

A60급 갑판 관통 관의 방화성능 평가를 위한 과도 열전달 해석과 화재시험

박우창, 송창용*
목포대학교 조선해양공학과

Transient Heat Transfer Analysis and Fire Test for Evaluation on Fire Resistance Performance of A60 Class Deck Penetration Piece

Woo Chang Park, Chang Yong Song*
Department of Naval Architecture & Ocean Engineering, Mokpo National University

요약 A60급 갑판 관통 관은 선박과 해양플랜트의 화재 발생 시 인명의 보호와 화염전파를 방지하기 위해 갑판 구획에 설치되는 방화 장치이다. A60급 갑판 관통 관이 새로 개발되거나 기존의 설계가 변경될 경우 국제해사기구의 화재시험 절차 규정에 따라 A60급 갑판 관통 관의 방화성능을 검증하도록 요구하고 있다. 따라서, 본 논문에서는 신규 개발된 선박과 해양플랜트용 A60급 갑판 관통 관의 방화 설계의 적합성을 평가하기 위해 과도 열전달 해석을 수행하였고, 화재 시험을 통해 해석결과의 타당성을 검증하였다. 또한 A60급 갑판 관통 관의 열전달 특성은 관의 직경, 내부형상 그리고 재질과 같은 설계 사양에 따라 비교하여 검토하였다. 과도 열전달 해석은 범용 유한요소법 소프트웨어인 ABAQUS/Implicit를 사용하여 수행하였으며, 해석결과의 검증에 위한 화재시험은 해사안전위원회에서 규정한 화재시험 절차 코드에 따라 수행하였다. 본 연구에서 검토한 A60급 갑판 관통 관의 방화성능은 국제 해상안전규정을 만족하였고, 재질 사양의 설계가 중요한 것으로 나타났다. 최대 시험온도를 기준으로 SUS316L 재질의 측정온도는 S45C 재질보다 평균적으로 25% 낮게 나타났고, 이때 각 재질의 열전도계수와 비열의 차이는 각각 17%와 58%였다.

Abstract A60 class deck penetration piece is a fire-resistance apparatus installed on the deck compartment to protect lives and prevent flame diffusion in fire accidents. In case that the A60 piece is newly developed or its initial design is revised, it is important to verify the fire resistance performance using a fire test procedure (FTP) code. In this paper, transient heat transfer analysis was carried out to evaluate the fire resistance design compatibility of the newly devised A60 piece. The analysis results were verified via a fire test. The heat transfer characteristics were also investigated by comparing design specifications, such as diameter, internal configuration, and material type. The analysis was performed using ABAQUS/Implicit, and the fire test was performed according to the FTP code. The fire resistance performance of the A60 pieces satisfied the safety of life at sea convention regulation. The material type was the most important design specification for the A60 piece. Based on the maximum test temperature, the measured temperature of SUS316L material was 25% lower than that of S45C on average. The differences between thermal conductivity and specific heat of each material were 17% and 58%, respectively.

Keywords : A60 Class Deck Penetration Piece, Fire Test, FTP Code, Heat Transfer Characteristics, Transient Heat Transfer Analysis

본 연구는 중소벤처기업부에서 지원하는 2020년도 산학연 Collabo R&D사업(No. S2910737)과 교육부의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 지자체-대학 협력기반 지역혁신 사업의 연구결과임.

*Corresponding Author : Chang Yong Song(Mokpo National Univ.)

email: cysong@mokpo.ac.kr

Received February 18, 2021

Accepted April 2, 2021

Revised April 1, 2021

Published April 30, 2021

1. 서론

선박과 해양플랜트에서 화재사고가 발생하게 되면 화염전파로 인한 대규모 구조손상과 인명피해로 이어질 수 있다. 이에 대해 국제해사기구(International Maritime Organization, IMO)는 선박과 해양플랜트의 주요 구획에 대한 방화 규정을 강화하고 있다. A60급 방화장치의 경우 해당 장치가 설치되는 구획에 60분간 화염 전파를 막을 수 있도록 해상안전규약(Safety of Life at Sea Convention, SOLAS)에서 규정한 방화설계가 적용되어야 한다[1]. A60급 갑판 관통 관(Deck penetration piece)은 화재발생의 위험도가 높은 구획의 수평구조를 관통하여 제어 혹은 통신용 케이블이 설치되어야 하는 경우에 적용되는 방화장치이다. IMO는 화재시험절차(Fire Test Procedure, FTP) 규정에 따라 A60급 갑판 관통 관의 방화성능을 검증하도록 요구하고 있다[2].

A60급 갑판 관통 관의 방화성능에 대한 연구수행과 연계하여 기존의 선박과 해양플랜트에 관한 방화성능 평가 연구를 조사하였다. Yu et al.[3]은 오일붐 재질의 방화성능 평가를 위한 전기로 시험과 수조시험 방법을 제안하였다. Choi et al.[4]은 H-120급 방화덤퍼의 H-120 방화성능을 만족시키기 위해 방화덤퍼 블레이드와 코밍 상의 내화재 조건을 조절하여 방화성능 시험을 수행하였다. Choi et al.[5]은 FRP 선박의 재질에 대한 방화성능 평가를 위해 다양한 복합재료 제작조건을 고려하여 방화시험을 수행하였다. Jang et al.[6]은 열해석을 이용한 H-120급 방화덤퍼의 방화설계 사항에 대한 열해석을 수행하고, 방화설계 조건을 변화시키면서 방화시험을 수행하였다. Song and Kim[7]은 열전달해석과 방화시험을 통해 선박의 수직구조에 적용되는 A0급 격벽 관통 관의 설계사항을 검증하였다. 상기의 선행연구에 의해 선박과 해양플랜트에 대한 방화성능 평가 연구가 다양하게 제시되고 있지만, A60급 갑판 관통 관의 방화성능에 대한 연구는 부족한 실정이다. 따라서, 본 논문에서는 신규 개발된 선박과 해양플랜트용 A60급 갑판 관통 관의 방화 설계의 적합성을 평가하기 위해 과도 열전달 해석과 화재시험을 이용하여 방화성능 평가의 연구를 수행하였다.

본 논문에서는 선박과 해양플랜트에 사용되는 A60급 갑판 관통 관의 방화설계의 적합성을 평가하기 위해 과도 열전달 해석을 수행하였고, 화재시험을 통해 열전달 해석결과의 타당성을 검증하였다. 또한 A60급 갑판 관통 관의 열전달 특성은 관의 직경, 내부형상 그리고 재질과

같은 설계 사양에 따라 온도 변화를 비교하여 검토하였다. 과도 열전달 해석은 유한요소법을 기반으로 FTP 코드에 나와 있는 시험사양과 온도조건을 반영하여 수행하였다. 열전달 해석결과의 검증을 위한 화재시험은 FTP 코드에 따라 시험편을 제작하여 국제표준시험법에 따라 시험을 수행하였다. 본 연구에서 검토한 A60 급 갑판 관통 관의 설계사양은 방화성능에 관한 국제해상안전규정을 만족하였고, 열전달 특성의 분석을 통해 재질 사양의 설계가 방화성능에 가장 중요한 것으로 나타났다. 본 논문은 2장에서 A60급 갑판 관통 관의 설계사항과 방화성능 평가 규정에 대해 기술하였고, 3장에서 과도 열전달 해석의 결과와 설계사양에 따른 열전달 특성에 대해 정리하였으며, 4장에서 열전달해석에 대한 화재시험 검증 내용을 기술하였다. 마지막에 결론을 정리하는 형식으로 구성하였다.

2. A60급 갑판 관통 관 및 방화성능평가 장치의 설계

선박과 해양플랜트에 적용되는 A60급 갑판 관통 관은 갑판의 화재 발생 시 갑판을 관통하여 설치되는 제어와 통신용 케이블의 안전한 운용을 위해 사용되는 방화장치이다. Fig. 1에 보인 것처럼 갑판 관통 관의 내부에 케이블이 설치되며, 관의 재질과 단열재 적용 여부에 따라 갑판 관통 관이 장착되는 구획의 화재 등급을 결정한다[8].

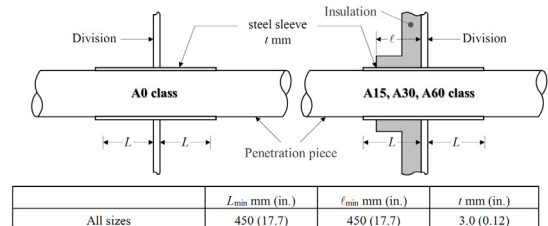
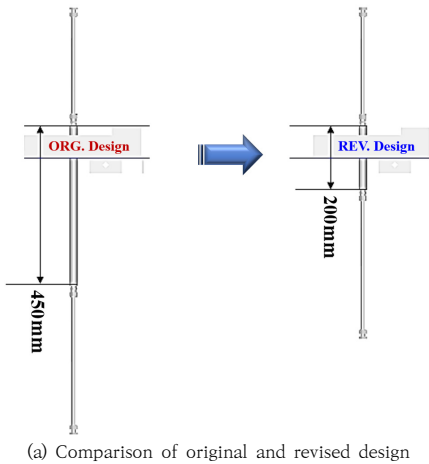


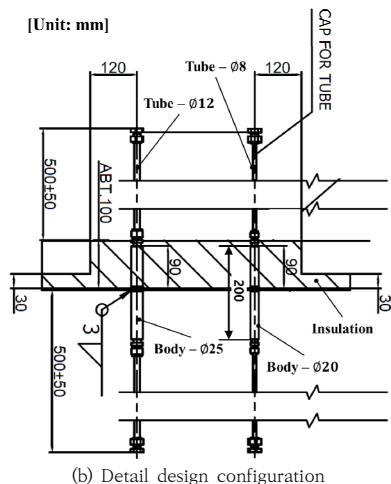
Fig. 1. A-class penetration piece[8]

Fig. 1에 나타난 것처럼 A60급 갑판 관통 관의 몸체(Steel sleeve)는 단열재를 포함하여 길이 450mm와 두께 3mm의 강재로 설계되거나, 길이나 두께가 규정된 치수에 미치지 못할 경우 FTP 코드에 따라 방화시험으로 설계를 검증해야한다 [1,2,8]. 그러나 갑판 관통 관의 길이가 길수록 관의 변형, 케이블 관입 작업능률 저하, 케이블 손상 등의 문제가 발생하기 때문에 실제 조선소에서

는 선급의 설계 규정을 준수하는데 많은 어려움이 있다. 본 연구에서는 길이를 축소하고 내화 단열재를 적용한 새로운 A60급 갑판 관통 관의 설계사양에 대해 과도 열전달 해석과 방화시험을 통해 갑판 관통 관의 생산성과 품질을 향상시키고자 하였다. 개선된 A60급 갑판 관통 관의 설계 형상은 Fig. 2에 나타내었다.



(a) Comparison of original and revised design



(b) Detail design configuration

Fig. 2. Enhanced design of A60 class deck penetration piece

Fig. 2에 보인 바와 같이 관통 관의 몸체(Body)는 길이 200mm로 축소하고, Tube의 직경은 $\varnothing 8$ 과 $\varnothing 12$ 로, Body의 직경은 $\varnothing 20$ 과 $\varnothing 25$ 로 각각 설계하였다. 단열재는 관통 관의 중심에서 한쪽으로 90mm가 치우쳐 부착되도록 하였다. 관통 관의 재질은 기계구조용 탄소강(S45C)과 오스테나이트계 스테인리스 강(SUS316L)의 사양을 각각 적용하였다. 갑판 관통 관의 내부형상은 용

도에 따라 튜브가 관통 관 내부에서 절단된 Cutting type과 튜브가 관통 관 내부를 통과하는 Passing type으로 각각 설계되었다.

A60급 방화장치는 60분간 규정된 화염 가열 조건에서 화염이 가해지는 면의 반대 면에서 계측된 온도가 $180\text{ }^{\circ}\text{C}$ 이하가 되도록 설계되어야 한다. Fig. 3에는 FTP 코드에 규정된 화재시험 전용 시편(Structure steel core)의 형상이 나타나 있다.

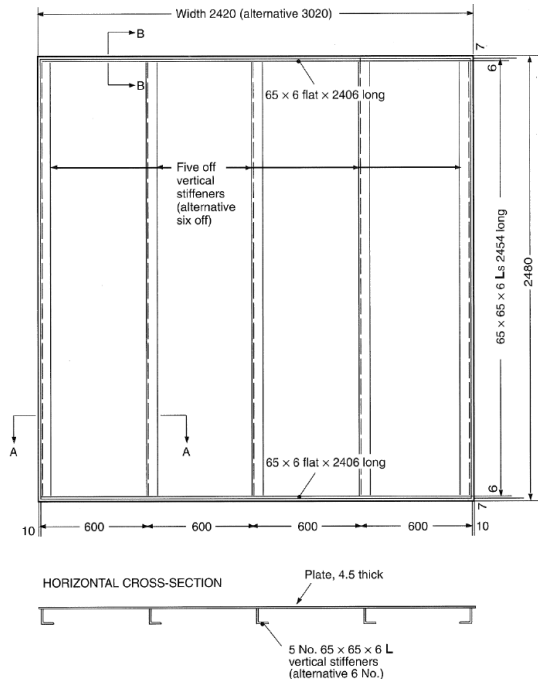


Fig. 3. Configuration of structure steel core[2]

Fig. 3에 나타난 바와 같이 A60급 갑판 관통 관에 대한 화재시험 전용 시편은 강제 구조물로 제작해야 하고, 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 L형 보강재가 배치되어야 한다. A60급 갑판 관통 관은 Fig. 3에 보인 시편의 L형 보강재 사이에 단열재와 같이 장착하여 방화성능을 검증해야 한다. A60급 갑판 관통 관과 단열재가 장착된 화재시험 전용 시편은 실제 선박과 해양플랜트의 설치 상태와 동일하게 평가될 수 있도록 화염이 가해지는 면에 단열재가 위치되어야 하고, 화염노(Furnace)에 수평으로 장착되어 60분간 $940\text{ }^{\circ}\text{C}$ 의 온도까지 가열한다.

Fig. 2의 A60급 갑판 관통 관의 설계 형상과 Fig. 3의 화재시험 전용 시편을 토대로 생성한 과도 열전달 해석

모델은 Fig. 4에 나타내었고, 해석모델의 상세사양은 Table 1에 정리하였다.

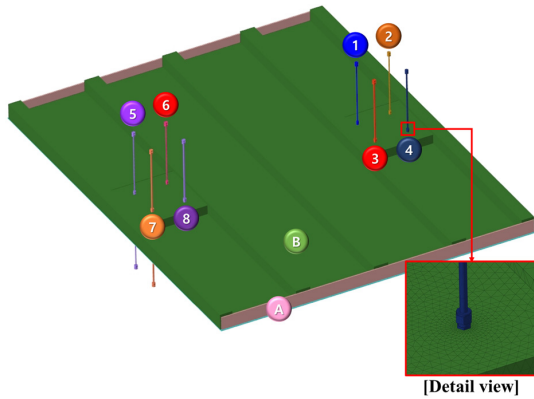


Fig. 4. Finite element analysis model

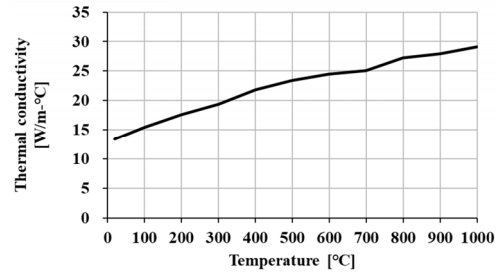
Table 1. Detail specification of analysis model

No.	Part	Dimension [tube / body]	Material type	Internal type
1	Penetration piece	∅8 / ∅20	SUS316L	Passing
2	Penetration piece	∅8 / ∅20	S45C	Passing
3	Penetration piece	∅12 / ∅25	SUS316L	Passing
4	Penetration piece	∅12 / ∅25	S45C	Passing
5	Penetration piece	∅8 / ∅20	SUS316L	Cutting
6	Penetration piece	∅8 / ∅20	S45C	Cutting
7	Penetration piece	∅12 / ∅25	SUS316L	Cutting
8	Penetration piece	∅12 / ∅25	S45C	Cutting
A	Structure steel core	-	SS400	-
B	Insulation	-	A60 class	-

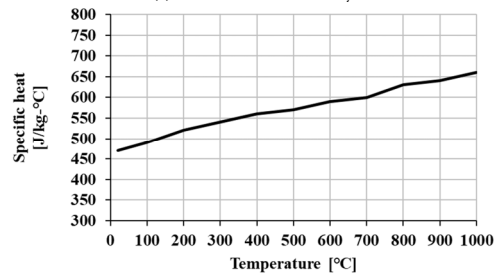
과도 열전달 해석에 적용된 유한요소모델은 1,352,236개의 요소와 323,738개의 절점으로 생성되었으며, 유한요소의 형태는 사면체 열전달 요소(DC3D4)를 적용하였다. 과도 열전달해석을 위한 경계조건은 유한요소모델의 표면 절점 상에 대류경계조건을 적용하였으며, 화염노 내부와 외부에 대한 자연대류계수를 산정하여 경계조건을 구현하였다. 또한 초기조건은 FTP 코드에 정의된 상온인 20 ℃를 적용하였다.

3. 과도 열전달 해석

과도 열전달 해석은 범용 유한요소법 소프트웨어인 ABAQUS/Implicit[9]를 사용하여 수행하였다. Figs. 5~8에 정리한 바와 같이 재료의 열전도와 비열 특성치는 과도 열전달 해석의 정확도를 향상시키기 위해 기존의 연구결과를 참조하여 온도에 따른 특성치를 적용하였다.

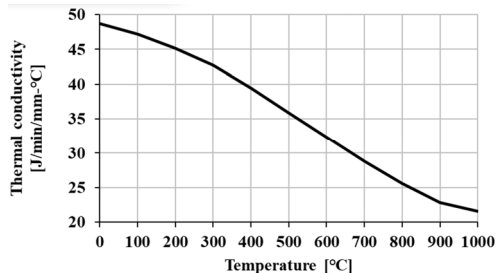


(a) Thermal conductivity

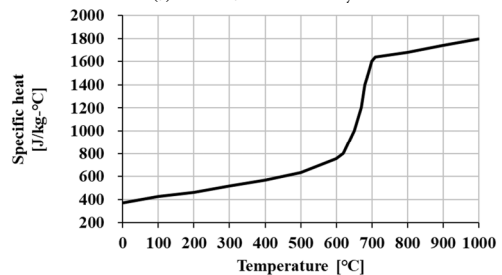


(b) Specific heat

Fig. 5. Material properties of SUS316L[10]



(a) Thermal conductivity



(b) Specific heat

Fig. 6. Material properties of S45C[11]

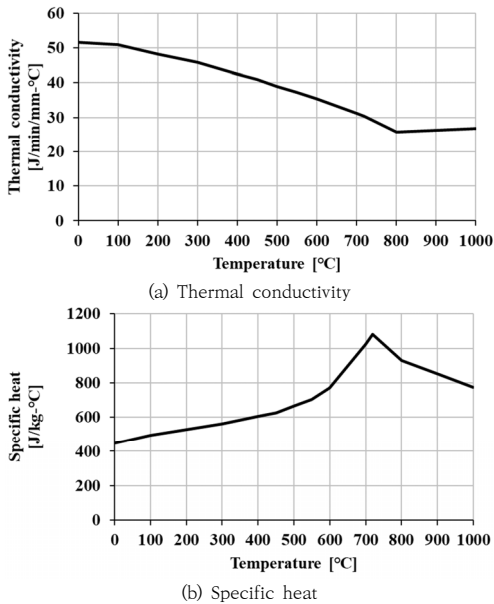


Fig. 7. Material properties of SS400[12]

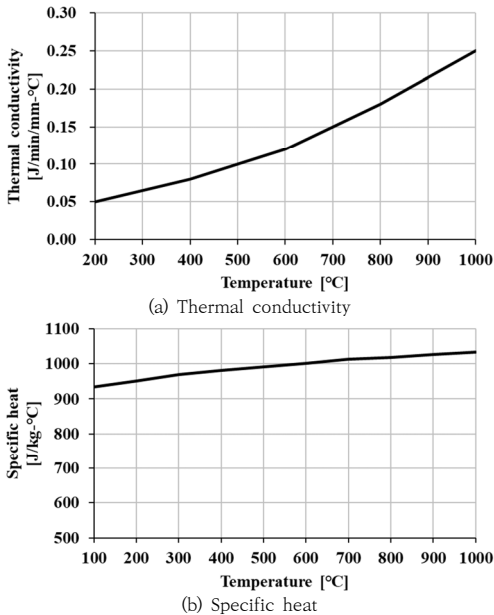


Fig. 8. Material properties of insulation[13]

Figs. 5~8에 나타난 재료의 열전도와 비열 특성치는 구조체에서의 온도 이동에 영향을 준다.

과도 열전달 해석의 입열조건은 Fig. 9에 나타난 것처럼 FTP 코드에 규정된 화염노 가열조건을 동일하게 적용하였다. Fig. 9(a)에 보인 바와 같이 화염노에 A60급 갑판 관통 관이 장착된 시편은 단열재 부착면이 화염노 내부 방향으로 놓이도록 수평방향으로 설치한다. 화염노

의 내부 온도는 가열점(Flaming point)의 화염으로 Fig. 9(b)에 나타나 있는 화염노 제어 온도 곡선에 따라 60분간 940 °C까지 가열한다. 화염노 제어 온도 곡선은 Eq. (1)과 같이 정의한다[2].

$$T = 340 \log_{10}(8t + 1) + 20 \text{ [}^\circ\text{C]} \quad (1)$$

Where, T denotes heating temperature, t denotes heating time (minutes).

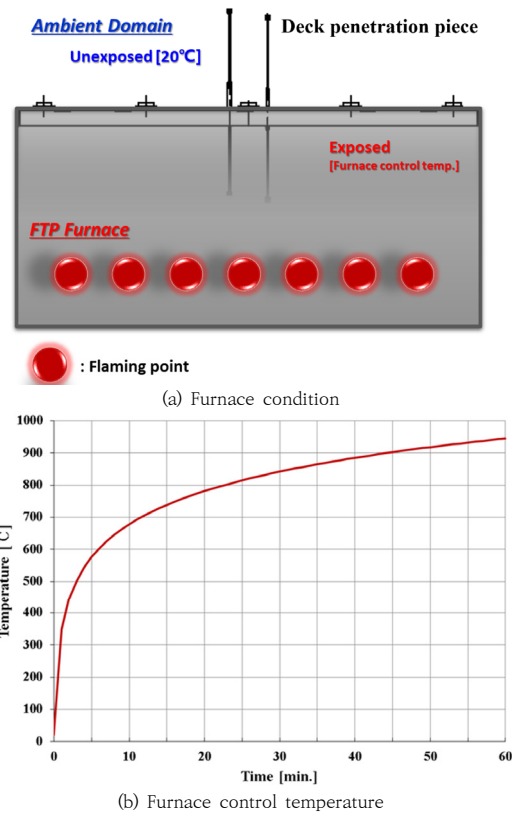


Fig. 9. Furnace flame condition

온도측정은 화염노 외부면(Unexposed ambient domain)에서 갑판 관통 관의 Body 부에서 최대온도를 측정하고, 온도편차가 180 °C 이하인 경우에 규정을 만족하는 것으로 판정한다.

FTP 코드에 규정된 화염노 가열조건은 폐쇄된 화염노 내부의 분위기 온도(Atmosphere temperature)를 높이는 방식이기 때문에 과도 열전달 해석에서는 Eq. (2)과 같은 대류계수 h 의 산출식을 적용하였다[14].

$$\begin{aligned}
 h &= \frac{k}{L} Nu \quad [W/m^2K] \\
 Nu &= 0.27 R_{aL}^{1/4} \\
 R_{aL} &= \frac{g\beta(T_s - T_\infty)L^3}{\nu^2} Pr
 \end{aligned}
 \tag{2}$$

Where, Nu denotes Nusselt number, R_{aL} denotes Rayleigh number, Pr denotes Prandtl number, $k(W/mK)$ denotes fluid thermal conductivity, $L(m)$ denotes geometrical characteristic length, ν denotes fluid dynamic viscosity coefficient, $g(m/s^2)$ denotes gravitational acceleration, β denotes volumetric expansion coefficient, $T_s(^\circ C)$ denotes surface temperature, $T_\infty(^\circ C)$ denotes fluid temperature far from the surface.

본 연구에서 사용한 유한요소해석 프로그램인 ABAQUS는 열전달해석에 적용되는 인자로 대류계수의 입력이 필요하며, Eq. (2)에서 Nusselt number와 Rayleigh number는 대류계수를 산정하기 위해 계산한다. Rayleigh number를 계산하기 위한 T_s , Pr , 그리고 ν 는 60분간의 가열온도 변화에 따른 입력 값을 적용하였으며, L 은 Fig. 3에 나타난 화재시험 전용 시편의 평판 치수를 고려하였다. 이와 같이 대류계수를 산정하여 유한요소법을 이용한 열전달해석 기법은 기존의 여러 연구에서도 확인할 수 있다 [15-17].

60분의 가열 시점에 대한 과도 열전달 해석의 온도분포 결과는 Fig. 10에 나타내었다.

화염노 외부면에서의 온도분포는 Fig. 10(a)에 나타난 것처럼 20 °C에서 195 °C의 분포 결과를 나타내었고, 화염노 내부면(Exposed furnace domain)에서의 온도분포는 Fig. 10(b)에 보인 바와 같이 270 °C에서 890 °C의 분포 결과를 보였으며, 갑판 관통 관이 장착된 영역의 온도분포가 높게 형성되는 것으로 나타났다. Fig. 10(b)에서 외벽부분과 내부영역의 온도편차가 크게 나타나는 이유는 대류조건이 외벽부분에서 제외되었기 때문이며, 이는 실제 시험에서 외벽부분이 단열된 시험벽체에 고정되는 조건과 동일하게 고려되었다.

과도 열전달 해석으로부터 60분의 가열시점에서 화염노 외부면의 A60급 갑판 관통 관에서 측정된 온도결과는 Table 2에 정리하였다.

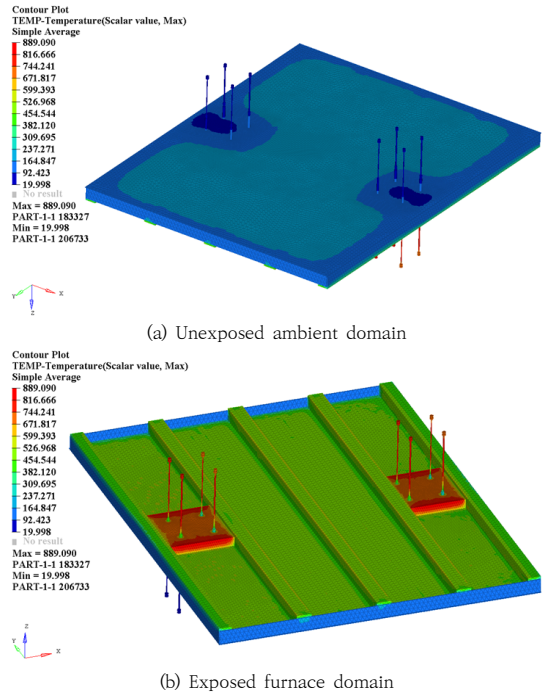


Fig. 10. Temperature distribution contour results

Table 2. Temperature measurement results of transient heat transfer analysis

No.	Dimension [tube / body]	Material type	Internal type	Temperature [°C]
1	∅8 / ∅20	SUS316L	Passing	63.7
2	∅8 / ∅20	S45C	Passing	84.3
3	∅12 / ∅25	SUS316L	Passing	64.6
4	∅12 / ∅25	S45C	Passing	88.1
5	∅8 / ∅20	SUS316L	Cutting	61.4
6	∅8 / ∅20	S45C	Cutting	80.7
7	∅12 / ∅25	SUS316L	Cutting	65.0
8	∅12 / ∅25	S45C	Cutting	87.9

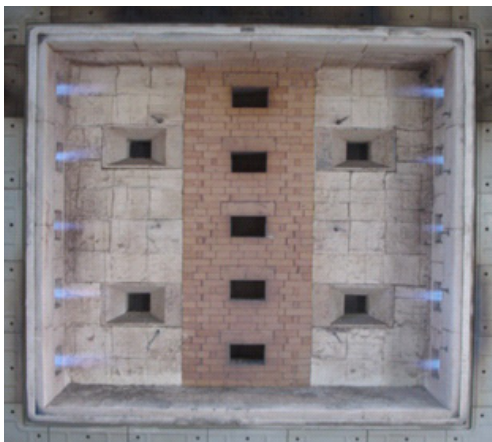
Table 2에 나타난 것처럼 본 연구에서 고려한 새로운 A60급 갑판 관통 관의 설계사양은 FTP 코드의 규정 온도인 180 °C 이하를 충분히 만족하는 것으로 나타났다. 설계사양에 따른 온도특성의 변화와 관련하여 SUS316L 재료의 측정온도는 S45C 재료보다 낮게 나타났고, 재료 변화에 따른 온도 편차가 큰 것으로 나타났다. 관통 관의 직경 변화에 따른 온도특성은 동일 재료 기준으로 관측해 보면 직경이 ∅8와 ∅20로 적용되는 경우와 같이 직경이 작을수록 온도가 낮게 나타나는 특성이 있으나, 온

도 편차는 크지 않은 것으로 나타났다. 내부형상의 변화에 따른 온도 특성은 직경이 $\varnothing 8$ 와 $\varnothing 20$ 로 적용되는 경우 Cutting type의 온도가 다소 낮게 나타났고, 직경이 $\varnothing 12$ 와 $\varnothing 25$ 로 적용되는 경우 내부형상에 따른 온도 변화는 거의 없는 것으로 나타났다. 이와 같이 A60급 갑판 관통 관의 설계사양 중 열전달 특성에 가장 큰 영향을 미치는 것은 재질 사양인 것으로 나타났다.

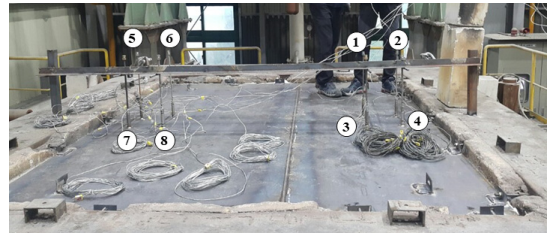
4. FTP 규정에 의한 화재 시험 결과

과도 열전달 해석 결과의 검증을 위해 해석모델과 동일하게 FTP 코드를 준수하여 시험편을 제작하였고, 국제 표준시험법에 따라 화재시험을 수행하였다. A60급 갑판 관통 관의 화재시험 설비인 수평 화염노는 선박과 해양 플랜트에 사용되는 A급 수평 구획 방화장치 등을 시험하는 장비로서 3,000 mm × 3,000 mm의 유효 가열면적이 필요하다. 또한 화염노 내부 온도는 측면 하부에 장착된 버너를 통해 Eq. (1)의 화염노 제어 온도 곡선에 따라 조절되며, 화재 등급에 따른 시간동안 방화시험을 수행한다[18]. A60급 갑판 관통 관의 화재시험에 사용된 화염노 설비와 시험설정 구성은 Fig. 11에 나타내었다.

Fig. 11(b)에 나타난 것처럼 화재시험에서 A60급 갑판 관통 관의 온도는 과도 열전달 해석과 동일한 위치에서 측정되었으며, 측정된 결과는 해석결과와 비교하여 Table 3에 정리하였다.



(a) Horizontal furnace



(b) Fire test of A60 class deck penetration piece

Fig. 11. Fire test set-up

Table 3. Comparison of temperature measurement results

No.	Analysis [°C]	Test [°C]	Error [%]
1	63.7	58.6	8.7
2	84.3	95.0	11.3
3	64.6	58.2	11.0
4	88.1	99.7	11.6
5	61.4	55.1	11.4
6	80.7	84.7	4.7
7	65.0	59.3	9.6
8	87.9	99.0	11.2

Table 3에 보인 바와 같이 A60급 갑판 관통 관의 과도 열전달 해석과 화재시험과의 최소 오차는 6번 측정 위치에서 4.7%, 최대 오차는 4번 측정 위치에서 11.6%로 나타났다. 전체 측정 위치에서의 평균 오차는 9.9%이며, 설계사양에 따른 온도특성의 변화의 경향성도 유사한 것으로 나타났다. 이와 같이 60분간의 화재시험에 대한 과도 열전달 해석임을 감안하면 해석결과와 정확도가 검증되었다고 할 수 있다. 따라서 본 연구에서 A60급 갑판 관통 관의 생산성과 품질향상을 위해 고안된 방화설계 사양은 FTP 코드의 규정을 만족하는 것으로 확인되었다. 또한 과도 열전달 해석을 이용한 A60급 갑판 관통 관의 방화설계와 열전달 특성의 평가가 적합한 것으로 나타났기 때문에 해석적 방법을 이용하여 A60급 갑판 관통 관에 대해 좀 더 다양한 방화설계 사양 검토가 가능할 것으로 판단되었다.

5. 결론

본 연구에서는 선박 및 해양플랜트용 A60급 갑판 관통 관의 생산성과 품질향상을 위해 고안된 방화설계의 적합성을 평가하기 위해 과도 열전달 해석을 수행하였고, 화재시험을 통해 열전달 해석결과와의 타당성을 검증하였

다. 또한 A60급 갑판 관통 관의 열전달 특성은 관의 직경, 내부형상 그리고 재질과 같은 설계 사양에 따라 온도 변화를 비교하여 검토하였다. 유한요소법을 이용한 과도 열전달 해석은 FTP 코드에 나와 있는 시편사양과 온도 조건을 적용하여 수행하였다. 과도 열전달 해석결과로부터 본 연구에서 고려한 새로운 A60급 갑판 관통 관의 설계사양은 FTP 코드의 규정 온도인 180 °C 이하를 충분히 만족하였고, 검토 대상 설계 사양 중 재질 변화에 따른 온도 편차가 큰 것으로 나타났으며, 오스테나이트계 스테인리스 강재를 적용할 경우 방화성능 향상에 영향도가 높은 것으로 나타났다. 과도 열전달 해석 결과의 검증 을 위해 해석모델과 동일하게 FTP 코드를 준수하여 시험편을 제작하였고, 국제표준시험법에 따라 화재시험을 수행하였다. 화재시험 결과와 과도 열전달 해석 결과의 비교로부터 전체 측정 위치에서의 평균 오차는 9.9%였고, 설계사양에 따른 온도특성의 변화의 경향성도 유사한 것으로 확인되었다. 과도 열전달 해석을 이용한 A60급 갑판 관통 관의 방화설계와 열전달 특성의 평가가 적합한 것으로 나타났기 때문에 향후 해석적 방법을 이용하여 A60급 갑판 관통 관에 대해 좀 더 다양한 방화설계 사양 검토가 가능할 것으로 판단되었다.

References

- [1] IMO, International Convention for the Safety of Life at Sea, SOLAS 1999/2000 Amendment, UK, 2010.
- [2] MSC, Adoption of the International Code for Application of Fire Test Procedures. MSC.307(88), UK, 2010.
- [3] J. S. Yu, H. G. Sung, J. H. Oh, An experimental study on fire-resistant boom, *Journal of the Korean Society of Marine Environmental Engineering*, Vol.3, No.2, pp.25-32, 2000.
- [4] T. J. Choi, J. S. Kim, K. K. Choi, Y. S. Lim, Y. T. Kim, 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*, Vol.37, No.4, pp.431-437, 2013. DOI: <https://doi.org/10.5916/jkosme.2013.37.4.431>
- [5] J. M. Choi, H. C. Um, Y. H. Jin, 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*, Vol. 38, No.9, pp.1150-1155, 2014. DOI: <https://doi.org/10.5916/jkosme.2014.38.9.1150>
- [6] C. J. Jang, N. S. Hur, I. W. Kim, Performance experiment of H-120 class fire damper for offshore, *Journal of the Korean Society of Manufacturing Process Engineers*, Vol.13, No.2, pp.131-136, 2014. DOI: <https://doi.org/10.14775/ksmpe.2014.13.2.131>
- [7] C. Y. Song, Y. Kim, Identification of fire resistance characteristics of bulkhead penetration pieces for A-0 class compartment, *Journal of Advanced Marine Engineering and Technology*, Vol. 44, No.6, pp.414-421, 2020. DOI: <https://doi.org/10.5916/jamet.2020.44.6.414>
- [8] ABS, Mobile Offshore Drilling Units - Fire and Safety, Rules for Building and Classing, USA, 2019.
- [9] Simulia, ABAQUS User Manual, Simulia, 2018.
- [10] G. Piscopo, E. Atzeni, A. Salmi, 2019, A hybrid modeling of the physics-driven evolution of material addition and track generation in laser powder directed energy deposition, *Materials*, Vol.12, No.17, pp.1-23, 2019. DOI: <https://doi.org/10.3390/ma12172819>
- [11] I. Magnabosco, P. Ferro, A. Tiziani, F. Bonollo, Induction heat treatment of a ISO C45 steel bar: experimental and numerical analysis, *Computational Materials Science*, Vol.35, No.2, pp.98-106, 2006. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.commatsci.2005.03.010>
- [12] S. Suman, P. Biswas, P. Sridhar, Numerical prediction of welding distortion in submerged arc welded butt and fillet joints, *International conference on Design and Manufacturing*, 2016.
- [13] T. Ohmura, M. Tsuboi, M. Tsuboi, M. Onodera, Specific heat measurement of high temperature thermal insulations by drop calorimeter method, *International Journal of Thermophysics*, Vol.24, No.2, pp.559-575, 2003. DOI: <https://doi.org/10.1023/A:1022936408676>
- [14] A. C. Yunus, J. G. Afshin, Heat and Mass Transfer: Fundamentals and Applications, McGraw-Hill, 2012.
- [15] V. Neela, D. Amitava, Three-dimensional heat transfer analysis of LENS TM process using finite element method, *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, Vol.45, No.9, pp.935-943, 2009. DOI: <https://doi.org/10.1007/s00170-009-2024-9>
- [16] K. J. Hwang, S. K. Yoon, Determination of the fire protection thickness of CFT column using heat transfer analysis, *Journal of the Architectural Institute of Korea Structure & Construction*, Vol.29, No.6, pp. 65-72, 2013. DOI: https://doi.org/10.5659/JAIK_SC.2013.29.6.65
- [17] X. Y. Cui, Z. C. Li, H. Feng, S. Z. Feng, Steady and transient heat transfer analysis using a stable node-based smoothed finite element method, *International Journal of Thermal Sciences*, Vol.110, No.1, pp.12-25, 2016. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ijthermalsci.2016.06.027>
- [18] ISO, Fire Resistance Tests - Elements of Building Construction, ISO 834-1, Switzerland, 1999.

박 우 창(Woo Chang Park)

[정회원]



- 2016년 2월 : 목포대학교 대학원
조선해양공학과 (공학석사)
- 2016년 3월 ~ 현재 : 목포대학교
대학원 조선해양공학과 박사과정

<관심분야>

최적설계, 신뢰성해석, 유한요소해석

송 창 용(Chang Yong Song)

[정회원]



- 2010년 2월 : 연세대학교 대학원
기계공학과 (공학박사)
- 2010년 9월 ~ 현재 : 목포대학교
조선해양공학과 교수

<관심분야>

최적설계, 신뢰성해석, 유한요소해석