

화재 PSA 방법론에 대한 고찰

이윤환 · 양준언

한국원자력연구소

1. 서론

원자력발전소에서 발생하는 화재사건은 원자로 정지를 유발함과 동시에 안전정지 또는 사고완화 기능을 수행하는 다수의 기기를 동시에 손상시킬 수 있어 원자력발전소의 안전성에 적지 않은 영향을 줄 수 있다.

미국에서는 1975년 Browns Ferry 원전 1호기 케이블 포설실(cable spreading room)의 케이블 관통부 밀봉재에 대한 건전성을 검사하는 과정 중에 화재가 발생하여 원자로 건물로 화재가 확산되는 심각한 사고가 발생하였다. 이에 대해 미국 원자력규제 위원회는 관련된 법규의 개정, 지침서의 발간과 함께 사업자로 하여금 화재 재해도 분석(Fire Hazard Analysis)을 수행할 것을 요구하였다.

현재 원자력발전소에서 화재사고의 중요성은 실제 경험뿐만 아니라 국내외 원자력발전소에 대한 화재사건 분석을 통하여 인식되고 있는 사항이며, 각 발전소에서는 설계단계에서부터 보다 강화된 화재방호 기준을 적용하고 있는 실정이다.

원전의 안전성 평가 방법 중 하나로 확률론적 안전성 평가(Probabilistic Safety Assessment : PSA)가 있다. PSA 방법은 원전의 설계, 운전 및 정비 등을 종합적으로 고려하여 원전의 안전성 평가 및 가장 효과적인 안전성 향상 방안을 도출하는 방법이다. PSA는 다음 식과 같이 표시되는 원전의 위험도(risk)를 평가하기 위하여 개발된 방법이다.

$$\text{위험도} = \text{사고 빈도} \times \text{사고 영향}$$

1979년도에 발생한 미국의 TMI-2 사고가 원전에 대한 가장 최초의 종합적인 PSA인 WASH-1400에서 이미 예견 되었음이 밝혀지면서 PSA 방법은 1980년대 이후 원전의 안전성 평가를 위하여 광범위하게 사용되어오고 있다. PSA는 기본적으로 노심 손상 빈도(Core Damage Frequency, CDF)를 평가하는 1단계 PSA, 격납 건물의 파손 확률을 평가하는 2단계 PSA 및 파손된 격납 건물 밖으로 누출되는 방사능 물질이 주변 주민 및 환경에 미치는 영향을 계산하는 3단계 PSA로 구분된다. 원전의 위험도를 실제적으로 평가하기 위하여서는 1-3단계에 걸치는 전 범위의 PSA가 수행되어야 한다. 그러나, 본 논문에서는 1단계 PSA의 결과인 노심손상빈도를 기준으로 설명을 하였다. 또한 화재사건 분석 시 사용되는 화재 PSA 방법론 및 추후 연구의 필요성이 있는 분야

에 대하여 기술하였다.

2. 분석 절차

화재사건 분석은 케이블 위치 정보 수집, 화재구역 설정 등과 같은 기본 모델 수립을 포함하는 정성적 선별 분석과 정량화를 통한 정량적 선별 분석 그리고 선별 분석을 통해 도출된 중요 화재구역에 대한 상세 화재사건 분석으로 구분하여 수행한다.

2.1 정성적 분석

화재구역의 경계를 정의하고 정의된 이들 구역의 물리적 특성과 기능적 특성을 파악하여 구역에서 화재가 발생하더라도 발전소 정지를 일으키지 않으며, 발전소 안전정지 기능에 영향을 미치지 않거나 안전정지 운전에는 영향이 있더라도 무시 가능한 수준임을 보임으로써 화재구역을 선별한다.

(1) 화재구역의 정의

화재구역은 최소 2시간 이상의 내화등급을 갖는 방화벽으로 경계가 이루어진 구역으로 정의하며, 이들 화재구역 경계는 화재구역 내의 잠재적인 화재 재해에 대해 충분한 건전성을 유지하여야 할 뿐만 아니라 외부 화재로부터 구역 내 중요 기기를 보호할 수 있어야 한다. 또한 방화벽에 존재하는 모든 개구부에는 내화벽과 동등한 내화등급을 갖는 방화문, 방화댐퍼 및 관통부 밀봉재 등의 화재 차단설비가 설치되어야 한다.

(2) 구역별 분석대상 계통 및 기기의 선정

선정된 계통을 구성하는 기기에 대하여 화재에 노출되었을 때 기기의 고유 기능이 상실될 수 있으면서 그러한 기능 상실이 사고 완화 기능을 저해할 수 있는 기기를 대상으로 선정한다. 또한 기기의 운전에는 필수적인 전원 및 제어 케이블은 화재 노출 시 쉽게 기능이 상실될 수 있으므로 분석 대상 기기에 연결되는 케이블이 어떠한 화재구역에 위치하고 통과하는가를 확인해야 한다.

(3) 화재구역의 경계 확인

화재구역의 경계상에 위치하는 방화문, 방화댐퍼 및 케이블 관통부 등의 위치 확인을 통해 다른 화재구역으로의 전파 가능성을 확인한다.

(4) 기기의 손상 여부 분석

화재로 인한 기기의 기능 상실 여부와 기기운전에 필수적인 전원 및 제어 케이블의 손상여부를 분석한다.

(5) 화재구역 간 전파 가능성 분석

화재구역 경계를 구성하는 방화문, 방화담퍼 및 케이블 관통부 등에서 화재와 무관한 임의의 고장이 발생하거나, 운전원에 의한 실수로 화재구역 경계의 건전성이 상실되어 화재가 전파된다는 보수적인 가정 하에 분석을 수행한다.

(6) 화재구역의 정성적 선별 분석

지금까지 파악된 구역별 분석 대상 기기와 화재 전파 경로의 존재 유무를 토대로 화재구역을 정성적으로 선별한다. 정성적 선별 대상 화재구역에는 기본적으로 어떠한 사고 완화 기기도 설치되어 있지 않아야 하며, 화재가 발생한 구역뿐만 아니라 화재가 전파될 수 있다고 판단되는 구역 내에는 화재로 인한 영향으로 발전소가 자동 또는 운전원에 의해 정지되는 사고가 발생하지 않아야 한다는 선별 기준을 만족하여야 한다.

2.2 정량적 선별 분석

정량적 선별 분석에서는 각 화재구역별 화재발생 빈도와 화재전파 가능성 그리고 화재가 발생한 구역에서의 기기 손상과 화재가 전파되었을 때의 추가 기기 손상을 고려하여 화재로 인한 조건부 노심손상확률을 계산하고 이로부터 노심손상빈도를 평가하여 보다 상세한 분석이 필요한 화재구역을 선별한다.

(1) 화재구역별 화재발생빈도 계산

EPRI 화재발생빈도 데이터 그리고 각 대표지역별 기기 종류 및 수량에 근거하여 각 화재구역별 화재발생빈도를 계산한다.

$$\begin{aligned} F_T &= F^{SI}_T + F^{PW}_T \\ &= WF^{SI}_L \sum SF^{SI}_{if} + WF^{PW}_L \sum SF^{PW}_{if} \end{aligned}$$

여기서, F_T 는 화재구역의 화재발생빈도이며 F^{SI}_T 는 화재구역 고유의 점화원에 대한 화재발생빈도의 합을, 그리고 F^{PW}_T 는 일반 점화원의 화재발생빈도의 합을 나타내고 있다. 또한 WF^{SI}_L 은 화재구역 고유 점화원에 대한 화재발생빈도 계산을 위한 대표 지역 계수이며 SF^{SI}_{if} 는 개별 고유 점화원의 화재발생빈도이다. 이와 유사하게 WF^{PW}_L 은 일반 점화원의 화재발생빈도 계산을 위한 계수이고 SF^{PW}_{if} 는 개별 일반 점화원의 화재발생 빈도이다.

(2) 초기사건의 선정

1단계 내부사건 PSA에서 고려한 초기사건을 포함하여 화재에 의해서 발생 가능한 사건을 초기사건으로 선정한다.

(3) 사고경위별 조건부 노심손상확률 계산

화재분석을 위해 구성된 고장수목을 사용하여 각 사고경위별 조건부 노심손상확률을 구한다.

(4) 각 화재구역별 노심손상빈도 정량화

상기 (3)에서 계산된 각 사고경위별 조건부 노심손상확률과 각 구역별 화재발생빈도를 곱하여 각 화재구역별 노심손상빈도를 구한다. 또한 구역별 노심손상빈도가 정량적 선별기준 (e.g., $1.0E-06$) 보다 작은 화재구역에 대해서는 더 이상의 분석을 수행하지 않는다.

2.3 정량적 상세 분석

정성적 그리고 정량적 선별분석에서 선별되지 않은 화재구역에 대해서 상세분석을 수행한다. 선별분석과 상세분석의 근본적인 차이점은 선별분석에서 고려된 보수성을 배제하여 가능한 현실적인 결과를 도출하는 것이며, 상세분석은 다음과 같은 과정을 통해 수행된다.

상세분석의 첫 단계는 화재구역 내 존재하는 점화원을 재평가하는 것이다. 점화원으로서의 역할을 하는 기기의 화재발생빈도를 정량적 선별분석에서 파악하나, 일부 점화원의 경우에는 설계특성에 따라 화재발생빈도가 변경될 수 있다.

다음 단계는 화재구역 내 설치된 점화원과 분석 대상 기기의 기능 및 위치에 근거하여 화재 시나리오를 마련하는 것으로 화재구역별로 하나 이상의 화재 시나리오가 개발될 수 있으며, 각각의 화재 시나리오는 화재손상 단계로 구분된다.

마지막 과정은 화재 시나리오를 정량화 하는 것으로 각 화재손상 단계의 발생빈도, 각 화재손상 단계에서의 조건부 노심손상확률, 각 화재손상 단계에 도달하기 전 화재를 진압할 확률 등을 조합하여 화재구역에서의 노심손상빈도를 계산한다. 최종 정량화 시 필요한 화재심각도, 화재진압 확률 및 소화설비의 고장률 등은 EPRI-TR105925 및 NSAC-179L 데이터를 사용한다.

최종 정량화 결과를 통하여 화재사건에 의해서 발전소 노심손상빈도에 큰 영향을 미치는 주요 화재 시나리오를 도출한다. 또한 정량화 결과를 바탕으로 한 민감도 분석을 통해서 설계 취약점 등을 도출하고 이에 대한 설계 개선안을 제시한다.

3. 결과 및 고찰

3.1 화재 PSA 결과를 통한 안전성 방안 도출

상기 기술된 화재 PSA 방법론을 이용하여 원자력발전소의 화재사건 분석을 수행하여 얻은 정량화 결과 및 민감도 분석 결과를 통해서 다음과 같은 사항을 도출할 수 있다.

- 발전소 노심손상빈도에 큰 영향을 미치는 주요 화재 시나리오 파악
- 설계 개선 등을 통한 화재 발생 가능성 최소화
- 화재 조기 감지 및 진압을 위한 설비 설치
- 화재로 인한 기기 피해를 최소화하기 위한 관련 절차서의 개정
- 다중 기기의 물리적인 격리 등

3.2 화재 PSA 방법론 보완을 위한 연구 필요성

현재 국내에서 사용하고 있는 화재 PSA 방법론은 미국전력연구원의 Fire PRA Implementation Guide를 기본으로 하고 있으나, 분석 과정상 약간의 차이는 있다. 이 차이점 중 앞으로 우리가 해결해야 할 일 중 한 가지는 바로 화재 성장 및 화재 전파에 관한 화재 모델을 화재 PSA에 사용하는 것이다. 현재 국외에서는 다양한 화재모델링 코드를 사용하여 화재 성장 및 전파에 관한 분석을 수행하고 있다.

이는 앞으로 진행될 성능위주의 화재방호 프로그램을 수행하기 위해서 필수적으로 필요한 사항이므로 이 분야에 대한 연구가 수행되어야 할 것이다.

4. 결 론

성능위주의 화재 방호 프로그램을 수행하기 위해서는 현재 PSA 방법론이 가지고 있는 보수성과 불확실성을 줄이기 위한 방법론 개선이 필요하며, 특히 화재 모델링 코드를 사용한 화재 성장 및 전파에 관한 분석이 이루어져야 할 것으로 판단된다. 또한 현재 원자력발전소에 적용되고 있는 상기 방법론을 일반 산업체에 적용하기 위해서는 PSA 모델 구축, 산업체의 화재사건 조사 및 데이터의 수집 등이 필요할 것으로 판단된다.

감사의 글

본 연구는 과학기술부의 원자력중장기연구개발사업의 지원으로 수행되었습니다.

참고문헌

1. NSAC-178L, Fire Event Database for U.S. Nuclear Power Plants, Electric Power Research Institute, January 1993.
2. EPRI TR-105928, Fire PRA Implementation Guide, Electric Power Research Institute, December 1995.
3. EPRI TR-100370, Fire-Induced Vulnerability Evaluation, Electric Power

Research Institute, April 1992.

4. NSAC-179L, Automatic and Manual Suppression Reliability Data for NPP Fire Risk Analysis, Electric Power Research Institute, February 1994.
5. Final Probabilistic Safety Assessment Report (Yonggwang Units 5&6), KEPCO
6. PRA Procedure Guide, NUREG/CR-2300