

극지 운항 선박 Ice Belt Zone의 도장 사양 설계 연구

백윤호^{1,†}·박충서¹·소용신²
현대중공업(주) 도장연구실¹
현대중공업(주) 에너지·환경연구실²

A Study on Coating Performance Design for Ice Belt Zone of the Arctic Vessels

Yun-Ho Baek^{1,†}·Chung-Seo Park¹·Yong-Shin So²
Protective Coating Research Dep't, Hyundai Heavy Industries, Co, Ltd¹
Energy & Environment Dep't, Hyundai Heavy Industries, Co, Ltd²

Abstract

The demand for an ice class ship is rising expected to rise according to the increase of energy consumption and the opening of arctic sea routes. Ice class ship should be designed to cope with the severe environmental conditions of arctic sea such as a high mechanical impact and abrasion damage, caused by pack ice, ice bergs and low temperature. The ice class ship hulls are coated with an anti-abrasion and low friction coating such as a solvent free epoxy or high solid-volume epoxy. These coatings require two-component heating pump and a high grade surface preparation. In this study, the coating performances for the arctic vessels, such as puncture absorbed energy, abrasive wear loss, friction coefficients and impact absorbed energy were evaluated. Based on this study, a proper coating performance specification for the arctic vessels was proposed and coating selection guideline in terms of coating performance and workability was also established.

Keywords : Ice belt zone(내빙대), Arctic vessel(극지운항선박), Anti-abrasion paint(내마모도료)

1. 서론

쇄빙선(Icebreaker)이란 빙해역을 독자적으로 항해할 수 있는 쇄빙능력을 보유한 선박을 말한다. 다시 말해 빙해역에 수로를 만들어 다른 선박의 항해를 유도하거나 아니면 단독으로 개별적인 활동을 추진하는 선박을 말한다. 쇄빙선과는 달리 독자적인 쇄빙능력은 보유하지 않았더라도 비교적 얇은 결빙해역이나 이미 만들어진 수로의 유빙저항을 이겨낼 만한 내빙능력을 갖춘 선박도 있는데, 이러한 내빙선(Ice Going Vessel)은 두께 50 cm 이내의 1년생 빙 그리고 결빙을 3/10 이하의 빙해역에서 사용되는 것으로서 쇄빙선의 인도에 따라 운행한다. 북극권의 국가들에서는 단독쇄빙선과 함께 수척의 빙해용 상선이 선단을 이루어 빙해역에서의 해상수송을 담당하고 있다.

Fig. 1에서 보는 것처럼 쇄빙선의 선수부 형상은 구상 선수(Bulbous bow)가 있는 일반 상선 구조와는 달리 항해 지역, 항해 목적, 쇄빙 효율을 고려해 빙 파괴에 적합한 선수부를가지도록 설계한다. 선체가 받는 빙하중은 이 선수부가 가장 크며 선체의 측면도 빙판에 의해 압축응력을 받는데, 안전을 위해 이 부분은

특히 튼튼한 구조로 만든다. 이 부분을 내빙대(Ice Belt Zone)라 부르며 얼음과 직접적인 충돌이 있는 부분이므로, 내마모성과 내충격성을 요구하는 특수 도장 시스템이 적용된다.

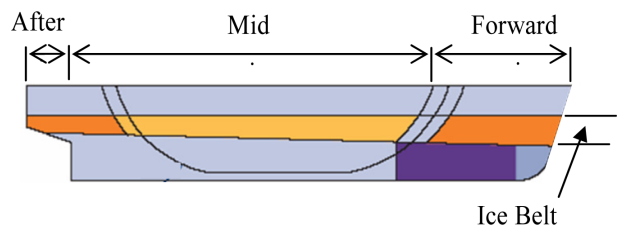


Fig. 1 쇄빙선의 측면 모식도

당사의 주요 도료제조사인 Lloyd's Register에서 발행하는 'Abrasion Resistant Ice Coating' 인증서를 보유하고 있다. 극지 운항선 도장사양 선정에 중요한 기준이 되는 이 인증서의 승인 기준은 다음과 같다.

- 1) 3척 적용 실적
- 극지 운항용 선박의 적용 실적에 대한 선주 증명서

[†] 교신저자 : bighostel@nhl.co.kr, 010-8816-4314

- 적용된 도료 사양에 대한 적용 실적, 운항 경로, 운항 빙등 급 조건
- 드라이 독킹(Dry Docking) 보고서
 - 컬러 사진을 포함한 보고서 및 도장 사양
- 상기 3척에 대해 반드시 1척은 LR 검사관 검사 실시
 - 드라이 독킹 기간
- 상기 조건을 검토 시 실선을 통한 인증 기간은 신조선의 결과 드라이 독킹 기간을 감안할 경우 최소 3년 이상이 필요함

2) 도막 성능 요구 사항

- 독립적인 공인 기관 또는 LR 검사관 입회하에서 자체적으로 진행
- 시험 진행시 기 공인된 제 3의 제품(ex. Inerta 160)과 상대 비교
- 도막 성능 평가 시험항목
 - Resistance to abrasion (Taber abraser test): ASTM D4060
 - Impact resistance: ASTM D2794
 - Cyclic corrosion test: ASTM D5894 (12 weeks)
 - Water immersion test ISO 2812-2 (12 weeks)

본 논문에서는 쇄빙선/내빙선용 도료에 대해 극지 운항 환경에서 빈번히 발생할 수 있는 충격, 마모에 대해 성능 평가를 수행하였으며, 특히 마찰 성능 시험에서는 통계적 기법을 통해 정규성을 검정하였다. 또한 이를 통해 얻어진 결과를 바탕으로 당사 특수 도장 사양 선정 기준을 정립해 도막 품질 향상에 기여하고자 한다.

2. 연구 내용

핀란드-스웨덴 빙 등급 규정(Finnish-Swedish Ice Class Rules)

에 따라 극지 운항용 도료는 크게 두 가지로 분류되는데, 1A Super 등급인 쇄빙선용, 그리고 그 보다 낮은 단계인 1A(또는 1B, 1C) 등급의 내빙선용으로 구분한다. 본 연구에서는 쇄빙선용 도료(A~E)와 내빙선용 도료(F, G, H)를 구분하여 선정하였는데, 이 중 도료 B의 경우, 30년 전에 개발되어 1,000척 이상의 적용 실적을 가지고 있으며, 타 도료 인증 시 평가 기준이 되는 도료이다. 쇄빙선용 도료의 주요 특징은 Table 1과 같다.

극지 운항선용 도료의 도막 성능 시험은 Lloyd's Register인증 조건에 규정된 충격에너지, 마모량을 기본 시험 항목으로 선정하였으며, 추가적으로 극지 운항 시 중요한 쇄빙 성능 지표인 마찰 계수를 측정하였다. 충격에너지는 필름 형태의 천공 흡수에너지(Puncture-absorbed Energy), 그리고 철판 도장 후 낙하 추에 의한 충격 흡수에너지(Impact-absorbed Energy)로 구분하여 시험을 수행하였다. 각각의 도막 시험에 대한 규격 및 시험 조건은 Table 2와 같다.

Table 2 도막 성능 시험 항목 및 조건

Test Items	Standards	Coating Thickness / Steel Thickness
Puncture-absorbed Energy	ISO6603-2	2.5~2.7 mm / -
Abrasive Wear Loss	ASTM D4060	500 μ m / 1.6 mm
Kinetic Friction Coefficients	ASTM D1894	500 μ m / 1.6 mm
Impact-absorbed Energy	ISO6603-1	500 μ m / 3.0 mm

Table 1 쇄빙선용 도료의 특징

	도료	K社	I社	J社	C社	S社
		A	B	C	D	E
지축/고화 건조시간(hrs)		2/24	5/48	3/10	8/12	-/12
타입		Epoxy	Epoxy	Epoxy	Polyester	Epoxy
가사시간		10 min at 45°C	5 min at 45°C	30 min at 23°C	4 hrs at 23°C	1 hrs at 23°C
고형분(%)		97	95	98	82	100
인증		Russian Register	Lloyd's Register	Lloyd's Register	Lloyd's Register	Lloyd's Register

3. 연구 결과 및 토론

3.1 도막 성능 시험 결과

3.1.1 천공 흡수에너지 시험 결과

쇄빙선용 도료 A에 대한 천공 흡수 거동을 Fig. 2에 나타내었다. 충격 전 첫번째 손상 하중(F_D)이 순간적 피크를 보인 후 지속적으로 하중이 증가 하는 경향을 보인 다음 최대힘 F_M 에 이르러 시편 균열이 개시되어 최대힘의 1/2의 변위점에서 천공이 발생한다. 따라서 최대에너지(E_M)는 최대힘 F_M 에서 발생한 변위점까지 적분한 면적과 같고 천공 에너지(E_P)는 최대힘 F_M 의 1/2로 힘이 떨어졌을때 변위점까지 적분 면적과 같다. 특정 시간 t 까지 소비된 시편의 최대 또는 천공 흡수에너지는 식 1과 같다.

$$E_j = \int_0^l F(l)dl \tag{1}$$

- 여기에서,
- E: 흡수에너지(J)
- F(l): 변위에서의 힘(N)
- l: 변위(m)
- j: 다음 중 하나를 표시하는 아래 첨자
(M: 최대,... P: 천공)

따라서 도료 A의 최대 흡수에너지는 변위 6.8 mm에서 최대 하중 0.69 kN일때이며, 적분 결과 3.35 J로 나타났다. 또한 최대 힘 F_M 이 1/2로 떨어진 변위에서 천공 흡수에너지는 3.56 J이며 이후, 파면에 의한 에너지 흡수로 조금 증가 후 수렴한다. 짧은 변위 범위에서 최대 흡수에너지 이후 천공 흡수에너지 발생은 도막과 같은 취성 재료의 특징이며, 천공 흡수에너지 발생 이후 에너지 변화량은 크지 않은 것이 일반적인 현상이다.

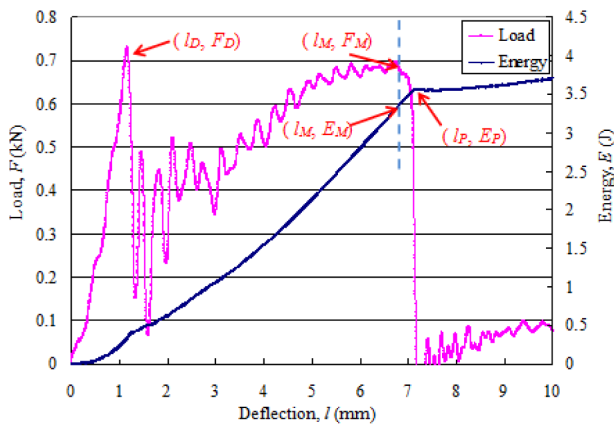


Fig. 2 도료 A의 최대/천공 흡수에너지 시험 결과

- F_D : 천공 전 첫번째 손상 힘(N)
- F_M : 시험 중 발생한 최대 힘(N)

- l_D : 천공 전 첫번째 손상이 발생한 변위(m)
- l_M : 최대힘FM에서 발생한 변위(m)
- l_P : 최대힘FM의 힘이 1/2로 떨어졌을때 변위(m)
- E_M : 변위 1M에서의 최대 흡수에너지(J)
- E_P : 변위 1P에서 천공 흡수에너지(J)

도료별 최대, 천공 흡수에너지 시험 결과를 Fig. 3에 정리하여 나타내었다. 쇄빙선용 기준 도료 B 대비 A, C, E가 우수한 것으로 나타났다. 반면 도료 D는 상대적으로 낮은 에너지에서 시편이 파괴되었는데, 이는 불포화 폴리에스테르의 고유 특성인 유연성 부족의 원인으로 판단된다. 한편 내빙선용 도료의 경우 세가지 도료 모두 유리 박편(Glassflake)이 함유된 에폭시 도료이지만 유일하게 G 도료만 쇄빙선용 도료와 유사한 충격 저항성을 보였다.

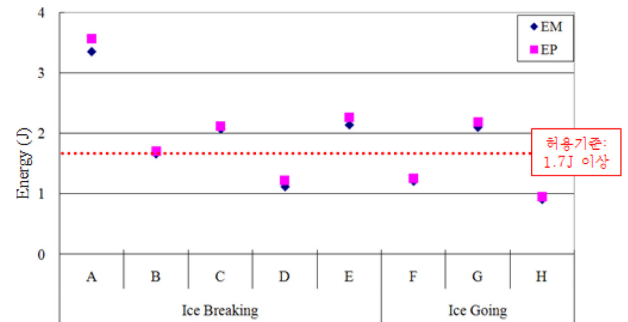


Fig. 3 도막별 최대 흡수에너지(EM) 및 천공 흡수에너지(Ep)

3.1.2 마모량 시험 결과

내마모성 시험 조건은 Table 3과 같으며, 시험 후 시편 모양은 중심에서 일정한 거리의 타원 형태이다. 이렇게 시험된 내마모성 결과를 정리하여 Fig. 4에 나타내었다. 현재 내마모성에 대한 절대적 기준이 정립되지 않아 극지 운항용 도료로 가장 많이 사용하고 있는 B를 허용 기준으로 선정하였다. 도료 D를 제외한 모든 도료들이 기준을 만족하였지만, D는 허용 기준의 50%를 초과하며 높은 손실율을 보였다. 이는 표면(Rz: 19.1μm)이 수십 마이크로미터 크기의 유리 박편 입자로인해 매우 거칠어 상대적으로 마모 저항성이 낮기 때문인 것으로 생각된다.

Table 3 마모 시험 조건

Items	Condition
Specimen Temp.	-5°C
Specimen Size	100mm×100mm
Coating Thickness	500±30 μm
Weight	1,000g
Speed	72 cycles/min
Abrasive Wheel	CS-17
Number of Rotation	1,000

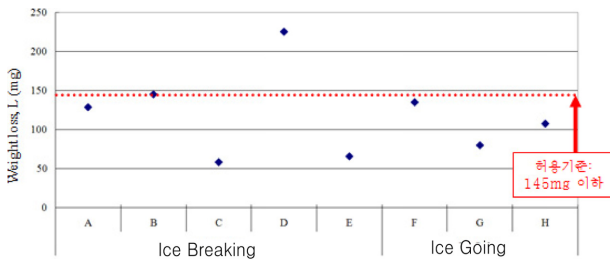


Fig. 4 저온마모량 시험 결과

3.1.3 마찰계수 시험 결과

얼음과 얼음, 얼음과 도막 사이의 마찰은 해빙과 선체의 상대 운동과 관련된 모든 동적 거동에서 중요한 영향인자 중 하나이다. 이는 식 2을 통해서 쇄빙 성능(hi)이 얼음-선체 계면 마찰 성능과 직접적인 관계가 있다는 점에서 알 수 있다. 해빙과 철판과의 운동 마찰계수 측정은 여러 연구자에 의해 수행되었는데, Table 4에 Enkvist, Finke, Grothues-Spork의 연구 결과를 정리하였다. 이 마찰계수는 얼음-도막의 마찰이 아닌 얼음-철판과의 마찰력으로 피마찰재는 다르지만 내빙대용 도료 적용으로 인한 마찰력 감소를 고려했을 때 최소 얼음-철판과의 마찰계수 보다는 낮은 값이 되어야한다. 따라서 본 연구에서는 3가지 측정결과에 대한 중간 값인 Finke의 운동 마찰계수 0.045를 기준으로 본 연구결과를 분석하였다.

$$h_i = \frac{0.07 \cos \frac{3}{2} \phi \sin \frac{1}{2} \left(\frac{\alpha_0 + \beta_0 + \beta_2}{3} \right)}{\sqrt[2.6]{f_d} \cdot \sqrt[5]{L/B} \cdot \sin \frac{3}{2} (90^\circ - \beta_{10})} \sqrt{P_e/B} \sqrt[6]{D} \quad (2)$$

여기에서,

- ϕ - stem angle, deg
- α_0 - entrance angle of design water line, deg
- β_0 - flare angle of frame line No.0 (in the Russian practice the frame line No.0 is assumed to be at the fore perpendicular), deg
- β_2 - flare angle of frame line No.2, deg
- β_{10} - flare angle amidships, deg
- L - vessel's length on DWL, m
- B - vessel's breadth on DWL, m
- P_e - total propeller thrust, t
- D - vessel's designed displacement, t
- f_d - coefficient of the dynamic ice/ship's hull friction.

Table 4 Sea ice - Steel의 운동 마찰계수

Investigator	Test material	Kinetic	Temperature
Enkvist	Brackish ice-smooth steel	0.025-0.045	-5°C
Finke	Sea ice-steel	0.045-0.065	-4.5°C
Grothues-Spork	Sea ice-steel	0.12-0.23	-7°C

Fig. 5에서 보는 바와같이 쇄빙선용 도료 중 도료 D를 제외한 네 가지 도료와 내빙선용 도료인 G 도료가 마찰계수 허용 기준을 만족하였다. 반면 유리 박편 함유 도료인 D 및 F는 Table면 조도가 17~19 μm (Rz 기준)로서 도료 A(4.1 μm), B(9.2 μm), C(2.17 μm)보다 높아 마찰력 상승의 주요 원인이 되었다. 비록 G 도료가 유리 박편 입자가 첨가되었지만 허용 기준을 만족하였는데, 이는 유리 박편을 함유하며 타 도료에 비해 살오름성이 우수하며, 입자의 크기가 수 마이크로로 작아 표면 조도가 10.8 μm 로 상대적으로 낮기 때문인것으로 판단된다. 따라서 마찰력은 표면 상태에 영향을 많이 받으므로 낮은 마찰력이 요구되는 도료 배합설계 시 이에 대한 고려가 필요하다. 또한 극지 운항용 도료별 마찰계수를 비교하면, 쇄빙선용 도료가 내빙선용 도료보다 마찰계수가 낮은 경향성을 보였으며, 동일한 제조사 제품 중 쇄빙선용 도료가 내빙선용 도료에 비해 더 낮았다.

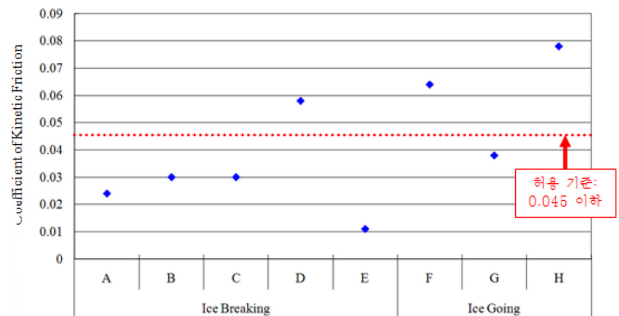


Fig. 5 운동 마찰계수 측정 결과

극지 운항용 도막 선정에 있어서 중요한 영향 인자이며 선주의 주된 관심 사항인 마찰계수의 정규 분포를 확인하기 위해 통계적 개념인 데이터의 정규성을 검증하였다. 여기서 유의 수준 (Significance Level)을 0.05로 정하면 데이터의 신뢰 수준은 95%이라는 의미이며 유의 수준과 p-value를 이용해 p-value 값이 유의 수준보다 작으면 데이터가 정규 분포(Normal Distribution)를 따르지 않는다고 결론 내리게 된다.

본 시험을 통해 입수된 마찰계수 값이 정규 분포를 따른다고 가정한 후 유의 수준 0.05로 고정시킨 다음 미니탭(MINITAB)을 이용해 분석하였다. Fig. 6의 p-value를 살펴보면 쇄빙선용 도료는 모두 0.15 이상의 값으로 신뢰 수준 95%에서 정규 분포를 따르는 것을 알 수 있었다. 따라서 시험 결과에 대한 신뢰도는 매우 높다고 할 수 있다.

다음으로 내빙선용 도료 마찰계수에 대한 정규성 검정을 실시하였다. Fig. 7을 보면 도료 F 및 G는 쇄빙선용 도료와 같이 p-value가 0.15 이상으로 정규 분포를 따른 반면, H는 p-value가 0.039로 유의 수준 0.05보다 낮아 정규 분포를 따르지 않았다. 따라서 도료 H의 측정된 마찰계수의 신뢰도는 다소 낮다고 할 수 있다.

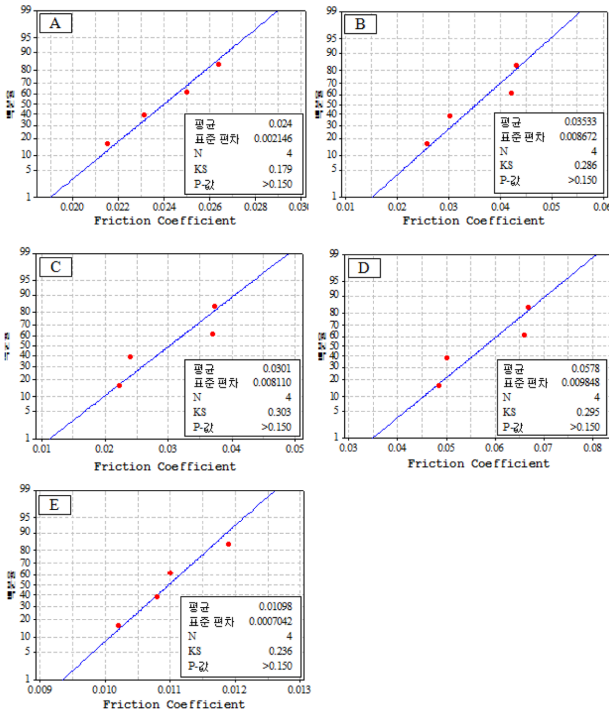


Fig. 6 쇠빙선용 도료의 마찰계수 정규 확률 플롯

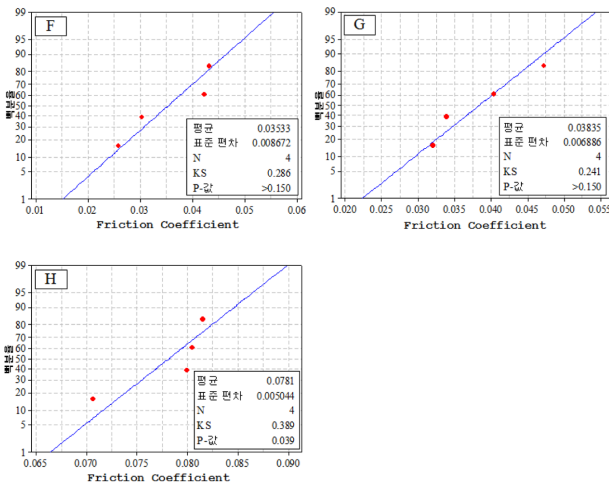


Fig. 7 내빙선용 도료의 마찰계수 정규 확률 플롯

3.1.4 충격 흡수에너지 시험 결과

충격 흡수에너지는 ISO20340에 따라 가속 노화 시험 후 -20°C 조건에서 낙하 추를 이용해 시험하였다. 충격에너지 계산은 ISO6603-1의 규격을 이용하는데, 식 3~5의 위치에너지를 보정해 계산한다. 3.2.5절의 대빙 충격 시나리오별 선체가 받는 충격에너지 결과를 이용해 충격 흡수에너지의 허용 기준(0.7 MJ/m²)을 선정하였다. 그 결과, Fig. 8처럼 쇠빙선용 도료 중 B의 충격에너지가 가장 높아 대빙 충격 저항성이 가장 우수하였으며, 앞서 기술한 천공 흡수에너지 시험에서 저조한 특성을 보인 D, F, H는 소지에 구속되어있을 때, 쇠빙선용 도막과 유사한 충격저항성을 보여주었다. 또한 도료 H의 충격저항성이 뚜렷하게

증가되었는데, 이는 프라이머 적용으로 인해 소지와외의 부착력이 높고, 상도를 지지하기 때문으로 사료된다.

$$E = mgH \tag{3}$$

- E: 충격 흡수에너지(J)
- m: 추 무게(kg)
- g: 중력 가속도(9.81 m/s²)
- H: 추 높이(m)

추 높이(H)는 식 3을 따라 H_a, N, A를 이용하여 계산한다.

$$H = H_a + \Delta H \left(\frac{A}{N} - 0.5 \right) \tag{4}$$

- H_a: 최소 높이(m)
- N: 균열 시편 수
- ΔH: 높이 증가량(m)

$$A = \sum_{i=1}^k n_i z_i \tag{5}$$

- n_i: 높이별균열 발생 시편의 수
- z_i: (H_i - H_a) / ΔH

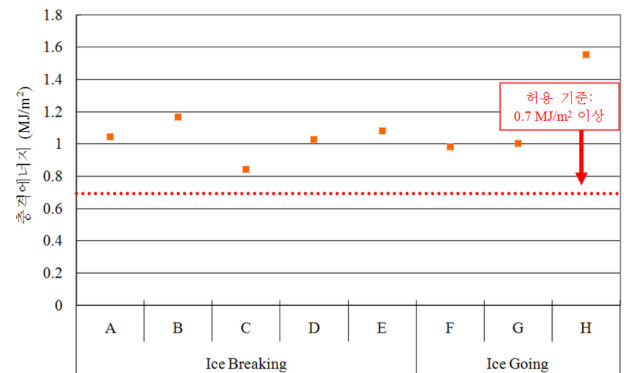


Fig. 8 충격 흡수에너지 시험 결과

3.2 빙 하중을 고려한 충격 에너지 계산 결과

3.2.1 빙 하중 및 극지 운항 환경 이해

빙 하중은 쇠빙 시 선체가 받는 힘으로서 이 구조가 손상을 입지 않는 한도 내에서 지탱해야할 파랑 하중이나 슬래밍(Slamming)에 의한 힘보다 월등히 크다. 따라서 대부분의 경우 빙해역에서는 파랑 하중의 크기는 별로 고려하지 않고 빙 하중만을 주요 설계 변수로 취급하고 있다.

빙 하중 조건에는 충격 쇠빙과 연속 쇠빙으로 구분된다. 쇠빙선이 바람과 해류 등에 의해 겹쳐 쌓인 두꺼운 빙산을 만나면 후

진, 전속력 충돌, 후진을 반복하는 충격 쇄빙이 행해지고, 선박의 추력이 수평 방향의 방저항 성분 보다 충분히 큰 경우 균일한 두께의 평탄빙(Level Ice)에서 연속 쇄빙이 일어난다.

일반적으로 충격 쇄빙 조건에서 빙 하중은 최대가 된다. 선체가 받는 빙 하중은 충격 쇄빙에 의해 선수부가 가장 큰 하중을 받게 되며 시간이 지나면 선체가 얼음 위에 올라 좌초된 상태에서 선체 중앙부가 가장 큰 하중을 받게 된다. 이때 선체 외판은 빙판 사이에 끼여 압축을 받게 된다. 이러한 충격 쇄빙은 북극해의 영구 극빙이 유입되는 비렌츠 해에 존재하는 얼음에 의한 것으로 특히 겨울철과 봄철인 1월에서 5월 사이 극빙에 기원을 둔 다년생 빙이 58% 를 점유하고 있다.

한편 카라 해, 오호츠크 해 및 발틱 해 등 항로로 이용되는 대부분 해역의 빙상 상태는 1m 내외의 평탄 빙이며 동절기에도 일부 해역을 제외하고는 1m 이하의 빙 두께를 가진다. 특히 발틱해는 스칸디나비아반도와 핀란드 그리고 발트 3국과 폴란드, 독일, 덴마크 등의 여러 나라로 둘러싸인 폐쇄해역으로서 얼음의 형성은 계절적 그리고 지역적으로 얼음의 분포와 두께에 많은 차이가 있는데, 잦은 바람의 영향으로 1년생 빙맥(Ice Ridge)의 형성이 두드러지며 빙맥의 sail 높이는 0.5 내지 1.5m 정도이고 보통 1km 당 1~5개 정도가 발견된다. 이러한 크고 작은 유빙에 의해 운항 시 연속 쇄빙의 한 종류인 빗면(Glancing) 충격이 발생되기도 한다. 충격 쇄빙 조건은 빈번하게 일어나는 현상은 아니며, 평탄빙에서의 연속 쇄빙 또는 빙맥에 의한 빗면 충격이 일반적으로 발생하는 현상이므로 이를 고려해 선형 설계 및 구조 강도를 계산한다.

3.2.2 충격 쇄빙(Ramming)

충격 쇄빙 과정에서 선체가 받는 빙 하중의 거동을 Fig. 9에 나타내었다. 처음 선수부가 얼음과 부딪히는 순간(Fig. 9①), 충격에 의한 빙 하중의 세기는 급격하게 상승하며 선수부가 얼음 위로 미끄러져 올라가기 시작하는 순간까지 지속된다. 주로 선수부에 빙 하중이 발생하는 이 단계는 지속시간이 0.5초에서 1초 이내의 짧은 시간에 발생하는 동적(Dynamic) 프로세스라고 할 수 있다. 그 사이에 선박의 전진 속도는 감소하며, 선수부가 얼음 위로 밀려 올라감에 따라 대신 수직 속도 성분이 최대에 이른다(Fig. 9②).

선수부가 얼음위로 올라가면서(Beaching) 빙 하중은 상대적으로 약간 감소한다. 이때 선박의 속도도 점차 감소하다가 아이스 나이프(Ice Knife)에 얼음이 걸리면서 정지 상태에 이르고 선체는 또 다른 최대 빙 하중에 도달하게 된다(Fig. 9③). 얼음과 선체

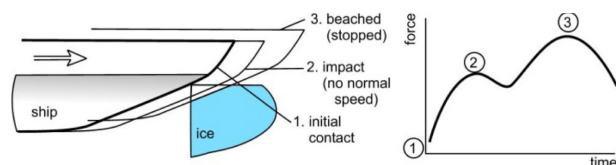


Fig. 9 충격쇄빙에 따른 빙 하중

와의 접촉 면적도 점차 증가하여 최대치에 도달한다. 이때 얼음의 파괴는 압축 모드에 의한 것이다. 이 단계에서는 지속 시간이 2~3초 이상으로 비교적 길어서 정적(Static) 혹은 준정적(Quasi-static)인 상태라 할 수 있다.

3.2.3 연속 쇄빙(Continuous Icebreaking)

평탄빙에서의 연속 쇄빙은 빙해역 항해 시 가장 흔하게 겪게 되는 운항 방식이다. Fig. 10에서 보는 것처럼 빙 하중의 크기는 초기 충격 단계에서 맞게 되는 빙 하중 수준에 버금가지만, 지속 시간이 충격쇄빙의 동적 프로세서와 유사한 1초 이내의 짧은 시간에 빙 파괴(Fig. 10②)가 일어난다. 이는 굽힘 모드에 의한 것으로 빙판을 압축에 의한 파괴보다는 선체의 중량을 이용한 굽힘을 통해 얼음을 쉽게 파괴함으로써 효율적인 쇄빙 성능을 발휘하도록 하는 것이다.

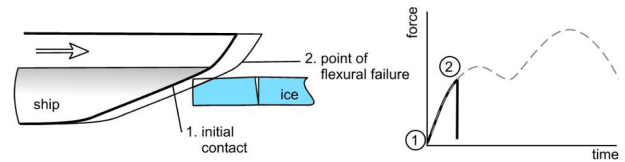


Fig. 10 연속 쇄빙에 따른 빙 하중

3.2.4 시나리오별 쇄빙 모드

시나리오별 충격 거동 분석은 캐나다 Memorial 대학의 Claude Daley 교수에 의해 제작된 'Direct Design for Polar Ships-Loads v1.4' 엑셀 스프레드 시트를 이용하였다. 이 엑셀 시트는 이론 및 경험식을 토대로 만들어진 것으로 빙 마찰은 무시하고, 선형을 단순화시켜 계산하였다.

먼저시나리오별 충격에너지를 구하기 위해 기본 변수를 Table 5에서 보는 바와 같이 설정하였다. 선종은 LNG 운반선이며 선체 길이는 271m, 중량은 약 10만 톤, 선속은 캐나다 선급 규정에서 정한 평탄빙에서의 연속 쇄빙 가능한 속도인 3 knots를 기준으로 정하였다.

Table 5 시나리오에 따른 충격에너지 계산의 기본 변수

Items	Unit	Value
Name	-	150K LNG carrier
Length	m	271
Beam	m	44.2
Draft	m	11.35
Height	m	26
Block coef.	-	0.768
Water plane coeff.	-	0.7469
Midshipcoeff.	-	0.935
Mass	ton	107,022
Ship speed	kn	3

Table 6 빗면 충격 시나리오에 의한 충격에너지 평가 결과

		Case 1 (spherical)	Case 2 (round edge)	Case 3 (pyramidal edge)	Case 4 (round ice edge)
Scenario					
Para-meters	Ice strength term	3 MPa	1.3 MPa	1.3 MPa	3 MPa
	Edge radius	7 m	20 m		
	Ice thickness	-	6 m		
	Ice flex. strength	-	0.8 MPa		
Results	Crushing penetration	0.3 m	0.68 m	0.41 m	0.21 m
	Normal force	30.6 MN	27.97 MN	35.2 MN	24.69 MN
	Area	13.21 m ²	30.3 m ²	6.7 m ²	8.23 m ²
	Impact energy	0.69 MJ/m ²	0.63 MJ/m ²	0.54 MJ/m ²	0.64 MJ/m ²

3.2.5 빗면 충격 시나리오별 충격 에너지 계산

Table 6은 극지 운항 중 발생할 수 있는 4가지 충격 모드에 대해 충격 형상, 빙 조건에 따른 빙 침투 깊이, 충격력, 빙 접촉면적, 그리고 충격에너지에 대해 계산한 결과이다. Case 1~3은 선수부 빗면 충격 모드로 접촉면 형태에 따라 분류된 것이며, Case 4는 선체 측면의 굽힘 충격 모드에 따라 계산된 값이다.

빙 파괴 압력 은 1.3, 3 MPa로 선정하였으며, 빙 굽힘 강도 (Ice flexural Strength)는 겨울철 초년생 빙이 0.7~0.8 MPa의 강도를 지니므로 0.8 MPa을 이용하였다. 또한 결과 항목 중 제시된 빙 접촉 면적은 투영된 면적(Projected Area)으로서 실제 빙 충격에서 발생하는 3차원 형태를 2차원 형태로 단순화해서 충격 에너지 계산에 이용하였으며 선체가 얼음에 가한 에너지는 모두 선체가 흡수한다고 가정하였다.

Case 1에서 Case 4까지의 충격에너지는 각각 0.69, 0.63, 0.54, 0.64 MJ/m²으로서 0.5~0.7 MJ/m² 범위이며 이 수치는 빙 충격 시 선체가 받는 에너지이므로 추 낙하 시험에 의해 계산된 충격 흡수에너지와 비교하여 0.7 MJ/m²을 허용 기준으로 선정하였다. 하지만 선체 형상 및 내빙대의 늑골(frame) 간격 등 변수에 의해 흡수에너지는 다양하게 소멸되어 도막이 실제 받는 에너지는 0.7 MJ/m² 보다 훨씬 작을 것이라 예상된다.

4. 결론 및 현업 적용 방안

본 논문에서는 쇄빙선의 내빙대에 적용되는 고 내마모성 도료에 대한 도장 사양 설계 기준 확보를 목적으로 도막 성능 시험을 수행하고 다음과 같은 결론을 얻었다.

1) 쇄빙선용 도료에 대한 도막 성능 기준 즉, 천공 흡수에너지 (1.7 J 이상), 마모율(145 mg 이하), 마찰계수(0.045 이하), 충격 흡수에너지(0.7 MJ/m² 이상)에 대한 기준을 제시하였다.

2) 도료 A, C는 모두 에폭시 타입으로서 B도료와 대등한 도막 성능을 보여 쇄빙선용 내빙대에 적용 가능하며, 특히 E는 페놀릭 에폭시 타입으로 분자 가교 밀도가 높아 쇄빙선용 도료 중 도막 성능이 가장 우수하였다. 또한 내빙선용 도료인 G는 천공 흡수에

너지 2.18 J, 마모량 80 mg, 마찰 계수 0.038, 충격 흡수에너지 1.0 MJ/m²으로서 2액형 가열 도장이 어려운 경우 쇄빙선용 후보 도료로 추천이 가능하다.

3) 도료 D는 유일하게 에어리스(Airless) 도장이 가능한 쇄빙선용 도료이지만, 2액형 도료에 비해 천공 흡수에너지, 마모량, 마찰계수 등의 항목에서 열세한 성능을 보였다. 이는 폴리에스테르 (Polyester) 타입으로서 건조시간이 빠르며, 소지와와의 부착성이 우수한 특징이 있지만, 저온에서 충격이 약하며, 수 십 마이크론의 유리 박편 함유 입자로 인해 Table면 조도(Rz: 19.1μm)가 높기 때문으로 판단된다.

본 연구는 극지 운항용 선박 또는 극지 해상 플랜트의 도장 설계 시 도료 선정 기준으로 적용할 수 있을 것으로 기대되며, 향후 당사 특수 도장 시공 기술 향상과 더불어 도장시스템의 내구성 및 신뢰성 향상에 기여할 수 있을 것으로 사료된다.

참고 문헌

LiisaLaiho, PiiNordström, BriitaJourio, Sebastian Sala, 2006, "Legal and administrative issues of arctic transportation", Ministry of trade and industry, Finland.
 한국기계연구원, 1994, "극지용 해양구조물의 구조설계기술 개발(I)".
 한국산업기술평가원, 2006, "산업기술동향분석-빙해 선박".
 G.W. Timco, M. E. Johnson, 2002, "Sea ice strength during the melt season", Proceedings of the 16th IAHR international symposium on ice Dunedin, New Zealand.



백 윤 호



박 충 서



소 용 신