

# 신규 PSA 방법론을 적용한 주제어실 화재 리스크 평가

오해철 · 지문학 · 김형택  
한수원 중앙연구원

## Evaluation of MCR Fire Risk using New PSA Method

Oh, Hae Cheol · Jee, Moon Hak · Kim, Hyung Taek

KHP-CRI

### 요 약

기존 국내원전의 화재 PSA는 기존 EPRI가 개발한 방법론을 이용하여 화재 PSA를 수행하여 오고 있다. 미국 NRC는 EPRI와의 공동연구를 통하여 새로운 PSA 방법론(NUREG/CR-6850)을 개발하였고, NFPA-805 코드를 적용하는 미국 원자력발전소들에 대해서 이 방법론을 적용한 PSA를 수행하는 것을 권고하고 있다. 본 논문에서는 국내 원전의 참조 주제어실을 대상으로 신규 방법론을 적용하여 노심손상빈도 영향을 평가하였고, 국내원전에 신규 방법론 적용시 논의되어야 할 사항들을 포함하였다.

### 1. 서 론

원자력 발전소에서의 화재사건은 원자로 정지를 유발함과 동시에 안전 정지 또는 사고 완화 기능을 수행하는 다수의 기기를 동시에 손상시킬 수 있어 원자력 발전소의 안전성에 적지 않은 영향을 줄 수 있다. 이러한 화재사건의 특성으로 인해 원자력 발전소에 대한 화재방호는 화재의 위험과 이로 인한 안전 관련 기기의 영향을 고려하여 심층방어개념으로 설계하고 있으며 발전소는 이러한 심층방어개념이 적절히 이행될 수 있도록 운영하고 있다. 그러한 설계, 건설 및 운영상의 노력에도 불구하고 화재는 점화원과 가연성 물질이 존재하고 있는 곳이라면 언제라도 발생이 가능하며, 원자력 발전소에서 화재사고의 중요성은 실제 경험뿐만 아니라 국내외 원자력발전소에 대한 화재사건 확률론적안전성평가(PSA)분석을 통하여 인식되고 있다. 국내 원전에 대한 화재사건 PSA에서는 EPRI의 화재 위험도 분석방법들[1],[2]을 적용하여 노심손상빈도를 계산하고 설계 취약점에 대해서는 설계 개선 대안을 제시하는 방법을 사용하고 있다. 가동중인 국내원전 화재 PSA 분석결과와 경우, 대부분 주제어실 화재에 의한 노심손상빈도가 전체 구역별 노심손상빈도 분포에서 가장 큰 기여도를 갖는 것으로 나타났다.

미국 NRC는 EPRI와 공동으로 신규 PSA 방법 (NUREG/CR-6850[3])을 개발하여 미국원전에 적용할 것을 권고하고 있고, 일부 발전소에서 시범적으로 적용하여 개선사항을 도출하고 있다. 신규 PSA 방법론은 국내에서 적용중인 화재 PSA 방법론과 비교할 때 분석 과정상의 큰 차이는 없으나 그 내용이나 깊이에 있어서는 약간 차이를 보이고 있다. 본 논문에서는 국내원전에 신규 PSA 방법론을 적용하는 경우에 대한 주제어실 화재사건 분석과정을 기술하 예비결과를 도출하여, 기존 방법론으로 도출된 결과와 비교하였다.

## 2. 주제어실 화재 PSA 분석

### 2.1 화재 PSA 업무 개요

원전 화재사건 PSA 분석은 케이블 위치 정보 수집, 화재구역 설정 등과 같은 기본 모델 수립을 포함하는 정성적 선별 분석과 정량화를 통한 선별 과정인 정량적 선별 분석 그리고 선별 분석을 통해 도출된 중요 화재구역에 대한 상세 화재사건 분석으로 구분하여 수행한다. 정량적 선별 분석으로부터 최종 선정된 화재구역에 대해서는 화재 감지 및 진압 설비, 수동 화재 진압 가능성, 화재 진과 확률, 화재모델링 분석 등의 보다 구체적인 상세 분석을 수행하며 이로부터 화재사건에 의한 최종 노심손상빈도를 계산한다. 노심손상빈도를 계산하는 지배식은 다음과 같다

$$CDF = \sum_{(i)} \lambda_i \times SF_i \times P_{i_{NS}} \times CCDP_i \quad (1)$$

여기서,  $\lambda_i$  : i구역화재 발생빈도,  $SF_i$  : 화재 심각도,  $P_{i_{NS}}$  : 비진압확률,  $CCDP_i$  : 조건부노심손상확률

### 2.2 주제어실 화재 PSA 업무 차이

신규 PSA 방법론에서 제시된 주제어실 노심손상빈도 평가절차와 기존 PSA 분석방법과 상당한 차이를 보이는 업무인 화재성장과 진과분석 수행업무와 심각도 분석업무에 대해 기술하고 기존 방법론 적용 결과와 비교하였다.

#### 2.2.1 화재 성장과 확산분석 수행

기존 분석방법론에서는 주제어실 화재시 상세모델링 대신 보수적 가정을 적용해오고 있다. 주제어실 화재시 대피시간의 경우, 주제어실 Geometry, 설계특성, 화재진과경로에 대한 상세분석없이 그림 1에 제시된 미국 SNL 연구소의 주제어실 화재실험결과[4]에서 제시된 Optical Density 결과를 인용하여 15분을 적용하여 평가하고 있다. 본 논문에서는 신규 방법론을 적용하여 FDS(Fire Dynamics Simulator)를 사용한 상세화재 모델링 분석을 수행하였는데, 주제어실 MCB(main control board) 내부 FICF(fire induced circuit failure) 가능성을 분석하는데 주 목적이 있다. MCB 내부 안전정지 케이블을 목표대상물로 선정하였고, 화재발생 후 시간 경과에 따른 목표대상물 온도, 열속 분석을 수행하였다. 또한 주제어실 내부온도가 93℃에 도달하는 시간과 1.8m 높이를 기준으로 Optical density가 3.0m<sup>-1</sup>에 도달하는 시간을 기준으로 주제어실 대피 시간 분석을 수행하였다. 주제어

실 거주성 평가 결과 주제어실 내부 온도는 화재가 진행됨에 따라 지속적으로 온도가 상승하였고 운전원 대피 기준인 95℃ 도달시간은 화재시나리오 종류별 다소 차이가 있으나 대략 25분 내외로 확인되었다. 주제어실 내부의 열속은 소화설비 동작 여부에 따라 차이를 보였으며, 소화약제가 살포되지 않은 경우 제한치인 1.0 kW/m<sup>2</sup>보다 낮은 값을 유지하나 소화약제가 MCB 내부에서 살포된 이후 주제어실 내부의 열속은 제한치를 초과하는 결과를 볼 수 있었다.

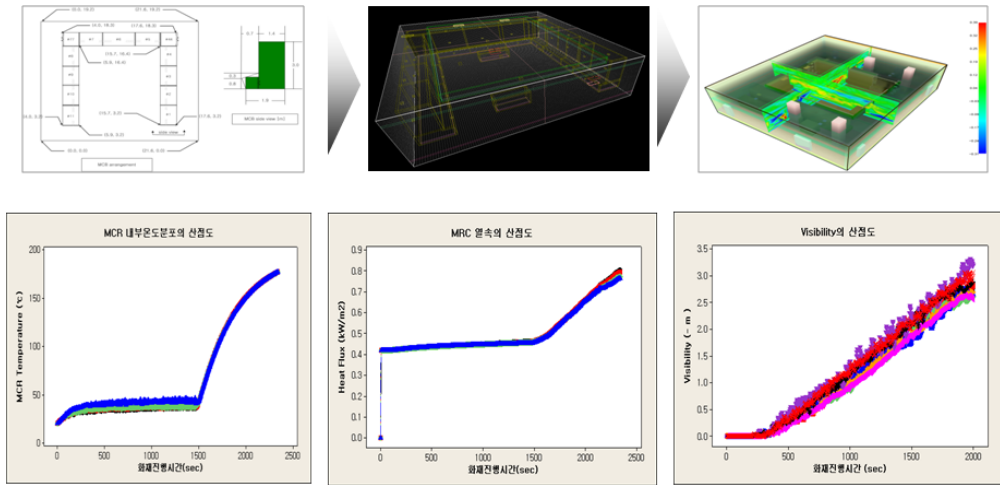


그림 2. 신규 PSA 방법론 적용에 따른 주제어실 화재 모델링 과정

### 2.2.2 주제어실 화재 진압실패확률

주제어실 화재시 진압실패확률과 관련해서 기존 분석방법에서는 청정소화약제살포 등 현재 설계된 자동진압설비는 고려하지 않는 대신, 참고문헌[2]에서 제시한 철수개시시간인 15분내 수동진압실패확률 권고치를 적용하여 평가한 반면, 신규방법론에서는 자동진압설비와 수동진압확률을 함께 고려하여 철수시간내 화재 진압실패확률을 계산하였고, 계산결과는 그림 3에 제시하였다.

### 2.2.3 주제어실 화재시 대체정지패널(RSP)에서의 안전정지 실패확률

주제어실 화재 진압실패시 운전원은 대체정지패널 (RSP)로 이동하여 안전정지운전을 수행하게 되어있다. 이때 운전원의 대체정지패널을 이용한 안전정지운전 실패확률과 관련해서 상세분석결과 도출된 주제어실 대피운전시간을 적용하여 안전정지운전실패에 대한 인적요류분석을 수행하였다.

### 3. 결론

국내원전에 성능기준 화재분석 및 규제가 성공적으로 도입되기 위해서는 기존 화재 PSA의 보수적인 가정 및 방법론을 적용하는 대신 신규 PSA 방법론에서 제시하는 화재 분석 및 회로 분석 등 상세분석이 필요하다. 표 1에 예시된 것처럼 기존의 보수적 방법 대신 상세 분석결과를 적용하면 점추정치로 평가할 경우 노심손상빈도는 감소되는 경향을 보이고 있다. 향후, 각 화재 PSA 수행업무들 각 요소에 내포된 불확실성분석이 수행되어야 하고, 이를 노심손상빈도에 반영하는 방법에 대한 고려가 필요하다고 판단된다.

#### 참고문헌

1. EPRI TR-100370, "Fire-Induced Vulnerability Evaluation (FIVE)", April 1992
2. EPRI TR-105928, Fire PRA Implementation Guide, Electric Power Research Institute, December 1995
3. NUREG/CR-6850 (EPRI TR-1011989), "EPRI/NRC-RES Fire PRA Methodology for Nuclear Power Facilities Volume 1 and 2" August 2005.
4. J.M. Chavez and S.P. Nowlen . NUREG/CR-4527 "An Experimental Investigation of Internally Ignited Fires in Nuclear Power Plant Control Cabinets, 1988

표 1. 국내 참조원전에 신규 PSA 방법론 적용 결과 예시

항목	기존방법 분석결과	신규방법론 적용시
주제어실 화재 철수시간	15분	25분
진압 실패확률	3.4E-3	8,84E-4
대체정지실패 인적오류확률	0.3	0.1
MCR 노심손상빈도	1.1E-6/yr	1.01E-7/yr

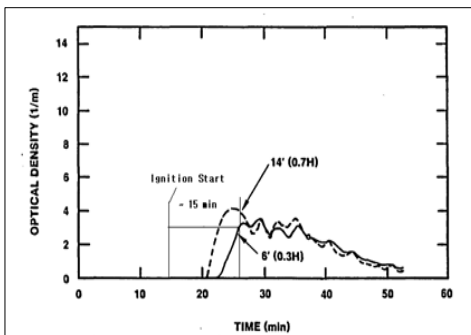


그림 1. 주제어실화재시 최소 철수개시시간 [4]

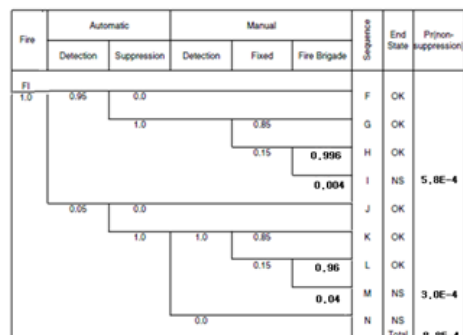


그림 3.신규 PSA 방법론 적용시 MCR 진압실패확률 계산