

# 비내빙설계 해군 함정의 결빙지역 운항 능력 평가

김 현 옥<sup>\*,1)</sup>

<sup>1)</sup> 국방과학연구소 해양기술연구원

## Evaluation of the Capability of Non-Ice Strengthened Naval Vessels for Operation in Ice-Infested Area

Hyunwook Kim<sup>\*,1)</sup>

<sup>1)</sup> Maritime Technology Research Institute, Agency for Defense Development, Jinhae, Korea

(Received 12 November 2020 / Revised 18 December 2020 / Accepted 29 March 2021)

### Abstract

With the gradual increase in the ROK naval power, it is an undeniable fact that the time of operation in the ice-infested area will be necessary in the near future. Recently, cases of ice formation around Korean waters in wintertime have been frequently reported. However, in the case of the ROK naval vessels to date, it is a fact that the ice-strengthened perspective has not been considered from the design stage. In this study, the capability of operation in the ice-infested area of the ROK naval vessels, which did not take into account the ice-strengthened design, was reviewed through the evaluation of the vessel's structural integrity in accordance with the sea ice conditions.

Key Words : Naval Vessels(해군 함정), Non-Ice Strengthened(비내빙), Ice-infested Area(결빙지역), Iceberg(빙)

### 기 호 설 명

- $KE_n$  : Normal Kinetic Energy
- $IE_i$  : Ice Indentation Energy
- $IE_s$  : Structural Indentation Energy

### 1. 서 론

대한민국 해군의 영향력 및 작전 영역의 확장은 가까운 미래에 반드시 다가올 것은 자명한 사실이다. 현재까지의 대한민국 해군 활동 영역에서는 결빙지역에 대한 고려가 이루어지지 않고 있다. 결빙지역에서의 작전 필요성은 이후 작전 영역의 확장을 고려하는 경우가 아니더라도, 현재 대한민국 해군의 주요 작전 영역인 겨울철 서해상에서의 활동을 위해서도 반드시 고려해야 하는 상황이다. Fig. 1은 겨울철 서해상에서 결빙 현상이 발생하는 사례를 보여준다.<sup>[1-2]</sup>

\* Corresponding author, E-mail: hwkim0505@add.re.kr  
Copyright © The Korea Institute of Military Science and Technology



(a) Near Baekryeong Island



(b) Nearshore of Incheon

Fig. 1. Cases of ice-infested area in winter<sup>[1,2]</sup>

서해의 경우 현재 대한민국 해군의 주요 작전 영역에 포함되어 있으므로 만약 겨울철 결빙 해역에서의 긴급한 작전 수행이 요구되는 상황이 발생할 가능성이 충분히 있다. 이러한 경우 현재 내빙설계가 전혀 고려되지 않고 있는 대한민국 해군 함정이 결빙지역에서 충분히 작전이 가능한지 여부에 대한 평가가 우선적으로 요구된다고 할 수 있다. 미국, 캐나다 및 다수의 북유럽 국가와 같은 빙해역권 국가에서는 해안경비대(Coast Guard)에서 쇄빙능력을 가지고 있는 선박을 운용 중에 있으며 대표적인 쇄빙 능력을 가진 미국과 캐나다 해안경비대 선박은 Fig. 2와 같다.<sup>[3,4]</sup>

선체 외판 두께와 관련하여 면의 압력을 받는 판의 강도를 기준으로 일반 상선과 함정에 요구되는 외판 두께 비교 결과는 Fig. 3과 같이 상선에 비해 함정 외판 두께가 상당히 얇은 것을 확인할 수 있다.<sup>[5]</sup> 이는 앞서 언급한 바와 같이 함정의 경우 선체 경량화를 통해 기동성 확보 및 무기체계 탑재가 설계 요소에서 최우선적으로 반영되어 있기 때문이다.



(a) CCGS Louis S. St-Laurent(Canada)



(b) USCG Healy(U.S)

Fig. 2. Canadian and U.S. Icebreakers<sup>[3,4]</sup>

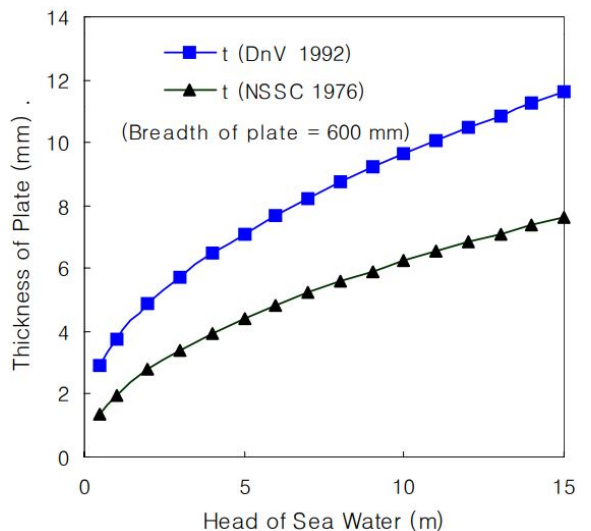


Fig. 3. Thickness of plate according to normal pressure<sup>[5]</sup>

일반적으로 쇄빙능력 또는 내빙성능을 가지고 있는 선박의 경우, 외판 두께가 일반적인 함정에서 요구하

는 선체 외판 두께 이상을 가져야 한다. 이러한 경우 신속성 및 다수의 무기체계를 탑재하기 위해 선체 자체의 중량을 최소한으로 경량화하여 설계되고 있는 함정 설계의 기본 원칙에 다소 위배되는 설계가 요구될 가능성이 높을 것으로 예상된다.

이러한 이유에서 현재 미국과 캐나다에서는 기존에 건조되어 활동하고 있는 자국 함정을 대상으로 별도의 내빙설계를 고려하지 않은 상황에서 결빙 지역에서의 실제 활동이 가능한지 여부에 대한 기초 연구를 단계적으로 추진하고 있는 것으로 파악된다. 미국 정부에서 발간한 공식적인 문서는 아니지만 내빙설계가 고려되지 않은 자국 해군 함정의 결빙 지역에서의 활동 가능성에 대한 연구가 수행된 바 있다. 분석 결과를 간략하게 요약하자면, 현재 선체 재료요건의 관점에서는 기존에 건조되어 활동 중인 함정의 경우 극지 운항에 요구되는 IACS Polar Rules와 빙해운항선박 지침<sup>[8,9]</sup>에서 정의하고 있는 극지 등급 중 ‘PC7’ 등급(오래된 빙의 개재(inclusions)가 포함될 수도 있는 얇은 두께의 1년생 빙 조건에서의 하기/추기 운항)을 만족하지만 선체 구조요건의 관점에서는 극지 운항이 제한됨을 확인하였다. 하지만 얼음의 두께가 상당히 얇고(thin), 열려있는 해빙구역(open sea ice fields)에서 대략적인 저속 운항(some low speed operations)이라는 전제조건에서는 비록 내빙설계가 고려되지 않은 함정의 경우에도 활동이 가능할 수 있다는 점을 초기 해석을 통해 확인하였고 추가적인 연구가 진행되고 있다<sup>[10]</sup>.

캐나다의 경우 대한민국 국방과학연구소와 유사한 DRDC(Defense Research & Development Council)라는 연구기관에서 내빙설계가 고려되지 않은 개념상의 구축함을 대상으로 실제 결빙 지역에서의 활동 가능성에 대한 기초 연구가 수행된 결과를 발표하였다<sup>[11,12]</sup>.

본 연구에서는 현재까지 발표된 연구결과에 대한 기본적인 분석을 수행하고 그 결과를 바탕으로 대한민국 해군 함정에서 유사한 제원을 가지고 있는 구축함을 대상으로 내빙설계가 고려되어 있지 않은 함정의 결빙지역에서의 운항 가능성을 평가하고 함정의 구조 안전성 확보 방안에 대해 논의하였다.

## 2. 국외/대한민국 해군 구축함 제원 비교

문헌조사를 통해 공식적으로 확인 가능한 캐나다 구축함의 주요 제원과 선체구조 관련한 제원을 Table

1과 2에 정리하였다. 여기서 ‘Notional’의 의미는 특정 해군 구축함을 지칭하는 것이 아닌 일반적인 구축함 또는 건조 예정인 구축함을 의미하는 것이다.

Table 1. Main particulars of notional destroyer

제 원	값
Length overall	151.4 m
Overall depth	16.5 m
Amidships depth	14.0 m
Maximum breadth	18.7 m
Displacement	7673 t
Length along waterline	142.8 m
Length between perpendiculars	137.8 m
Amidships location	68.9 m
Longitudinal center of gravity	72.0 m
Waterline breadth	16.8 m
Draft	6.7 m
Block Coefficient	0.48

Table 2. Structural parameter of notional destroyer

제 원	값
Web frame spacing	2000 mm
Hull longitudinal stiffener spacing	550 mm
Vertical spacing between decks	2750 mm
Deck longitudinal stiffener spacing	575 mm
Vertical stiffener spacing on watertight bulkheads	575 mm
Transverse offset of longitudinal bulkheads and girders	3450 mm
Vertical stiffener spacing on longitudinal bulkheads and girders	575 mm
Brackets connecting longitudinal hull frames and web frames	none

캐나다 구축함 제원은 해석을 목적으로 비교적 상세하게 소개되었으나 대한민국 해군에서 현재 활동

중인 구축함의 주요 선체구조에 대한 상세한 제원을 공식적으로 확보하는 것은 불가능하다. 따라서 배수량, 함정길이, 선폭 및 흘수를 기준으로 비교하여 유사한 함정을 대상으로 비교 평가하는 것이 현재로서는 가장 합리적인 접근방법이라 판단하였다. 비교 평가를 통해 현재 활동 중인 대한민국 해군 구축함 중 중무공 이순신급(KD-2)과 세종대왕급(KD-3) 구축함을 주요 제원을 기준으로 가장 적절한 비교 대상인 것으로 판단하였다. Table 3은 공개된 자료를 기초로 캐나다와 대한민국 해군 구축함의 주요 제원을 비교한 결과를 정리하였다.

Table 3. Comparison of main particulars of notional destroyer vs ROK destroyer

제 원	Notional Destroyer	KD-2	KD-3
Length overall	151.4 m	149.5 m	165.9 m
Maximum breadth	18.7 m	17.4 m	21.4 m
Displacement	7673 t	4400 t	7650 t
Draft	6.7 m	5.0 m	6.25 m

### 3. 내빙설계가 고려되지 않은 함정에 대한 결빙지역 운항 가능성 평가

현재까지 공개되어있는 데이터를 바탕으로 앞서 언급한 대로 별도의 내빙설계가 반영되어 있지 않은 구축함이 결빙지역에서의 작전을 수행하는 경우 선체 구조 관점에서의 구조 건전성을 평가하고 실제 운항 가능성에 대한 추가적인 분석을 수행하였다.

앞서 언급한 바와 같이 일반적으로 결빙 지역에서의 운항이 요구되는 선박에 비해 함정의 경우 선체 구조가 상대적으로 가벼운 경향이 있다. 하지만 일반적인 빙하중이 선체에 영향을 미치는 경우를 고려해봤을 때 상당히 국부적인 하중이 작용하는 경우가 대부분이므로, 비록 내빙설계가 고려되지 않은 함정의 선체 구조라 하더라도 함정의 전체 강도(Global strength)의 관점에서 고려하면 구조 건전성과 관련한 문제는 없을 것으로 예상된다. 따라서 내빙설계가 고려되지 않은 함정의 결빙지역에서의 활동 가능성을 평가하기 위해서는 국부적인 빙하중이 작용하는 경우(Local ice

impact)에 대한 평가가 중요하다.

내빙설계가 고려되지 않은 함정이 결빙지역에서의 활동이 가능한지 여부를 판단할 수 있는 현실적인 기준은 현재 함정 설계 기준으로 건조되어 활동하고 있는 함정이 결빙지역에서 구조 건전성 관점에서 심각한 손상으로 인해 위험이 발생하지 않아야 함을 전제 조건으로, 1) 어떠한 결빙 조건에서까지 활동이 가능한지에 대한 판단과 더불어 2) 최대 안전 운항 속도 범위를 제한하는 것이다. 이러한 판단을 위해 DDePS (Direct Design for Polar Ships)라는 평가방법에서는 실제 결빙지역에서 활동하는 선박이 경험할 수 있는 총 25개 수준의 다양한 선박-빙 상호작용 시나리오에 대한 빙하중 및 선체 구조 건전성 평가 방법을 제시하고 있다<sup>13-16)</sup>. 선체 구조 건전성을 고려한 안전 속도 평가를 위해서 제시된 총 25개의 시나리오 중 선박이 결빙 지역을 운항시 항로상에 존재하는 유빙 모서리와의 충돌을 고려한 ‘Case 2a: Glancing collision with wedge edge’ 시나리오를 선정하여 평가하였다(Fig. 4). Case 2a 시나리오는 IACS UR 12에서 설계 빙하중 평가를 위해 선정된 대표적인 빙충돌 시나리오이며, 따라서 본 연구에서도 선체 구조 건전성 평가를 위해 대표적인 시나리오로 채택하여 적용하였다.

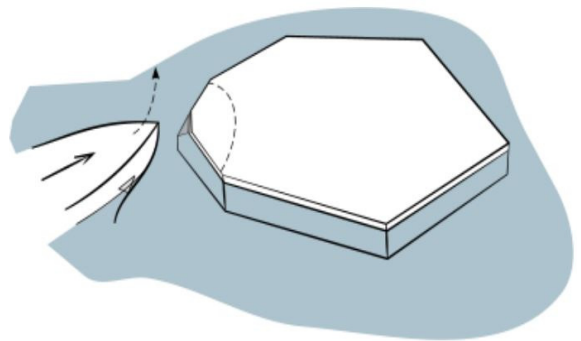


Fig. 4. Scheme of ‘Case 2a: Glancing collision with wedge edge’ impact scenario<sup>13)</sup>

결빙지역을 운항하는 선박-빙 상호작용에 의해 발생하는 빙하중 및 선체 구조 변형과의 관계를 Fig. 5와 6을 통해 개략적으로 나타냈다. 상호작용에 의해 발생하는 하중 크기를 수식을 통해 간략하게 평가하기 위해 적용된 방법이 Daley<sup>17)</sup>에 의해 제안된 에너지 평형 관계를 이용한 평가 방법이다. 이 방법의 접근법은 1) 선박과 빙을 각각의 체적을 가진 물체로

간주하고 2) 두 물체가 각각의 이동속도를 가지고 충돌하는 경우 3) 두 물체 사이의 운동에너지(Kinematic energy)와 충돌에 의한 빙 변형에 의한 변형에너지(Indentation energy)가 동일하다는 에너지 평형의 법칙을 기초로 하는 평가 방법이다(Fig. 5).

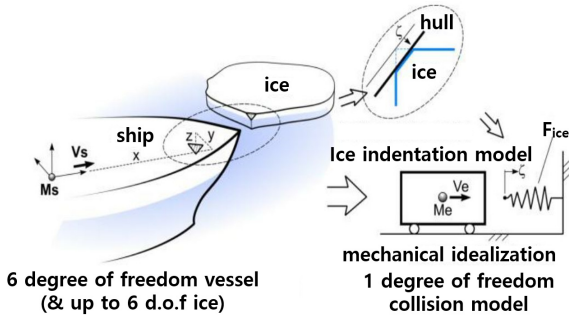


Fig. 5. Sketch of standard ship-ice interaction model<sup>[18]</sup>

$$KE_n = IE_i \quad (1)$$

이후 Dalcy<sup>[18]</sup>에 의해 실제 선박-빙 상호작용 시 선체 변형을 고려하는 경우 운항 효율성의 관점에서 선박 운항 속도를 증가시킬 수 있다는 연구 결과가 발표된 바 있다. 선박이 빙과 충돌하는 과정에서 변형 발생 가능성이 충분히 있고, 실제 충돌에 의한 선박 손상사례들이 다수 보고된 바 있다. 하지만 이전 연구에서는 선체는 변형이 절대 발생할 수 없는 강체(rigid body)로 가정하여 운동에너지 전체가 빙 변형에 의한 에너지로 변환된다는 가정을 기반으로 평가되었다. 하지만 이후 연구에서 선체가 강체가 아닌 변형 가능하다고(deformable body) 가정한 경우 동일한 결빙 조건에서 운항 속도가 증가함을 확인한 바 있다(Fig. 6).

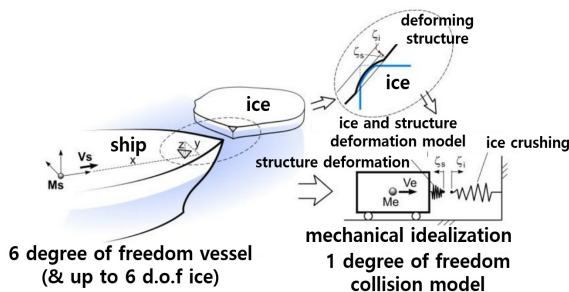


Fig. 6. Sketch for ship-ice interaction model considering structural deformation<sup>[18]</sup>

$$KE_n = IE_i + IE_s \quad (2)$$

적용한 식 (1)과 (2)에 대한 구체적인 내용은 Appendix 1을 통해 좀 더 상세하게 설명하였다.

특정 결빙 조건에서 운항하는 선박의 안전 운항 속도 평가 결과를 해석하는 방법을 Fig. 7에서 도식화하여 설명하였다. Fig. 7에서의 x축은 결빙 지역에서의 빙 두께를 나타내고 y축은 빙 직경 크기를 나타낸다. 특정 선박에 대한 안전 운항 속도 평가 후 그래프에 표시된 선의 위쪽 구역(붉은색 배경)은 현재 선체 설계 기준으로 구조 건전성이 확보되지 않는 영역을 의미하며 다시 말해 운항할 수 없는 결빙지역 조건을 나타낸다. 반대로 표시된 선의 아래쪽 구역(파란색 배경)에서는 선체 구조 건전성에 큰 위험 없이 결빙지역 조건 내에서 선박이 운항 가능할 것으로 판단되는 영역을 나타낸다. 그래프 상단에 표시된 계열표 중 첨자 ‘EP’의 의미는 선체 변형관점에서의 탄소성 변형(Elasto-Plastic deformation)을 의미하며, 첨자 ‘A’의 의미는 선체 구조 관점에서 허용되는 최대 소성 변형의 크기를 표기한다. 첨자 ‘B’의 의미는 선박의 운항 속도를 표기한다.

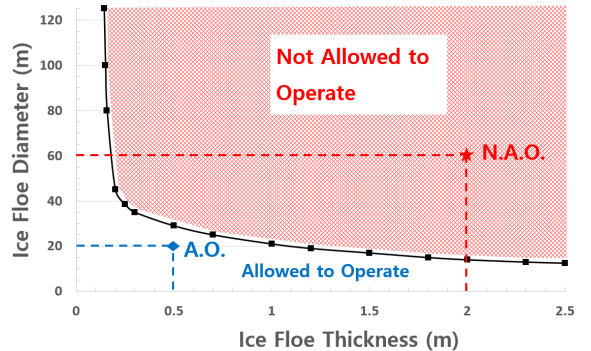


Fig. 7. Diagram of safe speed analysis result

좀 더 구체적으로 표시된 그래프의 의미를 설명하자면, 파란색 배경 내 ‘A.O.’로 표시된 결빙 조건에서는 운항이 가능하다는 의미이다. 이때의 결빙 조건을 x축과 y축에서 나타난 수치를 반영하여 조금 더 구체적으로 표현하자면 ‘빙 두께가 0.5 m이고, 빙 직경은 20 m인 결빙 조건에서 선체에 A cm 크기 만큼의 소성 변형이 허용된다면 B kts의 속도로 운항이 허용된다’라고 할 수 있다. 반대로 붉은색 배경구역 내 ‘N.A.O.’로 표시된 결빙 조건에서는 운항이 불가능하



다는 의미이며 동일한 방식으로 조금 더 구체적으로 표현한다면 ‘빙 두께가 2.0 m이고, 빙 직경은 60 m 인 결빙 조건에서 선체에 A cm 크기 만큼의 소성 변형이 허용된다 하더라도 B kts의 속도로는 운항이 불가하다’라는 의미임을 알 수 있다.

Fig. 8-10은 선체 구조의 관점에서 허용 가능한 최대 소성 변형 크기에 대한 결빙지역에서의 안전 운항 속도를 평가한 결과를 나타낸다. 평가 결과의 전체적인 경향을 요약하자면 1) 운항속도가 낮을수록 활동 가능한 결빙 지역에 대한 제한조건이 낮아짐을 확인할 수 있고 또한 2) 허용 가능한 최대 소성 변형의 크기가 커질수록 다소 가혹한 결빙지역 조건에서의 운항이 가능함을 알 수 있다. 허용 가능한 최대 소성 변형량에 따른 운항 속도에 관계없이 내빙설계가 반영되지 않은 선박에 대해 구조 건전성이 확보될 것으로 평가되는 결빙지역 조건을 Table 4에 정리하였다.

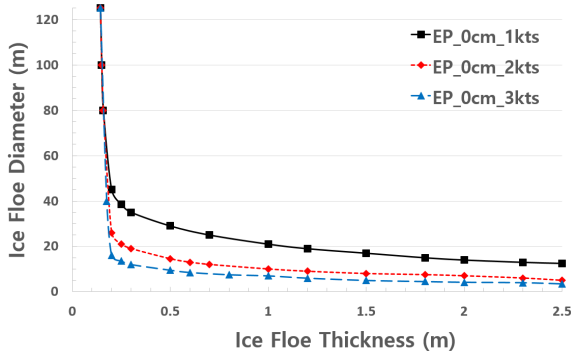


Fig. 8. Diagram of safe speed analysis result at 0 cm allowable plastic deformation

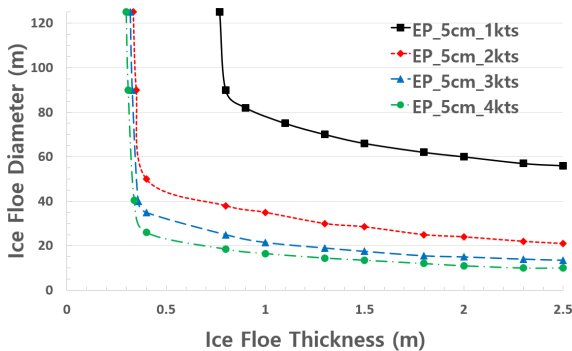


Fig. 9. Diagram of safe speed analysis result at 5 cm allowable plastic deformation

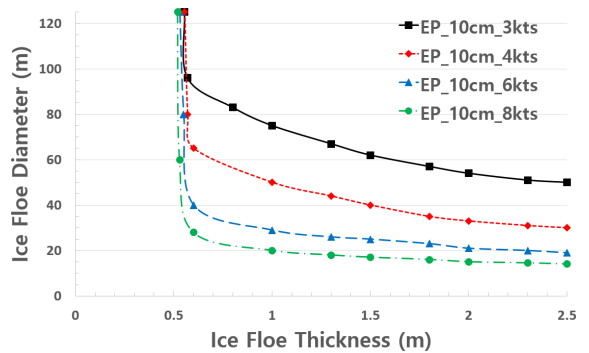


Fig. 10. Diagram of safe speed analysis result at 10 cm allowable plastic deformation

Table 4. Comparison of ice conditions at different allowable plastic deformation(at 3 kts)

제 원	0 cm	5 cm	10 cm
Ice Floe Thickness	~ 0.1 m	~ 0.3 m	~ 0.5 m
Ice Floe Diameter	~ 5.0 m	~ 10.0 m	~ 15.0 m

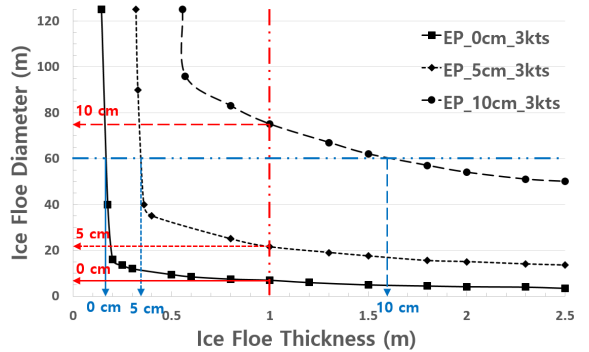


Fig. 11. Diagram of safe speed analysis result at different allowable plastic deformation (at 3 kts)

Fig. 11은 동일한 운항 속도조건에서 허용 가능한 소성 변형량의 변화에 따라 실제 선박이 운항 가능한 결빙지역 조건을 비교 평가한 결과를 도식화하였다. Fig. 11과 Table 5에 정리한 것과 같이 동일한 ‘3 kts’라는 속도에서 허용 가능한 최대 소성 변형량 ‘0 cm’, ‘5 cm’와 ‘10 cm’에서의 안전 운항이 보장되는 빙 두께는 0.15 m, 0.35 m와 1.60 m로 각각 변화하며(Fig. 11 x축 기준), 빙 직경 또한 6.0 m, 21.0 m와 75.0 m

로 범위가 확장(Fig. 11 y축 기준)됨을 알 수 있다. 본 연구에서 분석한 결과들은 해석의 관점에서 선체 구조에 허용 가능한 최대 소성 변형량을 가정하여 평가한 결과이므로, 실제 함정 설계 기준이 반영된 함정 선체 구조 기준에서 허용 가능한 소성 변형량에 대한 면밀한 평가가 필요할 것으로 판단된다.

Table 5. Comparison of ice conditions at different allowable plastic deformation(at 3 kts)

Vessel speed at 3 kts			
Allowable Plastic Deformation	0 cm	5 cm	10 cm
Ice Floe Thickness	~ 0.1 m	~ 0.3 m	~ 0.5 m
Ice Floe Diameter	~ 5.0 m	~ 10.0 m	~ 15.0 m

#### 4. 내빙성능을 위한 함정설계 기본제원 평가

해석을 통한 분석결과를 종합해보면 내빙설계가 고려되지 않은 선박(본 연구에서는 함정을 대상으로 함)의 경우라도 제한적인(빙 두께가 얇고 크기가 작은) 결빙지역 조건에서 활동이 가능할 것으로 판단되며 추가적으로 빙 충돌에 의해 발생 가능한 선체 소성변형을 일정 수준 허용한다면 운항속도 및 더욱 가혹한 조건에서도 활동이 가능한 것으로 평가되었다.

하지만 실제 작전 중 과도한 선체 구조에 대한 영구 소성변형이 허용되지 않는 경우라면 실제 결빙지역에서의 작전 수행에 요구되는 내빙설계가 함정 구조 설계 단계에서의 기본제원 결정에 반영되어야 한다. 공식적으로 대한민국 해군 구축함에 대한 상세한 주요 선체구조 제원확보가 불가능한 상황이므로 비교 대상으로 선정했던 캐나다 구축함 제원, 문헌을 통해 확인된 세종대왕급 구축함 제원 및 Park<sup>[19]</sup>에 의해 분석된 각국의 유사 함정의 제원을 참고하여 Table 6에 정리하였다. 결정된 함정 선체 주요제원을 기준으로 결빙지역 운항에 요구되는 선체 구조설계 국제 규정을 적용하여 현재 함정 설계기준의 내빙성능 만족 여부를 평가해보았다.

일반적으로 결빙지역을 운항하는 선박의 주요 선체 구조 제원 결정을 위한 규정은 실제 자국 영토에 빙해역을 포함하는 국가에서 과거부터 현재까지 이론적

인 배경과 실제 빙해역에서의 운항을 통해 축적된 계측 데이터를 바탕으로 다수의 규정이 제정되었다. 유럽의 경우 대표적으로 발틱해 연안에 위치한 핀란드와 스웨덴은 자국 빙해역을 운항하는 선박에 적용하는 FSICR(Finnish-Swedish Ice Class Rules) 규정을 적용중이며, 러시아(RMRS IR)와 캐나다(CASPPR) 또한 마찬가지로 별도의 규정을 가지고 있다.

Table 6. Main particular and frame data for ice class regulation analysis

제 원	값
Main Particular	
Length overall	165.9 m
Breadth	21.4 m
Draft	6.25 m
Displacement	7650 tons
Frame Data	
Main frame span	2000 mm
Main frame spacing	550 mm
Plate thickness	10.5 mm
Web height	130 mm
Web thickness	6 mm
Flange width	100 mm
Flange thickness	10 mm

하지만 다수의 국가에서 내빙설계를 위해 별도의 규정을 적용하는 것에 대한 우려의 목소리가 있었으며 이에 2007년 국제선급협회(IACS, International Association of Classification Societies)에서는 빙해역을 운항하는 선박에 공통적으로 적용해야하는 규정을 공표한 바 있다. 한국선급에서도 IACS UR I2 규정을 준용하여 빙해역을 운항하는 선박에 대한 선체 구조설계, 재료요건 및 추진부분 선정 등에 활용하고 있다.

IACS UR I2에 따라 앞서 Table 6에서 정리한 대한민국 해군 함정의 주요 선체구조 제원에 대한 내빙성능을 평가했다. 앞서 정리된 빙 충돌 시나리오 상황을 고려하였으며 극지 등급은 PC7을 고려하였다. 구조 건전성 확인이 필요한 영역은 Fig. 12에서 정의된 대

빙구역 선체 구조 범위를 참고하여 결정하였다.

Table 7에 정리된 바와 같이 현재 대한민국 해군 함정 설계 기준을 준용하여 건조되어 활동 중인 함정의 경우 IACS UR 12 설계 기준을 적용하는 경우 1) 선수 중간구역(BI)에서는 선저구역(BIb)을 제외한 나머지 구역에서는 내빙성능을 확보하지 못하는 것으로 평가되었고 2) 중앙구역(M)에서는 대빙대구역(Mi)을 제외한 나머지 구역에서는 일정 수준의 내빙성능이 확보되어있음을 알 수 있다. 이는 일반 상선 설계기준 대비 함정의 경우 앞서 언급한 것과 같이 선체 외판의 두께가 상대적으로 얇고 또한 녹골의 크기 및 두께 또한 얇기 때문인 것으로 판단된다. 또한 안전 운항속도 평가를 위해 설정한 선박-빙 충돌 시나리오에서 가장 큰 하중이 발생하는 위치가 선체 중앙구역이 아닌 선수구역임에 따른 영향 또한 있는 것으로 판단된다.

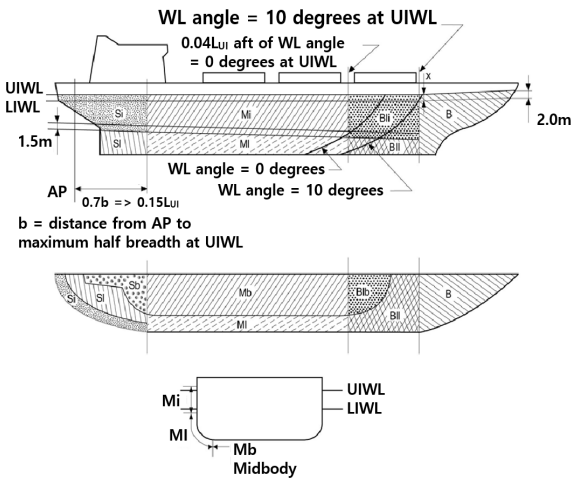


Fig. 12. Hull area extents<sup>[8]</sup>

Table 7. Result of DDePS for the ROK vessel

	Bow Intermediate (BI)			Midbody (M)		
	Bli	BII	BIb	Mi	MI	Mb
제 원						
Shell Plate Thickness	Fail	Fail	Pass	Fail	Pass	Pass
Frame Shear Area	Fail	Fail	Pass	Fail	Pass	Pass
Frame Modulus	Fail	Fail	Fail	Fail	Fail	Pass

## 5. 결론

대한민국 해군 전력의 점차적으로 증가함에 따라 머지않은 시점에 활동영역이 넓어질 것이고 결빙지역에서의 활동을 펼쳐야 하는 시기가 다가올 것은 자명한 사실이다. 최근 우리나라 서해상에서도 겨울철 결빙현상이 발생하는 사례가 빈번하게 보고되고 있으며, 이러한 상황에서 현재까지 함정설계 관점에서의 우선 순위가 다소 중요하지 않았던 내빙설계에 대한 고려는 대한민국 해군 함정의 결빙지역에서의 구조안전성 확보와 동시에 비상시 작전 가능성 판단을 위해 필요성이 있다고 판단된다.

본 연구에서는 국외에서 수행중인 연구결과를 참고하여 대한민국 해군 중 가장 유사한 함정급을 대상으로 기초적인 평가를 수행한 결과를 정리하였다. 분석 결과를 요약하면 일정 수준의 선체 소성변형을 감안하는 경우 현 함정설계 기준에서도 결빙지역에서의 최소한의 작전 수행은 가능할 것으로 검토되었으며, 추가적으로 내빙설계 만족 여부 평가를 위해 실제 함정설계에 활용되는 주요 제원을 적용하여 평가해보았다. 그 결과 1) 함정 중앙부 구역에서는 현 함정설계 기준을 적용하더라도 일정 수준 이상의 빙하중에 대한 구조 건전성 확보가 가능할 것으로 평가되었으나 2) 실제 함정이 운항하는 상황에서 대부분의 빙하중을 경험할 것으로 예상되는 함정 선수부에서는 내빙설계 기준에서 요구되는 구조 건전성 확보가 다소 부족할 것으로 예상되었다. 따라서 추후 연구를 통해 현 함정설계 기준을 크게 벗어나지 않는 기준에서 함정의 내빙성능을 증가시킬 수 있는 연구가 필요할 것으로 판단된다.

추후 충분한 내빙능력을 보유한 함정설계 또한 반드시 검토가 필요할 것으로 생각되며 본 연구를 통해 그 필요성에 대한 논의가 시작될 수 있는 계기가 되기를 희망한다.

## References

[1] "Be Careful of Ship Operations in Winter," (2017, December 1). Yonhap News. Retrived from <https://www.yna.co.kr/view/AKR20171201115600065> (accessed 2020, August 14).

[2] "Drift Ice Appeared in the Offshore of Incheon,"



- (2018, January 30). JoongAng Ilbo. Retrieved from <https://news.joins.com/article/22330888> (accessed 2020, August 14).
- [3] “Icebreaker CCGS Louis S. St-Laurent Leaves Northern Waters Concluding Canadian Coast Guard’s 2019 Arctic Operational Season,” (2019, December 19). DEFPOST. Retrieved from <https://defpost.com/ice-breaker-ccgs-louis-s-st-laurent-leaves-northern-waters-concluding-canadian-coast-guards-2019-arctic-operational-season/> (accessed 2020, August 14).
- [4] Wikipedia, “USCGC Healy(WAGB-20),” Retrieved from [https://en.wikipedia.org/wiki/USCGC\\_Healy\\_%28WAGB-20%29](https://en.wikipedia.org/wiki/USCGC_Healy_%28WAGB-20%29) (accessed 2020, August 14).
- [5] Det Norske Veritas, “Hull Structural Design Ships with Length 100 Meters and Above,” Rules for Classification of Ships, 1992.
- [6] Naval Sea Systems Command, “Structural Design Manual for Naval Surface Ships,” NAVSEA 0900-LP-097-4010, 1976.
- [7] S. I. Seo, K. H. Son and M. K. Park, “A Study on the Optimum Structural Design of Naval Vessels,” Journal of the Society of Naval Architects of Korea, Vol. 39, No. 1, pp. 100-112, 2002.
- [8] IACS, “IACS Unified Requirements Concerning Polar Class,” UK, 2011.
- [9] KR, “Guidance for Ship for Navigation in Ice,” GC-14-k, Korean Register, 2020.
- [10] F. Debond, S. McAllister, C. Cleary, J. Dolny and R. Kawamoto, “Design Considerations for Operation of Coast Guard Cutters and Combatants in the Arctic,” SNAME WMTC 15, USA, 2015.
- [11] C. Daley, “Ice Impact Capability of DRDC Notional Destroyer,” DRDC-RDDC-2015-C202, Canada, 2015.
- [12] C. Daley, J. Dolny and K. Daley, “Safe Speed Assessment of DRDC Notional Destroyer in Ice,” DRDC-RDDC-2017-C259, Canada, 2017.
- [13] Daley, C., “IACS Unified Requirements for Polar Ships - Background Notes to Design Ice Loads,” 2000.
- [14] J. Dolny, “Methodology for Defining Technical Safe Speeds for Light Ice-Strengthened Government Vessels Operating in Ice,” Ship Structures Committee, SSC-473, 2018.
- [15] A. Kendrick and C. Daley, “Ice Interaction Scenarios and Load Modeling Approaches,” BMT Report 6007A.DFR submitted to ABS, 2006.
- [16] A. Kendrick and C. Daley, “DDPS for Stern Impacts with Ice,” BMT Report 6512D.DFR submitted to ABS and DSME, 2009.
- [17] C. Daley, “Energy Based Ice Collision Forces,” POAC 99, Espoo, Finland, 1999.
- [18] C. Daley and H. W. Kim, “Ice Collision Forces Considering Structural Deformation,” OMAE 10, Shanghai, China, 2010.
- [19] B. W. Park, “A Study on the Structural Design of Naval Ships Considering Explosion Loads,” Doctoral thesis, University of Ulsan, 2000.
- [20] C. G. Daley, “Application of Plastic Framing Requirements for Polar Ships,” Marine Structures, 15, Elsevier, 2002.
- [21] C. G. Daley, “Derivation of Plastic Framing Requirements for Polar Ships,” Marine Structures, 15, Elsevier, 2002.
- [22] C. Daley, “E-8674&9096: Ice Engineering Course, PC\_Design&Check\_8074.xlsx,” Memorial University, Retrieved from [https://www.engr.mun.ca/~cdaley/8074\\_20.htm](https://www.engr.mun.ca/~cdaley/8074_20.htm) (accessed 2020, November 1st).

#### Appendix 1. 선박 - 빙 상호작용 모델 유도 식<sup>[20,21]</sup>

식 (1)의 경우 선체 변형이 발생하지 않은 경우이므로 빙충돌에 의해 발생하는 하중은 단지 얼음의 변형 크기에 의해 결정되며 최대 변형위치에서 최대 하중이 발생하게 된다. 충돌에 의해 발생한 얼음의 변형은 선체와 얼음이 겹쳐진 형상에서의 최대 깊이를 평가하여 계산할 수 있고, 그때의 평균 압력  $P_{av}$ 는 아래 식 (A.1)과 같이 정의할 수 있다.

$$P_{av} = P_0 A^{ex} \quad (A.1)$$

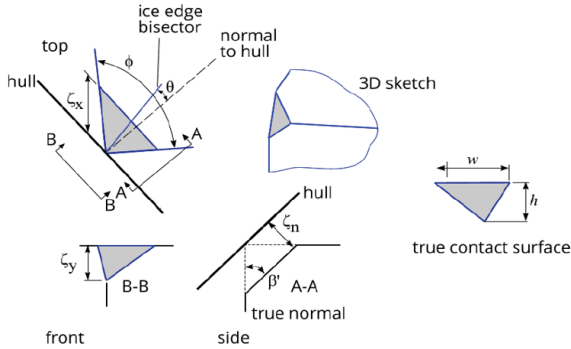
where,

$P_0$  : average pressure when the contact area is 1 m<sup>2</sup>  
 $ex$  : constant (typically  $ex = -0.1$ )

접촉면적의 경우 Fig. A1과 같이 General Wedge 형

상의 경우를 적용하여 계산하게 되고 그때의 접촉면 적은 식 (A.2)와 같이 정의할 수 있다. 형상 변화에 따른 접촉면적 결과는 본 논문에서 제시한 참고문헌을 통해 추가적으로 확인할 수 있다.

$$A = \zeta_n^2 \left( \frac{\tan(\phi/2 - \theta) + \tan(\phi/2 + \theta)}{2 \sin \beta' \cos^2 \beta'} \right) \quad (A.2)$$



where,

- $\zeta_x$  : ice penetration depth in x direction
- $\zeta_y$  : ice penetration depth in y direction
- $\zeta_n$  : ice penetration depth in normal direction
- $\phi$  : ice edge opening angle
- $\theta$  : ice edge bisector angle
- $\beta'$  : true normal angle between ice-hull
- $w$  : width of the nominal contact area
- $h$  : height of the nominal contact area

Fig. A1. General wedge edge interaction geometry

얼음과 선체 접촉면이 수직이 되는 경우(normal to hull) 요건을 구현하기 위해 ice edge bisector angle을 0도( $\theta = 0$ )로 대입하면 식 (A.2)는 아래 식 (A.3)과 같이 정리할 수 있다.

$$A = \zeta_n^2 \left( \frac{\tan(\phi/2)}{\sin \beta' \cos^2 \beta'} \right) \quad (A.3)$$

식 (A.1)과 종합해보면 수직방향에서의 총 하중은 아래 식 (A.4)와 같이 표현할 수 있다.

$$F_n = P_{av} A = P_0 A^{1+ex} \quad (A.4)$$

식 (A.3)과 (A.4)를 종합하면 빙 충돌에 의해 발생하는 하중의 크기는 아래 식 (A.5)와 같이 정리할 수 있다.

$$F_n = P_0 \zeta_n^{2+2ex} \left( \frac{\tan(\phi/2)}{\sin \beta' \cos^2 \beta'} \right)^{1+ex} \quad (A.5)$$

앞서 언급한바와 같이 접촉면적 형상에 따른 식의 간소화를 위해 형상계수(shape parameter)를 적용하여 식 (A.5)를 정리하면 식 (A.6)과 같이 표현된다.

$$F_n = P_0 f_a \zeta_n^{fx-1} \quad (A.6)$$

위 식 (A.6)에서 정의한 형상계수는 아래와 같이 각각 표현할 수 있다.

$$f_x = (3 + 2ex) \quad (A.7)$$

$$f_a = \left( \frac{\tan(\phi/2)}{\sin \beta' \cos^2 \beta'} \right)^{1+ex} \quad (A.8)$$

식 (A.1)부터 (A.8)까지 종합하여 수직 방향에 작용하는 힘을 수직 방향 변형 크기에 대해 적분하면 아래 식 (A.9)와 같이  $IE_i$ (Ice indentation energy)를 계산할 수 있다.

$$IE_i = \int_0^{\zeta_n} F_n d\zeta_n = \frac{P_0}{3 + 2ex} \left( \frac{\tan(\phi/2)}{\sin \beta' \cos^2 \beta'} \right)^{1+ex} \zeta_n^{3+2ex} \quad (A.9)$$

앞서 정의한 형상모수를 적용하여 식 (A.9)는 아래 식 (A.10)과 같이 간소화하여 표현할 수 있다.

$$IE_i = \frac{P_0}{f_x} f_a \zeta_n^{fx} \quad (A.10)$$

최종적으로 빙 충돌에 의해 발생하는 빙에서의 수직방향 변형의 크기는  $KE_n$ (Normal kinetic energy)와  $IE_i$ 와의 관계식과 같이 빙 충돌에 의해 발생하는 모든 에너지는 100 % 수직 방향으로의 빙 변형에 의해 소모된다는 관계식 (A.11)에 따라 결과적으로 식 (A.12)와 같이 계산할 수 있다.

$$KE_n = IE_i \quad (A.11)$$

$$\zeta_n = \left( \frac{KE_n \cdot f_x}{P_0 \cdot f_a} \right)^{1/f_x} \quad (A.12)$$

식 (2)의 경우 빙 충돌에 의해 발생하는 에너지 전체가 빙 변형에서 100 % 소모되는 것이 아닌 일부 선체 변형 발생에도 작용하는 경우를 가정한 것이므로 위 식 (A.11)에서 선체 변형에 대한 추가적인 항목이 반영되어야 한다. 이는 참고문헌 [18]을 통해 상세히 고려되었으며, 상관관계는 식 (A.13)과 같이 재정의 될 수 있다.

$$KE_n = IE_i + IE_s \quad (A.13)$$

여기서  $IE_s$ (Structural indentation energy)는 표현 그대로 선체에 발생하는 변형에 의해 흡수된 에너지를 의미한다. 이러한 경우 빙 충돌에 의해 발생하는 총 하중의 크기를 산정하는 방법은 참고문헌 [18]에 상세하게 설명되어있으나, 본 논문에서 간략하게 설명하자면 외부 하중에 의해 대상 구조물에 발생하는 변형량의 크기는 탄성구간을 넘어선 이후 소성변형 구간에서의 변화량을 이상화하였으며, 이때 하중의 크기는 변형량에 일정 기울기( $k_p$ )를 추종하며 탄성변형이 끝나는 시점(= 소성변형이 시작되는 시점)에서의 하중값을  $F_0$ 로 표현하였다. 이를 식으로 표현하면 (A.14)와 같다.

$$F_n = k_p \zeta_n + F_0 \quad (A.14)$$

정의된  $k_p$ 와  $F_0$ 는 대상 구조물에 따라 변화하는 값이므로 특정 값을 지정할 수 없으며, 평가하고자 하는 구조물을 반영하여 새롭게 계산해야한다.

식 (1)과 비교하여 식 (2)에서 달라지는 점은 수직 방향의 운동에너지( $KE_n$ )를 소진하는 대상이 단순히 충돌 대상인 빙에서 100 % 소진되는지 또는 상호작용에 의해 구조물에서도 일정량의 에너지 흡수를 통해 변형이 발생하는지에 따른 차이점이다. 따라서 식 (A.9)에서 빙과 구조물에서 발생하는 에너지의 총 합은 아래 식 (A.15)와 같이 표현할 수 있고, 계산된 결과는 식 (A.13)의 관계에 따라 평가할 수 있다.

$$IE_i + IE_s = \int_0^{\zeta_n} F_n d\zeta_n \quad (A.15)$$

## Appendix 2. 빙충돌에 의한 구조건전성 평가 방법 [20-22]

본 논문에서 결과물로 제시한 표 7에 대한 평가 방법에 대하여 별첨 2에서 정리하였다. 참고문헌 [20]과 [21]에서 극지를 운항하는 선체 구조의 구조건전성 평가 방법에 대하여 구체적인 수식을 통해 평가하는 방법에 대해 상세히 기술되어 있다. Daley[20]는 구조건전성을 평가하는 3가지 방법을 제안하였으며, 연구자에 의해 또다른 평가 방법이 제안될 수 있음을 설명하였다. 본 연구에서 적용하고자 하는 방법에 대한 검토 과정에서 1) Method 1의 경우 가장 간단하고 수차례의 반복계산이 필요없기 때문에 설계자가 가장 편하게 선택할 수 있는 방법이지만 전단 및 좌굴요건은 항상 만족하지만 프레임 설계결과가 과대 혹은 과소 평가되는 결과가 계산 결과상 예상되므로 최적 설계의 관점에서는 적용할 수 없는 방법이라 판단되었으며 2) Method 2의 경우 Method 1과는 다르게 설계자의 목적에 맞는 최적의 프레임 설계결과를 계산할 수 있는 방법으로 예상되지만, 실제 제작 단계에서 발생할 수 있는 제약조건들, 예를 들어 설계결과로 얻은 특정 부재의 두께라던가 높이등, 에 대해 최적 설계단계에서 반영이 필요한 사항들에 대해서는 적절한 반영이 불가능하여 결과적으로 다수의 반복 계산이 요구된다는 문제점이 예상되었다. 마지막으로 본 논문에서 적용하고자 하는 Method 3의 경우, Method 2와 유사하게 반복 계산과정을 통해 최종 구조물의 설계 변수들을 결정해야한다는 점은 동일하지만, 구조물 설계 변수에 요구될 가능성이 있는 제약조건들을 반영하여 최종적으로 규정에서 요구하는 수준의 설계결과를 만족하는 구조물 치수를 확인할 수 있는 방법이라 판단하였다. 따라서, 본 연구에서는 Method 3을 적용하여 선체 구조건전성 평가를 수행하였으며 그 결과로 Table 7과 같이 구역에 따라 요구조건을 만족(pass) 또는 불만족(fail)함을 확인할 수 있다. 이하 계산과정에서 적용되는 기호들을 아래 Table A1에 기술하였다. 계산과정에 관한 더욱 상세한 내용은 참고문헌을 통해 보다 구체적으로 확인할 수 있다.

Table A1에 추가하여 선체 구조건전성 평가에 어떻게 적용되는지에 관한 상세한 설명은 아래 Fig. A2~A4를 통해 확인할 수 있다. Fig. A2의 경우 적용하는 빙하중 정의와 관련한 설명이며, Fig. A3은 구조물의 대표적인 붕괴 매커니즘에 대한 도식을 나타내었고,

마지막으로 Fig. A4는 구조물 주요 치수에 대한 정의를 나타낸다.

Table A1. Nomenclature

기호	설명
$a$	length of shear panel
$a_1$	ratio of min. to actual web area
$A_1$	shear factor in rule modulus equation
$A_{1A}$	shear factor for 3-hinge mechanism
$A_{1B}$	shear factor for shear mechanism
$A_f$	area of the flange
$A_o$	minimum web area
$A_w$	area of the web
$b$	height of the ice load patch
$h_w$	height of the web
$k_{a1}$	modulus correction factor
$k_w$	flange factor
$k_z$	ratio of $z_p$ to $Z_p$
$L$	length of frame
$M_p$	plastic moment for frame
$m_p$	sum of plastic moments in plate and flange
$M_{pr}$	reduced plastic moment
$N$	shear force
$P$	pressure
$S$	frame spacing
$t_f$	thickness of the flange
$t_p$	thickness of the shell plating
$t_w$	thickness of the web
$w$	length of the ice load patch
$w_f$	width of the flange
$Z_p$	plastic section modulus
$z_p$	sum of plastic section modulus of plate and flange
$Z_{reqd}$	required plastic section modulus
$\delta$	deflection of the frame
$\sigma_y$	yield stress

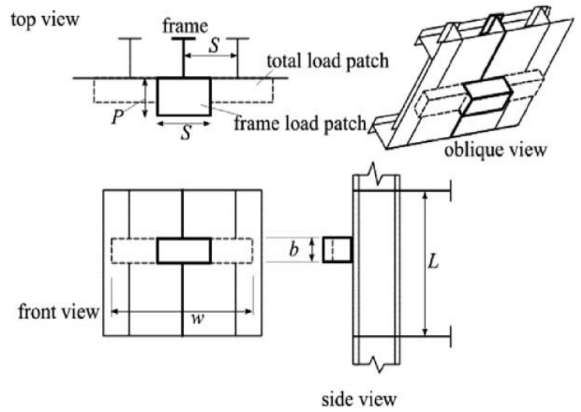
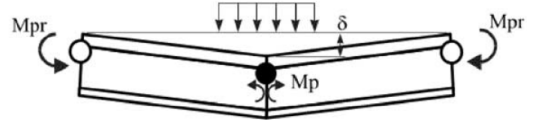
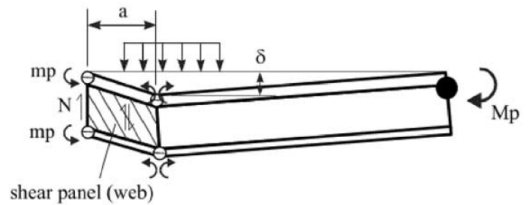


Fig. A2. Design ice load

3-hinge collapse mechanism



shear hinge collapse mechanism



shear panel (web)

- bending hinge (no shear)
- bending hinge (reduced capacity due to shear)
- ⊖ bending hinges in the plate and flange

Fig. A3. Collapse mechanism

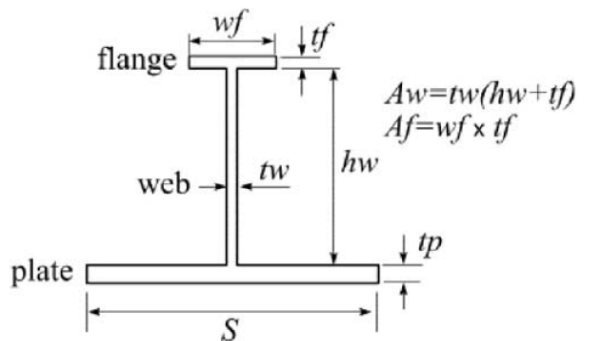


Fig. A4. Frame dimensions

Method 3에 따른 구조건전성 평가에 앞서 기본적인 규정과 관련한 식을 Table A2에 정리하였다.

Table A2. Basic rule equations for analysis

설명	수식
Minimum shear area	$A_o = \frac{1}{2} P b S \frac{\sqrt{3}}{\sigma_y}$
Required section modulus	$Z_{P_{reqd}} = \frac{P b S L (1 - \frac{b}{2L}) A_1}{4 \sigma_y}$ where: $A_1 = \text{maximum of } A_{1A} \text{ or } A_{1B}$
Modulus parameter for central load 3-hinge failure	$A_{1A} = \frac{1}{2 + k_w [\sqrt{1 - a_1^2} - 1]}$
Flange factor	$k_w = \frac{1}{1 + 2(A_f/A_w)}$
Modulus parameter for end load shear failure	$A_{1B} = \frac{[1 - \frac{1}{2a_1(1 - (b/2L])}]}{(0.275 + 1.438 k_z^{0.7})}$
Ratio of min. to actual shear area	$a_1 = \frac{A_o}{A_w}$
Actual shear area as fitted	$A_w = (h_w + t_f) t_w$
Modulus ratio	$k_z = \frac{z_p}{Z_p}$
Sum of local moduli of flange and plate as fitted	$z_p = S \frac{t_p^2}{4} + w_f \frac{t_f^2}{4}$
Actual plastic modulus of frame as fitted	$Z_p = (A_f(h_w + \frac{t_f + t_p}{2}) + A_w \frac{h_w + t_p}{2}) k_{a1}$
Factor for case when neutral axis is in web	$k_{a1} = \begin{cases} 1 & \text{if } A_p \gg A_f + A_w \\ (1 - \frac{A_p - A_f}{A_w})^2 & \\ 1 - \frac{A_p}{2(a + \frac{2A_f}{A_w})} & \text{if } A_p < A_f + A_w \end{cases}$
Web buckling restriction for flat bars	$h_w/t_w \ll 282/(\sigma_y)^{0.5}$
Web buckling restriction for all other sections	$h_w/t_w \ll 805/(\sigma_y)^{0.5}$

Method 3에서는 구조건전성 평가를 시작하는 단계에서 설계자가 ‘a<sub>1</sub>’ 값을 정의하면 Table A3에서 정의한 순서에 따라 계산을 수행하게 된다. 계산과정 중 ‘단계 11’에서 요구되는 조건을 만족하지 못하는 경우 다시 ‘단계 7e’로 돌아가서 최종 ‘단계 14’를 충족시키는 결과 값을 확보할 때 까지 계산을 반복 수행한다.

Table A3. Steps in method 3

단계	설명	수식
1	Design parameters (already set)	$L, S, P, b, \sigma_y$
2	Shell plate thickness (already set)	$T_p$
3	Set frame shape ratios	$t_w/t_p, w_f/S$
4	Calculate minimum web area	$A_o$
5	Set shear area ratio	$A_1$
6	Calculate actual web area	$A_w = A_o/a_1$
7	Calculate frame dimensions	
7a	Web thickness	$t_w = t_p x t_w / t_p$
7b	Web height	$H_w = A_w / t_w$
7c	Flange width	$W_f = w_f / S x S$
7d	Flange thickness	$t_f t_f / t_w x t_w$
7e	Area of flange	$A_f = w_f x w_f$
8	Calculate the fitted modulus (from dimensions above)	$Z_p$
9	Calculate $k_w$ Calculate $k_z$	$K_w$ $K_z$
10	Calculate the required modulus	$Z_{P_{reqd}}$
11	Check to see if $Z_p \gg Z_{P_{reqd}}$	
12	If $Z_p > Z_{P_{reqd}}$ and $t_f > 0$ , decrease $t_f$ , return to Step 7e	
13	If $Z_p < Z_{P_{reqd}}$ increase $t_f$ , return to Step 7e	
14	If $Z_p = Z_{P_{reqd}}$ end	

Table A1~A3에서 제시한 수식과 계산과정에 추가하여 IACS UR I2에서 정의하는 상세한 수치들은 참고 문헌 [8]에서 추가적인 검토가 가능하다. 제공된 수치들을 기반으로 MS Excel 프로그램을 활용하여 스프레드시트 형태의 파일이 작성되었고, 이 파일을 활용하면 설계자가 적용하고자 하는 선체 구조 주요 수치들이 원하는 운항 환경에서 구조건전성을 충족하는지 여부를 직관적으로 만족(pass) 또는 불만족(fail) 인지 확인 가능하다. 아래 Fig. A5는 본 논문에서 직접 작성한 계산용 MS Excel 스프레드시트와 유사한 형태로 작성된 MS Excel 스프레드시트 예시를 나타낸다.

Fig. A5에서 소개한 MS Excel 스프레드시트를 활용하면 본 연구에서 제시한 Table 7과 유사한 방식으로 선체 구조건전성 만족여부를 확인할 수 있다. Table 7에서 일부 항목에서 'fail'로 결과가 나온 위치는 현재 적용중인 선체 구조 주요치수가 요구되는 빙 조건에서의 운항에는 적절하지 않다는 의미이며 치수 변경을 통해 요구되는 운항 조건을 만족하는 선체 구조 주요치수를 결정할 수 있을 것이다.

Vessel Particulars				1
Item	Units	Var	Value	
PC Class		Class	PC 7	
Displacement	kt	Disp	50.0	
Displacement Class Factor		Cfdis	22.00	
Crushing Failure Class Factor		CFC	1.800	
Flexural Failure Class Factor		CFf	4.000	
		CFd	1.110	
Load Patch Dimensions Class Factor		CFb	2.800	

Offered Frame Data				Frames ..... (co)
Item	Units	Var	Value	
Case Frame Number	--	FrameNum	any	
Case Frame Description	--	FrameRef	HP 300*14.0	
Hull Region	--	HA	BI	
Hull Family	--	HF	1	
Frame Orientation Angle (to waterline)	deg	OA	90°	
Frame Orientation Type	--	FO	Transverse	
Protective Hull Coating Used?	yes/no	Coating?	Yes	
Bottom Longitudinals?	yes/no	BotLongs?	No	
Load Distributing Stringers?	yes/no	LDString?	No	
Water Density	t/m3	rhw	1.025	
Frame Attachment Parameter	--	j	2	
Yield Strength - Framing Material	MPa	Fy_f	350	
Yield Strength - Plating Material	MPa	Fy_p	350	
Young's Modulus of Plating Material	MPa	E_plate	207000	
Main Frame Span (=web frame spacing for longl)	mm	a	2000	
Main Frame Spacing	mm	s	380	
Thickness of Plate (gross)	mm	tp	19.5	
Height of Web	mm	hw	288.18	
Thickness of Web (gross)	mm	tw	14.0	
Angle of web	deg	fw	90°	
Width of Flange	mm	wf	57	
Thickness of Flange (gross)	mm	tf	31.8	
Flange Offset Distance	mm	bw	0	
		pl&fr&Str tonnes/m2	0.268	
		area m2	637	
		Tonnes	170	

Assesment Results for Offered Frames (net)			
Web Buckling Constant	--	wbc	358.4
Frame Stability Check (12.9.1)	--	frstab	OK
Web Thickness Min (12.9.3)	--	webmin	OK
Dist. to Plasto NA	mm	zna	0.0
Shell Plate Thickness - offered (net)	mm	tp	17.5
required value (12.4.2) (excl CA)	mm	t_reqd	17.1
			OK
Frame Shear Area - offered (12.5.7) (net)	cm2	Aw	39.0
required value (12.6.2 or 12.7.2)	cm2	At or AL	32.2
			OK
Frame Modulus - offered (12.5.8) (net)	cm3	Zp	1012.4
required value (12.6.3 or 12.7.3)	cm3	Zpt or Zpl	912.9
			OK

Fig. A5. Example of structural integrity analysis for ice-structure interaction using MS Excel spreadsheet