬레이션에 많은 시간이 소모된다는 단점이 있다. 경험식을 이용한 방법은 결과의 정확성과 결과 분석의 어려움이 있다. 그러나 계산 시간이 빠르며 많은 케이스에 대한 빙 저항을 빠르게 추정할 수 있는 장점이 있다. 본 연구에서는 쇄빙 선박의 항로를 결정하기 위해 빙 저항 추정 결과를 사용할 것이며, 항로를 결정하기 위해서는 많은 경우에 대한 빙 저항 계산이 빠르게 수행하는 것이 중요하다. 따라서 본 연구에서는 경험식을 통해 빙 저항을 추정하고자 한다.

이전 연구에서는 Spencer<sup>[1]</sup>의 경험식을 바탕으로 level ice 조건에서의 빙 저항을 추정하는 프로그램이 개발되었다.<sup>[2]</sup> 그러나 앞서 언급된 바와 같이 북극 항로를 운항하는 선박은 다양한 형태의 얼음 환경을 겪게 된다. 따라서 효과적인 북극항로의 운항을 위해서는 level ice 뿐만 아니라 다양한 조건에서의 빙 저항을 효과적으로 추정할 수 있어야 한다.

따라서 본 연구에서는 기존에 level ice를 대상으로 개발된 빙 저항 추정 프로그램의 기능을 다른 형태의 얼음 환경으로 확장하고자 한다. 본 연구에서는 level ice의 빙 저항 추정 방

법론을 바탕으로 다양한 집적도의 pack ice 환경의 빙저항을 추정할 수 있는 방법을 제시한다. 또한 제시한 방법을 통해 추정된 Pack ice 환경의 빙 저항을 모형 시험 결과와 비교함으로써 제시한 방법론에 대한 타당성을 검증하였다.

### 2. level ice에서의 빙저항 추정 방법론

본 연구의 목적은 기존의 연구에서 level ice를 대상으로 개발되었던 빙 저항 추정 프로그램의 적용 범위를 pack ice 환경으로 확장하는 것이다. 이를 위해 기존의 프로그램이 level ice에서의 빙 저항을 어떻게 추정하고 계산하는지에 대해 살펴볼 필요가 있다.

기존의 빙 저항 프로그램은 level ice에서의 빙 저항을 Spencer의 경험식을 이용하여 추정하고 있다. Spencer에 따르면 level ice에서 발생하는 전체 빙 저항( $R_T$ )은 4가지의 빙 저항 요소의 합으로 표현할 수 있다. 전체 빙저항은 물에 의해 발생하는 유체저항( $R_{OW}$ ), 선저로 빨려 들어간 얼음의 부력에 의해 발생하는 빙 부력저항( $R_B$ ), 선박의 진행방향에 존재하는 얼음 조각들을 밀어내며 발생하는 빙 제거저항( $R_C$ ) 그리고 평평한 얼음의 판을 선수를 이용하여 깎 때 발생하는 쇄빙저항( $R_{BR}$ )의 합으로 나타낼 수 있다.

$$R_T = R_{OW} + R_B + R_C + R_{BR}$$

4가지 빙 저항 요소들 중에서 유체저항은 전체 저항에 비하여 3~5% 정도로 다른 저항 요소와 비교하여 작은 값을 가진다.<sup>[3]</sup> 또한 본 프로그램이 얼음과 관련된 저항을 계산하여 도출하는 것이 목적이기 때문에, level ice에 대한 저항을 추정할 때에는 유체저항을 무시하고 나머지 3가지 빙 저항 요소의 합으로 level ice의 빙 저항을 추정한다. 각 빙저항 요소를 추정하는 식으로는, 쇄빙 저항의 경우 Shimansky의 쇄빙 저항 추정법을, 빙 부력 저항의 경우 Enkvist의 부력 저항 추정법을 그리고 빙 제거 저항의 경우 Ionov의 빙 제거 저항 추정법을 사용하였다. 각 빙저항 요소에 대한 추정 식을 아래에 나타내

었다. 아래의 빙 저항 추정 식에서, 빙 제거 저항의 경우 수선 면에서의 선박과 얼음의 상호 작용 만을 고려한다. 또한 쇄빙 저항의 경우 선수의 형상 및 각도에 의해서 영향을 받지만, 선속에 의해서는 영향을 받지 않는 점을 주의하여야 한다. 쇄빙 저항은 선속에 의해서는 영향을 받지 않으므로, 선속의 변화에 대해서는 상수 값을 가진다.

$$R_{Br} = 2 \frac{\sigma_f h^2}{b} \left[ K_1' \int_0^{L/2} \frac{\cos(n, x)}{\cos(n, z) \cos \alpha} dx + K_1'' f_g \int_0^{L/2} \frac{1}{\cos(n, z)} dx \right]$$

$$R_{Bu} = 2 \rho_0 g h \left[ K_2' \int_0^{L/2} \frac{\cos(n, x)}{\cos(n, z)} y dx + K_2'' f_g \int_0^{L/2} \frac{\cos \alpha}{\cos(n, z)} y dx \right]$$

$$R_{Cl} = 2 \rho_0 g h B \cdot Fr_B \left[ k_3' \int_0^{L/2} \frac{[y'(x)]^2}{\cos \alpha} dx + k_3'' f_g \int_0^{L/2} \frac{y'(x)}{\cos \alpha} dx \right]$$

### 3. Pack ice 환경에서의 빙 저항 추정을 위한 시스템 확장 방안

level ice의 빙 저항 추정 방법을 다양한 집적도의 pack ice 환경으로 확장하기 위해서 level ice와 pre-sawn 환경 사이의 차이점을 분석하였다. pack ice는 위에서 바라보았을 때 얼음이 수면을 뒤덮은 정도에 따라서 집적도를 정의한다. 집적도는 1~10의 값을 가지며, 집적도 값은 전체 면적을 십 분할 하였을 때 얼음이 전체 면적을 덮고 있는 값을 의미한다. 예를 들어 빙 집적도 5의 pack ice 환경은 위에서 바라본 면적 중 절반을 얼음 조각들이 덮고 있는 환경을 나타낸다. pre-sawn 환경은 빙 집적도 10의 pack ice 환경을 의미하는 용어이다. 따라서 pre-sawn 환경은 위에서 바라보았을 때 수면이 작은 얼음 조각에 의해서 모두 뒤덮혀 있는 얼음 환경이라고 볼 수 있다. 아래의 Fig.1는 KRISO의 빙해 수조에 pre-sawn 환경을 재현한 사진을 나타낸다. 빙해 수조에 평평하게 얼린 얼음을 일정한 크기로 잘라 채널을 만들어서 pre-sawn 환경의 실험 환경을 생성하였다.

이와 같이 level ice와 집적도 10인 pre-sawn 환경의 차이점은 얼음이 작은 조각으로 잘려져 있는가 하는 것이다. 이전 프로그램에서 level ice 에서의 빙 저항을 쇄빙 저항, 빙 부력 저항, 빙 제거 저항의 3가지 빙 저항 요소의 합으로 추정하였다. 그런데 level ice와 pre-sawn 환경은 얼음이 작은 얼음으로 부서졌는가의 유무에 따라 다르다. 따라서 pre-sawn 환경의 빙 저항은 level ice의 빙저항 추정의 3 가지 요소에서 쇄빙 저항에 의한 빙 저항을 제거함으로써 얻을 수 있다.

$$R_{pre-sawn} = R_C + R_B$$

또한, pre-sawn 에서의 빙 저항 추정 방법을 다양한 집적도의 pack ice 환경으로 확장하기 위해서 빙 제거 저항과 빙 부력 저항 사이의 weighting factor를 정의하였다.

$$R_{Packice} = R_C \times W_C + R_B \times W_B$$

여기서 weighting factor  $W_B, W_C$ 는 각각 집적도에 대한 함수로 정의한다. 이와 같이 빙 제거 저항과 빙 부력 저항이 전체 pack ice 저항에 기여하는 정도를 빙 집적도를 통해 정의 함으로써, 다양한 집적도의 pack ice 환경에 대한 빙 저항을 합리적으로 추정할 수 있다.



Fig. 1 Pre-sawn ice condition in ice basin

### 4. 모형 시험 결과 및 모형 시험 결과의 비교

본 연구에서는 앞서 3장에서 제안한 pre-sawn 및 다양한 집적도의 pack ice 저항 추정 결과를 비교하기 위하여 모형 시험을 수행하였다. 모형 시험은 국내 최초의 쇄빙연구선인 ARAON 선형을 바탕으로 수행하였다. ARAON 선형에 대하여 모형 시험은 실선 속도 2, 3, 4 knots의 3 가지 선속에 대하여 실험을 수행하였다. level ice 및 6, 8, 9, 10 (pre-sawn)의 4 가지 집적도의 pack ice 환경에 대하여 모형시험을 수행하였다. 아래 Fig. 2는 KRISO의 빙해 수조에서 모형 시험을 수행하고 있는 사진이다. 아래 Table. 1에 모형 시험의 변수를 실선에 대한 스케일로 나타내었다.



Fig. 2 Model test in level ice condition

Table 1. Model test parameters

Parameters	Target value
Full-scale ship length (m)	95
model ship length (m)	5.1
Aspect ratio	18.667
Elastic modulus (GPa)	>2000
Ice thickness (m)	0.6
Flexural strength of ice (KPa)	560
Frictional coefficient	0.05
Ice density ( $kg/m^3$ )	870

Pre-sawn 환경에 대하여 모형 시험 결과와 프로그램의 계산 결과를 그래프로 나타낸 결과는 Fig. 3과 같다. 아래 그림에는 모형 시험으로 측정된 level ice 및 pre-sawn에서의 실험 데이터와 프로그램으로 계산한  $R_B + R_C$ 의 값을 그래프로 나타내었다. 그래프를 살펴보면, pre-sawn 환경에서 2, 3, 4 knots에서의 빙 저항의 값과 증가 추세가 어느 정도 일치하는 것을 확인할 수 있다. 아래의 Table. 2에서 pre-sawn 상태에서의 모형 시험 및 프로그램 계산 결과를 표로 나타내었다. 표로 나타낸 결과에서 낮은 선속인 2, 3 knots에서는 오차

율이 6~8% 정도로 어느 정도 일치하는 결과를 보이는 것을 알 수 있다. 그러나 선속이 높아질수록 오차가 커지는 것을 알 수 있다. 높은 선속에서의 오차는 프로그램에서 저항을 추정할 때 유체저항을 무시하였기 때문에 발생한 것으로 추정된다. 따라서 향후 연구에서는 선속이 빠른 조건에서는 유체저항을 고려할 수 있도록 할 것이며, 유체 저항을 고려한 높은 선속에서의 오차를 비교할 것이다.

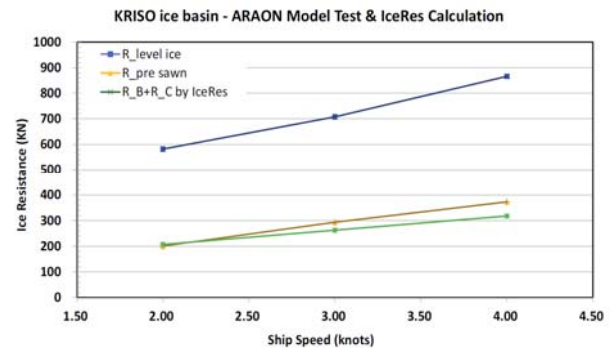


Fig. 3 Comparison of results of model test for ARAON

pre-sawn 환경의 모형 시험 결과와 프로그램의 추정 결과를 비교하여  $R_B + R_C$ 의 값을 이용하여 pre-sawn의 빙 저항을 추정할 수 있음을 확인하였다. 또한 빙 집적도 6, 8, 9, 10의 4 가지 pack ice 환경에 대해서도 모형 시험을 수행하였으며, 해당 모형 시험 결과를 이용하여 빙 부력 저항과 빙 제거 저항의 weighting factor를 결정한다.

Table 2. Comparison of results of model test for ARAON

선속(knots)	$R_{pre-sawn}$ (모형 시험)	$R_B + R_C$ (추정 결과)	오차(%)
2	193.9 kN	207.2 kN	6.859
3	285.6 kN	262.6 kN	8.053
4	362.6 kN	318.1 kN	12.272

Fig. 4는 실선 선속 2,3,4 knots 에서의 level ice, pre-sawn, pack ice의 빙저항 값을 보여준다. pack ice의 빙 집적도 값이 작아질수록 빙 저항 값이 작아지는 것을 확인할 수 있으며, 이를 통해 2개의 weighting factor를 집적도에 대한 함수로서 표현할 수 있다. 집적도에 따른 빙 부력 저항 및 빙 제거 저항의 경향을 보다 명확하게 파악하기 위하여 동일한 선속에서 집적도에 따라 각 빙 저항 요소가 차지하는 비율을 Fig. 4의 그래프로 나타내었다.

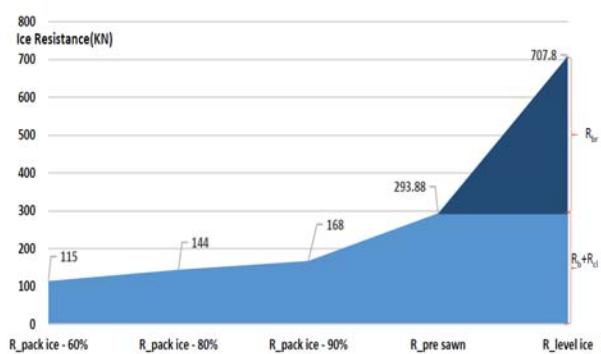
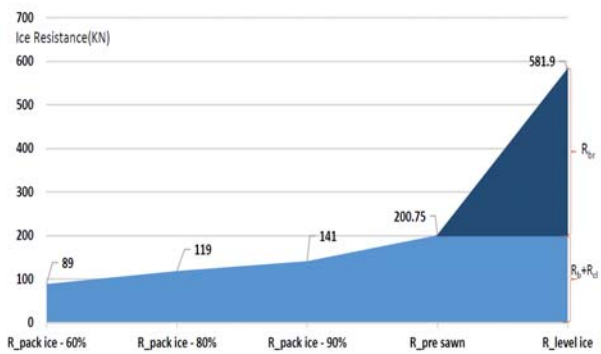
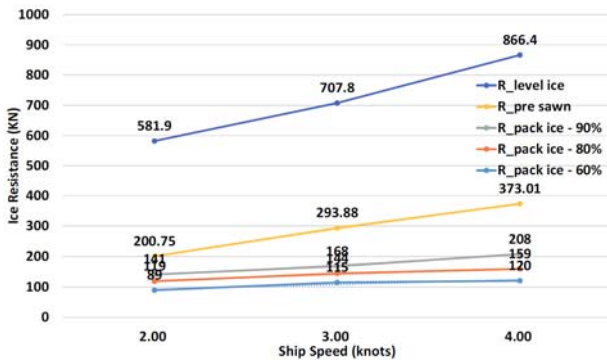


Figure 4. Comparison of results of model test in pack ice condition & value of weighting factor

빙 집적도가 9, 8, 6으로 작아지면서 각 빙저항 요소가 줄어드는 폭이 매우 완만해 진 것을 확인 할 수 있다. 이러한 빙 집적도에 따른 빙 저항 요소의 변화를 모형 시험 결과로부터 2차

함수 근사를 통하여 추정하였다. 빙 부력 저항과 빙 제거 저항의 weighting factor를 아래와 같이 빙 집적도에 대한 2차 함수로 도출하였다.

$$W_B = -0.0034C^2 - 0.082C + 0.2015$$

$$W_C = 0.05C^2 - 0.59C + 1.91$$

위의 식에서 C는 빙 집적도이며 1~10 사이의 자연수 값을 가진다. 이와 같은 방법으로 pre-sawn의 빙 저항 추정 방법론을 pack ice 환경으로 확장 할 수 있다. 이러한 빙 부력 저항 및 빙 제거 저항의 계수를 이용하여 다양한 pack ice 환경의 빙 저항을 계산할 수 있다. 더 많은 모형 시험 및 실선 실험 데이터를 얻을 수 있다면, pack ice 환경에 대한 빙 저항 추정의 정확도를 보다 향상 시킬 수 있을 것이다.

## 4. 결론

본 연구에서는 level ice 및 pre-sawn, pack ice 환경의 쇄빙 특성의 차이를 분석하였다. 이를 바탕으로 기존에 개발되었던 level ice를 대상으로 한 빙 저항 추정 프로그램의 적용 범위를 pack ice로 확장할 수 있는 방법론을 제안하였다. 제안된 방법론으로 부터 pre-sawn 환경의 빙 저항은 빙 부력 저항과 빙 제거 저항의 합으로 표현할 수 있다. 또한 집적도에 따른 빙 부력 저항과 빙 제거 저항의 weighting factor를 정의함으로써 pack ice 환경의 빙 저항을 추정할 수 있다.

제안한 확장 방법론의 타당성을 검증하기 위하여 ARAON 호를 대상으로 모형 시험을 수행하였다. 모형 시험 결과와 빙 저항 프로그램의 추정결과를 비교하여 2,3 knots 구간에서 오차 6~8% 정도로 어느 정도 일치하는 저항 추정 결과를 얻을 수 있음을 확인하였다. 그러나 높은 선속 구간에서는 오차가 다소 증가하는 경향을 확인하였다.

추후에는 높은 선속 구간에서 발생하는 오차를 개선하기 위하여 선속이 높은 구간에서 유체 저항을 고려하여 빙 저항을 계산하고 비교할 것이다. 또한 빙 부력 저항 및 빙 제거 저항 계산의 정확성을 향상시키기 위하여 모형 시험 시 선저부에서 촬영한 얼음 조각의 거동을 분석할 계획이다.

## 참고 문헌

- Spencer, D., 1992, A Standard Method for the Conduct and Analysis of Ice Resistance Model Tests, Proc. of the 23<sup>rd</sup> ATTC Symposium, pp.301-307

- Hyun Soo Kim, Cheol-Ho Ryu, Dong-Hyun Ahn, SuHeon Ju, Kuk-jin Kang and Jong Gye Shin, 2015, Development of software which is calculating ice resistance using 2-dimensional Hull form design program(HCAD), *Proceedings of Society of Naval Architects of Korea*, Je-Ju, Korea(2015)
- Seong-Yeob Jeong, Kyungsik Choi, 2008, A Review on Ice Resistance Prediction Formulas for Icebreaking Vessels, *Journal of the Society of Naval Architects of Korea*, 45(5), pp. 513-522



김 현 수

- 1964년생
- 2005년 부산대학교 조선해양공학과 박사
- 현 재 : 인하공업전문대학 교수
- 관심분야 : 빙해공학
- 연락처 : \*\*\*-\*\*\*\*-\*\*\*\*
- E-mail : hyunsookim@inhac.ac.kr



안 동 현

- 1984년생
- 2012년 서울대학교 조선해양공학과 석사
- 현 재 : 서울대학교 생산시스템공학 연구실 연구원
- 관심분야 : 빙해공학, 생산시스템 공학
- 연락처 : \*\*\*-\*\*\*\*-\*\*\*\*
- E-mail : dong8@snu.ac.kr



주 수 현

- 1992년생
- 2014년 서울대학교 조선해양공학과 학사
- 현 재 : 서울대학교 생산시스템공학 연구실 연구원
- 관심분야 : 빙해공학, 생산시스템 공학
- 연락처 : \*\*\*-\*\*\*\*-\*\*\*\*
- E-mail : wntngjs@snu.ac.kr



신 중 계

- 1955년생
- 1989 MIT 해양공학과 박사
- 현 재 : 서울대학교 조선해양공학과 교수
- 관심분야 : 조선해양생산시스템
- 연 락 처 : 02-880-9339
- E - mail : jgshin@snu.ac.kr

**대한조선학회논문집(한국연구재단 등재학술지)에  
회원 여러분들의 많은 논문 투고를 부탁드립니다.**