

1. 서론

원자력발전소(이하 “원전”으로 표기)의 화재방호 기반은 심층화재방어(Defense-in-Depth) 철학에서 비롯된다. 철학이라는 용어의 의미는 1975년 3월 미국의 Browns Ferry 원전 화재사고 이후 원전의 특수성을 고려하여 화재로 인한 원자력안전 및 방사성물질의 피해가 없도록 설계기준과 관리방법을 강화하여 원칙을 벗어나지 않겠다는 의지의 표현이다.

원전의 심층화재방어는 첫째, 화재를 사전에 예방

화재방호는 인명안전과 재산보호에 가장 비중을 두지만 원전의 경우 원자로의 안전한 정지와 방사성물질의 외부 누출을 최소화하기 위한 전략에 초점을 둔다.

원전에서는 화재방호를 위하여 정성적 접근으로서 화재의 발생원인을 줄이기 위한 화재위험도분석(FHA¹⁾)과 화재시 원전의 안전한 정지를 확보하기 위한 안전정지능력분석(SSA²⁾)을 수행한다. 이러한 대책에도 불구하고 화재가 발생할 경우 그 영향을 최소화하고 피해범위를 제한하여 공공의 피해를 최소화하기 위한 정량적 분석으로서 화재로 인한 확률론적 안

원자력발전소의 정성적 및 정량적 화재방호 분석방법



지문학 >>

한전 전력연구원 책임연구원
소방설비기술사, 건축기계설비기술사

(Prevention)하고 둘째, 최대한 빠른 시간에 화재를 감지하여 진압(Prevention)하며 셋째, 피할 수 없는 화재 일지라도 그것으로 인한 영향을 최소화(Mitigation)하는 것을 기본으로 한다. 이러한 개념은 일반 산업체의 화재방호개념과 크게 다르지 않지만 적용기준과 설계방법에서 많은 차이를 볼 수 있다. 일반 산업체의 경우

진성분석(Fire-PSA³⁾)을 수행하여 가상화재로 인한 외부의 피해를 최소화하기 위하여 문제점을 사전에 해결한다.

그림 1에서 표시된 바와 같이 화재위험도분석은 화재예방, 화재진압 및 화재로 인한 영향의 최소화에 목표를 두며 안전정지능력분석은 원자로를 안전하게

1) Fire Hazard Analysis

2) Safe Shutdown Analysis

3) Fire Probabilistic Safety Analysis

정지하고 안전상태를 계속적으로 유지하기 위한 안전 정지 기능의 확보에 주안점을 둔다.

화재로 인한 확률론적 안전성분석은 위에서 설명한 화재위험도 및 안전정지능력을 확보하였음에도 불구하고 화재가 발생할 경우 원자로 노심의 안전한 상태를 유지할 수 없는 상태를 가정한 가상사고로 인한 노심손상의 가능성을 정량적으로 분석하여 노심손상 빈도(CDF⁴⁾)라는 값으로 관리하는 원전 화재방호 분석기술로서 일반 산업체에서 볼 수 없는 특수한 접근 방법이다.

2. 원전 화재방호 접근 방법

원전의 화재방호 규정은 기본설계기준과 상세설계 기준으로 구분할 수 있다. 정립된 개념을 기준한 기본설계기준은 원전 설계국가의 화재방호규정과 기술 기준을 기반으로 하며 상세설계기준은 개념설계를 바탕으로 심층화재방어기준 및 행정관리 등 국내외의 제반 기술기준을 적용한 실질적인 설계로서 그 접근 방법 및 설계 결과는 원전의 예비안전성분석보고서(PSAR⁵) 및 최종안전성분석보고서(FSAR⁶)에 명시하여 발전소 수명기간동안 관리된다.

2.1 미국 원전의 화재방호 규정

미국 원전의 상업운전 이후 보고된 다수의 화재사고 분석자료에 의하면 원전별 다양한 화재가 발생하였으나 Browns Ferry 원전 1호기에서 발생한 사고는 원전 화재방호규정의 대대적인 변화를 요구하는 시발점이 되었다. 1975년 3월 22일 원자로 건물과 보조건물을 관통하는 부위에 설치된 가연성 폴리우레탄 폼, 밀봉재

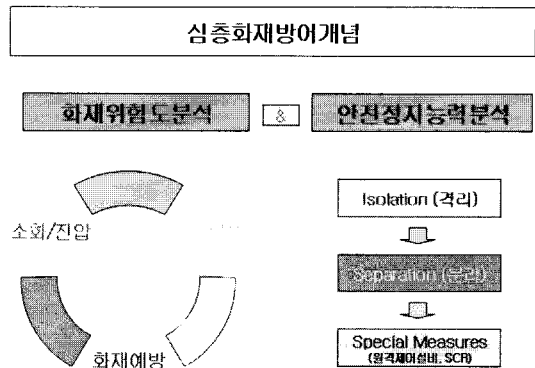


그림 1. 원전의 심층화재방어 개념

에서 시작된 화재는 케이블의 절연물에 인화되면서 약 7시간 연소가 지속되었다. 화재가 발생한 이후 원자로의 핵분열은 안전장치의 동작에 의하여 즉시 차단되었다. 반면, 노심의 잔열을 제거하여 저온 정지상태를 유지하기 위한 기능을 수행하는 기기의 전력 및 제어용 케이블이 손상되었으며 약 3시간에 걸친 비상복구작업에 의하여 저온정지기능이 확보되었다. 이 화재에서 약 1,600개의 케이블이 손상되었으며 이중 약 630여개의 안전정지관련 케이블도 함께 손상되어 원자로 저온정지기능 및 제어변수의 감시기능이 상실되었다.

이러한 심각한 화재사고에도 불구하고 원자로로는 안전한 상태로 유지되었으며 격납건물 외부로 방사성 물질은 누출되지 않았다. 화재사고 분석보고서에 따르면 이렇게 사고가 완화될 수 있었던 주요 배경은 원전의 기본 설계개념인 독립성, 다양성, 다중성 기능이 본래의 능력을 발휘한 것으로 해석된다. 반면, 종합보고서 결론에서 미국 원전의 화재방호 일반설계기준을 이행하기 위한 지침을 개발하고 운전중인 원전에 대하여 화재방호 프로그램을 수행토록 심도깊은 권고안이 제시되었으며 이후 미국 원전 정책의 규제기관인 NRC⁷에 의하여 원전고유의 특성을 고려한 포괄적인

4) Core Damage Frequency

5) Preliminary Safety Analysis Report

6) Final Safety Analysis Report

7) Nuclear Regulatory Commission

화재방호 규정²⁾이 제정되어 적용되어 왔다.

원전의 화재방호 설계를 위한 가장 기본적인 규정은 10CFR⁸⁾50 부록 A의 일반설계기준³⁾(GDC⁹⁾-3)이다. 본 규정에 따르면 원전의 안전에 중요한 구조물, 계통, 기기들은 화재 또는 폭발을 방지할 수 있도록 설계되어야 하며, 각 방화지역에는 불연성 또는 내열성 물질을 사용하여야 하고, 화재감지설비와 소화설비를 설치하여야 하며, 소화에 의한 피해가 없도록 설계되어야 한다고 명시하고 있다.

Browns Ferry 화재사고 이후 미국의 NRC에서는 정성적 규범에 바탕을 둔 결정론적 규정과 기술지침⁴⁾을 다수 발행하였다. 이러한 규범적 기준은 2000년 초반까지 원전 화재방호규정의 주류를 이루면서 원전

에 적용되어왔다. 이러한 규범적 규정의 일부를 표 1에 예시하였다.

상기와 같은 결정론적 규정은 화재의 위험성을 평가할 때 1980년대 초기의 기술적 수준에 기반을 둔 것이며 당시 과학적으로 충분히 입증되지 않은 제반 기본요소의 불확실성을 고려하여 매우 보수적인 요건을 담고 있다. 이러한 흐름에 반하여 1990년대 후반부터 원전고유의 정량적 위험도와 성능기준의 화재방호 기술기준들이 다양하게 개발되었다. 특히 경수로 원전의 성능기반 화재방호기술기준인 NFPA¹⁰⁾-805⁵⁾가 2001년 제정된 이후 위험도 정보를 활용한 성능기반 화재방호 기술이 미국 규제기관에 의해 2004년 10CFR50.48을 개정하면서 위험도 정보를 활용한 성능기반(Risk-Informed and Performance-Based)의 기술을 적용할 수 있도록 관련 규정이 개정되었으며 추가적으로 표 2에서 제시된 다양한 신기술 기준이 개발되었다. 이에 따라 원전의 화재방호기술도 정성적인 결정론적 분석방법에서 정량적인 성능기반 기술을 적용할 수 있는 기반이 마련되었으며 오늘날 존모델 또는 전산유체역학(CFD) 화재모델링 및 성능기반의 화재위험 분석기술에 의해 보다 합리적이고 과학적인 분석기술⁶⁾을 활용할 수 있게 되었다.

표 1. 규범적 화재방호규정 또는 지침(예시)

일자	기관	기준/규정	제목/내용
'71.02	NRC	10CFR50.App.A	일반설계기준(GDC)
'76.02	NRC	NUREG-0050	Browns Ferry 사고
'80.11	NRC	10CFR50.App.R	일반설계기준 구체화
'80.11	NRC	10CFR50.48	발전소 적용규정
'76.05	NRC	APCSB 9.5-1	규제기관 기술지침
'81.07	NRC	CMEB 9.5-1	규제기관 기술지침
'82.03	NRC	GL 81-12	규제지침(화재방호)
'86.04	NRC	GL 86-10	규제지침(IPE)
'88.07	NRC	GL 88-12	규제지침(T.S. 관련)
'03.10	NRC	SPLB 9.5-1	규제기관 기술지침
'04.11	NRC	NUREG-1805	결정론적화재위험분석

2.2 국내 원전의 화재방호 규정

국내 원전은 미국, 프랑스, 캐나다의 기술진에 의하여 원자로가 설계되었으며 설계국의 고유 기술기준이 적용되었다. 국내의 대부분 경수로 원전의 경우 미국의 화재방호 규정과 기술기준인 10CFR50 관련 규정 및 NFPA가 적용되었으며 중수로 원전인 월성 1,2발전소의 경우 캐나다 기술기준이 적용되었다. 울진 1호기는 프랑스의 프라마토름사가 설계하여 프랑스 기술기준을 적용하고 있다. 이러한 특성으로 인하여

표 2. 미국의 최신 화재방호규정 또는 지침(일부)

일자	기관	기준/규정	제목/내용
'01.03	NFPA	NFPA-805	성능기반 기술기준
'01.04	NRC	R.G. 1.189	종합 원전규제기준
'02.05	NEI	NEI 02-02	성능기반기술의 접근
'02.07	NRC	R.G. 1.174	RI&PB 기술의 접근
'04.06	NRC	10CFR50.48(c)	NFPA-805 법적수용
'04.10	EPRI	NUREG/CR-6850	Fire-PSA 방법론
'05.05	NEI	NEI 04-02	10CFR50.48이행지침

8) Code of Federal Regulations

9) General Design Guide

10) Nation Fire Protection Association

국내 원전의 화재방호 규정 및 기술기준은 설계사에서 적용한 화재방호규정과 기술기준을 따르지만 가장 우선시 되는 법률과 규정은 국내법에 따르는 것을 원칙으로 한다.

이러한 원칙에 따라 소방법은 국내의 소방기본법, 시행령과 시행규칙 및 국가화재안전기준(NFSC¹¹⁾)을 적용하며 원자력 관련규정은 원자력법과 원자력시설에 관한 기술기준 및 과학기술부 고시를 적용하고 있다. 이러한 법체제의 운영으로 인하여 해외 규정에 따라 설계되어 관리되고 있는 화재방호설비와 운영규정이 국내의 규정과 일치하지 않는 경우가 종종 발생하는바 이러한 문제점도 향후 해결해야할 숙제로 남아있다.

최근 과학기술부에서는 원전의 화재방호 기술기준과 관련된 고시 2002-05, 2003-19, 2003-20, 2005-31호를 발행하여 향후 원전 화재방호 적용기술 및 방법론의 방향을 제시하고 있다. 이들 고시에 대한 주요 내용은 다음과 같다.

- 고시 2002-5호(2002.01.01) : 발전용원자로시설의 최초 주기적안전성평가(PSR¹²⁾) 시기에 관한 규정
 - 각 원전의 발전소별 최초임계일 또는 운영허가일을 명시
 - 최초임계일 또는 운영허가일을 기준하여 10년이 경과한 원전의 경우 주기적안전성평가 보고서를 작성하여 제출토록 명시함
 - 본 주기적안전성평가보고서에는 원전의 화재방호 적용규정과 기술기준을 검토하고 화재방호설비 및 운영방법에 대한 평가를 수행하여야 함
- 고시 2003-19호(2003.11.17) : 화재방호계획의 수립 및 이행에 관한 규정
 - 원전의 화재방호 관련조직의 책임과 권한 및 화재예방을 위한 운영절차의 수립

- 화재진압을 위한 운영절차, 안전정지 운영절차 및 초동소방대 교육과 훈련에 관한 규정을 명시함
- 상기 규정에 따라 각 원전은 화재방호계획서를 수립하여 운영하여야 하며 매 10년 주기로 적합성을 검토하고 개정하여야 함

- 고시 2003-20호(2003.11.17) : 화재위험도분석에 관한 기술기준
 - 원전의 화재방호구역 구분 및 가연성물질의 종류와 크기에 관한 규정
 - 설계기준 화재의 범주, 화재감지 및 진압설비에 대한 규정
 - 화재위험성평가 및 안전정지능력 분석을 요구함
 - 상기와 같은 기준에 따라 건설허가 또는 운영허가신청 원전은 본 규정에 따라야 함
- 고시 2005-31호(2005.12.01) : 설계수명이 만료되는 원자로시설의 계속운전 평가를 위한 기술기준 적용에 관한 지침
 - 계속운전을 위한 원전에 적용되는 규정으로 원전의 화재방호평가는 제7조의 운전경험 및 연구결과를 반영하여 필요한 사항을 평가하여야 함
 - 본 지침에 따르면 계속운전을 계획하는 발전소는 화재방호계획 및 화재위험도 분석을 수행하여야 함

3. 정성적 및 정량적 화재위험 분석

원전의 화재방호를 위한 기본적인 분석기술은 화재위험도분석, 안전정지능력분석 및 화재로 인한 확률론적 안전성분석으로 대별될 수 있으며 이의 목적은 원자로 안전 및 공공 보호이다. 이러한 접근방법은 일반 산업계에서 적용하는 분석방법과 비교하여

11) National Fire Safety Code

12) Periodic Safety Review

상당한 차이를 보이는 바에 이들에 대한 기본 개념과 분석방법은 다음과 같이 요약할 수 있다.

3.1 화재위험도 분석(FHA)

원전의 방화지역은 호기별 약 150 내지 180 개소로 구분된다. 이들 방화지역에 대하여 아래와 같은 목적과 방법에 의하여 화재위험을 분석하고 평가한다.

- 화재위험도 분석 목적
 - 방화지역에서의 화재발생시 이로 인한 피해의 가능성 확인
 - 방화지역과 인접한 지역으로 화재가 확대할 수 있는 가능성 확인
 - 안전에 중요한 구조물, 계통, 기기의 존재여부, 화재로 인한 손상 또는 기능상실 가능성
 - 소화설비의 설치상태 및 화재발생시 진압능력 확인
 - 방화지역의 격리(Isolation), 구역제한(Confinement), 보호(Protection) 능력의 검증 및 불만족시 조치사항을 제시하기 위함
- 화재위험도 분석의 주요 항목 및 대상
 - 가연성물질, 점화원, 연소형태, 규모 등
 - 화재구역의 물리적 구역, 점화원과 보호대상물의 좌표상 위치
 - 화재시나리오의 선정 및 조건
 - 가상화재 예측 및 이의 타당성 검토

- 설계기준화재의 선정 및 표준화
- 연소 지속시간의 선정 등
- 상세 분석 내용(NFPA-804 기준)
 - 건물과 기기의 물리적 구조 및 배치, 방화지역과 방벽의 내화등급
 - 방화지역 또는 구역내부의 주요가연물량
 - 경보계통, 수동 및 자동 소화설비를 포함한 기기
 - 안전정지 기기 및 이들 기기들을 위한 케이블 및 배관계통
 - 각 방화지역별 가상화재분석 및 자동 또는 수동 소화설비가 작동하지 않는 경우를 가정한 상태의 안전정지 기기에 미치는 영향
 - 자동 또는 수동 소화설비가 작동하는 것을 고려한 상태에서 인명안전, 방사성물질 배출, 운전장해, 재산손실에 미치는 영향 분석
 - 지진, 폭풍, 홍수와 같은 재해가 화재방호에 미치는 잠재적 영향
 - 방사성물질 배출과 운전기능 저하와 같이 안전정지와 관련되지 않는 기타 문제를 유발할 수 있는 화재의 잠재적 발생가능성과 영향
 - 화재후 복구 가능성 분석
 - 효과적인 손실 관리에 필요한 비상계획 및 대외기관 협조사항 분석
 - 소방시설의 오동작, 파단 등으로부터 안전성 관련계통 및 기기를 방호하기 위한 분석
 - 연기가 각 구역의 안전성 및 운전에 미칠 수 있는 영향 및 연기제어 방법 분석 등

표 3. 정성적 및 정량적 분석 구분

구분	화재위험 분석
정성적	<ul style="list-style-type: none"> • 법규, 규정 등의 결정론적 요건에 충실 • 화재구역내의 가연성물질, 점화원, 발화조건 등에 대하여 현상 그대로 분석 • 화재구역별 가장 보수적인 조건에서 화재발생을 가정하여 방화지역내의 관련기능을 상실된다고 판단
정량적	<ul style="list-style-type: none"> • 위험도 측면에서 원자로안전, 심층방어개념, 안전여유도 등 기본적 요구사항을 반영 • 성능기반 측면에서 화재구역의 특성과 조건을 고려하여 화재로 인한 실질적 영향을 평가함

3.2 안전정지능력분석(SSA)

원전에서 화재가 발생할 경우 안전정지능력의 확보는 심층화재방어 기능을 기반한 가장 핵심적인 요건이다. 원전의 안전정지능력이란 사고시 원자로의 핵분열을 즉시 차단하고 핵분열이 차단된 이후 붕괴열 및 잔열을 제거할 수 있는 냉각능력을 확보하며 그러한 상태를 감시하고 제어변수를 확인할 수 있는 기능을 확보하는 것이다. 이러한 과정은 원자로의 온

도, 압력 및 핵분열 반응도를 주요변수로 구분하며 출력운전의 정지에 이어 고온정지 및 저온정지상태로 이행되면서 원자로를 안전한 상태로 유지한다.

이에 대한 상세한 기능과 제어변수들을 본 지면에서 일일이 열거할 수 없지만 고온정지의 기본적인 관리 항목은 원자로의 반응도 제어, 원자로 냉각재의 보유, 잔열제거기능 확보 및 각종 변수의 감시용 계측기능을 확보하는 것이며 저온정지의 기본적 요구사항은 고온정지에 이어 원자로냉각재 계통의 압력을 일정 이하로 낮추고, 원자로의 잔열을 지속적으로 제거하기 위한 냉각능력을 갖추며, 제2차 냉각원과 필수전원의 확보 등을 들 수 있다.

화재가 발생한 상태에서도 이러한 기능은 당연히 확보되어야 하며, 원전의 어떤 구역에서 화재가 발생하여 안전정지기능이 상실되더라도 다중성 개념에 의하여 다른 구역에서 안전정지기능을 수행할 수 있도록 원전화재방호규정은 이를 엄격히 요구한다. 이러한 요건을 요구하는 기본규정은 10CFR50 Appendix R로서 여기에 규정된 안전정지 요구사항을 요약하면 다음과 같다.

• 10CFR50 App. R Sec. III G

1) 안전정지를 위한 구조물, 계통 기기 등에 대한 특별 요건

a. 내용 : 고온정지 도달 및 상태 유지를 위하여 한 계열은 화재로 인한 피해나 손상이 없을 것

b. 내용 : 저온정지 도달 및 상태 유지를 위하여 계통의 보수 시간을 제한(72시간)

- 저온정지의 반응도 조건 도달 및 지속적 반응도 제어기능 확보
- 원자로 냉각재 보충 기능
- 잔열제거기능
- 공정감시기능 및 기타 보조기능(기기냉각, 유회 등)

2) 고온정지 도달 및 유지를 위한 케이블, 기기, 및 비안전 관련회로가 동일 화재방호구역에 위치한 경우 한 계열을 화재의 영향으로부터 안전하

게 유지하기 위한 요건

a. 원자로 격납건물 외부 지역인 경우

- 3시간의 내화벽으로 격리하여 한 계열의 안전을 확보, 또는
- 20feet의 거리를 유지하고 화재탐지 및 자동소화설비를 설치, 또는
- 1시간의 내화벽으로 격리하고 또한 화재탐지 및 자동소화설비를 설치

b. 비활성화 상태가 아닌 원자로 격납건물 내부의 경우

- 상기 a의 조건을 충족, 또는
- 20feet의 거리를 유지, 또는
- 화재탐지 및 자동소화설비를 설치, 또는
- 불연성 복사에너지 차폐체로 분리

3) 대체정지 또는 독립적 안전정지기능

a. III G2의 고온정지에 필요한 조건이 충족되지 않을 경우

b. 소화설비동작에 의하여 동일 화재방호구역 다중계열 영향을 받을 우려

• 10CFR60 App.R SEC. III L

1) 대체 또는 독립적 안전정지능력 요구사항

a. 원자로 상태를 미입계반응도 상태 만들고 이를 유지할 수 있을 것

b. 냉각재 유량을 유지할 있어야 한다.

c. 고온대기(Hot Standby) 상태 유지

d. 72시간 이내에 저온 정지상태에 도달한 다음 안전된 상태 유지

2) 구체적 요구사항

a. 구체적으로 어떠한 화재구역의 안전정지 능력은 각 구역별 독특한 방법을 적용할 수 있거나 모든 화재방호구역에 있는 계통들에 대하여 하나의 조합된 독특한 방법을 적용할 수 있음. 어느 경우이든 대체방법에 의한 정지능력(확보)은 특정한 하나의 화재방호구역에 독립적이어야 하며 소외전원을 이용할 수 있거나 소외전원이 72시간 동안 이용할 수 없는 화재의 경우에서도 화재가 발생한 이후의 상황(post

- fire condition)을 수용할 수 있어야 함.
- b. 화재로 인한 손상으로 저온정지가 불가능한 경우 저온정지가 가능할 때까지 고온대기상태를 유지할 수 있어야 함. 이러한 목적을 위한 기기 및 계통에 공급되는 소내 또는 소외 전원이 화재의 영향으로 공급될 수 없을 경우 독립적인 소내 전원계통이 제공되어야 함. 그러한 기기 및 계통들은 운전하는데 필요한 교대 운전원은 계속하여 발전소에 상주하여야 함.
 - c. 저온정지를 위한 기기 및 계통은 화재로 인한 영향이 없어야 함. 그렇지 못할 경우 그러한 기기 및 계통은 72시간 이내에 가동을 할 수 있고 저온정지에 도달할 수 있도록 화재의 영향을 제한할 수 있어야 함. 보수를 위한 자재들은 소내에서 손쉽게 이용할 수 있어야 하며 효과적으로 보수를 수행하기 위한 절차를 마

련하여야 함. 화재 발생후 72시간 이내에 사용되는 기기 및 계통들이 화재로 인하여 소외 전원을 공급받을 수 없을 경우 독립적 소내전원계통이 이용가능하여야 함. 72시간 이후의 시점에 사용되는 기기 및 계통들은 소외전원 단독의 전원을 공급받을 수 있음.

- d. 화재가 발생한 이후 정지능력 확보를 목적으로 설치된 정지계통들은 별도의 다른 사유 즉, 기존 안전계통과의 간섭이나 영향 또는 화재의 영향으로 부적절한 밸브의 동작 때문으로 필요한 경우가 아니면 내진 I 등급 기준, 단일 기능상실 요건 또는 다른 설계기준사고의 기준을 충족하도록 설계할 필요가 없음.
- e. 각 화재방호구역의 안전 정지 관련 기기 및 계통은 단락, 접지, 회로 개방에 의하여 안전 정지 기기의 작동에 지장을 일으키지 않도록 등 화재방호구역에서 비안전성 관련회로와 상호 분리되어있는지 확인하여야 함. 하나의 안전정지 부분에 속하는 관련회로를 수용하고 있는 트레이 또는 전선관에 대하여 다른 다중계열에 속하는 관련회로나 안전정지 케이블을 함께 수용하고 있는 트레이 또는 전선관은 계열간 상호 분리된 방벽이 있어서 가상의 화재가 발생하여도 안전정지에 지장을 일으키지 않아야 함. 또는 안전정지 기능을 위한 기기와 이들 관련회로를 상호 격리하여 이들 관련회로를 포함한 가상화재로 인하여 안전정지 기능에 지장을 일으키지 않도록 조치되어야 함.

표 4. 정성적 및 정량적 분석 구분

구분	안전정지능력 분석
정성적	<ul style="list-style-type: none"> • 결정론적 FHA에 바탕을 둠 • 안전정지를 위한 Train(A/B)의 Success Path 확보를 기준한 분석 • 물리적 배치 및 추가 요건의 만족여부에 따라 SSA 확보 여부를 결정
정량적	<ul style="list-style-type: none"> • Performance-Base의 FHA, SSA 결과를 이용함 • 실질적인 화재발생 가능성과 그 영향에 대하여 정량적 분석 • 성능기반 화재분석 프로그램의 활용

표 5. 정성적 및 정량적 접근 방법

구분	화재로 인한 확률론적안전성분석
정성적	<ul style="list-style-type: none"> • 화재구역별 선별방법(Screening Method 사용 : FIVE, COMPBRN IIIe 등 • Screening out 되지 않은 화재구역에 대하여 화재로 발생가능한 CDF를 계산 • 보수적인 CDF로 인하여 별도의 설비개선 필요
정량적	<ul style="list-style-type: none"> • Performance-Base의 FHA 및 SSA 결과를 이용하여 화재구역 선별과정을 거침 • 성능기반 화재분석 프로그램을 활용하여 실질적인 화재발생 가능성과 그 영향에 대하여 정량적 분석 : 존모델 또는 CFD 모델 이용

3.3 화재로 인한 확률론적안전성분석

화재로 인한 확률론적안전성분석은 화재지역에서의 안전정지기능이 상실될 경우에 대한 정성적 분석에 이어 안전정지기능이 확보되지 못할 경우 노심의 손상확률을 정량적으로 분석하는 방법이다. 이를 간단히 살펴보면, 방화지역에 대한 화재발생빈도를 계

산한 다음 조건부 노심손상확률(CCDP¹³⁾)를 곱하여 노심손상빈도를 계산할 수 있다.

- 대표지역의 점화원에 대한 화재발생빈도 계산
 - 대표지역 화재발생빈도 = 대표지역계수 × 점화원 계수 × 화재발생치로 표현됨
 - 예 : 케이블 포설실에 전기케비넷이 대표점화원이며 전기모타가 3개 있는 경우
 - 풀이 : 대표지역계수는 부지내의 호기수를 부지내의 케이블 포설실 수로 나눈 값으로 1.0이며, 대표지역의 점화원인 전기케비넷의 점화원 계수는 1.0이며 화재발생치는 실제 화재사고에 대한 데이터를 의하여 1.9E-02값을 얻는다. 따라서 대표지역의 화재발생빈도는 0.019의 값을 갖게 됨
- 일반 점화원에 대한 화재발생빈도 계산
 - 화재발생빈도 = 일반지역계수 × 점화원 계수 × 화재발생치로 표현됨
 - 예 : 케이블 포설실에 전기케비넷이 대표점화원이며 전기모타가 3개 있는 경우
 - 풀이 : 일반지역계수는 구역내의 점화원수를 발전소내의 해당 총 점화원수 또는 구역수로 나눈 값으로 3/40의 값을 갖고, 일반지역의 점화원인 전기케비넷의 점화원 계수는 1.0임. 화재발생치는 자료에 의하여 1.9E-02이므로 일반지역의 화재발생빈도는 0.001425의 값을 갖게됨.

따라서 케이블 포설실의 화재발생빈도는 계산식에서 대표지역 화재발생빈도와 일반지역 화재발생빈도의 값에 고정변수(여기서는 3)를 곱하여 0.061275의 값을 얻게 된다. 조건부노심손상확률(CCDP)은 확률론적안전성평가(PSA)의 고장수목(Fault)을 정형화한 프로그램에 의하여 그 값을 얻을 수 있으며 이에

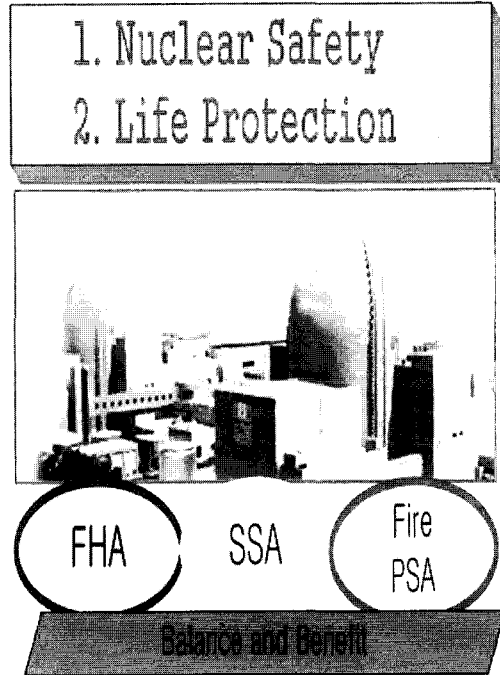


그림 2. 원전 화재위험분석 기반 요건

따라 화재발생빈도와 조건부노심손상확률을 곱하여 노심손상빈도(CDF)의 정량화된 값을 구한다.

4. 결론

원전의 화재방호기준은 설계단계에서부터 출력 및 계획예방정비기간중의 모든 기간중에 적용된다. 이의 정성적 및 정량적 접근은 화재위험도분석, 안전정지 능력분석 및 화재로 인한 확률론적안전성평가로 집약할 수 있다. 반면 원자력발전소를 위한 사용연료 및 방사성물질의 제어라는 특수성으로 인하여 원전의 화재방호는 심층화재방호개념의 적용뿐만 아니라 안전여유도의 확보, 적용방법론의 명확실성 반영, 해석 결과에 대한 민감도 해석 등 일반 산업계의 화재방호기술과 상당히 다른 접근방법과 분석기술을 사용하고 있다.

13) Conditional Core Damage Probability

그러나 원전에서 사용하는 결정론적 규정과 함께 정량적 해석방법은 일반 산업계에 응용하여 적용할 수 있으며 특히 최근 미국과 유럽을 중심으로 활발히 개발되고 있는 성능기의 분석기술과 방법론이 원전에 도입됨에 따라 일반 산업계의 실용기술과 원전의 기반기술을 상호보완하여 기술적 도약을 할 수 있는 단계에 이르렀다. 이에 따라 산업계의 다양한 적용기술과 원전의 특수기술을 상호 연계하여 활용할 경우 국내의 화재방호기술을 한 차원높은 실용기술로 발전할 수 있을 것으로 기대한다.

참고 문헌

1. Appendix R to 10 CFR 50 : Fire Protection Program for Nuclear Power Facilities Operating Prior to Jan. 1, 1979
2. CFR 50.48 : Fire Protection
3. GDC -3 : General Design Criteria for Nuclear Power Plants(Appendix A to Part 50)
4. NFPA 803, Standard for Fire Protection for Light Water Nuclear Power Plants.(93 edition)
5. NFPA 805, Performance-Based Standard for Fire Protection for Light Water Reactor Electric Generating Plants.(2001 Edition)
6. NUREG-1521, "Technical Review of Risk-Informed, Performance-Based Methods for Nuclear Power Plant Fire Protection Analysis(Draft for Comment)
7. "A User's Guide for FAST : Engineering Tools for Estimating Fire Growth and Smoke Transport(20 edition)", U.S. Department of Commerce, Technology Administration, NIST