

# 구조적 안전성을 고려한 빙해선박의 안전 운항속도 평가

노인식<sup>1,†</sup>·임승재<sup>1</sup>·강국진<sup>2</sup>  
충남대학교 선박해양공학과<sup>1</sup>  
선박해양플랜트연구소<sup>2</sup>

## Safe Speed Estimation of Arctic Ships considering Structural Safety

In Sik Nho<sup>1,†</sup>·Seung Jae Lim<sup>1</sup>·Kuk Jin Kang<sup>2</sup>  
Dept. of Naval Architecture & Ocean Engineering, Chungnam National University<sup>1</sup>  
Korea Research Institute of Ships & Ocean Engineering<sup>2</sup>

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.

Damage due to ice collision is the most serious threat for the structural safety of ships operating in arctic region. Since such hull damages are usually caused by the collision of floating ice at excessive voyage speed of ships, the authorities responsible for the shipping at arctic sea are required to provide the speed limit for safe voyage, so-called safe speed. In countries near arctic ocean, such as Canada and Russia, empirical methods to determine the safe speed of ships based on their long experience of arctic voyage have been established and applied them in the real arctic navigation. However, in Korea, it is not easy to accumulate the arctic voyage experience and related technical database, so it seems to be a realistic approach to adopt a safe voyage speed estimating method in arctic sea based on the ice collision simulation technology using the nonlinear finite element analysis. The aim of this study is to develop a technique for estimating the safe voyage speed of vessels operating at arctic sea through the ice collision analysis. In order to achieve this goal, the standard procedure of the ice collision analysis is dealt with and example analysis was carried out and the results were considered. To investigate the validity of developed method, POLARIS system proposed by IMO was studied for comparison.

**Keywords** : Safe speed(안전속도), Ice collision simulation(빙 충돌 시뮬레이션), Nonlinear FE Analysis(비선형유한요소해석), Sea ice (해빙), POLARIS(폴라리스 시스템)

## 1. 서론

최근 극한지 공학의 발전과 함께 북극 지방의 자원 탐사/개발 사업이 활발히 이뤄지고 있다. 또한 온난화로 인해 북극해의 얼음의 면적이 줄어들면서 북극해 항로의 접근성이 증가하고 있으며 국내외 해운사 및 조선업체에서는 북극항로 개척을 통한 물류 운송 비용을 절감하고자 하는 시도로서 빙등급을 갖춘 선박 건조에 관심이 늘고 있다. 북극항로는 온난화의 영향으로 얼음의 면적이 많이 감소하고 있다고 하지만 여전히 여름철을 제외하고는 항상 두꺼운 얼음이 존재하고 있으므로 선박이 이 지역을 통과하기 위해서는 저온의 얼음 바다를 극복할 수 있는 극지운항 기술의 필요성은 점점 커지고 있다.

빙해역을 운항하는 선박에서 가장 심각하게 고려해야 되는 상황은 바다 위에 떠다니는 해빙과의 충돌 문제이다. 최근 해빙과의 충돌로 인해 선체에 심각한 손상을 주는 사례가 많이 보고되고 있는데 대부분이 선박의 과도한 속도로 인해 발생하고 있다. 극지방을 운항하는 선박은 기본적으로 내빙설계가 이루어져 있지만 이처럼 과도한 선속으로 운항 중 해빙과 충돌하게 되면 심각한 손상을 받게 된다. 이러한 손상을 방지하기 위해서는 Fig.1에서 보는 바와 같이 주어진 빙상(Ice condition)에서 선박의 추진능력(Attainable speed) 뿐만 아니라 선체의 강도와 구조적 안전성을 고려한 안전속도(Safe speed)를 유지하는 것이 가장 중요하다. 캐나다, 러시아 등 북극해를 끼고 있는 빙해 연안 국가들에서는 일찍부터 자국의 동계 물류 문제 때문에 오랜 빙해역

운항 경험에 바탕으로 통계적이고 경험적인 안전속도 결정 방법을 확립하여 선박의 안전한 빙해역 운항에 활용하고 있다 (STX Canada Marine, 2014).

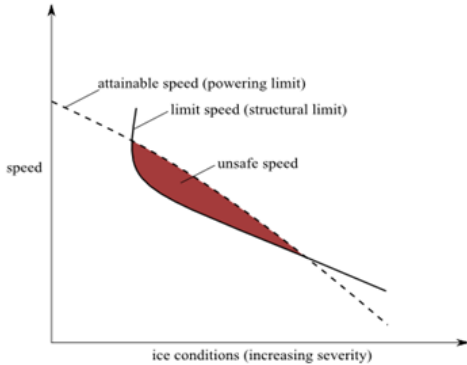


Fig. 1 Concept of safe speed diagram (Dolny et al., 2013)

국내에서는 빙해역 연안 국가와 달리 겨울에 바다가 얼지 않아 원천적으로 실선 시험이나 현장 계측 연구를 진행하기에는 근본적인 환경적 제약을 받고 있다. 따라서 이러한 경험과 데이터 베이스의 축적이 원천적으로 어려운 상황이므로 결국 선박의 빙 충돌 시뮬레이션 기술을 기반으로 안전 운항속도를 추정하는 방식을 채택하는 것이 가장 현실적인 접근 방법으로 보인다.

빙 충돌 시뮬레이션 기술을 기반으로 선박의 안전속도를 결정하기 위해서는 우선 극지의 해상 및 빙상 환경을 조사 분석해야 하며, 극지 운항 선박의 구조적 특성에 대한 정보가 확보되어야 한다. 또한 빙 충돌해석을 위한 극빙의 재료특성에 대한 기반 연구는 필수적이다 (Kujala et al., 2007). 본 연구에서는 여러 가지 빙 충돌 시나리오와 빙과 선체 간의 상호작용을 검토하고, 비선형 동적 구조해석 기법을 기반으로 하는 합리적인 빙-선체 충돌 해석의 표준 절차를 연구하여 선체의 안전속도 추정에 적용하였다 (Nho et al., 2016).

IMO에서는 최근 선종(ice class), 규모 등 운항 선박의 특성과 해역의 빙상 환경을 고려하여 운항평가를 할 수 있는 POLARIS (Polar Operational Limit Assessment Risk Indexing System) 시스템을 제안하여 규정화를 준비하고 있으므로, 국내에서도 빙해역 운항 선박의 안전 속도(safe speed) 예측에 POLARIS를 활용하기 위한 사전 연구와 준비가 진행되어야 할 시점으로 판단된다. 본 연구에서도 POLARIS의 적용에 대한 타당성 조사와 더불어, 개발된 안전속도 추정법과의 비교/검증을 시도하였다.

## 2. 빙 충돌 해석

본 연구의 목표는 빙 충돌 해석을 통해 빙해역에서 운항하는 선박의 안전속도를 추정하는 것이다. 빙 충돌에 의한 빙 하중의 발생과 선체의 손상은 동반되는 빙의 파괴와 밀접한 관계가 있기 때문에 빙의 파괴현상을 합리적으로 묘사할 수 있는 고도의 비선형 구조해석 기법이 적용되어야 하지만 현 시점까지도 실제 빙

충돌 및 파괴 현상을 그대로 반영하지는 못하고 있는 실정이다.

빙 충돌 해석 결과는 충돌 시나리오 설정, 빙의 재료특성 및 비선형 구조해석 기법 등 여러 가지 요인에 따라 민감하게 달라지기 때문에 신뢰성 있는 해석 결과를 얻기 위해서는 실제 빙 충돌 상황을 유사하게 묘사할 뿐만 아니라 합리적인 계산시간으로 선체구조의 거동을 현실적인 오차범위 이내로 추정할 수 있는 표준적인 해석절차를 정립할 필요가 있다(Nho et al., 2017).

빙해역에서 운항하는 선박이 얼음과 충돌하는 상황은 매우 다양하지만 본 연구에서는 선수 측면에 해빙이 충돌할 때, 선체 손상이 가장 빈발할 것으로 판단하여 이 경우를 가장 중요한 빙 충돌 시나리오로 보고 해석을 진행하였다. 이때 빙편(ice floe)의 크기와 모양은 매우 중요한 요소로 고려되어야 하며 얼음의 강도 역시 핵심적인 인자로 간주된다.

### 2.1 빙 충돌 시나리오

빙 충돌 시 선체구조의 안전성을 평가하기 위하여 여러 가지 빙 충돌 시나리오를 고려하였다. 선박이 얼음과 충돌하는 상황은 pack ice 상태가 대부분이기 때문에 본 연구에서는 가장 중요한 빙 충돌 시나리오로서 빙편(ice floe)의 날카로운 모서리 부분이 선수의 어깨(shoulder) 부위에 충돌하는 상황을 상정하였다. 이때 빙상(ice condition)으로는 빙해역 연안 국가들이 해역별 빙상 자료로 발표하는 ice chart와 egg code로부터 얻은 얼음의 두께와 크기를 적용한다. 그러나 아직 빙 충돌 해석 기술의 한계로 인하여 빙 집적도(ice concentration)에 따른 효과는 고려하지 않았다.

### 2.2 빙 충돌해석 조건

빙판의 움직임에 영향을 주는 주위 바닷물의 효과를 정확히 고려하기 위해서는 해수 영역을 유체요소로 모델링하는 것이 가장 합리적인 방법이지만 아직 해의 정확성이 완전히 검증되지 않은 상태이고, 막대한 해석시간이 소요되는 단점이 있다. 따라서 본 연구에서는 빙판의 부력을 고려하기 위하여 Fig. 2에서 보인 바와 같은 비선형 스프링 요소를 사용하는 통상적인 방법을 적용하였으며, 빙판의 유체동역학적 효과를 표현하기 위하여 빙판의 질량에 부가수 질량(added mass)을 추가하는 비교적 간편한 해석 모델을 적용하였다 (Nho et al., 2016).

빙의 기계적 성질은 온도, brine 함유율, 결정의 크기, 변형도 속도 등 다양한 요인들에 의해 복잡하게 변화한다. 빙의 가장 전형적인 특성인 변형속도 의존적 특성을 고려한 구성방정식이 여러 연구자들에 의해 제안되어 왔으나, 극지 현장의 빙상에 대한 실측 재료특성치 데이터의 부족으로 실제 문제에 이를 그대로 적용하는 것은 매우 어렵다. 따라서 본 연구에서는 상대적으로 간단한 탄소성 구성 방정식을 이용하였다. 그리고 콘크리트 등 취성재료에 적용되고 있는 Drucker-Prager 항복조건을 채택함으로써 압축보다 인장에 취약한 해빙의 취성을 고려하였다 (Kujala et al., 2007; Jose & Cela, 2002).

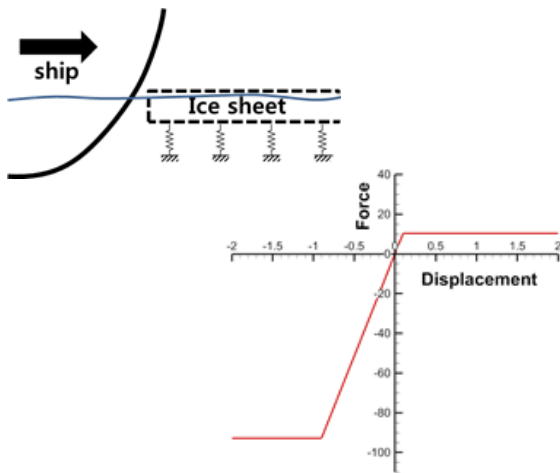


Fig. 2 Nonlinear springs for buoyancy effects of level ice

### 2.3 안전속도 추정 절차

앞서 보인 Fig. 1은 선박의 안전속도 곡선의 기본 형태를 나타내고 있다. x축은 얼음의 두께나 모양 등 빙상(ice condition)을 나타내고 있으며 y축은 선박의 속도로서 해상의 빙상에 따라 결정되는 항해 가능한 위한 최고속도를 표시한 것이 통상 말하는 안전 속도 곡선이 된다. 안전 속도 곡선은 선박의 최대 추진 성능을 고려하되 구조 강도 상 안전성 기준을 만족하는 최대 속도를 의미한다. 이때 안전속도 추정에 있어서 적용될 수 있는 선체 구조의 안전성 기준은 아직까지 공식적으로 발표되어 있지 않다. Table 1과 같은 순차적 손상 기준이 고려되고 있으며 잔류 소성 변형의 크기를 기준으로 사용할 수 있다 (STX Canada Marine, 2014). 본 연구에서는 소성변형이 발생하지 않는 상태(DS=1) 즉 선체의 응력이 항복하지 않는 상태를 기준으로 하였다.

Table 1 Damage severity index

Damage severity (DS) number	Description
0	No damage
1	High measured stress
2	Slight deformation of hull, denting, propeller
3	Small puncture or fracture, extensive denting
4	Large hole
5	Vessel sank

선체 구조의 안전성을 고려한 안전속도를 결정하기 위해서는 빙 충돌 속도와 빙 두께와 빙 강도 그리고 빙의 집적도를 포함하는 빙상의 조합에 따른 수많은 빙 충돌 조건에 대하여 시뮬레이션을 수행하고, 각 경우에 대한 선체의 구조적 안전성을 확인해야 하기 때문에 방대한 양의 구조해석 결과가 요구된다.

따라서 해석 시간을 가능한 한 절감하기 위해서는 해석의 정도를 훼손하지 않는 범위 내에서 모델링의 크기와 자유도 수를 줄여 소요되는 해석시간을 최소화 하는 한편, 합리적인 순서에 따라 충돌 시나리오의 해석을 진행하는 것이 필요하다. 안전속도는 선박의 추진성과 구조적 안전성을 동시에 고려해야 하므로 우선 선박의 추진 성능을 고려한 안전속도(즉 attainable speed)로부터 출발하면 구조해석 분량을 최소한으로 줄일 수 있다.

Fig. 3은 본 연구에서 제안하고 있는 안전 속도 추정방법을 나타낸다. x축은 얼음의 두께, y축은 선박의 속도를 표시하며, 점선으로 표시된 곡선은 빙해수조의 모형시험에서 얻은 attainable speed로서 선박의 추진성능의 한계를 의미한다. 그리고 이 점선은 빙 충돌 해석에 있어 빙 충돌 시나리오의 출발점으로 사용할 수 있다. 이 곡선을 따라 해당되는 빙상과 선속 즉 빙 충돌 속도에 대한 구조해석을 수행하여 선체의 구조적 안전성을 확인한다.

선체 구조의 응력이 안전 기준을 만족하면 다음 빙 충돌 조건(선속)으로 넘어가되 만약 안전성 기준이 만족되지 않으면 선박의 속도를 낮추는 조건으로 재해석하여 안전성 기준과 비교한다.

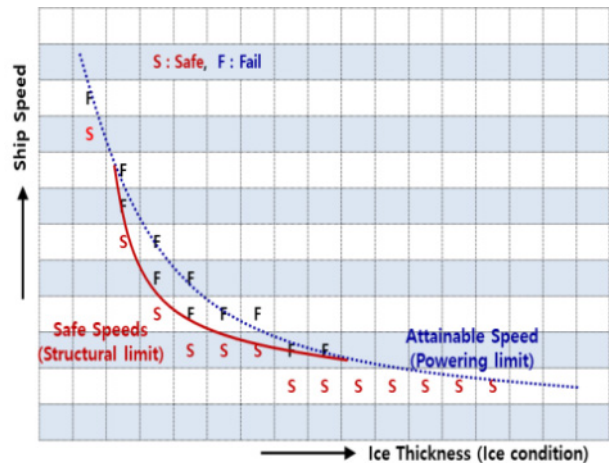


Fig. 3 Safe speeds and attainable speed

이러한 과정을 반복하면 선체의 구조적 안전성을 만족하는 속도에 도달하게 되고, 각 빙 두께에 대하여 도출된 이 점들을 연결하면 실선으로 표시되는 안전속도 곡선을 얻을 수 있다.

## 3. 빙 충돌 해석 및 안전속도 평가

### 3.1 빙 충돌 해석 조건

먼저 빙 충돌해석 결과의 경향과 타당성을 검토하기 위하여 pack ice 상태에서 빙편(ice floe)의 크기에 따른 빙 충돌 해석 결과를 비교, 고찰하였다. 해석에 적용할 빙 충돌 시나리오를 선정하기 위하여 선박이 운항 중, 3가지 종류의 빙편이 선수 선측(shoulder)에 충돌하는 상황을 고려하여 선체의 응답을 해석하고 빙편 종류에 따른 선체구조 응답의 경향을 분석하였다.

시계산의 대상선박으로는 국내 유일의 쇄빙선인 아라온호를 선정하였다. 3 가지 크기의 빙편(10 m x 10 m x 1 m, 20 m x 20 m x 1 m, 50 m x 50 m x 1 m)에 대하여 선박이 15knots의 속도로 충돌하는 과정을 해석하였다. Fig. 5에 빙편이 충돌하는 선수 선측 지점 주위의 등가응력 분포를 개략적으로 보였으며, 빙편 모서리가 직접 부딪히는 위치에서 큰 응력이 지속적으로 발생하는 것을 확인할 수 있다. Fig. 6에는 최대 응력이 발생하는 지점에서 빙편의 크기에 따라 등가응력의 시계열을 비교하여 보였다.

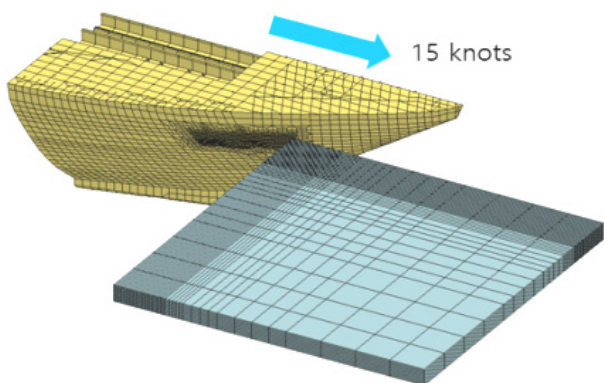


Fig. 4 Rectangular ice floe(20x20x1 m) colliding to the bow shoulder of ARAON

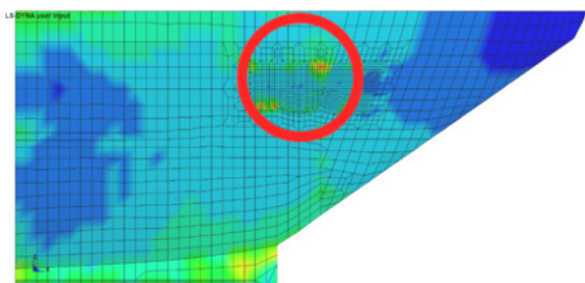


Fig. 5 Effective stress around colliding position

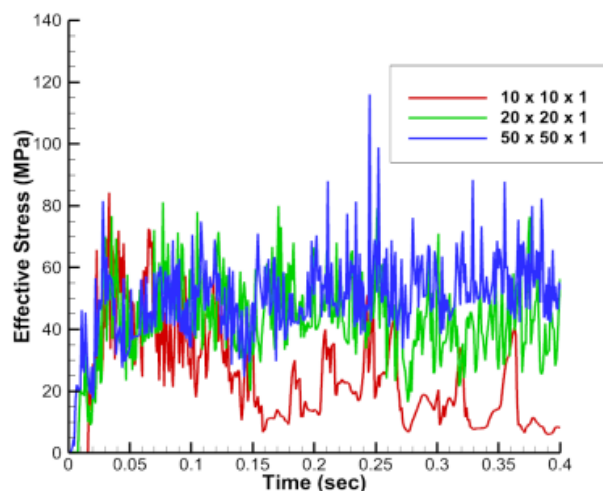


Fig. 6 Time histories of effective stress

10 m x 10 m x 1 m의 가장 작은 빙편 충돌 시에는 비교적 응력 수준이 낮지만, 초기 충돌 응력에는 큰 차이가 없으며, 얼음의 크기가 증가할수록 더 큰 응력이 발생하지만 빙편 크기가 20 m x 20 m x 1 m 이상으로 커지면 전체 응력의 증가 폭은 그다지 크지 않음을 확인하였다. 응력의 분포가 불규칙하게 발생하는 것을 확인할 수 있는데 이것은 얼음의 파괴거동에 대한 불확실성이 매우 크기 때문으로 판단된다.

### 3.2 시뮬레이션에 의한 안전속도 추정

빙 충돌 시뮬레이션을 이용한 선박의 안전속도 추정 기법을 적용하고 그 타당성을 검토하였다. 대상선은 3.1절에서 보인 쇄빙선 아라온호로 선정하였고 역시 동일한 구조해석 모델을 사용하였다. 먼저 Fig. 7은 빙해수조의 모형시험을 통해 얻은 아라온호의 attainable speed 즉, 빙 두께에 따른 운항가능 선속의 변화를 나타내었다. 모형시험은 빙의 굽힘강도 550 kPa, 빙 집적도 80% 상태에서 수행되었다. 빙 충돌 해석에서 빙편의 폭과 길이는 앞서 보인 3.1절에서 가장 큰 응력이 나타나는 50 m x 50 m 크기로 간주하였으며 얼음의 두께와 충돌 속도는 Fig. 7의 attainable speed 곡선을 따라 9가지 조건을 선정하였다.

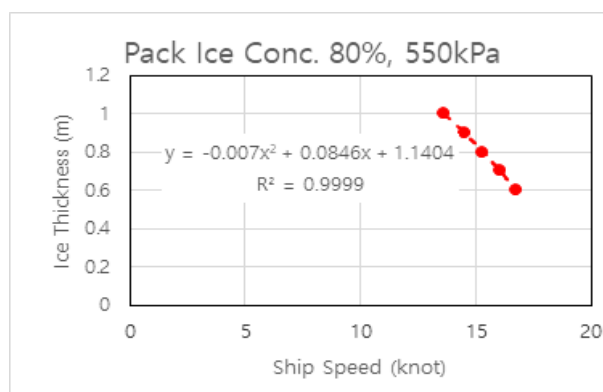


Fig. 7 Attainable speed of ARAON obtained from model test of KRISO ice tank

Table 2 Conditions and results of ice collision analysis

Load Case	Ice Thickness (m)	Attainable Speed (knots)	Max. Effective Stress (MPa)	Plastic strain
1	0.60	16.7	72	0
2	0.65	16.4	157	0
3	0.70	16.0	219	0
4	0.75	15.7	257	0
5	0.80	15.3	184	0
6	0.85	14.9	219	0
7	0.90	14.5	266	0
8	0.95	14.0	92	0
9	1.0	13.6	79	0

이 때, 빙의 집적도에 대한 효과는 다물체 동역학적 해석기법을 적용해야 하지만, 본 연구에서는 해석기법 상의 한계로 인하여 고려하지 않았다.

Table 2에 선정된 9 가지 조건 및 이에 대한 빙 충돌 해석 결과를 정리하였다. 모든 경우에서 선체구조용 강역의 항복응력(285 MPa) 보다 낮고 소성변형 역시 발생하지 않는 것으로 나타나므로 구조적 안전성을 만족하는 것을 확인하였다. 이 해석 결과로부터 모든 얼음 두께에서 대상 선박의 안전속도가 attainable speed와 같다고 결론을 내릴 수 있다.

### 4. POLARIS 시스템

시뮬레이션을 통한 안전속도 추정기법의 비교 및 검증을 위하여 POLARIS 시스템을 검토할 수 있다. POLARIS 시스템은 IMO에서 제안하였는데, 캐나다에서 사용 중인 AIRSS 시스템 (Timco et al., 2003)을 기반으로 하고 있다. 이는 빙해역에서 빙상에 따라 각종 빙 등급 선박의 운항가능 여부를 결정할 수 있는 시스템이다(IMO, 2014). POLARIS의 방법은 기본적으로 빙상(ice regime)을 특성화하고 운항중인 선박의 대빙등급에 따른 위험지수치(Risk index values, RVs)값을 결정하여 위험지수결과(Risk index outcome, RIO)를 계산하게 된다. 계산된 RIO 값을 통하여 최종적으로 운항가능 여부 판정을 하게 된다.

Table 3 Stage of development

Number from WMO Sea Ice Nonmenclature	Element	Thickness	Symbol
	No stage of development	-	0
2.1	New ice	-	1
2.2	Nilas; ice rind	< 10 cm	2
2.4	Young ice	10-30 cm	3
2.4.1	Gray ice	10-15 cm	4
2.4.2	Gray-white ice	15-30 cm	5
2.5	First-year ice	30-200 cm	6
2.5.1	Thin First-year ice	30-70 cm	7
2.5.1.1	Thin First-year ice, first stage	30-50 cm	8
2.5.1.2	Thin First-year ice, second stage	50-70 cm	9
2.5.2	Medium first-year ice	70-120 cm	1•
2.5.3	Thick first-year ice	> 120 cm	4•
2.6	Old ice		7•
2.6.1	Second-year ice		8•
2.6.2	Multi-year ice		9•
10.4	Ice of land origin		▲•
	Undetermined or unknown		X

빙상을 구성하는 요소로서는 얼음이 종류별로 현재 빙상에서 차지하는 비율인 부분집적도(partial ice concentration)와 얼음의 두께와 나이로 분류된 발전 단계(stage of development)와 얼음의 녹은 정도(stage of decay)로 정의하여 Table 3과 같은 도표로 제공하고 있다 (IMO, 2014). 얼음 두께별 운항 가능한 선박의 대빙등급(ice class)은 크게 category A, B, C, 3 단계로 나눌 수 있으며 A에서 C로 갈수록 운항 가능한 빙 두께가 얇아지며 요구되는 선박의 구조 강도 역시 낮아진다.

IMO는 겨울과 여름에 대한 위험지수치(RVs)를 각각 제안하고 있다. 여름철 얼음이 녹아 강도가 약해짐에 따라 여름철의 값이 겨울철에 비해 조금씩 양의 값으로 증가한다.

위험지수결과(RIO)는 각 얼음 종류별 부분집적도와 선박의 위험지수치를 곱하여 합산하면 다음 식과 같이 계산할 수 있다.

$$RIO = (C_1 * RV_1) + (C_2 * RV_2) + \dots (C_n * RV_n) \quad (1)$$

여기서,

$C_1 \dots C_n$  : concentrations of ice types within the ice regime,  
 $RV_1 \dots RV_n$  : corresponding Risk Index Values for each ship's Ice Class

빙 집적도 정보는 북극해 연안의 빙해역 국가에서 제공하는 ice chart 와 EGG code를 이용하여 얻을 수 있다. Fig. 8 오른쪽 그림에서 보는 바와 같이 EGG code는 빙해역상에 존재하는 지역별 해빙에 대한 정보를 제공한다. EGG code의 가장 윗 칸은 개빙구역(open water)을 제외한 총 얼음 집적도(10분율)를 나타낸다. 두 번째 칸은 각 얼음 종류별 빙 집적도를 나타낸다. 세 번째 칸은 두 번째 칸의 집적도에 대한 얼음의 종류를 의미하며, 네 번째 칸은 종류별 얼음의 크기를 나타낸다. Table 4는 앞서 보인 계산방법을 통하여 구한 위험지수결과를 평가하는 기준표이다. 이로부터 운항가능(operation permitted), 제한속도 내에서 운항 가능(limited operation permitted) 또는 운항 불가능(operation not permitted)으로든 3단계로 구분하여 판정할 수 있다. 쇄빙선의 호위를 받는 경우는 일반적인 단독 항해보다는 안전하다고 판단하게 되므로 계산한 RIO값에 10을 더하여 평가한다.

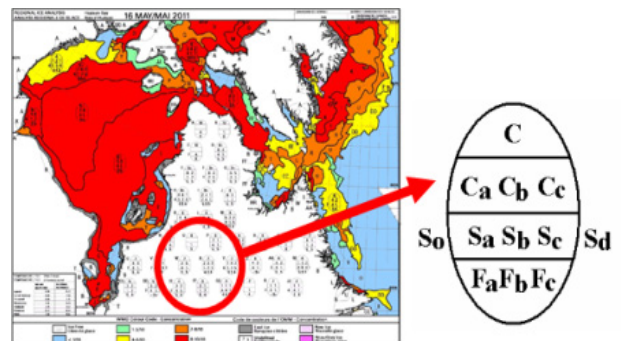


Fig. 8 Ice chart and EGG code (CCS, 2012)

Table 4 Risk index outcome evaluation criteria

$RIO_{SHIP}$	Category A & B (PC1 - PC7)	Category C (below PC7)
$RIO \geq 0$	Operation permitted	Operation permitted
$-10 \leq RIO < 0$	Limited speed operation permitted	Operation not permitted
$RIO < -10$	Operation not permitted	Operation not permitted

POLARIS 시스템의 실제 적용 예로서 Fig. 9에 보인 빙상에서 아라온호(PC1 대빙등급)가 항해 가능한지 검토하였다. 먼저, IMO (2014) 문서에 정리되어 있는, PC 1에 대한 위험지수치 (RVs) 값을 Table 5에 요약하였다. (2)식에서 보인 바와 같이 각 빙상 별 부분집적도와 RVs값을 곱한 후 모두 합산하여 위험지수 결과(RIO)를 구할 수 있으며, Table 4의 평가기준과 비교하여 운항 가능 여부를 평가할 수 있다. 계산 결과 25가 산출되므로 아라온호는 이 빙상에서 운항이 가능함을 확인할 수 있다.



Fig. 9 POLARIS Example

Table 5 RVs of PC 1 (IMO, 2014)

Ice class	TFY (Thick First Year Ice)	MFY (Medium First Year Ice)	IF (Ice Free)
PC1 (Category A)	2	2	3

$$\begin{aligned}
 RIO &= C_{TFY} \times RV_{TFY} + C_{MFY} \times RV_{MFY} + C_{IF} \times RV_{IF} \\
 &= [4 \times 2] + [1 \times 2] + [5 \times 3] \\
 &= 25 \text{ (Operation Permitted)}
 \end{aligned}
 \tag{2}$$

POLARIS 방법에서는  $-10 \leq RIO < 0$  범위에서는 제한속도가 주어지지만 (IMO, 2014), 얼음 두께별로 상세한 안전속도 관련 자료를 제공하기 어렵다는 단점이 있지만, EGG code를 포함

하는 빙상정보만 주어지면 쉽게 빙해역에서 선박의 운항가능 여부를 결정할 수 있다는 편리함이 있다.

## 5. 결론

본 연구에서는 빙해역을 운항하는 선박의 안전속도를 추정함에 있어서 빙 충돌 시뮬레이션 기술을 적용하여 선체의 강도를 고려하는 방법을 다루었다. 상용 비선형 유한요소해석 코드 LS-DYNA를 이용하였고, 빙-선체 충돌 과정에서 발생하는 응력과 소성 변형도 크기를 기준으로 구조적 안전성을 평가하였다. 빙해수조에서 모형시험 결과로 얻은 빙 추진 성능 즉, attainable speed 곡선을 바탕으로 해석 조건을 결정하였다. 본 연구에서 채택된 예제의 경우 attainable speed 곡선 상의 모든 점에서 구조적 안전성을 만족하므로 이 곡선과 안전속도 곡선은 일치하는 것으로 간주할 수 있다. 이렇게 얻어진 안전속도는 안전한 빙해역 항해를 위한 참고 자료로 활용할 수 있다.

또한 안전속도에 대한 결과를 검증하기 위하여 IMO에서 제안한 POLARIS 시스템의 적용방안을 검토하였으며 예제 계산을 통하여 적용 가능성을 모색하였다.

해빙이 선체에 충돌하는 상황과 그 결과는 얼음 크기, 충돌 위치, 각도 등에 따라 크게 달라질 수 있으며, 계절별, 지역별로 불확실성이 매우 큰 빙의 재료특성은 해석 결과에 큰 영향을 미치기 때문에 향후 이 분야에 대한 추가적인 연구를 통하여 보다 신뢰성 있는 시뮬레이션 기법을 정립해야 한다. 현재까지는 본 연구에서 채택된 해석 방법으로는 pack ice 조건에서 빙 집적도에 따른 효과를 합리적으로 고려하기 어려우므로 향후 추가적인 연구가 필요한 것으로 보인다.

## 후 기

본 연구는 해양수산부 해양안전 및 해양교통시설기술개발 사업 “북극항로 운항선박용 항해안전지원시스템 개발” 과제와 산업통상자원부 산업핵심기술개발사업 “ARC7 극지 환경용 해양플랜트 내빙구조 설계기술 개발” 과제의 지원으로 수행되었습니다.

## References

- Canadian Coast Guard, 2012. *Ice navigation in canadian waters record of amendments*. Minister of Fisheries and Oceans Canada 2012.
- Dolny, J., Yu, H.C., Daley, C. & Kendrick, A., 2013. Developing a technical methodology for the evaluation of safe operating speeds in various ice conditions. *Proceedings of the 22nd International Conference on Port and Ocean Engineering under Arctic Conditions*, June 9-13, 2013 Espoo, Finland.

IMO, 2014. *Polar limitations assessment risk indexing system (POLARIS) background to development, Rev.05*. Annex of Maritime Safety Committee 94th session Agenda item 3, MSC 94/INF.13, (12/12/2014).

Jose, J. & Cela, L., 2002. Material identification procedure for elastoplastic Drucker Prager model. *Journal of Engineering Mechanics*, 128(5) pp.586-591.

Kujala, P., Suominen, M. & Jalonen, R., 2007. *Increasing the safety of icebound shipping*. Final Scientific Report: Volume 2, Helsinki: Helsinki University of Technology, Ship Laboratory.

Nho, I.S., Lee, J.M., Oh, Y.T. & Kim, S.C., 2016. Analysis method of ice load and ship structural response due to collision of ice bergy bit and level ice. *Journal of the Society of Naval Architects of Korea*, 53(2), pp.85-91

Nho, I.S., Lim, S.J., Ryu, J.W. & Kang, K.J., 2017.

Safe speed estimation of arctic ships considering structural safety. *Proceeding of the Annual Autumn Meeting*, Yeosu, 13 November 2017, The Society of Naval Architecture of Korea, 페이지

STX Canada Marine, 2014. *Updating the arctic ice regime shipping system (AIRSS)*, Transport Canada.

Timco, G. and Johnston, M., 2003. *Arctic ice regime shipping system (AIRSS) pictorial guide*. Canadian Hydraulics Centre, TP14044E.

