내빙선박용 풍우밀 문의 결빙방지 기법 연구

정성엽^{1,†} · 천은지¹ · 조성락¹ · 이춘주¹
한국해양연구원 대덕분원¹

A Study on Anti-Icing Technique for Weather-Tight Door of Ice-Strengthened Vessels

Seong-Yeob Jeong^{1,†} · Eun-Ji Chun¹ · Seong-Rak Cho¹ · Chun-Ju Lee¹
Korea Ocean Research & Development Institute Daedeok Branch¹

Abstract

Icing problem of ice-strengthened vessels is an important issue when operating in low temperature environment and it can cause damage to deck machineries and emergency equipments. Many ice-strengthened vessels have since been constructed and operated in accordance with the ice class rules such as Det Norske Veritas (DNV), Russian Maritime Register of Shipping (RS), American Bureau of Shipping (ABS) and so on. Therefore winterization is defined as the preparation of a ship for safe operation. In this research, anti-icing performance tests of weather-tight door have been carried out at various temperature conditions (5°C, -10°C, -20°C, -30°C, -40°C) in the low temperature cold room facility and then, ambient temperature, specimen temperature, electric current and temperature of heating cable were measured during the test operations. This research describes the construction guidelines of weather-tight door based on anti-icing test results to apply to the full-scale vessels.

Keywords : Icing problem(착빙문제), Ice-strengthened vessel(내빙선박), Anti-icing performance test(결빙방지 성능 시험), Weather-tight door(풍우밀 문), Construction guideline(시공기준안)

1. 서 론

극지해역을 운항하는 빙해선박의 경우 저온환경 속에서 안전 운항 및 작업이 가능하도록 결빙방지(anti-icing) 설계와 해빙(de-icing) 설계기술이 새롭게 적용되고 있다. 특히 극지해역을 운항하는 선박에 대해 미국선급(ABS), 노르웨이선급(DNV), 영국선급(Lloyd's Register), 러시아선급(RS) 등에서는 방한기술 부호(winterization notation)를 정의하고 있는데, 방한기술은 선박의 건조과정에서 다루어지는 문제로서 강제규정은 아니지만 선박의 안전운항 및 저온 환경에서 기자재 및 긴급·구난 장비 등의 성능과 밀접한 관련이 있는 사항이다(Jeong, et al., 2011). 빙해선박의 북극해 운항 시 대기온도 및 선박에 대한 상대풍속, 수온과 같은 여러 성분들의 상관관계에 따라 선박기자재 및 상부 구조물에서 착빙(icing) 현상이 발생하게 된다. 그러므로 극지환경에서 상부 구조물의 착빙에 따른 빙해선박의 안전성 확보 대책과 함께 빙해선박에 탑재되는 의장품들은 북극해의 저온상태에서 결빙이 발생하더라도 사용이 가능하도록 설계가 되어야 한다(Lloyd's Maritime Academy, 2009). 노르웨이선급은 기자재에 대한 방한기술을 크게 category I, II로 구분하는데, category I은 결빙방지 설계에 관련된 사항을 나타내고 category II는 해빙설계 기술에 관련된 사항을 나타낸다(DNV, 2005). 최근 스웨덴 Stena사로부터

수주된 극지용 시추선(Ice class drill ship)의 경우 갑판통로와 루버 등에 열선(heating cable)을 이용한 결빙방지 시공기술이 적용된 사례가 있으며, 난간, PV valve, Air vent head 등의 선박기자재에 대한 저온성능 평가 시험이 수행된 바 있다. 한편 본 연구자들은 내빙선박용 풍우밀(weather-tight) 문에 착빙현상을 발생시키고 결빙과정을 통해 저온상태에서 작동성능 평가에 관한 기초 연구를 수행한 바 있다(Jeong, et al., 2010). 본 연구에서는 내빙선박용 풍우밀 문에 대한 결빙방지 기법을 개발하기 위해 저온 콜드룸 시설을 활용하여 결빙방지 시공법에 따른 저온성능 평가(low temperature performance evaluation)를 수행하였다. 아울러, 다양한 온도조건에서 시공법에 대한 저온성능 검증을 통해 보다 효과적인 풍우밀 문의 결빙방지 시공기준안을 도출하였다.

2. 내빙선박용 풍우밀 문의 결빙방지 시공

빙해역을 운항하는 선박의 경우 기자재들은 저온 및 착빙, 적설, 결빙 등의 혹한환경 속에서 원활한 기계적·재료적 특성을 확보해야 한다. 긴급한 바와 같이, 선박기자재의 방한기술은 각 선급규정에서 정의하고 있는데, 주로 북극권에 인접한 국가들이

이와 관련된 결빙방지 시공기술에 대한 원천기술을 확보하고 있는 상황이다. 국내에서도 빙해선박에 탑재되는 기자재에 대한 결빙방지 기술 및 저온성능 평가에 관한 연구가 활발히 진행되고 있다. 최근 결빙방지를 위해 앵커 또는 체인의 경우 묘쇄공 주위에 증용기를 이용하고 구명보트 또는 안전장비 등에는 보온커버를 설치하고 있다. 또한 구명정 대빛 또는 출입구에는 열선코일을 적용시키고 갑판 저장고, 선수 추진기실 또는 비상 발전실 등에는 전기히터가 적용되고 있는 추세이다. 현재 가장 많이 사용되고 있는 결빙방지 기술은 열선을 이용한 시공법으로서 갑판에 노출되는 장비에 열선시공을 통해 저온상태에서 결빙이 발생하는 것을 방지하고 있다. 하지만 열선시공의 경우 선박의 발전기 용량과 밀접한 관련이 있으므로 과도한 열선시공 보다는 열선의 최적용량 산정 및 시공방법 개선을 통해 효율을 높이는 것이 필요하다. 국내 선박기자재 업체의 경우 일부 저온 챔버 시설을 이용해 특정 온도에서 기자재에 대한 저온성능 평가를 수행하고 있지만 국외 선주들은 전문 시험기관 또는 인증기관에서의 성능평가를 통해 보다 신뢰성 높은 결과를 요구하고 있기 때문에 이러한 수요를 만족시키기 위해서 국내 조선소 및 기자재 업체에서는 저온성능 평가 시험시설 확보에 주력하고 있다. 국내의 경우 내빙선박용 풍우밀 문에 대한 저온성능 시험 및 성능검증에 대한 연구 자료나 결과가 상당히 부족한 실정인데, 본 연구에서는 저온 콜드룸 내부에 내빙선박용 풍우밀 문을 설치한 다음 다양한 온도조건에서 결빙방지 기술을 평가하였다. 아래 Fig. 1은 저온 콜드룸 내부에 설치된 내빙선박용 풍우밀 문을 보여주고 있다.

Fig. 1 Photograph of installed weather-tight door in the low temperature cold room facility

Fig. 2는 대기온도가 -20°C 인 경우 물보라(sea spray)에 의해 풍우밀 문 주변에 착빙이 발생하는 현상을 저온 콜드룸에서 구현한 것이다. 실제 극지해역에서 선박의 운항 시 대기온도가 해수의 결빙온도(약 -2°C)보다 낮은 경우에 대기 중의 수분 또는 물보라에 의해 갑판장비와 상부구조물에 착빙이 발생하게 되는데, 아래와 같이 풍우밀 문 주변에 착빙현상이 발생할 경우 문의 개폐성능을 저하시켜 승조원의 안전에 영향을 미치게 된다(Charles, 2008). 그러므로 조선현장에서는 이를 방지하기 위해 결빙방지 시공기술이 도입되고 있는 실정이다.

Fig. 2 Icing occurrence of weather-tight door according to the sea spray in low temperature

내빙선박용 풍우밀 문의 결빙방지를 위해 본 연구에서는 아래와 같이 세 가지 시공법에 대한 저온성능 평가를 수행하였다.

1. 풍우밀 문 끝단 열선 시공
2. 풍우밀 문틀 열선 시공(실선 적용 사례)
3. 풍우밀 문 끝단 열선 시공(경우 1 개선)

우선 첫 번째 시공법(Case I)은 기존 풍우밀 문틀의 끝단에 열선을 부착한 형식이고, 두 번째(Case II)는 풍우밀 문틀에 사각형 바(bar)를 설치한 후 그 속에 열선을 시공한 형태이다. 그리고 마지막 시공법(Case III)은 풍우밀 문틀의 끝단에 원형 바를 설치한 후 그 속에 열선을 삽입한 형태이다. 저온성능 시험과정에서는 풍우밀 문의 온도를 측정하기 위해 Fig. 3과 같이 문틀 외부(Ch

14)와 이에 맞닿는 쪽(Ch 11)에 온도센서를 설치하였다. 그리고 시험과정에서 열선의 용량에 따른 온도의 분포 정도를 확인하기 위해 각 위치에 온도센서(Ch 12, Ch 13, Ch 15)를 설치하였고 시험과정 시 열선의 온도를 함께 측정하기 위해 열선에도 온도센서(Ch 16)를 부착하였다(Fig. 7 참조). 아래 Fig. 4, 5, 6은 풍우

밀 문에 대한 세 가지 열선시공 사례를 보여주고 있다. 현재 내빙 선박용 풍우밀 문의 결빙방지를 위해 두 번째 시공법이 사용되고 있지만, 본 연구에서 제안한 첫 번째 시공법과 이를 보완한 세 번째 시공법을 통해 실제현장에서 보다 효과적인 결빙방지 효과를 얻을 수 있을 것으로 판단된다.

Fig. 3 Sensor location(#11, #14) of weather-tight door

Fig. 4 Sensor location(#12, #13, #15) of weather-tight door for Case I

Fig. 5 Sensor location(#12, #13, #15) of weather-tight door for Case II

Fig. 6 Sensor location(#12, #13, #15) of weather-tight door for Case III

Fig. 7 Sensor location(#16) of weather-tight door for Case II and Case III

결빙방지 시공의 경우 사용된 열선은 Raychem 열선으로서 각

시공법에 대한 열선의 종류와 용량은 Table 1에 정리되어 있다.

본 시험에서 사용된 열선은 정온전선(self-regulating cable)으로서 주변온도에 따라 전선내부 탄소(carbon)입자의 결합상태가 변화면서 전류의 흐름이 조절되어 발열량이 조절되는 자기제어형 열선이다. 현재 Raychem 열선은 선박 또는 해양구조물 등에 사용할 수 있도록 노르웨이선급과 미국선급 등으로부터 승인을 받은 상태이다.

Table 1 Information of heating cable type and capacity

Case	Cable Type	Nominal Power Output (W/m at 10°C)	Max. Maintain Exposure Temp. (°C)
I	20XTV2-CT-T2	66	120
II	10XTV2-CT-T3	33	121
III	10XTV2-CT-T3	33	121

3. 저온성능 평가 시험

본 연구에서는 내빙선박용 풍우밀 문의 결빙방지 시공에 대한 저온성능 평가시험을 수행하였다. 저온성능 시험에서는 Case I, II, III 에 대해 5 온도 조건(5°C, -10°C, -20°C, -30°C, -40°C)에서 시험을 수행하였고 시험과정 동안 대기온도, 풍우밀 문에 설치된 센서의 온도, 열선의 온도(Fig. 3~7 참조), 전류량 등을 측정하였다. 저온성능 평가 시험과정에서는 콜드룸의 대기온도를 영상(+0°C)에서 영하(-°C)로 변화시켜가면서 시험을 수행하였다. 또한 시험과정에서 대기온도가 시험 온도조건에 도달하더라도 시편에서 계속된 온도가 수렴할 때까지 일정시간동안 대기온도를 유지시켰다. Fig. 8에는 풍우밀 문의 저온성능 평가시험 절차가 도시되어있다.

Fig. 8 Test procedure of anti-icing performance test

Fig 9는 Case I의 대기온도 변화에 따른 시편온도 특성을 도시한 그래프이다. 우선 Case I의 경우 -30°C까지는 풍우밀 문 주변의 온도분포가 10°C 이상을 유지하는 것을 확인할 수 있다. 특히 대기온도가 -40°C 인 경우 열선은 24°C 정도가 유지되었으며, 주변온도도 4°C 이상을 유지하였다. Fig. 10은 Case II에 대한 결과를 도시한 그래프이다. Case II의 경우 Case I과 달리 풍

우밀 문틀에 사각형 바를 설치한 후 열선시공을 수행한 것으로서 열선이 시공된 사각형 바는 -40°C 까지 대기온도를 변화시켜도 약 7°C 이상을 유지하였지만 문틀 주변의 온도는 거의 -30°C 부근에서 영하로 떨어지는 것을 확인할 수 있다. 특히 풍우밀 문의 주변의 온도가 영하로 떨어질 경우 대기 중 수분 성분에 의한 착빙(atmospheric icing)이 발생하게 되며, 이러한 과정에서 문의 개폐성능에 영향을 미치게 됨을 알 수 있다.

Fig. 9 Ambient and specimen temperature characteristics of Case I

Fig. 10 Ambient and specimen temperature characteristics of Case II

Fig. 11 Ambient and specimen temperature characteristics of Case III

Fig. 11은 Case III의 저온성능 시험결과를 도시한 그래프이다. Case III은 Case I과 유사한 위치에 열선을 시공했지만 문틀 끝단에 열선을 삽입하기 위한 원형 바를 설치한 경우이다. 또한 열선의 용량도 Case I보다 낮은 열선이 사용되었다. Case III에서 문틀의 주변온도는 -30°C 부근까지는 영상을 유지하지만 -40°C 에서는 영하로 떨어지는 것을 확인할 수 있다. 이는 열선의 용량이 Case I보다 낮기 때문인 것으로 판단되는데, 실제 조선현장에서 열선시공 시 Case I 방법보다는 Case III의 방법이 보다 효율적이므로 이에 대한 시공기준안 도출이 가능할 것으로 판단된다.

Table 2는 Case I에서 대기온도에 따른 시편의 온도분포와 열선의 온도를 정리한 결과이다. 특히 센서 #12는 열선의 온도를 나타내며, 센서 #14는 풍우밀 문 표면의 온도를 나타내고 #15는 풍우밀 문틀의 온도를 나타낸다. 또한 센서 #11, #13은 열선 주변의 온도를 나타내는데, 저온 조건에서도 상당히 만족스러운 결과를 보여준다.

Table 2 Ambient temperature, sensor temperature of weather-tight door for Case I

Amb. Temp. ($^{\circ}\text{C}$)	#11 ($^{\circ}\text{C}$)	#12 ($^{\circ}\text{C}$)	#13 ($^{\circ}\text{C}$)	#14 ($^{\circ}\text{C}$)	#15 ($^{\circ}\text{C}$)
5.0	39.7	53.8	37.6	18.8	30.7
-10.0	31.3	46.7	29.6	7.0	21.8
-20.0	22.4	38.4	20.3	-2.8	12.1
-30.0	13.4	30.4	11.2	-12.0	3.0
-40.0	5.4	24.0	4.0	-20.2	-4.5

Table 3 Ambient temperature, sensor temperature of weather-tight door for Case II

Amb. Temp. ($^{\circ}\text{C}$)	#11 ($^{\circ}\text{C}$)	#12 ($^{\circ}\text{C}$)	#13 ($^{\circ}\text{C}$)	#14 ($^{\circ}\text{C}$)	#15 ($^{\circ}\text{C}$)	#16 ($^{\circ}\text{C}$)
5.0	18.8	41.5	20.7	14.3	17.1	61.3
-10.0	12.8	32.8	14.0	3.4	9.9	51.5
-20.0	3.3	23.8	4.7	-6.3	0.5	43.1
-30.0	-5.1	16.1	-3.6	-14.8	-8.0	36.1
-40.0	-13.2	8.8	-11.9	-22.7	-16.5	30.0

Table 4 Ambient temperature, sensor temperature of weather-tight door for Case III

Amb. Temp. ($^{\circ}\text{C}$)	#11 ($^{\circ}\text{C}$)	#12 ($^{\circ}\text{C}$)	#13 ($^{\circ}\text{C}$)	#14 ($^{\circ}\text{C}$)	#15 ($^{\circ}\text{C}$)	#16 ($^{\circ}\text{C}$)
5.0	29.0	31.1	31.0	17.8	31.2	99.7
-10.0	25.0	27.5	27.2	10.6	27.7	97.0
-20.0	9.4	11.8	11.5	-6.0	12.3	89.4
-30.0	1.0	3.6	3.7	-13.7	4.4	85.2
-40.0	-6.7	-4.1	-4.0	-22.2	-3.3	81.7

Table 3의 경우(Case II) 센서 #12는 열선이 시공된 바의 표면 온도를 나타내고 센서 #14는 풍우밀 문 표면 온도, 센서 #15는 문틀의 온도를 나타내며, 센서 #16은 열선의 온도를 나타낸다. 그리고 센서 #11, #13은 열선이 시공된 바의 주변온도를 나타내는데, -20°C 조건에서는 시공기준을 만족하지만 그 이하의 온도 조건에서는 기준을 만족시키지 못하는 것을 알 수 있다.

Table 4는 Case III에 대한 시험결과를 정리한 것으로서 Case I의 결과보다는 저온성능이 다소 낮은 편이지만 실제 시공측면에서는 Case I보다 적합한 시공방법으로서 실선 적용 시 본 방법을 통해 열선을 시공하면서 열선용량은 20XTV2-CT-T2타입을 적용하면 -40°C 의 조건에서도 시공기준을 충분히 만족할 것으로 판단된다.

아래 Table 5, 6, 7에는 각 시공방법에 대한 온도별 전류와 전력량이 정리되어 있다. 언급한 바와 같이 시험과정에서 계측된 전류와 전력량은 선박의 발전기 용량의 선정과 관련이 있는데, 본 시험결과는 결빙방지 시공 시 열선의 길이 산정 및 용량 추정을 위한 기반 자료로 활용할 수 있을 것으로 판단된다.

Table 5 Electric current and power of weather-tight door for Case I

Case I	Ambient Temperature ($^{\circ}\text{C}$)				
	5	-10	-20	-30	-40
Electric Current (A)	1.91	2.03	2.09	2.17	2.26
Electric Power (W)	420.2	446.6	459.8	477.4	497.2

Table 6 Electric current and power of weather-tight door for Case II

Case II	Ambient Temperature ($^{\circ}\text{C}$)				
	5	-10	-20	-30	-40
Electric Current (A)	1.39	1.46	1.51	1.57	1.62
Electric Power (W)	305.8	321.2	332.2	345.5	356.4

Table 7 Electric current and power of weather-tight door for Case III

Case III	Ambient Temperature ($^{\circ}\text{C}$)				
	5	-10	-20	-30	-40
Electric Current (A)	1.16	1.22	1.27	1.32	1.36
Electric Power (W)	255.2	268.4	279.4	290.4	299.2

4. 결 론

본 연구에서는 저온 콜드룸을 이용해 내빙선박용 풍우밀 문의 결빙방지 시공에 따른 저온성능 평가를 수행하였다. 특히 세 가지 시공법에 대한 성능 검증을 통해 보다 효과적인 시공법을 도출하고자 하였으며, 그 결과를 정리하면 다음과 같다.

Case I의 경우 열선용량은 66W/m로서 풍우밀 문을 주변에 열선시공을 통해 -40°C 에서도 $4\sim 5^{\circ}\text{C}$ 정도를 유지하므로 극지해역 운항 시 저온환경에 장시간 노출되더라도 결빙이 발생하지 않을 것으로 판단된다.

Case II는 실선에 적용된 시공사례로서 -20°C 조건에서는 주변이 대략 $3\sim 5^{\circ}\text{C}$ 정도를 유지하였지만 -30°C 이하 조건에서는 영하($-^{\circ}\text{C}$)로 떨어지는 것을 확인 할 수 있는데, 이는 적용된 열선 용량과 시공법이 그만큼 효율적이지 않다는 것을 의미한다.

Case III은 Case I의 열선시공 방법을 개선한 경우로 -30°C 에서 $1\sim 4^{\circ}\text{C}$ 정도를 유지하지만 -40°C 조건에서는 영하로 떨어지는 것을 알 수 있는데, 열선용량을 66W/m로 교체하면 시공기준을 만족할 수 있을 것으로 판단된다.

아울러, 본 연구를 통해 도출된 내빙선박용 풍우밀 문의 결빙 방지를 위한 시공기준안은 다음과 같다.

1. 풍우밀 문 설계 시 문틀의 끝단에 열선을 삽입을 위한 공간을 고려하며(Case III), 대상선박의 설계온도가 -20°C 인 경우에는 33W/m의 정온전선을 적용시킨다.

2. 대상선박의 설계온도가 -30°C 인 경우에는 33W/m 또는 66W/m를 적용시킬 수 있으며, 33W/m의 열선적용 시 갑판 승조원은 주기적으로 풍우밀 문 주변에 착빙이 발생할 경우 이를 제거해 주어야 한다.

3. 대상선박의 설계온도가 -40°C 인 경우 66W/m의 정온전선을 적용시킨다.

본 연구에서는 풍우밀 문의 저온성능 평가를 통한 성능 검증을 통해 기존 연구 자료나 시험 결과가 부족한 현실에서 상당히 구체적인 연구 결과를 확보할 수 있는 계기를 마련하였다. 다만, 내빙선박에 적용되는 풍우밀 문에 대한 일부 성능만을 검증하였으므로 보다 다양한 대상선에 적용되는 풍우밀 문에 대한 저온성능 평가 시험과 열전달 해석을 통한 비교·검증이 필요할 것으로 판단된다. 향후 연구에서는 다양한 기저재에 대한 저온성능 평가 시험 및 열전달 해석을 통해 좀 더 일반화된 설계·시공기준안 도출을 위한 연구가 수행되어야 할 것으로 판단된다.

후 기

본 논문은 지식경제부 산업원천기술개발사업인 "빙해선박의 극지항로 안전운항기술 및 극저온 빙성능 시험평가 기법 개발" 중 "극지용 저온 설계 및 Winterization 평가 기술 (PNS168C)" 과 한국해양연구원 대덕분원 일반과제인 "수조 및 대형터널의 새로운 시험기법 개발" (PES141A) 과제의 연구비 지원으로 수행된 결과임.

참 고 문 헌

- Charles, C. R., 2008. *Assessment of Superstructure Ice Protection as Applied to Offshore Oil Operations Safety*. CRREL Report No ERDC/CRREL TR-08-14.
- Det Norske Veritas (DNV), 2005. *DNV Rules for Classification of Ships*. DNV.
- Jeong, S.Y. Lee, C.J. & Cho, S.R., 2011. A Study on Anti-Icing Technique for Ballast Water of Icebreaking Vessels Operating in Ice-Covered Water. *Journal of the Society of Naval Architects of Korea*, 48(1), pp.93-97.
- Jeong, S.Y. Lee, C.J. & Cho, S.R., 2010. Cryogenic Performance Evaluation of Weather-tight door for Ice-strengthened Vessels. *2010 The Society of Naval Architects of Korea*, Jeju-island, Republic of Korea, 3-4 June 2010.
- Lloyd's Maritime Academy, 2009. *Shipboard Winterization the technical challenge for operations in ice and cold climates*. Lloyd's Maritime Academy Presents.

정 성 업

천 은 지

조 성 락

이 춘 주