

## 빙해선박의 안전 운항속도와 구조강도 평가 기술

노인식 (충남대학교)

### 1. 서론

최근 북극지방의 자원개발이 활성화되고 지구온난화에 따른 빙상감소에 힘입어 북극해 항로 개척과 물류운송 비용을 획기적으로 절감하고자 하는 시도가 이루어지고 있다. 국내외 해운사 및 조선업체에서는 빙 등급을 갖춘 상선의 건조에 많은 관심을 보이고 있으며, 야말 프로젝트에서 보듯이 이미 일부 대규모 쇄빙상선의 발주/건조가 진행되고 있다. 그러나 북극해는 여름철 짧은 기간을 제외하고는 항상 두꺼운 얼음으로 덮여 있으므로 선박이 빙해역의 차가운 기온과 빙상을 극복하고 안전하게 항해하기 위해서는 쇄빙선과 같은 특별한 선형 및 장비와 함께, 극지공학기술이 적용된 선체구조설계를 통하여 선박의 구조적 안전성 확보가 필수적이다.

극지해역을 운항하는 선박의 손상사례를 살펴보면 대체로 과도한 선속을 유지하다가 해빙에 충돌함으로써 발생하는 경우가 많기 때문에 해상 사고를 예방하기 위해서는 해역의 기상과 빙상(ice condition)을 고려한 안전속도(Safe Speed)를 유지하는 것이 가장 우선되어야 한다.

이러한 빙해역의 안전 운항속도를 결정하기 위해서는 극지의 해상 및 빙상 환경 조사 분석, 극지 운항 선박의 구조적 특성 분석, 빙 충돌해석을 위한 극빙의 재료특성 연구 등 의 기반기술을 확보하고 이를 바탕으로 다양한 조건 하의 빙과 선체의 상호작용을 해석하고 구조적 안전성과 손상 가능성을 평가하는 기술 개발이 필요하다. 따라서 본 고에서는 이 분야에서 가장 앞서 있는 것으로 평가되는 러시아, 캐나다 등 북극해 연안 국가에서 시행하고 있는 빙해역 안전운항 규칙의 현황을 살펴보고, 이를 바탕으로 우리 실정에 적합한 안전운항 속도 기준을 제시하기 위한 기술개발 방향을 제시하였다.

우리나라는 빙해에 연한 국가가 아니기 때문에 원천적으로 실선 시험이나 현장 계측 연구에 근본적인 환경적 제약이 있을 수밖에 없다. 따라서 빙해역 국가들이 채택하고 있는 경험과 database에 바탕을 두는 접근 방법을 우리가 그대로 채택하기는 어렵다. 결국 선박의 빙 충돌 시뮬레이션 기술을 기반으로 하는 해석적 방법이 그 대안으로 판단되며, 궁극적으로 선종(ice class), 규모 등 운항 선박의 특성과 해역의 빙상 환경 고려하여 빙 충돌 시 선체의 안전성 및 손상 가능성을 평가함으로써 빙해역 운항 선박의 안전속도(Safe Speed) 예측에 활용해야 할 것으로 판단된다. 이를 위해서 합리적인 빙-선체 충돌 해석 표준 절차를 개발하여 빙-선체 구조해석 안전속도 예측 및 평가에 적용하는 방안을 추진한다.

### 2. 안전속도의 개념

빙해역에서 운항하는 선박의 빙 충돌에 의한 손상은 매우 흔히 발생하는 통상적인 현상이다. 이러한 선체 손상은 대체로 과도한 속도로 운항할 때 해상의 유빙에 충돌함으로써 발생하는 것으로 알려져 있기 때문에 빙해역의 항해를 관장하는 기관에서는 안전운항을 위한 항해속도(safe speed)를 규정으로 제시하고 있다.

이 안전운항속도는 해빙의 두께, 빙의 강도, 해류 기온, 풍속 등 기상자료와 함께 선박의 쇄빙 성능을 감안하여 결정되는데 선체구조의 안전성에 대한 평가 기준이 중요한 고려요소가 된다. 빙 충돌 하중에 대응하기 위한 선체구조설계 과정을 Fig.2에 개략적으로 보였다(Hiramatsu,2007).

본 고에서는 우선 가장 넓은 빙해역에 연하고 있어 가장 선박의 빙해역 운항 경험과 실적 자료가 많이 축적된 러시아와 캐나다의 안전운항속도 관련 기술개발 사례를 정리하였다.



그림 1 Damaged bow structure by ice collision

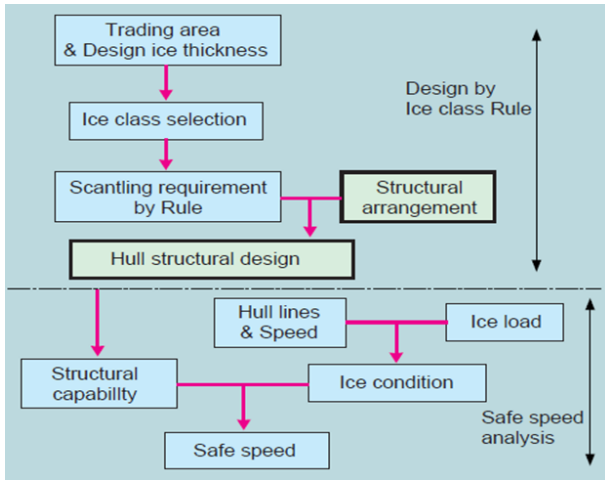


그림 2 Structural design flow for ice loads

러시아에서는 Ice passport (혹은 Ice certificate)라는 개념으로 빙해의 항해속도를 세계최초로 제도적으로 규제함으로써 선체구조 배치와 예상 빙상을 고려하여 빙해역에서의 안전 운항속도를 제시한 바 있다. Maxutov&Popov(1981)는 안전속도의 결정 요소로서 다음과 같은 항목을 제시하고 있다.

- 선박의 쇄빙 성능 : 항주가능속도(attainable speed)
- 빙 충격에 선체의 구조 안전(강도)상 제한 조건
- 호송 시 최소 안전 거리 결정 등 기타 운항 지침

이 개념은 Fig.3에 잘 요약되어 있다. 여기서 항주가능속도는 선박의 쇄빙성과 엔진 파워에 따라 결정되는 운항 가능한 최대 선속으로 빙해수조에서의 모형실험이나 간이 경험식으로부터 얻어진 빙 저항 성능으로부터 얻어진다. 그러나 안전속도는 이러한 추진성능 만으로 결정될 수 없고 빙해역의 전형적인 문제인 빙 충돌에 대한 구조적 안전성 확보가 중요한 제한조건으로 작용한다. 이러한 구조적 안전성을 고려한 항해 속도를 한계속도(limit speed)라고 하며 한계속도가 항주가능속도 보다 낮은 값을 보이는 채색된 영역이 안전속도 결정에 중요한 요소가 된다.

이렇게 시작된 러시아의 안전속도 개념은 1990년대 후반경 좀 더 개선된 Ice Passport 를 CCG Pierre Radisson 에 적용한 보고서(Likhomanov et al, 1997; Likhomanov et al, 1998)로 발표함으로써 구체화하였다. 여기서는 다양한 빙상에 대한 경험적, 준경험적 빙 저항 초기 추정법을 적용하였으며, 빙해수조의 모형시험 혹은 빙해시운전을 통하여 신뢰도 높은 빙해역에서 항주가능속도곡선을 얻는 등 안전속도 기준에 대한 개선된 기술적 접근 방법 채택하였다.

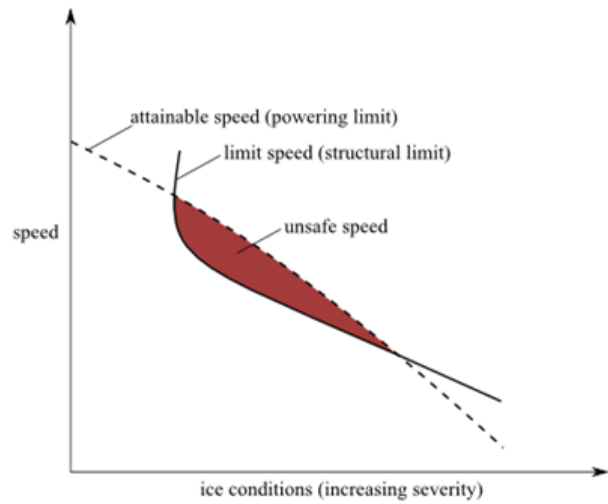


그림 3 Sketch of safe speed diagram (Dolny et al, 2013)

이로부터 구해진 빙 하중에 대한 선체 국부구조 부재의 내하 능력을 고려하여 선체의 구조 강도와 안전성을 고려한 극한상태곡선(Critical state curves)을 결정한다. 이 때, 선체의 구조거동은 보 이론에 기반한 간단한 극한강도 해석법을 적용하여 추정한다.

러시아 못지않게 광대한 북극해 연안 면적을 보유한 캐나다 역시 북극해를 통한 해운 물류의 필요성은 절실하기 때문에 오랫동안 실제 북극해의 운항 경험과 함께 방대한 실적 자료를 보유하고 있다. 캐나다는 러시아와는 달리 오랜 빙해역 운항 경험과 축적된 D/B를 기반으로 약 40년간의 빙해역 운항자료 분석함으로써 빙해역의 빙상(ice regime)에 따른 안전속도 결정 절차를 개발하였다. Transport Canada에서 개발하여 시행하고 있는 AIRSS(Arctic Ice Regime Shipping System)는 빙상과 선체 강도를 결합하여 빙해 운항 시 빙에 의한 잠재적인 피해를 평가할 수 있는 시스템으로서 빙해의 안전운항속도 추정하여 선박의 속도 규제에 적용하고 있다 (ENFOTEC, 1996)(Timco&Johnston, 2003).

이 AIRSS 의 핵심은 구조 강도에 대한 해석적 추정법을 적용하는 러시아와 달리 실제 극지 해역 운항자료의 통계자료에 바탕을 두는 철저히 비해석적 접근 방법을 채택하고 있다는 점이다. AIRSS는 다음과 같은 적용단계를 거친다.

- Step 1 : Characterize the Ice Regime
- Step 2 : Determine the Class-dependent Ice Multipliers
- Step 3 : Calculate the Ice Numeral
- Step 4 : Decide whether to proceed

이 때, 빙상 조건 즉, Ice Regime을 정의하는 주요 요소는 얼음이 Ice Regime을 차지하는 비율을 의미하는 빙 집적도 (Ice concentration), 얼음의 두께와 나이로 분류된 해빙의 발전 단계(Stage of development), 얼음이 녹은 정도(Stage of decay)와 주위에 작용하는 힘에 의한 얼음의 거칠기(Ice roughness) 등으로부터 정의된다.

이 빙상 조건과 선박의 내빙등급(CAC1~4, Type A~E)에 따라 Ice Multiplier(IM)가 주어진다. 선박의 항로는 The Canadian Ice Service에서 제공하는 Ice Charts (Fig.4에 예시)를 이용하여 결정할 수 있는데, 여기에는 캐나다 빙해역의 항해 구역 별 빙 집적도, 두께, 등 빙상에 대한 정보가 종합적으로 도시되어 있어 빙을 포함하는 기상 상태와 위험을 예상하여 가장 통과하기 쉬운 항로를 검색할 수 있도록 한다.

이 Ice Multiplier를 전체 운항 경로에서 차지하는 운항 구간별 비율을 곱하여 합한 값을 Ice Numeral (IN)이라고 하며 이것은 항해 해역의 빙상과 선박의 종류를 종합적으로 고려하여 위험도를 하나의 파라미터로 나타낸 것으로 볼 수 있다.

캐나다 빙해역을 운항하는 선박들의 출항과 도착시간, 운항선박의 손상기록 등에 관한 방대한 자료들은 Nordreg data에 축적되어 있다. 항구 간의 최단 경로와 구간별 거리는 주어지고 속도 역시 쉽게 계산할 수 있으므로 이로부터 손상이 없었던 선박과 손상이 발생했던 선박의 속도와 상관관계를 다음과 같은 과정을 거쳐 Fig.5와 같은 도표로 정리할 수 있으며 이 도표를 활용하여 빙해역을 운항하는 선박의 안전속도를 결정할 수 있다.

### 3. 최근의 안전속도 연구 동향

매우 가혹한 환경으로 볼 수 있는 빙해를 운항하는 선박의 빙 충돌 손상은 어느 정도 불가피한 측면이 있다. 따라서 안전속도의 추정 문제는 선박의 빙해 항해 능력과 한계를 규명하고 빙해 운항에 따르는 위험도를 경감할 수 있는 전략적 선택 수단으로 간주된다.

최근 북극해 항로에 해운 및 조선사의 관심이 집중되고 있고, 극지 운항선박의 해상안전 및 해양오염 사고가 발생할 잠재적인 가능성이 커짐에 따라 극지 해역 운항 선박에 대한 강제화 코드 개발 필요성도 증대되고 있다. 따라서 IMO에서도 러시아 캐나다 등 북극해 연안국들에서 자제적인 필요성에 의해 적용되어온 안전속도 개념을 발전시켜 공통적 체계를 갖는 국제적 Regulation으로 개발하는 문제를 활발하게 검토하고

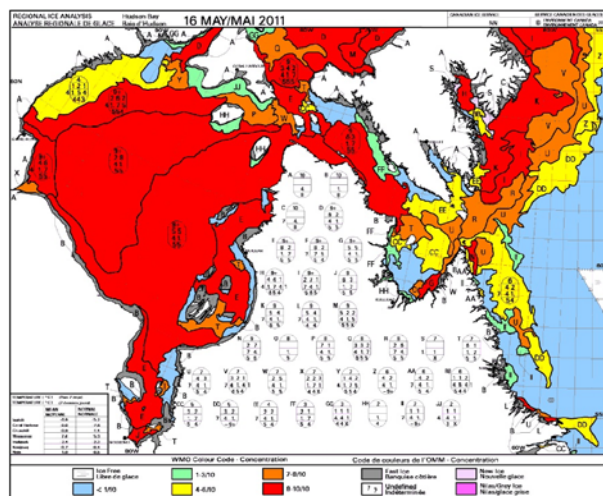
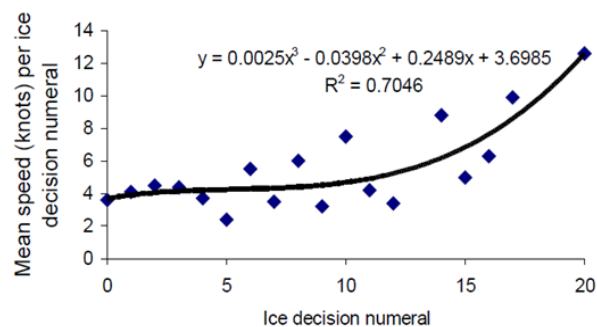
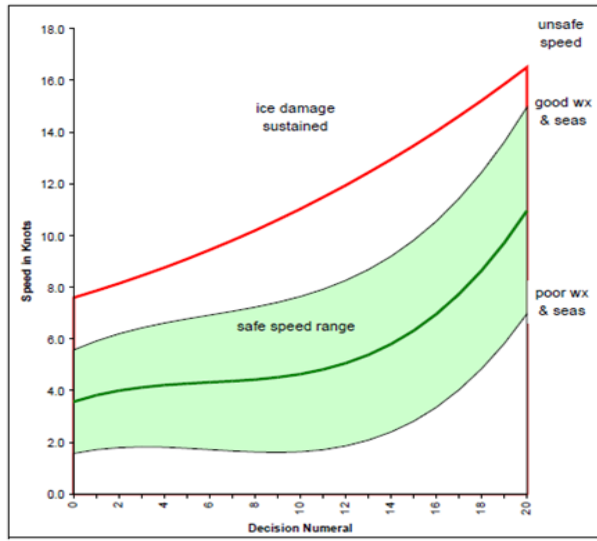


그림 4 Egg code and Ice Charts (CCG 2012)



◆ Vessel transits — Speed in knots per ice decision numeral  
(a) Type B Vessels



(b) Combined Type B, D, and E Vessels

그림 5 Relation between safe speed & ice numeral (ENFOTEC, 1996)

있다. 2017.1.1 발효 예정인 Polar Code에서 운항조건 판별 기준을 개발하는 중이며 극지운항제한평가 위험지수 (POLARIS, Polar Operational Limit Assessment Risk Indexing System) 에 대한 연구가 진행되고 있다. 기술적 측면에서 보면 합리적인 빙-선체 충돌 시나리오 개발, 충돌 시나리오와 연계된 빙의 파괴 거동 추정 기법, 안전속도에 대응되는 구조의 극한 상태 결정 등에 대한 연구가 심도 있게 이루어지고 있다.

설계 빙 충돌 시나리오를 좀 더 현실화하기 위해서 해빙과 육지 빙하에서 떨어져 나온 유빙의 재료 특성을 달리 고려하고, 빙판 가장자리에 선수부의 충돌 각도와 다양화하는 한편, 일반적인 쇄빙현상 뿐만 아니라 래밍, 선회 시 선수, 선측 충돌 등 경우에 따라 충돌 상황을 다양하게 고려하고 있다.

빙 충돌의 역학적 해석을 위하여 간이 빙-선체 충돌 모델이 사용되어 왔지만 최근에는 정밀 비선형 유한요소해석법이 시도되고 있다. 선체에 작용하는 빙 압력의 추정을 위하여 빙 역학 분야의 연구가 필수적이다. 굽힘, 압축, 전단 뿐만 아니라 균열전파에 의한 취성파괴 등 빙의 형상에 따라 다양하고 독특한 파괴 거동을 보이고 있어 아직까지 많은 불확실성을 안고 있다. 결국 빙 압력 문제는 해석적 접근방법만으로는 합리적인 추정이 어렵기 때문에 현장 실험 및 계측으로 보완되어야 할 필요가 있다.

## 4. 빙 충돌 시뮬레이션 예

앞서 밝힌 바와 같이 현재 국내의 극지 분야 연구 현황으로 판단할 때, 빙해역의 안전운항속도 추정법을 개발함에 있어서 캐나다, 러시아 등과 같이 전적으로 현장 실험/계측 및 축적된 경험을 기반으로 하는 방안은 아직까지 현실적으로 어려워 보인다. 북극해를 끼고 있지 않기 때문에 빙해 선박 운항 자료 취득이 쉽지 않을 뿐만 아니라 극지 현장 실험/계측 자료를 원하는 수준으로 확보하는 것도 불가능하다. 따라서 연구의 자율성과 독자성을 확보하기 위해서는 현장자료 의존성이 덜한 정밀 빙 충돌 시뮬레이션 기법에 기반한 안전속도 추정법 개발로 방향 설정하는 것은 타당해 보인다.

따라서 본 고에서는 빙해선박의 안전속도 추정의 기반 기술로서 빙해역 운항 시 선체 구조의 안전성을 합리적으로 평가하기 위한 빙 충돌 해석기술 연구 사례로서 평탄빙의 쇄빙 현상을 시뮬레이션하는 과정을 소개하고자 한다.

### 4.1 빙의 구성방정식 모델

빙의 기계적 성질은 온도, brine 함유율, 결정의 크기, 변형 속도 등 다양한 요인들에 의해 복잡하게 변화한다. 빙 충돌 시뮬레이션을 위해서는 무엇보다도 극빙의 재료특성에 대한 지역적, 계절적 특성을 고려해야 하지만 이 역시 실험/계측자료의 축적을 통한 D/B 확보에 근본적인 문제점이 있음은 이미 지적한 바 있다. 여러 학술 논문과 보고서에 부분적인 연구 결과들이 발표되고 있으나 계절적, 지역적으로 포괄적이며 종합적으로 정리되어 발표된 자료는 찾기 어렵다.

과거 빙의 재료특성을 잘 반영하고 있는 변형도 속도 의존성 재료모델이 적용된 바 있으나 재료특성 D/B 부족이라는 근본적인 문제의 해결이 어려웠기 때문에 오히려 다양한 자료를 얻을 수 있는 좀 더 간단한 파괴모델을 적용하기 위한 시도로서 변형도 비의존적이며 콘크리트 등 취성 재료의 항복현상을 설명하는데 적합한 Drucker-Prager 항복조건을 결합하는 재료모델을 적용하였다. 추후에도 해빙의 재료적 특성에 관한 연구는 꾸준히 계속되어 좀 더 현실성 있는 자료 확보가 필수적인 것으로 판단된다.

### 4.2 빙판-선체 충돌 해석

빙이 선체에 충돌하는 상황은 매우 다양하다. 그 중 쇄빙과정에서 발생하는 평탄빙과의 충돌이 가장 일반적이며, 여기서는 쇄빙 시 선박의 선수부와 평탄빙과의 충돌하는 상황을 고려하였다. 쇄빙선이 두께 0.6m의 무한한 평탄빙을 각각 2 m/s, 3 m/s, 4 m/s의 속도로 쇄빙하는 시나리오를 가정하여 해석을 수행하였으며, 모형시험결과와 비교하였다.

대상선으로서 아라온호를 채택하고 평탄빙의 쇄빙과정에서 발생하는 선수부의 구조 안전성을 검토하였다. 해석 시간의 단축을 위하여 기하학적 대칭조건을 고려한 1/2 대칭모델로 해석하였고, 평탄 빙은 20(m)X40(m)X0.6(m) 크기의 직육면체로 모델링하였으며, 충돌부위의 요소들을 상세하게 분할하였다. 선체의 총 요소 수는 3,562개, 빙판의 총 요소 수는 108,016개이다.

해수영역까지 모두 해석에 포함하여 유탄성 문제로 해석하는 방안은 너무 막대한 계산시간을 필요로 하기 때문에 많은 해석조건에 대한 계산이 필요한 안전속도 추정에서는 비현실적으로 판단된다. 따라서 현실성 있는 빙판 파괴거동 구현을 위한 시도로 빙판의 밑면에 비선형 스프링을 배치하여 빙판의 부력효과를 구현하였다.

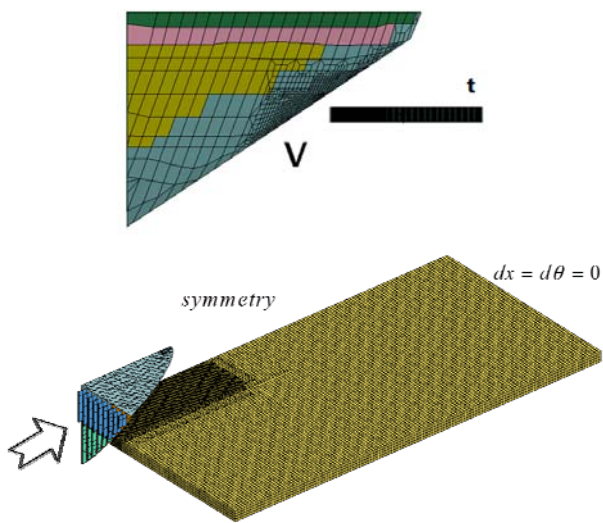
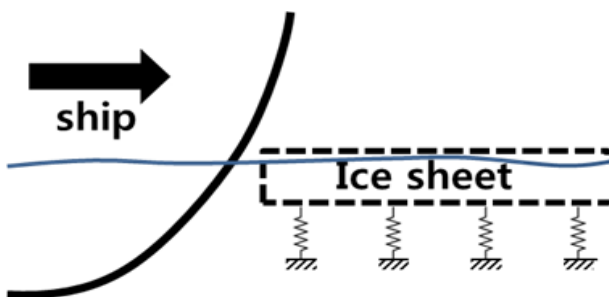
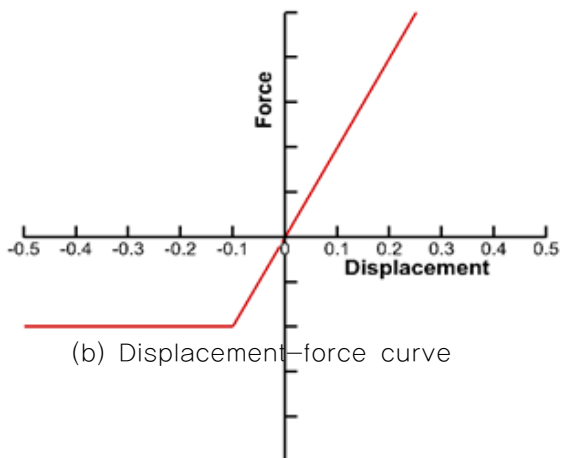


그림 6 Modeling of ship structure - level ice collision



(a) Conceptual modeling of buoyancy



(b) Displacement-force curve

그림 7 Nonlinear spring model for buoyancy of ice sheet

실선의 빙저항에 대한 계측결과가 부족하기 때문에 해석결과를 빙의 굽힘강도 280kPa, 560kPa의 모형빙에서 수행한

아래호의 모형쇄빙시험의 결과와 비교하였다. Fig.8에서 쇄빙중의 평탄빙의 파괴형상과 응력분포를 나타내었으며, Fig.9에서 각각 3m/s의 선속에서 빙 저항의 시계열을 보였다. 세 모점선은 280kPa, 네모점선은 560kPa의 굽힘강도에 해당되는 빙 저항이다. 두 모델 모두 충돌에 의한 빙 접촉부의 파괴만 관찰되고 있으며, 현재까지의 시뮬레이션 기술로는 그 외의 굽힘, 전단, 균열에 의한 현실적인 파괴모드의 구현이 미흡하다는 문제점은 여전히 남아 있다.

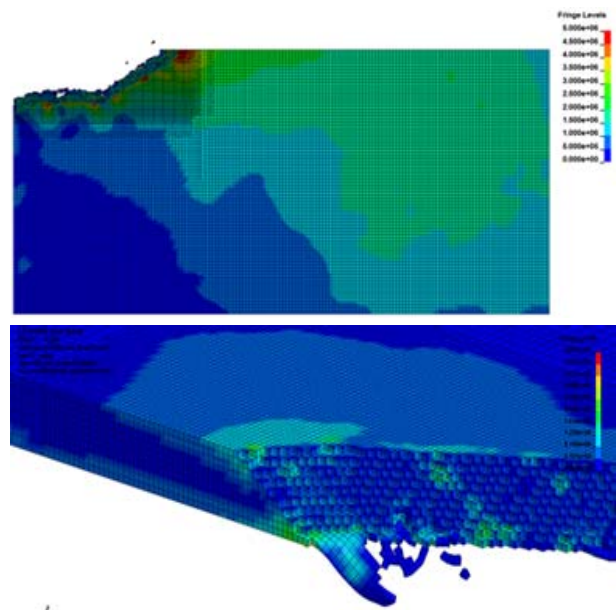


그림 8 Failure mode of ice sheet

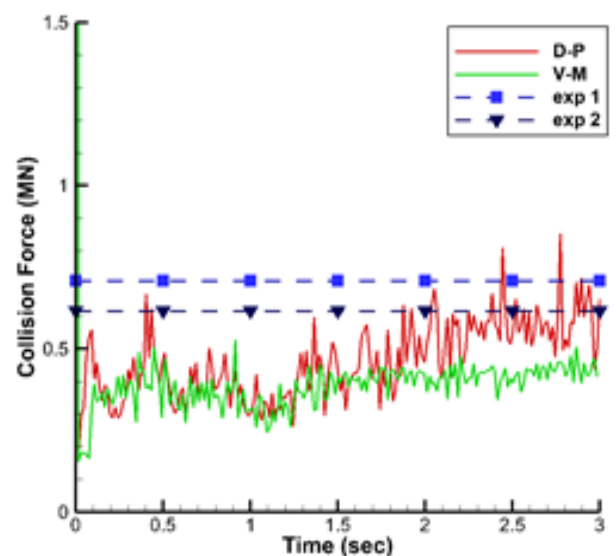


그림 9 Time histories of collision force (3m/s)

## 5. 결론

본 연구에서는 정밀 빙 충돌 시뮬레이션 기법에 기반한 안전속도 추정법을 개발함에 있어서 현재까지 선진국의 기술 수준을 살펴보고 이를 바탕으로 국내의 독자적인 기술개발 방향을 개발하였다.

국내에서 빙해역의 안전운항속도 추정법을 개발함에 있어서 현장 실험 및 계측을 기반으로 하는 연구는 아직까지 현실적으로 어려워 보인다. 북극해를 끼고 있지 않기 때문에 빙해선박 운항 자료 취득이 쉽지 않을 뿐만 아니라 극지 현장 실험/계측 자료를 원하는 수준으로 확보하는 것도 불가능하기 때문이다. 따라서 연구의 자율성과 독자성을 확보하기 위해서는 현장 자료에 의존성이 덜한 정밀 빙 충돌 시뮬레이션 기법에 기반한 안전속도 추정법 개발로 방향 설정하는 것은 타당해 보인다.

그러나 정밀 비선형 유한요소법 기반의 충돌해석 기법은 빙의 재료적 특성에 따라 결과의 신뢰성이 달라지며 다양한 빙의 파괴 모드를 합리적으로 구현하지 못한다는 한계점이 지적되고 있다. 따라서 안전운항속도 추정을 위하여 빙-선체 충돌 해석 기술을 그대로 적용하기에는 아직 많은 문제점이 남아 있으므로 이에 대한 대응 방안 마련이 앞으로 관련 연구의 핵심적인 내용이 될 것이다.

## 참고 문헌

- Brown, R. and Daley, C., 1999. "Computer Simulation of Transverse Ship-Ice Collisions," *National Research Council of Canada, PERD/CHC Report 9-79*.
- Canadian Coast Guard, 2012. *Ice Navigation in Canadian Waters Record of Amendments*, Minister of Fisheries and Oceans Canada 2012.
- Daley, C., Riska, K. and Smith, G., 1997. "Ice Forces and Ship Response during Ramming and Shoulder Collisions Phase III - Harmonization of Polar Ship Rules," *Transport Canada Publication No. TP 13107*
- Dolny, J., Yu, H.C., Daley, C., and 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

- ENFOTEC Technical Services Inc., 1996. "Safe Speed in Ice: An Analysis of Transit Speed and Ice Decision Numerals," *Ship Safety Northern (AMNS)*, Transport Canada
- Hill, B., 2005. "Ship collisions with iceberg database. Report to PERD: Trends and analysis," NRC, TR-2005-17.
- Hiramatsu, S., Tsumura, K., Sato, K., Ishida, T., Oka, M., and Fujino, Y., 2007. "Features of the Latest LNG Carriers Sailing into Low-Temperature Environments", *Mitsubishi Heavy Industries, Ltd. Technical Review*, Vol. 44, No. 3
- Howell, S.E.L. and Yackel, J.J., 2004. "A vessel transit assessment of sea ice variability in the Western Arctic, 1969-2002: implications for ship navigation," *Can. J. Remote Sensing*, Vol. 30, No. 2, pp. 205-215
- Nho, I.S., Oh, Y.T., 2016, "Structural Strength and Safe Speed of Ships Operating in Ice," *Proceeding of the Annual Spring Meeting, the Society of Naval Architecture of Korea, JeJu, 22-23 May 2015*. pp.141-145.
- Nho, I.S., Oh, Y.T., Ryu J.W. and Rim, S.J., 2016, "Considerations for the Structural Strength and Safe Speed of Ships Operating in Ice," *Proceeding of the Annual Spring Meeting, the Society of Naval Architecture of Korea, Busan, 19-20 May 2016*.
- Schulson, M., 1999. "Structure and Mechanical Behavior of Ice," *JOM*, 51 (2), pp. 21-27.
- Timco, G. and Kubat, I., 2001. , "Scientific Basis for the Ice Regime System: March 2001 Update," Canadian Hydraulics Centre, Technical Report HYD-TR-061
- Timco, G. and Johnston, M., 2003. "Arctic Ice Regime Shipping System (AIRSS) pictorial guide," *Canadian Hydraulics Centre, TP14044E*.



노인식

- 1956년생
- 1992년 서울대학교 조선해양공학과 박사
- 현 재 : 충남대학교 교수
- 관심분야 : 선박·해양 구조공학
- 연 락 처 : \*\*\*-\*\*\*-\*\*\*\*
- E - mail : isno@cnu.ac.kr