

# 위험도 정보 활용을 위한 화재사건 분석 방법론 개선 연구 현황

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.

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.

현재 미국을 중심으로 PSA 결과인 위험도 정보를 이용하여 원전에서의 운영 및 정비를 활발하게 수행하고 있는 실정이다. 기존에는 PSA가 결정론적 안전성 분석의 보조적 수단으로 사용되어 대상 원전에 대한 PSA가 일회적으로 이루어져 왔으나, 이제는 PSA 결과인 위험도 정보를 발전소의 운전 및 보수에 사용되게 됨에 따라 기존 PSA 방법의 문제점 개선에 대한 요구가 증대하고 있다.

본 논문에서는 화재방호를 목적으로 위험도 정보를 이용할 시 요구되는 방법론의 개선 사항을 파악하였다. 이를 위해서 먼저 현재 각국에서 연구 중인 분야에 대한 문헌 검토를 수행하였으며, 문헌 검토 결과를 토대로 앞으로 우리가 수행하여야 할 연구 분야를 도출하였다.

## 2. 화재사건 분석 방법론의 최근 연구동향

최근 미국 규제기관인 NRC(Nuclear Regulatory Commission) 등에서 수행 중인 화재 연구 프로그램<sup>1)</sup> 및 화재사건 분석 방법론의 개선 연구 분야 등에 대해서 살펴보았다. 또한 현재 각국에서 화재사건 분석에 가장 보편적으로 사용되고 있는 미국 전력연구원(Electric Power Research Institute : EPRI)의 화재 PSA 방법론<sup>2)</sup>상의 제한점 그리

고 방법론이 지니고 있는 보수성 등을 개선하고자 각국에서는 많은 연구가 진행되고 있으며, 특히 위험도 정보를 활용하는 화재방호 프로그램의 도입을 위한 연구가 활발히 진행 중이므로, 이들 현황 및 문제점 등에 대해서도 살펴보았다<sup>3)</sup>.

## 2.1 회로의 고장모드 및 발생 가능성 분석

전기 케이블이 화재로 인해 손상을 입었을 때, 가장 중요한 현상은 케이블과 관련된 기기의 기능 상실 또는 오작동(spurious actuation)이다. 화재 PSA에서는 케이블과 관련된 기기의 오작동은 hot short 에 기인하는 것으로 알려져 있다. 따라서 화재로 인해 케이블이 손상을 입었을 경우 구동, 제어 및 기기의 제어회로의 발생 가능한 고장모드가 발전소 운전애 어떠한 영향을 미치게 되는가를 파악하고, 제어회로 고장의 조건부 확률을 설정하기 위한 필요한 방법론 및 데이터를 구축하기 위한 연구가 미흡하다.

## 2.2 화재 감지 및 진압 분석

화재 위험도 평가 분석 시 화재 감지 및 진압의 효율성 문제는 실제적으로 자동 진압계통의 신뢰도를 평가함으로써 가능하다. 진압분석에는 화재 발생으로부터 진압에 들어가기까지의 시간 그리고 최종 진압까지 소요된 시간 등을 필요로 한다. 또한 대부분의 화재 위험도 평가에서 정량적으로 다루지 않았던 사항, 예를 들면 연기 및 조명 고장 등이 수동 화재진압에 미치는 영향 등을 고려해야 하나 현재 화재 위험도 평가에서 이러한 문제점을 고려하지 못하고 있다. 또한 자동 및 수동 화재 진압 활동의 신뢰도 평가를 위한 방법론 및 데이터 구축이 필요하며, 현재 운전되고 있는 미국 원자력발전소에 적용 가능한 신뢰도값을 예측하고, 예측된 신뢰도값의 주요 불확실성을 찾아내는 일이 시급한 실정이다.

## 2.3 IEEE-383 케이블의 화재 발생 가능성 분석

화재 위험도 평가에서의 새로운 관심사는 IEEE-383 flame test<sup>4)</sup>에 의해 입증된 케이블을 포함하여 케이블의 자체 발화 가능성에 관한 내용이다. IEEE-383 flame test 결과에 의하면 케이블의 자체 발화 가능성은 매우 낮은 것으로 나타났다. 원자력발전소에서의 케이블의 자체 발화에 관한 데이터는 매우 부족한 상태이며, 보고된 사건 수도 매우 적고 보고 상세 정도도 매우 낮은 실정이다. 그러나 케이블의 자체 발화 가능성이 매우 낮은 사실을 정당화 하기 위한 기술적인 근거를 마련하고, 케이블만 있는 화재구역에서의 화재발생빈도를 실제적으로 구하기 위한 개선된 방법론 개발이 필요하다.

## 2.4 화재 모델링

화재 구역 내 발생한 화재로 인해 케이블이 손상 받을 수 있는가의 여부를 정확하게 평가하기 위해서는 화재 모델링 입력 자료가 현실성을 반영해야 한다. 그러나 현재 입력 자료의 부족으로 인해 정확한 평가를 수행하지 못하고 있으므로 아래와 같은 연구를 통해서 이 문제점을 해결해야 한다. 케이블의 발화 가능성 및 열로 인한 케이블 손상 여부 결정에 필요한 실험 데이터의 수집, 열로 인한 기기의 손상 여부 결정에 필요

한 실험 데이터의 수집, 연기로 인한 기기의 손상 여부 결정에 필요한 실험 데이터의 수집 및 화재 위험도 평가에서 사용하고 있는 화재모델의 타당성 평가 등이다.

## 2.5 원전의 주요 화재사건 분석

발전소 안전에 중요한 영향을 미치는 화재사고가 미국을 포함한 각국의 원자력발전소에서 발생하였다<sup>5,6)</sup>. 그러나 위험도 평가에 사건 이력을 정확하게 반영하지 못하고 있으며, 이는 화재사건의 수만을 고려하고, 그 사건마다의 사건 내용을 상세하게 검토하지 못하기 때문이다. 따라서 심각한 화재사건 분석을 통하여 화재로 인한 발전소 안전정지 영향을 확인하고 통찰(Insight)을 얻기 위한 연구가 추진되고 있다.

## 2.6 일반 산업체의 화재사건 분석

원자력발전소에서 발생한 화재사건 중 보고되는 화재사건은 그리 많지 않다. 평균적으로 불 때 일년에 약 0.3회<sup>7)</sup> 정도의 발생률을 보이고 있으나, 발전소 안전에 영향을 미치는 화재사건의 발생률은 더욱 낮다. 따라서 원자력발전소와 유사한 기기와 공간을 지닌 일반 산업체에서의 화재사건을 검토하여 화재발생빈도 평가에 유용하게 사용하도록 하고 있다.

## 3.7 스위치기어실 및 변압기 화재의 발생 빈도와 특성 분석

모터 제어반을 포함한 전기 스위치기어실에서의 화재와 변압기 화재는 발전소 안전에 큰 영향이 있는 것으로 나타난다. 그러나 스위치 기어실 및 변압기 화재는 스위치기어실과 변압기 화재를 어떻게 모델링 하느냐에 따라 그 결과가 매우 달라지게 되므로 일관된 모델링을 수행할 수 있는 방법론 개발에 초점을 맞추어 모델링 정도에 따른 불확실성을 줄여야 한다.

## 2.8 화재 방호체의 신뢰도 분석

현재 화재 위험도 평가시 구역 화재 방호체(Fire Barrier)에 대한 처리가 각기 다르며, 이는 각기 다른 접근 방법에 기인한다고 할 수 있다. 따라서 화재 방호체의 건전성 문제를 일관성 있게 처리하기 위해서 화재 댐퍼, 방화문 및 관통부 밀봉재 등의 고장 확률을 예측하고 화재 조건하에서 구역 화재 방호체의 성능을 예측할 수 있는 모델을 개발하고 있다.

## 2.9 불확실성 분석

일반적으로 모델 변수의 불확실성 때문에 발생하는 모델 결과에서의 불확실성은 이미 잘 알려져 있으며 많은 상황에서 분석되었다. 반대로 모델 불확실성을 예측하는 방법은 현재 정립되지 않은 상태이다. 따라서 변수 불확실성의 수준 정도로 모델 불확실성을 평가하기 위한 다양한 방법론을 평가하여 두 개의 불확실성이 공존할 경우 평가 가능한 평가 방법론의 체계를 구축하고, 두 개의 불확실성이 공존할 경우 구축된 체계를 어떻게 현존하고 있는 문제에 적용할 것인가를 해결해야 한다.

## 2.10 화재발생빈도 분석

화재 위험도 분석에서 상당히 많은 불확실성을 내포하고 있는 분야가 바로 화재 발생빈도이다. 이러한 이유 때문에 불확실성을 줄이고자 하는 연구가 현재 진행 중이다. FIVE 방법론<sup>8)</sup>과 같이 기기 단위의 화재발생빈도를 산출하고 각 화재 시나리오별로 화재심각도를 판단하는 노력이 계속 되어 왔으며, 또한 화재 시나리오의 발생빈도를 정의하고, 특성화하고, 정량화하는 실제적이고 개선된 방법론을 개발하기 위한 가능성을 타진하기 위한 연구가 필요하다.

## 2.11 화재심각도의 사용 문제

화재심각도와 관련해서 심각도 비율은 주어진 화재구역에서 화재 발생시 짧은 시간 내에 중대한 영향을 미칠 수 있는 가능성을 가진 화재의 비율을 의미하며, 화재사건 경험 기록을 통해 산정한다<sup>9)</sup>. 최근 화재심각도 결정에 관해서는 우선 화재심각도를 결정하기 위해 사용된 사건에 대한 설명이 상세하지 못하며, 대형 화재 및 임시 연료 화재에 대한 기록의 부족 등이 문제화 되고 있다.

## 2.12 주제어실 화재 분석

주제어실에서 심각한 화재가 발생하여 운전원은 주제어실에서 철수하고 한 개 이상의 원격정지 제어반(remote shutdown panel)에서 발전소 정지를 해야 할 경우, 주제어실 화재사건에 대한 상세 분석은 원격정지 제어반의 전기적인 종속성 문제, 주제어실에서 원격정지 제어반으로의 운전 전환 전에 운전 전환 장치의 고장, 원격정지 제어반에서 안전정지 조치를 하기 전에 기기의 오작동, 주제어실 설계시 또는 계통 배열상에서 고려되지 않는 과도사건을 유발할 수 있는 오작동 신호로 인한 기기 손상 등을 고려하여야 한다. 또한 주제어실 화재 진압을 위한 운전원 행위 및 화재 진압 후 발전소 안전정지를 위한 행위 등의 성공 여부를 결정하기 노력이 부족한 실정이다. 따라서 심각한 주제어실의 화재 발생 가능성 및 결과 등을 예측할 수 있는 PSA를 수행하기 위해서는 좀 더 개선된 분석 기법이 필요하다.

## 2.13 화재모델의 한계점 분석

화재 위험도 평가시 화재로 인해 변화되는 상황을 정확하게 나타내기 위해서는 발전소 안전에 영향을 미치는 중요한 기기의 주변에서의 시간별 온도 및 열량 변화를 모사할 수 있는 화재 모델링 코드를 사용해야 한다. 그러나 기존 화재 모델링 코드는 화재의 성장 및 전파를 모사하는데 문제점을 지니고 있다. 따라서 현재 화재 위험도 평가시 사용되고 있는 화재 모델 그리고 앞으로 사용될 화재모델이 가지고 있는 불확실성 및 한계점을 확인하여야 한다.

## 2.14 터빈빌딩 화재의 중요성 분석

이제까지 터빈 빌딩에서 발생한 화재사건과 발전소별 외부사건 안전성 평가(IPEEE)의 결과에 의하면 터빈빌딩 화재가 원전의 안전성에 큰 영향을 미치는 것으로 나타났으나, 현 화재 위험도 평가 방법론의 부적절성 등으로 인해 많은 불확실성을 지니고 있다. 따라서 터빈빌딩 화재의 화재 위험도 평가를 위한 기술적인 근거 및 기초를 마련하고, 터빈빌딩의 화재가 발전소 안전에 미치는 영향을 평가하며, 화재 위험도 평가 방법론의 개선점을 찾아내야 한다.

### 2.15 관통부 밀봉재 검사 순위 결정

발전소 안전에 중대한 영향을 미치는 관통부 밀봉재의 건전성 확보에 대해서 위험도 정보를 활용하자는 의견이 제시되었다<sup>10)</sup>. 따라서 현재의 화재 위험도 평가 방법과 데이터가 밀봉재 검사의 우선 순위를 확실하게 결정할 수 있는가를 먼저 파악하고, 밀봉재 검사의 우선 순위를 위험도 정보를 활용하여 순위 매김을 할 수 있는 방법론을 개발하여야 한다.

### 2.16 다중호기에 미치는 화재사건 분석

많은 발전소별 외부사건 안전성 평가(IPEEE)로부터 다중호기가 위치한 지역에서 임시 점화원에 의한 단일화재가 다중호기의 안전에 중대한 영향을 미친다는 사실을 알 수 있었다. 따라서 단일 또는 심각한 화재가 발생하여 다중호기에 동시에 영향을 미칠 수 있는 가능성을 분석하여야 한다.

상기 분야 중 국내에서 연구해야 할 분야는 화재 모델링 코드를 사용한 화재 발생 구역 내 케이블의 기능 상실 여부 결정, 주제어실 및 터빈빌딩의 화재분석 등이다. 따라서 세계적으로 많이 사용되고 있는 화재 모델링 코드를 파악하여 각 코드의 장단점 등을 비교 분석 중이며, 이 결과를 토대로 화재사건 분석에 선정된 코드를 사용할 계획이다.

## 3. 화재 PSA 방법론과 불확실성

위험도 정보 활용 의사결정 체계에서 화재 PSA는 화재 방호 논쟁점의 중요성을 평가하는데 체계적이고 통합된 방법을 제공한다. 그러나 상기 기술된 바와 같이 주요 논쟁점(예:화재 성장, 화재로 인한 기기의 피해 정도 및 운전원 수행 정도)에 대한 실험 데이터 또는 입증된 모델이 부족한 관계로 현재 화재 PSA 결과는 상당한 불확실성을 포함하고 있다. 최근 연구 결과를 보면 주요 논쟁점에 대해서 올바른 또는 최적의 모델링 접근 문제가 의견 통일을 하지 못하고 있으므로 이런 환경에서의 모델링 가정사항의 차이는 화재로 인한 노심손상빈도(Core Damage Frequency : CDF) 결과 또한 상당한 변화를 나타내며, 정성적으로도 각기 다른 통찰(Insight)을 가지게 된다. 의견 통일을 하지 못하는 주요 논쟁점은 화재 심각도(Severity Factors)의 사용 문제 그리고 심각한 화재 사고 시에 주제어실 철수 문제 등이다. 상기 사항들이 노심손상빈도에 미치는 영향을 이해하는 일은 CDF 결과만큼 중요할 수 있다. 그러한 불확실성에 대한

이해가 부족한 상황에서 의사 결정론자가 화재 PSA 결과를 이용하는 것은 분명히 악영향을 미칠 가능성이 있다.

화재 PSA 결과의 불확실성은 모두 분석 방법론에 기인한다고 할 수는 없다. 현재 모든 원자력 발전소의 화재 PSA에서는 일반적인 분석 방법론을 사용하거나 그와 약간 상이한 방법론을 사용하고 있다. 오히려 이러한 불확실성의 원인은 화재 사고경위의 일부 상황에 대한 현재 지식 수준 정도의 취약함과 의견 차이 때문이다. 화재 PSA 결과의 주요 불확실성 근원은 중요 화재 사고경위의 발생빈도, 화재 성장과 진압에 대한 모델링, 화재로 인한 계통의 기능 상실 및 화재 시 발전소 상태 변화와 운전원의 행위 예측 등에서 주로 발생한다.

또한 모든 화재 PSA에서 현재의 기술 수준을 모두 수용하는 것이 아니기 때문에 다른 불확실성도 발생한다. 많은 경우에 보수적인 모델이 사용되고 있으며, 그 보수성 정도도 명확하지 않다. 따라서 분석 결과를 사용하고자 하는 결정론자는 이러한 점들을 해결해야 한다고 문제 제기하고 있다.

화재 PSA의 현재 기술 수준에서의 취약점과 의견 차이를 해결하기 위해서는 연구와 개발이 필수적이다. 많은 국가에서 이런 분야에 대한 의미 있는 연구 활동이 진행이며, NRC 등을 중심으로 화재 연구 프로그램을 수행 중이다. 이 결과는 향후 화재 PSA 방법의 개선에 많은 기여를 할 것으로 기대된다. 예를 들면 프랑스 Institute for Radiological Protection and Nuclear Safety(IRSIN)에서는 화재로 인한 전기 케이블의 손상에 관한 실제 화재 실험을 수행하였으며, 전기 캐비닛과 관련한 화재실험 그리고 한 화재구역에서 이웃 화재구역으로의 화재 전파와 관련한 화재 실험 등을 수행 중이다. 이러한 화재 실험의 수행 목적은 화재 PSA 결과에 중요한 기여를 하는 상기 화재 사고경위의 불확실성을 줄이기 위함이다. 따라서 이러한 정보 근거가 구축되면서 모델은 좀 더 현실성 있게 될 것이며, 불확실성은 줄어들 것이다. 이러한 정보 근거를 더욱 더 확고하게 하기 위해서 OECD에서는 2000년 12월 부터 OECD Fire Incident Records Exchange(OECD-FIRE) 프로젝트를 수행 중에 있다.

원자력발전소의 성능기반 화재방호 기준이 NFPA (National Fire Protection Association)에서 개발되었다. NFPA 805코드<sup>11)</sup>에서는 화재 PSA 방법론의 적용 및 화재 모델링 코드의 사용 등에 대해서 언급하고 있으며, 현재 ANS (American Nuclear Society)에서 위험도 정보 활용에 필요한 화재 PSA 모델의 표준화에 대해서 구체적으로 체계화하고 있는 실정이다.

#### 4. 화재 PSA 적용

상업용 원자로에 대해서 최초로 상세하게 화재 PSA를 수행한 것은 1981년 Zion 그리고 1982년 Indian Points 원전의 PSA이다. 그 이후 많은 화재 PSA가 수행되었으며, 최근 여러 형태의 원자로에 대하여 화재 PSA를 수행하였다. 화재 PSA 방법론의 개선으로 화재 성장, 진압 및 계통에 미치는 영향 등을 고려하여 PSA 수행 초창기보다

좀 더 상세한 모델링이 가능해졌으며, 화재 PSA를 수행함으로써 발전소 특유의 취약성 및 개선안 등을 찾을 수 있게 되었다. 이와 같이 많은 국가에서 현재 운전 중인 발전소에 대해 화재 PSA를 수행하고 있으며, 이는 결정론적인 안전 분석의 추가 결과물로써 이용되고 있다. 많은 수행 결과에 의하면 화재는 발전소 안전에 중대한 영향을 미치는 주요 인자이며, 평가 결과로부터 위험도를 감소시킬 수 있는 설계상의 또는 운전상의 개선점 등을 확인할 수 있었다. 현재 화재 PSA를 수행한 후 그 결과를 응용할 수 있는 분야는 다음과 같다.

- 운전 중인 발전소에 대한 위험도 기반 배열 관리
- 발전소 직원 훈련
- 개량형 원자로 설계 개선
- 일반적인 화재방호 논쟁사항 확인 및 우선 순위 선정
- 중요 검사구역 검사 활동
- 규제 측면에서의 효율성 분석
- 연구 및 개발 측면에서의 우선 순위 선정

PSA 결과가 의사결정을 하는데 확실하게 보조할 수 있을 정도의 수준이 된다 하더라도 의사 결정자는 의사 결정시 PSA 결과 한 가지만으로 의사결정을 하지는 않는다. 즉, 일반적으로 다른 엔지니어링 분석과 함께 다른 정보 등을 사용하여 최종적인 의사결정을 수행하게 된다. 따라서 의사 결정 과정은 다른 말로 표현하자면 위험도 기반(Risk-based)이 아닌 위험도 정보(Risk-informed) 활용이라 할 수 있다. 위험도 정보 활용 하에서 의사 결정자는 PSA 결과와 이를 통한 통찰(Insight)을 사용함으로써 위험도 정보 활용을 하지 않는 분야에 대해서 개선할 수 있다면 PSA 모델이 불완전하더라도 또한 법적으로 유효하지 않더라도 그 결과를 사용할 수 있을 것이다.

#### 4. 결 론

화재 PSA는 원자력발전소에서 화재 안전을 입증할 필요가 있을 경우 해결해야 할 복잡한 논쟁점을 다루는데 효과적이면서도 체계적인 방법이다. 또한 화재 PSA는 화재 위험도와 관련한 발전소의 설계 및 운전상의 강점과 약점을 조망하기 때문에 결정론적 분석에 근거하는 원자로 설계와 화재 방호 등을 지원하는 유용한 방법이다. 현재까지 화재 PSA는 설계, 운전 및 규제 측면에서의 의사 결정 등을 지원하는데 유용하였으며, 앞으로 더더욱 지원 분야는 증가할 것이다. 이와 같은 화재 PSA 방법을 타 산업 분야에 적용할 때도 그 결과로부터 많은 유용한 개선 사항을 도출하는 것이 가능할 것으로 기대된다.

화재 PSA의 결과 및 이를 통한 통찰(Insight)은 의사 결정을 하는데 완전한 기술적인 근거라 하기 보다는 위험도 정보를 활용한 의사 결정 과정의 일부로서 사용되어야

하며, 화재 PSA 결과의 적용 분야와 적용 정도는 PSA에서 사용된 모델의 정확성과 타당성에 좌우된다고 할 수 있다. 따라서 화재 PSA의 유용성은 상기에서 설명한 바와 같이 많은 분야의 연구와 개발을 통해 현재 기술 수준을 증진시킬 것이며, 그에 따라 더 일관성 있는 결과를 낳게 될 것으로 판단한다. 또한 현재 중장기 연구에서 추진되고 있는 사항인 화재 모델링코드를 사용한 화재구역 내 케이블의 건전성 여부 확인 등의 연구를 통해서 국내 화재 PSA의 점진적인 발전을 기대할 수 있으리라 사료된다.

## 감사의 글

본 연구는 과학기술부의 원자력중장기연구개발사업의 지원으로 수행되었습니다.

## 참고문헌

1. Proceedings from International Workshop on Fire Risk Assessment, NEA, 1999
2. Fire PRA Implementation Guide, EPRI, 1995
3. "화재사건 분석 방법론에 대한 최근 연구 동향 분석", 이윤환 외, KAERI/AR-673/2003, 한국원자력연구소, 2003
4. S.P. Nowlen, A Summary of Nuclear Power Plant Fire Safety Research at Sandia National Laboratories, 1975-1987, NUREG/CR-5384, 1989
5. U.S. Nuclear Regulatory Commission, Recommendations Related to Browns Ferry Fire, NUREG-0050, 1976
6. S.A. Bohra, The Naroa Fire and its Continuing Consequences: Backfitting the Indian PHWRs, Proceedings of Fire & Safety 1997: Fire Protection and Prevention in Nuclear Facilities, London, 1997
7. J.R. Houghton, Special Study: Fire Events-Feedback of U.S. Operating Experience, AEOD/S97-03, U.S. NRC 1997
8. Professional Loss Control, Inc., Fire-Induced Vulnerability Evaluation (FIVE), EPRI, TR-100370, 1992
9. "화재사건 분석 절차서", 이윤환 외, KAERI/TR-2345/2002, 한국원자력연구소, 2002
10. U.S. NRC, Memorandum from the Advisory Committee on Reactor Safeguards to Shirley Ann Jackson, Chairman, U.S. NRC, Draft Supplement 1 to NUREG-1552, Fire Barrier Penetration Seals in Nuclear Power Plants, 1998
11. Performance-Based Standard for Fire Protection for Light Water Reactor Electric Generating Plants, National Fire Protection Association, 2001