

Ice Hazard를 고려한 Membrane Type LNG선박의 화물창 안전성 평가

이재열, 박영일, 한성곤(대우조선해양(주))

1. 서론

극지 빙해역에는 많은 천연자원이 매장되어 있으며 현재 자원 개발과 수송에 많은 관심이 모아지고 있다. 이에 따라 당시에서는 최종적으로는 극지역을 운항할 수 있는 선박을 개발하고자 하며, 그 초기 연구로 발틱해를 운항할 수 있는 FMA Ice Class 1A에 적합한 170K급 LNG 선박을 설계하고자 한다. LNG 선박 중 Membrane type의 화물창은 분리형에 비해 상대적으로 빙하중에 취약할 것으로 여겨지므로, 수치해석을 통해 화물창 내벽의 안전성을 평가하고자 한다. 이를 위해 Ice Hazard에 대한 분석을 통해 빙하중을 추산하였으며, 화물창 안전기준을 중심으로 계산된 데이터를 분석하여 LNG 선박의 안전성을 평가하였다.

2. 빙하중 추정

2.1 하중을 받는 얼음의 거동

극지방에서 조업 및 운항을 하는 선박 및 해양구조물들에 작용하는 빙하중을 추정하기 위해서 먼저 얼음의 특성을 이해해야만 한다. 이를 위해 본고에서는 해빙(Sea ice)의 기본 특성을 정리하고, 선박에 작용하는 빙하중을 추정하는 방법을 소개하고자 한다.

해빙은 염도, 온도, 결정 상태, 공기방울 함량 등 여러 가지 조건에 따라 그 밀도나 탄성계수, 강도 등의 물성치가 다양하게 변하는 특징이 있다. 이러

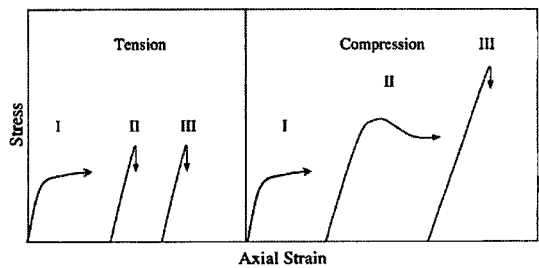


Fig. 1 Stress -strain relation of ice

한 값들을 모두 고려하여 해석을 하기에는 많은 문제가 따르기 때문에 본 연구에서는 그 대표적인 값만 고려하여 평가를 할 수 밖에 없다.

얼음은 압축 및 인장을 받을 때 다른 재료들과 다르게 독특한 특징을 나타내는데, 이런 특징이 빙하중을 추정하는 데 중요한 영향을 준다. Fig. 1은 얼음의 응력-변형도 관계를 간략히 보여주고 있다.

얼음은 인장을 받으면 변형률(strain-rate)에 관계 없이 비교적 쉽게 부서지는 특징을 가지고 있다. 그러나 압축을 받는 경우는 인장과는 달리 변형률에 따라 차이가 있음을 보여 준다. 천천히 압축하중을 가하는 경우, 크리프 및 연성 거동을 보이며 시간이 증가될수록 하중의 증가 없이도 변형이 지속적으로 증가한다(Compression-I). 변형률이 커지면 최종 압축강도도 증가한다(Compression-II). 변형률이 더욱 커지면 압축강도도 더 커지고 얼음은 연성 거동 대신 취성(brittle)의 특징을 보인다(Compression-III).

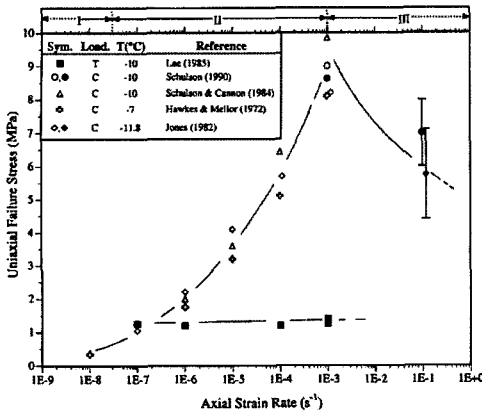


Fig. 2 Uniaxial failure stress as a function of strain-rate

Fig. 2는 실제 얼음 시편을 가지고 압축실험을 수행한 결과이다. 변형률이 0.001보다 큰 경우에는 brittle한 거동을 보인다. 빙판이 선체와 충돌하는 경우 비교적 빠른 속도로 접촉하는 문제가 되며 이때 얼음의 거동은 brittle로 취급할 수 있으며 본 연구에서는 변형률 0.01을 기준으로 해빙의 물성치를 적용하였다.

무한 빙판이 경사 구조물에 충돌하는 경우, 빙판은 압축에 의해 부서지기 전에 굽힘모멘트에 의해 먼저 파괴된다. 빙판에 굽힘모멘트가 작용하면 아래 면에 인장응력이 발생하고 균열이 성장하기 때문이다.

Fig. 3은 굽힘에 의해 파괴되는 빙판의 작용하는 하중의 메커니즘을 도시한 것이다. 하중 성분들을 계산하는 식들은 참고문헌에 설명되어 있다.

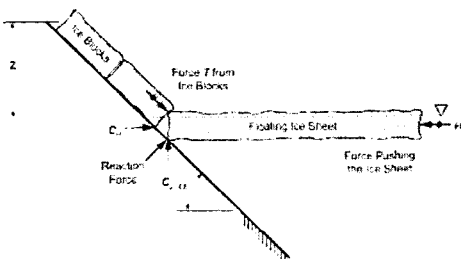


Fig. 3 Force during an interaction of a floating ice sheet against a wide sloping surface

커다란 빙판은 좌굴에 의해서 파괴되기도 하는데, 굽힘에 의한 파괴 현상과 유사한 결과를 나타낸다. 빙판이 압축하중을 받을 경우, 특성 길이에 따라 좌굴 모드가 발생하게 된다. 이 특성길이는 재료의 물성치에 의해 계산되며 굽힘 변형에 의해 이 크기로 부서지게 된다. 특성길이는 다음 식으로 계산한다.

$$L = [Eh^3 / \{12(1-\nu^2)\rho_w g\}]^{1/4}$$

L = characteristic length of the ice sheet

E = modulus of elasticity of ice

h = ice thickness

$\rho_w g$ = specific weight of water

ν = Poisson's ratio of ice, about 1/3

2.2 Ice Hazards

쇄빙선이 만든 수로를 따라 일반 선박이 지나갈 때, 선체는 수로 내의 부서진 빙편과 충돌하기도 하고 수로의 경계면 얼음과 충돌하는 경우도 있다. 이런 예상되는 Ice Hazard를 정의하고 각 상황에 대해 빙하중을 추정할 필요가 있다.

1) 평탄빙 (Level ice)

가장 대표적인 빙상상태로 빙하중을 결정하는 기준이 된다. 본 연구에서는 반무한 크기의 균열 두께 빙판을 평탄빙이라 정의한다. 각 선급들은 선박이 운항하고자 하는 해역의 바다의 해상 상태와 기후 조건에 따라 빙판의 두께를 정의하고 있다. 평탄빙에 작용하는 하중은 흘수면을 기준으로 선체 전면에 가해지므로 이 부분은 다른 부분보다 더 보강하여 설계한다. 평탄빙의 경우는 선수부를 포함 선체 앞부분에서 주로 충돌한다.

2) 빙반 (Ice floe)

평탄빙이 쇄빙선 혹은 기타 구조물과 충돌하여 균열이 발생하면 작게 부서지게 되는데 본 연구에

서는 특성길이 크기로 부서진다고 가정한다. 이렇게 부서진 빙편은 조류나 바람 등에 의해 움직이다가 선박과 2차 충돌을 하게 된다. 빙편은 크기가 크지 않기 때문에 선체 바닥부분으로 끌려 들어가게 되고 부력에 의해 상승하면서 또 다시 충돌하게 된다. 그래서 ice floe에 의한 빙하중은 선박의 밑지(bilge) 부분과 선저 부분에 주로 작용한다고 생각한다.

3) 빙맥 (Ice ridge)

평탄빙이 Ice Hazard의 기본이 된다면, 빙맥은 선박에 큰 하중을 가하는 위험요소(hazard) 중 가장 발생빈도가 높은 요인이다. 빙맥은 평탄빙이 조류나 기타 외부 하중(쇄빙선 포함)에 의해 움직여 서로 충돌하면서 만들어 진다. 충돌하면서 부서진 얼음조각들이 쌓이고 서로 엉켜 붙어 얼게 되면서 만들어 진다. 빙편들은 해수에 의해 쉽게 얼지만 외부 하중을 받으면 또한 쉽게 깨어진다. 그러나 시간이 오래 지나면 전체가 하나의 빙맥(ice ridge)이 되어 강도도 커지고 상당히 큰 하중을 줄 수 있다. 빙맥에 의한 빙하중은 Fig. 4와 같이 빙맥의 단면 평균 넓이를 고려하여 선체의 앞 부분에 적용한다.

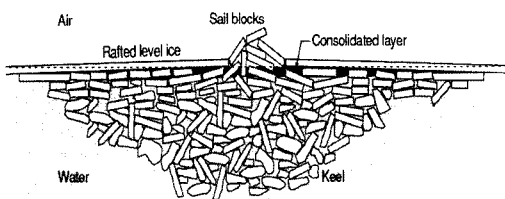


Fig. 4 Principal cross section of an ice ridge

4) 얼음에 갇힘 (Stuck in ice)

선박이 얼음에 갇히게 되면 상당히 위험한 상태가 된다. 얼음은 지속적으로 움직이면서 성장하기 때문에 선체에 가하는 하중이 점차 증가되고 화물창 벽이 위험한 상태에 도달할 수 있다. 그래서 이런 Ice Hazard는 비록 발생 빈도는 작아도 상당히

위험하기 때문에 신중히 고려해야 한다. 얼음에 갇힌 상태에서 선체에 가해지는 빙하중은 흘수면을 기준으로 측면 전구간에 걸쳐 평탄빙의 두께 만큼 범위에 전달된다고 가정한다.

2.3 해빙의 분쇄(crushing) 강도

빙하중을 계측하기 위해 다양한 방법으로 많은 실측시험이 있었으며, 이 데이터를 기준으로 Canadian Standard Association(CSA)에서는 빙하중에 대한 기준을 정의하였다. Fig. 5는 구조물이 빙판이 수직하게 충돌할 때 단면적에 따라 계측된 빙압력(Ice pressure) 데이터이다. 본 연구에서는 M+2SD를 기준으로 빙하중을 계산한다. 빙판이 구조물과 수직하게 충돌할 때 가장 큰 하중을 주기 때문에 아래의 데이터는 보수적인 관점에서 접근한 것이라고 할 수 있다.

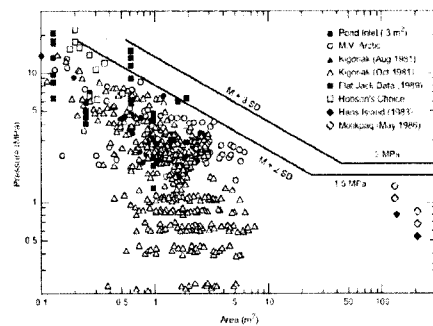


Fig. 5 Ice pressures as a function of nominal contact area (CSA 2005)

Fig. 6은 평탄빙이 선체 측면과 충돌할 때 하중이 작용하는 범위를 보여 주는 그림이다. 빙판의 상부는 차가운 공기와 접하고 하부는 상대적으로 온도가 높은 해수와 접하고 있어 아래 부분의 강도가 작다. 그래서 압축하중을 받을 때 빙판의 하부가 쉽게 부서지기 때문에 빙판의 두께 h 전 구간에 힘이 작용하지 않고 상부의 b 만큼만 하중이 작용한다고 생각한다.

한편, 빙판은 longitudinal 방향으로 울퉁불퉁하게



생기기 때문에, 배와 충돌할 때 충돌하는 단면적이 다양하다. 이때 작은 부위만 충돌하는 경우에는 주위보다 큰 압력이 가해지기 때문에 쉽게 부서지며 새로운 경계면을 만들게 된다. 그리고 긴 단면적에 걸쳐 동시에 부딪히는 경우에도 좌굴이나 기타 하중 조건에 따라 쉽게 부서지기 때문에 실질적으로 힘이 전달되는 길이는 줄어들게 된다. 즉, 빙판의 실제 길이가 상당히 길어도 선체에 가해지는 하중

은 Fig. 6의 아래 그림과 같이 길이 1 만큼만 작용하게 된다. 이러한 원리에 따라 선급규정에서는 빙 등급을 정할 때, 빙하중의 크기 외에도, 유효 길이 b, l 값도 정의하고 있다.

본 연구에서는 가장 보수적인 관점에서 접근하기 위해 b, l 값 대신에 빙판의 두께 h 와 특성 길이 L 을 고려하여 하중을 계산한다.

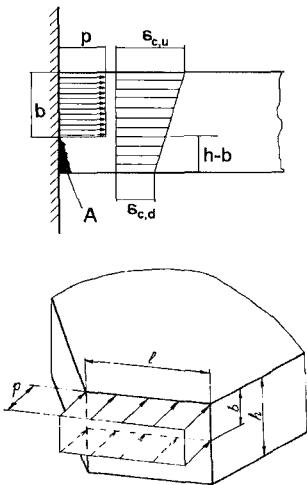


Fig. 6 Diagram of contact ice loads



Fig. 7 Deformation of membrane inside a tank

3. NO96 Containment System

3.1 내부구조의 변위

Fig. 7은 El Paso Paul Kayser LNGC가 좌초에 의해 크게 손상된 모습이다. 외판(위쪽 그림)은 상당히 심각하게 손상되었지만, 내부구조는 약간의 소성변형만 발생하였다. 이 사고 자료는 LNGC의 안전성을 평가하기 위한 기준으로 외판이 아닌 내부구조의 변위 값을 기준으로 평가해야 함을 보여주는 좋은 사례이다.

3.2 Limit deflection

NO96 containment system은 Fig. 8과 같이 단열

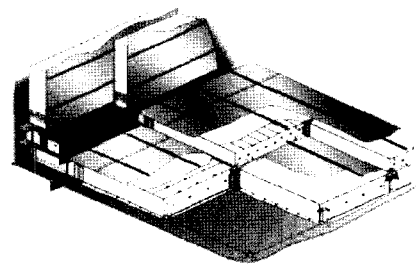


Fig. 8 NO96 containment system

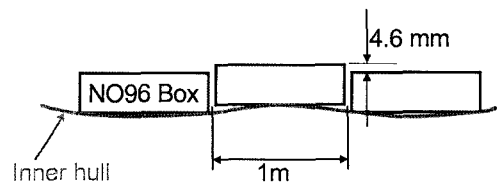


Fig. 9 Operational limit

박스가 배치되고, coupler에 의해 고정되어 있다. 단열 박스가 내벽에 직접 붙어있지 않기 때문에 화물창 변형에 대해 어느 정도 유연하게 견딜 수 있게 설계되어 있다.

단열 박스의 길이는 1m이며, 굽힘하중에 대해 저항할 수 있는 부재는 아니다. 그래서 화물창 내벽에 생기는 변형은 coupler 부분이 흡수하도록 설계되어 있다. 즉, 이 지지대 부분이 단열 박스에 힘을 전달하지 않고 버틸 수 있는 변형 크기가 화물창 내부의 안전도를 평가하는 기준이 된다.

Fig. 9는 NO96 containment system이 안전한 상태를 유지할 수 있는 허용 변위를 보여주고 있다. Operational limit는 단위 m당 4.6mm까지 허용하고 있고, Survival limit는 단위 m당 40mm이다. 이 두 조건을 기준으로 화물창의 안전도를 평가한다.

4. Calculation of Demand

4.1 Limit stress mechanism

본 연구에서 고려한 Ice Hazard는 평탄빙, 빙맥, 얼음에 갇힌 상태 등 세 가지이다. Fig. 10은 하중의 적용 위치를 보여 주고 있다. 빙맥은 주로 선수 부분에 부딪히기 때문에 No.1 Tank 에만 적용한다. 반면 평탄빙은 No.1, 2 Tank에 적용한다.

Table 1은 CSA에서 규정하고 있는 빙압력에 따라 계산된 값이다. 본 연구가 고려한 해상은 발틱 해로 다년생빙은 존재하지 않는 해역이다. 그래서 빙맥의 생성 시간이 상당히 작기 때문에 외부 하중

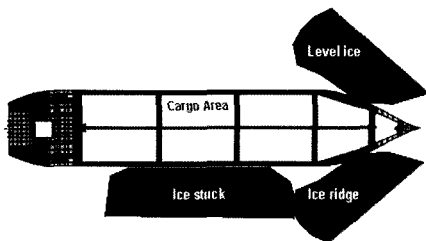


Fig. 10 Ice hazard for limit stress mechanism

Table 1 Ice crushing pressure

Ice Hazard	단면적 (m ²)	빙압력 (N/mm ²)
Level ice	6.72	3.28
Ice ridge	43.68	0.75
Stuck in ice	100.0	1.5

Table 2 Results of nonlinear FE analysis

Ice Hazard		Strain Energy [MJ]	Max. Deflection* [mm]
Level ice	No.1 Tank	1.51	15.4
	No.2 Tank	1.67	16.9
	BHD	1.83	4.9
Ice ridge	No.1 Tank	0.28	13.0
	No.2 Tank	0.37	19.4
	BHD	0.14	3.7
Stuck in ice		1.71	15.0

*: Inner hull deflection

을 받을 때 해수에 의해 언 부분이 전단응력에 의해 쉽게 부서진다. 파괴기준이 되는 전단강도 값은 압축강도에 비해 상당히 작다. 그래서 이러한 점을 모두 고려하여 보수적인 관점에서 하중의 50%를 적용한다.

Table 1에 정리되어 있는 하중을 LNG선박의 측면에 적용하였으며, 경계면에 대칭조건을 주어 비선형 수치해석을 수행하였다. 본 연구에서는 비선형 해석 전용 프로그램인 ABAQUS를 사용하였으며, Ice Hazard에 의한 빙하중 외에 다른 하중들은 상대적으로 크기가 작을 것으로 추정되기 때문에 고려하지 않았다. 빙해역 수로를 운항하는 속도는 최대 8노트이기 때문에 얼음의 이동에 의한 하중은 상당히 작을 것으로 추정된다.

Table 2는 변형에너지와 내부구조의 최대 변형 값을 정리한 것이며, Fig. 11은 외판과 화물창의 변형을 보여주고 있다. 평탄빙에 의한 빙하중은 외판에

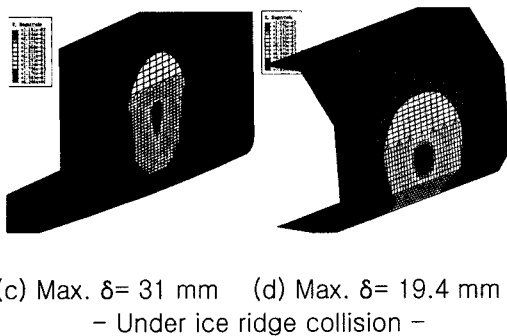
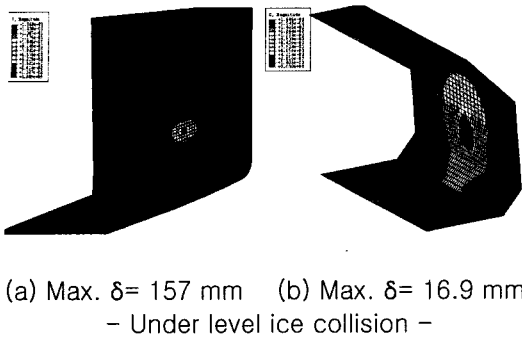


Fig. 11 Maximum deformation for side shell

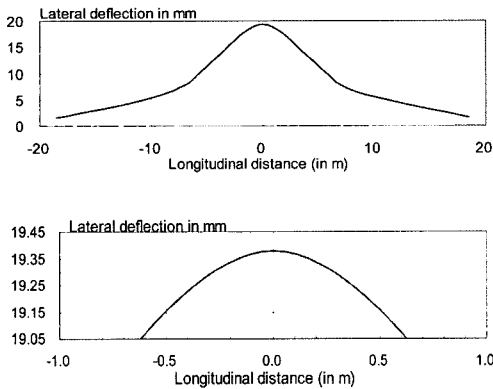


Fig. 12 Lateral deflection of inner hull

국부적으로 대변형을 유발시킨다. 그러나 외판에 비해 화물창의 변형은 상대적으로 작다. 반면 빙맥에 의한 하중은 넓은 범위에 영향을 주며, 외판에 전달된 에너지가 화물창 내부로 잘 전달된다. 그 결

과 평탄빙에 비해 변형에너지는 작으나 화물창의 변위는 오히려 더 크다.

Fig. 12는 빙맥에 의한 하중을 받을 때, 화물창의 횡방향 변형을 길이 방향으로 그래프로 표현한 것이다. 중앙부를 기준으로 단위 m당 0.23mm의 최대 변형이 발생하였다. 이 값은 안전 허용기준인 단위 m당 4.6mm에 비해 훨씬 작기 때문에 화물창은 안전하다고 할 수 있다.

5. 결론

당사에서는 최종적으로는 극지역을 운항할 수 있는 선박을 개발하고자 하며, 그 기초 단계로 발틱해를 운항할 수 있는 선박에 대해 연구를 진행하였다.

선박의 손상 사례에 의하면 Membrane type LNG 선박의 외판이 크게 손상되더라도 내부 화물창이 손상되지 않으면 안전함을 알 수 있다. 이에 따라 내부 화물창의 허용 가능한 최대 변형 값을 조사하였으며, Ice Hazard 분석을 통해 빙하중을 계산하였다. 비선형 유한요소해석을 통해 계산된 화물창 내부의 변형 값은 허용 변형 값에 비해 상당히 작아서 안전함을 알 수 있다.

참고문헌

1. CECW-EH (2002). Engineering and Design - Ice Engineering, EM 1110-2-1612, Chap.6
2. CSA (2005). Canadian Standard Association in CSA S471-04.
3. FMA (2002). Finnish Maritime Administration Regulations on the Structural Design and Engine Output Required of Ships for Navigation in Ice.
4. Heinonen, J. (2004). Constitutive Modeling of Ice Rubble in First-Year Ridge Keel, VTT Publication 536, Espoo, Finland.
5. Jansen, A., Loset, S., Hoyland, K.V., Liferov, P., Heinonen, J. and Evers, K.U. (2001). "Physical Modeling of First-Year Ice Ridges-Part ii : Mechanical Properties", Proc. of the 16th POAC Conference, Ottawa, Canada, pp.1493-1502.
6. Schulson, E.M. (1999). "The Structure and Mechanical Behavior of Ice", Journal of Materials. Vol.51, No.2, pp. 21-27. ⚓