

[Research Paper]

민감도 분석을 이용한 원전 주제어실의 캐비닛 화재에 대한 거주성 평가

한호식 · 이재오 · 황철홍[†] · 김주성* · 이상규*

대전대학교 소방방재학과, *한국원자력안전기술원 계통평가실

Assessment of the Habitability for a Cabinet Fire in the Main Control Room of Nuclear Power Plant using Sensitivity Analysis

Ho-Sik Han · Jae-Ou Lee · Cheol-Hong Hwang[†] · Joosung Kim* · Sangkyu Lee*

Department of Fire and Disaster Prevention, Daejeon University

*Department of Reactor System, Korea Institute of Nuclear Safety

(Received April 10, 2017; Revised April 13, 2017; Accepted April 18, 2017)

요 약

NUREG-1934에서 제시된 원자력발전소 주제어실의 캐비닛 화재를 대상으로 운전원의 거주성을 평가하기 위하여 수치해석이 수행되었다. 이를 위해 본 연구에서는 대표적인 화재모델인 FDS가 사용되었다. 운전원의 거주성을 결정하는 기준으로서 복사 열유속, 상층부 온도, 연층높이 및 연기의 광학밀도뿐만 아니라, CO 등과 같은 독성물질의 농도가 포함되었다. 주요 결과로서, 화재모델의 확인 및 검증(V&V) 기반의 주요 입력인자 민감도 및 모델 불확실도 분석을 통해 다양한 화재시나리오에 대하여 거주성 기준의 초과 확률 및 거주 가능시간이 산출되었다. 최대 열방출률, CO 및 Soot yields의 민감도 분석을 통해, 거주시간 뿐만 아니라 거주성을 결정하는 한계기준의 변화가 발생됨을 확인하였다. 이러한 방법론은 불확실한 캐비닛 화재정보를 이용한 주제어실의 거주성 평가의 신뢰성 강화를 위한 현실적인 대안이라 판단된다.

ABSTRACT

Numerical simulations were performed to evaluate the habitability of an operator for a cabinet fire in the main control room of a nuclear power plant presented in NUREG-1934. To this end, a Fire Dynamics Simulator (FDS), as a representative fire model, was used. As the criteria for determining the habitability of operator, toxic products, such as CO, were also considered, as well as radiative heat flux, upper layer temperature, smoke layer height, and optical density of smoke. As a result, the probabilities of exceeding the criteria for habitability were evaluated through the sensitivity analysis of the major input parameters and the uncertainty analysis of fire model for various fire scenarios, based on V&V (Verification and Validation). Sensitivity analyses of the maximum heat release rate, CO and soot yields, showed that the habitable time and the limit criterion, which determined the habitability, could be changed. The present methodology will be a realistic alternative to enhancing the reliability for a habitability evaluation in the main control room using uncertain information of cabinet fires.

Keywords: Nuclear Power Plant, Cabinet Fire, Habitability, Fire Simulation, FDS (Fire Dynamics Simulator)

1. 서 론

원자력발전소(원전) 화재는 원자로 정지를 유발함과 동시에 안전정지 또는 사고 완화기능을 수행하는 다수 기기를 동시에 손상시킬 수 있으며, 방사능 유출과 같은 심각한 사고로 발전될 잠재적 위험성을 갖고 있다⁽¹⁾. 이에 원전 주제어실에는 화재 발생 시 원자로를 안전한 상태로 유지하거나 안전정지 기능관련 계통 및 기기가 상실되

라도, 발전소를 안전하게 정지시킬 수 있는 능력이 필수적으로 요구된다. 특히 원전 주제어실의 충분한 화재안전 대처능력을 확보하기 위해서는 우선적으로 화재 시 운전원의 거주성(Habitability)에 대한 충분한 검토가 선행되어야 한다. 원전의 화재위험성 평가 및 화재 대응체계구축 방안으로 미국 화재방호협회에 의한 성능기반 화재방호 기준(NFPA 805)⁽²⁾을 시작으로 최근 수학적 화재모델을 통한 화재위험성 평가가 진행되고 있다. 대표적으로 미국

[†] Corresponding Author, E-Mail: chewang@dju.ac.kr, TEL: +82-42-280-2592, FAX: +82-42-280-2596

© 2017 Korean Institute of Fire Science & Engineering. All right reserved.

Table 1. Comparison of Criteria for the Habitability in MCR between NUREG/CR-6850 and Domestic PBD Standard

Critical Criterion	NUREG/CR-6850 ⁽⁴⁾	Domestic PBD Standard
Radiative Heat Flux at 1.8 m	1 kW/m ²	—
Upper Layer Temperature	95 °C	60 °C (at 1.8 m)
Smoke Layer Height	1.8 m	1.8 m
Optical Density	3.0 m ⁻¹	0.26 m ⁻¹
Visibility (for a Light-Reflecting Object)	0.44 m	5.0 m
O ₂ Volume Fraction	—	15%
CO ₂ Volume Fraction	—	5%
CO Volume Fraction	—	1,400 ppm

원자력규제위원회(NRC)와 전력연구소(EPRI)에 의해 발표된 NUREG-1934⁽³⁾는 화재모델의 코드 적용 지침서로서 국내·외적으로 원전 화재모델링 적용의 기준안으로 평가되고 있다.

원전 주 제어실의 화재안전성 평가와 관련하여 NUREG-1934에는 NUREG/CR-6850⁽⁴⁾을 근거로 화재시물레이션을 통한 케비닛 내부의 케이블 화재발생 및 공조환기설비의 정지와 배연모드로 전환된 2가지 상황에 대한 화재시나리오가 제시되어 있다. 이때 화재 시 거주성에 대한 다음의 2개의 기준 중에 1개라도 발생되면 운전원은 거주할 수 없다. 첫째, 바닥면으로부터의 높이 1.8 m의 운전원 위치에서 피부에 통증을 유발할 수 있는 최소량인 1 kW/m²의 열유속이 입사되는 조건이다. 이 복사 열유속에 해당되는 상층부의 온도는 대략적으로 95 °C에 해당된다. 둘째, 연층이 수직높이 1.8 m 이하로 하강하고 연기의 광학적 밀도(Optical density)가 0.3 m⁻¹ 이하가 되는 조건이다. 이는 운전원이 빛을 반사하는 물체에 대하여 약 0.4 m 이하의 가시도(Visibility)를 갖는 상황이다. 이들 2가지 기준에 포함된 연층의 높이, 열유속, 상층부 온도 그리고 연기의 광학적 밀도(또는 가시도)에 대한 세부 기준의 독립적 적용은 주 제어실 운전원의 거주성에 대한 보다 보수적인 평가가 될 것이다. NUREG/CR-6850에 제시된 운전원의 거주성에 관한 세부적인 인자는 Table 1에 요약되었다. 국내에서도 최근 Kim 등⁽⁵⁾에 의해 이러한 기준을 근거로 신형 원전의 주 제어실 화재 시 공조환기설비의 운전방식이 거주성에 미치는 영향에 관한 화재시물레이션이 수행되었다. 그러나 운전원의 화재안전성을 평가하기 위해서는 기존의 열, 연기로 인한 호흡기계선 및 가시도의 기준뿐만 아니라, 화재로 인한 독성물질의 위험성이 동시에 고려된다면 보수적인 관점에서 운전원 거주성 평가의 신뢰성이 보다 강화될 것이다. 비록 원전의 주 제어실에는 독성가스방호에 관한 충분한 설비와 장비가 구축되어 있다 하더라도, 화재 시 주 제어실의 기능 및 운전원의 역할에 대한 중요성을 고려할 때 이러한 접근방법은 충분한 가치가 있다고 판단된다.

주 제어실 운전원의 거주 가능시간은 일반적인 관점에서

화재 공간 재실자의 허용안전피난시간(Available Safe Egress Time, ASET)과 동일한 의미를 갖는다. Guillaume 등⁽⁶⁾은 침실 화재실험을 통해 열적기준과 다양한 독성기준들이 ASET에 미치는 영향을 규명하였다. Tosolini 등⁽⁷⁾은 ISO 등의 다양한 문헌에 제시된 ASET의 기준을 적용하여, 구획화재에 대한 시물레이션을 통해 ASET의 평가 방법론에 관한 연구를 수행한 바 있다. 구체적으로, ASET의 기준 물리량에 큰 변화를 초래할 수 있는 화재시물레이션 주요 입력인자인 최대 열발생률, 화재성장률, 연소열, CO yield(y_{CO}) 및 Soot yields(y_{soot})의 불확실도가 ASET에 미치는 영향을 검토하였다. Vigne 와 Wegrzynski⁽⁸⁾는 y_{soot} 의 변화가 가시도에 미치는 영향 및 ASET의 변화를 검토하였다. 이러한 방법론의 적용은 제한된 문헌정보를 기반으로 수행되는 화재시물레이션 결과의 불확실성을 개선시킬 수 있으며, 궁극적으로 주 제어실 운전원 거주성 평가에 보다 큰 신뢰를 제공할 수 있다. 특히 원전의 대표적 화재시나리오에 해당되는 케비닛 내부의 케이블 화재는 케이블의 종류 및 설치형태 그리고 환기조건에 따라 최대 열발생률, 화재성장률 그리고 y_{CO} 와 y_{soot} 등의 상당한 변화가 동반될 수 있다^(9,10). 그 결과 화재시물레이션의 물리적 입력정보는 상당한 불확실성을 갖게 되며, 동시에 주 제어실의 거주성에 대한 평가결과 역시 큰 오차를 갖을 수 있다.

이러한 배경 하에, 본 연구에서는 NUREG-1934에서 제시된 원전 주 제어실의 케비닛 화재를 대상으로, 화재시물레이션을 통한 운전원의 거주성을 평가하였다. 이때 거주성의 기준은 기존 NUREG/CR-6850에 제시된 복사 열유속, 상층부 온도, 연층높이, 연기의 광학밀도뿐만 아니라, 국내 「소방시설 등의 성능위주 설계 방법 및 기준」에 제시된 화학종의 농도(체적분율)를 동시에 고려하였다. 이에 대한 정량적 수치는 Table 1에 제시되었다. 독성농도를 포함한 ASET의 기준에 도달하는 거주 가능시간의 평가를 위하여, 이들과 연관된 화재시물레이션 주요 입력인자들의 민감도 분석을 수행하였다. 이러한 방법론을 통한 운전원의 거주성 평가결과는 원전 주 제어실의 비상대피설계 및 안전관리를 위한 유용한 정보를 제공할 것으로 기대된다.

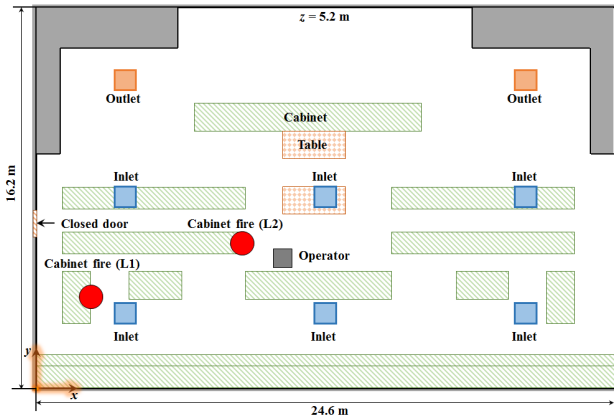


Figure 1. Computational domain for the main control room (MCR).

2. 화재시뮬레이션 대상 및 조건

2.1 화재시뮬레이션 대상 및 시나리오

원전 주제어실의 캐비닛 화재를 대상으로 운전원의 거주성을 평가하기 위하여, Table 1에 제시된 기준을 초과하는 시간에 대한 화재시뮬레이션 주요 입력인자의 민감도 분석이 수행되었다. 거주성 기준으로서 NUREG/CR-6850에 제시된 복사 열유속, 상층부 온도, 연층높이, 광학밀도와 국내 성능위주설계(PBD)의 인명 안전기준에 적용되는 O₂, CO₂ 및 CO 체적분율이 동시에 고려되었다. 화재모델로는 대표적 Field 모델인 FDS (Fire Dynamics Simulator, version 6.1.2)⁽¹¹⁾가 적용되었다. Large Eddy Simulation (LES) 기법이 적용된 FDS의 아격자 난류유동 및 연소모델로는 Deardorff 모델과 EDC (Eddy Dissipation Concept) 모델이 각각 적용되었다. FDS의 수치기법 및 모델에 대한 보다 상세한 내용은 참고문헌⁽¹²⁾에서 확인될 수 있다.

Figure 1은 NUREG-1934⁽³⁾에 제시된 24.6 m (x) × 16.2 m (y) × 5.2 m (z)의 내부 체적을 갖는 주제어실의 단면 형상을 나타낸 것으로서, 다수의 캐비닛과 테이블이 배치되어 있다. 화재는 제어용 캐비닛 내부의 전기 케이블에서 발생된 것으로 가정되었으며, 운전원(Operator) 위치를 기준으로 좌측(L1)에 화원이 위치하는 것으로 가정되었다. 공조환기설비는 상부에 설치된 6개의 흡기구(Inlet)와 2개의 배기구(Outlet)로 구성되며, 정상조건에서 5 ACH (Air Changes per Hour)의 공기가 공급 및 배출된다. 참고로 공기 순환률의 정의는 공조환기설비에 의해 시간당 공급되는 체적유량 (m³/h)를 구획체적(m³)으로 나눈 값을 의미한다. 화재발생 10 s 후에 공조환기설비가 수동으로 작동정지 또는 25 ACH의 급배기 조건이 적용되는 2가지의 시나리오가 적용되었다. 출입구는 닫혀있으며, 하단부에 0.9 m (폭) × 0.013 m (높이)의 누설면적이 고려되었다. 구획 내부의 초기 온도는 20 °C로 설정되었다.

Figure 2는 제어용 캐비닛 화재에 대한 화재성장곡선을

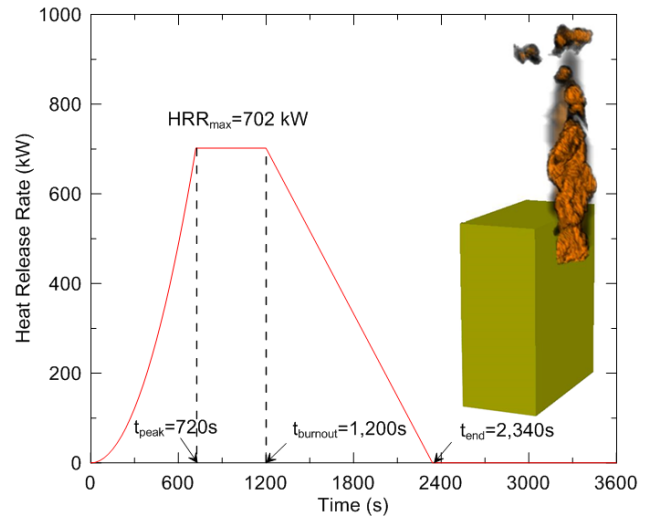


Figure 2. Fire growth curve for the cabinet fire.

Table 2. Combustion Properties of XPE/neoprene Cables

Parameter	Value
Effective fuel formula ⁽⁴⁾	C ₃ H _{4.5} Cl _{0.5}
Heat of combustion ⁽⁴⁾	10,300 kJ/kg
CO yield, y_{CO} ⁽¹⁴⁾	0.082 kg/kg
Soot yield, y_{soot} ⁽¹⁴⁾	0.175 kg/kg
Radiative fraction ⁽¹⁴⁾	0.53
Mass specific extinction coefficient ⁽¹⁵⁾	8,700 m ² /kg

도시한 것으로, NUREG/CR-6850⁽⁴⁾에 제시된 모델화원 (Design fire) 정보가 인용되었다. 점화 이후에 NFPA-72B⁽¹³⁾를 근거로 t²에 의해 720 s까지 성장하며, 최대 열발생률 702 kW에 도달한 후에 1,200 s 동안 준평형상태를 유지하고 1,140 s동안 선형적인 쇠퇴기를 갖는다. 실제 화재는 캐비닛(h=2.4 m) 내부의 전기 케이블(XPE/neoprene)에서 발생되지만, 화원은 화염 및 배기가스가 배출되는 캐비닛 측면상단 0.3 m 아래에 위치한 0.6 m (폭) × 0.2 m (높이) 크기의 통풍구에 설정되었다. XPE/neoprene 케이블의 연소물성으로서 화학식, 연소열, y_{CO} , y_{soot} , 복사분율 및 단위질량당 광소멸 계수는 Table 2에 제시되었다.

Table 3은 앞에서 언급된 기본적인 화재시나리오와 더불어, 추가적으로 고려된 화재시나리오와 거주성 기준 물리량과 연관된 화재시뮬레이션 입력인자의 민감도 분석을 위한 변화량을 제시한 것이다. 밑줄로 표기된 값은 기본값을 의미한다. 운전원의 거주성을 확보할 수 있는 최소 급배기 유량을 확인하기 위하여, 화재 발생 이후 적용되는 공기 순환률(ACH)은 0~25 ACH까지 단계적으로 변화되었다. Figure 1의 L1에 해당되는 화원과 운전원의 위치는 약 8.7 m의 직선거리를 갖기 때문에, 화염으로부터의 직접적인 열적 위험성을 갖기 어렵다. 이에 화원의 위치(L2)를 운전원

Table 3. Fire Scenario and Additional Considerations

Fire Scenario	
Air Changes Per Hour	0, 5, 10, 15, 20, 25
Fire Source Location	L1, L2
Sensitivity Analysis (for 0 ACH)	
\dot{Q}_{max}	85% ~ 115% ($\Delta \dot{Q}_{max}=5\%$)
y_{CO} (kg/kg)	0.082, 0.150, 0.200, 0.300
y_{soot} (kg/kg)	0.010, 0.100, 0.175, 0.200

의 근처에 추가적으로 설정하여, 보다 보수적인 운전원의 열적 위험성을 검토하였다. 입력인자의 민감도 분석을 위하여 최대 열발생률, y_{CO} 및 y_{soot} 의 변화가 고려되었다. 이때 최대 열발생률(\dot{Q}_{max})은 복사 열유속, 상층부 온도 및 연층의 높이에 영향을 줄 수 있으며, y_{CO} 는 독성 기준에 직접적인 영향을 미치게 된다. 또한 y_{soot} 는 연층의 높이뿐만 아니라, 광학밀도 및 가시도에 직접적인 변화를 가져온다. 참고로 가시도(s)의 정의는 식 (1)과 같다.

$$S = C / (K_m \rho Y_s) \tag{1}$$

여기서, C 는 연기를 통해 보여지는 물체유형에 따른 무차원 상수로서, 빛을 반사하는 물체의 경우 3.0의 값을 갖는다. K_m 은 단위 질량당 광소멸계수(Mass specific extinction coefficient, m^2/kg), ρ 와 Y_s 는 각각 밀도와 Soot의 질량분율을 의미한다.

2.2 격자 민감도 분석

LES 기법을 적용하는 FDS의 경우, 격자의 크기는 난류 유동 및 연소 모델의 의존도와 직접적으로 관련되며, 화재 특성치의 예측에 매우 큰 영향을 미치게 된다⁽¹⁶⁾. 일반적으로 화재모델링에서 격자의 크기는 특성 화재직경(Characteristics fire diameter, D^*)⁽¹⁷⁾ 내부에 4~16개의 격자가 설정될 때 타당한 결과가 제공된다고 알려져 있다⁽³⁾. 본 연구에 적용된 캐비닛 화재의 \dot{Q}_{max} 는 702 kW이며, 이때 D^* 는 0.832 m이다. Figure 3은 격자 크기가 0.20, 0.15 및 0.08 m로 변화될

때 화원 및 운전원 주위의 바다 및 천장 근처($z=0.5, 5.0$ m)에서 예측된 기체온도를 비교·도시한 것이다. 격자 크기변화에 따른 온도 변화 및 계산의 효율성을 고려하여 최종 0.15 m 격자크기가 선정되었다. 이는 D^* 내에 약 5.6개의 격자가 포함된 것으로서, 적용된 총 격자수는 777,600개이다.

2.3 거주성 기준 초과 확률

화재시뮬레이션 결과를 이용하여 거주성 가능 여부를 판단하기 위해서는 입력인자의 불확실도 및 화재모델의 불확실도가 동시에 고려되어야 한다. 민감도 분석은 다양한 입력인자의 불확실도가 수치해에 미치는 영향을 평가하는 것으로, 화재시뮬레이션 입력인자의 불확실도를 정량적 화재위험성 평가에 반영하는 것이다. 일반적으로 열발생물이 주요 화재특성치의 예측 불확실도에 가장 큰 영향을 미친다고 알려져 있다⁽¹⁸⁾. 이에 본 연구에서는 적용된 \dot{Q}_{max} 의 불확실도에 따른 주요 물리량의 거듭제곱 의존도(Power dependence)를 산출하기 위한 반복계산을 수행하였으며, 최종 15%의 불확실도가 고려된 \dot{Q}_{max} 의 의존도가 반영된 기준 물리량을 산출하였다. 민감도 분석에 관한 보다 자세한 내용은 선행연구⁽¹⁹⁾에서 확인될 수 있다.

화재모델의 불확실도는 복잡한 화재현상의 수식화를 위한 단순화 과정과 수치모델의 부정확성에 의해 야기된다. 화재모델의 검증 및 확인(Verification and Validation, V&V) 결과⁽²⁰⁾를 통해 각 물리량의 편향인자(δ)와 상대표준편차(σ_{rel})를 적용하여, 다양한 화재시나리오 및 주요 입력인자의 변화량에 따른 거주성 기준의 초과확률을 산출하였다⁽²¹⁾. 구체적으로 화재시뮬레이션을 통해 예측된 1차 물리량은 15%의 열발생률 불확실도를 고려한 민감도 분석결과를 반영하여 2차 물리량(M)으로 보정된다. 이때 $\mu = M/\delta$ 는 V&V 결과에 의해 조절된 “true” 값 또는 확률밀도함수의 평균값이 된다. 또한 $\sigma = \sigma_{rel} \times (M/\delta)$ 는 표준편차를 의미한다. 그 결과 Table 1에 제시된 다양한 거주성 기준 x_c 를 초과할 수 있는 확률들은 식 (2)를 통해 얻어질 수 있다⁽³⁾.

$$P(x > x_c) = 0.5 \operatorname{erfc} \left(\frac{x_c - \mu}{\sigma \sqrt{2}} \right) \tag{2}$$

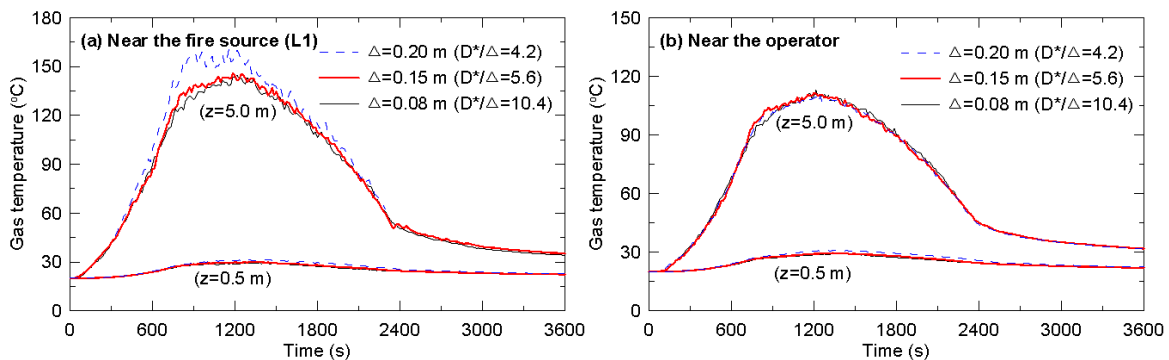


Figure 3. Results of grid sensitivity analysis.

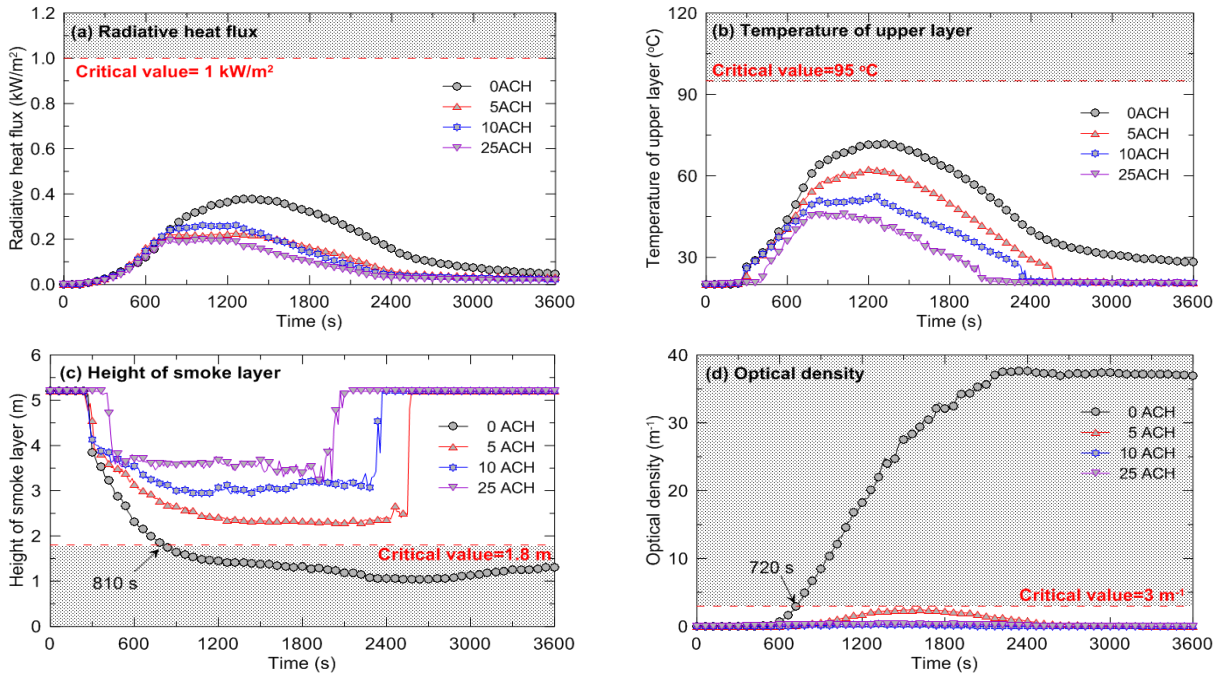


Figure 4. Time history of parameters related to habitability with the change in ACH.

여기서, $erfc(x) = \frac{2}{\sqrt{\pi}} \int_x^{\infty} e^{-t^2} dt$ 이다.

3. 결과 및 고찰

3.1 공기 순환률 및 화원 위치 변화에 따른 거주성 평가

Figure 4는 캐비닛(L1) 화재 발생 120 s 후에 공조환기설비의 조건변화에 따른 주재시설 운전원의 거주성을 평가하기 위해, 운전원의 위치($z=1.8$ m)에서 복사 열유속, 상층부 온도, 연층 높이 및 연기의 광학밀도의 시간에 따른 변화를 도시한 것이다. 공조환기설비의 유량조건은 0~25 ACH의 범위에서 변화되었다. 먼저 복사 열유속과 상층부의 온도를 살펴보면, 공기 순환률이 증가됨에 따라 운전원의 위치에서 복사 열유속 및 상층부 온도가 점차적으로 감소됨을 볼 수 있다. 또한 모든 조건에서 Table 1에 제시된 거주성의 열적 기준(1 kW/m^2 , $95 \text{ }^\circ\text{C}$)을 초과하지 않는다. 이러한 결과는 Figure 1에서 확인되듯이 운전원의 위치가 급기 덕트 사이에 존재하여 공급되는 상온의 공기에 의해 발생된 것으로 판단된다. 또한 화원의 위치(L1)과 운전원의 사이에 설치된 캐비닛($h=2.4$ m)에 의해 화염으로부터의 직접적인 복사 열유속이 차단된다. 그 결과 운전원에 미치는 복사 열유속은 화염이 아닌 주로 고온 연층으로부터 공급되는 것임을 알 수 있다. Figure 4(c)의 연층 높이를 살펴보면, 공기 순환률이 증가됨에 따라 바닥면으로부터의 연층 높이는 증가된다. 이때 공조환기설비가 수동 정지된 0 ACH의 조건만이 거주성 기준(1.8 m) 이하로 감소되며, 도달시간은 약

810 s에 해당된다. Figure 4(d)의 연기 광학밀도를 살펴보면, 연층 높이와 유사하게 0 ACH의 조건에서만 720 s에 거주성 기준(3 m^{-1})를 초과하는 것으로 확인된다. 즉, 본 계산에 고려된 급배기 덕트, 화원 및 운전원의 위치 조건에서는 최소 5 ACH 이상의 공기 순환률이 유지되면 열적 기준, 호흡한계선 및 광학밀도의 기준을 초과하지 않아 운전원의 거주가 가능한 것으로 예측된다.

Figure 5는 Figure 4와 동일한 조건에서 국내 성능위주설계의 인명안전 기준에 적용되는 화학종의 체적분율 기준에 대한 거주성 평가결과를 도시한 것이다. 공기 순환률 5~25 ACH의 조건에서는 O_2 , CO_2 및 CO 모두 거주성 기준을 초과하지 않는다. 그러나 0 ACH의 조건의 경우 O_2 는 약 1,605 s에 15% 이하에 도달하며, CO 는 약 990 s에 1,400 ppm의 기준을 초과한 것으로 확인된다. 본 계산의 조건에서 거주성 기준을 초과하는 시간은 순차적으로 광학밀도-연층높이- CO - O_2 의 순서를 갖는다. 즉, 화재 발생 후 720 s 후에 광학밀도의 감소로 인한 0.44 m 이하의 낮은 가시도로 인하여 운전원의 거주가 어렵게 된다. 그러나 서론에서 언급되었듯이, 캐비닛 내부의 케이블 화재는 케이블의 종류, 설치형태 및 환기조건에 따라 화재특성에 큰 변화가 발생될 수 있음을 고려할 때, Table 2에 제시된 일정한 값의 연소물성 적용은 화재시물레이션을 통한 운전원의 거주성 평가결과의 신뢰성을 저하시키는 주요 문제점으로 인식될 수 있다. 특히 광학밀도에 직접적으로 영향을 주는 y_{soot} 와 주요 독성물질인 y_{CO} 는 캐비닛 내부의 제한된 환기조건으로 인하여 큰 변화가 발생될 수 있으며^(22,23), 실제 운전원의 거주성을 판단하는 한계기준의 변경 및 거주 가능시간의

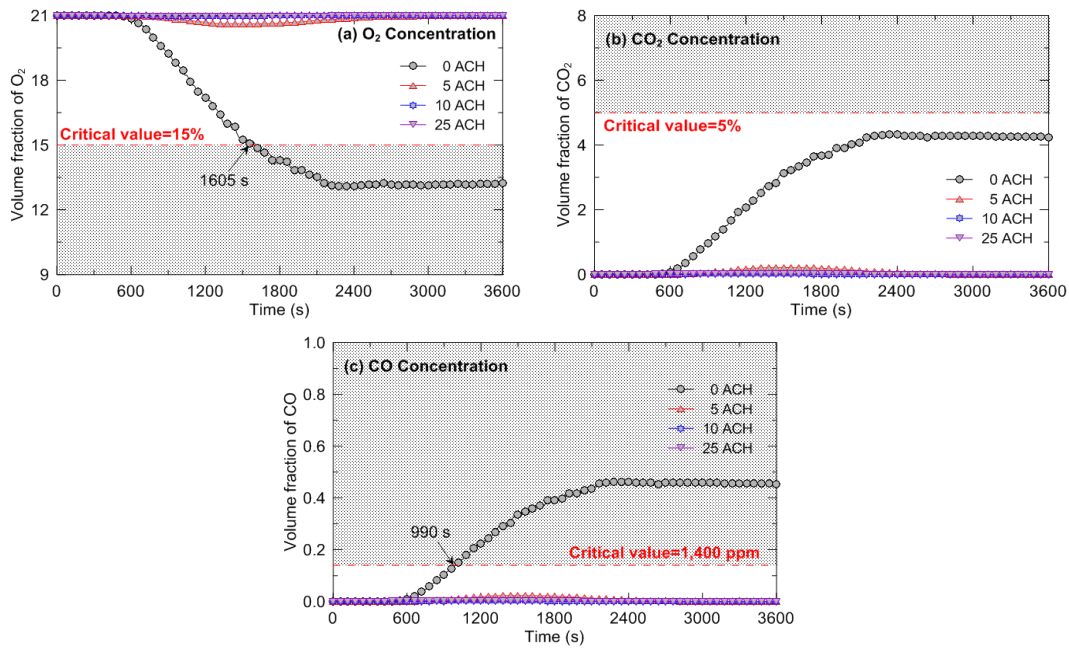


Figure 5. Time history of species concentrations with the change in ACH.

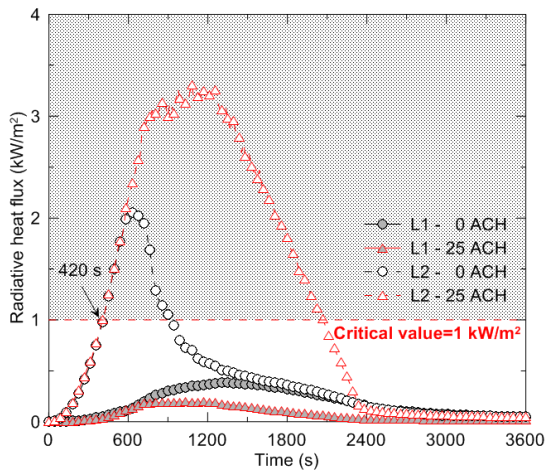


Figure 6. Time history of radiative heat fluxes with the changes in fire location and ACH.

상당한 변화가 존재할 것으로 예상된다.

Figure 6은 화원위치를 L1에서 운전원에 근접한 L2로 변경시켰을 때, 시간에 따른 복사 열유속을 도시한 결과이다. Figure 4(a)에서 확인되었듯이, L1의 위치는 운전원과 상당한 직선거리(8.7 m)에 있으며, 중간에 위치한 캐비닛으로 인하여 화염으로부터의 직접적인 복사열이 차단될 수 있다. 이에 보다 보수적인 관점에서 거주성의 열적 기준을 평가하기 위하여, 운전원에 근접한 화원위치 L2에 대한 영향을 검토하였다. 그림에는 공기 순환률 0과 25 ACH의 결과를 동시에 도시하였다. 화원위치 L1에 비하여 L2는 운전원의 위치($z=1.8$ m)에 매우 높은 복사 열유속을 공급하며, 급배기 유무에 상관없이 거주성 기준인 1 kW/m^2 을 초과하는

시간은 420 s이다. 이 값은 L1의 조건에서 광학밀도 기준을 초과하는 시간인 720 s보다 매우 짧은 값이다. 급배기의 유무는 화재성장 및 구획 내부의 열적 조건을 크게 변경시킬 수 있으나, 넓은 구획 내부의 공기량으로 인하여 1 kW/m^2 을 초과하는 시간은 동일하게 예측되고 있다. 그러나 약 600 s 이후 25 ACH의 조건은 0 ACH에 비해 높은 화염강도로 인하여, 운전원 근처에 3 kW/m^2 이상의 복사 열유속이 발생됨을 볼 수 있다. 참고로, L2의 조건에서 급배기 유무에 따른 상층부 온도, 연층높이, 광학밀도 및 화학종의 체적분율의 변화는 L1에서의 결과와 유사한 경향이 발견되었다. 위 결과로부터, 주 제어실 운전원의 거주성 평가를 위한 복사 열유속 기준은 화원의 위치에 따라 크게 변경됨을 확인하였다.

3.2 거주성 기준의 초과확률 및 민감도 분석을 통한 거주 가능시간 평가

검토된 화재시나리오 및 주요 입력인자의 변화에 대한 수치결과를 활용하여 2.3절에 언급된 열발생률 불확실도에 대한 민감도 분석 및 화재모델의 불확실도 분석의 과정을 통해 최종 거주성 기준을 초과할 수 있는 확률이 산출되었다. 공기 순환률, 화원의 위치변화에 대한 화재시나리오 및 y_{CO} 와 y_{soot} 변화에 따른 결과가 Table 4에 제시되었다. 민감도 분석을 위한 화재조건은 거주성 기준이 초과되는 화원위치 L1과 0 ACH이 고려된 조건에서 수행되었다. 열발생률의 변화에 따른 영향은 이미 15%의 불확실도에 대한 민감도 분석과정에서 포함되었기에, 거주성 기준 초과확률은 개별적으로 고려하지 않았다. 또한 연층높이에 대한 기준 초과확률은 기존 V&V 연구에서 편향인자(δ)와 상대표

Table 4. Summary of the Probability of Exceeding the Critical Values for the Habitability in MCR

		Probability of Exceeding (%)					
Quantity		Upper Layer Temp.	Radiative Heat Flux	Optical Density	O ₂	CO ₂	CO
Fire Scenarios							
Fire location L1 (default)	0 ACH	0	0	100	100	58	100
	5 ACH	0	0	46	0	0	0
	10~25 ACH	0	0	0	0	0	0
Fire location L2	0 ACH	0	100	100	100	56	100
	25 ACH	1	99	0	0	0	0
Sensitivity Analysis (0 ACH and L1)							
CO Yield, y_{CO} (default=0.082)	0.15	0	0	100	100	35	100
	0.20	0	0	100	100	24	100
	0.30	0	0	100	100	16	100
Soot Yield, y_{soot} (default=0.175)	0.01	0	0	0	100	63	100
	0.10	0	0	100	100	54	100
	0.20	0	0	100	100	40	100

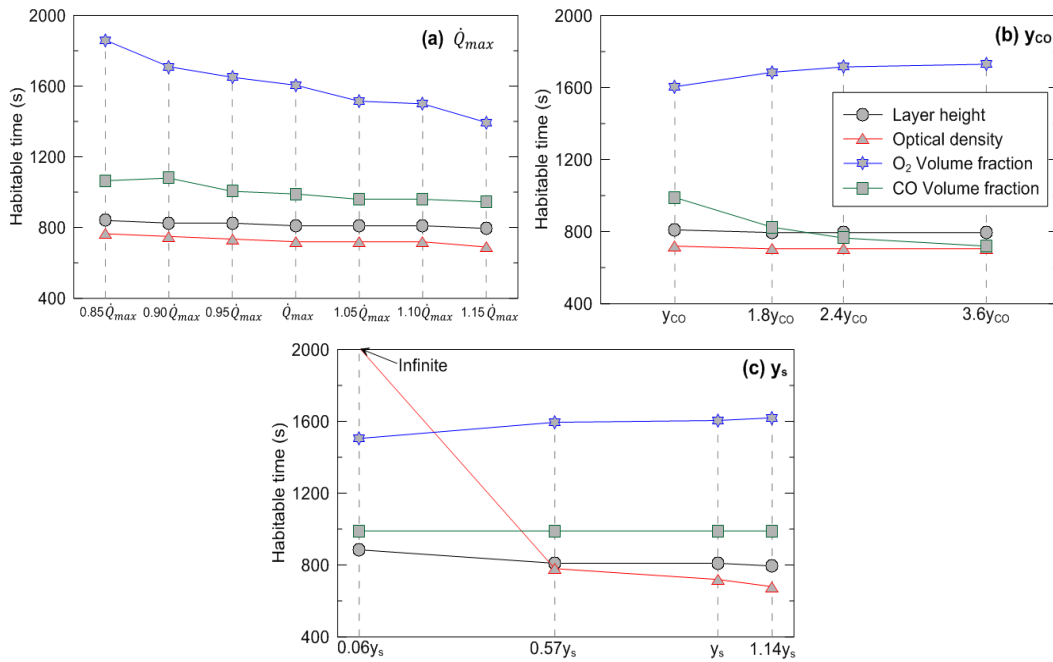


Figure 7. Habitable times with sensitivity analysis of major parameters under the conditions of L1 and 0 ACH.

준편차(σ_M)가 제시되지 않았기에 계산에서 제외되었다.

화원위치가 L1인 조건에서, 공조환기설비가 정지된 0 ACH의 경우 열적 기준(상층부 온도 및 복사 열유속)을 초과할 확률은 0이지만, 광학밀도, O₂ 및 CO 기준을 초과할 확률은 100%로 확인되었다. 공기 순환률이 5 ACH의 경우의 Figure 4(d)에서 확인되듯이 광학밀도는 기준값을 초과하지는 않았으나, 민감도 및 불확실도 분석을 통해 산출된 초과확률은 46%에 해당된다. 화원의 위치가 L2로 변경되었을 때 급배기 유무에 상관없이 복사 열유속 기준을 초과할 확률은 약 100%이며, 다른 기준들의 초과확률은 L1의

경우와 유사하다. y_{CO} 의 변화에 따른 결과는 기준값($y_{CO} = 0.082$)이 적용된 L1 및 0 ACH의 결과와 비교하면, y_{CO} 가 증가됨에 따라 CO₂의 기준을 초과할 확률은 오히려 감소되며, 다른 기준은 모두 동일함을 볼 수 있다. y_{soot} 의 경우, 매우 낮은 값이 적용되었을 때는 광학밀도 기준을 초과할 확률은 0에 해당되며, 이 값이 증가됨에 따른 기준 초과확률은 기본조건의 결과와 동일함을 볼 수 있다. 비록 주요 입력인자의 민감도 분석을 통한 거주성 기준 초과확률에는 큰 변화가 발생되지 않으나, 거주 가능시간의 변화가 존재할 수 있다. 이에 대한 검토는 Figure 7에서 논의되었다.

Figure 7은 고려된 화재시나리오에서 상대적으로 높은 위험성을 보이는 화원위치 L1과 공기 순환률 0 ACH의 조건에서 열발생률, y_{CO} 및 y_{soot} 의 변화에 따른 거주 가능시간의 변화를 나타낸 결과이다. Table 1에 제시된 기준 중에서 거주시간의 결정에 영향을 미치는 연층높이, 연기의 광학밀도, O_2 및 CO의 체적분율이 검토되었다. Figure 7(a)는 최대 열발생률(\dot{Q}_{max})의 불확실도를 고려하여 기준 \dot{Q}_{max} 의 85%~115%의 변화에 따른 결과이다. 열발생률의 증가에 따라 O_2 체적분율의 기준에 의한 거주 가능시간은 급격하게 감소되며, 다른 기준들에 의한 거주시간 역시 점차적으로 감소되는 경향이 확인된다. 최종 거주가능시간을 결정짓는 한계 물리량인 연기의 광학밀도를 살펴보면, \dot{Q}_{max} 이 85%에서 115%로 증가될 때 거주 가능시간은 765 s에서 690 s로 감소되며, 이들의 차이는 약 75 s에 해당된다. Figure 7(b)는 y_{CO} 의 변화에 따른 거주시간을 도시한 것으로서, y_{CO} 의 증가에 따른 CO 체적분율의 기준에 의한 거주 가능시간은 급격하게 감소된다. 환기가 제한된 케비닛 화재의 급격한 CO 증가를 고려할 때, 검토된 3.6 y_{CO} 의 조건에서는 연기의 광학밀도에 의해 제한된 거주 가능시간과 유사한 값을 갖게 된다. Figure 7(c)는 y_{soot} 의 변화에 따른 결과로서, 낮은 y_{soot} 의 조건에서는 연기의 광학밀도에 의한 거주한계가 발생되지 않는다. 그러나 y_{soot} 이 증가됨에 따라 연기의 광학밀도 기준에 의한 거주 가능시간은 최소 680 s까지 감소된다. 주요 물리량의 민감도 변화량에 대한 정량적 범위는 다양한 화재조건에 대한 케비닛 실험을 통해 산출되어야 한다. 그러나 충분한 실험결과가 제시되지 않는 현재의 상황에서 거주성 평가기준 인자에 영향을 미치는 주요 입력인자의 민감도 분석을 통한 운전원의 거주 가능성 및 시간에 대한 평가는 신뢰성 강화를 위한 현실적 대안이라 판단된다.

4. 결 론

본 연구에서는 NUREG-1934에서 제시된 원전 주 제어실의 케비닛 화재를 대상으로 운전원의 거주성을 평가하기 위하여 FDS를 이용한 화재시뮬레이션이 수행되었다. 원전원의 거주성을 보다 구체적으로 평가하기 위하여, 기존의 복사 열유속, 상층부 온도, 연층높이 및 연기의 광학밀도의 기준뿐만 아니라, CO 등과 같은 독성물질의 기준이 포함되었다. 또한 거주성 기준에 영향을 주는 화재시뮬레이션의 주요 입력인자에 대한 민감도 분석을 통해 주 제어실 거주성 평가에 대한 신뢰성을 개선하였다. 주요 결론은 다음과 같다.

(1) NUREG-1934에 제시된 원전 주 제어실 케비닛 화재를 대상으로 공기 순환률에 따른 거주성을 평가한 결과, 화재 발생 이후 구획 체적당 공기 순환률(ACH)이 최소 5 ACH 이상으로 유지되면 열적 기준, 호흡기계선 및 광학밀도의 기준을 초과하지 않는 것으로 예측되었다. 화염으로 인한 직접적인 복사 열유속의 위험성을 고려하기 위하여,

운전원 근처로 화원위치를 변경한 경우 급배기 유무와 상관없이 복사 열유속에 의한 거주성 기준이 초과되는 것으로 예측되었다.

(2) 화재시뮬레이션 입력변수의 민감도 분석 및 화재모델의 불확실도가 반영된 거주성 기준의 초과확률을 살펴보면, 검토된 화재조건에서 공조환기설비가 정지된 경우에 연기의 광학밀도(또는 가시도), O_2 및 CO에 의한 거주성 기준의 초과확률이 100%로 확인되었다.

(3) 화재시뮬레이션 주요 입력변수에 해당되는 최대 열방출률, CO 및 Soot yields의 변화에 대한 민감도 분석을 통해, 거주시간 뿐만 아니라 거주성을 결정하는 한계기준의 변화가 발생됨을 확인하였다. 이러한 방법론은 불확실한 케비닛 화재 특성치를 이용한 주 제어실의 거주성 평가의 신뢰성 강화를 위한 현실적인 대안이라 판단된다.

후 기

본 연구는 원자력안전위원회의 재원과 한국원자력안전재단의 지원을 받아 수행한 원자력안전연구사업의 연구결과입니다(No. 1305001).

References

1. H. C. Oh and H. T. Kim, "Evaluation of MCR Fire Risk using New Fire Human Reliability Analysis Guidelines", Proceedings of Annual Conference, Korean Institute of Fire Science & Engineering, pp. 307-3010 (2012).
2. NFPA, "Performance-Based Standard for Fire Protection for Light Water Reactor Electric Generating Plant", NFPA 805, 2001 Edition (2003).
3. U.S.NRC and EPRI, "Nuclear Power Plant Fire Modeling Analysis Guidelines", NUREG-1934 and EPRI 1023259, Final Report (2012).
4. EPRI and U.S.NRC, "Fire Probabilistic Risk Assessment Methods Enhancements", NUREG/CR-6850(EPRI 1011989), Final Report (2005).
5. B. G. Kim, H. S. Lim, Y. S. Lee and M. S. Kim, "Effect of the HVAC Conditions on the Smoke Ventilation Performance and Habitability for a Main Control Room Fire in Nuclear Power Plant", Fire Science and Engineering, Vol. 30, No. 5, pp. 74-81 (2016).
6. E. Guillaume, F. Didieux, A. Thiry and A. Bellivier, "Real-scale Fire Tests of One Bedroom Apartments with Regard to Tenability Assessment", Fire Safety Journal, Vol. 70, pp. 81-97 (2014).
7. E. Tosolini, S. Grimaz, L. C. Pecile and E. Salzano, "People Evacuation: Simplified Evaluation of Available Safe Egress Time (ASET) in Enclosures", Chemical

- Engineering Transactions, Vol. 26, pp. 501-506 (2012).
8. G. Vigne and W. Wegrzynski, "Experimental and Numerical Analysis of the Influence of the Soot Yield When Conducting CFD Analysis for the Estimation of the Available Safe Evacuation Time", Interflam 2016, Royal Holloway College, UK (2016).
 9. J. Mangs, J. Paananen and O. Keski-Rahkonen, "Calorimetric Fire Experiments on Electronic Cabinets", Fire Safety Journal, Vol. 38, pp. 165-186 (2003).
 10. T. R. Hull, K. Lebek, M. Pezzani and S. Messa, "Comparison of Toxic Product Yields of Burning Cables in Bench and Large-scale Experiments", Fire Safety Journal, Vol. 43, pp. 140-150 (2008).
 11. K. McGrattan, S. Hostikka, R. McDermott, J. Floyd, C. Weinschenk and K. Overholt, "Fire Dynamic Simulator; User's Guide", NIST SP 1019, Sixth Edition, NIST, Gaithersburg, MD (2015).
 12. K. McGrattan, S. Hostikka, R. McDermott, J. Floyd, C. Weinschenk and K. Overholt, "Fire Dynamic Simulator; Technical Reference Guide", NIST SP 1018-1, Sixth Edition, NIST, Gaithersburg, MD (2015).
 13. NFPA, "Standard for the Installation, Maintenance and Use of Auxiliary Protective Signaling Systems for Fire Alarm Service", Standard: NFPA-72B (1986).
 14. NFPA, "SFPE Handbook of Fire Protection Engineering", 4th ed., National Fire Protection Association, Quincy, MA (2008).
 15. G. W. Mulholland and C. Croarkin, "Specific Extinction Coefficient of Flame Generated Smoke", Fire and Materials, Vol. 24, pp. 227-230 (2000).
 16. H. S. Han, C. H. Hwang, K. L. Baik and S. Lee, "Application of FDS for the Hazard Analysis of Lubricating Oil Fires in the Air Compressor Room of Domestic Nuclear Power Plant", Journal of the Korean Society of Safety, Vol. 31, No. 2, pp. 1-9 (2016).
 17. A. Bounagui, N. Benichou, C. McCartney and A. Kashef, "Optimizing the Grid Size Used in CFD Simulations to Evaluate Fire Safety in Houses", In: 3rd NRC Symposium on Computational Fluid Dynamics, High Performance Computing and Virtual Reality, Ottawa, pp. 1-8 (2003).
 18. NRC and EPRI, "Verification and Validation of Selected Fire Models for Nuclear Power Plant Applications", NUREG-1824 and EPRI 1011999, Final Report, 2007.
 19. J. H. Cho, C. H. Hwang, J. Kim and S. Lee, "Sensitivity Analysis of FDS Results for the Input Uncertainty of Fire Heat Release Rate", Journal of the Korean Society of Safety, Vol. 31, No. pp. 25-32 (2016).
 20. K. McGrattan, S. Hostikka, R. McDermott, J. Floyd, C. Weinschenk and K. Overholt, "Fire Dynamic Simulator Technical Reference Guide, Volume 3: Validation", NIST SP 1018-3, Sixth Edition, NIST, Gaithersburg, MD (2015).
 21. H. D. Yang, H. S. Han, C. H. Hwang and S. C. Kim, "An Investigation of Quantitative Risk Assessment Methods for the Thermal Failure in Targets using Fire Modeling", Fire Science and Engineering, Vol. 30, No. 5, pp. 116-123 (2016).
 22. C. H. Hwang, C. H. Park, G. H. Ko and A. Lock, "An Experimental Study on Relationship Between Global Equivalence Ratio and Fire Characteristics in Full-scale Compartment Fires", Journal of the Korean Society of Combustion, Vol. 15, No. 3, pp. 32-39 (2010).
 23. S. Ukleja, "Production of Smoke and Carbon Monoxide in Underventilated Enclosure Fires", Ph.D. Thesis, Design and Built Environment of the University Ulster, (2012).