Heat Transfer Characteristics of Bulkhead Penetration Piece for A60 Class Compartment II: Fire Resistance Test for Piece Material and Insulation Types

Woo-Chang Park^{ID*} and Chang Yong Song^{ID*}

^{*}Dept. of Naval Architecture and Ocean Engineering, Mokpo National University, Jeonnam, Korea

A60급 구획 적용 격벽 관통용 관의 열전달 특성 II: 관 재질 및 단열재 종류에 따른 방화시험

박우창^{ID*} · 송창용^{ID*}

^{*}목포대학교 조선해양공학과

KEY WORDS: Ship and offshore plant fire accident 선박 및 해양플랜트 화재 사고, A60 class compartment A60급 구획, Bulkhead penetration piece 격벽 관통 관, Fire resistance test 방화 시험, Piece and insulation materials 관 및 단열재 재질

ABSTRACT: In the case of a fire accident on a ship or an offshore plant, the design of the bulkhead penetration piece must be verified via a fire test procedure (FTP), as specified by the Maritime Safety Committee (MSC). The purpose of this study is to verify both the numerical analysis results and the design specifications for penetration pieces that could be applied to the A60 class bulkhead division. In this study, the FTP was carried out in accordance with the test procedure prescribed in the MSC regulation. In order to review the fire resistance performance according to the material type, bulkhead penetration pieces for the FTP were made from brass, carbon steel for machine structures (S45C), and austenite stainless steel (SUS316). In addition, spray-type insulation and mechanical fastener-type insulation were applied to investigate the fire resistance performance according to the type of insulation. To verify the heat transfer numerical analysis results for the A60 class bulkhead penetrating piece from this test study, the design specifications of the penetrating piece material and the insulation type applicable to a ship and an offshore plant were identified.

1. 서 론

선박 및 해양플랜트 운용 시에 다양한 형태의 제어, 모니터링 및 통신용 케이블 등이 필요하게 되며, 이러한 케이블은 선내·외에 걸쳐 전 영역에 포설된다. 선박 및 해양플랜트 구조 특성상 여러 격벽(Bulkhead)이 배치되게 되는데, 이러한 케이블이 안전하게 설치 및 유지보수 되기 위해서 격벽 관통 관(Bulkhead penetration piece, BPP)의 설치가 요구된다. 특히 선박 및 해양플랜트에 화재가 발생하는 경우에 대비하여 해사안전위원회(Maritime Safety Committee, MSC)에서 규정한 화재시험절차(Fire test procedure, FTP)에 따라 적합한 BPP 설계의 방화성능을 실증해야 한다(MSC, 2010). BPP의 방화시험에서 MSC에 규정된 전용 시편(Structure steel core, SSC)의 설계 및 제작, 시험 대상 BPP와 SSC와의 조립, 단열재(Insulation)의 선정, SSC의 화

염로(Furnace) 장착, 화염시험 및 분석 등의 일련의 과정들이 수행되며 높은 수준의 시험 노하우(Know-how)와 많은 시간과 비용 등이 요구된다.

선박 및 해양플랜트 분야에서 방화시험과 관련된 연구들이 수행되어 오고 있다. Yu et al.(2000)은 내화용 오일탱크의 재질 자체에 대한 내화성을 평가하기 위한 전기로 시험과 실제 유충이 점화된 상황을 모사하는 수조시험 방법을 제시하였다. Grigonis et al.(2011)은 팽창성 화재 방지 코팅의 두께와 열에 노출된 시간 사이의 관계를 조사하기 위해 14가지 이상의 상이한 화재 방지 코팅 샘플에 대한 방화시험을 수행하였다. Choi et al.(2013)은 방화 덤퍼의 H-120급 방열성능 확보를 위하여 방화 덤퍼 블레이드의 방열 유무와 코팅 부위에 적용된 방열재의 두께를 변화시켜 120분 탄화수소 화재 조건의 내화 실험을 실시하였다. Choi et al.(2014)은 FRP 선박을 건조하는 19곳의 조선소를

Received 12 March 2019, revised 4 August 2019, accepted 12 August 2019

Corresponding author Chang Yong Song: +82-61-450-2732, cysong@mokpo.ac.kr, ORCID: <http://orcid.org/0000-0002-1098-4205>

© 2019, The Korean Society of Ocean Engineers

This is an open access article distributed under the terms of the creative commons attribution non-commercial license (<http://creativecommons.org/licenses/by-nc/3.0>) which permits unrestricted non-commercial use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.

대상으로 선박 기관실의 난연성 향상을 위해 적용되는 재료의 종류를 조사하였고, 이들 재료를 이용하여 적층 또는 도포 형태의 14종의 시험체를 제작하여 국제해사기구에서 규정한 화염전파시험 및 소방방재청에서 고시한 방염성능시험을 실시하고 그 결과를 비교하였다. Jang et al.(2014)은 해양플랜트용 H-120급 방화덤퍼의 열응력해석을 수행한 후 덤퍼 블레이드 및 코밍 방열에 대한 최적 조건을 도출하기 위해 코밍 노출면 방열 두께와 비노출면 방열 길이를 변수로 하여 내화실험을 통한 비노출면 방열재와 코밍 표면 온도를 측정하였다.

본 논문은 저자들이 수행한 기존 연구논문(Park et al., 2018)의 후속 연구로서 앞서 저자들이 수행하였던 A60급 구역에 적용될 수 있는 BPP의 설계와 과도 열전달 수치해석의 결과를 검증하기 위해 MSC에서 규정하고 있는 A60급 방화성능 검증에 대한 화재시험절차와 동일하게 시험의 제작, 온도조건 및 가열 시간 설정, 온도측정 및 분석방법을 준수하여 방화시험 연구를 수행하였다. 방화시험에 적용된 BPP는 앞서 저자들의 수치해석 연구에서 가장 경제성이 우수한 것으로 검토된 200mm 길이의 BPP를 대상으로 하였다. 수치해석 결과의 타당성을 검증하기 위해 BPP는 수치해석 연구와 동일하게 황동(Brass), 기계구조용 탄소강(S45C), 오스테나이트계 스테인레스 강(SUS316)의 재질로 각각 제작하여 방화시험을 수행하였다. 또한 단열재의 종류

에 따른 방화성능을 검토하기 위해 분무식 단열재(Spray type insulation)와 부착식 단열재(Mechanical fastener type insulation)를 각각 적용하여 방화시험을 수행하였다. 본 시험연구를 통해 A60급 BPP의 열전달 수치해석의 검증과 더불어 실질적으로 선박 및 해양플랜트에 적용 가능한 BPP와 단열재의 설계 사양을 검토하였다.

2. A60급 구역의 화재시험절차(FTP) 규정 (MSC, 2010)

MSC에서는 선박 및 해양플랜트 기자재의 방화성능을 일정한 규정에 따라 검증될 수 있도록 Resolution MSC.307(88) 상에 시편제작부터 시험방법에 이르기까지 상세한 내용을 명문화하고 있다. 선박 및 해양플랜트에 설치되는 구조나 의장품이 A60급 구역에 대한 방화성능을 만족하기 위해서는 60분 동안 규정된 화염온도 가열 상태에서 화염이 가해지는 면의 반대쪽에서 측정된 온도가 180°C 이하가 되어야 한다. 또한 시험과정 동안 화염이 가해지는 면의 반대쪽 시험편과 단열재에서 발화가 발생하지 않아야 하고, 시험편의 과도한 구조적 손상이 발생되지 않아야 한다. 격벽을 관통하는 관의 방화성능 검증시험용 시험편은 실제 선박 및 해양플랜트의 설치 조건과 동일하게 평가될 수 있도록

Fig. 1 Position of unexposed-face thermocouples for “A” class division (MSC, 2010)

단열재는 화염이 가해지는 면의 반대쪽 면에 도포되고 화염로에 수직으로 장착되어야 한다. A60급 격벽 구역에 대한 화재시험용 시편인 SSC는 강제로 된 용접 구조물로 제작되어야 하며 가로 2,440mm, 세로 2,500mm, 두께 4.5 ± 0.5 mm의 평판에 600mm 간격으로 $(65 \pm 5) \times (65 \pm 5) \times (6 \pm 1)$ mm의 보강재가 배치되도록 설계되어야 한다. SSC는 열팽창에 대한 저항성이 보장될 수 있도록 $1,600 \sim 2,400 \text{ kg/mm}^3$ 의 밀도를 갖는 두께 50mm 이상의 콘크리트 혹은 석조(Masonry) 형태의 화염로에 볼트로 체결되어야 한다. 온도측정센서(Thermocouple)는 Fig. 1에 나타난 바와 같이 단열재가 화염이 가해지는 면의 반대쪽 면에 도포되는 격벽용 SSC의(B 측정위치) 경우 평균 및 최고 온도의 측정 목적과 단열재의 도포 방법에 따라 규정대로 부착되어야 하며, 시험시간 동안 1분 간격으로 온도가 측정되어야 한다. 본 연구에서는 동일한 사양의 온도측정센서를 MSC FTP code에서 규정하는 온도 측정 위치에 부착하여 SSC의 방화시험 조건을 구성하였다.

시험을 위한 대기온도는 $10 \sim 35^\circ\text{C}$ 이며 화염로의 내부 평균 온도(T)는 다음의 조건식에 따라 제어되어야 한다.

$$T = 345 \log_{10}(8t + 1) + 20 \quad (1)$$

여기서 t 는 분 단위의 시험 시간을 나타낸다. 식 (1)을 이용하여 화염 시간에 대한 온도 곡선을 도출할 수 있다. 또한 안정적인 화염온도 조건을 유지하기 위해 격벽 SSC의 경우, 바닥 높이보

다 500mm 높은 곳에서 압력 값이 0이 되도록 화염로를 제어해야 한다.

3. A60급 BPP의 방화시험

3.1 방화시험 방법

본 연구에서는 수치해석 연구와 동일하게 A60급 BPP의 재질을 Brass, S45C, SUS316로 각각 적용하고, 단열재의 종류에 따른 방화성능을 검토하기 위해 분무식 및 부착식 단열재로 각각 적용한 SSC를 설계 및 제작하였다. 제작이 완료된 SSC를 KOLAS 공인시험기관에서 화염로에 수직으로 설치 및 A60급 BPP의 방화성능 시험을 수행하고 MSC FTP code의 온도 규정 만족여부를 검토하였으며, 기존 저자들이 수행한 연구논문(Park et al., 2018)의 과도열전달수치해석 온도분포 결과와 비교 검토하였다. 본 논문에서 수행된 일련의 A60급 BPP의 방화성능 시험 과정은 Fig. 2에 정리하여 도시하였다.

A60급 BPP의 방화성능 평가용 설비인 수직화염로는 Fig. 3에 도시한 바와 같이 선박 및 해양플랜트용 A급 수직 방화 구획 구성재 등을 시험하는 장비로써 $3,000 \text{ mm} \times 3,000 \text{ mm}$ 이상의 유효 가열면적이 적용되며, 측면에 배치된 버너를 통해 식 (1)의 시험 온도 곡선으로 화염로 내부 온도를 제어하여 방화 성능을 시험하게 된다(ISO, 1999).

본 연구에서 수행한 A60 BPP의 방화성능시험 시 수직화염로

Fig. 2 Fire test flow of bulkhead penetration piece for A60 class compartment

Fig. 3 Vertical furnace(left) and fire test condition(right) (Park et al., 2018)

Fig. 4 Verification of time-temperature curve for furnace

내부의 실제 온도 측정결과(actual)와 ISO에서 규정하는 식 (1)의 시험 온도 곡선(standard)과의 비교 결과는 Fig. 4에 나타내었다.

Fig. 4에 나타난 바와 같이 수직화염로 내부의 실제 온도와 ISO 규정 시험 온도 곡선 간의 차이는 거의 발생하지 않았으며, 방화시험 시 MSC. 307(88)에서 규정하는 화염로 내부 시험 온도 규정을 만족하였음을 확인 할 수 있다.

3.2 BPP의 재질에 대한 방화시험 결과

BPP의 재질별 시편은 과도 열전달 수치해석의 결과(Park et al., 2018)를 방화시험을 통해 검증하기 위해 동일한 설계사양으로 제작 하였다. 열전달 수치해석 연구와 동일하게 가장 경제성이 우수한 것으로 검토된 길이 200mm의 BPP를 대상으로 하여 직경 $\phi 8$ 의 튜브 및 직경 $\phi 18$ 의 소켓, 직경 $\phi 12$ 튜브 및 직경 $\phi 25$ 의 소켓의 조립체로 구성된 BPP를 사용 용도에 따라 튜브가 소켓 내부에서 단절된 절단형(Cutting type)과 튜브가 소켓 내부를 연속적으로 통과하는 관통형(Passing type)의 설계사양을 고

려하고, Brass, S45C, SUS316의 3가지 재질을 반영하여 총 10개의 BPP를 제작하였다. 강재로 구성된 SSC에 제작된 BPP를 조립한 후 분무식 단열재를 적용하여 방화시험용 SCC 조립체를 제작하였다. 분무식 단열재로 구성된 방화시험용 SCC 조립체와 BPP의 설계사양 조합은 Fig. 5와 Table 1에 나타내었다. Table 1에 나타나 있는 BPP의 직경 및 재질에 대한 사양 조합은 실제 조선소에서 적용 가능한 설계 사양의 조사를 통해 고려되었다. 1~5번의 BPP는 $\phi 8$ 튜브와 $\phi 18$ 소켓의 조립체로 구성하였고, 6~10번의 BPP는 $\phi 12$ 튜브와 $\phi 25$ 소켓의 조립체로 구성하였다.

튜브 재질이 황동인 경우 용접성 등의 이유로 소켓 재질을 S45C로 설정하였으며, 이외의 BPP는 튜브와 소켓의 재질을 동일하게 설정하였다. 또한 1~3번, 6~8번 BPP는 절단형으로 고려하였으며 4~5번 및 9~10번 BPP는 관통형으로 고려하였다.

Fig. 5와 Table 1에 나타나 있는 사양으로 실제 제작된 분무식 단열재 적용 방화시험용 SCC 조립체의 형상과 A60 방화시험 수행을 위해 수직화염로에 장착된 상태는 Fig. 6에 도시하였다.

Fig. 5 Fire test specimen design for A60 class bulkhead penetration piece with spray type insulation (Park et al., 2018)

Table 1 Material type and main dimension of fire test specimen with spray type insulation

No.	Part Name	Main Dimension	Material Type	Piece type
1	Bulkhead penetration piece	$\phi 18$ Socket / ($\phi 8$ Tube)	SUS316L / SUS316L	Cutting type
2	Bulkhead penetration piece	$\phi 18$ Socket / ($\phi 8$ Tube)	S45C / Brass	Cutting type
3	Bulkhead penetration piece	$\phi 18$ Socket / ($\phi 8$ Tube)	S45C / S45C	Cutting type
4	Bulkhead penetration piece	$\phi 18$ Socket / ($\phi 8$ Tube)	SUS316L / SUS316L	Passing type
5	Bulkhead penetration piece	$\phi 18$ Socket / ($\phi 8$ Tube)	S45C / S45C	Passing type
6	Bulkhead penetration piece	$\phi 25$ Socket / ($\phi 12$ Tube)	SUS316L / SUS316L	Cutting type
7	Bulkhead penetration piece	$\phi 25$ Socket / ($\phi 12$ Tube)	S45C / Brass	Cutting type
8	Bulkhead penetration piece	$\phi 25$ Socket / ($\phi 12$ Tube)	S45C / S45C	Cutting type
9	Bulkhead penetration piece	$\phi 25$ Socket / ($\phi 12$ Tube)	SUS316L / SUS316L	Passing type
10	Bulkhead penetration piece	$\phi 25$ Socket / ($\phi 12$ Tube)	S45C / S45C	Passing type
A	Bulkhead plate	$2420 \times 2480 \times 4.5$ t	Mild Steel	-
B	Bulkhead stiffener	$65 \times 65 \times 6$ t	Mild Steel	-
C	Sealing	$100 \times 4.5 \times 2420$ L	Mild Steel	-
D	Mounting plate	$80 \times 80 \times 4.5$ t	Mild Steel	-
E	A60 fire insulation	60 t	Spray S	-

Fig. 6 Actual fire test specimen with spray type insulation(left) and installation on vertical furnace(right) **Fig. 7** Overall thermocouple locations(left) and detailed location(right)

BPP의 온도 측정 위치는 A60급 BPP의 열전달 수치해석 연구 (Park et al., 2018)와 동일하게 설정하였다. 온도 측정을 위한 온도센서 부착 설정사항은 Fig. 7에 자세히 나타내었다.

Fig. 7에 나타낸 바와 같이 SSC의 보강재 위치에 분무된 단열

재의 높이로 인해 튜브에만 온도센서를 부착할 수 있는 경우인 2번, 4번, 7번, 9번 BPP는 2개의 온도센서를 튜브에 부착하였고, 이 외에 단열재 높이에 영향을 받지 않아 온도센서 부착에 제한이 없는 경우인 1번, 3번, 5번, 6번, 8번, 10번 BPP는 소켓에 2

개, 튜브에 2개로써 총 4개의 온도센서를 부착하였다. MSC.307 (88)에 규정된 시험절차에 따라 60분간 방화시험을 수행하면서 화염 비노출면에서 BPP의 온도를 측정하였고, 앞서 저자들이 수행하였던(Park et al., 2018) 과도 열전달 수치해석 결과를 검

증하기 위해 BPP 상의 온도센서 부착 위치 별 온도결과를 비교 하여 Table 2에 나타내었다. 저자들이 수행하였던 기존 연구논문(Park et al., 2018)에서 과도열전달해석에 따른 화염 비노출면에서의 온도분포 결과는 Fig. 8에 도시하였다.

(a) Unexposed face

(b) Exposed face

Fig. 8 Temperature distribution contour results(Park et al., 2018)

Table 2 Comparison of temperature results for analysis and test (Park et al., 2018)

BPP #	Measuring point #	Material type	Unexposed face		Error [%]	Remark	
			Temperature [°C]			Analysis	Test
			Analysis	Test			
1	1-1 (socket)	SUS316L	144.5	153.0	5.9	OK	OK
	1-2 (socket)	SUS316L	144.4	132.5	8.3	OK	OK
	1-3 (tube)	SUS316L	31.9	29.2	8.6	OK	OK
	1-4 (tube)	SUS316L	32.0	27.9	12.8	OK	OK
2	2-3 (tube)	Brass	169.7	196.7	15.9	OK	Fail
	2-4 (tube)	Brass	169.7	193.8	14.2	OK	Fail
3	3-1 (socket)	S45C	210.2	220.5	4.9	Fail	Fail
	3-2 (socket)	S45C	210.2	202.6	3.6	Fail	Fail
	3-3 (tube)	S45C	84.5	82.7	2.1	OK	OK
	3-4 (tube)	S45C	84.5	79.4	6.1	OK	OK
4	4-3 (tube)	SUS316L	102.3	115.3	12.7	OK	OK
	4-4 (tube)	SUS316L	102.3	109.9	7.4	OK	OK
5	5-1 (socket)	S45C	213.9	221.3	3.5	Fail	Fail
	5-2 (socket)	S45C	213.8	210.7	1.5	Fail	Fail
	5-3 (tube)	S45C	81.2	77.5	4.6	OK	OK
	5-4 (tube)	S45C	81.2	76.8	5.5	OK	OK
6	6-1 (socket)	SUS316L	165.8	191.6	15.6	OK	Fail
	6-2 (socket)	SUS316L	165.8	159.0	4.1	OK	OK
	6-3 (tube)	SUS316L	35.2	34.4	2.4	OK	OK
	6-4 (tube)	SUS316L	35.1	31.2	11.0	OK	OK
7	7-3 (tube)	Brass	186.4	218.4	17.2	Fail	Fail
	7-4 (tube)	Brass	186.4	213.4	14.5	Fail	Fail
8	8-1 (socket)	S45C	230.9	233.5	1.1	Fail	Fail
	8-2 (socket)	S45C	231.0	219.4	5.0	Fail	Fail
	8-3 (tube)	S45C	93.0	86.7	6.8	OK	OK
	8-4 (tube)	S45C	92.8	85.3	8.1	OK	OK
9	9-3 (tube)	SUS316L	108.7	97.0	10.7	OK	OK
	9-4 (tube)	SUS316L	108.7	96.3	11.4	OK	OK
10	10-1 (socket)	S45C	232.5	240.2	3.3	Fail	Fail
	10-2 (socket)	S45C	232.5	223.5	3.9	Fail	Fail
	10-3 (tube)	S45C	87.7	95.4	8.8	OK	OK
	10-4 (tube)	S45C	87.6	92.1	5.1	OK	OK

Table 2에 나타나 있는 바와 같이 방화시험 결과를 기준으로 과도열전달 수치해석의 온도결과 오차는 전체 측정위치에서 17.2% 미만으로 나타났으며, Brass 재질인 경우 상대적으로 오차가 높은 것으로 나타났다. Brass 재질인 경우 과도열전달 수치해석 결과에서 절단형으로 설계된 2번 BPP는 규정 온도인 180°C 이하를 만족하고 관통형으로 설계된 7번 BPP는 규정 온도를 만족하지 못할 것으로 예측 하였으나, 방화시험에서 모든 형태의 BPP에서 규정 온도를 만족하지 못하는 것으로 나타났다. Brass 재질의 BPP에서 이와 같은 해석과 시험의 오차가 발생한 원인은 Fig. 9에 나타난 것처럼 방화시험 후 화염노출면에서 Brass 재질의 BPP가 용해되는 현상이 발생하였기 때문으로 사료된다. S45C 재질 BPP의 경우 과도 열전달 수치해석 결과와 동일하게 모두 경우에서 규정 온도를 만족하지 못하는 것으로 나타났다. SUS316L 재질 BPP의 경우 방화시험 결과에서 1번, 4번, 6번, 9번 BPP 중 6-1(Socket) 측정위치에서의 규정 온도인 180°C를 초과하는 것으로 나타났으며, 이러한 오차는 수치해석 상에서의 BPP와 단열재의 연결 형태와 방화시험에서의 실제 연결 형태의 차이에 기인 한 것으로 파악되어진다. 과도 열전달 수치해석에서 BPP와 단열재의 유한요소 모델은 절점(Node)을 공유하여 단열재와 BPP 간에 이격이 없는 이상적인 상태로 고려되나, 실제 제작된 방화시험용 SCC 조립체의 경우 일부 BPP와 단열재의 밀착이 잘 이루어지지 않아 오차가 발생한 것으로

판단된다. 그러나 전체적인 방화시험 온도 측정결과를 해석결과와 비교해보면 오차율이 크지 않았고, 방화시험에 소요되는 비용과 시간을 고려하면 사전에 과도 열전달 수치해석에 기반하여 설계 사양을 결정하는 것은 합리적인 접근 방법이라 할 수 있다. 방화시험 전·후의 재질에 따른 BPP의 상태를 각각 관찰하기 위해 화염 노출면에서의 BPP 형상을 Fig. 9에 비교하여 나타내었다.

Fig. 9에 나타난 바와 같이 Brass 재질인 2번, 7번 BPP에서 용해가 일어남으로 인해 Brass 재질의 온도 특성(MatWeb, 2019) 상 BPP의 소재로 적합하지 않은 것으로 나타났으며, S45C 재질인 3번, 5번, 8번, 10번 BPP에서 방화시험 후에 변형이 발생한 것을 알 수 있다. 한편 과도 열전달 수치해석 연구에서 가장 합리적인 A60 BPP의 설계 사양으로 판단했던 SUS316L 재질인 1번, 4번, 6번, 9번 BPP는 방화시험 전후의 형상이 거의 동일하게 유지되는 것으로 나타났다.

3.3 단열재의 특성에 대한 방화시험 결과

A60급 BPP용 단열재의 종류에 따른 방화성능을 검토하기 위해 부착식 단열재를 추가로 적용하여 방화시험 시편을 설계 및 제작하였다. 부착식 단열재는 선박 및 해양플랜트의 방화용 단열재로 주로 적용되고 있는 W-212-II Hi Wool을 고려하였다. 부착식 단열재 적용 BPP의 방화시험에서는 앞서의 분무식 단열재

Fig. 9 Bulkhead penetration piece status before fire test(left) and after(right)

Fig. 10 Fire test specimen design for A60 class bulkhead penetration piece with mechanical fastener type insulation (Park et al., 2018)

Table 3 Material type and main dimension of fire test specimen with mechanical fastener type insulation

No.	Part name	Main dimension	Material type	Piece type
1	Bulkhead penetration piece	$\phi 18$ Socket / ($\phi 8$ Tube)	S45C / S45C	Cutting type
2	Bulkhead penetration piece	$\phi 18$ Socket / ($\phi 8$ Tube)	SUS316L / SUS316L	Cutting type
3	Bulkhead penetration piece	$\phi 18$ Socket / ($\phi 8$ Tube)	S45C / S45C	Passing type
4	Bulkhead penetration piece	$\phi 18$ Socket / ($\phi 8$ Tube)	SUS316L / SUS316L	Passing type
5	Bulkhead penetration piece	$\phi 25$ Socket / ($\phi 12$ Tube)	S45C / S45C	Cutting type
6	Bulkhead penetration piece	$\phi 25$ Socket / ($\phi 12$ Tube)	SUS316L / SUS316L	Cutting type
7	Bulkhead penetration piece	$\phi 25$ Socket / ($\phi 12$ Tube)	S45C / S45C	Passing type
8	Bulkhead penetration piece	$\phi 25$ Socket / ($\phi 12$ Tube)	SUS316L / SUS316L	Passing type
A	Bulkhead plate	2420 × 2480 × 4.5 t	Mild Steel	-
B	Bulkhead stiffener	65 × 65 × 6 t	Mild Steel	-
C	Sealing	65 × 6 × 2420 L	Mild Steel	-
D	Mounting plate	50 × 50 × 100 L × 5 t	Mild Steel	-
E	A60 fire insulation	75 t	W-212-II Hi Wool	-

Fig. 11 Actual fire test specimen with mechanical fastener type insulation(left) and installation on vertical furnace(right)

적용 BPP의 방화시험에서 Brass 재질 BPP가 용해 되었기 때문에 Brass 재질 BPP를 제외하고 시편을 설계 및 제작하였다. 부착식 단열재가 적용된 방화시험용 SCC 조립체의 설계사양은 Fig. 10과 Table 3에 나타내었다. Table 3에 나타나 있는 것처럼 Brass 재질 BPP를 제외하고 S45C와 SUS316L 재질은 분무식 단열재 적용 BPP의 방화시험용 시편과 동일하게 설계 및 제작하였다. 1~4번의 BPP는 $\phi 8$ 튜브와 $\phi 18$ 소켓의 조립체로 구성하였고, 5~8번의 BPP는 $\phi 12$ 튜브와 $\phi 25$ 소켓의 조립체로 구성하였으며, BPP는 튜브와 소켓의 재질을 동일하게 설정하였다. 또한 1~2번, 5~6번 BPP는 절단형으로 고려하였으며 3~4번 및 7~8번 BPP는 관통형으로 고려하였다.

Fig. 10과 Table 3에 나타나 있는 사양으로 실제 제작된 부착식 단열재 적용 방화시험용 SCC 조립체의 형상과 A60 방화시험 수행을 위해 수직화염로에 장착된 상태는 Fig. 11에 나타내었다.

부착식 단열재를 적용한 경우의 방화시험을 수행하기 전에 분무식 단열재와의 시공 상 특성을 비교하기 위해 Fig. 12와 같이 BPP 조립위치에서 상세 형상을 관측하였다.

Fig. 12 Insulation assembly characteristics in spray type(left) and mechanical fastener type(right)

Fig. 12 좌측에 나타난 바와 같이 분무식 단열재는 울(Wool)의 형태로 이루어진 단열재를 접착성분과 함께 분무하여 시공하는 단열재로써 BPP의 조립 형상에 영향을 받지 않아 울 형태

Table 4 Comparison of temperature results for insulation type

Spray type insulation					Mechanical fastener type insulation				
BPP #	Measuring point #	Material	Temperature [°C]	Remark	BPP #	Measuring point #	Material	Temperature [°C]	Remark
1	1-3 (tube)	SUS316L	29.2	OK	2	2-3 (tube)	SUS316L	199.7	Fail
	1-4 (tube)	SUS316L	27.9	OK		2-4 (tube)	SUS316L	181.7	Fail
3	3-3 (tube)	S45C	82.7	OK	1	1-3 (tube)	S45C	231.2	Fail
	3-4 (tube)	S45C	79.4	OK		1-4 (tube)	S45C	217.4	Fail
4	4-3 (tube)	SUS316L	115.3	OK	4	4-3 (tube)	SUS316L	225.4	Fail
	4-4 (tube)	SUS316L	109.9	OK		4-4 (tube)	SUS316L	209.7	Fail
5	5-3 (tube)	S45C	77.5	OK	3	3-3 (tube)	S45C	229.1	Fail
	5-4 (tube)	S45C	76.8	OK		3-4 (tube)	S45C	198.4	Fail
6	6-3 (tube)	SUS316L	34.4	OK	6	6-3 (tube)	SUS316L	155.1	OK
	6-4 (tube)	SUS316L	31.2	OK		6-4 (tube)	SUS316L	155.1	OK
8	8-3 (tube)	S45C	86.7	OK	5	5-3 (tube)	S45C	245.0	Fail
	8-4 (tube)	S45C	85.3	OK		5-4 (tube)	S45C	244.4	Fail
9	9-3 (tube)	SUS316L	97.0	OK	8	8-3 (tube)	SUS316L	216.9	Fail
	9-4 (tube)	SUS316L	96.3	OK		8-4 (tube)	SUS316L	203.5	Fail
10	10-3 (tube)	S45C	95.4	OK	7	7-3 (tube)	S45C	245.4	Fail
	10-4 (tube)	S45C	92.1	OK		7-4 (tube)	S45C	230.0	Fail

의 단열재에 비해 밀착되어 시공되어 있는 것을 확인할 수 있다. 반면 Fig. 12 우측에 나타난 부착식 단열재는 미네랄 울(Mineral wool)을 판(Plate)형태로 제작하여 필요한 길이만큼 절단하고 이를 핀으로 고정시키는 형태로써 단열재 고정용 핀을 격벽에 미리 용접해야 하는 준비과정이 필요하고, BPP의 조립부에서 완전한 밀착을 보장하기 어려운 것으로 나타났다. Table 4에는 MSC.307(88)에 규정된 시험절차에 따라 60분간 방화시험을 수행하면서 부착식 단열재가 적용된 A60급 BPP의 화염 비노출면에서 온도를 측정하였고, 분무식 단열재의 결과와 비교하였다.

Table 4에 나타난 것처럼 부착식 단열재가 적용된 A60급 BPP의 규정 온도 만족 여부를 살펴보면 SUS316L 재질의 튜브사이즈 $\phi 12$ 이며 절단형인 6번 BPP만 규정 온도를 만족하는 것으로 나타났다. 전체적으로 60분 후 최종 측정 온도를 비교해 보면 부착식 단열재가 적용된 BPP에서 최소 약 2배에서 최대 약 7배의 온도 편차가 관측되었다. 이러한 원인은 Fig. 12에서 살펴본 바와 같이 부착식 단열재가 적용된 경우 BPP의 조립부에서 단열이 완전히 이루어지지 못하여 발생한 것으로 파악된다. 부착식 단열재를 적용할 경우 BPP의 조립부에서 완전한 밀착을 보장할 수 있는 기술개발이 필요함을 알 수 있다. A60급 BPP와 같은 형상에 분무식 단열재를 적용할 경우 부착식 단열재에 비해 BPP의 형상에 따른 제약조건이 발생하지 않는 것으로 판단된다. 분무식 단열재의 시공성이 평균적으로 우수하고, BPP의 방화시험에서 최종 온도분포를 비교하였을 때 분무식 단열재를 시공한 BPP의 전체적인 온도가 현저히 낮게 나타나는 것으로 보아 실질적으로 선박 및 해양플랜트의 A60급 BPP에는 분무식 단열재를 적용 하는 것이 타당하다고 판단된다.

4. 결 론

본 연구에서는 앞서 저자들이 수행하였던 A60급 구획에 적용될 수 있는 BPP의 설계와 과도 열전달 수치해석의 결과를 검증하기 위해 MSC에서 규정하고 있는 A60급 방화성능 검증에 대한 화재시험절차와 동일하게 시편제작, 온도조건 및 가열시간 설정, 온도측정 및 분석방법을 준수하여 방화시험을 수행하였다. 방화시험에 적용된 BPP의 설계사양은 앞서의 수치해석 연구에서 가장 경제성이 우수한 것으로 검토된 길이 200mm를 기준으로 설정 하였다. BPP 재질에 따른 수치해석 결과의 타당성을 검증하기 위해 수치해석 연구와 동일하게 Brass, S45C, SUS316L의 재질로 각각 BPP를 제작하여 방화시험을 수행하였다. 방화시험 결과로부터 Brass 재질인 경우 화염노출부에서 용해가 발생하여 BPP의 사양으로 적합하지 않음을 검증하였고, S45C 재질인 경우 과도한 열변형이 발생하였으며 과도 열전달 수치해석에서 예측한 바와 같이 모두 규정 온도를 만족하지 못한 것으로 나타났다. 과도 열전달 수치해석에서 가장 합리적인 A60 BPP 설계 사양으로 판단되었던 SUS316L 재질인 경우 외관상 변형이 거의 발생하지 않았으며, BPP 6번의 1개의 측정부를 제외하고 모두 규정온도를 만족하는 것으로 나타났다. 재질별 BPP에 대한 전체적인 방화시험 온도 측정결과를 과도 열전달 해석결과와 비교해보면 오차율이 크지 않았고, 방화시험에 소요되는 비용과 시간을 고려하면 사전에 과도 열전달 수치해석을 통해 A60급 BPP의 설계 사양을 결정하는 것은 합리적인 접근 방법이라 할 수 있다. 단열재의 종류에 따른 방화시험 결과로부터 부착식 단열재가 적용된 경우 SUS316L 재질의 튜브사이즈 $\phi 12$ 이며 절단형인 6번 BPP만 규정 온도를 만족하였고,

이외의 설계사양은 모두 규정을 만족하지 못하는 것으로 나타났다. A60급 BPP와 같은 형상에 분무식 단열재를 적용할 경우 부착식 단열재에 비해 BPP의 형상에 따른 제약조건이 발생하지 않는 것으로 판단되었다. 분무식 단열재의 시공성이 평균적으로 우수하고, BPP의 방화시험에서 최종 온도분포를 비교하였을 때 분무식 단열재를 시공한 BPP의 전체적인 온도가 현저히 낮게 나타나는 것으로 보아 실질적으로 선박 및 해양플랜트의 A60급 BPP에는 분무식 단열재를 적용 하는 것이 타당하다고 판단되었다. 저자들은 추후 부착식 단열재의 형상 제약사항을 개선할 수 있는 설계방안의 연구를 수행할 예정이다.

후 기

본 연구는 중소벤처기업부 위기지역 Scale-up R&D 사업, 해양수산부 해양장비개발 및 인프라구축사업인 ‘해양플랜트 플로트오버 및 복수크레인 설치설계 핵심기술개발’ 과제, 산업통상자원부 ‘산업전문인력역량강화사업’의 친환경스마트선박 R&D 전문인력양성사업의 연구결과 중 일부를 밝힙니다.

References

- Choi, J.M., Um, H.C., Jin, Y.H., 2014. Comparison on the Fire Performance of Additional Insulation Materials for Improving the Fire Retardancy in Engine-room of FRP Vessel. *Journal of the Korean Society of Marine Engineering*, 38(9), 1150-1155. <https://doi.org/10.5916/jkosme.2014.38.9.1150>
- Choi, T.J., Kim, J.S., Choi, K.K., Lim, Y.S., Kim, Y.T., 2013. An Experimental Study on the Fireproof of Fire Damper in Accordance with Insulation Conditions on the Coaming and Blade. *Journal of the Korean Society of Marine Engineering*, 37(4), 431-437. <https://doi.org/10.5916/jkosme.2013.37.4.431>
- Grigonis, M., Maciulaitis, R., Lipinskas, D., 2011. Fire Resistance Tests of Various Fire Protective Coatings. *Materials Science*, 17(1), 93-98.
- International Organization for Standardization (ISO), 1999. Fire Resistance Tests - Elements of Building Construction. ISO 834-1, Switzerland.
- Jang, C.J., Hur, N.S., Kim, I.W., 2014. Performance Experiment of H-120 Class Fire Damper for Offshore. *Journal of the Korean Society of Manufacturing Process Engineers*, 13(2), 131-136. <https://doi.org/10.14775/ksmpe.2014.13.2.131>
- MatWeb, 2019. Overview of materials for Brass. [Online] Available at : <<http://www.matweb.com/>> [Accessed 14 January. 2019].
- MSC, 2010. Adoption of the International Code for Application of Fire Test Procedures. MSC.307(88), UK.
- Park, W.C., Song, C.Y., Na, O.G., 2018. Heat Transfer Characteristics of Bulkhead Penetration Piece for A60 Class Compartment I: Transient Thermal Analysis for Piece Design. *Journal of Ocean Engineering and Technology*, 32(5), 310-323. <https://doi.org/10.26748/KSOE.2018.6.32.5.310>
- Yu, J.S., Sung, H.G., Oh, J.H., 2000. An Experimental Study on Fire-Resistant Boom. *Journal of the Korean Society of Marine Environmental Engineering*, 3(2), 25-32.