



수동화재보호 재료가 적용된 구조부재의 화재하중에 대한 강도 특성

조상찬^{1,2}·유승수¹·서정관^{1,3,†}
부산대학교 조선해양공학과¹
삼성중공업 해양설계팀²
부산대학교 선박해양플랜트기술연구원³

Strength Characteristics of Passive Fire Protection Material Applied Structural Members on Fire Load

Sang Chan Jo^{1,2}·Seung Su Yu¹·Jung Kwan Seo^{1,3,†}
Department of Naval Architecture and Ocean Engineering, Pusan National University¹
Offshore Engineering Team, Samsung Heavy Industries Co., Ltd²
The Korea Ship and Offshore Research Institute, Pusan National University³

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.

In offshore installations, fires cause the structure to lose its rigidity and it leads to structural integrity and stability problems. The Passive Fire Protection (PFP) system slows the transfer rate of fire heat and helps prevent the collapse of structures and fatality. Especially, intumescent epoxy coating is widely used in the offshore industry, and not only is the material cost expensive, but it also takes a lot of time and cost for construction. Several studies have been conducted on the efficient application and optimal design of the PFP system. However, the mechanical properties and the strength of the PFP material have not been considered. In addition, researches on the correlation between the thickness of PFP and the structural behavior were insufficient. Therefore, this study aims to analyze the thermal and mechanical effects of the PFP on the structure when it is applied to the structural member. In particular, it is intended to resolve the change in strength characteristics of the structural members as the thickness of the PFP increases.

Keywords : Offshore installation(해양플랜트), PFP system(수동화재방호 시스템), Intumescent epoxy coating(팽창성 에폭시 도장), Strength characteristics(강도 특성), Safety system(안전시스템)

1. 서론

해양자원 개발용 해양플랜트의 상부구조물(topside)은 육상의 정유공장처럼 원유를 정제하고 생산, 저장하는 기능으로 항상 화재와 폭발 등의 위험에 노출되어 있다. 이러한 고위험 해양구조물을 계획된 수명만큼 안전하고 효율적으로 운영하기 위해서는 구조물의 손상과 인명 피해를 저감하는 위험도 기반 설계와 운영이 필요하다. 2010년 미국 멕시코만에서 발생한 딥워터 호라이즌(deepwater horizon) 석유시추설비의 화재폭발 사

건은 최근에 발생한 대표적인 해양플랜트의 대표적인 사고 사례이다. 이 사고로 인해 수십 명의 시추 노동자가 부상당하거나 사망했고, 수개월 동안 대량의 원유가 유출되어 심각한 환경 재해를 발생시켰다. 이와 같은 해양플랜트의 사고로 인한 피해를 줄이기 위해 화재와 폭발사고를 대비한 안전시스템 설계는 필수적이다 (Paik & Thayamballi, 2007; Paik, 2020).

수동화재방호(Passive Fire Protection, PFP)는 석유 및 가스 산업에서 화재로부터 구조물을 보호하기 위해 해양플랜트에서 매우 널리 이용되고 있다(Fig. 1). 특히, 에폭시(epoxy)를 이용한 팽창성 PFP 재료는 1974년에 소개된 이후로 지난 30여 년



Fig. 1 Structure members with PFP applied (SR group of company, 2021)

동안 가장 많이 이용되고 (Wade, 2011) 화재가 발생했을 때, 부풀어 오르면서 열전도율(Coefficient of heat conduction)을 감소시키는 원리로 화재로 인한 열의 전달을 느리게 함으로써 구조물이 온전한 상태(integrity)로 유지되게 하는 기능을 하게 된다.

그러나 에폭시 타입의 PFP 재료는 시공과 고가의 자재비로 관련된 비용검토가 요구된다. 또한, 다양하고 정량적인 화재특성을 고려하기가 쉽지 않아 기존 PFP 설계는 보수적으로 진행되는 경우가 많다 (Koo et al., 2013). 따라서 PFP의 효율적인 적용을 위하여 최적시공위치, 화재-구조 연성 해석기법 및 해석절차 등에 관련된 연구가 수행되었다 (Yun et al., 2013; Lee, 2014; Park et al., 2016; Park and Min, 2021). 이중 직접적인 PFP 관련 연구로는 Friebe et al. (2014)은 FPSO 상부 모듈의 화재 시뮬레이션을 통해 다양한 PFP coating 및 Coat-back과 구조물의 붕괴 시간에 대한 시스템적 연구를 수행하였다. Kim et al. (2014)의 연구에서는 PFP 최적설계를 위한 범용 비선형 유한요소해석 코드를 사용하여 PFP 효과를 고려한 비선형 구조응답 해석기법 및 절차를 개발하였다. 최근 단 열재료 중 하나인 미네랄 울(mineral wool) 재료에 대하여 강도 효과에 대한 실험 및 수치해석을 통한 효과분석 연구가 최초로 수행되었다 (Park et al., 2021). 그러나 대부분의 기존 연구는 PFP는 열적 특성만 고려하여 비강도 재료로 취급하며 기계적 특성 및 PFP 시스템의 강도 연구는 미미한 실정이다. 특히, 실제 공사 시 PFP의 적용에 있어서 관련 규정 또는 실물실험 또는 화재해석을 통해 요구되는 PFP의 두께보다 더 많은 양의 PFP가 시공되는 경우가 발생한다. 이는 부재의 기하학적 형상, 작업자의 숙련도가 원인으로 보고되고 있고, 과적용된 PFP층은 1차적으로 주변 의장품과의 간섭과 구조물의 전체 무게 증가로 추가적인 비용 발생을 초래한다.

따라서 강구조물에 시공되는 PFP가 구조물의 거동에 미치는 강도적인 영향에 대한 정량화가 필요하다. 본 연구에서는 PFP가 시공된 구조부재를 대상으로, 다양한 조건과 PFP 층의 두께에 따른 열적 및 구조적 수치해석을 수행하고 구조강도 특성을 검토하였다.

2. 해석 방법

수치해석을 위하여 상용 유한요소해석 프로그램 ANSYS (2020)를 이용하여 Fig. 2의 절차로 해석을 수행하였다.

해석절차는 크게 6단계로 1) 구조하중 및 화재의 열하중이 적용되는 H-Beam/PFP 구조재 수치해석을 위한 유한요소 종류를 결정, 2) 화재의 상황을 고려하기 위해 온도 변화에 따른 재료의 열적 특성 분석, 3) 해석 대상 구조부재 선택 및 해석 시나리오 설정 4) PFP가 적용된 H-Beam의 수치해석 모델링 수행, 5) 시간의 변화에 따른 과도(transient) 열전달 해석 6) 열전달 해석의 결과를 이용한 구조응답해석 순서로 수행하였으며 최종적으로 대상 H-Beam/PFP 복합재의 구조강도특성을 분석하였다.

해석을 위한 유한요소는 PLANE55 와 SOLID70, SOLID185를 사용하였다. SOLID 요소는 PFP의 두께효과 고려를 위하여 적용되었다.

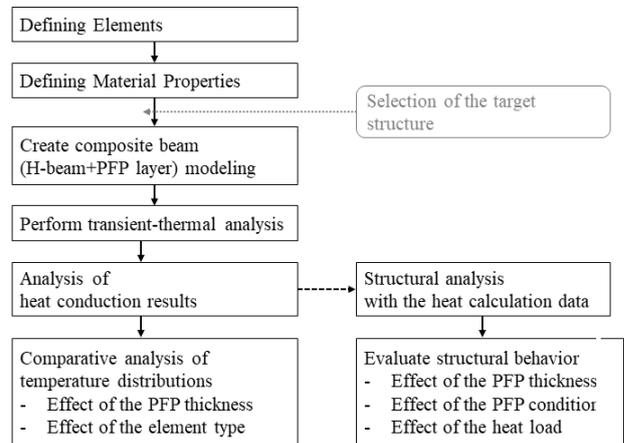


Fig. 2 Procedure for FEM method of analyzing nonlinear structural response with PFP subjected to fires

2.1 대상 구조물의 선정

해석을 위한 구조는 해양플랜트의 상부 구조물에서 주(primary) 및 부(secondary) 구조부재로 널리 사용되는 H-beam을 대상 구조부재로 선정하였다. 일반적으로 H-beam은 갑판(deck) 및 그레이팅(grating), 배관(piping), 장비(equipment) 등의 다양한 하중을 지지하기 위한 강도부재로 사용된다 (Fig. 3).

또한 해석시나리오의 대상 부재결정은 화재사고 발생 시 화재 노출 특성과 강도부재의 특성을 반영하였다. Fig. 4(a)의 경우는 H-beam이 갑판과 갑판에 작용하는 하중을 지지하는 부재로 주로 화재는 갑판의 하부에서 발생한다. 따라서 H-beam의 상단면에는 PFP 적용이 없고 화재의 열이 직접적으로 노출되지 않는다. Fig. 4(b)의 H-beam은 그레이팅 및 장비를 지지하는 구조이다. 그레이팅과 H-beam이 맞닿는 부분(플랜지의 상단면)에는 PFP가 적용되지 않으며, 이외의 부분에는 PFP가 H-beam을 보호한다. 화재로 인한 열은 모든 방향에서 직접적으로 노출되는 것으로 가정하였다. Fig. 4(c)의 H-beam은

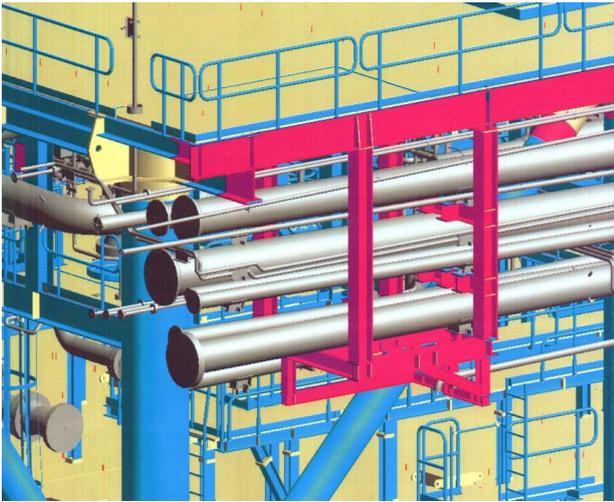


Fig. 3 H-beams for supporting decks and pipes

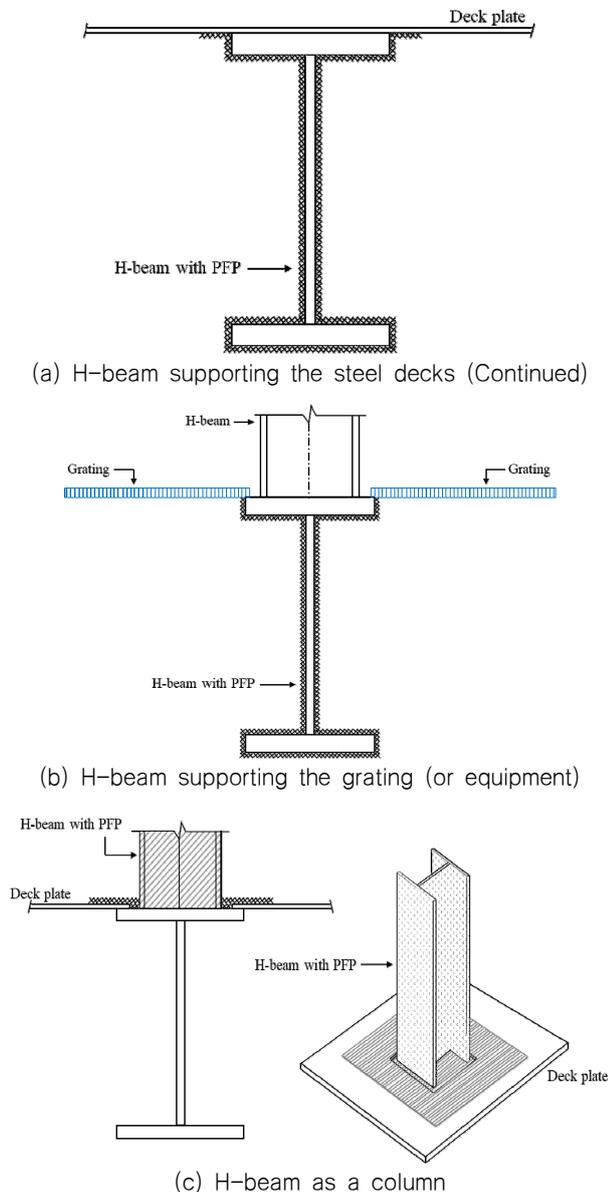


Fig. 4 Target structures selected

연직 부재로서 구조물의 기둥 역할을 하는 형상이다. H-beam은 4면에서 PFP로 보호되고, 화재로 인한 열도 H-beam의 모든 면으로 노출되는 것으로 가정하였다. 따라서 화재특성과 대상구조부재의 PFP 시공 특징을 고려한 대표적인 3가지 종류의 대상구조부재를 선정하였다.

2.2 해석 조건의 설정

선정된 세 가지의 대상구조에 대해, 정상 환경과 화재 시 화재에 의한 열전달이 진행 중인 화재 사고 상황으로 구분하였다. 또한 H-beam에 적용되는 PFP의 6가지 두께를 고려하여 PFP의 양이 구조부재에 미치는 영향을 검토하기 위하여 Table 1과 같이 5개 그룹과 총 60가지의 시나리오로 결정하였다.

그룹 A는 화재의 열에 의한 H-beam/PFP 복합체의 열전달 특성 파악을 위하여 구조적 하중이 가해지지 않는 상태를 검토하였다. 이때 유한요소는 Plane 55요소를 사용하여 화재에 대한 H-beam 단면의 열적 분포와 특성을 확인하기 위해 과도 열 해석(transient thermal analysis)을 200단계로 수행하였다. 그룹 B는 Solid70 요소를 이용해 열 해석을 수행하였다. 이 결과값을 Solid185 요소를 통한 Beam의 구조 해석(그룹D)에 반영하였다. Solid70 요소의 적절성을 평가를 위하여 그룹 A에서 수행한 열전달 해석의 데이터와 비교 분석하였다. 그룹C는 H-beam의 네 면에

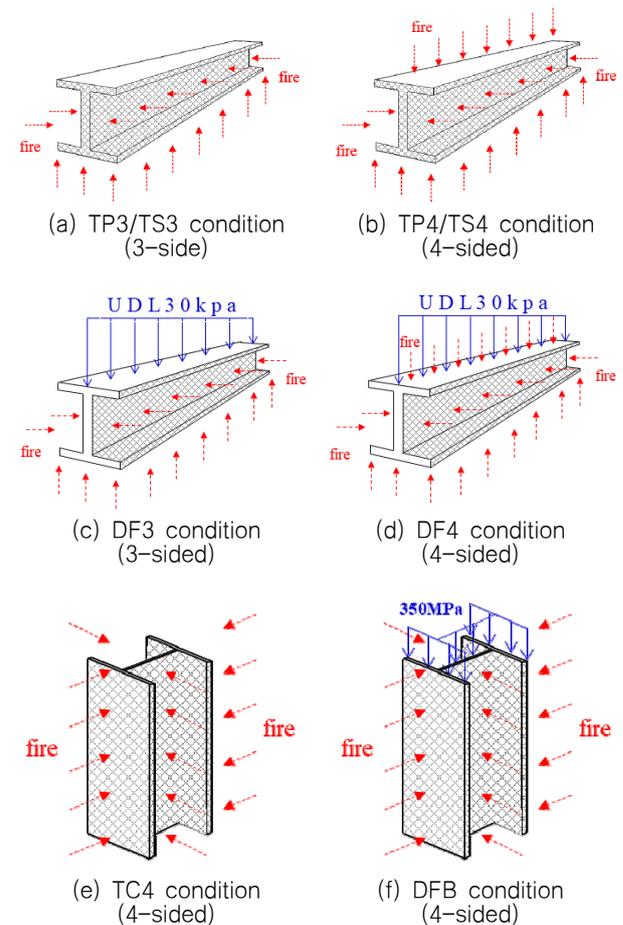


Fig. 5 Configuration of the steel members for analysis

모두 PFP가 적용된 상태에서 화재의 열이 가해지는 조건이고, 이 결과값은 그룹E의 구조 해석에 반영된다.

그룹D에서는 그룹B의 열전달 해석 결과를 토대로 등분포하중을 가해서 구조 해석을 수행하였다. 그룹 E는 압축력을 받는 기둥으로써 H-beam/PFP 복합체의 좌굴(buckling)과 연직 변위를 평가하기 위해 설정하였다.

Fig. 5는 Fig. 3의 대상 구조물을 바탕으로 한 구조 하중 및 화재의 방향성 조건(heat direction)을 보여준다. H-beam 부재 단면의 크기는 200×100×10t(mm)이고 길이는 3,000 mm로 설정하였다. Fig. 5 (a)는 H-beam/PFP 복합체의 상단면에 PFP의 보호가 없고 화재로 인한 열이 직접적으로 전달되지 않는 설정이며,

반면에 (b)는 동일한 PFP 적용 조건에서 모든 면에 화재의 열이 직접적으로 가해진다. (c), (d)의 경우, (a), (b)의 화재 조건에 연직 등분포하중(Uniform Distributed Load, UDL) 30 kPa이 전체 길이에 걸쳐 H-beam의 플랜지 상단면에 작용하고 부재의 양 끝단은 고정단으로 가정하였다. (e)는 기둥 역할을 하는 H-beam의 모든 면에 PFP가 적용되고 화재의 열 또한 모든 방향으로 노출되는 조건을 보여준다. (f)의 경우, (e)의 설정과 더불어 350 MPa의 축방향 압축력이 작용하는 것으로 가정하였다.

화재에 의한 열 하중은 Fig. 6의 International Standardization Organization(ISO) 화재 곡선 (ISO, 2012)에 따라 200분 동안 최고 온도 약 1,100 °C가 부재에 가해진다.

Table 1 Cases of the analysis in order to identify the effect of PFP thickness and fire load on H-beams

Group	No.	PFP applied	Heat	Numerical analysis		Group	No.	Structural load	Thermal data	Numerical analysis	
				Type	Element					Type	Element
A	TP3-00	3-sided	standard fire curve	transient thermal	plane55	D	NFS-00	UDL 30kPa	no fire	static structure	solid185
	TP3-01						NFS-01				
	TP3-03						NFS-03				
	TP3-06						NFS-06				
	TP3-10						NFS-10				
	TP3-15						NFS-15				
	TP4-00	4-sided			DF3-00		UDL 30kPa	results from TS3 analysis			
	TP4-01				DF3-01						
	TP4-03				DF3-03						
	TP4-06				DF3-06						
	TP4-10				DF3-10						
	TP4-15				DF3-15						
B	TS3-00	3-sided	standard fire curve	transient thermal	solid70	E	DF4-00	UDL 30kPa	results from TS4 analysis	static structure	solid185
	TS3-01						DF4-01				
	TS3-03						DF4-03				
	TS3-06						DF4-06				
	TS3-10						DF4-10				
	TS3-15						DF4-15				
	TS4-00	4-sided			NFB-00		Axial compression 350MPa	no fire			
	TS4-01				NFB-01						
	TS4-03				NFB-03						
	TS4-06				NFB-06						
	TS4-10				NFB-10						
	TS4-15				NFB-15						
C	TC4-00	4-sided	standard fire curve	transient thermal	solid70	E	DFB-00	Axial compression 350MPa	results from TC4 analysis	static structure	solid185
	TC4-01						DFB-01				
	TC4-03						DFB-03				
	TC4-06						DFB-06				
	TC4-10						DFB-10				
	TC4-15						DFB-15				

* TP: Thermal analysis with plane element,
 TS: Thermal analysis with solid element,
 TC: Thermal analysis for column member
 * -NN in No.: PFP thickness

* NFS: During no fire, structural analysis,
 DF3: During a fire, structural analysis on H-beam with 3-sided PFP,
 DF4: During a fire, structural analysis on H-beam with 4-sided PFP
 NFB: During a no fire, structural analysis on buckling,
 DFB: During a fire, structural analysis on buckling

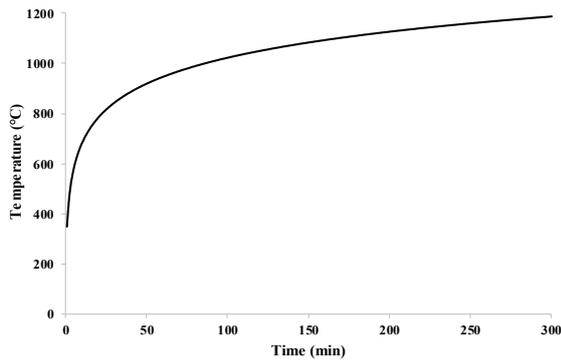


Fig. 6 Fire curve (ISO, 2002)

Table 2 Boundary conditions

Location		a	b	c
Displacement	δx	Fix	Fix	Free
	δy	Fix	Fix	Free
	δz	Fix	Fix	Free
Rotation	θx	Fix	Fix	Free
	θy	Fix	Fix	Free
	θz	Fix	Fix	Free

Notes:

- a: both ends of the beam for group D analysis
- b: one of the ends of the H-beam for group E analysis
- c: the other end of the H-beam for group E analysis

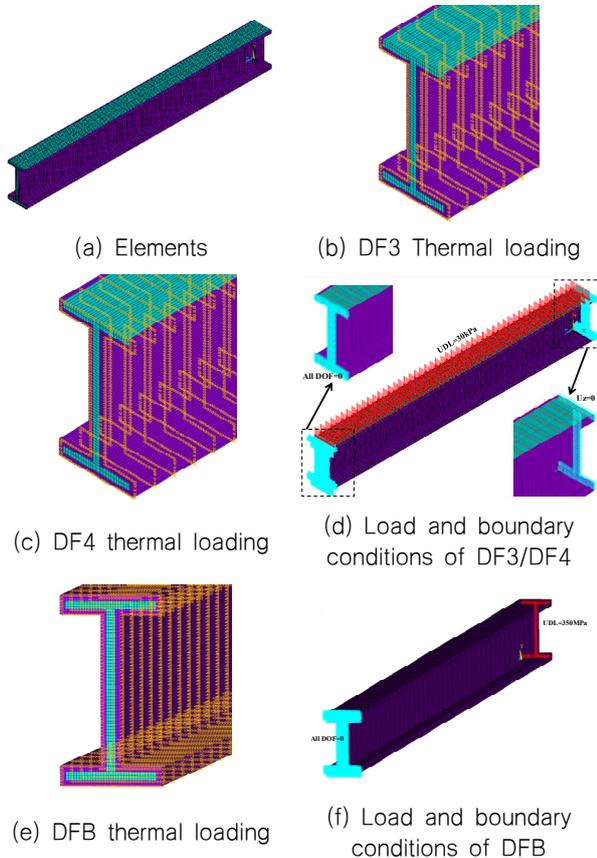


Fig. 7 Finite elements models

경계조건은 Table 2와 같이 하중이 가해지는 보의 끝단은 자유단이며, 반대쪽 끝단은 모든 변위와 모멘트를 고정조건으로 설정하고 해석모델은 Fig. 7과 같다.

2.3 재료의 물성치

화재 시 발생하는 열 하중에 대한 구조부재 및 PFP 재료에 대해서 온도 변화에 따른 각 재료특성이 정의되어야 한다 (Kim et al., 2014). 본 연구에서는 정밀한 수치해석을 위해 온도 변화에 따른 각 재료의 비열(specific heat) 및 열전도율 (thermal conductivity), 탄성계수(elastic modulus) 값을 적용하였다.

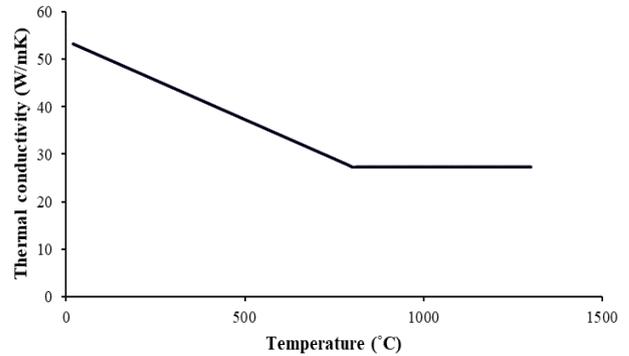
2.3.1 Steel의 물성치

온도에 따른 강재의 열전도율 (λ_a , W/mK)은 식 (1)과 Fig. 8(a)의 값을 가진다 (European standard, 2005).

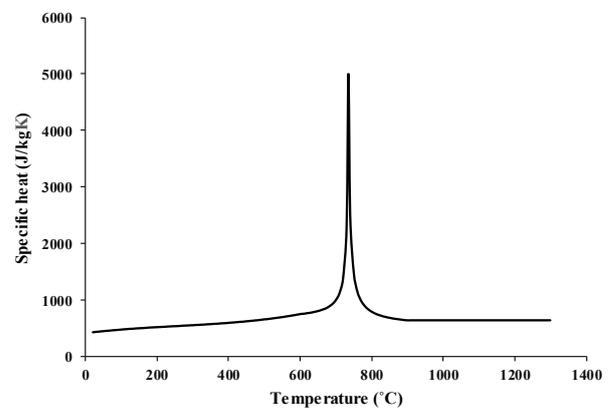
$$\lambda_a = 54 - 3.33 \times 10^{-2} \theta_a \text{ for } 20^\circ\text{C} \leq \theta_a < 800^\circ\text{C} \quad (1a)$$

$$\lambda_a = 27.3 \text{ for } 800^\circ\text{C} < \theta_a \leq 1200^\circ\text{C} \quad (1b)$$

여기서 θ_a 는 강재의 온도[°C]를 이다



(a) Thermal conductivity of steel



(b) Specific heat of steel

Fig. 8 Variation of the steel's properties with temperature

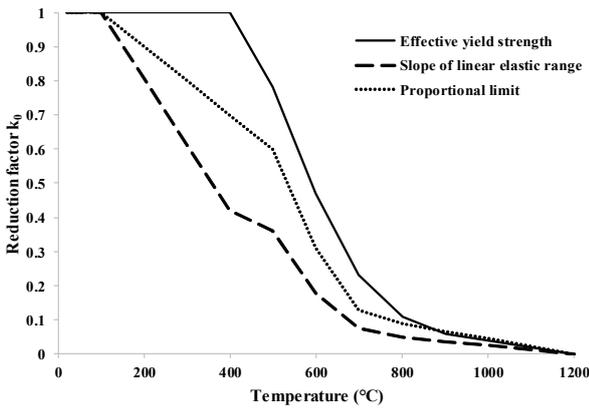


Fig. 9 Reduction factors for the stress-strain relationship of carbon steel (European Standard, 2005)

강재의 비열(C_a , J/kg·K)은 아래의 식 (2)과 같으며, Fig. 8(b)와 같이 나타난다 (European standard, 2005). Eurocode 3에서는 강재의 강도 변화를 Fig. 9와 같이 나타내고 있다. 강재의 탄성계수는 100 °C까지는 변화가 없지만 그 이후부터는 감소하기 시작하는데, 500 °C에서 40 % 감소하고 800 °C에서는 90 %이상 감소하는 것을 확인할 수 있다.

$$C_a = 425 + 7.73 \times 10^{-1} \theta_a - 1.69 \times 10^{-3} \theta_a^2 + 2.22 \times 10^{-6} \theta_a^3 \quad (2a)$$

for $20^\circ\text{C} \leq \theta_a < 600$

$$C_a = 666 + \frac{13002}{738 - \theta_a} \quad (2b)$$

for $600^\circ\text{C} \leq \theta_a < 735^\circ\text{C}$

$$C_a = 545 + \frac{17820}{\theta_a - 731} \quad (2c)$$

for $735^\circ\text{C} \leq \theta_a < 900^\circ\text{C}$

$$C_a = 650 \quad (2d)$$

for $900^\circ\text{C} \leq \theta_a < 1200^\circ\text{C}$

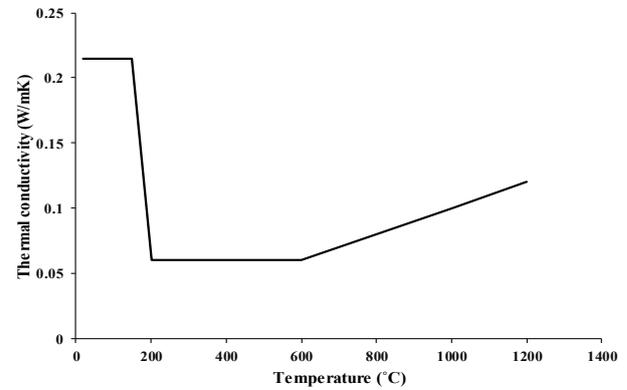
2.3.2 에폭시 타입 PFP 재료의 물성치

PFP의 온도 증가에 따른 열전도율을 변화는 Fig. 10(a)와 같다. 약 150 °C 부근 에서 급격히 작아지는 것을 볼 수 있다. 150°C 온도 지점부터 PFP가 팽창하면서 열전달 속도를 낮춘다. 또한 에폭시 타입 PFP의 비열은 Fig. 10(b)와 같이 온도에 따라 변화하는 특성을 가지고 있다.

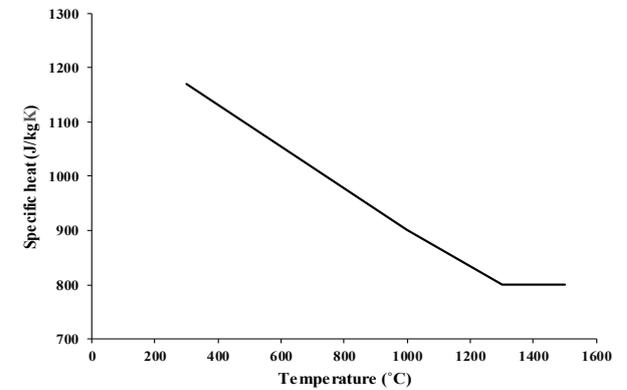
Table 3은 에폭시 타입 PFP의 대표적인 제품인 Chartek7의 재료 특성 (International paint, 2010)을 이용하여 PFP의 기계적 특성을 고려하였다.

Table 3 Material characteristics of Epoxy type PFP

Property	Value	Units
Density	1000	kg/m ³
Thermal conductivity	0.213	W/m°C
Coefficient of thermal expansion	68×10 ⁻⁶	cm/cm°C
Specific heat	1.17	J/gK
Tensile strength	1.28	MPa
Tensile modulus	1786	MPa
Compressive strength	18.6	MPa
Compressive modulus	1172	MPa
Lab. shear strength	10.1	MPa



(a) Thermal conductivity of PFP



(b) Specific heat of PFP

Fig. 10 Variation of the epoxy type PFP's properties with temperature

3. 열전달 해석 결과

화재에 의한 열이 가해지는 상황에 대해 Solid70 요소를 이용한 해석(그룹B)과 Plane55 요소(그룹A)의 열전달 해석 결과를 비교하였다. 각 Cases에 대한, H-beam 정 중앙 위치에서의 시간에 따른 온도 변화를 Fig. 11에 나타내었다. 두 결과의 오차는 5% 이내이며, 온도 변화율 결과값은 매우 잘 일치하는 것을 확인할 수 있다.

PFP를 적용했을 경우, 열전달의 지연 효과는 소량의 PFP가 시공되더라도 구조물의 온도 증가를 지연시키는 것을 확인할 수 있다. 예상한 것과 같이 PFP layer의 두께가 커질수록 시간에 대한 온도의 변화율이 감소하고, 화재 발생 200분의 경과 후, H-beam에 적용된 PFP 두께와 H-beam 단면 중앙점 온도의 관계는 Fig. 12와 같다. 모든 경우에서, PFP의 두께가 증가됨에 따라 열의 전달이 더욱 지연됨을 확인할 수 있다.

Fig. 11과 12의 결과를 통해, 6 mm 이상의 두께에서는 PFP 적용량의 증가에 비해 온도 변화율의 감소폭은 크지 않음을 확인할 수 있다. 그리고 두께가 6 mm 이상인 TP3과 TS3의 해석에서는 화재 발생 200분까지도 온도가 100 °C를 넘어가지 않는다. 강재의 탄성계수 변화의 시작점이 100 °C임을 고려하면, 상부 플랜지에 열이 직접적으로 전달되지 않는 경우에는 구조부재의 변형은 열에 의한 효과가 크지 않음을 확인할 수 있다. 또한 열전달 측면에서 H-beam 부재에 적절한 PFP 두께는 6 mm 정도로 예상할 수 있고, 그 이상의 두께 증가는 열전달 속도로 설명할 수 있으나 열의 정량적인 지연효과에 대한 영향은 크지 않음을 확인할 수 있다.

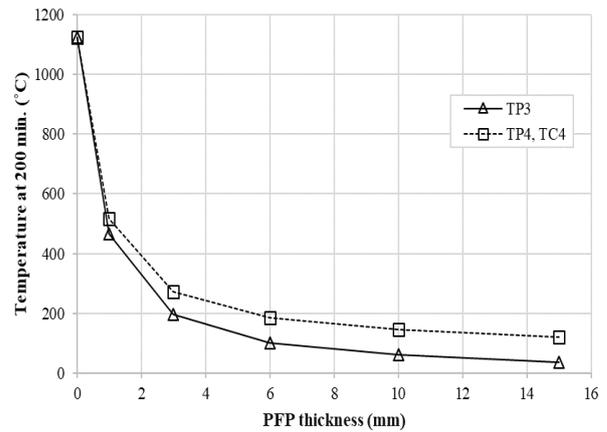


Fig. 12 Change in temperature with PFP thickness

4 구조 해석 결과

4.1 구조강도 특성

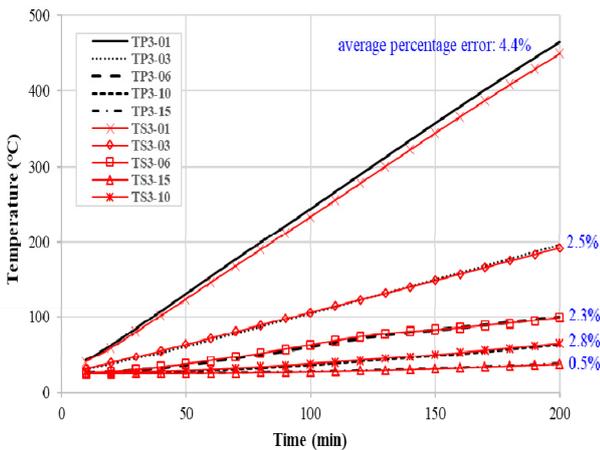
화재가 발생하지 않은 조건에서의 H-beam/PFP 복합체의 구조적 거동을 살펴보기 위해, Fig. 13과 같이 H-beam 단면 중앙점에서의 연직 변위 값의 변화율(rate of change)로 표현하였다.

변화율은 PFP가 적용되지 않은 H-beam(NFS-00)의 결과에 대한 PFP가 적용된 상태(NFS-01, 03, 06, 10, 15)의 결과의 비율이다. NFS의 그래프는 PFP의 적용량에 비례해서 변위가 커지는 경향을 보여준다. 두께 6mm 지점에서 PFP의 미적용 상태보다 약 10%의 변위가 추가로 발생한다. 이는 보에 추가되는 PFP의 자중(self-weight)에 의한 효과로 설명할 수 있다. 자중을 고려하지 않은 경우 PFP의 두께 증가는 보의 변형에 저항하는 강도적인 기여 효과로 판단할 수 있다.

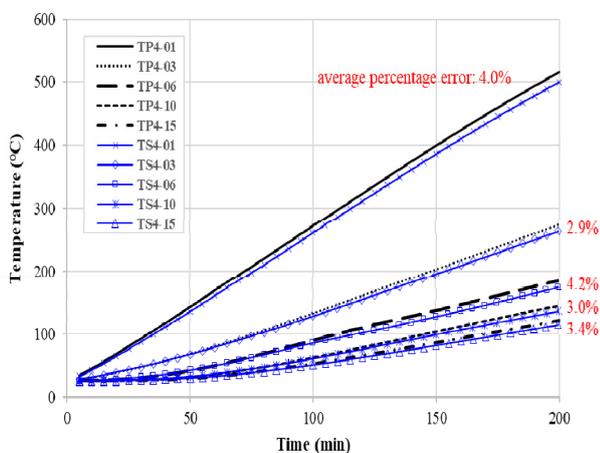
Fig. 14에서는 PFP의 적용에 따른 보의 최대 von Mises stress의 변화율을 나타내었다. Von mises stress는 PFP의 적용으로 약 20% 감소하는 결과를 보인다. 즉, H-beam에 부착된 PFP는 부재의 강도를 높인데 긍정적 영향을 준다고 볼 수 있다. PFP의 두께 증가로 인해 응력은 증가하는 경향을 보이는데, 이것 또한 PFP 자중의 영향으로 판단된다. 결과들을 정리하면, 화재의 열이 없는 조건에서 구조부재에 적용된 PFP는 그 무게의 증가로 인해 보의 처짐은 증가시키지만, 보 내부응력은 감소되는 것을 알 수 있다.

화재 발생 200분 후, PFP의 적용이 H-beam/PFP 복합체의 변형에 미치는 영향을 Fig. 15를 통해 확인할 수 있다. 화재하중에 대한 PFP의 영향은 순수 구조부재 대비 약 90%의 변위를 감소시키는 결과를 나타낸다. 특히 보의 상부 플랜지에 열이 직접적으로 전달되지 않는 DF3의 경우, 화재가 없을 때의 변위와 매우 유사한 결과를 보여줄 정도로 PFP는 보의 구조적 거동에 큰 영향을 주는 것으로 확인되었다.

시간의 경과에 따른 연직 변위의 특성은 Fig. 16과 같이 PFP의 적용으로 인해 시간-변위의 변화율이 현저히 줄어드는 것을



(a) TP3 and TS3



(b) TP4 and TS4

Fig. 11 Change in temperature over time

확인할 수 있다. DF3와 DF4의 결과를 비교해보면, 100분의 시간까지는 서로 유사한 변위값을 보이나 100분을 기점으로 DF4는 급격히 변형이 증가하고 DF3는 완만하게 변형이 발생하는 것을 볼 수 있다. DF3의 경우 H-beam의 내부 평균온도가 200분 동안 100°C를 넘어가지 않지만, DF4는 100분을 기점으로 100 °C이상의 값을 가지고 강재의 탄성계수가 작아지기 시작하는 지점이기 때문에 판단된다. PFP의 두께 증가는 부재의 변형에 기여하는 정도는 적음을 확인 할 수 있다. 이러한 현상은 NFS의 결과와 같이 PFP의 두께 증가에 따른 직접적인 강도 증가로 판단할 수 있다.

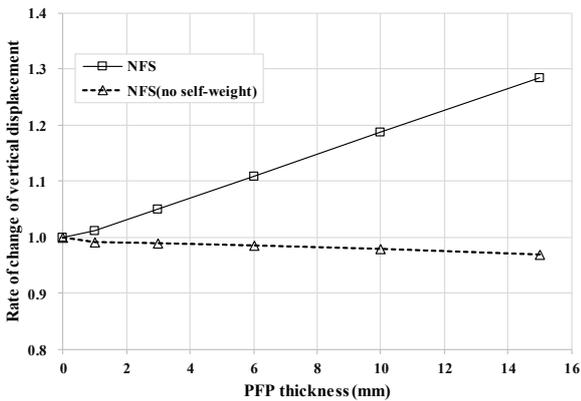


Fig. 13 Deflection change in case of no fire

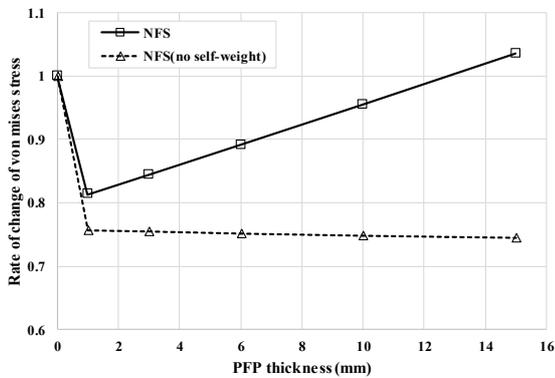


Fig. 14 Stress change in case of no fire

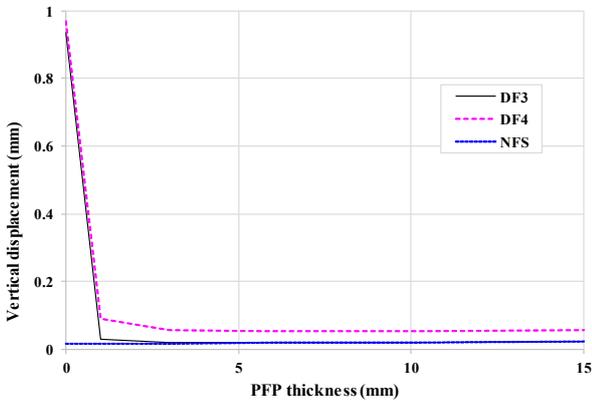
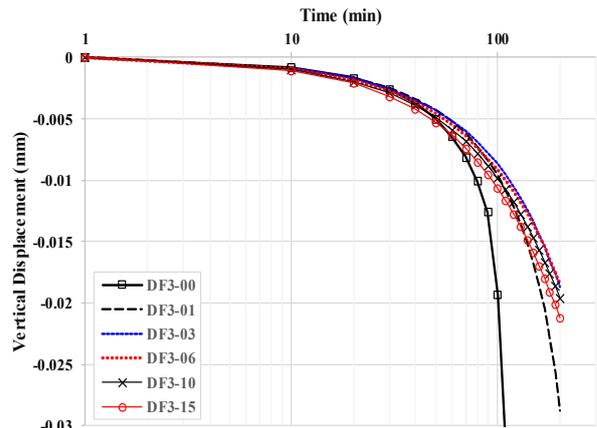
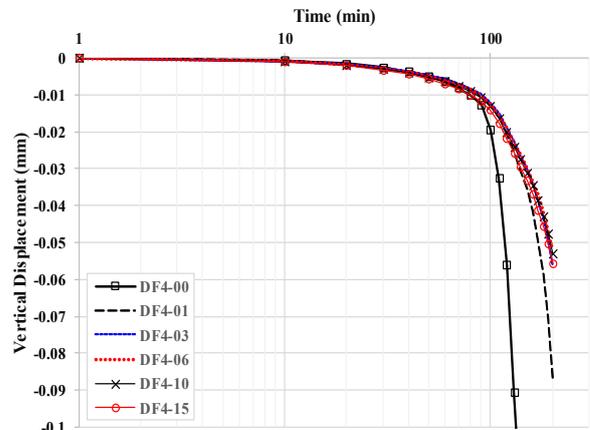


Fig. 15 Comparison of the vertical displacement after 200 minutes of fire



(a) DF3 analysis

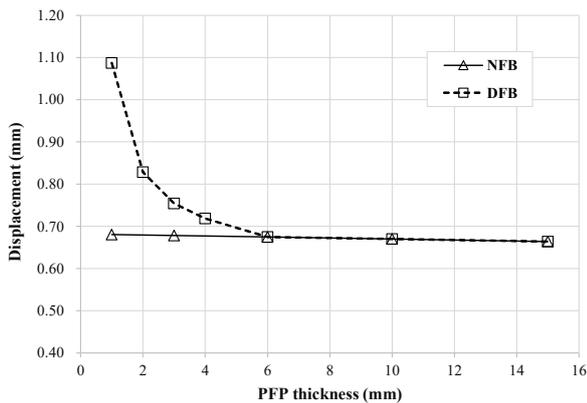


(b) DF4 analysis

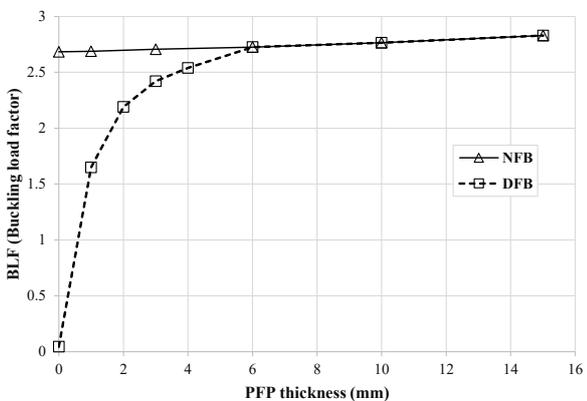
Fig. 16 Time-Displacement curve by PFP thickness

4.2 좌굴강도 특성

축방향 압축력을 받는 H-beam에 PFP가 적용되었을 경우의 구조적 거동을 살펴보기 위해 시나리오 그룹E의 해석 결과를 분석하였다. Fig. 17(a)는 PFP의 적용에 따른 H-beam의 축방향 변위 값을 보여준다. 화재가 발생하지 않는 상황(NFB)에서는 PFP의 적용으로 미소한 변위의 감소를 보이지만, 화재의 열이 작용하는 상황(DFB)에서는 PFP의 역할이 뚜렷이 나타난다. 6 mm 이상의 PFP 두께에서는 앞선 해석 결과들과 동일하게 변형량이 크지 않다. 동일한 경향을 (b)의 좌굴하중계수(BLF, Buckling Load Factor) 값에서도 확인할 수 있다. BLF는 압축력을 받는 구조물의 좌굴에 대한 강도를 평가하는 지표로서, 좌굴을 일으키는 임계하중을 실제 부재에 가해지는 압축력으로 나눈 상대적인 비율로 정의된다. BLF가 크다는 것은 그만큼 부재가 좌굴에 대해 안전함을 의미한다. 본 연구의 조건에서 화재 발생 200분 후, PFP의 적용으로 PFP가 없는 경우보다 약 60배의 BLF가 증가하는 것으로 확인되었다. 즉, PFP는 좌굴에 대한 안정성의 증가에 기여한다는 것을 확인할 수 있다.



(a) Displacement (after 200 minutes of fire)



(b) BLF value (after 200 minutes of fire)

Fig. 17 Displacement and BLF for each PFP thickness

5. 결론

PFP는 해양플랜트 구조물에서 화재에 대한 구조물의 화재에 수동적 보호시스템으로 널리 사용된다. 본 연구에서는 에폭시 타입 PFP가 구조물에 미치는 구조 강도적 특성을 살펴보기 위하여 화재의 발생 전과 발생 중으로 구분하고 다양한 PFP 두께를 고려하여 수치해석을 수행하였다. 이를 바탕으로 다음과 같은 결론을 도출하였다.

- 1) 열전달 해석 결과를 통해, 선정된 화재시나리오 대해서 PFP의 적용은 열의 전달 속도를 충분히 지연시키는 것으로 확인하였다. 또한, 적용되는 PFP의 두께 증가는 열전달 감소 효과는 있으나 특정 두께를 넘어서면 그 효과가 줄어 든다.
- 2) 화재가 없는 상황, 즉 강 구조부재에 열 하중이 없는 경우 PFP가 적용된 구조부재의 강도는 증가함을 확인하였다. PFP 자중으로 인해 처짐량은 증가하지만 내부 응력은 감소하는 결과를 보였다.
- 3) 화재에 따른 열이 강재 부재에 전달되는 경우, PFP의 적용으로 인해 처짐은 약 90%이상 감소하고 시간-변위의 변화율이 감소하는 것을 확인하였다.
- 4) 좌굴 평가에서, PFP가 적용된 H-beam 부재는 PFP 미적

용 상태에서 보다 좌굴임계하중 값이 60배 이상 증가함을 보였다.

본 연구는 PFP 재료의 적용에 유용한 자료로 활용될 것으로 기대되며, 이러한 연구를 바탕으로 추후 다양한 조건과 PFP 층의 두께에 따른 구조 강도 특성에 대한 실험적 연구를 수행하여야 할 것이다.

후기

본 연구는 산업통상자원부의 재원으로 추진된 ‘한-영 해양플랜트 글로벌 전문인력양성사업(N0001288)’과 추진 중인 ‘미래 해양플랜트 글로벌 전문인력양성사업(P0012646)’의 지원으로 수행된 연구결과입니다.

References

ANSYS, 2020. *User's Manual (Version 2020 R1)*. ANSYS Inc.: Pennsylvania.

European Standard, 2005. *Eurocode 3: Design of Steel Structures – Part 1–2: General Rules – Structural Fire Design*, European Committee for Standardization, Brussels.

Friebe, M., Jung, B.J & Jim, Y., 2014. A parametric study on the use of passive fire protection in FPSO topside module, *International Journal of Naval Architecture and Ocean Engineering*, Vol.6, No.4, pp.826–839.

International Standardization Organization(ISO), 2012. ISO 834–8: *Fire-resistance tests – Elements of building construction – Part 8: Specific requirements for non-load bearing vertical separating elements*, International Organization for Standardization.

International, 2020. *International Chartek7 passive fire protection*, <https://www.international-pc.com/products/chartek-7> [Accessed 9 July 2021].

Kim, J.H. et al., 2014. Methods for nonlinear structural response analysis of offshore structures with passive fire protection under fires. *Journal of Ocean Engineering and Technology*, 28(4), pp.294–305.

Koo, M.J., Choi, J.W. & Yoon, H.B., 2013. Introduction of fire protection technology and its design method of offshore facilities, *Transactions of the Korean Society Mechanical Engineers. C*, 1(1), pp.59–57.

Lee, C.W., 2014. Production and performance test input of the H-120 grade fire damper prototype for the offshore plant, *Journal of Korean Society of Mechanical Technology*, 16(4) pp.1603–1609.

Paik, J.K., 2020. *Topics in safety, risk, reliability and quality : Advanced Structural Safety Studies*. Springer, Springer Nature Singapore.

Paik, J.K & Thayamballi, A.K., 2007. *Ship-shaped offshore Installations: Design, Building, and Operation*. Cambridge University Press: Cambridge.

Park, D.K. et al., 2021. Effects of the structural strength of fire protection insulation systems in offshore installations. *International Journal of Naval Architecture and Ocean Engineering*. 13, pp.493–510.

Park, H., Kang, J.W., & Lee, J., 2016. Nonlinear Thermo-mechanical Analysis Considering Heat Flow under Fire Conditions. *Journal of the Computational Structural Engineering Institute of Korea*, 29(4), pp. 369–376.

Park, M.J., & Min, J., 2021. Insulation Design for Circular Spacers of Steel-Polymer Prefabricated Floor under Fire. *Journal of the Architectural Institute of Korea*. 37(10), pp. 227–234.

SR group of companies, 2021. [Online] Available at: <https://www.srgroup.com.sg/assets/img/projects/Singapore%20Jurong%20Cogen%20Project/2.jpg> (Accessed 16 April 2021).

Wade R., 2011. A review of the robustness of epoxy passive fire protection (PFP) to offshore environments, *Corrosion Conference and Expo 2011*, Houston, USA, 13 March.

Yun, S.H. et al., 2013. Thermal-structure Interaction Parallel Fire Analysis for Steel-Concrete Composite Structures under Bridge Exposed to Fire Loading. *Journal of the Computational Structural Engineering Institute of Korea*, 26(4), pp.283–292.

