

## 시뮬레이션을 이용한 플랜트 시설물 제연설비에 관한 연구

## A Study on the Smoke Removal Equipment in Plant Facilities Using Simulation

최두찬<sup>1</sup> · 양민혁<sup>2\*</sup> · 고민혁<sup>3</sup> · 오수민<sup>4</sup>Doo Chan Choi<sup>1</sup>, Min Hyeok Yang<sup>2\*</sup>, Min Hyeok Ko<sup>3</sup>, Su Min Oh<sup>4</sup><sup>1</sup>Chief Executive Officer, KF UBIS CO., Ltd, Seoul, Republic of Korea<sup>2</sup>Researcher, KF UBIS CO., Ltd, Seoul, Republic of Korea<sup>3</sup>Senior Initiative, KF UBIS CO., Ltd, Seoul, Republic of Korea<sup>4</sup>Researcher, KF UBIS CO., Ltd, Seoul, Republic of Korea

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

## ABSTRACT

**Purpose:** In this study, in order to ensure the evacuation safety of plant facilities, we analyze the relationship between the height of smoke removal boundary walls, the presence or absence of smoke removal equipment, and evacuation safety. **Method:** Using fire and evacuation simulations, evacuation safety was analyzed through changes in the height of the smoke removal boundary wall, air supply volume and exhaust volume according to vertical dista. **Result:** In the case of visible drawings, if only 0.6m of boundary wall is used, the time below 5m reaches the shortest, and 1.2m of boundary width is 20% longer than when using smoke removal facilities. In the case of temperature, 1.2m is 20% longer than 0.6m when only the boundary width is used without smoke removal facilities. **Conclusion:** It was found that increasing the length of the smoke removal boundary wall could affect visibility, and installing a smoke removal facility would affect temperature. Therefore, it is determined that an appropriate smoke removal plan and smoke removal equipment should be installed in consideration of the process characteristics.

**Keywords:** Plant, Fire Dynamics Simulator, Pathfinder, smoke boundary, Performance Based Design

## 요약

**연구목적:** 본 연구는 플랜트 시설물의 피난 안전성을 확보하기 위해 제연경계벽의 폭 및 제연설비의 유무와 피난 안전성과의 관계를 분석하고자 한다. **연구방법:** 화재 및 피난 시뮬레이션을 활용하여 제연경계벽의 폭, 수직거리에 따른 급기량, 배기량의 변화를 통해 피난 안전성을 분석하였다. **연구결과:** 가시도의 경우 경계벽 0.6m 만을 사용한 경우 5m 이하로 되는 시점이 가장 짧게 도달하였으며 제연경계 폭 1.2m와 제연설비를 사용한 경우와 비교하여 20%긴 것으로 나타났다. 온도의 경우 제연설비를 사용하지 않고 경계 폭만 사용하였을 때 0.6m 보다 1.2m가 20% 긴 것으로 확인되었다. **결론:** 제연 경계벽에서는 온도를, 제연설비에서는 가시도의 영향을 줄일 수 있으나, 반대로 제연 경계벽의 길이를 길게 하였을 때 가시도의 영향을 줄 수 있으며, 제연설비를 설치하였을 때 온도의 영향을 주는 것으로 나타났다. 따라서, 공정 특성을 고려하여 적합한 제연계획과 제연 설비를 설치해야 할 것으로 판단된다.

**핵심용어:** 플랜트, 화재 시뮬레이션, 피난 시뮬레이션, 제연경계벽, 성능위주설계

Received | 6 December, 2023

Revised | 22 February, 2024

Accepted | 26 February, 2024

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

플랜트 시설물은 최종 생산 제품 및 목적에 따라 여러 형태의 설비가 유기적으로 연결되어 있는 시설물이다. 이에 따라 플랜트 시설물은 취급 물질이 다양하며 생산 제품, 설비, 취급 물질에 따라 화재 성상 또한 달라진다. 특히, 석유화학 플랜트의 경우 고위험군의 설비로 화재 시 대형화재로 번질 우려가 큰 시설물이며 울산 정유공장 화재(2022), 미국 텍사스 사우스레이크 화재 등 플랜트 시설물에 대한 화재는 빈번히 일어나고 있다. 이처럼 다양한 형태의 화재를 예방하고 대처하기 위해서 화재위험분석과 안전정지분석 등의 분석업무가 수행되고 있으나 종사자의 인명 안전 및 신속한 화재진압에 대한 기술개발은 상대적으로 소외되어 있어 이에 대한 기술개발이 필요한 실정이다. 최근 소방설계에서는 허용피난시간(ASET, Available Safety Evacuation Time)을 도출하고, 피난소요시간(RSET, Required Safety Evacuation Time)과 상호 결과 값을 비교·분석하여 피난안전성 확보 여부를 결정하는 평가기법인 “성능위주설계”가 도입됨에 따라 건축물의 용도, 구조 등을 고려하여 법령 기준보다 강화하여 안전한 설계를 수행하기도 하지만 아직까진 국내법령인 화재안전기준에 명시된 기준을 따라 설계되고 시공되고 있다. 플랜트 시설물은 다양한 형태의 화재가 일어나고 복잡한 구조를 지니고 있지만, 플랜트 특성에 맞지 않는 화재 안전 성능을 지니고 있으며 특히 제연설비의 경우 플랜트 시설물은 설치 대상에서 제외되어 있다. 국내 제연설비는 크게 화재실에서 연기배출과 신선한 공기를 동시에 유입하여 청결층을 확보하는 거실제연설비와 차압을 이용한 부속실제연설비로 구분하고 있다. 부속실제연설비와 거실제연설비는 연기를 제어하여 재실자의 안전을 확보하는 것에 목표를 두고 있지만 전실제연의 경우 방연풍속, 차압 등을 통한 연기제어를 목적으로 하고 있으며, 거실제연설비의 경우 연기가 아래로 내려오지 않도록 하여 청결층 확보와 청결층으로 인한 소화 활동을 목적으로 두고 있다. 화재 시 재실자의 호흡 한계선인 바닥으로부터 1.8m의 위치에서 인명안전기준에 명시되어 있는 열, 가시거리, 독성 등 피난 및 인체에 위험한 상황을 최대한 지연할 수 있도록 제연경계벽 및 제연설비를 활용하여 허용피난시간을 늘리는 데 중점을 두어 플랜트 시설물의 안전성을 평가하고 설계하여야 한다.

따라서, 본 연구는 플랜트 시설물의 피난에 대한 효율성을 연구하기 위해 실제 운용중인 플랜트 시설물을 활용하여 A구역부터 E구역까지 제연경계벽과 제연설비를 적용하는 시나리오를 구성하였으며, 제연경계벽의 폭 및 제연설비 설치 유무와 피난과의 관계를 분석하였다.

## 시뮬레이션 시나리오

### 플랜트 시설물 모델링

화재 시뮬레이션 수행을 위해 실제 플랜트 시설물의 도면을 활용하여 실내의 플랜트 설비가 위치하고 있는 구역을 활용하였다. 본 공간은 방화문 및 벽으로 구성된 공간으로 총 3,253m<sup>2</sup>의 크기의 공간을 모델링 하였으며, 시설물의 기둥, 공간을 그대로 모사하여 수행하였다. 모델링에 사용된 플랜트 시설물은 좌우측의 계단으로 층간 이동이 가능하며 중앙실 아래 방화문을 통해 사무공간으로 나갈 수 있는 구조이다. 본 연구에서는 구획되어 있지 않은 플랜트 시설물의 연기거동과 온도를 확인하기 위하여 좌우측의 계단실 문과 사무공간으로 통하는 문은 닫혀있는 상황으로 Fig. 1과 같이 모델링 하였다.

피난에 대한 효율성을 연구하기 위해 A 구역부터 E 구역까지 구분하였으며 “화재안전기술(NFTC 501)”에 제시되어 있는 제연구획 기준에 맞춰 제연경계벽과 제연설비를 적용하는 시나리오를 구성하였으며, 각 실의 면적은 Table 1과 같다. 화

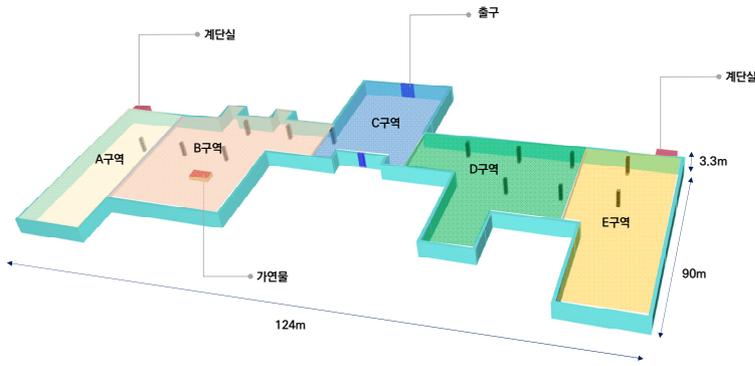


Fig. 1. Simulation model

Table 1. Floor information

구분	면적(m <sup>2</sup> )	높이(m)
A 구역	581	3.2
B 구역	845	
C 구역	531	
D 구역	692	
E 구역	604	
계	3,253	3.2

재를 모사하여 피난의 안전성을 확인하기 위해 양 쪽의 계단실과 중앙의 출구에 측정점을 화재 시뮬레이션에 설치하였으며, 측정지점 별로 가시도, 온도, 이산화탄소, 산소 농도를 측정하고자 하였다. 재실자의 호흡 한계선 기준인 1.8m에 Device를 설치하였다.

**화재시뮬레이션 입력 변수**

화재실은 실제 플랜트 시설물에 윤활유를 사용하는 시설물의 위치에 화원을 설정하였다. 해당 시설은 B구역 중앙에 위치해 있으며 B구역에서 발생 된 화재를 시나리오로 연기거동 및 온도, 이산화탄소 등 화재 영향을 분석하였다. 화원은 사용된 플랜트 시설물의 압축기에서 윤활유 교체작업 및 운전과정에서 윤활유 화재가 발생한 상황을 가정하여 8m<sup>2</sup> 크기의 윤활유 화재로 설정하였다. 화재조건은 Ultra-Fast로 모델링 하여 시뮬레이션 수행 동안 일정량의 열과 연기가 발생 되도록 모델링 하여 수행하였으며, 총 해석시간은 400초로 908,600개의 격자로 나눠 시뮬레이션을 수행하였다. 시뮬레이션의 변수로는 플랜트 시설물의 제연설비 적합성을 평가하기 위해 “화재안전기술(NFTC 501)”에 따라 제연경계 벽 및 급배기 풍량을 활용하였다. 화재안전기술에 따라 제연 경계는 법정 최소 폭인 0.6m부터 구성하여 Fig. 2와 같이 0.6m, 0.9m, 1.2m로 설정하였다. 급배기의 경우 수직거리별 배출량에 따라 Table 2와 같이 제연 경계벽 0.6m일 경우 수직거리 2.6m로 2.5m 초과 3m 이하기

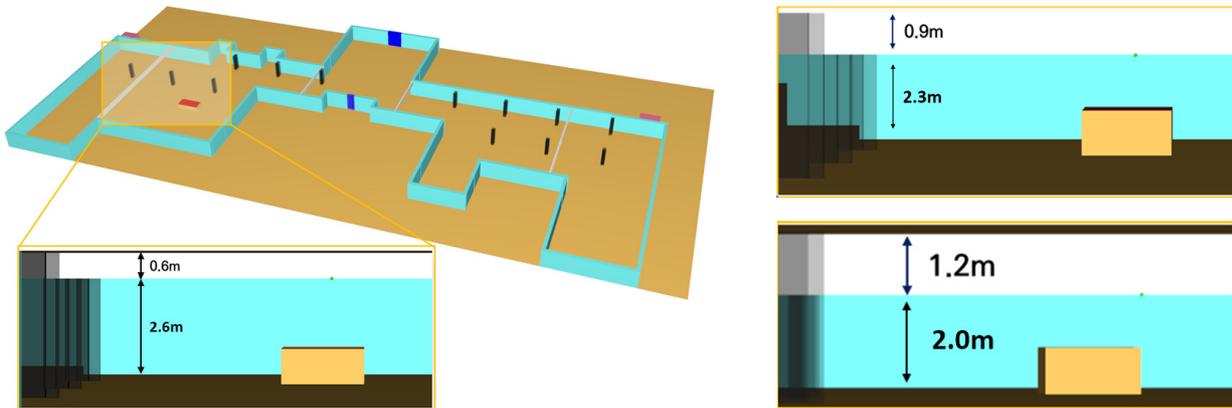
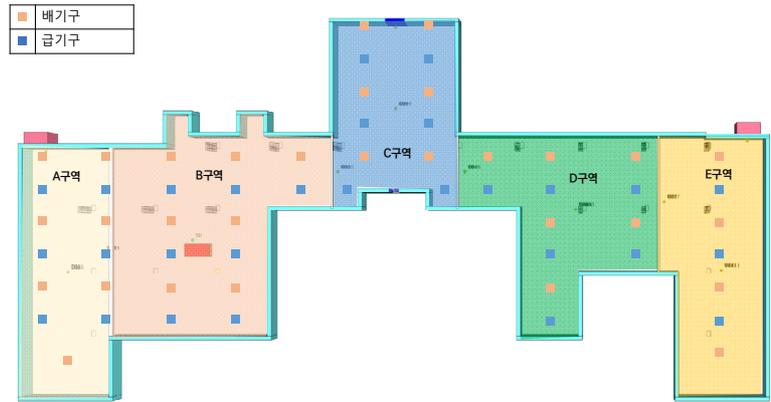


Fig. 2. Height of smoke boundary

**Table 2.** Smoke control zone

조건	제연 경계벽 폭 (m)	수직 거리 (m)	급배 기량 (m <sup>3</sup> /h)
거실 제연	0.6	2.6	55,000
	0.9	2.3	50,000
	1.2	2.0	45,000



**Fig. 3.** Location of exhaust and air supply ports

준을 적용하여 55,000m<sup>3</sup>/h, 0.9m일 경우 수직거리 2.3m로 50,000m<sup>3</sup>/h, 1.2m의 경우 수직거리 2m로 45,000m<sup>3</sup>/h로 적용하여 설정하였으며 급·배기구 한 개의 크기를 0.3m×0.3m로 설정하였다. 급배기는 인접구역 상호제연방식으로 화재 시 해당 구역은 급기구는 자동 폐쇄되고 배기구가 열려 배기 되고, 비화재실은 배기구는 자동 폐쇄되고 급기구가 열려 급기되는 방식으로 하였다. 화재실의 연기는 배기구를 통해 연기가 배출되며 인접구역의 비화재실에 급기되는 풍량으로 인해 연기가 주변 구역으로 넘어오는 것을 방호하게 된다. 급기구와 배기구는 모델링된 플랜트 시설물에 Fig. 3과 같이 동일한 간격으로 설치하였다. 화재시물레이션 조건은 Table 3과 같다

**Table 3.** Simulation condition

구분	시나리오					
	Case 1	Case 2	Case 3	Case 4	Case 5	Case 6
제연 경계벽 폭	0.6	0.9	1.2	0.6	0.9	1.2
제연 설비 설치 유무	무	무	무	유	유	유
종류	운활유 화재 C14H30(n-Tetradecane)					
화재시물레이션	가연물	열방출률	9,380KW			
		가연물 면적	8m <sup>2</sup> (4m×2m)			
		성장속도	Ultra-Fast			
연소 생성물	C14H30(n-Tetradecane)					
	CO yield(g/g)	0.012				
	Soot yield(g/g)	0.042				
해석공간(m)	X : 124, Y : 60, Z : 3.3					
격자 수(개)	908,600					
격자 크기(m)	0.3 × 0.3 × 0.3					
해석 시간	400초					

## 결과 분석

### 가시도

Fig. 4에 나타난 바와 같이 Point 2의 경우 가시도 5m 이하로 되는 시점은 400초 이상으로 확인되었으며, Point 1인 경우 경계벽 조건 Case 1부터 3까지 비교하였을 때 Case 1에서 가시도 도달 시간이 Case 3보다 10% 긴 것을 확인하였고, Case 1부터 6까지 분석하고, 가시도 도달시간이 가장 짧은 Case 2와 가장 긴 Case 6를 비교하였을 때 20% 긴 것으로 확인되었다. 또한, Point 3인 경우 Case 1부터 3과 비교하였을 때 Case 1, 2, 3 순서로 가시도 도달 시간이 긴 것으로 확인되었으며 전체 Case 1부터 6까지 비교하였을 때 가장 짧게 도달한 Case 1과 가장 길게 도달한 Case 6를 비교하였을 때 100% 이상 긴 것으로 확인되었다. 시뮬레이션의 종료 시점인 400초 시점의 가시도를 Fig. 5에 나타내었다.

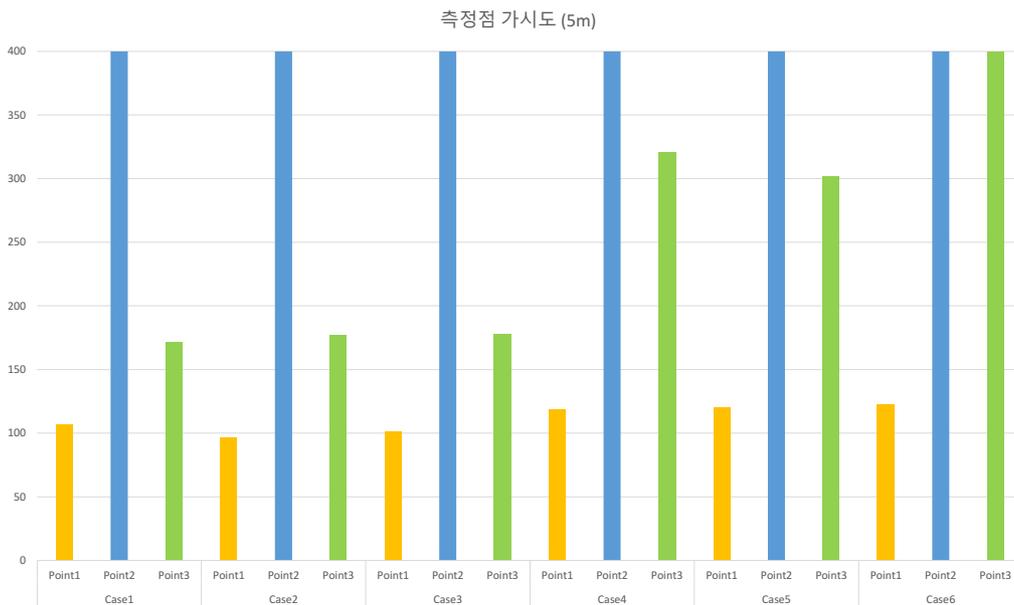


Fig. 4. Visibility of simulation results

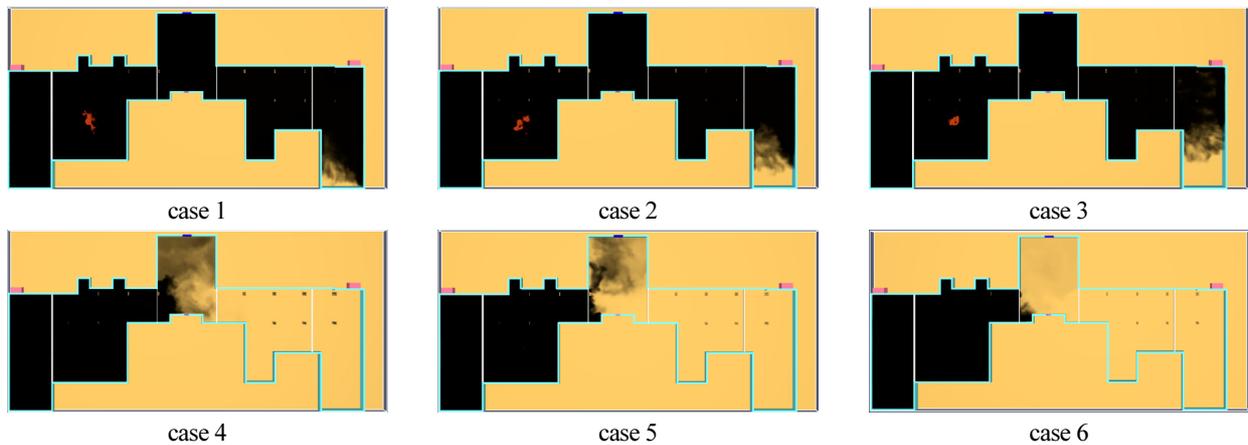


Fig. 5. Result of smoke movement at 400sec

## 온도

Fig. 6과 같이 Point 1인 경우 Case 1부터 3까지 비교하였을 때 온도 60°C에 도달하는 시간 순서는 Case1,2,3 순으로 Case3은 Case1에 비하여 20% 긴 것으로 확인되었으며, Case 1부터 6까지 비교하였을 때 Case 4에서부터 온도 도달 시간이 짧아지는 것으로 확인되었다. Point 2,3 또한 Case 1에서 3까지 비교하였을 때 400초 이상으로 확인되었으나 Case 4부터는 약 50% 단축되는 것을 확인되었다. 400초 시점의 온도를 Fig. 7에 나타내었다.

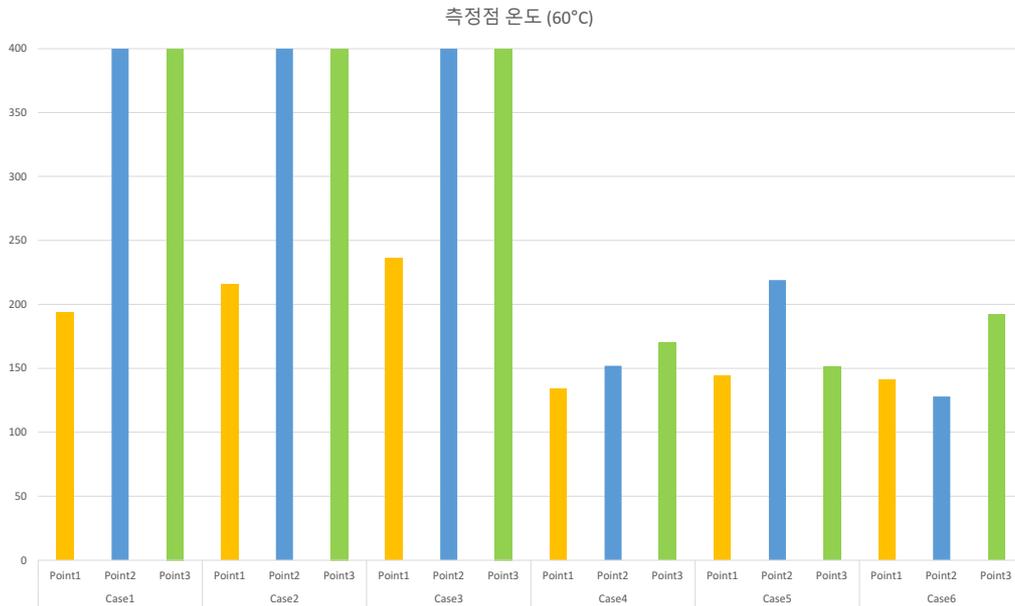


Fig. 6. Temperature of simulation results

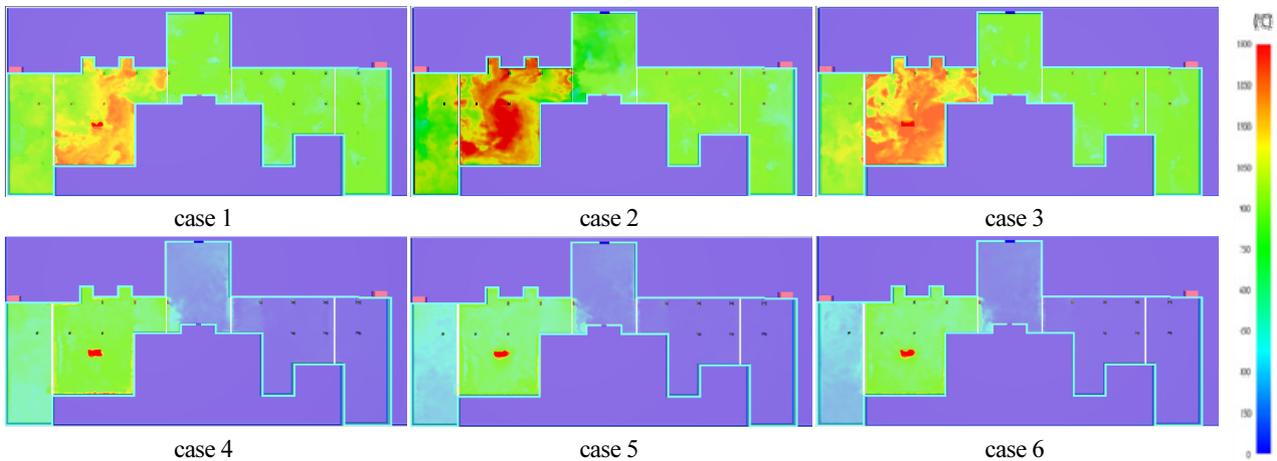


Fig. 7. Result of temperature at 400sec

## 결론

피난안전성평가 기법을 활용하여 플랜트 시설의 화재피난 시뮬레이션을 수행하였다. 열방출률 9,380KW의 유희유 화재를 가정하였으며, 제연경계벽 조건, 제연설비 조건을 반영하여 총 6가지 시나리오에 따라 시뮬레이션 결과 분석을 하였으며 결론은 아래와 같다.

- (1) 가시도에 대하여 천장에서 부터의 제연경계벽 길이가 길어질수록 출구 가시도의 영향을 받는 것으로 확인되었다. 이와 더불어 제연설비를 설치하였을 때 가시도의 영향을 줄일 수 있을 것으로 판단하였다.
- (2) 온도에 대하여 천장에서 부터의 제연경계벽 길이가 길어질수록 온도의 영향을 줄일 수 있는 것으로 확인되었으나, 제연설비를 설치하였을 때 출구에 도달하는 시간이 오히려 짧아지는 것으로 판단되었다.
- (3) 제연 경계벽에서는 온도를, 제연설비에서는 가시도의 영향을 줄일 수 있으나, 반대로 제연 경계벽의 길이를 길게 하였을 때 가시도의 영향을 줄 수 있으며, 제연설비를 설치하였을 때 온도의 영향을 주는 것으로 확인되었다.
- (4) 따라서 공정 특성을 고려하여 시설물의 위험도를 평가하고 화재의 성상을 파악하여 온도에 영향을 줄일 수 있는 제연 경계벽과 가시도의 영향을 줄일 수 있는 제연설비를 적절하게 설치해야 할 것으로 판단된다.

## Acknowledgement

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

## References

- [1] Choi, S.G. (2018). "A study on the smoke control design parameter of large volume space by fire dynamic simulation." *Journal of the Korea Academia-Industrial cooperation Society*, Vol. 19, No. 11, pp. 237-243.
- [2] Kim, D., Jeong, J., Park, S., Go, J., Yeom, C. (2020). "A study on the application of optimal evacuation route through evacuation simulation system in case of fire." *Journal of the Society of Disaster Information*, Vol. 16, No. 1, pp. 96-110.
- [3] Kim, M.S., Baek, E.S. (2017). "A study on improvement of livingroom smoke-control system using the FDS." *Fire Science and Engineering*, Vol. 31, No. 04, pp. 26-34.
- [4] Lee, S.G., Min, S.H. (2023). "A model experiment study to secure the straight line distance between the air inlet and exhaust section of the living room." *Journal of the Society of Disaster Information*, Vol. 19, No. 2, pp. 439-450.
- [5] Nam, G.T., Lee, D.H., Choi, D.C. (2022). "Fire risk analysis of petrochemical plant facilities through fire modeling." *Fire Science and Engineering*, Vol. 36, No. 06, pp. 131-141.