

C-05

원자력발전소의 화재 안전성 평가

이윤환, 양준언
한국원자력연구소

Fire Safety Assessment of Nuclear Power Plant

Yoon-Hwan Lee, Joon-Eon Yang
Korea Atomic Energy Research Institute

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 화재와 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 원자력발전소에서 화재사고의 중요성에 대한 인식이 높아지고 있는 상황이며, 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 1975년에 수행된 원전에 대한 가장 최초의 종합적인 PSA인 WASH-1400에서 이미 예견 되었음이 밝혀지면서 PSA 방법은 1980년대 이후 원전의 안전성 평가를 위하여 광범위하게 사용되어 오고 있다. PSA는 기본적으로 핵연료의 연간 파손 빈도로 정의되는 노심 손상 빈도(Core Damage Frequency, CDF)를 평가하는 1단계 PSA, 격납 건물의 파손 확률을 평가하는 2단계 PSA 및 파손된 격납 건물 밖

으로 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 분야에 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 발전소 설계 특성 파악

(1) 분석 자료원 확보

화재사건 분석을 위해서는 다수의 발전소 설계자료를 검토하여야 하며 원자력, 기계, 전기, 건축, 배관, 공조, 계측제어 분야 등의 전 설계 분야에서 생성되는 도면과 계산서 그리고 보고서 등 다수의 발전소 설계자료를 검토하여야 한다. 이 중에서도 구역별 화재 감지 설비, 화재 진압 계통, 화재 하중, 화재 전파가 가능한 이웃 구역, 발전소 화재 시의 안전 정지 기능 유지와 관련된 중요 설계 항목 등의 발전소 자료가 필수적이며 이들 정보는 설계 문서로 발행되는 화재재해도 분석 및 안전정지 분석 보고서로부터 입수할 수 있다. 또한 화재 경험 데이터, 화재방호 설비 고장 데이터, 수동 화재 진압 시간 등과 같이 우리나라의 원전에서 입수할 수 없는 정보는 미국전력연구원 보고서에서 언급된 일반 데이터를 사용하거나 보수적인 공학적 판단에 근거하여 사용한다.

(2) 현장 답사

발전소 현장답사는 크게 두 가지 목적을 가지고 수행한다. 하나는 발전소 설계자료로부터 확인할 수 없는 분석 정보를 구하기 위하여 수행하며 다른 목적은 발전소 설계자료로부터 입수한 분석 정보가 실제 발전소 조건을 반영하고 있는가를 또는 발전소의 현 조건이 설계에 따라 유지되고 있는가를 판단하기 위하여 수행한다.

이러한 발전소 현장답사는 일회에 그치는 것이 아니고 분석을 수행하면서 각 분석 단계별로 필요한 경우마다 발전소를 방문하여 필요한 자료를 입수하거나 설계 자료와 현장과의 일치성을 확인함으로써 분석 대상 발전소 고유의 현실적인 결과를 도출하는데 반영하여야 한다.

2.2 정성적 분석

정성적 분석에서는 화재구역의 경계를 정의하고 정의된 이들 구역의 물리적 특성과 기능적 특성을 파악하여 각 구역에서 화재가 발생하더라도 발전소 정지를 일으키지 않으며, 발전소 안전정지 기능에 영향을 미치지 않거나 안전정지 운전에 영향이 있더라도 무시

가능한 수준인가를 확인함으로써 향후 정량분석을 수행할 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, 방화담뽀 및 관통부 밀봉재 등의 화재 차단설비가 설치되어야 한다.

(2) 구역별 분석대상 계통 및 기기의 선정

각 구역 내의 기기 중에 화재에 노출되었을 때 기기의 고유 기능이 상실될 수 있으면서 그러한 기능 상실의 사고 완화 기능을 저해할 수 있는 기기를 분석 대상으로 선정한다. 또한 기기의 운전에 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, 방화담뽀 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

화재의 전파 가능성은 화재구역 경계를 구성하는 방화문, 방화담뽀 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.

2.3 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

현재 국내에서는 EPRI 화재발생빈도 데이터 그리고 각 대표지역별 기기 종류 및 수량에 근거하여 각 화재구역별 화재발생빈도를 계산한다. 화재발생빈도는 다음 식과 같이 표현된다.

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

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

(2) 초기사건의 선정

1단계 내부사건 PSA에서 고려한 초기사건을 포함하여 화재에 의해서 발생 가능한 사건을 초기사건으로 선정한다. 여기에서 초기사건이라 함은 정상 운전 중인 발전소의 불시적인 원자로 정지를 초래하는 기기 혹은 계통의 이상이나 인간행위를 의미한다.

(3) 사고경위별 조건부 노심손상확률 계산

화재분석을 위해 구성된 고장수목을 사용하여 각 사고경위별 조건부 노심손상확률을 구한다. 여기에서 고장수목이라 함은 계통이 필요한 기능을 수행하지 못하는 즉, 이용불능한 상태가 되는 모든 경우를 논리 게이트를 사용하여 연역적으로 도식화한 논리수목을 말한다.

(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 선별 기준 (e.g., 1.0E-06) 보다 작은 화재구역에 대해서는 더 이상의 분석을 수행하지 않는다.

표 1. 정량적 선별분석 정리 예

화재 구역	화재전과 구역	시나리오 발생빈도(/년)	조건부 노심손상확률	시나리오 CDF (/년)	구역 CDF (/년)	결과
100-A25A	100-A01A	2.69E-05	1.73E-04	4.66E-09	4.68E-09	선별제거
	100-A10A	5.37E-06	2.23E-06	1.20E-11		
	100-A05A	5.37E-06	2.04E-06	1.09E-11		
100-A25B	100-A05B	5.14E-06	1.58E-05	8.12E-11	6.30E-09	선별제거
	100-A01B	5.14E-06	1.81E-05	9.27E-11		
	110-A01B	5.14E-06	1.81E-05	9.27E-11		
125-A01A	-	1.41E-05	6.06E-04	8.54E-09	8.55E-07	추가분석
	125-A01B	7.05E-07	1.00E+00	7.05E-07		
	144-PACR	1.41E-07	1.00E+00	1.41E-07		
125-A01B	-	1.39E-05	1.40E-04	1.95E-09	2.09E-06	추가분석
	125-A01A	6.94E-07	1.00E+00	6.94E-07		
	144-PACR	1.39E-06	1.00E+00	1.39E-06		

2.4 정량적 상세 분석

정성적 그리고 정량적 선별분석에서 원전의 안전성에 중요하지 않은 것으로 판단된 구역 이외의 화재구역에 대해서는 상세분석을 수행하여야 한다. 선별분석과 상세분석의 근본적인 차이점은 선별분석에서 고려된 보수성을 배제하여 가능한한 현실적인 결과를 도출하는 것이며, 상세분석은 다음과 같은 과정을 통해 수행된다.

상세분석의 첫 단계는 화재구역 내 존재하는 점화원을 재평가하는 것이다. 점화원으로서의 역할을 하는 기기의 화재발생빈도는 정량적 선별분석에서 파악되기는 하나, 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. 일반적으로 최종 정량화 시 필요한 화재심각도, 화재진압 확률 및 소화설비의 고장률 등은 EPRI TR-105928 및 NSAC-179L 데이터를 사용한다.

최종 정량화 결과를 통하여 화재사건에 의해서 발전소 노심손상빈도에 큰 영향을 미치는 주요 화재 시나리오를 도출한다.

표 2. 정량적 상세분석 정리 예

화재구역		노심손상빈도 (/년)
화재구역 번호	화재구역 명	
100-A01A	A 계열 안전관련 스위치기어실	3.56×10^{-8}
100-A01B	B 계열 안전관련 스위치기어실	1.00×10^{-7}
100-A03A	A 채널 안전관련 인버터실	4.52×10^{-8}
100-A03B	B 채널 안전관련 인버터실	7.61×10^{-8}
125-A01A	A 계열 케이블포설실	8.19×10^{-9}
125-A01B	B 계열 케이블포설실	1.49×10^{-8}
총 노심손상빈도		2.80×10^{-7}

2.5 정량적 결과를 통한 안전성 방안 도출

화재사건 분석을 통해 도출된 발전소 취약점에 대하여 이의 우선 순위를 결정하고 각각의 취약점에 대한 현실적인 개선안을 마련한다. 현실적인 개선안이란 현재의 발전소 설비 변경 사항이 최소화하도록 하며 반면에 변경에 의한 안전성 향상이 극대화할 수 있는 개선안을 의미한다. 이때 가능하면 복수안을 마련하는 것이 바람직하며 이들 개선안은 정량화가 가능한 수준이어야 한다. 즉, 개선안에 대한 권고사항으로서의 채택 여부는 이들 개선안에 대한 민감도 분석을 통하여 결정되어야 한다.

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. 화재 PSA 방법론의 문제점 및 최근 연구 동향

현재 국내에서 사용하고 있는 화재 PSA 방법론은 미국전력연구원의 Fire PRA Implementation Guide를 기본으로 하고 있으나, 분석 과정상 약간의 차이는 있으며 많은 가정 사항과 데이터의 부족으로 인해 보수적인 평가를 수행하게 되며, 이로 인해 정량적 결과의 불확실성이 상대적으로 큰 상태이다. 따라서 본 논문에서는 현재 사용되고 있는 화재 PSA 방법론의 문제점을 제시하고, 그 문제점 해결을 위한 최근 연구 동향에 대하여 간략하게 기술하고자 한다.

3.1 화재 전파 및 기기 손상 모델링

한 화재구역에서 화재가 발생한 경우 화재의 성장으로 인해 그 구역 내 기기 및 케이블이 손상되며, 화재 전파 경로가 있을 경우 다른 화재구역으로 화재가 전파되어 전파된 구역 내 기기 및 케이블이 손상되는가를 분석하기 위하여 화재 모델링 코드를 사용한다. 현재 CFAST, COMPBRN IIIe, MAGIC, FIVE 및 FRANC 등 다양한 화재모델링 코드를 사용하여 화재 성장 및 전파에 관한 연구를 수행하고 있으나, 국내에서는 이러한 분야에 대한 연구가 부족한 실정이다. 따라서 상기 나열한 코드의 특성 및 장단점 등을 파악하여 국내 원전의 화재사건에 적합한 코드를 파악하여 국내 원전 화재 분석에 적용해야 할 것으로 판단된다.

3.2 화재 감지 및 진압에 대한 분석

현재 화재 PSA 수행 시 사용되는 방법론 상에서 가장 많은 차이를 나타내고 있는 부분이 바로 화재 감지 및 진압에 대한 분석 내용이다. 많은 PSA에서 주제어실을 제외하고 다른 화재구역에서는 수동화재 진압을 모델링 하지 않고 있으며, 그로 인해 보수적인 계산 결과를 낳게 된다. 또한 대부분의 PSA에서 단순하게 일반 데이터인 화재 감지 및 화재 진압 실패 확률만을 사용하여 계산함으로써 각 화재 사고경위의 특성을 반영하지 못하고 있다. 마지막으로 현장 운전원이나 화재 구조대의 화재 진압 행위에 의해 화재에 의해 손상되지 않은 기기가 손상되어 발전소 안전 정지에 문제가 될 수 있으므로 인간오류 분석 관점에서 이에 대한 접근이 필요할 것으로 판단된다.

3.3 화재 소구역간의 화재 전파

화재 소구역간의 화재 전파는 다중 계열의 케이블과 기기의 기능 상실을 초래한다. 그러나 일부 화재모델링 코드는 단일 화재구역에만 적용되므로 화재 소구역간의 화재전파를 분석할 수 없다는 단점을 지니고 있다. 또한 코드상의 문제 이외에도 분석 상 많은 차이점을 나타내고 있는데, 이는 화재 차단설비의 건전성 문제를 어떻게 처리하는냐에 따라 달라진다.

현재 대부분의 PSA에서는 다음과 같은 화재 전파 가능성을 고려하고 있지 않다.

- 방화 댐퍼 및 자동 닫힘 방화문 등의 능동 화재 차단 설비의 실패 확률
- 화재 진압 활동으로 인한 화재 방화벽의 건전성 상실
- 다수의 점화원 및 다량의 연소성 물질을 보유하고 있는 화재구역의 방화벽 건전성 문제

따라서 이웃한 화재구역으로의 화재 전파 및 화재 차단설비의 건전성 문제를 고려한 분석이 필요할 것으로 판단된다.

3.4 연소 생성물로 인한 영향 분석

일반적으로 화재사건 분석에서는 기기 또는 운전원에 대해서 연소 가스와 같은 연소 생성물이 미치는 영향을 적절하게 분석하지 못하고 있다. 이러한 분석 상의 취약점은 연소 생성물이 운전원에 미치는 영향 또는 케이블, 전기 캐비닛 및 전동기 등의 기기에 미치는 영향을 정량적으로 평가할 수 있는 방법과 데이터가 부족한 것에 기인한다.

현재 연구 결과에 의하면 연소 생성물로 인해 짧은 시간 내에 기기가 기능 상실하게 될 가능성은 희박하다고 한다. 오히려 연소 연기로 인해 화재 진압계통을 작동케 하여 이로 인해 안전관련 기기가 기능 상실하게 되는 분야에 대해서 연구가 진행 중이라고 한다. 따라서 향후에는 연소 생성물로 인한 진압 효율성 및 잘못된 진압 행위 등 운전원이 수동 화재 진압을 수행하는데 미치는 영향을 분석해야 할 것으로 판단된다.

3.5 주 제어실의 화재 시나리오 구성 및 정량화

원자력발전소 주 제어실에 대한 화재사건의 분석은 분석 정도에 따라 그 결과가 매우 상이하게 나타난다. 이는 주 제어실의 배치도 또는 운전원의 훈련 정도에 기인하기 보다는 분석 시 사용한 가정 사항에 의해 좌우되는 것으로 나타났다.

많은 분석의 경우 주 제어실 화재가 발생하면 운전원은 주 제어실에서 대피하여 발전소를 주 제어실 밖에서 안전정지를 위한 운전을 수행하는 것으로 모델링 되며, 정량화에서는 그 밖에 가능한 운전원 행위는 고려하지 않고 단순히 이 운전이 실패할 확률값만을 사용한다. 따라서 주 제어실의 화재사건 분석은 현재의 단순분석 수준보다 보다 상세한 분석이 요구된다.

3.6 그 밖의 연구 동향

상기 기술한 분야 외에도 다음과 같은 여러 분야에서 활발한 연구가 수행되고 있다.

- 화재 조건 하에서의 케이블 거동
- 터빈빌딩의 화재분석
- 화재발생빈도의 결정
- 모델 및 입력자료의 불확실성 분석 등

4. 결론

화재사건 분석 결과로부터 노심손상빈도의 기여 순에 따라 화재사고 시나리오의 우선 순위가 결정되며 높은 우선 순위를 나타내는 화재 시나리오가 발전소 안전성 측면에서 중요한 의미를 갖는다. 화재와 관련된 발전소 취약점은 화재사고 시나리오별로 파악 가능할 뿐만 아니라 주요 화재사고 시나리오에 공통적으로 적용되는 항목에 대해서도 도출될 수 있다. 이를 위해서는 화재사건 분석 결과의 세심한 검토는 물론 화재사건 분석의 전반적인 분석 개념에 대하여 충분한 이해력이 바탕이 되어야 한다고 사료된다.

성능위주의 화재 방호 프로그램을 수행하기 위해서는 현재 PSA 방법론이 가지고 있는 보수성과 불확실성을 줄이기 위한 방법론 개선이 필요하며, 특히 상기 설명한 분야에 대한 연구가 절실하다고 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