

국내 원자력발전소의 주제어실 화재 피난 리스크 평가를 위한 화재 시뮬레이션

강대일* · 김길유 · 장승철 · 유성연*

한국원자력연구원 종합안전평가부 · *충남대학교
(2014. 5. 13. 접수 / 2014. 8. 5. 채택)

Fire Simulations for the Abandonment Risk Assessment of Main Control Room Fire in Domestic Nuclear Power Plant

Dae Il Kang* · Kilyoo Kim · Seung-Cheol Jang · Seong Yeon Yoo*

Korea Atomic Energy Research Institute · *Chungnam National University
(Received May 13, 2014 / Accepted August 5, 2014)

Abstract : In this paper, to systematically assess the abandonment risk of main control room (MCR) fire, fire simulations with Fire Dynamics Simulator were performed and abandonment probabilities were estimated for the MCR bench-board fire of domestic reference nuclear power plant. The fire simulation scenarios performed in this study included propagating and non-propagating fires of the MCR bench-board, and the availability and unavailability of heating, ventilation, and air conditioning system (HVACS). The following results were obtained. First, temperature was the major abandonment impact factor for the MCR bench-board fire if the HVACS was available and optical density was that if the HVACS was unavailable. Second, the fire scenario contributing the MCR bench-board fire abandonment risk was identified to be only the propagating fire. Third, it was confirmed that the abandonment probability of the MCR bench-board fire for domestic reference nuclear power plant could be reduced by using the fire modeling.

Key Words : nuclear power plant, main control room, abandonment risk, fire simulations

1. 서론

원자력발전소(이하 원전)는 안전성을 확보하기 위한 수단으로 다중성(redundancy)과 다양성(diversity)의 설계 개념을 가지고 있다¹⁾. 다중성 설계란 단일 기기의 고장에 대비해 동일 기능을 하는 기기들을 2대 이상 배치하는 것을 말한다. 다양성 설계는 기기들의 형태를 서로 다르게 하는 것이다. 일반적으로 원전은 기기들의 단일 계열 고장(single failure)에 대비하기 위해 기기들이 물리적으로 전기적으로 서로 분리되어 있다.

원전의 주제어실(main control room)은 원전의 정상 운전과 비상운전시 운전원이 상주하며 원전을 운전해야 하기에, 발전소의 운전과 안전에 필요한 모든 계통들의 제어/계측과 관련된 기기들이 주제어실 벤치보드(bench-board)와 전기 캐비닛에 배치되어 있다. 따라서 주제어실내에서 화재는 원전의 안전성을 확보하기 위

한 다중성과 다양성의 설계 개념을 무력화시켜 원전의 안전에 커다란 위협요인이 될 수 있다. 주제어실 화재 발생 등으로 인해, 운전원이 주제어실에 거주하지 못하거나 원전을 안전정지 못하면 운전원은 주제어실 피난을 대비해 설계된 원격정지 제어반(remote shutdown panel: RSP)에서 원전을 안전정지 시킨다.

원전의 화재 안전성 평가는 크게 결정론적(deterministic) 평가와 확률론적(probabilistic) 평가로 구분될 수 있다¹⁾. 결정론적 화재 안전성평가는 화재 위험성 분석(fire hazard analysis)이라 부르며 발전소내 화재 발생시 발전소가 안전정지를 제대로 할 수 있느냐 여부의 평가에 초점이 맞추어져 있다. 확률론적 평가는 화재 확률론적 안전성평가(probabilistic safety assessment: PSA)^{2,3)}라 부르며, 정량적 화재 리스크(risk)인 원전의 노심 손상 빈도(core damage probability: CDF) 추정에 초점이 맞추어져 있다. 노심 손상은 원전의 원자로내에 있는 핵연료가 손상되는 것을 말한

* Corresponding Author: Dae Il Kang, Tel : +82-42-868-8639, E-mail : dikang@kaeri.re.kr
Korea Atomic Energy Research Institute, 989-111, Daedeok-daero, Yuseong-gu, Daejeon 305-353, Korea

다. 국내 원전은 결정론적 화재 위험성 분석과 더불어 화재 PSA가 수행되고 있다. 결정론적 화재 안전성평가는 보수적인 가정하에 수행하고, 화재 PSA는 가능한 실제적 (realistic)인 발전소 상황을 반영하여 수행한다.

지금까지 국내 원전의 화재 PSA는 미국 전력연구원 (EPRI)에서 개발된 fire PRA implementation guide(이하 FPRAIG)⁴⁾에 따라 수행되어 왔다. 최근 미국의 NRC와 EPRI에서는 기존 FPRAIG을 개선한 신 화재 PSA 방법인 NUREG/CR-6850⁵⁾을 개발하였다. 기존 국내 원전 화재 PSA⁶⁾에서는 화재 시뮬레이션을 수행하지 않고 주제어실 화재 리스크를 평가하였다. 지금까지 화재 PSA에서 수행된 주제어실 벤치보드(main control room bench-board) 화재 피난에 대한 연구⁷⁻¹²⁾ 대부분은 NUREG/CR-6850의 방법론과 데이터에 따라 수행해왔고 화재 모델링은 CFAST (Consolidated Model of Fire Growth and Smoke Transport)¹³⁾를 주로 사용하였다.

원전의 주제어실 화재 피난에 대한 화재 모델링 연구는 화재 PSA가 최근에 수행되었기 때문에 활발히 이루어지지 않았다. 주제어실 벤치보드 패널 화재시, 이웃 패널로의 화재 전파는 Usama Farradj 등⁷⁾을 제외하고 고려하지 않았다. 한편 Francisco Joglar 등¹²⁾은 벤치보드 패널 내 화재가 전파와 비전파 화재로 나눌 수 있다고 언급하였다. 발화지점과 운전원 위치에 대해서는 대부분 특별한 언급이 없었으나 Ashley Mossa⁸⁾는 FDS¹⁴⁾ (Fire Dynamics Simulator) 5를 이용한 화재 모델링에서 운전원의 위치를 다중으로 고려하였고, Zhong Shan¹⁰⁾은 CFAST를 이용한 화재 모델링에서 3개의 지점을 고려하였다. 운전원 피난조건에 대한 기존 연구에서는 대부분 NUREG/CR-6850의 기준을 사용했지만 Usama Farradj 등⁷⁾과 Zhong Shan¹⁰⁾은 피난 온도 조건으로 50℃를 사용하였다.

기존 연구에서는 화재 모델링 수행시 단일 화재 시나리오 즉, 화재 전파를 고려하지 않거나 화재가 발생되면 무조건 전파된다고 보고 화재 모델링을 수행하였다. 하지만, 주제어실 벤치보드 화재는 화재의 특성에 따라 발생 화재가 이웃 벤치보드 패널 까지 전파될 수 있고 안될 수도 있다. 또 화재가 운전원과 벤치보드 기기들에 미치는 영향의 정도에 따라 운전원의 주제어실 피난여부가 결정된다. 화재 모델링 결과는 화재 발생 위치와 운전원 위치에 따라 달라질 수 있는데, 기존 연구에서는 대부분 화재 발생위치와 운전원 위치를 한 가지만 고려하였다. 이는 기존 연구 대부분이 CFAST를 사용했기 때문이다. CFAST를 이용한 화재 모델링 결과는 화재 발생위치와 운전원 위치에 따라 큰 차이를 보이지 않는다. 하지만, FDS를 이용해 화재 모델링

할 경우에는 큰 차이를 보일 수 있다. 또 주제어실 벤치보드 화재 발생위치에 따라 주제어실 강제 환기계통인 공기조화계통(HVAC: heating, ventilation, and air conditioning system)의 이용가능 여부가 결정되는데, 기존 연구에서는 이를 제대로 고려하지 않았다.

본 연구에서는 위에서 언급한 기존 연구 제한사항을 개선하며, 주제어실 화재 피난 리스크를 체계적으로 평가할 목적으로, FDS를 이용하여 국내 참조원전의 주제어실 벤치보드 화재 모델링을 수행하고 피난확률을 평가하였다.

2. 화재 리스크 평가와 화재모델링 방법

2.1 화재 리스크 평가 방법

원전의 화재로 인한 리스크인 노심손상빈도(CDF) 식은 다음처럼 표시될 수 있다^{5, 15)}:

$$CDF = \sum_{k=1}^n \lambda_k * SF_k * NS_k * CCDP_k \quad (1)$$

λ_k = 화재 시나리오 k 또는 화재구역 k의 화재빈도
 SF_k = 화재 시나리오 k 또는 화재구역 k의 심각도 (severity)

NS_k = 화재 시나리오 k의 진압실패확률 (non-suppression probability)

$CCDP_k$ = 화재 시나리오 k 또는 화재구역 k의 조건부 노심손상확률(conditional core damage probability: CCDP)

주제어실 화재 피난 확률은 위의 (1) 식에서 심각도와 진압실패확률 곱으로 나타낼 수 있다. 심각도는 열 방출율에 따라 주어지고, 진압실패 확률은 화재 시뮬레이션을 수행하여 얻어진 운전원 피난조건 도달시간을 추정하여 평가한다. 화재 진압실패 확률 (NS) 계산은 다음 식¹⁶⁾으로 표시된다:

$$NS(t) = e^{-\lambda t}, \text{ 최소 값은 } 0.001 \quad (2)$$

여기서 λ : 진압율 상수, 주제어실에 대해 0.33/min.
 t : 피난조건 도달시간 (min.)

식 (1)의 주제어실 화재로 인한 노심손상빈도 평가를 위해서는 점화빈도, 피난확률과 더불어 조건부 노심손상 확률을 계산해야 한다. 조건부 노심손상 확률은 안전관련 기기 이용불능도와 운전원의 원격 정지반 (RSP) 이동시간과 기기 작동시간 등을 고려한 인적 오류 확률(human error propability) 평가¹⁷⁾를 통해 이루어진다.

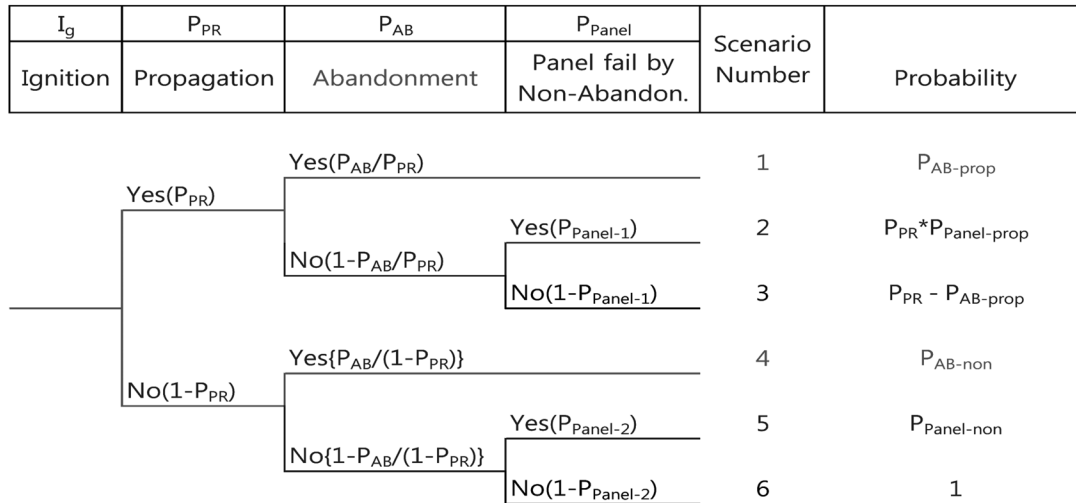


Fig. 1. Decision tree for evaluating the abandonment risk of main control room fire.

기존 연구⁷⁻¹¹⁾에서는 주제어실 화재 피난 리스크 평가시 전파 화재 또는 비전파 화재 한가지만을 고려하였다. 본 연구에서는 화재전파 여부에 따른 화재시나리오를 파악하기 위해, Francisco Joglar 등¹²⁾와 NUREG/CR-6850⁵⁾의 연구를 토대로, 주제어실 화재 리스크 평가 논리를 Fig. 1처럼 제안하였다. Fig. 1에서 리스크 평가시 고려하는 피난 시나리오는 1과 4이고, 피난하지 않는 시나리오는 2와 5이다. 시나리오 3과 6은 피난 유발도 벤치보드 패널 손상도 주지 않기에, 화재 리스크 계산에 포함시키지 않는다. Fig. 1의 각 시나리오에 대한 확률은 전파, 피난 등의 확률 값이 0.1보다 작을 때의 각 시나리오에 대한 확률 값이다. 피난 시나리오에는 화재가 전파되는 1번 시나리오와 전파 안하는 시나리오 4번 시나리오가 있다. 전파 안하는 경우는 10분 내에 화재가 진압되었다는 것을 전제로 한다¹²⁾. 따라서 시나리오 4는 피난조건 도달시간이 10분보다 짧으면 화재 시뮬레이션 결과를 리스크 계산시 고려하지만, 10분보다 길면 고려하지 않는다.

2.2 화재 모델링 방법

본 연구에서 사용한 주제어실 화재 운전원 피난조건은 NUREG/CR-6850⁵⁾이다. 기존 다른 연구자 일부^{7,10)}는 온도 피난조건으로 50℃를 사용하였지만 SFPE Handbook¹⁸⁾에서는 건조공기 110℃에서 최대 거주 가능 시간이 25분이라고 보고하였다. 따라서 본 연구에서는 NUREG/CR-6850의 온도 피난조건을 그대로 사용하였다. 다음 조건 중 하나가 만족이면 운전원은 주제어실을 떠나야 한다:

- 바닥 위 1.8 m의 위치에서 열속(heat flux)이 1000W/m²

- 이상이거나 온도가 95℃이상, 또는
- 연무 층이 바닥 위 1.8 m의 위치까지 내려오고, 광학밀도(optical density)가 3 m⁻¹이상, 또는
- 2.13 m 이상 이격된 대상물(target) 손상

위의 3가지 피난 조건 중 화재시뮬레이션과 직접적인 연관이 있는 조건은 열속, 온도, 광학밀도이다.

화재 모델링 결과에 주요하게 영향 미치는 열방출율(HRR: heat release rate) 입력 데이터는 NUREG/CR-6850⁵⁾에 제시되어 있다. NUREG/CR-6850에서는 주요한 점화원에 대한 열 방출율 확률분포를 제시하고 있고, 이들 열 방출율 분포에 대해 15개의 빈(bin)으로 나누어 심각도(severity)를 할당하였다. Table 1⁵⁾에는 두개 이상의 케이블이 있는 수직 캐비닛의 15개 빈에 대한 열방출율과 심각도 예가 나타나 있다. 운전원 피난조건 도달시간을 구하기 위한 화재 시뮬레이션은, 기본적으로 처음 빈 15를 시작으로 빈 1까지 15개의 빈에 대한 열 방출율 점 추정치(point value) 값을 이용해 수행한다. 화재 시뮬레이션 중 특정 빈에서의 열 방출율이 운전원 피난조건을 유발하지 않으면 더 이상의 화재 시뮬레이션은 수행하지 않는다.

2.3 화재 모델링 도구

NUREG/CR-6850⁵⁾, NUREG-1934¹¹⁾에서 제시한 화재 모델링 도구는 크게 단순 상관식을 가지고 만든 FDT(fire dynamic tool)¹⁹⁾, 존 모델(zone model)인 CFAST (Consolidated Model of Fire Growth and Smoke Transport)¹³⁾, 그리고 필드(field) 모델인 FDS (Fire Dynamics Simulator)¹⁴⁾가 있다. FDT는 단순 상관식을

Table 1. Discretized distribution and severity factors of heat release rates for vertical cabinets with qualified cable, fire in more than one cable bundle

Bin	Heat Release Rate - kW (Btu/s)			Severity Factor
	Lower	Upper	Point Value	
1	0 (0)	90 (85)	34 (32.7)	0.506
2	90 (85)	179 (170)	130 (123)	0.202
3	179 (170)	269 (255)	221 (209)	0.113
4	269 (255)	359 (340)	310 (294)	0.067
5	359 (340)	448 (425)	400 (397)	0.041
6	448 (425)	538 (510)	490 (464)	0.026
7	538 (510)	628 (595)	579 (549)	0.016
8	628 (595)	717 (680)	669 (634)	0.01
9	717 (680)	807 (765)	759 (719)	0.006
10	807 (765)	897 (850)	848 (804)	0.004
11	897 (850)	986 (935)	938 (889)	0.003
12	986 (935)	1076 (1020)	1028 (974)	0.002
13	1076 (1020)	1166 (1105)	1118 (1060)	0.001
14	1166 (1105)	1255 (1190)	1208 (1145)	0.001
15	1255 (1190)	Infinity	1462 (1386)	0.001

가지고 만들었기에 분석 결과가 매우 보수적이다. CFAST는 분석대상 구역을 고온구역과 저온구역으로 나누어 유동방정식을 풀기에 계산시간이 빠르다. FDS는 LES(large eddy simulation) 난류해석 기법을 기반으로 유동방정식을 풀기에 계산시간이 오래 걸린다. FDT는 미국원자력 위원회에서, CFAST와 FDS는 미국의 NIST(National Institute of Standards and Technology)에서 개발되었다. 원전은 화재 리스크 평가시분석 대상 방화구역과 화재 시나리오가 매우 많기에 대부분 CFAST를 사용한다.

본 연구에서는 주제어실 벤치보드 화재로 인한 운전원 피난 리스크를 평가하기 위해, FDS를 이용해 화재 시뮬레이션을 수행하였다. FDS는 version 5.5.3 (SVN 7031)¹⁴⁾을 사용하였다. FDS는 Navier-Stokes 방정식을 수치적으로 풀 때 근사 해(approximate solution)를 사용하므로 격자(grid) 크기 선정이 매우 중요하다^{11, 14)}. 본 연구에서는 시뮬레이션 시간을 고려해, 격자 크기를 15 cm로 선정하였다. FDS 이용시 격자 크기의 적절성에 대한 평가는, 특성 화재직경(characteristic fire diameter)에 대한 격자 크기의 비로 평가한다. 특성 지름을 D^* , 격자 크기를 δx 라고 할 경우 이전 화재모델링 확인과 검증 연구에서 사용했던 특성 화재직경에 대한 적정 격자 크기 비, $D^*/\delta x$ 는 4에서 16이었다^{11, 14)}. 특성 화재직경 D^* 는 다음 식으로 계산된다.

$$D^* = \left(\frac{\dot{Q}}{\rho_{\infty} c_p T_{\infty} \sqrt{g}} \right)^{\frac{2}{5}} \quad (3)$$

여기서, \dot{Q} 는 열방출율(kW), ρ_{∞} 는 공기밀도(kg/m³), c_p 는 공기비열(kJ/kg/K), T_{∞} 는 공기온도(K), g 는 중력가속도(m/s²)이다.

3. 화재 모델링 시나리오

3.1 주제어실 설계사항

분석 대상 참조원전 주제어실 크기는 가로 21.4 m, 세로 18.4 m, 높이 3.6 m이고 바닥과 천정의 재질은 석고보드이며 벽의 재질은 주로 콘크리트이다²⁰⁾. Fig. 2에 나타나 있듯이 주제어실 안에는 말굽모양의 주제어실 벤치보드(bench-board), 전기 캐비닛 및 운전원 지원 콘솔 등이 있다. 주제어실 벤치보드는 외관상 벤치보드 패널들이 분리된 것처럼 보이지만 내부에는 칸막이가 없이 서로 연결되어 있다.

Table 2에는 각 벤치보드 패널 별 관련 계통이 나타나 있다²⁰⁾. PM01~PM11 벤치보드 패널 한 부분에서 화재가 발생되면 관련 계통이 오작동되거나 이용불능이 될 수 있다. 각 패널내에서 발생된 화재는 패널 전체로 확산되거나 이웃 벤치보드 패널로 전파될 수 있다. 또한, 화재가 어느 패널에서 발생하느냐에 따라 공조계통이 이용가능할 수도 있고 없을 수도 있다. PM01 패널에서 화재가 발생하면 HVAC 상실사고가, PM02 패널에서 화재가 발생하면 기기냉각수계통(CCWS: component cooling water system)과 필수냉방수계통(ECWS: essential chilled water system) 상실 사고가 발생할 수 있다. PM10 패널에서는 발전소 정전사고가 발생할 수 있다. HVAC이나 CCWS/ECWS 상실 또는 발전소 정전사고가 발생하면

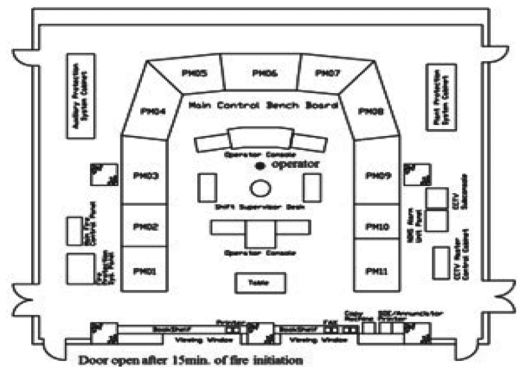


Fig. 2. Overview of main control room for domestic reference NPP.

Table 2. Description of MCR bench-board for domestic reference NPP

Name	Description
PM01	bench-board - HVAC system
PM02	bench-board - CCWS, ESWS, IAS etc.
PM03	bench-board - Engineered Safety Feature
PM04	bench-board - CVCS
PM05	bench-board - Reactor coolant system
PM06	bench-board - RPS
PM07	bench-board - Main steam system
PM08	bench-board - Feedwater system
PM09	bench-board - Turbine auxiliaries
PM10	bench-board - Site and aux power
PM11	bench-board - Site and aux power

주제어실에 정상적인 공기를 공급할 수 없게 된다. 벤치보드 다른 패널에서의 화재 발생은 HVAC의 이용불능과 무관하다.

정상 운전과 비상 운전 시 주제어실로 유입되는 공기 유량은 15,000 CFM(7.07 m³/sec)이고, 유출되는 공기 유량은 14,800 CFM(6.98 m³/sec)이어서 31.4 파스칼(Pascal)의 정압이 유지된다. 정상 운전 시와 안전주입작동신호가 발생하는 비상시의 주제어실 공기 공급과 유출은 모두 자동으로 이루어진다. 주제어실 화재 시 연기를 제거하는 배연계통(purge system)의 운전은 주제어실 밖에서 운전원이 수동으로 운전해야 된다.

벤치보드와 전기캐비닛의 스위치 등과 연결된 케이블들 모두 열경화성 케이블이고 케이블이 있는 바닥에 조기 화재탐지기가 설치되어 있다. 벤치보드 내부, 캐비닛 내부 및 주제어실 상부에는 화재 탐지기가 설치되어 있다.

3.2 운전원 위치와 발화지점

본 연구에서 운전원의 위치는 Fig. 2에서 첫 번째 운전원 콘솔(operator console)과 발전부장 책상(shift supervisor desk) 사이에 있다고 가정하였다. 운전원의 위치에 따라 화재 모델링 분석 결과가 달라질 수 있다. 하지만, 벤치보드 모든 패널에서 화재가 각각 발생한다고 하면 운전원의 위치를 어디에 설정하던 평가 결과는 유사할 것이다. 예를 들면 PM06 패널 근방에 운전원이 위치해 있다고 가정하자. PM06 패널에서의 화재로 인한 운전원 피난조건에 도달하는 시간은 짧아지지만, PM01 패널이나 PM11 패널에서의 화재로 인한 피난조건 도달시간은 매우 길 것이다.

Fig. 1에 나타나 있듯이 분석 대상 화재 시나리오, Fig. 2의 벤치보드 각각에서만 발생하는 단일 벤치보드 패널 화재와 한 벤치보드 패널 화재가 이웃 벤치보드

패널 로 전파되는 전파화재가 있다. 또 화재 발생위치에 따라 HVAC 이용가능 화재와 HVAC 이용불능 화재로 구분할 수 있다. 본 연구에서는 기본적으로 HVAC 이용가능 경우에는 발화지점이 PM06 패널과 PM03 패널, HVAC이 이용불가능 경우에는 발화지점이 PM02 패널이라고 가정하였다. 벤치보드 피난확률을 정확히 계산하려면 모든 패널에서의 화재 발생을 각각 고려해 화재 모델링을 수행해야 한다. 하지만 FDS의 모델링 시간이 많이 소요되어 벤치보드의 대략적인 대칭적인 배치, 운전원 위치, 화재 발생시 HVAC 이용 가능성을 고려해 PM02, PM03, PM06 패널들을 발화지점으로 선정했다. 이들 3개의 벤치보드 패널의 모델링 결과를 이용해 보수적으로 다른 패널에서의 화재에 대한 피난확률을 추정하였다. 선정 발화지점 패널들의 화재 모델링 결과와 동일하다고 한 벤치보드 패널은 다음과 같다:

- PM02 패널 모델링 결과: PM01과 PM10 패널 사용
- PM03 패널 모델링 결과: PM04, PM08, PM09, PM11 패널 사용
- PM06 패널 모델링 결과: PM05와 PM07 패널 사용

3.3 화재 시뮬레이션 입력자료와 기본가정사항

열방출율 크기는 Table 1의 각 빈(bin)을, 화재 성장과 지속시간, 그리고 소멸시간은 NUREG-1934¹¹⁾를 토대로 선정하였다. Fig. 3과 4에는 FDS에 입력으로 사용된 벤치보드 비전파와 전파화재의 열 방출율이 각각 나타나 있다. 벤치보드 패널의 설계사항과 NUREG/CR-6850 supplement 1¹⁶⁾을 토대로 패널에서의 화원 크기는 0.36 m²로, 화원 위치는 패널 높이 하단 30cm로 선정하였다. FDS의 입력에 사용되는 다른 데이터들은 참조원전 설계사항, NUREG/CR-6850^{5,16)}, NUREG-1934¹¹⁾, SFPA Handbook¹⁸⁾을 토대로 선정하였다. Table 3에 연소관련 입력 데이터들이 나타나 있다.

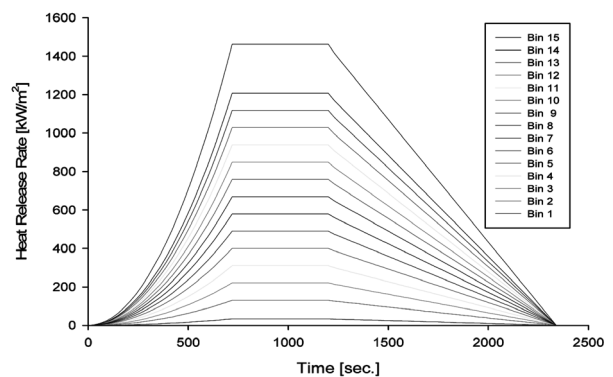


Fig. 3. Heat release rate profile for the non-propagating fire of bench board.

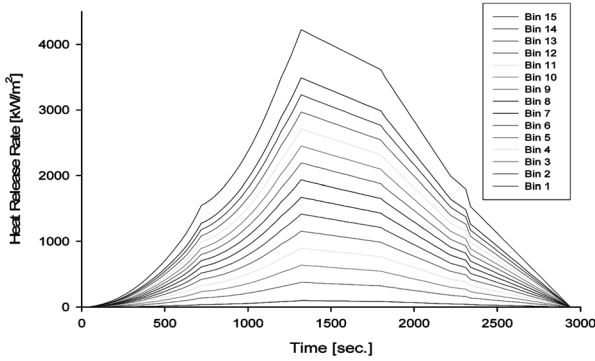


Fig. 4. Heat release rate profile for the propagating fire of bench board.

기존 연구결과^{5,7,11,12,16}와 참조원전의 주제어실 설계 사항, 그리고 운전원과 소방부서 직원 면담을 바탕으로 화재 시뮬레이션시 다음과 같은 가정을 하였다:

- 비전파 화재는 벤치보드 하나의 패널내에 국한되며, 전파화재는 화재 시작 10분후 이웃 벤치보드 패널로 화재가 전파된다.
- 화재 발생 15분에 주제어실의 한 문은 소방대에 의해 열린다.
- 화재 성장율은 연소시간 제공에 비례한다. 열방출율이 최고치에 도달하는 시간은 12분이고, 최고치 지속시간은 8분이며 감소시간은 19분이다.
- 서로 대칭인 각 패널에서의 발화에 대한 화재 모델링 결과는 동일하다.
- 배연계통(purge system)은 운전원이 주제어실이 아닌 현장에서 수동으로 작동해야 하기 때문에 이용불능이다. 리스크 평가관점에서 배연계통의 고려에 대한 리스크 감소가 크지 않다고 판단되기에 고려하지 않았다. 배연계통 고려시 배연계통 작동에 대한 운전원의 인적요류를 리스크 평가에 추가적으로 고려해야 한다^{5,17}.

Table 3. Input parameters relating to the combustion

Parameters	Values
Effective Fuel Formula	C ₃ H _{4.5} Cl _{0.5}
Heat of Combustion	10,300 kJ/kg
CO Yield	0.082 kg/kg
Soot Yield	0.175 kg/kg
Radiative Fraction	0.53

4. 화재 시뮬레이션 결과 및 고찰

비전파 화재 시뮬레이션 결과는 Table 4에, 전파화재는 Table 5에 나타나 있다. Table 4와 5에 나타난 숫자는 피난조건 도달 시간을, N/A는 피난조건에 도달하지 않는 것을 나타낸다.

4.1 격자 크기 검토

일반적으로 격자(grid) 크기가 작을수록 실험치와 FDS를 이용한 예측치 차이는 작아지는 경향이 있고, 격자가 크면 FDS는 과대 예측하는 경향이 있다^{11, 14}. Table 6에 전파와 비전파 화재에 대한 특성 화재직경에 대한 격자 크기 비가 15 cm, 20 cm, 10 cm에 대해 나타나 있다. 본 연구에서 사용된 격자 크기 15 cm는 비 전파 화재는 빈 5~15가, 전파화재는 빈 2~15가 적정 특성 화재직경에 대한 격자 크기 비 4~16을 만족시킨다. 하지만, Table 4의 빈 2~4는 만족시키지 못한다. Table 4에서 PM02 화재인 경우, 빈 2~4에서 피난조건 도달시간은 1,460~1,670초이다. 피난조건 도달시간이 약 1,255 초 이상인 경우, 식 (2)에서 진압실패 확률은 최소 1.0E-3으로 일정하다. 따라서, Table 4의 빈 2~4에 대한 시뮬레이션 결과는 격자 크기를 작게하여 재분석한다고 해도 피난확률 차이는 없을 것으로 판단된다.

Table 4. Fire simulation results for the non-propagating fire of main control room bench-board

Scenarios	Criteria	BIN-1	BIN-2	BIN-3	BIN-4	BIN-5	BIN-6	BIN-7	BIN-8	BIN-9	BIN-10	BIN-11	BIN-12	BIN-13	BIN-14	BIN-15
MCB PM02 fire without HVAC	T>95℃	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	870
	>1kW/m2	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A
	Opt.>3m-1	N/A	1670	1520	1460	1327	1320	1255	1242	1240	1145	1100	970	910	877	800
MCB PM03 fire with HVAC	T>95℃	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	1022	850	742
	>1kW/m2	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A
	Opt.>3m-1	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A
MCB PM06 fire with HVAC	T>95℃	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	732	657
	>1kW/m2	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A
	Opt.>3m-1	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A

Table 5. Fire simulation results for the propagating fire of main control room bench-board

Scenarios	Criteria	BIN-1	BIN-2	BIN-3	BIN-4	BIN-5	BIN-6	BIN-7	BIN-8	BIN-9	BIN-10	BIN-11	BIN-12	BIN-13	BIN-14	BIN-15	
MCB PM02 fire without HVAC	T>95℃	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	1357	1282	1192	1135	1072	1037	997	952	917	827	
	>1kW/m2	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	1435	1335	1255	1180	1150	1100	1080	960	
	Opt.>3m-1	N/A	1735	1505	1460	1295	1212	1157	1112	1040	1017	982	922	882	852	800	
MCB PM03 fire with HVAC	T>95℃	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	1402	1282	1220	1112	1042	987	877	862	822	752	727
	>1kW/m2	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	1335	1265	1242	1152
	Opt.>3m-1	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	1362	1262
MCB PM06 fire with HVAC	T>95℃	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	1203	1225	1127	1102	1020	1015	947	862	722	687	
	>1kW/m2	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	1260	1235	1165	1130	1060
	Opt.>3m-1	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	1682

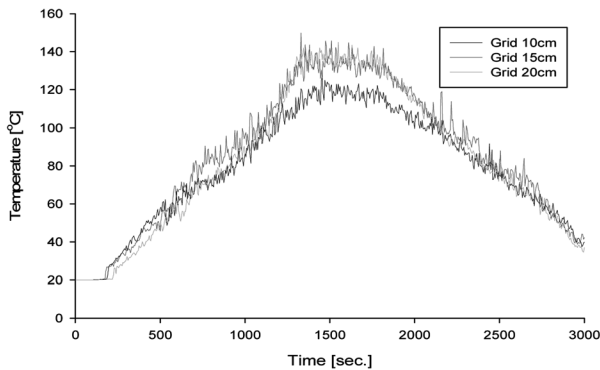


Fig. 5. Temperature profile for the change of grid sizes.

격자 크기 15 cm 선정의 타당성을 보이기 위해 HVAC 이용 가능한 PM06 전파화재에 대해, 격자 크기 10 cm, 20 cm 인 경우 화재 시뮬레이션을 수행하였다. 분석 대상은 Bin 12로 열 방출율이 1,028 kW일 경우이다. 전체 격자 셀(cell)수는 각각 격자 크기 10 cm인 경우 1,417,536, 15 cm인 경우 408,960, 20 cm인 경우 173,340이다. Fig. 5에는 격자 크기에 따른 피난온도 화재 시뮬레이션 결과가 나타나 있다. Fig. 5에 나타나 있듯이 격자 크기 10 cm일 경우가, 전체적으로 가장 낮은 온도 변화를 나타내고 있다. 15 cm인 경우와 20 cm 경우는, 약 1,000초까지 15 cm가 더 높은 온도 변화를 보이다가 1,000초 이후에는 유사한 온도 변화를 나타내고 있다. 확률론적 안전성 평가는 가능한 실제적인 발전소 상황을 반영하지만 보수성을 추구하기²¹⁾에 본 연구에서 사용한 격자 크기의 적절성은 확인된 것으로 판단된다.

4.2 화재 시뮬레이션 결과 및 고찰

비전파 화재에서 HVAC이 이용가능한 PM06 패널과 PM03패널에서의 화재시, 운전원 피난 주요 인자는 온도로 나타났다. 운전원 피난을 유발하는 최소 열방출율은 PM06 패널 경우 Bin 14인 1,208 kW이고 피난조건

Table 6. Ratio of the characteristic fire diameters to the sizes of grid cell

Bin	Non-propagating fire grid			Propagating fire grid				
	Max. HRR	15cm	20cm	10cm	Max. HRR	15cm	20cm	10cm
1	34	1.64	1.23	2.46	98.3	2.51	1.88	3.76
2	130	2.80	2.10	4.21	376.5	4.29	3.22	6.44
3	221	3.47	2.60	5.20	638.6	5.30	3.98	7.95
4	310	3.97	2.98	5.95	895.8	6.07	4.55	9.10
5	400	4.40	3.30	6.59	1155.8	6.72	5.04	10.08
6	490	4.77	3.58	7.15	1415.9	7.29	5.47	10.93
7	579	5.10	3.82	7.65	1673.1	7.79	5.84	11.69
8	669	5.40	4.05	8.10	1933.1	8.26	6.19	12.38
9	759	5.68	4.26	8.52	2193.2	8.68	6.51	13.02
10	848	5.94	4.45	8.91	2450.4	9.08	6.81	13.61
11	938	6.18	4.64	9.27	2710.4	9.45	7.09	14.18
12	1028	6.41	4.81	9.62	2970.5	9.80	7.35	14.70
13	1118	6.63	4.97	9.95	3230.6	10.14	7.60	15.21
14	1208	6.84	5.13	10.26	3490.6	10.46	7.84	15.69
15	1462	7.38	5.54	11.07	4224.6	11.29	8.46	16.93

도달시간은 732초로 나타났다. PM03 패널 최소 열방출율은, Bin 13인 1,118 kW이고 피난조건 도달시간은 1022초로 나타났다. 최단 피난조건 도달시간은 PM06 패널에서는 657초, PM03 패널에서는 742초로 나타났다. 비전파화재에서 HVAC이 이용불가능한 PM02 패널에서의 화재시, 운전원 피난에 대한 주요 영향인자는 광학밀도로 나타났다. 운전원 피난을 유발하는 최소 열방출율은 Bin 2인 130 kW이고 이때의 피난조건 도달시간은 1,670초로 나타났다. PM02 패널에서의 최단 피난조건 도달시간은 800초로 나타났다.

비전파와 전파 화재에 대한 시뮬레이션 결과 비교가 Table 7에 나타나 있다. 화재전파 유.무와 무관하게

Table 7. Summary of fire simulation results

Cases	Fire propagation	HVAC	Abandonment		
			Major factors	Minimum bin & HRR	Shortest time(sec.)
1-PM02	No	No	Optical	2, 130kW	800
2-PM03	No	Yes	Temp.	13, 1,118kW	742
3-PM06	No	Yes	Temp.	14, 1,208kW	657
4-PM02	Yes	No	Optical	2, 130kW	800
5-PM03	Yes	Yes	Temp.	5, 400kW	727
6-PM06	Yes	Yes	Temp.	6, 490kW	687

HVAC이 이용가능한 경우에는 온도가 주요 피난 영향인자이고, HVAC이 이용불능인 경우에는 광학밀도가 주요 피난 영향인자이다. 최소 피난 유발 열방출을 빈은 HVAC 이용불능한 경우가 이용가능한 경우보다, 비전파 화재인 경우보다 전파 화재인 경우가 작게 나타났다. 최단 피난조건 도달시간은 HVAC 이용가능한 경우가 이용불능인 경우보다 짧게 나타났고, 화재 전파 유·무와는 차이가 없었다. 이는 피난조건 최단 도달시간이 11분~13분이고, 화재 전파 시작시간이 10분이기 때문이다. 화재 전파 시작 초기에는 열방출을 증가가 크지 않다.

4.3 피난 확률 평가

피난 확률 평가는 전파화재에 대해서만 수행하였다. 비전파 화재인 경우, Table 4에 나타나 있듯이 피난조건은 화재발생후 10분이 지나서 일어난다. Fig. 1에서 화재가 전파안될 경우의 시나리오 4는 화재진압이 성공할 경우의 시간을 10분으로 선정했기 때문에, 10분 이내에 일어나는 피난 시나리오만을 고려한다. Table 8은 전파화재의 경우, PM02 패널 화재에 대한 피난확률 평가 결과 예이다. Table 5의 결과를 이용해 계산된 PM03, PM06 패널 화재의 피난 확률 평가 결과는, 각각 2.32E-4와 1.75E-4로 나타났다. 따라서 다른 벤치보드 패널에서의 화재 발생 경우도 고려하면, 벤치보드 전체 피난 확률은 3.47E-3으로 계산된다. 벤치보드 패널이 11개가 있으므로, 패널 1개당 평균 피난 확률은 3.15E-4으로 평가된다. 이는 기존 국내 참조원전 연구⁶⁾에서 화재 모델링을 수행하지 않고 계산된 패널 1개당 평균 피난 확률 8.5E-4의 37%이다. 결과적으로 국내 참조원전의 주제어실 화재 피난 확률은 화재 모델링을 통해 약 63% 감소되었다.

Fig. 1에 의한 주제어실 벤치보드 화재 리스크 평가는, 피난 리스크로 전파화재를 피난하지 않는 리스크로 전파화재와 비전파 화재 모두를 고려한다. 피난하지 않는 전파화재 리스크 평가는 10분내에 진압실패

Table 8. Calculation results of abandonment probability for PM02 fire

bin	HRR(kW)	SF	Time to Abandonment(s)	NS	(SF*NS)
1	34	0.506	N/A	0.00E+00	0
2	130	0.202	1735	1.00E-03	2.02E-04
3	221	0.113	1505	1.00E-03	1.13E-04
4	310	0.067	1460	1.00E-03	6.70E-05
5	400	0.041	1295	1.00E-03	4.10E-05
6	490	0.026	1212	1.27E-03	3.31E-05
7	579	0.016	1157	1.72E-03	2.76E-05
8	669	0.01	1112	2.21E-03	2.21E-05
9	759	0.006	1040	3.28E-03	1.97E-05
10	848	0.004	1017	3.72E-03	1.49E-05
11	938	0.003	982	4.51E-03	1.35E-05
12	1028	0.002	922	6.28E-03	1.26E-05
13	1118	0.001	882	7.82E-03	7.82E-06
14	1208	0.001	852	9.22E-03	9.22E-06
15	1462	0.001	800	1.23E-02	1.23E-05
Total					5.96E-4

확률을 고려해 평가한다.

만일 주제어실 벤치보드내에서 발생한 화재가 모두 전파한다고 가정하면, 피난하지 않는 리스크를 평가할 경우에는 진압실패 확률을 고려하지 않게 된다. 따라서, 피난 리스크는 본 연구결과와 동일하지만, 피난하지 않는 리스크는 진압실패확률을 고려하지 않아 본 연구결과보다 크게 된다. 또 전파하지 않는 화재 리스크를 평가하지 않게되어 기존 화재사건 경험⁸⁾과 부합되지 않는다.

만일 주제어실 벤치보드내에서 발생한 화재가 모두 전파하지 않는다고 가정하면, Table 4와 5에 나타나 있듯이 주제어실 벤치보드 피난 확률을 낙관적으로 평가한다. 또 화재가 전파하지 않는 경우에는, 전파하는 경우보다 상대적으로 식 (1)에 나타난 조건부 노심손상확률을 작게 평가한다. 결과적으로 벤치보드 화재가 전파하지 않는다는 가정은, 주제어실 화재 리스크를 낙관적으로 평가할 우려가 있다.

5. 결론

본 논문에서는 주제어실 화재 피난 리스크를 체계적으로 평가할 목적으로, FDS를 이용하여 국내 참조원전의 주제어실 벤치보드 화재 모델링을 수행하고 피난확률을 평가하였다. FDS를 이용하여 화재 시뮬레이션은 주제어실 벤치보드의 비전파 화재와 전파 화재를 고려

하였고, HVAC의 운전 여부도 고려하였다. 본 연구를 통해 다음과 같은 결론을 도출하였다:

- HVAC이 이용가능한 경우에는 온도가 주요 피난 영향 인자이고, HVAC이 이용불능인 경우에는 광학밀도 (optical density)가 주요 피난 영향인자이다.
- 최소 피난 유발 열방출을 빈(bin)은 HVAC 이용가능한 경우보다 이용불능한 경우가, 비전파 화재인 경우보다 전파 화재인 경우가 작게 나타났다.
- 최단 피난조건 도달시간은 HVAC 이용불능인 경우보다 이용가능한 경우가 짧게 나타났고, 화재 전파 유무와는 차이가 없었다.
- 화재 피난 리스크 평가에 기여하는 화재 시나리오는 전파화재 뿐이다.
- 화재 피난 확률은 화재 시뮬레이션을 수행하여 감소시킬 수 있음을 확인하였다.

Acknowledgements: This work was supported by Nuclear Research & Development Program of the National Research Foundation of Korea (NRF) grant, funded by the Korean government, Ministry of Science, ICT & Future Planning.

References

- 1) H. J. Kim, "Nuclear Safety and Regulation", Hans House, Korea, 2012.
- 2) J. C. Lee and N. J. McCormick, "Risk and Safety Analysis of Nuclear Systems", Wiley, 2011.
- 3) H. -J. Jeon, "A Risk Impact Assessment According to the Reliability Improvement of the Emergency Power Supply System of a Nuclear Power Plant", Journal of the Korean Society of Safety, Vol. 27, No. 5, pp. 224-228, 2012.
- 4) W. J. Parkinson, K.M.Bateman, W.S.Gough, J.A.Lee, B.Najafi, J.Schloss and G.Simon, "Fire PRA Implementation Guide", EPRI TR-105928, 1995.
- 5) B. Najafi, S. P. Nowlen, F. Joglar, D. Funk, R. C. Anoba, M. Kazarians, F. Wyant, A. Kolaczowski, G. Hannaman and J. Forester, "Fire PRA Methodology for Nuclear Power Facilities", NUREG/CR-6850, USNRC, 2005.
- 6) KOREA HYDRO & NUCLEAR POWER CO., LTD., "Probabilistic Safety Assessment for Hanul Units 3&4 [Level 1 PSA for External Events : Main Report]", 2004.
- 7) Usama Farradj and Kiang Zee, "Insights from Evaluations of Control Room Abandonment Fire PRA Analysis", PSA 2008 Topical Meeting, USA, 2008.
- 8) Ashley Mossa, "Abandonment Analyses for a Fire in a

- Nuclear Power Plant Control Room", Master's thesis, Rensselaer Polytechnic Institute, 2010.
- 9) M. A. Minton, "Uncertainty and Sensitivity Analysis of a Fire-induced Accident Scenario Involving Binary Variables and Mechanistic Code", Master's Thesis, Massachusetts Institute of Technology, 2010.
- 10) S. Zhong, "Abandonment Times Evaluation of Main Control Room at Daya Bay Nuclear Plant", 11th International Probabilistic Safety Assessment and Management Conference & the Annual European Safety and Reliability Conference, Finland, 2012.
- 11) D. Stroup et al., "Nuclear Power Plant Fire Modeling Application Guide(NPP FIRE MAG)", NUREG-1934, USNRC, 2012.
- 12) J. Francisco and R. Guy, "Modeling Main Control Room Fire", PSA 2013 Topical Meeting, USA, 2013.
- 13) W. Jones, R. Peacock, G. Forney and P. Reneke, "CFAST: An Engineering Tool for Estimating Fire Growth and Smoke Transport", Version 5 - Technical Reference Guide, NIST Special Publication 1030, National Institute of Standards and Technology, Gaithersburg, MD, 2004.
- 14) K. McGrattan, R. McDermott, S. Hostikka and J. Floyd, "Fire Dynamics Simulator (Version 5) User's Guide", NIST Special Publication 1019-5, National Institute of Standards and Technology, FDS Version 5.5, Gaithersburg, MD, 2010.
- 15) D. Il. Kang, S. H. Han and S. Y. Yoo, "Development of the IPRO-ZONE for Internal Fire Probabilistic Safety Assessment", Nuclear Engineering and Design, Vol. 257, page 72 - 78, 2013.
- 16) K. Canavan and J.S. Hyslop, "Fire Probabilistic Risk Assessment Methods Enhancements", NUREG/CR-6850 Supplement 1, USNRC, 2010.
- 17) S.Lewis et al., "EPRI/NRC-RES Fire Human Reliability Analysis Guidelines", NUREG1-1921, USNRC, 2012.
- 18) SFPE, "SFPE Handbook of Fire Protection Engineering", 4th Edition, National Fire Protection Association, 2008.
- 19) Naeem Iqbal and Mark Henry Salley, "Fire Dynamics Tools (FDTs): Quantitative Fire Hazard Analysis Methods for the U.S. Nuclear Regulatory Commission Fire Protection Inspection Program", NUREG-1805, USNRC, 2004.
- 20) KOREA HYDRO & NUCLEAR POWER CO., LTD., "Final Safety Analysis Report for Hanul Units 3&4", 2004.
- 21) ASME, "Standard for Level 1/Large Early Release Frequency Probabilistic Risk Assessment for Nuclear Power Plant Applications", ASME/ANS RA-Sa-2009, ASME, 2009.