

[Research Paper]

## 환경에너지 시설내 화재 및 피난해석

전용한 · 김종윤<sup>\*†</sup>

상지영서대학교 소방안전학과 교수, \*서정대학교 소방안전관리과 교수

# Fire and Evacuation Analysis in Environmental Energy Facilities

Yong-Han Jeon · Jong-Yoon Kim<sup>\*†</sup>

Professor, Dept. of Fire Protection and Safety, Sangji-Youngseo College. \*Professor, Dept. of Fire Safety Management, Sejoeng Univ.

(Received April 23, 2019; Revised May 10, 2019; Accepted May 13, 2019)

### 요 약

본 연구에서는 환경에너지 시설내 전자기기실 내부의 화재 및 피난을 수치적 해석 방법을 통해 실시하고 평가하였다. 화재 시뮬레이션은 FDS를 이용하여 가시거리, 온도분포, CO의 농도분포 등을 분석하였다. 그 결과를 토대로 피난시뮬레이션인 Pathfinder 프로그램을 사용하여, 재실자들의 피난시간을 계산하였으며 피난안전성 평가를 도출하였다. 그 결과 전자기기실 내부의 피난 허용시간은 P-01에서 203.3 s로 가장 단시간 내에 대피가 요구되었으며, P-05에서 398.6 s로 피난 허용시간이 가장 큰 값을 나타내었다. 피난 소요시간 분석 결과 모든 지점에서 모든 재실 인원이 대피가 이루어져 대피자의 안전성이 확보되는 것으로 판단되었다. 특히 이 시뮬레이션의 결과는 피난안전성능을 높이기 위하여 소방설비가 작동하지 않는 경우를 고려한 것으로서 실제 화재 발생 시 소방설비가 작동된다면 보다 우수한 안전을 확보할 수 있을 것으로 사료된다.

### ABSTRACT

In this study, a fire and evacuation inside an electronic equipment room in environmental energy facilities were conducted and evaluated using a numerical analysis method. In the fire simulation, the visual distance, temperature distribution, and CO concentration distribution were analyzed using FDS. Based on the results, the Pathfinder program, which is an evacuation simulation, was used to calculate the evacuation time of the occupants and derive an evacuation safety evaluation. As a result, the Available safe Egress time (ASET) of P-01 and P-05 was 203.3 and 398.6 s, respectively. For the Required safety Egress time (RSET) results, all evacuees were evacuated at all points and the safety of the evacuee was secured this simulation showed that the safety evaluation is based on the non-operation of the fire-fighting equipment to improve the safety, making it possible to secure better evacuation safety performance owing to the fire of other fire-fighting facilities.

**Keywords** : FDS, Pathfinder, Available safe egress time (ASET), Required safety egress time (RSET)

## 1. 서 론

최근 쓰레기 소각시설에서 화재가 증가함에 따라 화재로 인한 인적·물적 손실이 증가하는 경향이 나타나고 있어 인적·물적 피해가 속출하고 있다. 2018년 7월 청주권 광역소각시설 2호에서 자연발화로 추정되는 화재가 발생하였으며, 이 화재로 대형폐기물처리창고 1개동이 전소되고 장비와 집기 등이 소실돼 소방서 추산 4억7천500여 만원의 재산피해가 있었다. 또한 2015년 영천 도남공단 쓰레기소

각시설에서 소각시설 2급 대상으로 가연물질이 다량 야적되어 있는 상태에서 화재가 발생하여 재산피해가 있었다. 2015년 6월에는 시흥시시설관리공단 폐기물 소각처리 시설에서 자연발화로 추정되는 화재가 발생하여 방수로봇까지 동원하여 두 시간 만에 진화했다. 2015년에만 같은 장소에서 두 번의 화재가 발생한 곳이며 진화과정 또한 금수성 물질이 물과의 접촉으로 인해 연기가 다량 발생하여 큰 어려움을 겪었다. 따라서 안전한 소각로의 형태의 환경에너지 시설이 반드시 필요한 실정이다. 이러한 환경에너지 시

<sup>†</sup> Corresponding Author, E-Mail: [sweat100@hanmail.net](mailto:sweat100@hanmail.net). TEL: +82-31-860-5014, FAX: +82-31-860-5053

© 2019 Korean Institute of Fire Science & Engineering. All right reserved.

설을 시공 전에는 반드시 화재 및 피난 해석을 통해 안전성을 확보하는 것이 필수적이며, 현재 다양한 분석기법을 통하여 연기 등을 분석함과 동시에 대피자의 위험도를 평가하여 피해를 최소화 하는 연구가 진행 중에 있다. 건물화재의 경우는 컴퓨터를 이용한 수치해석을 주로 하고 있으며 대표적인 연구 결과로 Roh와 Ryou<sup>(1)</sup>, Abolghasemzadeh<sup>(2)</sup> 등의 여러 연구자들이 컴퓨터 수치해석을 통한 화재해석을 실시하고 있다. 본 연구에서는 National institute of standards and technology에서 개발한 Fire dynamics simulator (FDS)를 이용하여 화재 시뮬레이션을 실시하였으며 이 프로그램은 화재에 의한 열 및 연기와 같은 유체역학적 유동 등을 해석하는 소프트웨어이다. FDS 프로그램은 Navier-stokes equations에 기반으로 연산을 수행하며 수치해석 결과를 온도 및 연기의 유동을 예측할 수 있다, 그러한 결과를 데이터 시트의 방식으로 출력하여 연기 및 열의 결과를 시간과 위치에 따라 수치적인 평가가 가능하다<sup>(3)</sup>. 국내에서는 Yoo<sup>(4)</sup> 등이 FDS를 사용하여 건물이나 터널, 지하철에서 화재 발생시 대피자들의 최적 대피 경로 안전성에 대한 평가를 수행하였으며 이와 비슷한 많은 적용사례들이 있다. 또한 스프링클러 설비나 제연설비 그리고 내화구조평가까지 가능하기 때문에 성능위주의 피난 안전성 평가에 광범위하게 사용되고 있다. 피난시뮬레이션은 Thunderhead engineering consultants, Inc.에서 개발한 Pathfinder로서 거주자 피난경로를 시뮬레이션 할 수 있는 프로그램이다. Pathfinder 프로그램은 DiNenno (2008)의 SFPE handbook<sup>(5)</sup>에서 제시한 인간의 행동에 따라 화재발생시의 대피자 행동을 분석하고 있으며, 이는 컴퓨터를 기반으로 한 인간행동 분석 기술을 사용한 것이다. 또한 대피자의 행동을 다양한 가정에 따라 표현하고 있는데 충돌, 경로 이탈, 이동속도 변화, 추월이나 뒷걸음질 등을 표현함으로써 실제 상황과 유사하게 나타내고 있다. 외국에서는 Mu 등<sup>(6)</sup>, Ronchi와 Colonna<sup>(7)</sup> 등의 연구사례가 있으며 국내에서도 다양하고 많은 연구사례들이 존재한다.

하지만 국내 환경에너지 시설에 대한 안전평가등에 대한 기초적인 자료가 부족한 실정이므로 본 연구에서 화재 시뮬레이션과 피난 시뮬레이션을 이용하여 기초 평가를 하고자 한다.

## 2. 수치해석

본 연구에서의 화재 및 피난 안전성 평가는 Ministry of public safety and security (2015)의 “소방시설 등의 성능위주 설계방법 및 기준 시행령 별표1”에 제시된 인명안전 기준과 피난시간 기준을 적용하였으며 세부적인 평가는 Society of fire protection engineers (SFPE: 미국소방기술사회)에서 발간된 “The SFPE handbook of fire protection engineering”에서 기술된 방법으로 평가하였다.

### 2.1 판정기준

화재 및 피난 안전성 평가는 “소방시설 등의 성능위주 설계 방법 및 기준 시행령 별표1”에서 제시된 인명안전 기준 및 피난시간 기준을 적용하며 세부적인 평가방법은 “The SFPE handbook of fire protection engineering”에 따라 평가한다.

### 2.2 화재 시뮬레이션 평가 방법

일반적으로 화재에 의한 재실자의 위험도는 열 및 가시거리 그리고 독성가스에 의해 상승한다. 따라서 재실자의 피난을 목적으로 한 화재시뮬레이션 수행 시 국내에서 적용해야 할 인명안전기준은 Table 1과 같다.

### 2.3 피난 시뮬레이션 평가 방법

본 피난 시뮬레이션에서 해석하는 평가 지점 중 화재실의 경우 재실 특성상 화재상황을 재실자가 스스로 인식하여 대피할 수 있으므로 통보, 조치, 피난시작 시 지연시간이 발생하지 않는다. 따라서 화재안전성 평가를 할 경우 화

Table 1. Occupational Safety Standards

Breathing Limit Line	Reference of 1.8 m from the Floor	
Effect of Heat	below 60 °C	
Effect of Visibility	Use	Permissible Visibility Limit
	Other Facility	5 m
	Assembly Facility Sales Facility	10 m
Effect of Toxicity	Component	Reference Value of Toxicity
	CO	1,400 ppm
	HCN	80 ppm
	O <sub>2</sub>	above 15%
	CO <sub>2</sub>	below 5%

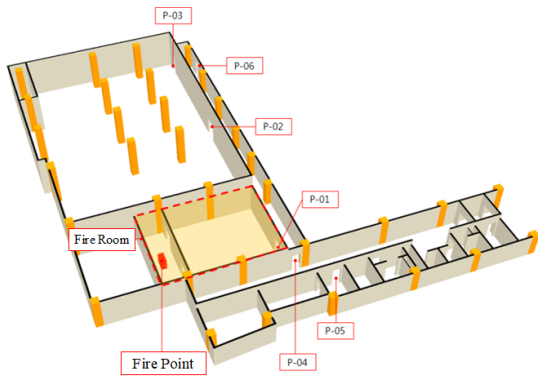


Figure 1. Model of analysis and exit location.

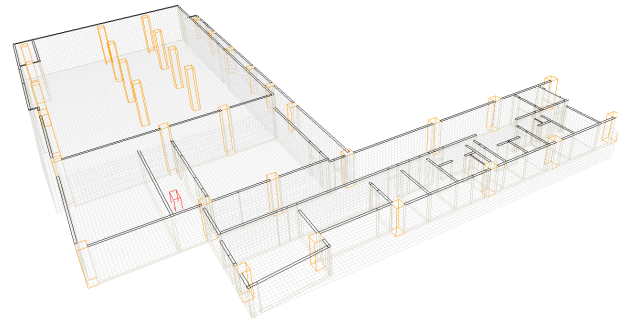


Figure 2. Grid modeling of electronic equipment room.

재실에서는 재실자의 대피 지연시간을 화재 감지기의 감지 시간으로 고려하며 화재실 이외의 지역에 대해서는 산업건물의 특성을 감안하여 “소방시설등의 성능위주 설계 방법 및 기준 시행령 별표1”에서 제시된 피난가능시간 기준에 따라 화재 감지기의 감지시간과 추가로 1분의 지연시간을 적용하여 피난 시뮬레이션을 실시하며 최종적인 피난 소요 시간을 선정한다. 화재 감지기의 감지시간은 화재시뮬레이션을 통하여 구할 수 있다.

#### 2.4 화재 및 피난 시뮬레이션 평가 대상

본 연구에서 수행한 시나리오는 평상시 재실밀도가 가장 높을 것으로 예상되는 위치에 대해서 화재 영향성을 평가하기 위하여 환경에너지 시설 내 재실밀도가 가장 높을 것으로 예상되는 전자기기실(중앙제어실)을 화재지점으로 설정하여 아래의 시나리오로 화재안전성 평가를 수행하였다.

화재는 전자기기의 과열로 인한 화재조건으로 설정하였으며 최악조건을 산정하기 위해 자동으로 작동하는 소화설비(스프링클러 등)가 작동하지 않는 것으로 설정하였다.

화재실에 있는 재실자들 모두는 화재를 직접 목격하며 그에 따라 대피여부를 판단할 수 있으므로 감지기 작동 시 피난을 시작하는 것으로 설정하였으며, 화재실 이외 장소의 경우는 경보가 발생한 후 화재 여부를 판단하여 대피를 시작하는 것으로 간주하여 지연시간 1분을 적용하였다.

“소방시설등의 성능위주 설계 방법 및 기준 별표”에서 제시하는 화재 및 피난 시뮬레이션의 시나리오 작성기준에 의하면 시나리오 적용이 가능한 모든 장소 중 가장 피해를 클 것으로 예상되거나 화재발생 확률이 가장 높을 것으로 예상되는 지점에 대한 피난 안전성 평가를 실시 해야한다.

본 건축물에서는 재실밀도가 가장 높을 것으로 예상되는 전자기기실(중앙제어실)을 화재지점으로 설정하여 화재 안전성 평가를 실시하였다.

### 3. 수치해석 결과

#### 3.1 전자기기실 화재 시뮬레이션 설정

본 연구에서 해석한 전자기기실은 44.1 m × 48.0 m × 4.8 m의 크기를 가지고 있으며, 대피자의 호흡선을 고려하여 피난구 바닥으로부터 높이 1.8 m에서 위험도를 분석하였다. 각각의 피난구 위치에서 호흡간격을 고려하여 평균분석을 실시하였으며, 각 피난구의 온도 및 가시거리, CO농도를 분석하였다. 피난구는 총 6개로 설정하였고 이 중 P-1은 화재실 피난구이며, 최종 피난구는 P-5 및 P-6의 두 곳으로 설정하였다.

“소방시설등의 성능위주 설계 방법 및 기준 시행령 별표1”에서 제시된 재실자 인명안전기준에 의거하여 분석된 위험요소가 해당 성능기준에 도달하였을 경우 위험한 것으로 판단, 피난구별 위험요소를 분석하고 각 위험요소에 대한 허용한계시간을 계산하여 도출된 결과 중 각 피난구에 대하여 가장 짧은 시간을 고려하여 그 피난구에 대한 피난 허용시간(Available safe egress time : ASET)<sup>(8)</sup>으로 결정하였다.

수치해석은 총 178,934개의 Multi mesh를 이용하여 격자를 생성, 해석을 실시하였으며 격자크기는 30 cm로 설정하였다. 이는 미국원자력규제위원회(NRC)<sup>(9)</sup>에서 제시한 계산결과의 정확도와 화재해석에 필요한 소요시간을 모두 만족하는 범위인  $D^*/\Delta x = 5\sim 10$ 의 값을 적용한 크기이다. ( $D^*/\Delta x = 5.15$ )

경계조건으로 실내의 초기온도는 20 °C를 기준으로 하였으며 발화는 전자기기 과열에 따른 화재로 설정하였다. 화재물질은 해석의 안전성향상을 위하여 발열량이 큰 물질(화재실의 책상 : CH<sub>1.7</sub>O<sub>0.72</sub>N<sub>0.001</sub>, Red oak)로 최대발열량 3300 kW로 설정하였으며 이때 CO 발생분율은 0.004 kg/kg, 연기 발생분율은 0.015 kg/kg 으로 설정 하였다. 또한 최악의 조건으로 고려하기 위하여 소방설비는 미작동 한 것으로 설정 하였다. 다음 Figure 3에 화재 대상물질에 대한 열방출률을 나타내었다. 본 연구에 적용된 최대발열량은 그림에 제시된 화재실험자료를 기준으로 적용하였으며 화재성상은 t<sup>2</sup> 화재성장곡선 중 Fast fire의 조건으로 적용하였다.

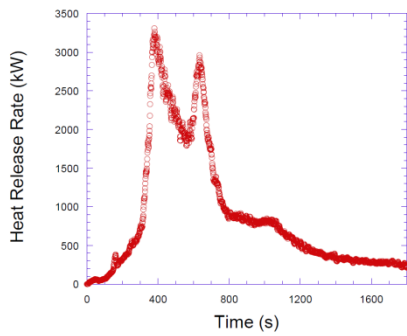


Figure 3. Heat release rate of fire material.

### 3.2 전자기기실 화재 시뮬레이션 결과

FDS를 이용한 화재 시뮬레이션 결과 전자기기실에서 화재발생 시 시간의 경과에 따른 가시거리, 온도, CO농도 분포 결과를 도출하였으며 그 결과를 Figure 4~Figure 6에 각각 나타내었다. 또한 그 결과를 이용하여 그래프를 작성, 한계선을 표시하여 각 피난구별 허용한계시간을 계산하였다.

먼저 Figure 4에서 나타난 가시거리에 따른 안전성 평가 결과를 분석해 보면 화재실 피난구인 P-1 지점과 화재실 인근 피난구인 P-4 지점은 화재발생 203 s 및 230 s 이후부터 위험한 것으로 나타났으며, 최종 피난구인 P-5 지점에서는 398 s, P-6 지점에서는 323 s 이후부터 위험한 것으로 나

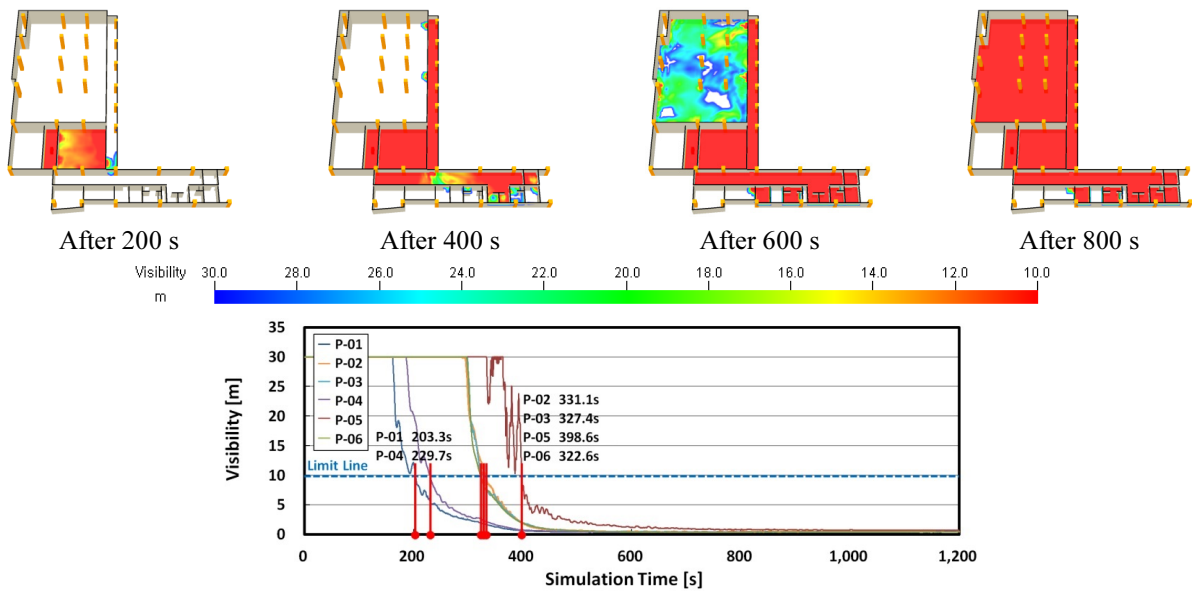


Figure 4. Distribution of visibility over time and safety assessment.

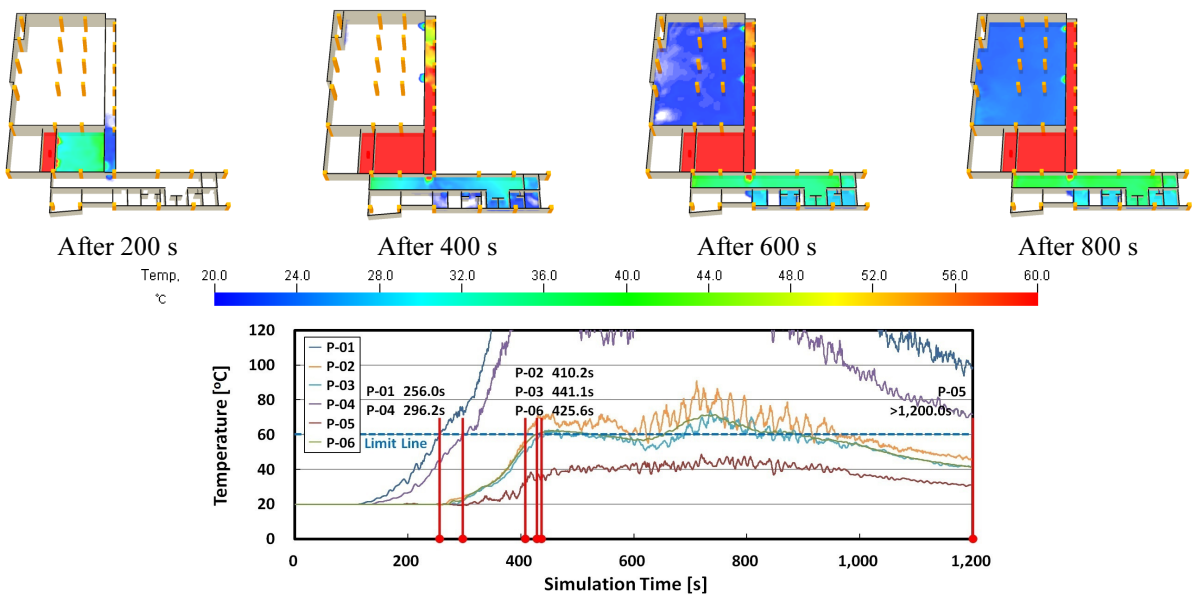


Figure 5. Distribution of temperature over time and safety assessment.

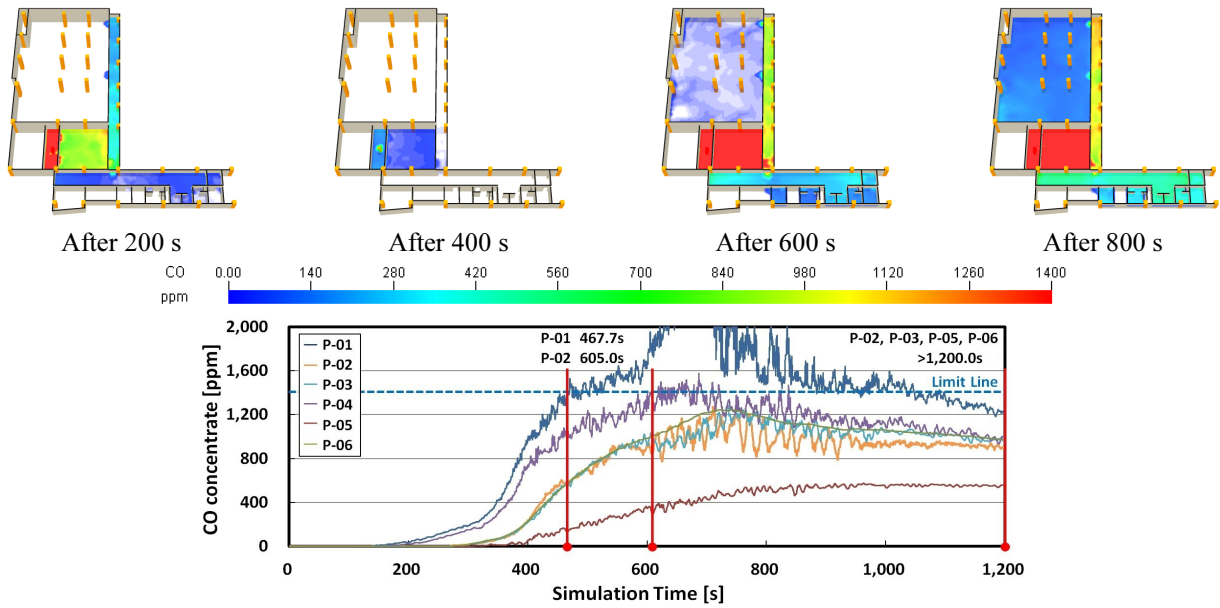


Figure 6. Distribution of CO concentration over time and safety assessment.

타났다. 그 이외의 피난구에서는 327 s~331 s 이후부터 위험한 것으로 나타났다. 화재실 보다 건물 안쪽에 위치한 방의 재실자들은 P-6 피난구를 이용하여 대피해야 하며 정상적으로 대피가 이루어질 경우 최소 323 s 이내에 대피하여야 할 것으로 판단되었다.

Figure 5에서 나타난 온도분포에 따른 안전성 평가 결과를 분석해 보면 화재실 피난구인 P-1 지점과 화재실 인근 피난구인 P-4 지점은 화재발생 256 s 및 296 s 이후부터 위험한 것으로 나타났으며, 최종 피난구인 P-5 지점에서는 위험온도에 도달하지 않는 것으로 나타났고 P-6 지점에서는 426 s 이후부터 위험한 것으로 나타났다. 또한 나머지 피난구에서는 410 s~441 s 이후부터 위험한 것으로 나타났으며 이에 따라 최소 위험온도에 도달하기 전의 시간까지는 각 피난구 장소를 벗어나야 함을 알 수 있다.

Figure 6에서 나타난 일산화탄소 농도 분포에 따른 안전성 평가 결과를 분석해 보면 화재실 피난구인 P-1 지점과 화재실 인근 피난구인 P-4 지점은 화재발생 468 s 및 605 s 이후부터 위험한 것으로 나타났으며, 나머지 피난구 지점에서는 일산화탄소 위험 농도에 도달하지 않는 것으로 나타났다.

Figure 4~Figure 6의 그래프를 비교하면 가지거리 분포의 결과가 허용한계시간에 가장 먼저 도달하였으며 이는 연기발생분율이 크고 연기의 특성상 빠른 확산 속도에 때문임을 알 수 있다. 또한 일산화탄소의 농도는 발생분율이 낮아 온도의 허용한계인 60 °C에 도달하는 시간보다 상대적으로 더 늦게 도달하였고 화재실 및 인근 피난구를 제외한 장소에서는 위험농도에 도달하지 않음을 알 수 있다. 따라서 본 연구에서 대피자들의 위험성을 판단할 경우 연기에 의한 가지거리 분포에 따라서 안전성 평가를 할 필요가 있다고 판단된다.

### 3.3 전자기기실 피난 시뮬레이션 설정

본 연구에서는 Pathfinder를 이용하여 피난 시뮬레이션을 수행하였으며 실내에는 총 38 명의 인원이 있다고 가정하였다. 또한 화재실 및 화재실 인근에는 5 명의 인원이 있다고 가정하였으며 대부분의 인원들은 최종피난구 인근의 홀에 있다고 가정하였다. 또한 화재실을 지나 건물 안쪽에는 3 명의 인원이 근무를 하고 있다고 가정하였다. 화재 발생시 대피자의 이동속도는 SFPE the handbook of fire protection engineering에서 제시하고 있는 재실자의 특성별 이동속도 및 재실비율을 적용하였으며 화재실에 있는 인원의 경우 재실 특성상 화재상황을 재실자가 직접 인지하여 대피할 수 있어 통보, 조치, 피난개시에 대한 지연시간이 발생하지 않으므로 감지기 작동 후 즉시 대피를, 비화재실에 있는 경우에는 지연시간이 발생하므로 피난지연시간 1 분을 적용하여 대피를 한다고 가정하였다. 다음 Figure 7에 피난시뮬레이션 모델 및 인원배치에 대하여 나타내었다.

### 3.4 전자기기실 피난 시뮬레이션 결과 및 안전성 평가

상용 피난 시뮬레이션인 Pathfinder를 이용하여 전자기기실에서 화재발생 시 재실자의 대피 해석을 실시하였으며 그 결과를 Figure 8에 나타내었다. 그림에 나타나는 바와 같이 대피 시작 후 10 s 이내에 화재실 및 화재일근에 위치한 인원은 모두 이동을 실시하였으며 화재실 보다 건물 안쪽의 인원은 대피 시작 후 70 s 내외에 P-6 피난구를 이용하여 대피하였다. 또한 P-5 피난구를 이용한 대피자들은 대피 시작 86.2 s 후 위험지역을 벗어나 대피가 완료되었다.

FDS를 이용한 화재시뮬레이션에서 화재 감지기가 작동하는 시간을 확인한 결과 24.5 s였으며 이에 따라 Pathfinder를 이용하여 도출된 피난 시뮬레이션결과에 화재감지시간

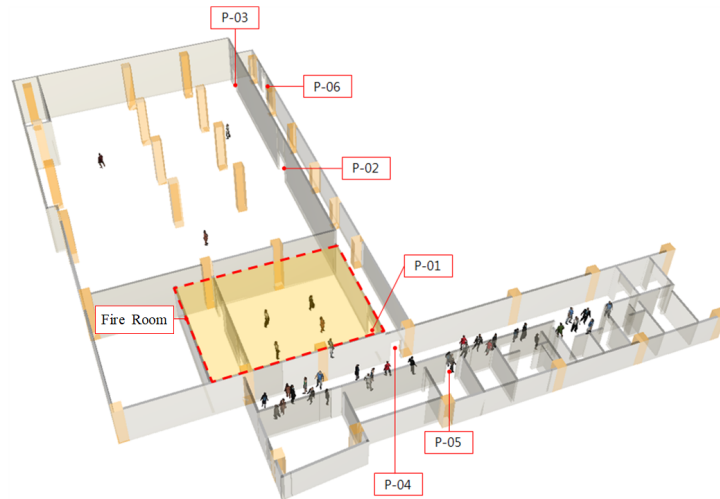


Figure 7. Model of analysis and personnel placement.

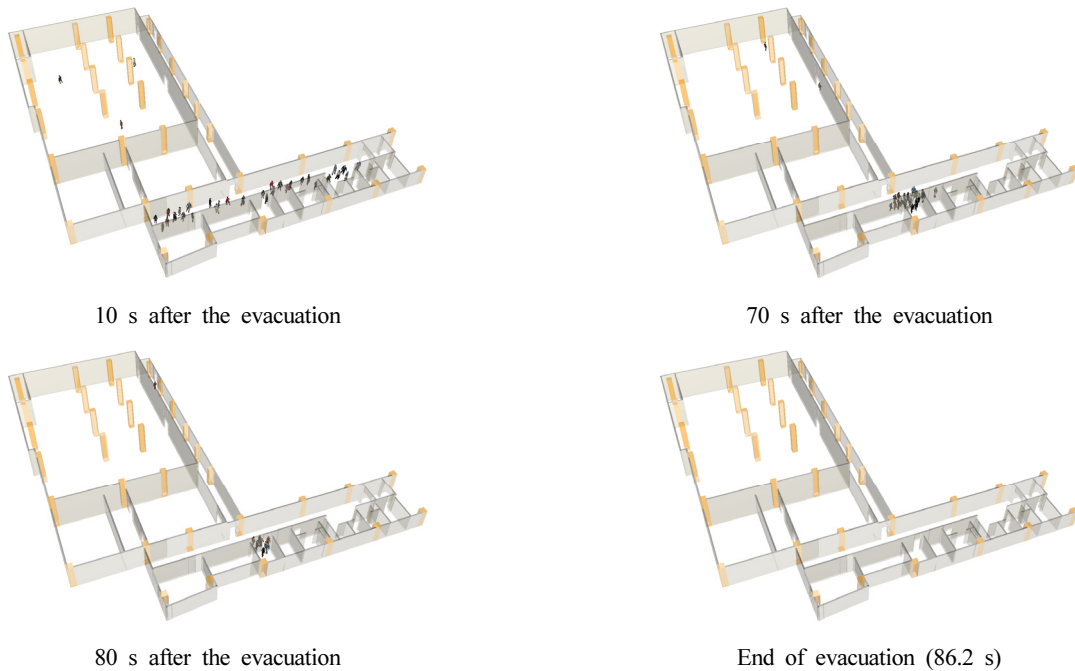


Figure 7. Result of evacuation simulation.

(24.5 s)을 더하면 피난구별 피난 소요시간(RSET)을 산정<sup>8)</sup>할 수 있으며 이 결과와 화재 시뮬레이션 결과에서 도출된 피난허용시간(ASET)을 이용하여 전자기기실에 대한 안전성평가를 실시하였다. Table 2에 피난소요시간과 피난허용시간의 비교 결과를 나타내었다.

화재 발생 시 재실자의 피난 안전성을 분석한 결과, 전체 구간에서 피난 소요시간이 피난 허용시간을 초과하지 않음에 따라 화재 발생 시 재실자들이 안전하게 피난 할 수는 것으로 판단되어 안전성에 문제가 없는 것으로 나타났다.

#### 4. 결 론

화재 시뮬레이션인 FDS와 피난 시뮬레이션인 Pathfinder를 이용하여 환경 에너지 시설내 화재 및 피난 시뮬레이션을 실시하고 도출된 결과를 이용하여 각 피난구별 피난소요시간(RSET) 및 피난허용시간(ASET)을 산정하였으며 이 값의 비교를 통하여 최종적으로 전자기기실에 대한 화재 안전성평가를 실시하였다.

화재 시뮬레이션 결과 허용한계시간에 가장 먼저 도달하는 기준인 가시거리 분포를 이용하여 각 피난구별 피난

**Table 2.** Comparison of RSET and ASET by Exit

Exit No.	Result of Evacuation Simulation [s]	Detection Time [s]	Required Safety Egress Time [s]	Available Safe Egress Time [s]
P-01 (Fire Room)	7	24.5	31.5	203.3
P-02	69.8	24.5	94.3	331.1
P-03	74.6	24.5	99.1	327.4
P-04	9.7	24.5	34.2	229.7
P-05 (Final Exit)	86.2	24.5	110.7	398.6
P-06 (Final Exit)	81.3	24.5	105.8	322.6

허용시간을 산정하였으며 피난시뮬레이션 결과에 화재감지시간을 더하여 피난소요시간을 산정하였다. 또한 이 두 값을 비교 화재 발생 시 재실자의 피난안전성을 분석한 결과, 전체 구간에서 피난 소요시간이 피난 허용시간을 초과하지 않기 때문에 재실자가 안전하게 피난할 수 있는 것으로 나타났다. 이러한 시뮬레이션 결과를 이용하여 화재발생 시 안전성을 높이기 위하여 소방설비가 작동하지 않는 최악의 상황을 고려하여 안전성 평가를 실시할 경우 실제 화재발생시 보다 우수한 안전이 확보될 수 있을 것으로 판단된다.

## References

1. J. S. Roh, and H. S. Ryou, "CFD Simulation and Assessment of Life Safety in a Subway Train Fire", *Tunnelling and Underground Space Technology*, Vol. 24 No. 4, pp. 447-453 (2009).
2. P. Abolghasemzadeh, "A Comprehensive Method for Environmentally Sensitive and Behavioral Microscopic Egress Analysis in Case of Fire in Buildings", *Safety Science*, Vol. 59, No. 1, pp. 1-9 (2013).
3. K. B. McGrattan, "Fire Dynamics Simulator Version 5 User's Guide", National Institute of Standards and Technology, USA (2010).
4. J. O. Yoo, "A Study on Evacuation Characteristic by Cross-Sectional Areas and Smoke Control Velocity at Railway Tunnel Fire", *Journal of Korean Tunnel Underground Space Association*, Vol. 17, No. 3, pp. 215-226 (2015).
5. P. J. DiNunno, "The SFPE Handbook of Fire Protection Engineering 4th edition", National Fire Protection Association, USA (2008).
6. N. Mu, W. G. Song, X. X. Qi, W. Lu, and S. C. Cao, "Simulation of Evacuation in a Twin Bore Tunnel: Analysis of Evacuation Time and Egress Selection", *Procedia Engineering*, Vol. 71, No. 1, pp. 333-342 (2014).
7. E. Ronchi, and P. Colonna, "The Evaluation of Different Evacuation Models for Assessing Road Tunnel Safety Analysis", *Tunnelling and Underground Space Technology*, Vol. 30, No. 1, pp. 74-84 (2012).
8. S. L. Poon, "A Dynamic Approach to ASET/RSET Assessment in Performance based Design", *Procedia Engineering*, Vol. 71, No. 1, pp. 173-181 (2014).
9. K. B. McGrattan, "Verification & Validation of Selected Fire Models for Nuclear Power Plant Applications : Fire Dynamics Simulator", U.S. Nuclear Regulatory Commission, USA (2007).