

# 빙해역 시운전 해석을 위한 환경조건 보정 방법 및 검증

김현수<sup>†</sup>  
인하공업전문대학 조선해양과

## Correction Methods and Validation for Environmental Conditions in the Ice Field Trials

Hyun Soo Kim<sup>†</sup>  
Department of Naval Architecture and Ocean Engineering, Inha Technical College

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.

Vessel's ice speed performances will be verified in ice sea trial but environmental conditions of ice fields are changeable according to the weather condition of ice trial area. Speed performance has to correct in the no wind, wave and current etc, after sea trial. Especially finding ice fields which is exact the same as owner's ice thickness and strength requirements is not easy. Therefore speed correction according to environment condition has to be done after sea trial measurements. Correction methods for ice thickness, ice strength, wave, wind and ship draft, trim, ice drift etc. are checked in ice sea trial based on literature review such as ISO standard, ITTC recommendation, journal papers and proceedings of conferences. Possibility of application for current and ice drift correction in ice field are discussed and measuring schemes and procedures of correction methods are described in this paper. All of correction schemes are calculated for 'Araon' which is ice breaking research vessel with Arctic and Antarctic ice field test results. Analyzed results shows that Araon is satisfied with her official ice speed performance of 3 knots with 10MW power at 1m ice thickness, 570kPa ice flexural strength.

**Keywords :** Ice field trial(빙해역 시운전), Flexural strength(굽힘 강도), Ice thickness(얼음 두께), Correction method(보정 방법), Speed performance in ice(빙 속도 성능)

## 1. 서론

대형 쇄빙형 LNG 선박의 첫 번째 빙해역 시운전이 성공적으로 끝나고 선주에게 인도되었다(LNG world news, 2017). Christophe de Margerie로 명명된 이 선박은 전장 299m, 폭 50m, 깊이 26.5m, 설계흘수 11.7m 재화중량 80,200ton, 총톤수 128,806 ton으로 보고되었다(Ship Technology, 2018). 기존 쇄빙선박이 길이 100~150m 내외, 총톤수 1만~3만톤 규모의 연구, 안전 및 구조 목적의 선박이라면 Christophe de Margerie는 북극항로를 쇄빙선 도움 없이 독자적으로 운항하면서 LNG를 수송할 수 있는 선박의 등장이라는 의미를 가지고 있어 조선/해운 및 에너지 업계에 비상한 관심을 모으고 있으며, 국내 조선소에서 15척이 순차적으로 인도 중에 있다.

빙해역 시운전은 선주와 계약상에 언급된 빙해역에서의 성능을 검증하는 중요한 목적을 가지고 있다. 하지만 해빙의 두께와

강도 등 해빙 특성과 온도, 바람, 조류, 해빙의 표류(ice drift) 등 환경 조건에 부합하는 빙해역 시운전 구역을 찾는 것에 어려움이 있어, 계약에 언급된 얼음의 특성에 근사한 환경에서 빙해역 시운전을 수행하고 환경 변수를 보정하는 방법을 일반적으로 사용하는데 이러한 과정은 일반해역(open Sea)에서 바람, 파도, 조류 등이 존재하는 상황에서 시운전을 수행한 후 국제 표준인 ISO 15016 혹은 선주와 별도로 정한 방법 등을 사용하여 외란이 없는 상태로 보정을 하는 방법과 같은 절차로 과학적인 근거를 가지고 보정이 수행되고 있다.

빙해역 시운전 관련 연구 문헌을 조사하면 다음과 같이 정리할 수 있다. 한국 최초의 쇄빙연구조사선인 아라온(Araon)이 건조된 이후 Vladimir (2010)는 아라온 호의 시운전 결과보고서를 작성하였다. 또한 정부과제 등을 통해 아라온의 실선 시운전 결과와 관련된 논문이 여러 편 게재되었는데, 몇 가지 연구 결과를 정리하면 다음과 같다. Kim et al.(2011a)은 아라온 선박을 사용해 북극에서 시운전을 수행하여 각종 신호의 계측방법과 계측

결과에 대해 보고하였고, Kim et al.(2012)은 큰빙판에서 아라온 속도 성능을 알아보기 위해 눈의 밀도를 고려하여 빙 두께를 보정하였고, 선체의 마찰계수와 빙강도에 대한 고려는 하지 않은 상태에서 실선 시운전 계속 결과를 보고한 바 있으며, Choi et al.(2014)은 남극 주변의 Amundsen 해에서 해빙의 온도, 밀도 등을 측정하고 해빙의 물성치를 이용해 해빙의 굽힘강도 계산하는 Timco & O'Brien(1994)의 경험식을 사용하여 측정한 해빙의 굽힘강도 계산 결과를 발표하였다. 또한 Lee et al.(2014)은 빙해역 시험을 할 때 빙판의 크기에 따른 쇄빙성능은 빙판이 큰 경우에 속도 성능이 작음을 남극과 북극해 주변의 실선 시운전 결과 분석을 통해 증명한 바 있다. Kim et al.(2011b)은 집적도 9/10 이상인 Pack ice 상태의 Chuckchi 해에서 빙해역 시운전 결과를 발표하였고, Lee et al.(2011)은 Canada의 쇄빙선인 Terry Fox 선박을 사용하여 빙조건의 기하학적 상사가 보장되지 못하는 상황에서 모형시험과 실선의 상관관계를 보정하는 시도를 하였다. 외국의 경우 선주사의 보안 문제로 공식적인 빙해역 실선 시운전 결과를 공개하지 않아 참고문헌을 찾기가 쉽지 않은 상황이지만 Wilkman et al.(2003)은 KV Svalbard 선박에 대해 모형시험과 실선 시운전 결과를 발표하였고, 선회 성능 등 모형 시험을 포함하여 선미 쇄빙의 우수성을 보고한 바 있다. 또한 Wilkman et al.(2007)은 MV Norilskiy Nickel 선박에 대해 Kara 해에서 속력시운전 결과를 발표한 바 있다.

문헌을 통한 시운전 해석의 고찰에서 알 수 있듯이 환경 변수 전체를 고려한 빙해역 시운전 해석 결과를 찾는 것은 어려움이 있는 바 본 논문에서는 빙해역 시운전에서 환경변수를 보정하는 방법에 대해 고찰하고, 특히 해빙의 두께와 강도를 보정하는 다양한 방법을 적용하여 가장 합리적인 빙해역 시운전 보정방법이 최종결과에 어떠한 영향을 주는지 평가하였다.

빙두께 보정을 위해서 눈의 밀도를 고려한 사례를 소개하고, 빙강도 보정을 위한 염수체적비 계산 방법에 대해 문헌조사를 수행하여 제시된 방법의 유용성을 판단하기 위해 아라온에서 측정한 결과를 사용해 비교 검증하였다. 기타 환경변수에 대한 보정 방법도 정리하여 조류와 해빙의 표류에 대한 방법을 제시하고 실험 데이터에 사용한 보정으로 보정 정도가 속력과 엔진 출력에 주는 영향을 정리하였다.

## 2. 환경변수와 빙특성 보정 방법

### 2.1 빙해역 시운전 보정 대상 및 계속 방법

빙해역 시운전에서는 주어진 얼음의 특성(강도, 두께)에서 계약상에 선주와 약속된 속도, 조종 등 운항 성능을 검증하는 것이 주요 목적이다. 선박이 운항 예정된 해역에서 얼음의 특성에 대해 과학자들이 통계적으로 분석하여 선박 건조 후 20여 년간 어떤 얼음에서 운항 할 것인지를 분석하고 이를 근거로 선주로부터 설계 조건을 제시 받는데, 제시된 조건과 일치하는 빙상 조건을 시운전 해역에서 만나는 것은 불가능한 일이다. 따라서 얼음의

두께와 굽힘 강도에 대해 보정을 하고 보정결과를 모형시험 결과와 비교하여 계약상의 조건을 만족하는지 여부를 판정하게 된다. 얼음의 두께와 강도가 가장 중요한 보정의 대상이지만 해빙 빙판의 표류(ice drift) 속도와 방향, 조류의 속도와 방향, 바람의 속도와 방향, Brash ice 조건에서 파도 등도 빙해역 시운전 결과에 영향 주기 때문에 이에 대한 보정을 수행하여야 한다. 시운전 조건에 포함되어 있는 흘수, 수온, 트림 여부, 수심 등도 시운전 결과에 영향을 주는 변수로 이에 대한 고려가 되어야 한다. 보정 대상을 표로 정리하면 아래 Table 1과 같이 정리할 수 있다. Table 1의 대분류, 중분류, 소분류는 보정을 해야 하는 값에 대해 분류를 하는 방법에 대해 정리를 하였다. 예를 들면 대분류 해빙 특성을 보정하기 위해서는 해빙의 종류와 강도 등이 있고, 해빙의 두께를 알기 위해서는 눈의 두께와 눈의 밀도를 알아야 한다고 이해하면 된다.

Table 1 Items for measurement and correction in ice trial

대분류	중분류	소분류
해빙 특성	평탄빙	빙 두께 (눈 두께, 눈 밀도)
	Pack ice	집중도, 분포
	Brash ice	두께, Wave 높이 & 방향
	Ice ridge	두께, 단면적
	해빙 강도	굽힘 강도 (해빙 온도, 밀도, 염도)
	ice drift	Speed, Direction
선박정보	운항	위치, Heading, 속도
	엔진	프로펠러 회전수(RPM), 출력, 추진기 각도, Torque
	선박자세	흘수, 트림
환경 정보	바람	속도, 방향
	해수정보	온도
	지정확 정보	수심
	조류	속도, 방향
성능정보	추진기, 저항	저항성능, 저항성능 값
	풍동시험	풍향에 따른 형상계수 값
	빙 성능	모형시험 결과

Table 1에 언급된 보정 대상을 어떠한 과학적인 방법으로 계속 할 것인가 하는 것도 주요한 관심사 중 하나이다. Table 2에는 계속 방법과 도구에 대해 정리하였다.

Table 2 Ice properties measurement methods & devices

계측 항목	계측 장비 (방법)
평탄빙 두께, 눈 두께	Ice auger, 자 (직접 계속)
눈 밀도	일정 부피를 갖는 장비, 질량계
Pack ice 집중도, 분포	위성 영상 분석, 사진 분석 (전문가 및 이미지 분석 Program)

계측 항목	계측 장비 (방법)
Brash ice 두께	Ice auger, 자 (직접 계측)
Brash ice 조건에서 Wave 높이 & 방향	파고계, 방향계측기 (신호 집적 장치)
Ice ridge 두께, 단면적	Ice auger, 자 또는 Underwater sonar (직접/간접 계측)
해빙 온도	온도계 (해빙의 깊이 방향 직접 계측)
해빙 밀도	질량계 (일정 부피로 절단)
해빙 염도	염도계 (신호 집적 장치)
Ice drift 속도와 방향	GPS (빙판에 설치)
선박 위치	본선 GPS (신호 집적 장치)
선박 Heading	Gyro (신호 집적 장치)
선박 속도	속도계 (신호 집적 장치)
프로펠러 회전수	RPM Display (신호 집적 장치)
엔진 출력	엔진 출력 Display (신호 집적 장치)
추진기 각도	Display (신호 집적 장치)
Torque	Torque meter (신호 집적 장치)
선박 흘수, 트림	목측 (직접계측)
풍향, 풍속	풍향계 (신호 집적 장치)
해수 온도	온도계 (직접계측)
수심	수심계측기 (신호 집적 장치)
조류 속도, 방향	조류계측기
자항성능 결과	자항 시험 보고서
저항성능 결과	저항 시험 보고서
풍향에 따른 형상계수 값	풍동 시험 보고서
빙 모형시험 결과	빙수조 모형시험 보고서

## 2.2 빙해역 시운전 보정 절차

2.1절에서 계측된 다양한 시운전 정보는 환경 정보의 영향을 배제한 결과를 도출하여 모형시험의 결과를 실선으로 확장한 결과와 비교하는 방법을 사용한다. Fig. 1은 빙해역에서 실선 시운전을 수행하여 각종 환경 변수를 보정하는 절차를 Flow chart 형태로 표시한 것이다. 여기서 보정 대상에 대해 크게 두 가지 항목에 대한 보정을 수행한다.

환경변수에 대한 보정은 크게 저항 값과 속도에 대한 보정으로 할 수 있는데, 환경 변수의 종류에 따라 Fig. 1에서 보는 바와 같이 바람, 파도, 조류의 영향은 각 항목의 계측 값이 주는 저항의 증가 혹은 감소로 판단하여 저항 값을 보정하고, 2.7절에서 설명되는 저항을 실선 엔진 출력으로 환산하는 방법을 사용한다. 빙해역에서 해빙의 두께와 강도에 대한 보정도 역시 목표 한 값을 기준으로 저항의 증가 혹은 감소로 보정을 하고 이를 엔진 출력으로 환산하여 사용한다. 속도의 보정은 수심과 해빙의 표류를 계산을 통해 보정한다.

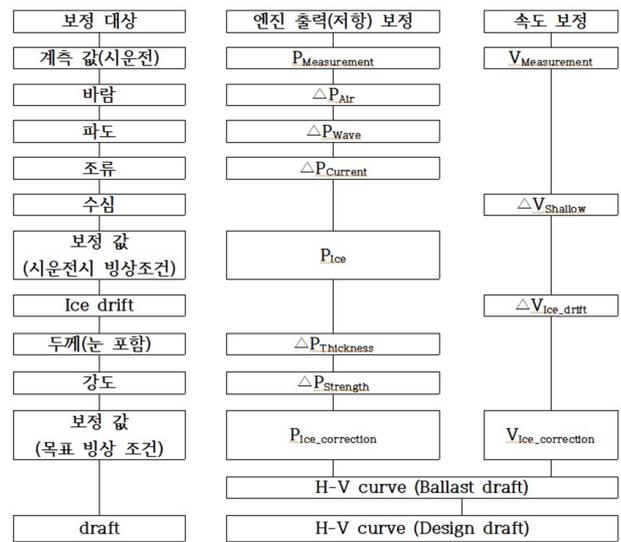


Fig. 1 Procedure of ice sea trials correction

## 2.3 환경 변수 보정

일반 해역에서 환경변수는 바람, 파도, 조류에 대한 보정을 의미한다. 보정에 대한 방법은 ITTC(International Towing Tank Conference, 2005) 와 ISO 15016 (International Standard Organization, 2002)에 언급되어 있다. ITTC(2005)에 따르면 바람에 대한 보정은 다음의 식 (1)을 사용하고 있으며, 바람에 의한 증가 혹은 감소된 저항으로 판단하여 이를 계측된 엔진 출력에서 저항으로 보정하는 방법을 권유하고 있다. 식 (1)의  $C_{Air}(\phi_{Air})$  는 풍동시험을 통해 구한 값을 사용한다.

$$R_{Air} = \frac{1}{2} C_{Air}(\phi_{Air}) \rho_A A_{XV} V_{WR}^2 \quad (1)$$

여기서,  $R_{Air}$  공기저항,  $C_{Air}(\phi_{Air}) = C_{Air0} K(\phi_{Air})$ ,  $A_{XV}$  바람에 노출된 최대 횡방향 투영 면적,  $C_{Air}(\phi_{Air})$  바람 저항 계수,  $C_{Air0}$  및 바람시 바람저항계수,  $K(\phi_{Air})$  바람저항의 방향계수,  $V_{WR}$  상대 풍속,  $\rho_A$  공기 밀도.

파도 보정과 관련해 ITTC(2005)는 다음의 식 (2)를 사용하고 있으며, 바람의 보정방법과 같이 파도에 의해 발생한 저항을 보정하는 개념을 적용한다. 식 (3)은 Mads(2010)가 파도의 입사 파 방향을 고려한 식 (2)를 파도의 방향까지 고려한 식으로 제안하였다. 하지만 평탄빙 조건에서는 파도가 발생하지 않기 때문에 이와 같은 방법을 평탄빙에서는 적용하지 않지만 Brash ice 조건에서는 사용할 수 있다.

$$R_{T0} = 0.64 \rho g C_B \xi_W^2 B^2 / L \quad (2)$$

$$R_T = R_{T0} [0.667 + 0.333 \cos \alpha] \quad (3)$$

여기서,  $\alpha$ 는 파도의 상대 방향 (선수 방향이 0°),  $R_{T0}$ 는 파도

에 의한 저항(선수파),  $R_T$ 는 파도에 의한 저항(상대 파향 고려),  $\zeta_w$ 는 파고,  $\rho$ 는 해수밀도,  $g$ 는 중력가속도,  $C_B$ 는 방형계수,  $L$ 은 배의 길이,  $B$ 는 배의 폭.

조류에 대한 보정을 위해서 일반해역에서는 선박의 침로를 180° 변경하여 2회 실시한 후 평균을 취하는 방법을 사용한다. ITTC(2002, 2005)는 일반해역에서 사용되는 식 (4)를 제시하고 있다.

$$R_{Current} = 0.75 \rho C_f S V^2 \quad (4)$$

여기서,  $C_f = \frac{0.075}{(\log Re - 2)^2}$ ,  $Re = \frac{V_c L}{\nu}$ ,  $\nu = \frac{\mu}{\rho_w}$ ,  $\mu = \frac{\mu_0}{(1 + 0.03368t + 0.000221t^2)}$ ,  $\mu_0 = 0.00179$ ,  $C_f$ 는 마찰 계수,  $Re$ 는 Reynolds 수,  $\nu$ 는 동점도,  $\rho_w$ 는 해수온도,  $L$ 은 선박 길이,  $\mu$ 는 동점성계수,  $\mu_0$ 는 동점성계수.

빙해역에서 조류의 영향을 고려하는 가장 과학적인 방법은 사항 상태에서 조류에 대한 영향을 반영하는 방법으로 판단된다. ITTC(2002, 2005)에서도 해빙 조건에서 조류에 대한 보정방법은 제안하지 않고 있다. 저자가 제안하는 방법은 바람을 보정하는 방법을 조류에 적용하여 조류에 영향을 받는 면적과 조류의 속도를 고려한 아래와 같은 식 (5)의 적용을 고려할 수 있다고 판단된다.

$$R_{Current} = \frac{1}{2} C_{Current}(\phi_{Current}) \rho A_{XC} V_{CRR}^2 \quad (5)$$

여기서,  $R_{Current}$  조류저항,  $C_{Current}(\phi_{Current}) = C_{Current0} K(\phi_{Current})$ ,  $A_{XC}$  조류에 노출된 최대 횡방향 투영 면적,  $C_{Current}(\phi_{Current})$  조류 저항 계수,  $C_{Current0}$  선수에서 조류가 올 경우 조류저항 계수,  $K(\phi_{current})$  조류저항의 방향 계수,  $V_{CRR}$  상대 조류속도,  $\rho$  해수 밀도.

식 (5)에 사용된 계수들은 풍동 시험과 같은 방법으로 파도의 발생을 억제한 상태에서 회류수조에서 조류 방향 변화에 대한 계수를 찾아야 하는 노력을 해야 하는데 아직 시험 방법이나 결과 등이 보고된 바 없다.

빙해역 시운전에서 조류에 대한 보정은 조류에 의해 발생한 저항 값을 배의 계측 속도에서 얻어진 저항에서 빼주는 방법으로 식 (4)의 변형된 형태인 식 (6)을 사용할 수 있다. 일반적으로 조류의 속도가 크지 않은 점을 고려하면 큰 저항 값을 주지는 않을 것으로 판단되지만 선주와 협의를 거쳐 동의된 상태에서 적용이 가능하다.

$$\Delta R_{cu} = 0.75 \rho_w S_h \left( \frac{0.075}{(\log(Re_v) - 2)^2} v^2 - \frac{0.075}{\log(Re_{vice} - 2)^2} v_{ice}^2 \right) \quad (6)$$

## 2.4 빙두께 보정

평탄빙이 있는 빙해역 시운전에서 빙두께는 순수 해빙의 두께와 눈의 두께를 더한 것으로 정의하는데 눈의 두께는 눈 밀도의 크기에 따라 빙두께에 포함하는 하는 정도를 구분하여 사용한다. Vladimir(2010)에 따르면 눈의 밀도가 0.35 g/cm<sup>2</sup> 보다 크고 눈의 두께가 얼음의 두께의 40% 이상인 경우에는 눈의 두께를 순수 해빙의 두께에 더하여 빙두께로 계산하는 AARI(Arctic and Antarctic Research Institute)의 방법을 적용하였다. 일반적으로 눈의 밀도가 0.35 g/cm<sup>2</sup> 보다 작은 경우에는 눈 두께의 1/3을 해빙의 두께에 더하여 빙 두께로 사용한다.

ITTC(2002)에서는 확연히 차이가 나는 두 개의 다른 평탄 빙 두께에 대해서 수행된 모형시험 결과를 사용하여 식 (8)을 사용하여 지수 값 'x'을 구하고, 식 (7)의 저항 값을 구하는 것을 제안하고 있으며 이때 지수 x 값은 1.0~2.0의 값을 제안하고 있다. 실제 시운전에서 빙두께 보정( $H_{I\text{Measure}}$ ) 값과 계측된 엔진 출력을 사용하여 목표로 하는 빙두께( $H_{I\text{Target}}$ )에서 엔진 출력으로 알 수 있는데 식 (7)과 (8)에서 사용되는 값은 저항 값으로 계측된 엔진 출력을 직접 적용하기에는 어려움이 있다.

보정된 해빙두께( $H_{I\text{Measure}}$ )를 가지고 2.7절의 엔진 출력과 저항 관계를 통해 환산된 빙저항( $R_{I\text{Measure}}$ )을 구하고, 지수 x를 사용하여 목표 빙두께( $H_{I\text{Target}}$ )에서 저항 값( $R_{I\text{Target}}$ )을 식 (8)에서 구할 수 있다.

$$R_{I\text{Target}} = R_{I\text{Measure}} \left[ \frac{H_{I\text{Target}}}{H_{I\text{Measure}}} \right]^x \quad (7)$$

$$x = \frac{\ln(R_{I2}/R_{I1})}{\ln(H_{I2}/H_{I1})} \quad (8)$$

여기서, R은 빙저항 값을 의미하고 H는 빙두께를 의미 한다. 아래 첨자로 표시된 'Target'과 'Measure'는 각각 목표 값과 시운전이 수행하여 계측된 값을 의미한다. 아래 첨자 '1' 과 '2'는 서로 다른 얼음을 의미한다.

실선 시운전에서 확연히 차이가 나는 두 개의 빙 두께에서 시험을 하였다면 이 결과를 사용하여 실선에서의 지수 값 x를 구해 사용할 수도 있다. HSV(2007)에서는 ITTC(2002)와 유사하게 빙두께를 보정하는 방법을 제시하고 있는데 식 (9)에서와 같이 두께 보정에 대한 지수 A 값을 구하고 보정계수 값( $F_1$ )을 일괄적으로 저항과 엔진 출력을 계산하는 방법을 사용하고 있다.

$$F_1 = (H_{Target} / H_{actual})^A \quad (9)$$

여기서, A 값은 해빙의 종류에 따라 다음과 같이 정의 된다. 평탄빙 1.5-0.4 × | $F_{nH}$ |, 큰 빙판 1.2-0.32 × | $F_{nH}$ |, 깨진 수로 1.0-0.23 × | $F_{nH}$ |이며  $F_{nH}$ 는 목표 빙두께에 대한 Froude 수로  $F_{nH} = \frac{V}{(g \times H_{I\text{Target}})^{0.5}}$ 이다.

빙두께 보정은 ITTC(2005)와 HSVA(2007)의 방법이 본 논문에서 제시 되었는데 실제 시운전에서 사용되는 방법은 선주와의 협의를 통해 결정하는 것이 일반적이며, 반드시 보정 방법을 시운전 전에 결정한 후 시운전을 수행해야 선주와의 분쟁을 피할 수 있다.

### 2.5 빙강도 보정

ITTC(2005)에서는 빙 강도 보정에 대한 값을 제시하지 않고 있으나 HSVA(2007)은 평탄빙에서 강도에 대한 보정으로 식 (10)을 사용하고 있다. 식 (10)은 기준이 되는 빙강도 대비 실제 빙해역에서 측정된 강도의 변화를 계수( $F_2$ )로 표시하고 있다.

$$F_2 = \frac{1 + (\sigma_{Target}/\sigma_0 - 1)/B}{1 + (\sigma_{Measure}/\sigma_0 - 1)/B} \quad (10)$$

여기서  $\sigma_0$ 는 기준이 되는 빙강도로 500kPa 이고,  $\sigma$ 는 강도를 나타내는데 아래 첨자로 사용된 'Target' 과 'Measure'는 목표와 계측 값을 의미하며 B는 계수 값으로  $B = 2.3 + 2 \times |F_{nH}|$  로 정의 된다. 식 (10)은 평탄빙에 대한 보정 값이고, 큰 빙판 또는 깨진 수로의 경우  $F_2$ 는 1을 사용한다.

빙강도는 실제 해역에서 굽힘 시험을 수행하여 굽힘 강도를 계측하는 것이 가장 좋은 방법이지만 빙해역의 상황에 따라 빙 두께가 1m 이상 두껍거나 대기 기온이 너무 낮거나, 계측 장비의 범주를 벗어나는 경우 등 직접계측이 어려운 경우가 많다. 따라서 보완적인 방법으로 일부의 시편을 사용하여 3점 굽힘 시험을 수행하는 방법도 있고, 염수체적비(Brine volume), 얼음의 온도 등을 계측하여 경험식을 사용하는 Timco & O'Brien(1994)의 방법 등도 있다.

염수체적비를 계산하는 방법은 주장하는 학자들에 따라 제시하는 많은 식들이 사용되고 있는데 Kovacs(1997)는 염수부피를 계산하는 식 (11)을 제시하였고, Weeks & Assur(1967)는 식 (12)를 제시하였으며 Cox & Weeks(1982)는 식 (13)을, Timco & O'Brien(1994)과 Kovacs(1997)는 염수체적비를 구하는 방법으로 식 (14)를 제시한 바 있다.

$$v_b = 41.64 \cdot s^{0.88} |T|^{-0.67} \times 10^{-3} \quad (11)$$

$$v_b = s \left[ 0.532 - \frac{49.185}{T} \right] \times 10^{-3} \quad (12)$$

$$v_b = s \left[ 0.93 - \frac{45.917}{T} \right] \times 10^{-3} \quad (13)$$

$$v_b = \rho s_i / F_1(T_i) \quad (14)$$

여기서,  $v_b$  염수체적비, s 해빙 염도, T 해빙 온도.

식 (14)의 분모  $F_1(T_i)$ 는 식 (15)로 구할 수 있다.

$$F_1(T_i) = -4.732 - 22.45 T_i - 0.6397 T_i^2 - 0.01074 T_i^3 \quad (15)$$

염수체적비( $v_b$ )를 사용하여 굽힘강도( $\sigma$ )를 계산하는 방법은 Timco & O'Brien(1994)에 의해 식 (16)이 제시되었다.

$$\sigma = 1.76 e^{-5.88 \sqrt{v_b}} \quad (16)$$

여기서,  $\rho$  ( $g/cm^3$ ) 해빙밀도,  $S_i$  (%)해빙염도,  $T_i$  (°C)해빙온도.

빙강도를 보정하는 방법은 HSVA(2007)의 방법이 일반적으로 사용되고 식 (10)에서  $\sigma_{Measure}$ 는 식 (11) ~ (15)를 사용하여 식(16)으로 계산 하는 방법을 사용한다. 빙해역 시운전에서 빙 강도는 빙 두께와 함께 가장 중요한 보정 변수 중에 하나로 세심한 주의가 필요하다.

### 2.6 선박출수, 수심, 마찰계수 및 빙편 표류 보정

선박의 출수도 시운전시 중요한 보정 변수 중에 하나로 일반적으로 쇄빙선의 경우는 컨테이너 선박과 같이 경하상태(Ballast) 출수 조건에 맞추어 시운전을 수행한다. 경하출수에서 모형시험 결과를 실선으로 확장한 속도-엔진출력 관계 곡선을 기준으로 시운전시 정해진 엔진 출력에서 계측된 속도가 모형 시험의 결과대비 속도가 잘 나왔는지 여부를 가지고 빙해역 속력시운전의 사양 만족여부를 판단한다. 모형시험과 시운전이 같은 출수에서 수행된 경우에는 직접비교를 통해 판단이 가능하지만 다른 출수의 경우에는 출수 보정을 해야 하는데 얼음이 없는 해역에서는 몇 가지 방법이 제시되어 있다. 첫 번째는 식 (17)에서와 같이 배수량 변화를 속도 변화의 관계로 표현하는 Admiralty 계수를 사용하는 것이다.

$$C_{Admiralty} = \frac{\Delta^{2/3} \cdot V^3}{P} \quad (17)$$

여기서  $\Delta$  배수량, V 선박의 속도, P는 DHP이다.

두 번째는 Henk et al.(2006)은 배수량의 작은 변화에 대해서 배수용적을 가지고 식 (18)과 같은 제안을 한 바 있다.

$$\Delta P_{Disp} = \left( \left( \frac{\nabla_{ref}}{\nabla_{Trial}} \right)^{2/3} - 1 \right) P_{measure} \quad (18)$$

여기서,  $\Delta P_{Disp}$  배수량 변화에 따른 엔진 출력 변화량,  $\nabla_{ref}$  기준 배수용적,  $\nabla_{Trial}$  시운전 배수용적,  $P_{measure}$  시운전 시 계측된 엔진 출력.

세 번째로 ISO 15016(2002)에서는 출수(draft)와 트림(trim)에 대해 배수량 변화가 2% 이하이고, 트림은 1% 이하로 할 것을 권고하고 있으며 저항의 증가로 계산하여 식 (19)를 제안하고 있다.

$$R_{Adis} = 0.65R_T \left( \frac{\Delta_0}{\Delta} - 1 \right) \quad (19)$$

여기서,  $R_{Adis}$  배수량 변화에 따른 저항 변화량,  $\Delta_0$  목표 배수량,  $\Delta$  시운전 배수량,  $R_T = \frac{1}{2} C_{TP} \rho S V_s^2 (N)$  전저항.

빙해역에서는 식 (17) ~ (19)를 사용하여 배수량의 변화를 저항, 엔진 출력, 무차원 계수로 모두 구할 수 있다. 선주와 사전 협의가 필요한 이유이다. 수심에 대한 보정은 일반해역에서 Lackenby(1963)의 방법에 따라 식 (20)과 같이 보정을 할 수 있고, ISO 15016(2002)에서도 같은 식을 제안하고 있다.

$$\frac{\Delta V_s}{V_s} = 0.1242 \left( \frac{A_M}{h^2} - 0.05 \right) + 1 - \sqrt{\tanh \left( \frac{gh}{V_s^2} \right)} \quad (20)$$

여기서,  $\Delta V_s$  속도의 증가량,  $V_s$  계측속도,  $A_M$  중앙단면적, h 수심.  $A_M/h^2 \gg 0.05$ .

식 (20)은 수심에 대한 영향을 속도의 증가량으로 판단하여 보정을 하는 방법으로 얼음이 없는 해역에서는 수심이 충분히 깊은 곳에서 수행하는 것을 제안하지만 북극해의 경우 양호한 균질도를 갖는 평탄빙은 연안지역으로 수심이 50m 이하이기 때문에 천수(Shallow water)의 영향을 반드시 고려해야 한다. 일반해역에서 사용하는 식 (17)을 얼음으로 구속되어 있는 해역에서 적용하는 것은 검증이 필요하다고 하겠다. 식(18)도 주로 일반해역에서 사용하는 식으로 빙해역 사용이 조심스럽다. 빙해역 시운전에서는 식 (20)이 가장 합리적으로 판단되고, Ship technology (2018)에서도 이 방법이 사용되었다.

선체와 얼음의 마찰계수도 빙능성에 미치는 영향이 큰 변수 중에 하나이다. HSVA(2007)에서는 식 (21)의 보정 계수를 사용하여 전체 저항과 엔진출력에 반영하고 있다.

$$F_3 = (C_1 + C_2 \times \mu_i)^{-1} \quad (21)$$

여기서,  $\mu_i$  선체와 얼음의 동 마찰 계수,  $C_1, C_2$ 는 상수 값으로 얼음의 종류에 따라 결정된다. (평탄빙 :  $C_1 = 0.6 C_2 = 4$ , 큰 빙판  $C_1 = 0.8 C_2 = 2$ , 깨진 얼음 항로  $C_1 = 0.9 C_2 = 1$ )

빙해역에서 운항하는 선박은 Inertia 160이라는 도료를 사용하는데 이 도료의 동 마찰 계수를 사용하여 보정 할 수 있다. 빙해역 시운전시 마찰계수는 신조 후 도료 손상이 거의 되지 않는 상태로 인정하여 일반적으로는 보정을 가지 않고  $F_3$ 를 1로 사용한다. 다른 여러 가지 보정 계수에서 큰 이상이 없는 상태에서 성능의 차이가 생겼다면 마찰계수에 대한 보정과 도료 손상을 의심해 보는 것이 좋다.

해빙의 표류(Ice drift)는 해류의 표류 방향과 속도를 계측해야하는데 보통을 빙판에 센서(Sensor)를 설치하여 일정기간 계측한 후에 평균한 결과를 사용한다. 해빙표류의 속도와 방향이

얻어지면 시운전한 선박의 침로와 속도를 가지고 Fig. 2와 같이 벡터(Vector) 계산을 하여 구한다.

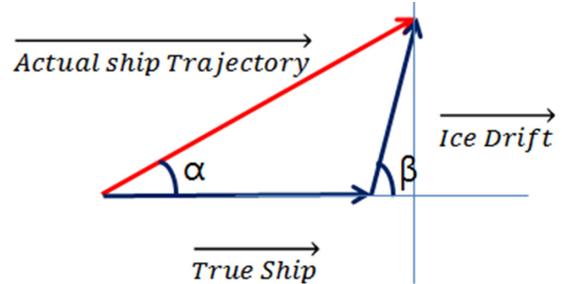


Fig. 2 Vector analysis with ship trajectory and ice drift

실제 운항한 선박의 궤적( $\vec{T}$ )은 해빙의 표류에 의한 궤적( $\vec{D}$ )과 벡터 합을 통해 해빙 표류의 영향이 없는 선박의 방향과 속도( $\vec{S}$ )를 구한다. 식으로 표현하면 식(22)와 같다.

$$|\vec{S}| = \sqrt{(|\vec{T}| \cos \alpha - |\vec{D}| \cos \beta)^2 + (|\vec{T}| \sin \alpha - |\vec{D}| \sin \beta)^2} \quad (22)$$

## 2.7 저항과 엔진 출력의 보정

HSVA(2007)은 빙두께, 강도 및 빙마찰 보정 계수와 식 (23)를 사용하여 시운전 환경 조건에서 계측된 엔진 출력 값( $P_{I-m}$ )을 보정하여 목표가 되는 시운전 환경에서 저항 값( $P_{I-t}$ )을 구할 수 있다.

$$P_{I-t} = P_{I-m} \times (F_1 \times F_2 \times F_3)^{1.5} \quad (23)$$

추력에 대한 보정은 식 (24)와 같이 각종 보정계수를 사용하여 시운전 환경 조건에서 계측된 추력 값( $T_{I-m}$ )을 보정하여 목표가 되는 시운전 환경에서 추력 값( $T_{I-t}$ )을 구할 수 있다.

$$T_{I-t} = T_{I-m} \times F_1 \times F_2 \times F_3 \quad (24)$$

저항 값은 시운전시 직접 계측이 불가능하기 때문에 수조에서 수행한 볼라드풀 시험 (Bollard pull test) 결과를 사용한다. 볼라드풀 시험을 수행하면 추력을 내기 위한 엔진 회전수와 엔진 출력 및 추력 (혹은 저항)의 관계를 구할 수 있다. 이 관계를 통해 얻어진 엔진 출력을 저항 (혹은 추력)으로 환산이 가능하여 다양식으로 표현 할 수 있다.

시운전시 얻어진 엔진 출력은 볼라드풀 시험의 추력으로 환산이 가능하고 빙해역에서 빙과 얼음의 상호 작용으로 인해 추력감소계수를 고려하지 않을 경우 추력과 저항이 같으므로 엔진 출력은 저항으로 계산이 가능하다. 이러한 방법으로 계측된 엔진 출력은 저항으로 환산이 가능하다.

Fig. 3은 아라온의 볼라드풀 시험 결과를 예로 보여주고 있다.

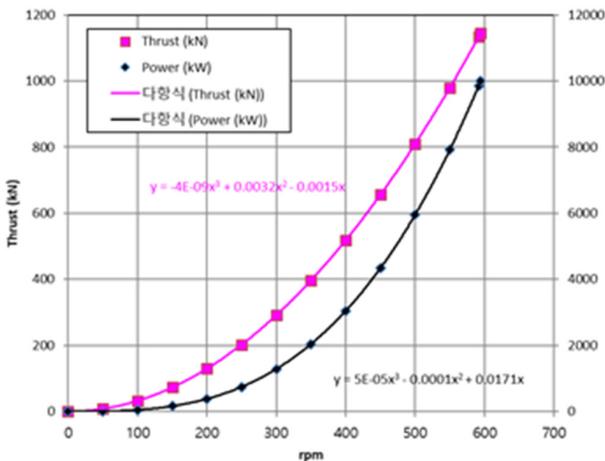


Fig. 3 Bollard pull test results of IBRV Araon

빙강도와 빙-선체 마찰계수 보정 방법은 HSVA(2007)에서 제안하는 보정계수를 사용하는 방법 이외에는 보정 방법이 없고, 빙 두께를 포함한 환경 변수(바람, 파도, 조류)와 흘수에 대한 보정은 저항의 변화로 보정 할 수 있다. 보정된 저항 값을 취합 하면 시운전 조건에서 예측된 저항 값( $R_{I-m}$ )을 알 수 있다. 이렇게 얻어진 저항 값을 식 (24)를 사용하여 목표가 되는 빙상환경에서 저항 값( $R_{I-t}$ )을 구할 수 있다.

$$R_{I-t} = R_{I-m} \times F_1 \times F_2 \times F_3 \quad (25)$$

최종적으로 식 (25)에서 구해진 저항 값( $R_{I-t}$ )을 블라드폴 시험 결과를 사용하여 예측된 엔진 출력으로 사용하게 된다.

속도는 예측된 시운전에서 예측된 속도, 빙표류(ice drift)에 의한 속도 벡터 그리고 수심에 의해 변화된 속도를 반영하여 식 (26)과 같이 구할 수 있다.

$$V_f = V_m + V_{id} + \Delta V_s \quad (26)$$

여기서  $V_m$  예측된 속도,  $V_{id}$  빙표류에 의한 선박의 진행방향 속도,  $\Delta V_s$  수심의 변화에 의한 속도 변화량.

보정하는 방법에 따라 식 (23)에서 구해진 보정 엔진 출력 혹은 식 (25)에서 구해진 저항을 블라드폴 시험에서 환산된 엔진 출력이 최종 예측 엔진 출력이 되며, 식 (26)에서 구해진 최종 예측 속도가 된다. 위 두 개의 값을 모형시험 속도 마력 그래프에 직접 입력하여 시운전 결과가 사양에 만족하는지 여부를 판단하게 된다.

### 3. 보정 방법의 검증

본 논문에서는 2장에서 제시된 많은 보정 방법을 적용했을 때 각각이 최종 결과에 어떠한 영향을 주는지를 파악하기 위해 Kim et al.(2011a)과 Kim et al.(2012)가 남극과 북극에서 한국 최초 쇄빙연구선 아라온(Araon)을 사용하여 수행한 실선 시운전

계측 결과를 사용하여 보정을 수행하고 각 보정 방법에 대한 타당성을 검증하였다.

Choi et al.(2014)는 남극의 Amundsen 해에서 수행한 해빙의 물성치 계측 시험 결과와 데이터를 발표하였고, Kim et al.(2011a)과 Kim et al.(2012)은 북극과 남극에서 각각 계측된 눈과 얼음의 두께를 계측하여 시운전 결과를 발표한 바 있다.

Table 3 Artificial measured sea ice properties based on Choi et al.(2014)

Place	ID	Temperature	Density	Salinity
		°C	kg/m <sup>3</sup>	%
Amundsen Sea (I)	A	-1.45	915.3	3.8
	B	-1.72	843.5	3.8
	D	-1.67	855.8	4.4
	E	-1.68	850.9	4.3
Chukchi Sea (II)	F	-1.82	824.5	3.8
	G	-1.72	852.1	4.0
	H	-1.77	792.2	4.4
	J	-1.69	847.8	4.1

강도 보정을 위해서 Choi et al.(2014)의 논문 Table 2에서 제시된 해빙의 물성치를 참고하여 Table 3과 같이 Test ID를 가 공하여 사용하였고, Choi et al.(2014), Kim et al.(2011a), Kim et al.(2012) 참고 문헌에서 제시된 실선 시운전 데이터를 해빙의 두께 보정을 위해 Table 4에 정리하였다.

Table 4 Datum from Arctic and Antarctic sea

Place	ID	V (speed)		Ice thickness (cm)	Snow thickness (cm)	Measured power (MW)
		(m/s)	(knots)			
I	A	1.51	2.93	145.4	13.1	8.02
	B	1.24	2.41	99.1	17.6	6.10
	D	0.44	0.85	198.2	29.3	6.95
	E	0.99	1.93	192.5	29.7	7.95
II	F	2.86	5.55	114.3	13.0	5.99
	G	2.46	4.79	225.1	9.0	6.04
	H	1.75	3.40	190.7	8.0	5.03
	J	1.43	2.78	249.3	10.0	6.55

### 3.1 빙두께, 빙강도 보정 결과

눈두께를 보정하는 방법은 2.4절에서 설명된 바와 같이 눈 밀도와 영향이 있다. 눈 밀도는 남극과 북극의 환경에 따라 다르고 차이가 나지만 본 논문에서는 계산의 편의를 위해서 눈의 밀도를 0.35 g/cm<sup>3</sup> 이상으로 가정하여 AARI의 권고에 따라 눈 두께를 그대로 해빙의 두께에 더하여 사용하였다. 눈두께를 반영하여 계산된 해빙 두께는 Table 5에서 알 수 있다. 해빙 두께는 각각의 조건에서 목표치인 1.0m 해빙보다 상당히 두꺼운 것을

Table 4를 통해 알 수 있고, 따라서 눈 두께에 대한 보정이 필요하다. 빙저항으로 보정하는 식 (6), (7)의 방법은 아라온의 빙수조 모형시험 결과가 없으므로 지수  $x$ 를 구할 수 없어 사용하지 못한다. 따라서 식 (9)를 사용하여 HSV(A2007)의 방법으로 빙두께 보정을 하려면 식 (9)의 지수  $A$  값과 목표 해빙두께에서의 Froude 수( $F_n$ )를 계산해야 한다. Table 5는 Table 4와 식 (9)를 사용하여 계산한  $F_1$ (두께보정 계수, 해빙의 종류는 평탄빙 적용) 값을 정리한 결과이다.

Table 5 Calculated results of  $F_n$ ,  $A$ ,  $F_1$

Place	ID	Hi-actual with snow	$F_n$	$A$	$F_1$
I	A	158.5	0.4808	1.35	0.538
	B	116.7	0.3960	1.37	0.809
	D	227.5	0.1395	1.46	0.302
	E	222.2	0.3176	1.40	0.328
II	F	127.3	0.9122	1.21	0.747
	G	234.1	0.7859	1.25	0.346
	H	198.7	0.5587	1.32	0.404
	J	259.3	0.4561	1.35	0.275

Table 5에서 알 수 있듯이  $F_1$ 값이 1보다 작은 값으로 실제 power 값이 보정을 할 경우 많이 줄어 들 수 있음을 예측할 수 있다.

빙 강도 보정을 위해서는 Table 3에서 주어진 데이터를 사용하여 식 (11) ~ 식 (13)의 방법으로 염수체적비( $v_b$ )를 구할 수 있으며, 계산 결과를 Table 6에 정리하였다.

Table 6 Calculation of brine volume using formula (11)~(13)

Place	ID	Eq. (11)	Eq. (12)	Eq. (13)	Eq. (14)
I	A	0.1051	0.1309	0.1239	0.1312
	B	0.0937	0.1107	0.1050	0.1000
	D	0.1088	0.1319	0.1251	0.1214
	E	0.1062	0.1282	0.1215	0.1172
II	F	0.0903	0.1047	0.0994	0.0920
	G	0.0981	0.1165	0.1105	0.1064
	H	0.1046	0.1246	0.1182	0.1054
	J	0.1008	0.1207	0.1144	0.1098

Table 6의 염수체적비 값이 크면 해빙에 염수가 많다는 물리적 의미를 가지고 있어 해빙의 강도가 작음을 예측할 수 있고, 실제로 식 (14)로 굽힘 강도를 계산할 때 염수체적비가 클수록 굽힘강도가 작게 계산된다. 따라서 어떤 방법을 사용하는가에 따라 굽힘 강도의 보정 값에 영향을 미침을 알 수 있다.

Table 6의 결과를 분석해 보면 식 (12)와 식 (13)의 방법이 가장 큰 염수체적비 계산 결과를 주고, 식 (11)의 방법이 가장

작은 염수체적비 값을 주는 것을 알 수 있으며, 식 (14)의 방법이 중간 값의 결과를 주는 것을 알 수 있는데, 이러한 이유로 빙강도 보정에서 Timco의 염수체적비 계산 방법을 많이 사용한다.

Table 7은 Table 6의 Timco 결과와 식 (14)를 사용해 계산한 결과를 정리하고, Choi et al.(2014)의 결과와 비교하고 차이를 오차율로 표현하였으며, 강도 보정계수  $F_2$ 를 구하여 정리한 것이다.

Table 7 Calculation of ice strength correction factor

ID	Choi et al. (2014)	Eq. (14)	Error (%)	B	$F_2$
A	205	209	-2.0	3.26	1.22
B	292	274	6.5	3.09	1.17
D	239	227	5.3	2.58	1.27
E	240	235	2.0	2.94	1.22
F	302	296	2.1	4.12	1.11
G	281	259	8.7	3.87	1.14
H	267	261	2.4	3.42	1.16
J	261	251	4.0	3.21	1.18

Table 7의 오차율은 사용된 값들의 소수점 자리수 사용의 차이로 발생한 것으로 평가되며 강도 보정 계수가 1보다 큰 값이 대부분으로 강도 보정의 기준이 되는 500kPa보다 작은 결과를 주어서 얻어진 결과로 판단되어 보정이 되면 실제 엔진 출력이 더 필요하다는 것을 알 수 있다.

마찰계수에 의한 보정은 모형시험에서 주로 사용하는 일반적인 마찰계수 0.1을 사용하여 식 (21)을 사용하고 계수 값으로 시운전 조건과 부합하는  $C_1 = 0.8$   $C_2 = 2$ 를 사용하면  $F_3$ 는 1이 된다. 따라서 1을 마찰계수 보정 값( $F_3$ )으로 사용하였다.

### 3.2 속도 보정 결과

시운전 결과를 속도로 보정을 하는 변수는 수심과 해빙의 종류이다. Table 8은 식 (22)를 사용해 해빙의 종류에 대한 계산 결과를 보여 주고 있다. 사용된 data는 해빙종류의 영향을 평가하기 위해 북극 시운전에서 계측된 자료를 사용하였으나 시운전 조건과 일치하지는 않는다.

Table 8 Sample calculation of ice drift

	Direction (deg)	Speed(Knots)
Ice Drift	200	0.49
Trajectory	209.83	3
Correction	9.83	2.51

Kim et al.(2011a)과, Kim et al.(2012)는 북극과 남극에서 Araon을 사용하여 연구 목적의 시운전을 수행할 당시 공식적으로 수심을 측정하지 않았으나 두 논문에서 제시된 시운전 지역

의 위도와 경도를 참고할 때 수심이 ISO 15016에서 제시하는 흘수의 5배 이상으로 Lackenby(1963)의 수식을 사용할 필요가 없지만 수심의 보정에 대한 정도를 파악하기 위해 흘수의 약 2배 정도를 가정하여 계산을 수행하였다. 이 역시 시운전 상황과 일치하지 않는다. 계산 결과는 Table 9와 같은 결과를 주고 있는데 식 (20)을 사용하였다.

Table 9 Sea depth correction of Araon

Items	Value
Araon draft (m)	7.62
Sea depth (m)	15
Midship section Area (m <sup>2</sup> )	140
Ship speed (knots)	3.0
$\Delta V$	0.2132
Corrected speed (knots)	2.7868

### 3.3 바람, 파도, 조류 및 흘수 보정 결과

바람, 파도 및 조류는 보정을 하게 되면 저항의 값으로 표현이 되는 것을 2.3절과 2.6절에서 기술하였다. 하지만 빙해역 시운전의 경우 평탄빙에서는 파도가 발생하지 않으므로 본 논문에서는 제외하기로 한다. 바람에 의한 보정은 식 (1)을 사용하였고, 조류에 대한 보정은 식 (6)을 사용하였다.

Table 10 Wind resistance correction of Araon

Items	Value
TA (m)	7.2
TF (m)	6.8
LPP (m)	95
LOA (m)	111
Density of air ( $\rho_A$ ) (Kg/m <sup>3</sup> )	1.292
Air temperature (°C)	0
Relative wind direction (°)	354.00
Relative wind speed (m/s)	10.2
Wind force coefficient ( $C_{Air}$ , Assume)	-0.744
Wind resistance (kN, $\Delta R_{Air}$ )	-10.00

Table 10은 Araon 선박의 바람에 의한 저항 보정 값을 보여주고 있는데  $C_{Air}$  값은 추정 값을 사용하였다. 바람의 속도가 크지 않고 바람의 방향이 선박의 침로 (180°)와 반대 방향으로 작용하고 있어 저항 값이 음수로 나왔음을 알 수 있다.

아라온 선박의 조류에 대한 보정 결과는 Table 11에 정리하였다. Table 11에서 얻어진 결과는 조류의 상대 속도로 계산한 결과로 조류 속도가 작아 저항의 보정 값이 상당히 작은 것을 알 수 있다.

흘수에 대한 보정은 식 (18)과 (19)를 사용하여 보정할 수 있다. 식 (18)은 엔진출력으로 보정이 되는 방법이고 식 (19)는 저

항을 보정하는 방법이다. 하지만 본 논문에서는 시운전 흘수 조건과 일치하여 보정에서 제외하였다.

Table 11 Correction of current of Araon

Items	Value
Water temperature (°C)	10
Water density (Kg/m <sup>3</sup> )	999.8
Current speed (m/s)	0.1
Current direction (°)	120
Coeff. of viscosity ( $\mu$ , kg/m-s)	0.001317
Coeff. of kinematic viscosity(m <sup>2</sup> /s)	0.001318
Reynolds number ( $Re_v$ )	7,210
Cf	0.0217
Projection area (m <sup>2</sup> , Assume)	700
$\Delta R_{cu}$ (kN)	0.11

### 3.4 빙저항, 엔진출력 보정 결과

HSVA(2007)의 두께와 강도 보정을 한 결과를 정리하면 Table 12와 같이 정리 할 수 있다.

Table 12 Calculating of corrected power

ID	F1	F2	Measured power(MW)	Corrected power(MW)
A	0.538	1.22	8.02	4.25
B	0.809	1.17	6.10	5.62
D	0.302	1.27	6.95	1.65
E	0.328	1.22	7.95	2.01
F	0.747	1.11	5.99	4.52
G	0.346	1.14	6.04	1.50
H	0.404	1.16	5.03	1.62
J	0.275	1.18	6.55	1.22

아라온의 성능보다 과도한 빙두께이지만 빙 강도가 약한 큰 빙판에서 시운전한 결과 예측된 결과보다 수정된 엔진 출력 값이 상당히 작은 것을 알 수 있다.

3.2절과 3.3절의 보정 결과를 정리하면 해빙에 의한 표류 속도 보정 값( $V_{id}$ )은 0.49 knots, 수심에 의한 속도 보정( $\Delta V_s$ ) 값은 0.2132 knots로 식 (26)에 의한 전체 속도 보정 값은 약 0.7032 knots 이다. Table 4의 예측된 속도 값에 보정 값을 더하여 최종 예측 속도를 구할 수 있다.

바람에 의한 저항(-10 kN)과 조류에 의한 저항(0.37 kN)을 보정하면 -9.63 kN를 얻을 수 있는데 9.63 kN의 저항을 Fig. 3의 볼라드풀 시험(Bollard pull test) 결과를 사용하여 구할 수 있다. Fig. 3에 표시된 프로펠러 회전수와 추력, 프로펠러 회전수와 엔진출력 관계를 통해 계산을 하면 9.63 kN의 저항에 해당하는 엔진 출력은 9 kW이다.

### 3.5 결과 고찰

남극과 북극에서 시운전을 수행하여 선박의 주어진 흘수 조건에서 선박의 속도, 엔진 출력 등이 예측되고, 시운전 수행시의 존재했던 바람, 파도, 조류, 수심, 해빙의 표류 등 환경 변수에 대해 보정을 통해 환경 변수 영향을 제거한 결과가 최종 시운전 결과로 Table 13으로 정리 할 수 있다.

Table 13 Speed power value of Araon after correction

ID	V (knots)	Power(MW)
A	2.22	4.24
B	1.71	5.61
D	0.15	1.64
E	1.23	2.00
F	4.85	4.51
G	4.08	1.49
H	2.70	1.61
J	2.07	1.21

보정을 수행한 아라온의 목표가 되는 빙두께는 1.0m, 빙강도는 500kPa 이었다. Araon 목표에 비해 Table 4에서 보는 바와 같이 빙 두께는 두껍고, Table 7에서 보는 바와 같이 빙강도는 약한 상황에서 평탄빙이 아니고 큰 빙판에서 수행된 시운전으로 평탄빙에서 결과인 1.03m 빙두께에서 10MW 엔진 출력과 차이가 있는 것을 알 수 있다. 하지만 Fig. 4는 아라온이 1.0m 두께, 630kPa 강도에서 보정을 수행한 결과로 10MW 엔진출력보다 작은 상태에서 시운전 속도 성능 조건을 모두 만족하는 것을 알 수 있다.

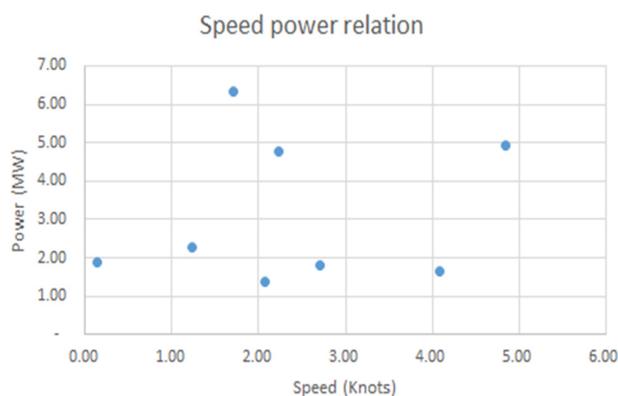


Fig. 4 Speed power relation of Araon after correction

Fig. 4는 보정 값의 결과가 속도와 파워의 일관된 경향을 보여 주고 있지 못하는 것은 각각의 시운전 조건이 다양하여 발생한 것으로 큰 빙판이 중첩되어 있는 경우에서의 시운전 수행, 구속되어 있는 상태의 큰 빙판에서의 시운전 수행, 빙판의 크기가 다른 상태에서의 시운전 수행 등으로 쇄빙에 필요한 엔진 동력이 해빙의 상태에 따라 상이한 것을 알 수 있다.

## 4. 결론

빙해역 시운전시 환경변수를 보정하는 방법에 대한 연구를 수행하였다. 일반 해역에서 환경 변수에 대한 보정과 빙해역에서 환경 변수에 대한 보정의 차이와 빙해역에서 보정의 주요 변수인 빙 두께, 빙강도 등의 보정 방법에 대해 문헌적인 조사와 실제 사용되는 방법에 대해 정리하였고, 아라온 선박을 사용해 실험해역에서 예측된 결과를 활용한 보정을 수행하여 결과를 정리하였다. 본 연구를 통해 얻어진 결론을 정리하면 다음과 같다.

- (1) 빙해역 시운전이 외란이 없는 상태의 결과로 보정을 하기 위해 필요한 정보와 예측 방법, 절차 등을 정리하였다.
- (2) 빙 두께와 빙강도 보정 방법은 아라온의 실선 데이터를 사용해 검증 및 비교 분석하였다. 또한 빙강도 보정을 위한 빙 굽힘강도 계산은 Timco & O'Brien(1994) 방법(식 14)을 사용하는 것이 보다 합리적일 것으로 판단된다.
- (3) 빙해역에서 조류와 해빙의 표류에 의한 영향을 보정하는 방법을 제시하고 아라온의 적용하여 결과를 검증하였다.
- (4) 아라온 선박을 사용하여 각종 환경 변수에 대한 보정을 수행하여 시운전 성능이 사양을 만족함을 확인하였다.

## 후기

이 논문은 인하공업전문대학의 지원에 의하여 연구되었음.

## References

Choi, K.S., Kim, H.S., Ha J.S. & Lee, C.J., 2014. A comparative analysis of sea ice material properties in the Amundsen Sea, Antarctica. *Journal of the Society of Naval Architects of Korea*, 51(3), pp.254-258.

Cox, G.F.N., & Weeks, W.F., 1982, Equation for determining the gas and brine volumes in sea ice samples. *Crel Report 82-30*, Cold Resigns Research & Engineering Laboratory.

Henk, J.J., Boom V.D., Ivo, E., Hout, V.D., Maarten, B. & Flikkema, 2006, Speed-power performance of ships during trials and in service. *MARINE report*.

HSVA, 2007, Model test in brash ice for class 1b and 1a for a 52000 DWT tanker. *Hamburg HSVA*.

ITTC, 2002, ITTC-Recommended Procedures and Guidelines Testing and Extrapolation Methods Ice Testing Resistance Test in Level Ice, *ITTC 7.5-02-04-02.1*.

ITTC, 2005, ITTC Recommended Procedures and Guidelines Full scale measurements speed and power Trials analysis of speed/power Trial data, *ITTC 7.5-04-01-01.2*.

- International Organization for Standardization, 2002, ISO 15016.
- Kim, H.S., Lee, C.J., Choi, K.S. & Kim, M. C., 2011a. Study on icebreaking performance of the Korea icebreaker ARAON in the Arctic sea. *International Journal of Naval Architecture and Ocean Engineering*, 48(3), pp.208–215.
- Kim, H.S., Lee, C.J., Jeong, S.Y. & Choi, K.S., 2011b. A study on the speed sea trial on the ice field for ice breaking research vessel "Araon". *Journal of the Society of Naval Architects of Korea*, 48(5), pp.421–425.
- Kim, H.S., Lee, C.J. & Choi, K.S., 2012. Speed trial analysis of Korean ice breaking research vessel 'Araon' on the big floes. *Journal of the Society of Naval Architects of Korea*, 49(6), pp.478–483.
- Kovacs, A., 1997, Estimating the full-scale flexural and compressive strength of first-year sea ice. *Journal of Geophysical research*, 102(C4), pp.8681–8689.
- Lackenby H., 1963, The effect of shallow water on ship speed. *Wiley Online Library*, <https://doi.org/10.1111/j.1559-3584.1964.tb04413.x>
- Lee, C.J., Kim, H.S. & Choi, K.S., 2014. Comparative study of ice breaking performance according to scale of sea ice on ice field. *Journal of Ocean Engineering and Technology*, 28(1), pp.28–33.
- Lee, S.K., Kim, M.C., Kim, H.S. & Lee, C.J., 2011. Study on the correction method of ice strength and thickness applied to the sea trial condition based the ice model test results. *Journal of the Society of Naval Architects of Korea*, 48(5), pp.457–464.
- LNG world news, 2017, SCF's ice-breaking carrier in Yamal LNG first, Available at: <https://www.lngworldnews.com/scfs-ice-breaking-carrier-in-yamal-lng-first/> [Accessed 31 March 2017].
- Mads, A., 2010. *Monitoring of hull condition of ship*. Master degree Thesis. Norwegian University of Science and Technology.
- Ship technology, 2018, Christophe de margerie class icebreaking LNG carriers, Available at: <https://www.ship-technology.com/projects/christophe-de-margerie-class-ice-breaking-lng-carriers/> [Accessed 11 July 2018].
- Timco, G.W. & O'Brien, S., 1994. Flexural strength equation of sea ice. *Cold Regions Science and Technology*, 22, pp.285–298.
- Vladimir, L., 2010, Full-scale ice trials of the Korean research icebreaker ARAON, *Arctic and Antarctic Research Institute(AARI) Scientific-Technical report*.
- Weeks, W. & Assur, A., 1967, The mechanical properties of sea ice Part II : Physical Science Section C : Physics and mechanics of ice. *CRREL Report Cold Resigns Research & Engineering Laboratory*.
- Wilkman, G., Elo, M., Forsén, A.-C., Demmo, K. & Myklebust, J., 2003. Ice trials of KV SVALBARD. *17th International Conference on Port and Ocean Engineering under Arctic Conditions*, Trondheim, Norway, June 16–19 2003, pp.453–466.
- Wilkman, G., Elo, M., Lönnberg, L. & Kunnari J., 2007. Ice trials of MV NORILSKIY NICKEL in March 2006. *19th International Conference on Port and Ocean Engineering under Arctic Conditions*, Dalian, China, June 27–30 2007, pp.405–418.



김현수