

Ansys를 활용한 플랜트 시설물 내화성능에 대한 해석적 연구

Analytical Study of Fire Resistance Performance of Plant Facilities using Ansys

최두찬¹ · 양민혁^{2*} · 오수민³ · 양소진⁴Doo Chan Choi¹, Min Hyeok Yang^{2*}, Su Min Oh³, So Jin Yang⁴¹Chief Executive Officer, KF UBIS CO., Ltd, Seoul, Republic of Korea²Researcher, KF UBIS CO., Ltd, Seoul, Republic of Korea³Researcher, KF UBIS CO., Ltd, Seoul, Republic of Korea⁴Researcher, KF UBIS CO., Ltd, Seoul, Republic of Korea

*Corresponding author: Min Hyeok Yang, ymh6865@kfubis.com

ABSTRACT

Purpose: This study aims to analyze the fire resistance performance applied to plant facilities with high fire risk in Korea, secure suitable fire resistance performance, and ensure the fire safety of plant facilities. **Method:** Using the finite element analysis program Ansys, thermal transfer analysis and structural analysis were performed with fire load and fireproof coating as variables, and the fire resistance performance of plant facilities was analyzed based on the analysis results. **Result:** The fireproof coating applied to domestic plant facilities failed to secure fire resistance performance when the fire load of hydrocarbon fire presented in UL 1709 was applied, and it was confirmed that the deformation of steel after the fire was also significant. **Conclusion:** The current fire resistance performance applied to plant facilities in Korea cannot secure fire resistance performance in sudden fire growth and large fire loads like petrochemical plants, and it is necessary to secure fire safety by evaluating suitable fire resistance performance through performance evaluation of plant facilities.

Keywords: Plant, Fire Resistance Performance, Finite Element Analysis, Heat Transfer Analysis, Structural Analysis

요약

연구목적: 본 연구는 화재위험도가 높은 플랜트 시설물에 적용하고 있는 국내 내화성능을 분석하고 적합한 내화저항성능을 확보하여 플랜트 시설물의 화재 안전성을 확보하고자 한다. **연구방법:** 유한요소해석 프로그램인 Ansys를 활용하여 화재하중과 내화피복을 변수로 열전달 해석과 구조해석을 수행하고 해석 결과에 따른 플랜트 시설물의 내화성능을 분석하였다. **연구결과:** 국내 플랜트 시설물에 적용된 내화피복은 UL 1709에 제시된 탄화수소화재의 화재하중을 적용하였을 때 내화성능을 확보하지 못하였으며 화재 후 강재의 변형 또한 크게 나타남을 확인하였다. **결론:** 현재 플랜트 시설물에 적용된 국내의 내화성능은 석유화학 플랜트 등과 같이 급격한 화재성장과 큰 화재하중에서 내화성능을 확보할 수 없으며 플랜트 시설물의 성능평가를 통해 적합한 내화성능을 평가하여 화재 안전성을 확보하여야 한다.

핵심용어: 플랜트, 내화성능, 유한요소해석, 열전달 해석, 구조해석

Received | 1 December, 2023

Revised | 8 December, 2023

Accepted | 8 December, 2023

OPEN ACCESS



This is an Open-Access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution Non-Commercial License (<http://creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0>) which permits unrestricted noncommercial use, distribution, and reproduction in anymedium, provided the original work is properly cited.

서론

최근 중국 상해 케미칼 플랜트 화재(2022), 이탈리아 산 줄리아노 화재(2022), 울산 정유공장 화재(2022), 미국 텍사스 사우스레이크 화재 등 플랜트 시설물에 대한 화재는 빈번히 일어나고 있다. 플랜트 시설물은 단일형태의 생산시설이 아닌 복합적인 형태의 시설물로서 기계 장치들이 유기적으로 연결되어있어 공정 목적에 맞춰 원료 또는 중간재, 최종 제품을 생산할 수 있는 시설물이다. 특히 발전, 오일, 가스 및 석유화학 분야는 일반 건축물에 비해 가연성 물질의 적재량이 많아 화재 발생 시 높은 화재하중 및 빠른 화재성장을 유발할 가능성이 크며, 화재로 인한 피해와 더불어 가스류 및 독성물질 확산으로 인해 폭발 등의 다수의 인명피해를 유발하는 국가적인 대형 재난으로 확대될 수 있다. 이러한 화재 성장으로 플랜트 시설물은 특별히 화재 안전에 대한 대비가 필요하며 화재 시 시설물의 붕괴를 막기 위해 구조물, 지지대, 파이프랙 등의 내화성능을 확보는 필수적이라 할 수 있다.

국내의 건축법규에서는 “건축물의 피난·방화구조 등의 기준에 관한 규칙”에서 내화성능을 규정하여 적용하고 있으며, 50MPa 이상의 설계강도를 가지는 고강도 콘크리트 부재나 그 외의 구조부재의 경우, KS F 2257-1에 제시된 표준시간-가열 온도 곡선(Standard fire, Cellulosic Fire Curve)을 따라 열하중을 가한 뒤 부재의 하중지지력 및 차열성, 차염성을 기준으로 한 내화성능평가를 통해 검증된 부재에 대해서 내화구조로 인정하고 있다. 하지만 빠른 화재성장과 높은 화재하중을 가지고 있는 플랜트 시설물의 화재 안전성을 위해서는 보다 빠르고 높은 화재곡선으로 평가되어야 한다. 한국산업안전보건공단에 서 발행한 “내화구조에 관한 기술지침”에 따르면 정유 및 석유화학공장 등 탄화수소 물질을 다량 보유 및 취급하고 빠른 시간 내에 높은 온도에 노출될 수 있는 경우에는 UL 1709에 제시되어 있는 탄화수소 화재(Hydrocarbon fire) 또는 동등 이상의 시험방법을 적용하는 것을 고려하여야 한다고 제시하고 있다.

따라서, 본 연구에서는 유한요소해석 프로그램인 Ansys를 활용하여 현재 국내 내화기준 KS F 2257-1을 적용한 플랜트 시설물과 해외기준 UL 1709를 만족하는 내화기준을 변수로 열전달 해석과 구조해석을 수행하였다. 열전달 해석은 사전에 비재하 조건으로 수행된 실험 내화시험 데이터와 비교 분석하였으며, 열전달 해석으로 얻어진 온도분포를 해석 모델에 대입하여 구조해석을 진행하였다.

내화시험 시나리오 및 모델링

시험변수 및 시험체 모델링

본 연구에서는 유한요소해석 프로그램인 Ansys를 활용하여 열전달 해석과 구조해석을 진행하였으며, 실제 내화시험 데이터와 비교분석을 수행하였다. 실제 내화시험과 비교 분석을 위하여 시험의 변수는 Table 1과 같이 내화시험을 수행한 변수와 똑같이 적용하였다.

Table 1. Scenario

시험체	화재곡선	내화도료
B-SF-AC	표준시간-가열온도 곡선 (Standard fire)	아크릴 내화도료 (KS F 2257-1)
B-HF-AC	탄화수소 화재 (Hydrocarbon fire)	아크릴 내화도료 (KS F 2257-1)
B-HF-EP	탄화수소 화재 (Hydrocarbon fire)	에폭시 내화도료 (UL 1709)

해석 모델링은 실제 시험에서 수행된 시험체를 바탕으로 Fig. 1과 같이 전체 스패ん길이 4.7m에 단면 400×200×8×13로 모델링 하였고 내화피복된 합성보의 치수 또한 실제 치수를 바탕으로 적용하였으며, 실제 내화시험을 모사하기 위하여 가열로 덮개인 콘크리트를 덮어 모델링하여 수행하였다. 또한, 강재와 내화도료는 multi-body 조건을 적용하여 노드를 공유하도록 하였으며 콘크리트와 내화도료 간 bonded 조건을 부여하여 모델링하였다.

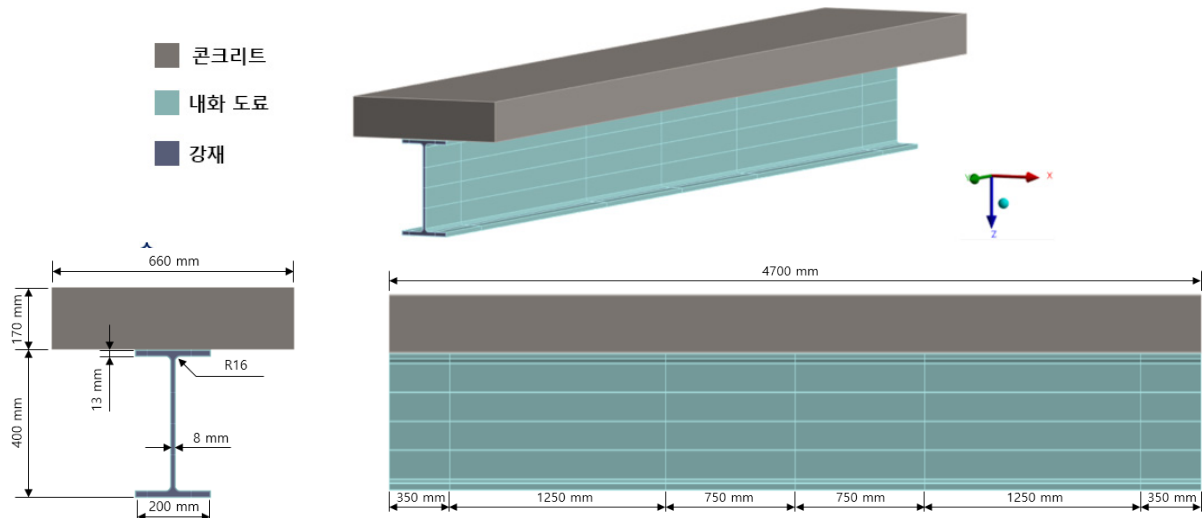


Fig. 1. Dimensions of composite beam modeling

화재노출조건은 Fig. 2와 같이 현재 국내에서 적용하고 있는 KS F 2257-1의 표준시간-가열온도 곡선(Standard fire)과 해외에서 사용하고 있는 Eurocode 및 UL1709에서 제시한 탄화수소화재(Hydrocarbon fire)를 화재하중으로 선정하여 수행하였다.

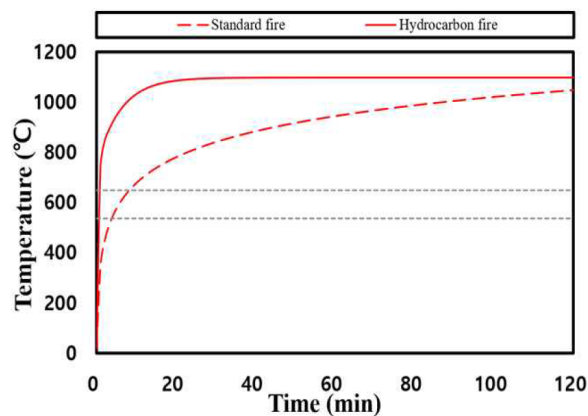


Fig. 2. Time-temperature curve of fire load

재료의 물성치

강재의 열전달 및 구조해석을 위해선 화재 시 발생하는 열 하중에 대한 강재의 온도 변화에 따른 재료 특성을 알아야한다. 본 연구에서는 정확한 수치해석을 위해 Fig. 3과 같이 Eurocode 3에 따라 온도에 따른 강재 강도 변화율을 참고하여 물성치를 적용하였으며, Fig. 4와 같이 온도 변화에 따른 비열 및 열전도율 값을 적용하였다.

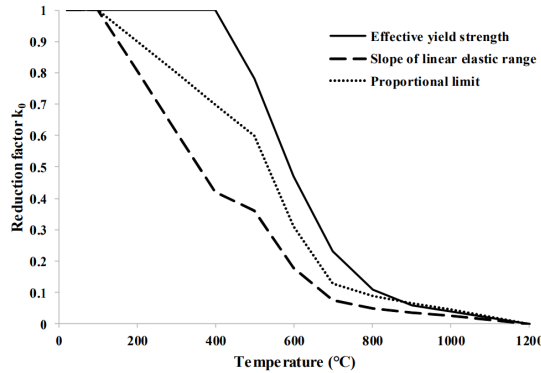


Fig. 3. Reduction factors for the stress-strain relationship of carbon steel

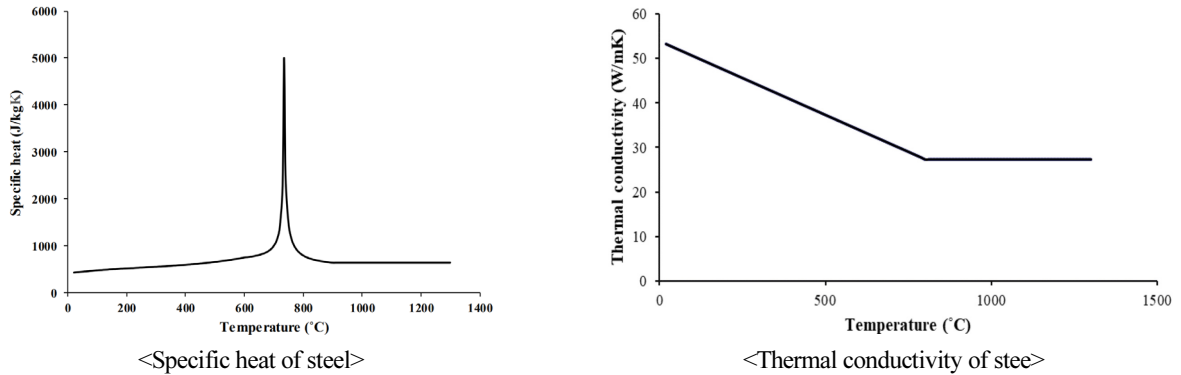


Fig. 4. Time-temperature curve of Fire load

열전달 해석 및 구조해석

열전달 해석 방법

열전달 해석을 위하여 시험체의 가열면에 표준화재 온도 곡선과 탄화수소화재의 온도 곡선을 적용한 가열온도를 적용하였으며 콘크리트 덮개와 붙어있는 시험체 상부 부분은 비 가열면으로 설정하여 구조해석만 진행하였다. 시험체의 온도는 실제 내화시험 시험체와의 비교분석을 위해 내화시험과 Fig. 5 같이 동일한 웨브의 중간지점, 상부 플랜지 끝에서 50mm 지점, 웨브와 하부 플랜지 연결부, 하부 플랜지 끝에서 30mm 지점을 측정하였으며, 슬래브 중간지점과 각각 750mm 이격된 지점 세 지점에서 측정하였다.

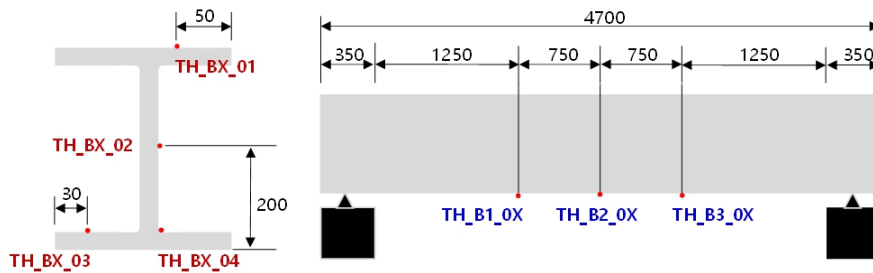


Fig. 5. Detail specification of specimens

열전달 해석 결과

화재하중 및 내화도료를 변수로 120분 내화성능 확보를 목표로 수행한 열전달 해석결과 Fig. 6의 (a)와 같이 B-SF-AC 시험체는 하부 플랜지 중앙 TH_B1_03 지점에서 564.89°C로 가장 높게 측정 되었으며 평균온도는 531.1°C로 120분 내화성능을 확보하였다. B-HF-AC 시험체의 경우 온도분포는 Fig. 6의 (b)와 같이 나타났으며, 평균온도는 645.8°C로 측정되었고 최고온도는 하부 플랜지 중앙 TH_B1_03 지점에서 755.77°C로 세 시험체 중 가장 높게 나타났다. 이는 내화성능 기준인 최대온도 649°C를 100°C 이상 초과한 온도로 120분 내화성능을 확보하지 못한 것으로 나타났다. B-HF-AC 시험체의 경우 Fig. 6의 (c)와 같이 온도가 분포 되었으며 최고온도는 648.08°C, 평균온도는 528.3°C로 나타나 120분 내화성능을 확보하였다.

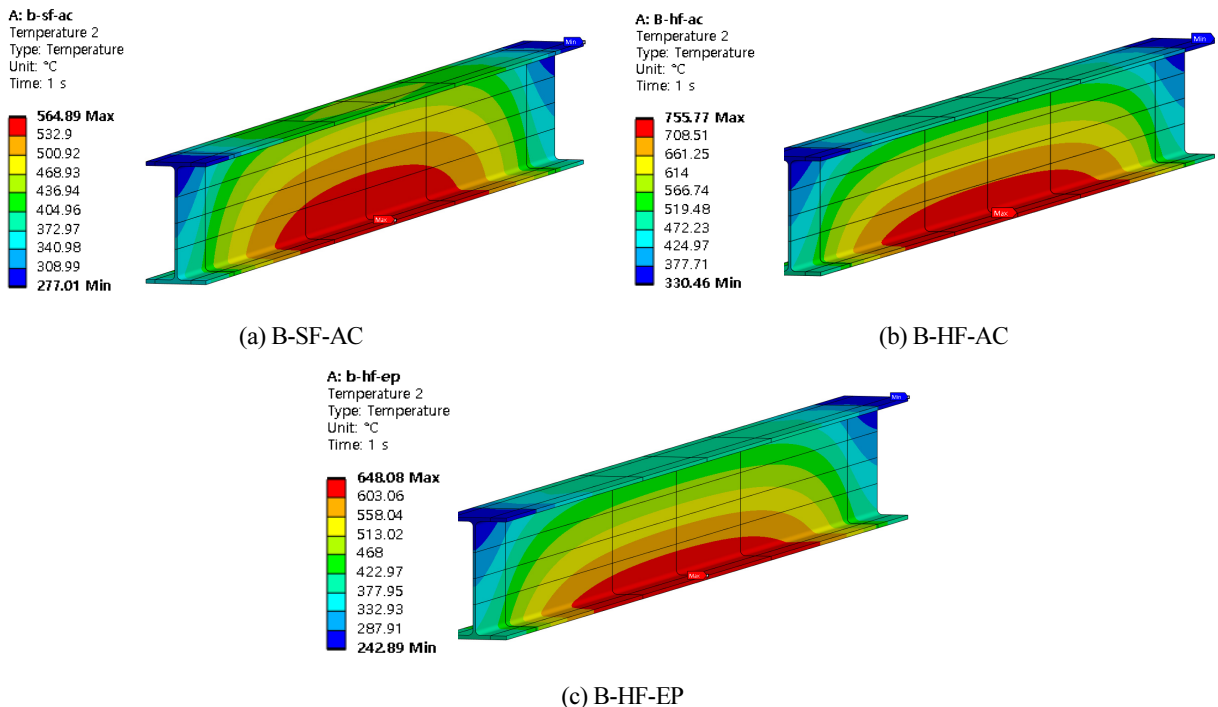


Fig. 6. Detail specification of specimens

내화시험과 해석결과 비교

사전에 수행된 내화시험 데이터와 열전달 해석 데이터를 각 지점별 평균온도를 비교하여 Fig. 7에 나타내었으며, 구조해석을 진행하기 전 오차율을 확인해 열전달 해석의 적절성을 검증하였다.

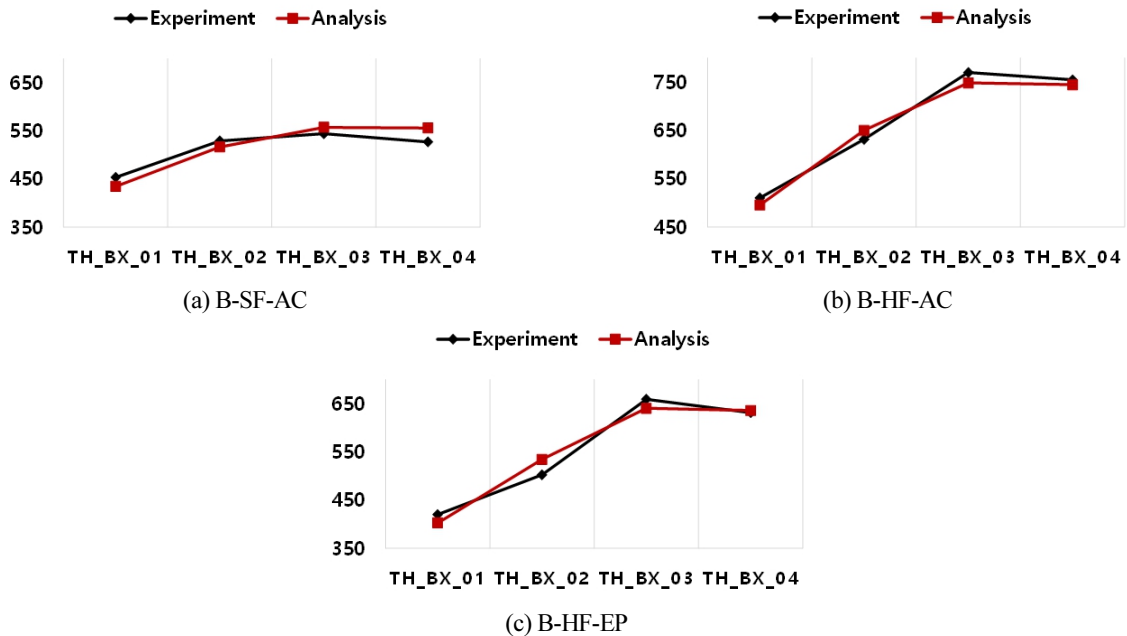


Fig. 7. Error rate of experiment results and analysis results

강재 위치 별 실험 온도 평균값 대비 해석 오차를 확인하였을 때 B-SF-AC는 가장 낮은 오차를 보인 TH_BX_02의 위치에서 시험 결과 값은 529.1°C, 해석 결과 값은 516.6°C로 오차는 2.37%로 나타났다. 가장 높은 오차는 TH_BX_04 지점으로 시험 결과 값은 527°C로 측정되었고 해석 결과는 55.6°C로 오차는 5.51%로 나타났다.

B-HF-AC의 경우 가장 낮은 오차는 TH_BX_04의 지점으로 1.33%로 나타났다. 온도는 시험결과 값 754.8°C, 해석 결과 값 744.8°C로 10°C의 차이가 났으며 가장 높은 오차는 2.92%로 TH_BX_02 지점으로 확인하였다.

B-HF-EP의 경우 열전달 해석에서는 최고온도는 648.08°C, 평균온도는 528.3°C로 120분 내화성능을 확보 하였지만 실제 내화시험에서는 하부 플랜지의 평균온도 초과로 내화성능을 확보하지 못하였다. 이는 시험 중 내화피복의 박리, 탈락으로 인해 강재에 화재가 노출되어 나타난 결과이며, 이에 따라 하부 플랜지 TH_BX_02 지점의 오차가 6.40%로 세 시험체 중 가장 큰 오차인 것을 확인할 수 있었다. 열전달 해석으로 B-HF-EP의 시험체의 내화피복이 탈락하지 않았을 경우 강재의 내화성능을 확보할 수 있음을 확인하였으며, B-HF-EP의 오차는 TH_BX_04 지점에서 0.69%로 세 시험체 중 가장 낮은 오차로 나타났다.

이러한 차이를 보이는 이유는 내화시험의 경우 내화도료의 단락 및 가열로 내부의 온도의 변화에 따라 시험체에 열이 전달 되지만 해석의 경우 온도분포를 가열면에 고르게 가하기 때문이다. 해석의 경우 모델링 시 강재의 성질 및 내화 도료의 물성치를 고르게 입력하여 해석을 수행하게 되어 내화시험에서의 온도가 차이가 날 수 있다. 시험체 별 오차는 평균은 각각 B-SF-AC - 3.62%, B-HF-AC - 2.48%, B-HF-EP - 3.51%로 세 시험체 모두 시험 값 대비 오차 5% 이내로 나타났다. 시험체

별 오차율은 Table 2에 정리하여 나타내었다.

Table 2. Experiment results and Analysis results

Type		Experiment(°C)	Analysis(°C)	error (%)
B-SF-AC	TH_BX_01	453.4	434.5	4.17
	TH_BX_02	529.1	516.6	2.37
	TH_BX_03	544.1	557.3	2.43
	TH_BX_04	527	556.0	5.51
B-HF-AC	TH_BX_01	510.0	495.3	2.88
	TH_BX_02	631.5	650.0	2.92
	TH_BX_03	769.9	748.4	2.79
	TH_BX_04	754.8	744.8	1.33
B-HF-EP	TH_BX_01	419.9	402.6	4.13
	TH_BX_02	502.4	534.5	6.40
	TH_BX_03	659.1	640.4	2.84
	TH_BX_04	631.4	635.7	0.69

구조해석 방법

표준화재 및 탄화수소화재의 화재하중을 가한 후 강재의 내구성을 판단하기 위하여 열전달 해석에서 얻은 데이터를 모델링하여 적용하였다. 강재의 강도만을 판단하기 위하여 가열로 덮개인 콘크리트 및 내화도료 모델링은 제외하고 강재에 대해서만 구조해석을 진행하였다. 열전달 해석에서 내화도료 에폭시계 내화도료와 아크릴계 내화도료의 화재하중에 따른 강재 표면 온도 데이터를 매핑하여 모델링 하였으며, 재하 조건은 Fig. 8(a)와 같이 시험체 상단에 30kPa의 등분포 하중을 적용하여 분석하였다.

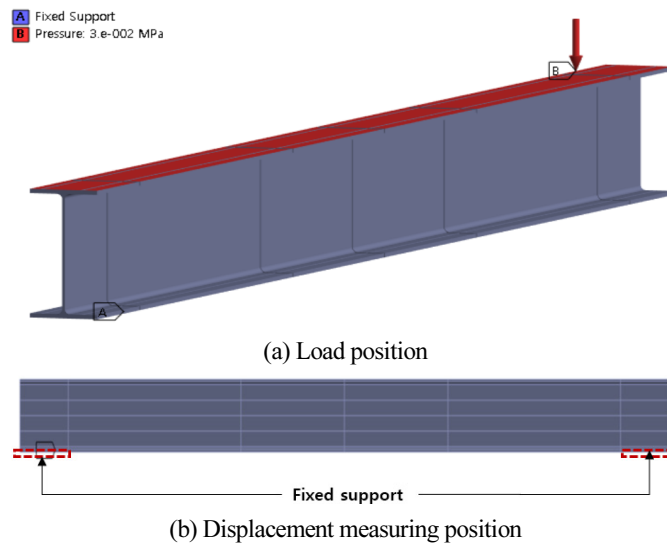


Fig. 8. magnitude and position of load

구조해석 결과

각각의 시나리오 별로 화재하중을 가한 후 동일한 하중을 준 상황에서의 강재는 Fig. 9와 같이 결과를 확인할 수 있었다. B-SF-AC의 경우 KS F 2257-1의 기준의 인증을 받은 아크릴계 내화도료를 사용하여 표준화재의 화재하중으로 해석한 결과 0.42mm의 변형을 보였으며 B-HF-EP의 시험체의 경우 UL 1709의 인증을 받은 에폭시계 내화도료를 사용하여 탄화수소화재의 화재하중으로 해석한 결과 0.39mm로 B-SF-AC와 비슷한 강성인 것을 확인하였다. 하지만 KS F 2257-1의 인증을 받은 아크릴계 내화도료를 사용한 강재에 탄화수소화재의 화재하중으로 해석한 B-HF-AC 시험체의 경우 0.66mm로 가장 큰 변형을 보였다. 강재는 고온의 화재에 노출될 경우 강재의 내구성은 떨어지고 강성이 감소하는 성질을 가지고 있으며, 이에 따라 각각의 기준에 맞춰 적합한 내화성능을 평가하여 인증받은 내화도료를 사용했을 때 내화성능을 확보하였으나 탄화수소화재를 화재하중으로 KS 인증을 받은 내화도료를 사용하였을 때 강재는 강성이 감소하여 큰 폭의 변형을 확인할 수 있었다.

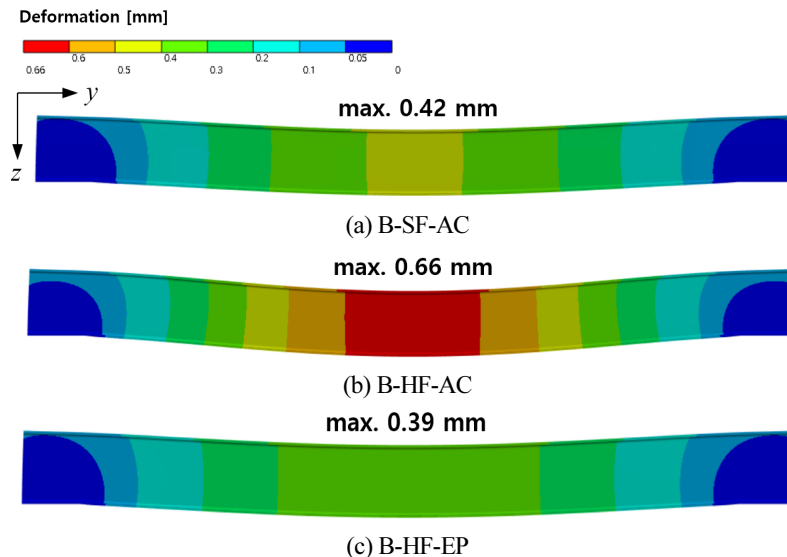


Fig. 9. Load direction displacement contour

결론

플랜트 시설물은 최종 생산 제품, 취급 물질, 시설물의 유기적인 결합 등 화재 시 각별한 주의를 요하는 시설물이다. 이에 따라 본 연구는 플랜트 시설물의 구조체를 대상으로 내화도료와 화재하중을 변수로 하여 유한요소해석 프로그램인 Ansys를 이용하여 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다.

- (1) 열전달 해석에서 플랜트 시설물의 구조부재에 대하여 화재하중과 내화도료를 변수로 수행한 결과, 탄화수소화재에 노출된 강재에서 높은 온도 상승을 보였다. 하지만 탄화수소화재를 하중으로 적합한 인증을 거친 내화도료를 사용한 B-HF-EP 시험체의 경우 강재의 내화성능을 확인하였으며 현재 국내의 플랜트 시설물에 적용된 내화도료를 사용하여 탄화수소화재를 하중으로 해석한 B-HF-AC 시험체의 경우 최대 온도 755.77°C로 내화성능을 확보하지 못함을 확

인하였다.

- (2) 열전달 해석결과와 사전에 수행된 내화시험 결과를 비교하였을 때 B-SF-AC의 경우 3.62%의 오차를 보였으며 B-HF-AC는 2.48%의 오차를 보였다. B-HF-EP의 경우 내화시험과 열전달 해석에서의 차이를 보였는데 내화시험에서는 하부 플랜지의 평균온도 초과로 내화성능을 확보하지 못하였지만, 열전달 해석결과 120분의 내화성능 확보를 확인할 수 있었다. 이는 내화시험에서 하부 플랜지의 내화피복이 탈락하여 강재에 화재가 직접 노출되어 생긴 현상이며 열전달 해석을 통해 내화피복의 탈락이 없을 경우 내화성능을 확보할 수 있음을 확인하였다. 이에 따라 오차 또한 하부 플랜지 TH_BX_02 지점에서 세 시험체 중 가장 높은 오차인 6.40%로 나타났다. 본 결과를 통해 화재 성능에 맞는 내화피복의 선정도 중요하지만 화재 시 내화피복이 탈락하지 않고 강재를 보호할 수 있도록 적합한 시공과 유지보수를 위한 가이드라인이 제시되어야 한다고 판단된다.
- (3) 구조해석 결과 국내 내화성능 기준으로 인증받은 내화도료와 표준화재를 화재하중으로 수행한 B-SF-AC 시험체와 UL 1709의 인증을 받은 내화도료를 사용하여 탄화수소화재를 화재하중으로 수행한 B-HF-EP 시험체는 각각 0.39mm, 0.42mm로 변형을 보였으나 국내 내화성능 인증을 받은 내화도료로 탄화수소화재를 화재하중으로 수행한 B-HF-AC 시험체의 경우 0.66mm의 큰 변형을 확인하였다. 이는 강재가 고온의 화재에 노출되어 강재의 내구성이 하락하여 생긴 결과로 확인되었다.
- (4) 플랜트 시설물의 열전달 해석과 구조해석 결과 현재 국내의 내화성능은 빠른 시간 내에 높은 온도에 노출될 가능성이 있는 석유화학 플랜트, 정유 플랜트 등 화재하중이 큰 시설물에서는 내화시간을 확보하지 못하여 큰 재난으로 이어질 것으로 사료된다. 따라서, 플랜트 시설물은 구조 및 취급 물질이 변수로 작용하여 화재하중이 급격히 변화하는 시설물이며 이에 따른 적합한 내화성능 평가를 통한 플랜트 시설물의 내화성능 확보가 필요하다.

Acknowledgement

본 연구는 국토교통부 국토교통과학기술진흥원의 연구비 지원(RS-2021-KA163162)에 의해 수행되었음.

References

- [1] EN Eurocodes (1993). Eurocode 3: Design of steel structures. European Commission, Brussel, Belgium.
- [2] KS F 2257-1. (2014). Methods fire resistance test for elements of building construction - General requirements. Korean Agency for Technology and Standards, Eumseonggun, Republic of Korea.
- [3] KS F 2257-6. (2019). Methods Fire Resistance Test for Elements of Building Construction - Specific Requirements Forements for Beams. Korean Agency for Technology and Standard, Eumseonggun, Republic of Korea.
- [4] KS F 2257-7. (2019). Methods Fire Resistance Test for Elements of Building Construction - Specific Requirements for Columns. Korean Agency for Technology and Standard, Eumseonggun, Republic of Korea.
- [5] Kwak, S.-S., Choi, B.-J. (2019). "An analytical study on composite beam performance with posr-fire temperate using ANSYS program." Journal of the Korea Academia-Industrial Cooperation Society, Vol. 20, No. 1, pp. 391-400.
- [6] Kwon, I.-G. (2014). "Evaluation of structural stability at high temperatures for beams made of high strength structural steels (SM 570) by analytical method." Fire Science and Engineering, Vol. 28, No. 3, pp. 49-54.

- [7] Lee, D.-H., Nam, G.-T., Cho, G.-H., Choi, D.-C. (2022). "Experimental study on evaluating the fire resistance performance of plant facilities." *Fire Science and Engineering*, Vol. 36, No. 6, pp. 107-113.
- [8] Min, B.-R., Lee, S.-H., Kim, H.-R. (1993). *Improvement of Fire Proof Construction Regulations*. Ministry of Construction and Transportation, Sejong, Republic of Korea.
- [9] UL 1709. (2017). *Standard for Safety, Rapid Rise Fire Tests of Protection Materials for Structural Steel*.