

국내 원자력발전소의 공기 압축기실에서 윤활유 화재의 위험성 분석을 위한 FDS의 활용

한호식·황철홍*·백경록*·이상규*

대전대학교 소방방재학과 · *한국원자력안전기술원 계통평가실
(2016. 2. 16. 접수 / 2016. 3. 2. 수정 / 2016. 3. 8. 채택)

Application of FDS for the Hazard Analysis of Lubricating Oil Fires in the Air Compressor Room of Domestic Nuclear Power Plant

Ho-Sik Han · Cheol-Hong Hwang* · Kyung Lok Baik* · Sangkyu Lee*

Department of Fire and Disaster Prevention, Daejeon University

*Department of Reactor System, Korea Institute of Nuclear Safety

(Received February 16, 2016 / Revised March 2, 2016 / Accepted March 8, 2016)

Abstract : The standard procedure of fire modeling was reviewed to minimize the user dependence, based on the NUREG-1934 and 1824 reports. The hazard analysis of lubricating oil fires in the air compressor room of domestic nuclear power plant (NPP) was also performed using a representative fire model, FDS (Fire Dynamics Simulator). The area (A_f) and location of fire source were considered as major parameters for the realistic fire scenarios. As a result, the maximum probability to exceed the thermal damage criteria of IEEE-383 unqualified electrical cables was predicted as approximately 70% with $A_f=1\text{ m}^2$. It was also found that for qualified electrical cables, the maximum probabilities of exceeding the criteria were 2% and 90% with $A_f=2$ and 4 m^2 , respectively. It was concluded that all electrical cables should be replaced with IEEE-383 qualified cables and the dike to restrict as $A_f \leq 2\text{ m}^2$ should be installed at the same time, in order to assure the thermal stability of electrical cables for lubricating oil fires in the air compressor room of domestic NPP.

Key Words : nuclear power plant, lubricating oil fire, fire modeling, fire risk analysis, FDS(Fire Dynamics Simulator)

1. 서론

원자력발전소(이하 원전으로 표기)의 화재 위험도 평가 및 화재 대응체계 구축 방안은 2001년 미국 화재 방호협회(NFPA)에 의한 경수로 원전의 성능기반 화재 방호기준(performance-based standard for fire protection)인 NFPA 805¹⁾를 통해 체계화되었다. 성능기반 접근법의 중요한 한 가지 방법론은 수학적 화재모델을 통해 화재위험성을 평가하는 것이다. NFPA 805는 화재모델링의 적합성 및 정확성을 확보하기 위하여, 화재모델의 검증 및 확인(verification and validation, V&V)과 규제기관이 허용한 화재모델만이 화재모델링에 사용되도록 권장하고 있다²⁾. 최근 미국 원자력규제위원회(NRC)와 전력연구소(EPRI)는 화재모델의 검증 및 확

인 보고서 NUREG-1824³⁾와 화재모델의 코드 적용 지침서 NUREG-1934⁴⁾를 발간하였으며, 국내·외적으로 원전 화재모델링 적용의 기준안으로 평가되고 있다. 국내에서도 한국원자력안전기술원(KINS)에 의해 NUREG-1934를 기반으로 하는 화재모델링 적용지침 보고서⁵⁾가 발표되었다.

화재모델링을 통한 위험도 분석의 신뢰성을 확보하기 위하여 많은 연구자들에 의해 실험과 화재모델링 결과의 비교·검증에 관한 연구가 수행되고 있다⁶⁻⁹⁾. 또한 화재모델이 갖는 불확실도와 수치 및 물리적 입력인자의 불확실도를 고려한 해석결과의 적용방안에 관한 다양한 연구결과가 발표되었다¹⁰⁻¹²⁾. 그럼에도 불구하고 화재모델링 결과의 적용 타당성 및 정량적 위험성 평가는 고려된 화재 시나리오, 예측 물

* Corresponding Author : Cheol-Hong Hwang Tel : +82-42-280-2592, E-mail : chehwang@dju.ac.kr

Department of Fire and Disaster Prevention, Daejeon University, 62, Daehak-ro, Dong-gu, Daejeon 34520, Korea

리량 및 허용되는 화재모델의 정확도 수준에 따라 변
화될 수 있다. 특히 사용자의 역량에 따라 예측결과
의 타당성 및 해석결과의 신뢰성은 상당한 차이를
가질 수 있다. 따라서 화재모델링이 본질적으로
갖고 있는 사용자 능력의 높은 의존도를 최소화
시키고, 화재모델링 결과의 평가에 대한 객관
화가 원전 화재위험성 평가를 위해 요구되는
가장 핵심이라 할 수 있다.

최근 국내에서도 성능기반 화재모델을 이용
하여 다양한 원전 방호지역 화재위험도 분석
연구들이 진행되고 있다. 주로 화재모델의
적용 가능성에 초점을 두고 있으며, 일부 특
정 입력인자에 대한 해석결과의 민감도 분
석이 수행되었다¹³⁻¹⁵⁾. 이들 연구들은 원
전화재의 위험성 평가를 위한 화재모델링의
적용 가능성을 확인한 유용한 결과를 제공
하고 있다. 그러나 NUREG-1934에서 제시
된 체계적인 절차에 따라 국내 특정 원전 화
재방호지역의 정량적 위험성 및 설계방안의
제시에 관한 직접적인 적용사례 및 분석결
과는 찾아보기 어려운 실정이다.

이러한 배경 하에 본 연구에서는 대표적
인 화재모델인 FDS(Fire Dynamics Simulator)¹⁶⁾
를 이용하여 국내 특정 원전에 위치한 공기
압축기실을 대상으로 운할유 화재로 인한
전기 케이블의 손상 여부 및 안전성 확보 방
안을 제시하였다. 우선, NUREG-1934 및
NUREG-1824를 근거로 체계적인 화재모
델링 절차 및 개념을 고찰하고, 이 절차에
따라 공기 압축기실에 대한 화재 위험성
에 대한 정량적 평가를 수행하였다. 궁극
적으로 본 연구결과는 화재모델링의 수행
및 분석절차의 관점에서 국내 엔지니어에
게 최소한의 가이드라인을 제공할 수 있
으며, 화재모델링 결과의 객관적 평가를
위한 유용한 정보를 제공할 것으로 기대
된다.

2. NUREG-1934에 의한 화재모델링 절차

Fig. 1은 NUREG-1934에서 제시된 화
재모델링 수행 절차의 흐름도를 나타낸 것
이다. 화재모델링 절차는 구체적으로 8
단계로 구성될 수 있으며, 포괄적으로 화
재모델링의 목적 설정, 화재시나리오의
설정, 화재모델의 선택 및 적합성의 판
단으로 구성된 전처리 단계 (I) 과 입
력파일의 작성을 포함한 화재모델링의
실행 단계 (II), 마지막으로 입력인자
의 민감도 분석 및 화재모델의 불확실도
분석, 그리고 문서화 단계 (III)로 재
분류될 수 있다.

화재모델링의 목적 설정에서는 화재
로부터 특정 대상물의 안전 또는 손상을
나타내는 기준이 구체적으로 명시되어
야 한다. 화재시나리오는 NFPA 805에서
정의된

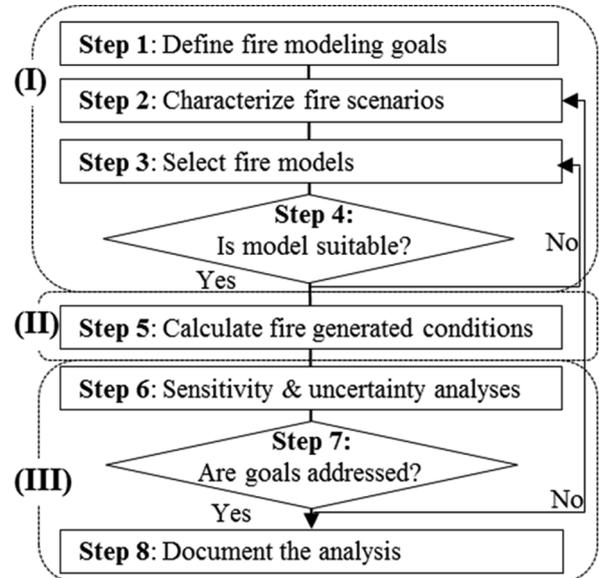


Fig. 1. Process of fire modeling⁴⁾.

바와 같이 제한된 화재시나리오(limiting fire scenarios)와 최대 예상시나리오(maximum expected scenario)로 분류된다. 적절한 화재시나리오는 화재 공간, 중요 대상물, 화재의 유형 및 조건, 화원의 종류 및 위치에 따라 크게 변화될 수 있으며, 화재모델링의 목적에 부합하도록 적절하게 설정되어야 한다. 화재모델의 선택 및 적합성은 NUREG-1824의 Table 2.2에 제시된 바와 같이 다양한 화재모델(FDT⁵⁾, FIVE-Rev1, CFAST, MAGIC, FDS)중에서 화재모델링 목적을 위해 요구되는 주요 물리량의 예측 가능여부에 따라 선택될 수 있다. 또한 NUREG-1824의 Table 3.1에는 V&V를 통해 얻어진 주요 물리량의 예측 정확도가 정성적으로 분류되어 있다. 참고로, 현재까지의 V&V의 결과는 제한된 실험조건(총 26개)을 대상으로 제시되었기 때문에, 설정된 시나리오의 화재조건이 V&V에서 고려된 실험조건에 포함되는지를 확인해야 한다. 이를 위해 NUREG-1824의 Table 2.4에는 Froude 수, 천장 높이에 대한 화염길이, 총괄 당량비, 구획의 중량비 등 총 6가지의 무차원 변수에 대하여 검증된 범위가 제시되어 있다.

화재모델링의 실행단계에서 입력파일의 작성을 위해서는 주요 수치 및 물리적 입력인자의 명확한 출처가 제시되어야 한다. 또한 격자크기에 대한 주요 수치해의 민감도 분석과 개구부의 존재 시 계산영역의 크기에 대한 적절한 설정 근거가 제시되어야 한다.

마지막으로 민감도 분석 및 모델 불확실도(또는 모델 오차) 분석은 화재모델링 결과를 통한 정량적 위험성 평가를 위해 매우 중요한 단계라 할 수 있다. 민감도 분석은 다양한 입력인자의 불확실도가 수치 해에

미치는 영향을 평가하는 것으로, 화재모델링 입력인자의 불확실도를 정량적 화재위험성 평가에 반영하는 것이다. 일반적으로 15%~25%의 높은 측정 불확실도를 갖는 열발생률(\dot{Q})이 주요 화재특성치의 예측 불확실도에 가장 큰 영향을 미친다고 알려져 있다³⁾. NUREG-1824의 Table 5.1에는 경험적 상관식을 바탕으로 전개된 \dot{Q} 의 불확실도에 따른 주요 화재특성치의 거듭제곱 의존도(power dependence)가 제시되어 있다. 그러나 보다 정확한 정량적 화재위험성 평가를 위해서는 반복적 화재모델링 수행을 통해 화재대상 및 조건에 따라 \dot{Q} 의 불확실도에 대한 수치해의 민감도가 제시되어야 한다¹⁷⁾. 모델 불확실도는 복잡한 화재현상의 수식화를 위한 단순화 과정과 수치모델의 부정확성에 의해 야기된다. 선행된 V&V 결과를 통해 제시된 각 화재모델의 편향인자와 상대표준편차를 이용하여, 화재로부터 특정 대상물의 손상 기준을 초과할 수 있는 (모델 불확실도가 고려된) 확률이 계산할 수 있다. 화재모델링의 절차 및 개념에 대한 보다 상세한 내용은 참고문헌^{3,4)}을 통해 확인될 수 있다.

3. 공기 압축기실에 대한 화재모델링 수행

3.1 화재모델링의 목적 및 화재시나리오 설정

화재모델링의 목적으로서, 국내 특정 지역의 가동 원전인 공기 압축기실을 대상으로 천장 근처에 위치한 전기 케이블의 열적 손상 가능성이 평가되었다. 공기 압축기실의 경우, 윤활유 교체작업 및 운전과정에서 윤활유 누설로 인한 유류화재의 발생이 가정될 수 있다. 가동 원전의 공기 압축기 주위에는 윤활유 확산방지를 위한 제방(dike)이 설치되지 않아, 화원 면적이 변화될 수 있는 액체 풀(pool) 화재가 검토되었다.

Fig. 2(a)는 공기 압축기실의 개략도를 나타낸 것으로서, 계기용 압축공기를 공급하는 IA(instrument air) 압축기 3대와 작업용 압축공기를 공급하는 SA(service air) 압축기 1대가 설치되어 있다. 천장($z=7.6$ m) 근처에는 다수의 케이블 트레이가 설치되어 있으며, Fig. 2(b)에서와 같이 연결 유무에 따라 총 5개의 케이블 그룹으로 분류되었다. 각 케이블의 용도별 분류는 현실적으로 어렵기 때문에, 본 연구에서는 IEEE-383 인증 및 비인증 전기 케이블의 열적 손상조건을 모두 고려하였다. 전기 케이블의 열적 손상기준은 NUREG/CR-4679¹⁸⁾를 근거로 IEEE-383 인증(한계 표면온도 및 열유속: 370°C, 10 kW/m²) 및 비인증(한계 표면온도 및 열유속: 218°C, 5 kW/m²) 케이블에 대하여 각각 적용되었다. 구획 내부에는 공기 압축기 및 전기 케이블 이외에 다수의 설비가

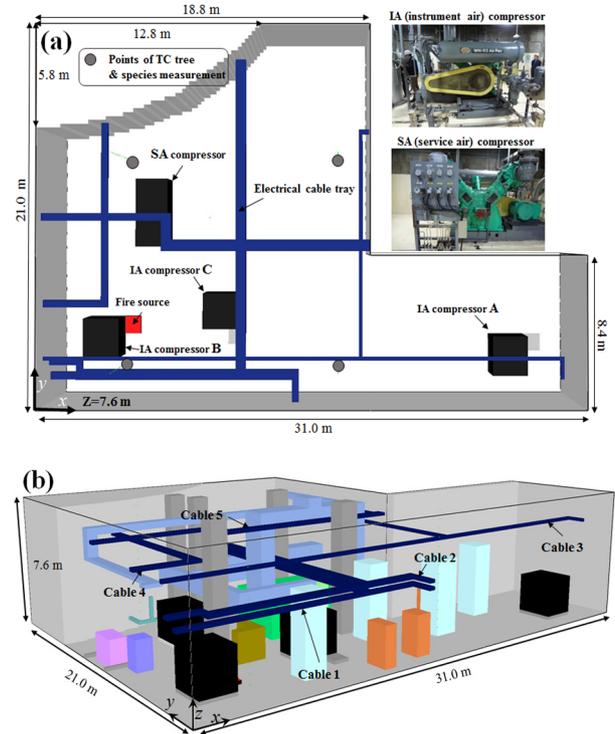


Fig. 2. Perspective view of the air compressor room including electrical cables for the domestic nuclear power plant.

설치되어 있다. 화재로 인한 연층의 높이 및 온도, 그리고 직진성을 갖는 복사 열전달을 보다 실질적으로 예측하기 위하여, Fig. 2(b)에서와 같이 실측된 구조물들이 화재모델링에 고려되었다. 바닥, 천장 및 벽면의 재질은 콘크리트, 기기 및 설비는 강판, 전기 케이블은 PVC로 설정되었다.

화재시나리오는 각 압축기에 포함된 윤활유(C₁₄H₃₀, n-Tetradecane) 40 L의 유출 및 누설과 마찰에 의한 전기 스파크 및 자기착화에 의한 화재의 발생으로 가정되었다. 공기 압축기실에는 소형 전기 케비닛 및 분전반만이 설치되어 있어 전기 화재의 발생 가능성은 배제되었다. 화재 위험성 평가를 위한 주요 변수로서, 화원의 면적(A_f)과 화원의 위치가 고려되었다. $A_f=1$ m²과 2 m²의 경우, 4개의 압축기 각각에서 화재 발생이 가정되었으며, $A_f=4$ m²과 8 m²의 경우에는 SA 압축기에서만 화재가 발생하는 것으로 가정되었다. 화원면적 $A_f=8$ m²의 화재는 평균 화염길이(L_f)는 천장 높이(H)의 약 70%로서, 부력에 의해 주기적으로 진동하는 순간적 화염의 최대 높이가 천장 근처의 전기 케이블에 직접 접촉될 수 있다. 그 결과 케이블의 열적 안정성은 절대적으로 확보될 수 없다 판단되었기에, 최대 화원 크기로 결정되었다. 이에 본 연구에서는 총 10개의 화재시나리오가 선정되었다.

각 화재시나리오에 대한 화재성장곡선을 도출하기 위하여, 유허유의 화재성장속도(fire growth rate)는 NFPA-72B¹⁹⁾를 근거로 t^2 에 의한 ultrafast로 최성기에 도달한 후에, 일정한 열발생률의 구간과 성장기와 동일한 속도의 쇠퇴기를 갖는다고 가정하였다. 적용된 유허유에 대한 점근적 직경의 질량감소율(asymptotic diameter mass loss rate, \dot{m}''_{∞})은 $0.039 \text{ kg/s}\cdot\text{m}^2$ 이며, 유한 크기의 화원에서 발생하는 질량감소율 \dot{m}'' 은 다음 식을 통해 얻어질 수 있다²⁰⁾.

$$\dot{m}'' = \dot{m}''_{\infty} \times (1 - e^{-k\beta D}) \quad (1)$$

여기서, k 와 β 는 각각 extinction-absorption coefficient of flame, mean beam length corrector이며, D 는 화원면적에 대한 등가직경을 의미한다. 특정 화원면적에 대한 \dot{m}'' 과 유허 연소열을 통해 최대 열발생률을 얻을 수 있으며, 총 발열량을 고려하여 최성기 및 쇠퇴기 시간에 대한 계산이 가능하다. 이와 같은 과정을 통해 계산된 화원면적에 따른 화재성장곡선은 Fig. 3에 제시되었다. 보다 상세한 계산절차는 참고문헌²¹⁾에서 확인될 수 있다.

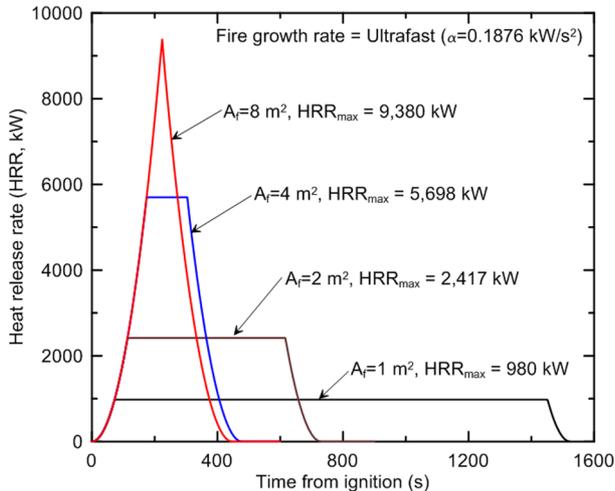


Fig. 3. Fire growth curves with the change in the area of a fire source (A_f).

3.2 화재모델의 선택 및 적합성 판정

화원으로 설정된 공기 압축기의 위치에 따라 복잡하게 배치된 전기 케이블의 열적 손상 여부를 판단하기 위하여, 시간에 따라 3차원 공간에서의 화재해석이 가능한 대표적 field 모델인 FDS(Fire Dynamics Simulator, version 6.1.2)²²⁾가 선택되었다. Large eddy simulation (LES) 기법이 적용된 FDS의 최신 버전에는 아격자 유동

Table 1. Results of the V&V study by NUREG-1824

Output quantity	Predictive capability	Model uncertainty	
		δ	$\tilde{\sigma}_M$
HGL temp.	GREEN	1.03	0.07
Target temp.	YELLOW	1.02	0.13
Total heat flux	YELLOW	0.85	0.22
O ₂ concentration	GREEN	1.08	0.14
Smoke concentration	YELLOW	2.70	-

δ : Bias factor by the results of the V&V study
 $\tilde{\sigma}_M$: Relative standard deviation

및 연소모델로서 Deardorff 모델과 EDC (eddy dissipation concept) 모델이 각각 적용되었다. FDS의 수치기법 및 모델에 대한 보다 상세한 내용은 참고문헌에서 확인될 수 있다^{16,22)}.

Table 1은 NUREG-1824에서 인용된 V&V의 결과로서, 주요 물리량에 대한 FDS 예측성능을 정성적으로 분류한 결과이다. GREEN은 FDS가 해당 물리량을 실험 불확실도 범위 내에서 적절히 예측될 수 있음을 의미하며, YELLOW는 해당 물리량의 예측은 가능하지만, 실험 불확실도 범위를 넘어서 큰 상대오차를 가져올 수 있음을 나타낸다. 전기 케이블의 열적 손상기준에 해당되는 대상물체의 온도(표면온도)와 열유속은 YELLOW 등급에 해당됨을 고려할 때, 화재로 인한 전기 케이블의 안전성 평가에 대한 FDS의 수행 및 분석 결과의 신뢰성을 확보하기 위해서는 상당한 주의가 요구됨을 인지할 수 있다.

2장에서도 언급되었듯이, 다양한 실규모 화재실험과 FDS의 비교를 통한 V&V 결과를 직접적으로 반영하기 위해서는, 본 연구에서 고려한 화재조건 및 화재시나리오가 기존 실규모 실험조건 범위 내에 포함되는지를 확인해야 한다. Table 2에는 Froude 수, 천장 높이에 대한 화염길이, 구획의 종횡비와 같은 무차원 수에 대하여 본 연구에서 적용된 화재조건과 기존 실험결과의 검증 범위가 제시되었다. 그 결과 모든 화재시나리오 조건이 V&V에서 고려된 실험조건 범위 내에 포함되었음을 알 수 있다.

3.3 격자 민감도 분석 및 입력인자 설정

LES 기법을 적용하는 FDS의 경우, 격자의 크기는 난류 유동 및 연소모델의 의존도와 직접적으로 관련되며, 화재특성치의 예측에 매우 큰 영향을 미치게 된다. 일반적으로 화재모델링에서 격자의 크기는 특성 화재 직경(characteristic fire diameter, D^*)²³⁾ 내부에 10~20개의 격자가 설정될 때 타당한 결과가 제공된다고 알려

Table 2. Evaluation of applicability of V&V results by NUREG-1824

Quantity	Normalized parameter					Validation range	In range
Fire Froude Number	$\dot{Q}^* = \frac{\dot{Q}}{\rho_{\infty} c_p T_{\infty} D^2 \sqrt{g D}}$					0.4~2.4	Yes
	$A_f = 1 \text{ m}^2$	2 m^2	4 m^2	8 m^2			
	\dot{Q}^*	0.651	0.674	0.668	0.462		
Flame length (L_f) relative to ceiling height (H)	$L_f/H, L_f/D = 3.7 \dot{Q}^{*2/5} - 1.02$					0.2~1.0	Yes
	$A_f = 1 \text{ m}^2$	2 m^2	4 m^2	8 m^2			
	L_f/H	0.311	0.449	0.632	0.713		
Compartment aspect ratio	$L/H = 31.0/7.6 = 4.07, W/H = 21.0/7.6 = 2.76$					0.6~5.7	Yes

Table 3. Combustion properties of the lubricating oil

Property	Value
Effective formular	$C_{14}H_{30}$ (n-Tetradecane)
Density (kg/m^3)	$760^{25)}$
Effective heat of combustion (kJ/kg)	$46,000^{25)}$
Total volume (m^3)	0.04
Asymptotic diameter mass loss rate, \dot{m}''_{∞} ($\text{kg/m}^2 \cdot \text{s}$)	$0.039^{20)}$
$\kappa\beta$ (m^{-1})	$0.7^{20)}$
CO yield (kg/kg)	$0.012^{26)}$
Soot yield (kg/kg)	$0.042^{26)}$

Table 4. Thermal properties of materials

Material	Density (kg/m^3)	Thermal conductivity ($\text{W/m} \cdot \text{K}$)	Specific heat ($\text{kJ/kg} \cdot \text{K}$)
Concrete ²⁵⁾	2,400	1.600	0.750
PVC ²⁷⁾	1,380	0.192	1.289
Carbon steel ²⁶⁾	7,850	54.000	0.460

져 있다²⁴⁾. 그 결과 최소 $\dot{Q}(A_f=1 \text{ m}^2)$ 을 기준으로 공기 압축기실의 경우, 약 8백만 개에서 3천만 개 이상의 매우 많은 격자수가 요구된다. 이에 본 연구에서는 격자 크기가 0.30, 0.20 및 0.15 m로 변화될 때 주요 물리량의 민감도 분석을 통해 최종 0.20 m 크기의 격자(총 격자수 약 48만 개)가 고려되었다.

케이블의 열적 안정성을 평가하기 위하여, 각 케이블의 길이 방향으로 2 m 간격의 표면온도 및 열유속이 출력되었다. Table 3은 본 연구에서 고려된 윤활유의 연소물성 및 관련 정보를 제시한 것이며, Table 4는 구조물들이 갖는 재질에 대한 열적 물성을 나타낸 것이다. 각 물성값에 대한 출처는 Table에 표기된 참고문헌^{20,25-27)}을 통해 인용되었다.

4. 결과 및 검토

4.1 FDS 결과의 1차 분석

FDS 결과의 모델 불확실도 및 민감도 분석을 반영하기 이전에, 1차 결과에 대한 분석을 수행하였다. Fig. 4는 $A_f=1 \text{ m}^2$ 을 갖는 IA 압축기 A에서 화재 발생시 5개 그룹의 케이블에서 발생하는 최대 표면온도와 열유속을 도시한 결과이다. Fig. 2를 통해 확인될 수 있듯이

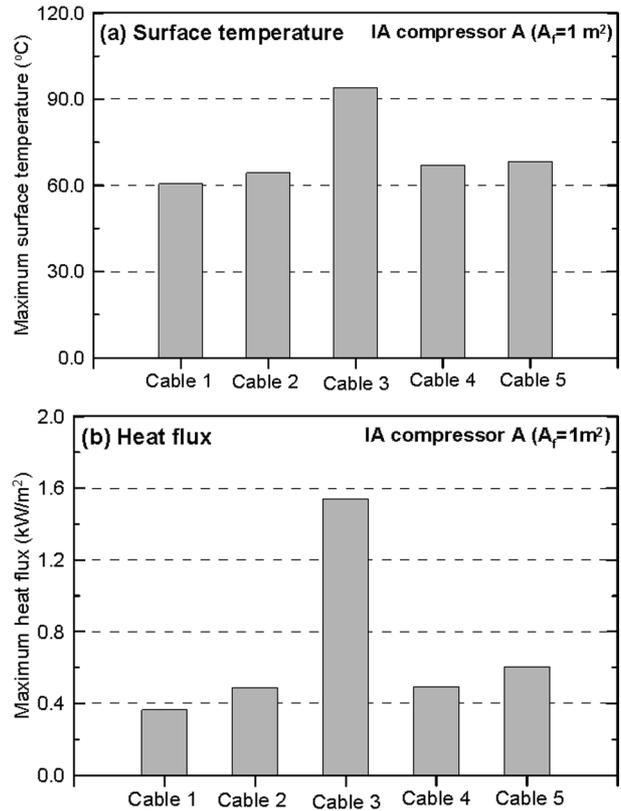


Fig. 4. Maximum surface temperature and heat flux on electrical cables for the fire generated at IA compressor A with $A_f=1 \text{ m}^2$.

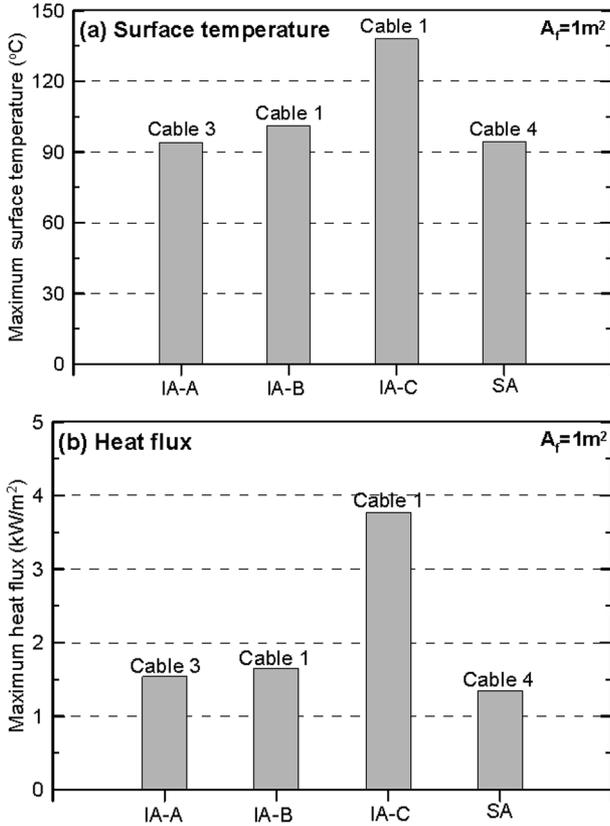


Fig. 5. Maximum surface temperature and heat flux on electrical cables for various fire locations with $A_f=1\text{ m}^2$.

IA 압축기 A의 상부에 위치한 cable 3에서 가장 높은 표면온도 및 열유속이 예측되고 있다. 그러나 인증 및 비인증 케이블의 열적 손상기준에는 미치지 못하여, 모든 케이블이 안전함을 확인할 수 있다.

Fig. 5는 $A_f=1\text{ m}^2$ 을 갖는 4개의 압축기에서 발생한 각각의 화재에서 전기 케이블의 최대 표면온도 및 열유속을 보여주고 있다. 화원의 위치에 따른 최대 표면온도 및 열유속이 발생하는 케이블의 번호(Fig. 2 참조)는 그림 내에 표기되었다. 천장 근처의 케이블은 서로 다른 높이 및 불규칙한 분포를 갖기 때문에, 위치가 변경된 화원과의 직선거리에 따라 최대 표면온도 및 열유속의 다른 값들을 보여주고 있다. 결과적으로 IA 압축기 C에서 화재 발생 시 가장 낮은 수직 높이 및 짧은 직선거리를 갖는 cable 1에서 높은 표면온도 및 열유속이 예측된다. 정량적으로 최대 표면온도 및 열유속은 각각 138°C 와 3.8 kW/m^2 으로서, IEEE-383 비인증 케이블의 열적 손상기준에 미치지 못한다. 즉, 화원의 면적이 $A_f=1\text{ m}^2$ 인 경우, 화원의 위치에 상관없이 천장 근처의 모든 케이블은 열적 안정성이 확보될 수 있음을 예측할 수 있다.

Fig. 6은 A_f 가 2, 4, 8 m^2 으로 증가되었을 때, 전기

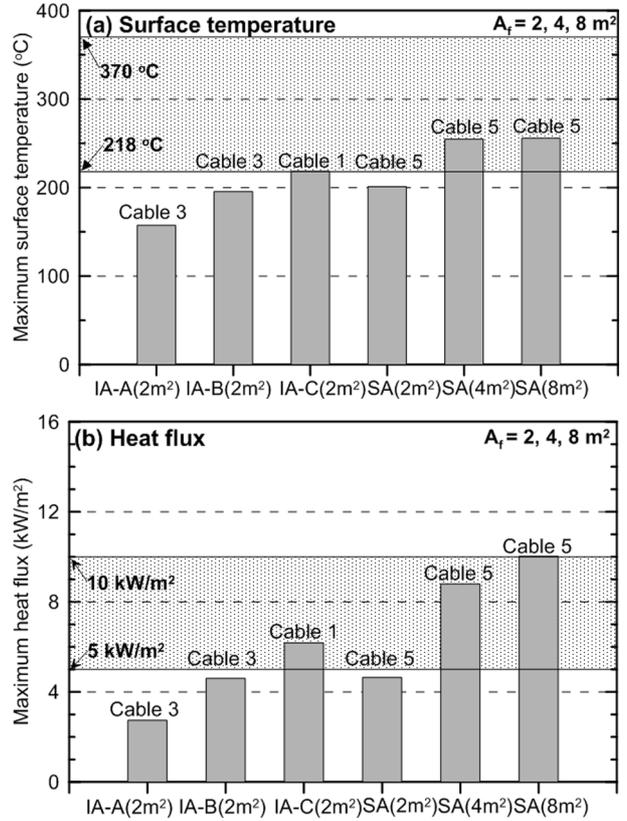


Fig. 6. Maximum surface temperature and heat flux on electrical cables with the fire scenarios considered in the present study.

케이블의 최대 표면온도 및 열유속을 도시한 것이다. IEEE-383 비인증 및 인증 케이블의 열적 손상기준이 각 그림에 표기되었다. A_f 의 변화는 화염길이의 변화를 동반하며, 이는 결과적으로 최대 열적 손상을 주는 케이블을 부분적으로 변경시킬 수 있다. 그림에서 IA 압축기 B와 SA 압축기의 경우, $A_f=2\text{ m}^2$ 으로 변경됨에 따라 최대 표면온도 및 열유속을 갖는 케이블(cable 3과 5)이 $A_f=1\text{ m}^2$ 의 조건(cable 1과 4)과 다름을 볼 수 있다. Fig. 6(a)의 표면온도에 의한 케이블의 손상 유무를 살펴보면, $A_f=2\text{ m}^2$ 의 조건에서 IA 압축기 C에서 화재 발생 시 219°C 로서 비인증 케이블의 손상이 예상되며, 다른 위치의 압축기의 경우에도 비록 손상기준에는 미치지 못하지만, 근접한 온도를 보여주고 있다. SA 압축기의 $A_f=4, 8\text{ m}^2$ 의 경우에, 표면온도는 약 255°C 로서 비인증 케이블의 손상이 예상된다. 반면에 모든 화원의 크기 및 위치에서 인증 케이블이 갖는 기준치 (370°C)를 초과하지 않아, FDS의 1차 분석결과만을 고려할 때 열적 안정성이 확보될 수 있다고 예상된다. Fig. 6(b)의 최대 열유속 결과를 살펴보면, 표면온도의 결과와 정성적으로 상당히 유사한 경향을 보이고 있다.

그러나 SA 압축기의 $A_f=4, 8 \text{ m}^2$ 인 경우, 최대 열유속은 인증 케이블의 높은 기준치(10 kW/m^2)에 근접(8.8 kW/m^2)하거나 약간 초과(10.1 kW/m^2)된 결과를 보이고 있다. 즉, 열유속의 관점에서 SA 압축기의 $A_f=4, 8 \text{ m}^2$ 조건은 비인증 뿐만 아니라 인증 케이블 역시 열적 손상이 발생할 수 있음을 예측할 수 있다. 참고로, 대표적인 열적 손상기준인 표면온도는 열에너지의 양과 관련된 반면에, 열유속은 시간에 따른 단위면적당 열에너지 변화율과 관련된 물리량이다. 그 결과 열유속은 화재성장속도와 보다 밀접한 관계를 갖게 되며, 표면온도와는 정성적으로 다른 경향을 보일 수 있다.

Figs. 4-6의 결과는 FDS 수행을 통해 얻어진 1차 분석으로서, 최종 고려된 화재시나리오에 대하여 전기 케이블의 열적 안정성을 평가하기 위해서는 2장에서 언급된 FDS의 모델 불확실도 및 입력인자의 불확실도가 반영되어야 한다.

4.2 민감도 및 모델 불확실도 분석

FDS의 입력인자 중에서 수치 해에 가장 큰 영향을 미치는 \dot{Q} 의 불확실도에 대한 민감도 분석이 수행되었다. Table 5에는 \dot{Q} 의 불확실도에 따른 주요 화재특성치의 거둬제공 의존도(power dependence)가 제시되어 있다. 2장에서 언급하였듯이, 경험적 상관식을 기반으로 유도된 거둬제공 의존도(NUREG-1824)는 화재 위험성을 크게 과소평가할 수 있기 때문에¹⁷⁾, 본 연구에서는 반복 계산을 통해 \dot{Q} 의 변화에 따른 거둬제공 의존도를 도출하였다. 예를 들어, \dot{Q} 이 15%의 불확실도를 갖는다고 가정할 때, 화재모델에 의해 예측된 표면온도의 상대적인 변화량은 $15\% \times 0.86 = 12.9\%$ 의 불확실도를 갖게 된다. 본 연구에서는 \dot{Q} 의 입력 불확실도를 15%로 가정하였으며, 민감도 분석 결과가 반영된 각 시나리오의 최대 표면온도와 열유속 조건에 최종적으로 모델 불확실도가 고려되었다.

모델 불확실도는 V&V 결과를 통해 제시된 Table 1의 편향인자(δ)와 상대표준편차($\tilde{\sigma}_M$)로부터 고려될 수

Table 5. Model sensitivity to uncertainty in heat release rate

Output quantity	Power dependence	
	NUREG-1824	Present study
HGL temp. rise	2/3(0.67)	0.82
Surface/target temp.	2/3(0.67)	0.86
Total heat flux	4/3(1.33)	1.06
O ₂ concentration	-1/2(-0.5)	-0.16
CO ₂ concentration	1/2(0.5)	0.97
CO concentration	1/2(0.5)	0.97

있다. 만약 민감도 분석을 통해 얻어진 예측값을 M 이라 할 때, $\mu = M/\delta$ 은 V&V 결과에 의해 조절된 “true” 값 또는 확률밀도함수의 평균값이 된다. 또한 $\sigma = \tilde{\sigma}_M \times (M/\delta)$ 은 표준편차를 의미한다. 그 결과 손상기준 x_c 를 초과할 수 있는 확률은 식 (2)를 통해 얻어질 수 있다.

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

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

위와 같은 민감도 및 모델 불확실도 분석을 통해 Fig. 7은 IEEE-383 비인증 케이블에 대하여 표면온도 및 열유속 손상기준이 초과될 확률을 도시한 결과이다. 표면온도의 관점에서 $A_f=1 \text{ m}^2$ 의 모든 조건은 손상 확률이 0%로 예측되었다. 반면에, $A_f=2 \text{ m}^2$ 의 경우에는 최대 56%, $A_f=4, 8 \text{ m}^2$ 으로 증가되면, 약 95%의 손상 확률을 보이고 있다. 일반적으로 표면온도보다 높은 열적 손상 확률을 보이는 열유속의 경우에, $A_f=1 \text{ m}^2$ 을 갖는 IA 압축기 C에서 화재 발생 시 약 70%의 손상 확

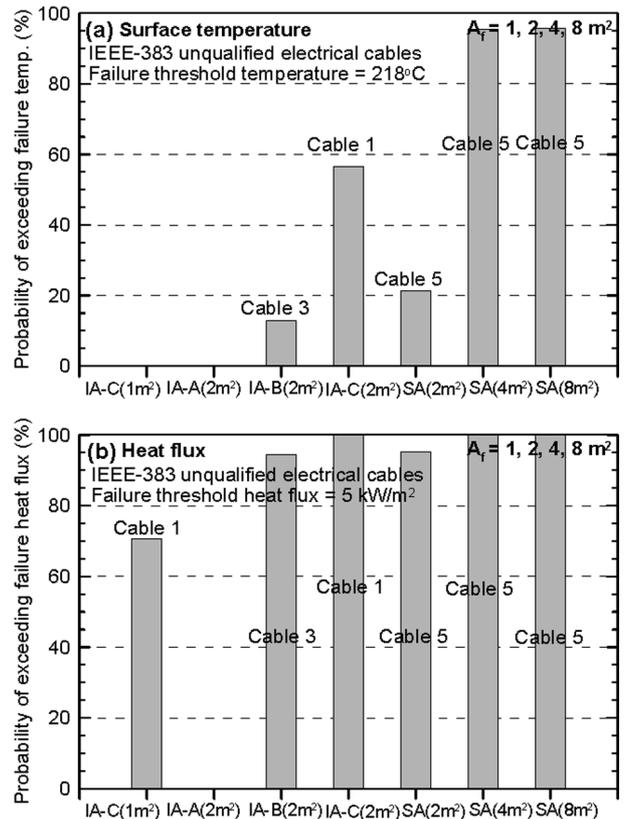


Fig. 7. Probabilities of exceeding failure temperature and heat flux for the IEEE-383 unqualified electrical cables through the sensitivity and model uncertainty analyses.

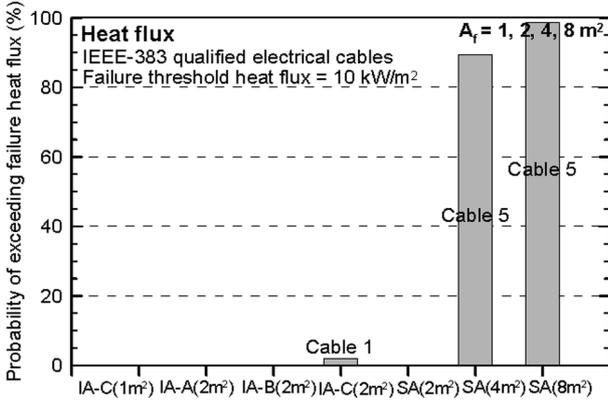


Fig. 8. Probabilities of exceeding failure heat flux for the IEEE-383 qualified electrical cables through the model sensitivity and uncertainty analyses.

를 갖으며, $A_f=2$ m²의 일부 조건(IA 압축기 C)에서는 100%의 손상 확률을 나타내고 있다. 또한 A_f 가 증가된 4, 8 m²의 조건에서는 모두 100%의 손상 확률을 보이고 있다. 즉, 비인증 케이블이 사용된 경우에, $A_f=1$ m²의 조건에서도 케이블의 열적 손상이 발생할 높은 가능성이 있음을 짐작 할 수 있다.

Fig. 8은 인증 케이블에 대하여 열유속 손상기준이 초과될 확률을 도시한 결과이다. 표면온도 370°C의 기준을 초과할 확률은 모든 화재시나리오에 대하여 0%로 예측되어, 본 논문에는 제시되지 않았다. 그림에서 열유속 10 kW/m²의 기준이 초과될 확률은 $A_f=2$ m²을 갖는 IA 압축기 C의 경우에 2%이며, SA 압축기 $A_f=4, 8$ m²의 경우에는 각각 90%와 99%로 예측되었다. 즉, 인증 케이블의 경우에 열적 안정성을 확보하기 위해서는 A_f 가 2 m² 이하로 설정되어야 함을 알 수 있다.

결론적으로, IEEE-383 비인증 및 인증 전기 케이블이 혼재되어 있는 공기 압축기실에서 윤활유 화재로 인한 케이블의 열적 안정성을 확보하기 위해서는 반드시 인증 케이블로 교체되어야 하며, 동시에 유류 화원의 면적이 2 m² 이하가 되도록 제방이 설치되어야 함을 예측할 수 있다. 추가로 화재모델링을 이용한 위험도 분석의 신뢰성을 보다 강화시키기 위해서는 국내에서도 다양한 화재조건에 실규모 실증실험을 통해 NUREG-1824에 제시되어 있는 V&V 결과의 지속적인 보완이 이루어져야 할 것으로 판단된다.

5. 결론

원전 화재모델링의 수행 기준안으로 인식되고 있는 NUREG-1934와 NUREG-1824를 근거로 체계적인 화재 모델링 절차를 고찰하였다. 또한 대표적인 화재모델인

FDS를 이용하여 국내 특정 지역의 가동 원전인 공기 압축기실을 대상으로 천장 근처에 위치한 전기 케이블의 열적 손상 확률 및 안정성 확보 방안이 제시되었다. 주요 결과는 다음과 같다.

공기 압축기실의 윤활유 교체작업 및 운전과정에서 윤활유 누설로 인한 유류화재의 발생 시, 화원의 면적 (A_f)이 1 m²의 조건에서도 IEEE-383 비인증 케이블은 높은 열적 손상 가능성을 갖는다. 또한 인증 케이블이 적용된 경우, A_f 가 2 m²의 경우, 2%의 손상 확률을 보였으며, 4 m² 이상의 경우 100%에 근접한 손상 가능성을 예측하였다. 결론적으로 공기 압축기실에서 윤활유 화재로 인한 전기 케이블의 열적 안정성을 확보하기 위해서는 반드시 인증 케이블로 교체되어야 하며, 동시에 보수적인 관점에서 유류 화원의 면적이 2 m² 이하가 되도록 제방이 설치되어야 한다.

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

References

- 1) NFPA, "Performance-Based Standard for Fire Protection for Light Water Reactor Electric Generating Plant", NFPA 805, 2001 Edition, 2003.
- 2) S. Y. Mun, C. H. Hwang, J. S. Park and K. Do, "Validation of FDS for Predicting the Fire Characteristics in the Multi-Compartments of Nuclear Power Plant (Part I: Over-ventilated Fire Condition)", Journal of Korean Institute of Fire Science & Engineering, Vol. 27, No. 2, pp. 31-39, 2012.
- 3) NRC and EPRI, "Verification and Validation of Selected Fire Models for Nuclear Power Plant Applications", NUREG-1824 and EPRI 1011999, Final Report, 2007.
- 4) NRC and EPRI, "Nuclear Power Plant Fire Modeling Analysis Guidelines", NUREG-1934 and EPRI 1023259, Final Report, 2012.
- 5) Korea Institute of Nuclear Safety, "Nuclear Power Plant Fire Modeling Application Guide(Draft)", KINS/ RR-856, 2011.
- 6) M. Bundy, A. Hamins, E. L. Johnsson, S. C. Kim, G. H. Ko and D. Lenhart, "Measurement of Heat and Combustion Products in Reduced-scale Ventilation-limited Compartment Fires," NIST Technical Note 1483, NIST, Gaithersburg, MD, 2007.
- 7) A. Lock, M. Bundy, E. L. Johnsson, A. Hamins, G. H. Ko, C.

- H. Hwang, P. Fuss and R. Harris, "Experimental Study of the Effects of Fuel Type, Fuel Distribution and Vent Size on Full-scale Under-ventilated Compartment Fires in an ISO 9705 Room", NIST TN 1603, NIST, Gaithersburg, MD, 2008.
- 8) L. Audouin et al., "Quantifying Differences between Computational Results and Measurements in the Case of a Large-Scale Well-Confined Fire Scenario", Nuclear Engineering and Design, Vol. 241, pp. 18-31, 2011.
 - 9) B. Merci and P. Vandevelde, "Numerical Simulations of Full-scale Enclosure Fires in a Small Compartment with Natural Roof Ventilation", Fire Safety Journal, Vol. 42, pp. 523-535, 2007.
 - 10) A. Meunders, G. Baker, L. Arnold, B. Schroeder, M. Spearpoint and D. Pau, "Parameter Optimization and Sensitivity Analysis for Fire Spread Modelling with FDS" SFPE 10th International Conference on Performance-Based Codes and Fire Safety Design Methods, University of Queensland, Australia, 2014.
 - 11) A. Kelsey, S. Gant, K. McNally and S. Betteridge, "Application of Global Sensitivity Analysis to FDS Simulations of Large LNG Fire Plumes", Institution of Chemical Engineers Symposium Series, Vol. 159, pp. 283-293, 2014.
 - 12) C. H. Hwang, S. Y. Mun and J. H. Cho, "Study on Sensitivity and Uncertainty Analyses of Fire Model", KINS/HR-1291, 2013.
 - 13) M. H. Jee and B. K. Lee, "Applicability of FDS for the Fire Hazard Analysis of the Fire Zone at Nuclear Power Plants", Journal of Korean Institute of Fire Science & Engineering, Vol. 20, No. 4, pp. 13-18, 2006.
 - 14) M. H. Jee, B. K. Lee and R. H. Jeoung, "Sensitivity Analysis for Fire Risk Conditions of Fire Area at Nuclear Power Plant with Performance-based Fire Model (FDS)", Journal of Korean Institute of Fire Science & Engineering, Vol. 21, No. 2, pp. 98-104, 2007.
 - 15) S. C. Kim, J. Y. Kim, J. S. Yoon and E. S. Lee, "A Comparative Study of Computational Fire Models for Fire Safety Analysis of Nuclear Power Plant", Proceedings of 2012 Spring Annual Conference, Korean Institute of Fire Science & Engineering, pp. 420-423, 2012.
 - 16) 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.
 - 17) 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. 1, 2016.
 - 18) S. P. Nowlen, "Quantitative Data on the Fire Behavior of Combustible Materials Found in Nuclear Power Plant: A Literature Review", NUREG/CR-4679 and SAND86-0311, 1987.
 - 19) NFPA, "Standard for the Installation, Maintenance and Use of Auxiliary Protective Signaling Systems for Fire Alarm Service", Standard: NFPA-72B, 1986.
 - 20) V. Babrauskas, in SFPE Handbook of Fire Protection Engineering, 2nd ed., NFPA, Quincy, MA, 1995.
 - 21) C. H. Hwang, H. S. Han, H. S. Yoon, J. H. Cho and B. J. Kim, "Development of Evaluation Criteria and Demonstration Application for Fire Modeling of Nuclear Power Plant", KINS/HR-1422, 2015.
 - 22) 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.
 - 23) 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.
 - 24) K. McGrattan, J. Floyd, G. Forney, H. Baum and S. Hostikka, "Improved Radiation and Combustion Routines for a Large Eddy Simulation Fire Model", In: Fire Safety Science - Proceedings of the Seventh International Symposium, Worcester, MA, pp. 827- 838, 2003.
 - 25) U.S. NRC, "Fire Dynamics Tools (FDTs), Quantitative Fire Hazard Analysis Methods for the U.S. Nuclear Regulatory Commission Fire Protection Inspection Program", NUREG-1805, Final Report, 2013.
 - 26) NFPA, "SFPE Handbook of Fire Protection Engineering", 4th ed., National Fire Protection Association, Quincy, MA, 2008.
 - 27) NRC and EPRI, "Fire Probabilistic Risk Assessment Methods Enhancements", NUREG/CR-6850 and EPRI 1011989, Technical Report, 2010.