

## 위험도 및 성능기반 분석방법에 의한 원전 화재방호규정 적용 방안 Application for Fire Protection Regulation based on Risk-Informed and Performance-Based Analysis

지문학<sup>†</sup> · 이병곤\*

Moon-Hak Jee<sup>†</sup> · Byung-Kon Lee\*

한전 전력연구원 원자력발전연구소, \*충북대학교 안전공학과 교수  
(2006. 6. 14. 접수/2006. 8. 10. 채택)

### 요 약

원자력발전소의 화재방호규정은 발전소 건설 초기단계에서 인허가 요건에서 제시하는 설계기준을 따른다. 이러한 규정은 발전소 정상상태를 기준한 것이며 발전소 과도상태, 배열이 변경될 수 있는 계획예방정비기간 또는 발전소 해체기간의 화재방호 적용기준으로는 부족한 실정이다. 최근 미국에서 개발되고 있는 화재방호요건은 발전소 전체 수명기간에 걸쳐 성능기반 요건과 관리기준을 제시하고 있으나 발전소 상태변경에 따른 정성적 및 정량적 평가를 위한 적용기준이라기 보다 개념적 적용방법을 제시하고 있다. 반면, 성능기반 화재위험 분석기법은 원전의 화재방호구역을 하나의 분석공간으로 설정한 다음 열 및 연기의 유동을 해석하며, 실내의 안전성 관련 기기 및 케이블에 대한 열적 영향을 평가한다. 본 논문에서는 이러한 새로운 정량적 분석기술을 국내 원전에 적용하기 위한 목적으로 원전 화재방호규정의 적용방법 변경 방안과 발전소 상태변경에 대한 위험도 평가 항목을 구분하여 제시하였다.

### ABSTRACT

From the beginning of the construction stage, the fire protection regulation for the nuclear power plants conforms to the design requirements for the acquisition of the license permit. This regulation is based on the plant status of the normal operation, but it is not enough to be used as an application standard for fire protection at the transient mode of the plant and the outage time for refueling as well as for the plant decommissioning. While the advanced fire protection requirement that has been developed in America recently suggests the performance-based requirement and management rule applicable to the overall life time of the plant, it simply represents the conceptual application. It means that it can not be treated as appropriate standards because it does not deal with the qualitative and quantitative approach in specific ways. By the way, with the use of the performance-based fire risk analysis, the dynamic behavior of the heat and smoke at the fire compartment of the nuclear power plants can be analyzed and the thermal effect to the safety-related equipment and cables can be evaluated as well. At this paper, it suggests the ways to change the applicable fire protection regulations and the required evaluation items for the fire risk resulted from the plant configuration change with an intent to introduce the state-of-the-art quantitative fire risk analysis technology at the domestic nuclear power plants.

**Keywords :** Nuclear power plant, Fire hazard, fire risk, Performance-based, Defense-in-depth

### 1. 서 론

원자력발전소(이하 “원전”이라 함)의 화재위험 분석 및 평가 방법론이 정성적 분석뿐만 아니라 정량적 평가를 포함하는 방향으로 변경되고 있다. 이러한 방법

론의 변경은 정량화된 분석방법 및 평가기준이 있어야 가능하다. 미국 화재방호협회에서 제정한 기존 경수로 원전의 화재방호기술기준인 NFPA-803<sup>1)</sup>은 결정론적 방법에 바탕을 둔 화재방호 기술기준을 담고 있으며 국내의 대부분 원전은 이 방법에 의해 원전 화재방호 규정 및 기술기준을 적용하였다. 한편, 성능기반 화재방호 기술기준인 NFPA-805<sup>2)</sup>가 2001년 발행되었으며 2004

<sup>†</sup>E-mail: jmhak@kepri.re.kr

년 6월 미국의 원전규제기관인 NRC는 성능기반 기술 기준을 연방법인 10CFR50.48<sup>3)</sup>에 의하여 이를 수용함에 따라 원자력발전소에서도 성능기반 화재방호 분석 및 평가가 가능하게 되었다.

상기와 같은 기술변화에 의하여 원전 화재방호 규정은 기존의 결정론적 기준에서 성능기반 신기술을 활용할 수 있게 되었으나, 구체적인 실천방안이 마련되지 않아 새로운 기술기준에 따른 이행방안이 마련되어야 한다. 이를 위해 본 소고에서는 미국의 원전사업자인 Nuclear Energy Institute가 추진하고 있는 성능기반 화재방호 규정과 방법론의 적용 방안을 확인하고 이를 국내 원전의 화재방호 기술기준으로 적용할 수 있는 실천방안을 제시하고자 한다.

## 2. 본 론

### 2.1 원전 심층화재방어기준

원전의 심층화재방어개념은 기본적으로 화재의 발생 가능성을 사전에 예방(Prevention)하고 화재가 발생할 경우 이를 즉시 감지하여 소화(Detection and Suppression)하며 화재로 인한 인적 및 물적 피해를 최소화하는 것이다. 반면 이러한 3단계 방어기준은 상호간 적절한 조화와 균형을 유지하여 하나의 방어수단에 지나치게 의존하지 않도록 설계하여야 한다. 원전은 이러한 기본 개념뿐만 아니라 화재발생시 원자로의 안전 정지 및 방사성물질 유출을 제한하기 위한 고유 특성으로 다중성(Redundancy), 다양성(Diversity), 독립성(Independence)을 기본설계개념에 도입하여 건축물 설계, 소화설비 배치, 정상운전시 운영계획에 적용하며 화재시 주요공정의 감시 및 제어를 이중으로 수행할 수 있는 다중의 심층화재방어개념<sup>4)</sup>(Defense-in-Depth Concept)을 적용하고 있다.



Fig. 1. Defense-in-Depth Concept at NPPs.

Fig. 1에서 볼 수 있는 바와 같이, 원전에서는 화재 발생 원인을 줄이기 위한 화재위험도분석(Fire Hazard Analysis)과 화재시 원전의 안전한 정지를 확보하기 위한 안전정지능력분석(Safe Shutdown Analysis)을 수행한다. 이러한 조치에도 불구하고 화재가 발생할 경우 그 영향을 최소화하고 피해범위를 제한하여 공공의 피해를 극소화하기 위한 목적으로 가상화재를 설정하여 정량적인 방법으로 확률론적 안전성분석(Probabilistic Safety Analysis for Fire)을 수행하여 실제화재에서 발생가능한 문제점들을 사전에 해결한다. 이러한 심층화재방어개념 및 분석방법은 일반 산업체에서 볼 수 없는 독특한 접근방법이다.

### 2.2 원전 화재방호규정의 변경

국내원전의 기본설계는 미국, 캐나다, 프랑스의 원자로 설계국가들이 수행하였으며 화재방호규정도 대부분 미국의 설계기준을 적용하였다. 이에 따라 미국의 화재방호규정 및 기술기준의 변화는 국내원전의 화재방호 정책에 직접적인 영향을 미치게 된다. 1990년 후반까지 미국의 원전 화재방호규정은 결정론적 방법인 규범적 요건에 따라 규제하여 왔으며 최신 방법론이 개발된 최근까지도 결정론적 위험분석도구인 NUREG-1805<sup>5)</sup>를 규제기관에서 자체적으로 개발하여 원전의 화재위험평가에 적용하고 있다.

이와 같은 결정론적 분석방법은 기초자료에서 밝혀지지 않은 다양한 불확실성을 공학적으로 수용하기 위하여 보수적인 기준을 적용하게 된다. 이와는 달리 정량적 위험분석 방법에 의한 성능기준 분석은 화재실증 시험과 최신 분석기술을 이용하여 화재위험을 보다 정량적이고 과학적으로 해석하는 방법이다. 따라서 기존의 결정론적 접근방법과 성능기반의 정량적 위험분석 방법을 상호 조화시킬 경우 원전의 안전정지 분야는 안전성을 높일 수 있게 되며 과도하게 보수성이 높은 분야는 합리적인 설계방안을 마련할 수 있게 될 것이다.

국내원전의 경우 프랑스 기술기준을 적용한 울진 1,2호기 및 캐나다 기술기준을 적용한 월성 1,2발전소를 제외한 모든 경우로 원전은 미국의 화재방호 규정과 기술기준을 적용하였다. 원전은 설계국가의 화재방호 규정과 기술기준에 따라 설계되고 운영되지만 가장 우선시되는 법률은 국내법에 따르는 것이 원칙이다. 이에 따라 국내원전의 경우 소방관계법인 소방기본법, 시행령과 시행규칙 및 국가화재안전기준을 적용하면서 원자력법과 원자력시설에 관한 기술기준 및 과학기술부 고시를 적용하고 있다. 이와 같이 이원화된 원전 화재방호규정 운영으로 인하여 해외 화재방호규정이 변

**Table 1.** Prescriptive fire protection regulations

Date	AHJ	Standard/Rule	Title (or Contents)
'71.02	NRC	10CFR50.App.A	General Design Criteria
'76.02	NRC	NUREG-0050	Brows Ferry Accident
'80.11	NRC	10CFR50.App.R	Advanced GDC
'80.11	NRC	10CFR50.48	Fire Protection Rules
'76.05	NRC	APCSB 9.5-1	SRP for Fire Protection
'81.07	NRC	CMEB 9.5-1	SRP for Fire Protection
'82.03	NRC	GL 81-12	Fire Protection Guideline
'86.04	NRC	GL 86-10	Fire Protection Guideline
'88.07	NRC	GL 88-12	Fire Protection Guideline
'03.10	NRC	SPLB 9.5-1	SRP for Fire Protection
'04.11	NRC	NUREG-1805	Deterministic Approach

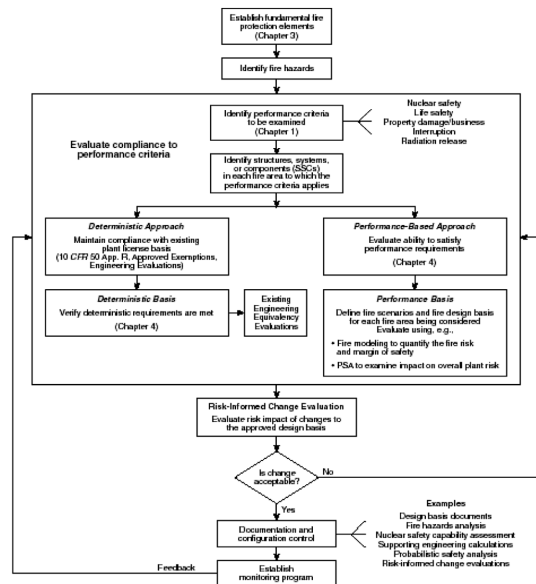
**Table 2.** Performance-based fire protection standards and rules

Date	AHJ	Standard/Rule	Title (or Contents)
'01.03	NFPA	NFPA-805	Performance-based Rule
'01.04	NRC	R.G 1.189	Regulation Guide
'02.05	NEI	NEI 02-02	Implementation Direction
'02.07	NRC	R.G. 1.174	Regulation Guide
'04.06	NRC	10CFR50.48 (c)	Change of CFR
'04.10	EPRI	NUREG/CR-6850	Fire-PSA Approach
'05.05	NEI	NEI 04-02	Implementation Guide

경될 경우 이의 타당성 및 안전성을 검토한 다음 국내 도입 여부를 결정하여야 한다. 이러한 측면에서 위험도 및 성능기반 분석에 의한 원전 화재방호규정의 적용방법론 개발은 국내법과 원전 설계국의 규정 변경을 합리적으로 수용할 수 있는 기술적 분석도구로 활용될 수 있다.

**2.3 성능기반 화재방호 기술기준의 적용 방법론**

국내 전력산업기술기준(KEPIC)의 FPN-805는 경수로 원전의 성능기반 화재방호 기술기준을 다루고 있다. 이 기준은 NFPA-805의 한글본이며 제2장 방법론에서는 성능기반 기술기준을 적용하기 위한 일반적 접근방법을 설명하고 있다. 이에 따르면 신규 원전의 경우 사업자는 자발적으로 NFPA-805를 기본 화재방호 기술기준으로 채택할 수 있으며 인허가를 받아 운영중인 원전일지라도 성능기반의 기술기준을 적용할 수 있다. 특히 원전 화재방호 설비가 개선되거나 인허가 관련사항



**Fig. 2.** Process for Performance-Based Approach (Referenced to the Fig. 2.2 of NFPA-805).

이 변경되는 경우 또는 대규모 설계변경이 일어날 경우 기존 규정을 충족할 수 없을 경우 성능기반 분석방법에 의하여 요건을 충족여부를 평가할 수 있다. 즉, 화재방호 설계 또는 설비의 변경이 발생하더라도 현재 규정에 적합한 경우 별도 조치없이 화재방호설비의 변경이 가능하나 규정을 따르지 못하는 변경사항은 성능기반의 화재안전성 평가 및 위험도정보를 활용한 정량적 분석을 통하여 현재 규정의 적용을 면제받을 수 있다.

Fig. 2에 도시된 바와 같이 성능기반 분석방법은 운전중인 원전에서 화재가 발생할 경우 원자로의 안전한 정지와 안전상태 유지를 위한 원자로 안전성능기준 (Nuclear Safety) 및 방사성물질 누출을 방지하기 위한 안전성능기준 Radioactive Release) 확보 여부를 평가하는 것이다. 원자로 안전성능기준 확보 여부는 결정론적 방법과 성능기반 분석방법을 개별적으로 사용할 수 있다. 결정론적 방법은 기존의 규범적 요건의 충족여부를 평가하는 것이며 이 요건을 만족할 경우 원자로 안전성능기준은 만족한 것으로 간주된다. 성능기반 분석방법에 의할 경우 원자로 안전성능기준은 화재모델링에 의한 열 및 연기의 거동과 영향 평가 및 화재위험도에 대한 정량적 평가를 수행하여 원자로 안전성능기준을 만족하지는 여부를 평가하여야 한다. 방사성물질의 누출에 대한 안전성능기준은 방사성물질의 누출을 제한하기 위한 원자로 안전성능기준을 만족할 경우 적합한 것으로 평가된다.

즉, 성능기반 분석방법론은 결정론적 규정을 충족할 경우 활용가치는 낮으나 발전소의 비정상상태, 계획에 방정비기간, 대규모 설계변경, 화재방호 규정의 변경이 필요한 경우 화재의 일반성상 및 화재성장에 대한 정성적 및 정량적 평가, 능동적 및 피동적 화재방호설비 능력 확인 및 화재방호구역의 배열변경에 대한 화재위험 평가를 위해 필요한 신기술이다.

**2.4 원전 화재방호규정 적용방법 변경을 위한 프로세스**

원전의 인허가 문서에 의하여 승인된 화재방호 설계기준, 화재방호설비 또는 운영기준이 변경되거나 물리적 배열 또는 운영방법이 변경될 경우 발전소 화재방호 담당자는 상태 변경에 대한 영향을 정성적 및 정량적으로 평가하여야 한다. 주요 평가내용은 원상태(Baseline)를 기준하여 기본상태를 평가한 다음, 변경 이후 그 결과에 대한 정량적 화재위험도 증가분을 평가하고 심층화재방어기준이 유지되는지 확인하며 안전상태 유지를 위한 안전을 및 변경 상태를 지속적으로 감시하기 위한 방법 개발 및 문서화 조치를 취해야 한다.

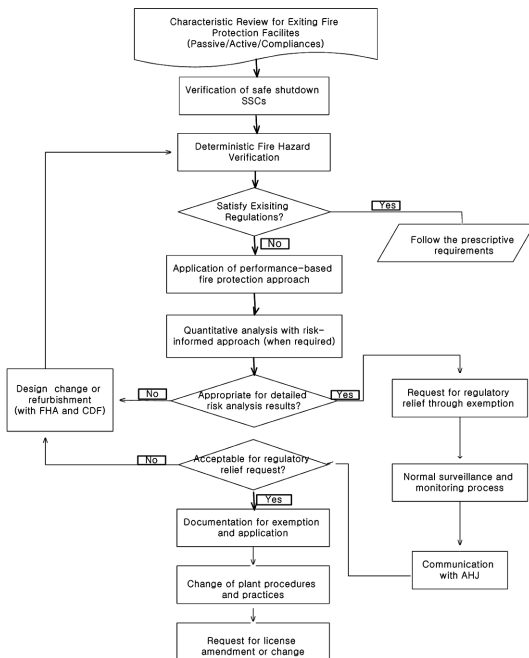
이와 같이 원전 화재방호규정의 적용방법 변경은 다양한 분석내용과 해석방법 및 평가기준에 대한 검토가

이루어져야 한다. 본 논문에서는 이에 관한 업무를 포괄적으로 검토하고 미국의 규정을 참조하여 국내 원전에서 화재방호규정 적용기술을 변경할 경우 발전사업자 및 규제기관에서 활용할 수 있는 방안을 Fig. 3과 같이 제시하였다. 이 방안의 주요 내용은 첫째, 화재방호 요건 변경을 결정론적 화재위험분석에 의하여 평가한 결과 기존 규정을 만족할 경우 현재 규정을 적용하게 되며 (Use-as-is) 둘째, 현재의 규정을 만족하지 못할 경우 성능기반 화재위험 분석방법에 의해 정량적 위험분석을 수행한 다음 필요한 설계보완 또는 설비개선을 수행하여 면제조치를 추진하는 방안을 제시하였다. 후자의 면제조치 이행방법은 국내의 규제기관에 의해 공식적으로 수용되지 않았으나 최신기술에 의해 공학적 타당성을 입증하는 방법론은 기술적인 대안으로 활용될 수 있으며 신규 원전의 경우 화재방호설비 설계단계에서 적용이 가능할 것으로 판단된다. 특히, 이러한 접근방법은 화재방호구역이 개방되거나 확장되는 계획에방정비기간 또는 설계변경에 의하여 기본배열이 변경될 경우 화재위험도의 정성적 및 정량적 평가를 수행하여 실질적인 화재 안전성을 평가하는 절차로 활용할 수 있다.

**2.5 원전 화재방호 상태변경에 대한 평가 항목**

미국 원전사업자(NEI)는 규제기관(NRC)의 검토를 거쳐 원전 화재방호규정 상태변경에 대한 평가 방법<sup>1)</sup>을 마련하였다. 이에 따르면 상태변경은 3범주로 분류된다. 첫째 범주는 경미한 변경으로 별도 조치가 필요하지 않은 분류이며, 둘째 범주는 규정의 요건을 만족하지는 못하나 성능기반 분석방법에 의해 안전성기준을 확보하는 사항이며, 세번째 범주는 별도의 설비개선 또는 조치를 취하지 않을 경우 인허가 요건을 만족하지 못하는 중대한 위반사항으로 분류된다.

이러한 개념을 국내 원전에 도입하기 위하여 화재방호설비 상태변경에 대한 처리방안을 Table 3에 제시하였다. Table 3의 I번 항목은 정성적 평가항목으로 미소한 변경사항, 화재방호규정 위반사항, 인허가 변경사항, 원자로 안전정지를 위한 성능에 관한 사항, 방사성물질의 외부누출에 관한 변경사항 등 5개 항목에 대한 평가방안을 제시하였으며 II번 항목은 정성적 및 정량적 평가가 필요한 발전소 상태변경항목으로 초기 선별과정을 거친 다음 화재위험도에 대한 정량적 평가와 심층화재방어개념의 변경사항, 안전여유도에 영향을 미치는 사항을 분류하였다. III번 항목은 성능기반 화재방호기준을 적용할 경우 일반적으로 적용하여야 할 업무처리 순서이며 Fig. 3의 내용과 일치시켰다.



**Fig. 3.** Suggested process for change of fire protection rule at domestic NPPs.

**Table 3.** Evaluation for plant change and sequence

<b>I. Qualitative Plant Change Evaluation</b>		
No	Evaluation Item	Evaluation Reference
1	Minor Changes	NFPA-805, NEI 04-02, etc
2	Requirement Violation	10CFR50 App. A and R, 10CFR50.48, NFPA codes
3	Change of License Permit	GDC, FHA, SSA
4	Violation of Safety Performance Requirement	Reactivity Control, Residual Heat Removal, Pressure and Inventory Control
5	Violation of Radioactive Release Criteria	10CFR20 Requirements
<b>II. Qualitative/Quantitative Plant Change Evaluation</b>		
No	Evaluation Item	Evaluation Reference
1	Initial Screening Process for Fire Risk Analysis	Preliminary Screening Process
2	Quantitative Fire Risk Evaluation	Fire-PSA, R.G.-1.174
3	Fire Defence-in-Depth	Fire Modeling, DID, Risk Balance
4	Fire Safety Margin	Fire Modeling, R.G.-1.174
<b>III. Sequence of Application for Performance-Based Fire Protection Approach</b>		
No	Evaluation Sequence	Detail Evaluation
1	- Investigation of Data - General Analysis - Fire Scenario Setting - Fire Scenario Review	- Verification for Data - Fire Scenario Evaluation - Re-evaluation for needs
2	- Fire Risk Analysis by use of Fire Modeling	- Fire-PSA analysis - CDF/LERF calculation
3	- Analysis & Assessment for fire modeling result	- DID, Safety Margin - Quantitative Analysis
4	- Design Changes - Status Improvement - Rearrangement - Configuration Control	- Performance Monitoring - Procedure Change - Design Change - Other Replacements
5	- Re-Modeling - Final Confirmation for Fire Risk and Safety	- Administrative Actions - QA Documents

### 3. 결 론

원전의 화재방호규정은 발전소 건설을 위한 초기단계에서부터 개념설계, 상세설계에 이어 인허가 설계기준을 수립하여 최종적으로 결정된다. 이러한 규정은 발전소 정상상태를 기준한 것<sup>7)</sup>이며 발전소 과도상태, 배열변경이 발생하는 계획예방정비기간 또는 발전소 해체기간의 화재방호 적용기준으로는 부족한 실정이다. 이에 따라 최근 미국에서 개발되고 있는 화재방호규정은 발전소 전체 수명기간에 걸쳐 화재방호 요건과 관리기준을 제시하고 있으나 발전소 상태변경에 따른 정성적 및 정량적 평가를 위한 적용기준이라기 보다 개

념적 적용방법을 제시하고 있다.

반면, 성능기반 화재위험 분석기법은 원전의 화재방호구역을 하나의 분석공간으로 설정한 다음 열 및 연기의 유동해석과 분석대상이 되는 실내의 안전성 관련 기기 및 케이블의 영향을 분석할 수 있으며 화재로 인한 안전성기준을 평가할 수 있는 정량적 분석 방법론이다. 이를 위해 본 논문에서는 국내 원전의 화재방호규정 적용방법을 변경하고자 할 경우 새로운 정량적 분석방법과 기존의 정성적 분석방법을 상호 조합하여 발전소 상태변경에 대한 정성적 및 정량적 평가항목과 평가 기준을 설정하였고 업무의 이행순서와 상세 평가항목을 구분하여 제시하였다.

## 후 기

본 논문은 2005년도 충북대학교 학술연구지원사업의 연구비 지원에 의하여 연구되었음(This work was supported by the research grant of the Chungbuk National University in 2005).

## 참고문헌

1. NFPA 803, "Standard for Fire Protection for Light Water Nuclear Power Plants"(1993).
2. NFPA 805, "Performance-Based Standard for Fire Protection for Light Water Reactor Electric Generating Plants"(2001).
3. NRC, 10CFR50.48, "Fire Protection"(1980).
4. NRC, 10CFR50 Appendix R, "Fire Protection Program"(1980).
5. NRC, NUREG-1805, "Quantitative Fire Hazard Analysis Methods for the U.S. Nuclear Regulatory Commission Fire Protection Inspection Program"(2004).
6. NEI 04-02, "Guidance for Implementing a Risk-Informed, Performance-Based Fire Protection Program"(2005).
7. NEI 00-01, "Guidance for Post-Fire Safe Shutdown Analysis"(2003).