

# 환경에너지시설의 화재 및 피난 안전성 평가에 관한 연구

전 용 한\*·한 상 필\*

\*상지영서대학교 소방안전과

## A Study on Assessment of Fire and Evacuation Safety in Environmental Energy Facilities

Yong-Han Jeon\*·Sang-Pil Han\*

\*Department of Fire and Protection, Sangji-Young College

### Abstract

In this study, fire and evacuation safety of environmental energy facilities using fire and evacuation simulation was examined as part of performance-oriented design. The worst-case fire scenarios in which fire-fighting facilities such as sprinkler fire extinguishing and smoke control systems are not working, and the FDS analyzes the visibility, temperature distribution, and carbon monoxide concentration distribution through FDS. The safety was examined. As a result, it was proved that evacuation could limit the visibility, temperature, and carbon monoxide concentration in a smooth range, based on the safety standards set by relevant laws. In other words, it was possible to verify the safety of fire and evacuation for environmental energy facilities where a large amount of combustibles and fires coexist.

**Keywords :** Fire and Evacuation Simulation, PBD, FDS, Pathfinder

### 1. 서론

1970년대 이후 국내 산업의 발전은 경제 성장의 원동력이 되어 내수 생산과 소비가 급격한 증가를 가져왔다. 이 과정에서 오물, 폐품 등 쓰레기가 다량으로 발생하게 되었고, 정부는 가장 단순하고 간단한 매립이라는 방식을 채택하여 처리하였다. 최근 들어 매립지는 악취, 위생 등으로 기피하는 장소가 되어 주민민원으로 부지선정 및 확보가 매우 곤란하며, 환경적으로는 토양 및 지하수 오염 등으로 인해 여러 문제점을 야기한다. 환경에너지시설로서 쓰레기소각장은 우리나라의 지리적 특성을 고려해 볼 때 입지가 반드시 필요한 고립형 내수시설이다. 1990년대부터 정부 및 지방자치단체는 대형 쓰레기 소각장을 건설하여 쓰레기 처리와 더불어 에너지재생을 병용하고 있다. 그러나 소각(燒却)이라는 처리단계는 동일한 장소에 다량의 가연물질과 화기가 공존하여 화재위험성을 높이는 요인이 된다. 지난 2017년 6월 청주 광역소각시설 및 2015년 9월 영천 도남공단 쓰레기 소각시설에서의 화재 사고 사례에서 볼 수 있듯이 한번 발생한 사고는 대형화재

로 이어지게 되어 인명피해와 더불어 막대한 재산피해를 초래하게 된다. 따라서 환경에너지시설은 건립 후 철저한 예방활동을 통한 안전관리와 적절한 사고대응을 통한 피해저감도 중요한 요소이며, 관련 시설의 설치단계에서부터 다양한 검토를 통한 안전성을 확보하여 공급하는 방법도 고려되어야 하나 아직까지는 미흡한 실정이다.

본 연구에서는 환경에너지시설의 설치 이전, 즉 계획 및 설계 단계에서의 분석 및 검토에 초점을 맞추어, 환경에너지시설 내에서 위험요소로 인해 발생할 수 있는 다양한 안전사고 중 화재가 미치는 영향을 화재 및 피난 시뮬레이션을 통해 검증하고자 하였다[1],[2],[3].

2006년 1월 ‘소방공사업법 제11조(설계)’의 개정과 2015년 6월 ‘화재예방, 소방시설 설치유지 및 안전관리에 관한 법률 시행령 제15조의3(성능위주설계를 하여야 하는 특정소방대상물의 범위)’가 신설되면서 성능위주설계(Performance Based Fire Protection Design)에 대한 기준이 마련되었다[4]. 성능위주설계란 특정소방대상물의 용도, 위치, 구조, 수용 인원, 가연물(可燃物)의 종류 및 양 등을 고려한 공학적인 방법을 이용하여 화재안전의

†Corresponding Author : Sang-Pil Han, Department of Fire and Protection, Sangji-Youngseo College, 84, SangjiDaegil, Wonju, MP : 010-2611-5532, E-mail: hsfeel@hanmail.net

Received November 01, 2019; Revision November 25, 2019; Accepted November 29, 2019

목적성을 성취하기 위한 문제를 해결하는 설계기법으로 흔히 법규위주설계(또는 사양설계)와 대별된다. 어떠한 대상물에 실제 적용하여 타당성을 확보하기 위해서는 물리적, 시간적으로 실현 가능성이 낮기 때문에 이를 해결하기 위한 방법으로 시뮬레이션을 활용하는 것이 일반적이다.

본 연구에서 시뮬레이션 프로그램은 미국 NIST(National Institute of Standards and Technology)의 FDS(Fire Dynamics Simulator) [5]를 활용하여 화재로 인한 영향 및 해석을 검토하였으며, 미국 Thunderhead Engineering Consultants, Inc.의 Pathfinder를 통해 재실자의 피난 경로를 분석하였다.

성능위주설계방법에서는 화재 및 피난 안전성 평가방법을 위험론적 분석방법(Risk-Based Analysis)과 결정론적 분석방법(Deterministic Analysis)으로 구분하고 있으며, 이번 연구에서는 사고의 발생빈도를 고려하지 않은 결정론적 방법으로 분석, 평가하여 결과를 유추하고 향후 진행될 위험론적 분석방법을 통한 연구를 통해 2가지 방법에 대한 결과를 비교하여 화재모델링의 신뢰성을 제고하고자 한다.

## 2. 수치해석

화재 및 피난 안전성을 평가하기 위해서는 ‘소방시설 등의 성능위주설계방법 및 기준’의 별표1에서 정하는 ‘시나리오 적용 기준’ 중 ‘인명안전 기준’과 ‘피난가능시간 기준’ [6]에 근거하여 해석하였으며, 그 외 구체적인 평가방법에 대해서는 SFPE(미국소방기술사회, Society of Fire Protection Engineers)에서 제시하는 기준 [7]을 활용하였다.

### 2.1 판정기준

화재 및 피난 시뮬레이션의 시나리오는 가장 피해가 클 것으로 예상되는 시나리오를 기준으로 작성하였으며, 소방시설 등의 성능위주설계방법 및 기준’에서는 인명안전 기준에 따라 호흡기계선, 열에 의한 영향, 가시거리에 의한 영향, 독성에 의한 영향으로 판정하며 각각의 기준은 <Table 1>과 같다.

<Table 1> Life safety code

Content	Performance standard	
Heat	Below 60°C	
Visibility	Use	Permissible limit
	Other Facility	5 m
	Assembly and Sales Facility	10 m
Toxicity	Ingredient	Toxicity criteria
	CO	1,400 ppm
	O <sub>2</sub>	Above 15%
	CO <sub>2</sub>	Below 5%

## 2.2 화재 및 피난 시뮬레이션 분석방법

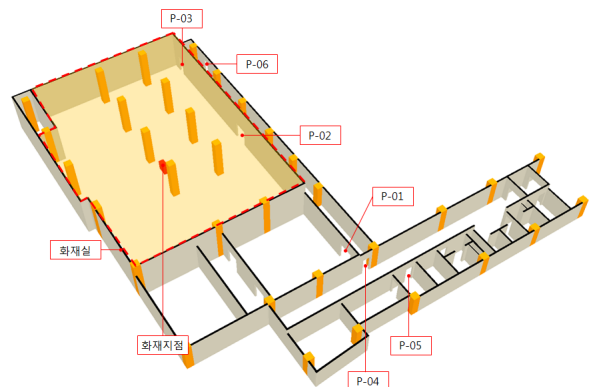
화재시뮬레이션은 화재실에서 시간경과에 따른 온도상승과 온도분포와, 연기 및 연소생성물에 의한 가시거리의 확보 수준, 독성가스의 증가량의 관계를 검토하였다.

본 연구의 대상은 산업(공업)시설로서 ‘소방시설 등의 성능위주설계 방법 및 기준’의 피난가능시간 기준에 따르면 거주자는 건물의 내부, 경보, 탈출로에 익숙하고, 항상 깨어 있는 조건에 해당되므로 지연시간이 발생하지 않는다. 따라서 화재감지기의 감지시간을 지연시간으로 고려하여 1분 미만(W1)을 적용하였다. 또한 피난시뮬레이션은 공업용도의 산업시설의 수용인원을 적용하여 피난가능시간 기준에 적합여부를 평가하여 분석하였다.

<Table 2> Code of available safe egress time

Use	Time (Minute)		
	W1	W2	W3
Industrial facility (Residents are accustomed to building interiors, alarms and escape routes, and are always awake)	<1	3	>4

- ※W1 : In case of providing nurturing guidelines through broadcasting of control room equipped with CCTV facilities such as disaster prevention center or providing nurturing guidelines to all residents in interior by trained staff
- W2 : In case of providing an alert with recorded voice messages or trained staff
- W3 : In case of providing the untrained staff with fire alarm system

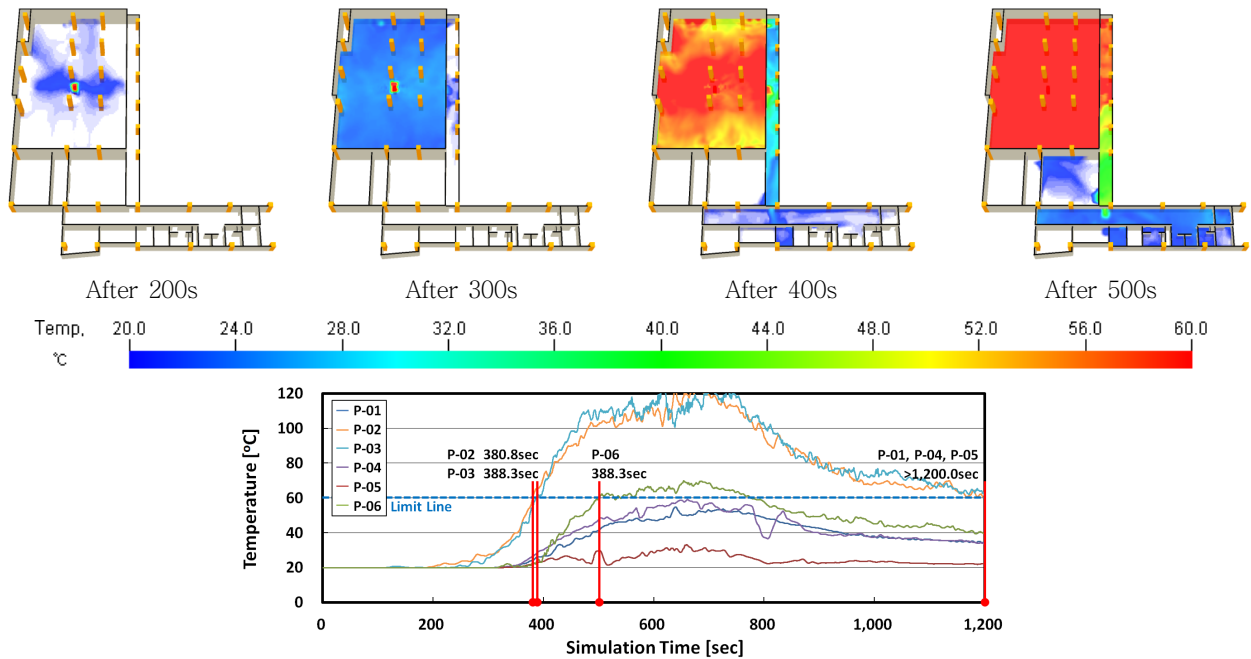


[Figure 1] Model of Analysis and Exit Location.

## 3. 수치해석 결과 및 분석

### 3.1 전기실 화재 시뮬레이션 설정

본 연구의 대상모델로 이용된 환경에너지시설 중 전기실을 포함하고 있는 층은 44.1×48.0×4.8 m 규모로서



[Figure 2] Distribution of temperature over time and safety assessment.

중앙제어실(전자기기실)과 전기실이 주요 부분을 차지하고 소규모의 부속실 등으로 구획되어 있다. 해당 층의 출입구(피난구)는 6개소이며, 크기 900×2100mm(W×H)으로 갑종방화문으로 마감되었다. 이 중 화재실(전기실)은 수평피난 방법은 Route 1(P-02 또는 P-03 ⇒ P-06)과 Route 2(P-02 또는 P-03 ⇒ P-04 ⇒ P-05)의 방법을 이용하게 된다.

수치해석을 위하여 전체 공간을 0.3×0.3×0.3m의 격자(Grid)를 178,934개로 세분화하여 전산데이터의 정확도를 높이고자 설정하였다.

화재로 인해 발생하는 영향을 분석하는 지표가 되는 도(연기)분포, 가시거리, 독성가스 등은 인명안전평가 기준에 따른 연기 호흡선(대피자 호흡선)에 따른 바닥으로부터 1.8 m 상부의 위험도를 분석하였다.

화재시나리오는 ‘소방시설 등의 성능위주설계 방법 및 기준 별표 1’에 따라 가장 피해가 클 것으로 예상되는 시나리오 3가지(시나리오1+시나리오5[나]+시나리오6[나])를 적용하였다. 출화 전 실내온도는 20 °C이며 화재 원인은 전자기기 과열로 Red Oak(CH1.700.72N0.01)가 발화하여 화재화원(최대 발열량)이 3,300 kW까지 발달하게 되고, 일산화탄소와 연기 발생률은 각각 0.004 kg/kg, 0.015 kg/kg으로 설정되었으며 공기조화기로 인한 유량의 출입은 없는 것으로 가정하였다. 보수적인 측면에서 최악의 화재조건으로 설정하기 위하여 소방시설이 작동하지 않는 것으로 하였다.

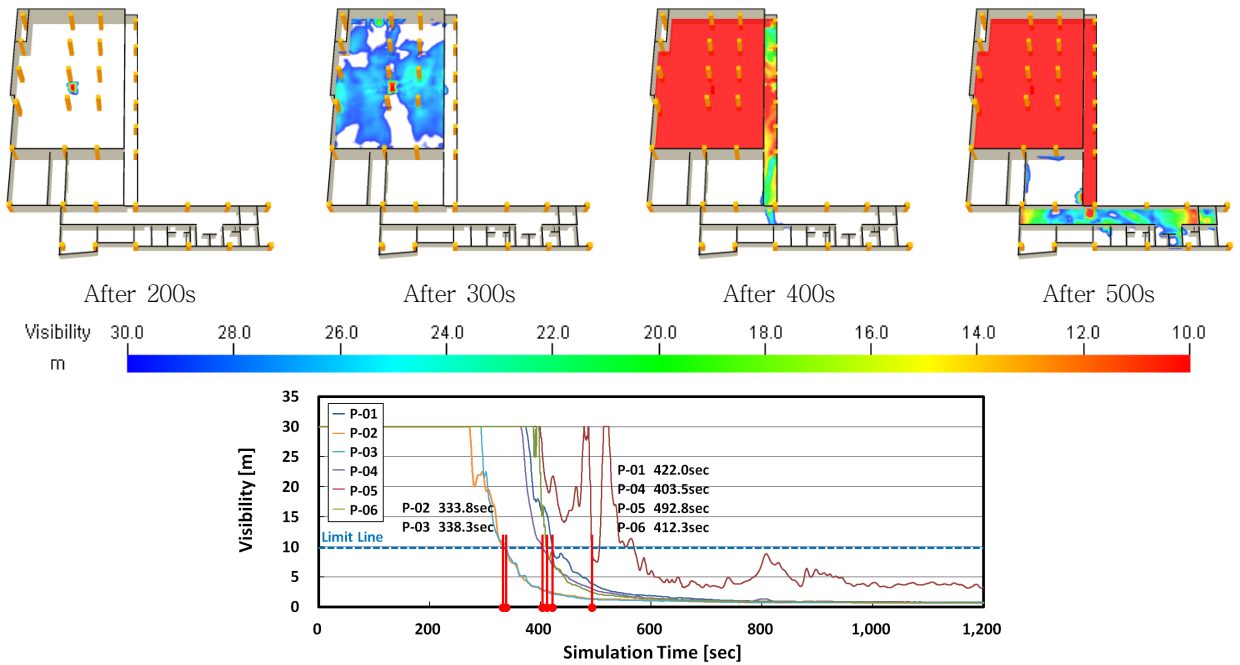
### 3.2 전기실 화재 시뮬레이션 결과

화재시뮬레이션의 결과값을 분석하기 위한 척도로서 연기호흡선을 고려한 온도에 의한 영향과 연기밀도에 대한 척도로서 가시거리, 자립피난능력에 영향을 주는 독성가스에 대하여 인명안전 기준과 비교하여 분석하였다.

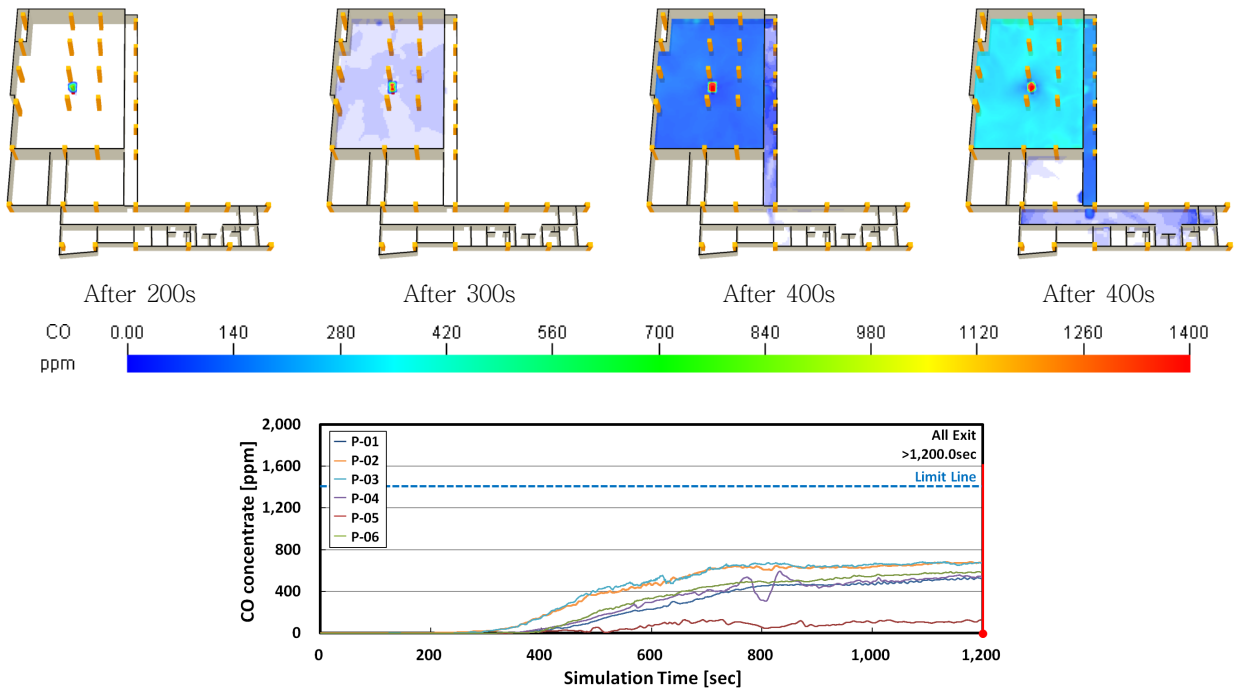
먼저 호흡안전선(바닥으로부터 1.8 m)에서 60 °C를 기준으로 노출에서부터 확산형태(온도분포)를 파악하였다. 그 결과 화재실 내 피난구 P-02, P-03은 각각 380초, 388.3초 이후 거주 및 피난 한계온도에 노출되어 상승하는 것으로 나타났다. 또한 화재가 발생한 해당 층에서 1차 안전구역(복도)과 연결된 P-06까지는 388.3초, 2차 안전구역(계단실)과 연결된 P-05까지는 1,200초 이후 한계온도에 도달하는 것으로 나타났다[Figure 2].

가시거리(가시도)는 화재 시에도 건축물에 익숙하지 않은 사람이 연기가 발생하여 시야에 장애를 받더라도 유도등(피난구 유도등, 통로유도등)을 확인할 수 있는 거리에 근거한 10 m를 기준으로 하였으며, 그 결과 화재실 내 피난구 P-02, P-03은 각각 333.8초, 338.3초 초 이후 허용 가시거리 한계에 노출되어 상승하는 것으로 나타났다. 또한 화재가 발생한 해당 층에서 1차 피난안전구역(복도)과 연결된 P-06까지는 412.3초, 2차 피난안전구역(계단실)과 연결된 P-05까지는 492.8초 이후 허용한계 거리에 도달하는 것으로 나타났다[Figure 3].

사람이 피난하는 동안 노출되는 연기독성의 측정값인 일산화탄소의 농도를 1,400 ppm을 기준으로 하였다. 물론, SEPE Handbook[7]에서는 거주자가 1,000 ppm까



[Figure 3] Distribution of visibility over time and safety assessment.



[Figure 4] Distribution of CO time and safety assessment.

지 30분 이상 견딜 수 있는 것으로 보고되고 있지만 국내 기준을 우선으로 하였다. 그 결과, 화재실 내 피난구 P-02, P-03과 1차 안전구역(복도)과 연결된 P-06, 2차 안전구역(계단실)과 연결된 P-05의 모든 지점에서 시뮬레이션 설정 1,200초 동안 일산화탄소 허용농도 한계까지 노출되지 않는 것을 확인할 수 있었다.[Figure 4].

### 3.3 전기실 피난 시뮬레이션 설정

해당 건물의 층에는 ‘소방시설 등의 성능위주설계 방법 및 기준’에 근거하여 상주인원을 화재실(전기실) 및 중앙 제어실이 각각 3명, 5명이었으며, 견학홀에서는 최악의 조건가정 상 시설견학 중 발생한 화재사고로 비상주인원 30명이 입실한 조건에서 Pathfinder를 활용하여 피난 시

물레이션을 실행하였다[8]. 대피인원의 특징과 이동속도는 SFPE에서 제시하는 기준을 적용하였으며, 지연시간은 앞서 <Table 2>에서 제시한 1분으로 하였다. 피난경로는 Route 1.과 Route 2.로 구분하여 확보하였으나, 해당 층은 환경에너지시설 건물 중 3층에 위치하고 있기 때문에 Route 1을 제외한 Route 2 방향만을 시뮬레이션으로 계획하였다.

### 3.4 전기실 피난 시뮬레이션 결과

피난소요시간은 식 (1)과 같이 나타낼 수 있다.

$$E_t = D_t + N_t + P_t + S_t \quad (1)$$

여기에서 피난소요시간( $E_t$ )은 화재감지시간( $D_t$ )과 통보시간( $N_t$ ), 피난개시지연시간( $P_t$ ), 시뮬레이션시간( $S_t$ )을 합산한 시간으로 나타낸다.

화재발생 후 20초가 넘어선 시점에서 화재실 내 상주인원이 1차 피난안전구역(복도)으로 피난이동되었으며, 약 80초가 소요되는 시점에서 2차 안전구역(부속실 또는 계단)으로의 이동을 확인할 수 있었다. 화재층 내 모든 재실자가 해당 층을 벗어나는 시점은 93.4초가 소요되었다. 각 출입구 지점에서의 피난소요시간(RSET)은 화재시뮬레

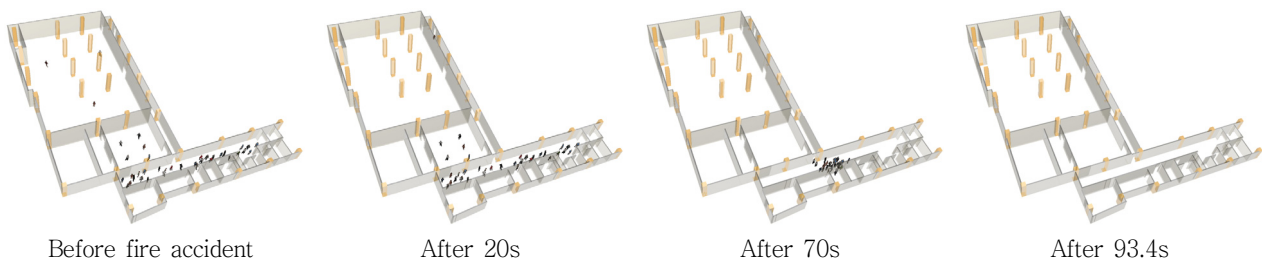
이션에서 얻어진 데이터 기초로 인명안전 기준에 적합한 피난허용시간(ASET)과 비교하여 화재 및 피난 안전성을 비교, 검토하였다. 그 결과, <Table 3>에 나타난 바와 같이, 각 구획실의 출입구에서의 피난소요시간은 피난허용시간을 하회하는 것을 확인할 수 있었기에 환경에너지시설의 전기실에서의 화재 시 화재 및 피난 안전성을 확보할 수 있는 것을 검증할 수 있었다[8].

### 4. 결론

현대사회의 요구에 의한 생산과 소비의 증대는 쓰레기라는 잔유물을 유발하게 되며, 이를 처리하기 위한 환경에너지시설은 국내환경을 고려할 때 매우 중요한 시설이다. 그러나 가연물질의 다량 보유 및 화기원의 사용으로 인한 위험성을 고려하지 않을 수 없다.

본 연구에서는 환경에너지시설의 화재위험성으로부터 운영의 안전성 및 대응력을 확인하기 위하여 화재 및 피난 시뮬레이션을 실시한 결과 다음과 같은 결론을 확인할 수 있었다.

첫째, 국내의 ‘소방시설 등 성능위주설계 방법 및 기준’에서 제시하는 인명안전 기준을 FDS 화재시뮬레이션을 통해 비교한 결과, 온도분포, 가시거리, 일산화탄소에 의한 독성 기준이 확보되는 것을 알 수 있었다.



[Figure 4] Result of evacuation simulation.

<Table 3> Comparison of RSET and ASET by Exit

Exit No.	Time	①	②	③	④
P-01		67.2	29.4	96.6	422.0
P-02		9.7	29.4	39.1	333.8
P-03		14.5	29.4	43.9	338.3
P-04		69.8	29.4	99.2	403.5
P-05		93.4	29.4	122.8	492.8
P-06		21.1	29.4	50.5	412.3

※ ① Result of Evacuation Simulation  
 ② Detection Time[sec]  
 ③ Required Safety Egress Time[sec]  
 ④ Available Safe Egress Time[sec]

둘째, 피난시뮬레이션 프로그램인 Pathfinder를 통해 화재 진행 및 확대에 따른 재실자의 피난시간을 확인한 결과, 피난소요시간(RSET)이 피난허용시간(ASET)의 범위 내에 있었기에 화재 시 대상시설의 피난대응 능력이 확보됨을 확인할 수 있었다.

본 연구의 대상인 환경에너지시설은 건축물의 규모가 비교적 대형대상물(특정소방대상물 1급 이상)에 해당하는 경우는 미미하지만, 위험성이 높은 대상으로 특별한 안전관리가 필요하다. 따라서 향후 연구에서는 각 구획실 별 화재에 따른 화재 및 피난 안전성 검토에 대한 분석과 구획실 동시화재 위험발생조건 등을 고려한 결정론적 측면에서의 안전성 검토뿐만 아니라 발생빈도를 고려한 위험론적 방법 대상공간의 용도 조건 등 다양한 사례분석이 필요할 것으로 사료된다.

## 5. References

- [1] J. H. Kim, S. Y. Joo, G. J. Lee(2007), "An Evaluation on Evacuation Safety in Multiplex Cinema based on Fire & Evacuation Simulation." Journal of Korean Institute of Architectural Sustainable Environment and Building Systems, 1(1):7-13.
- [2] P. Abolghasemzadeh(2013), "A Comprehensive Method for Environmentally Sensitive and Behavioral Microscopic Egress Analysis in Case of Fire in Buildings." Safety Science, 59(1):1-9.
- [3] J. H. Kim, C. H. Lee, G. J. Lee, D. C. Kim(2018), "Analysis of Smoke Behavior in Fire within Real-scale Theater Using FDS: Influences of Fire Curtain and Natural Smoke Vent Area." Fire Sci. Eng. 32(6):7-14.
- [4] J. Y. Lee(2010), "The Legal Problems and Improvement in the Performance." Fire Sci. Eng. 24(1):54-63.
- [5] K. McGrattan(2008), FDS(V4, V5) Technical Reference Guide. NIST Special Publication.
- [6] Korea Ministry of Government Legislation(2016), Standard and Method of Performance-based Design for Firefighting Facilities, No. 2016-30.
- [7] P. J. DiNenno(2008), SFPE Handbook of Fire Protection Engineering(4th Edition), National Fire Protection Association.
- [8] J. Y. Kim, Y. H. Jeon(2015), "The Case Analysis through Fire Simulation FDS and Evacuation Simulation Pathfinder." Journal of Business Venturing and Entrepreneurship, 10(6):253-260.

## 저자 소개



### 전 용 한

인하대학교 기계공학 박사 취득. 현재 상지영서대학교 소방안전과 부교수 재직 중.  
관심분야 : 열·연기 유동, 에너지공학 등



### 한 상 필

Kyoto University 건축공학 박사 취득.  
현재 상지영서대학교 소방안전과 부교수 재직 중  
관심분야 : 건축방재, 건축환경, 건축설비 등