

위험도 및 성능기반 분석방법에 의한 원전 화재방호규정 적용 방안 연구

지문학, 이병곤*

한전 전력연구원, 충북대학교*

Application for Fire Protection Regulation based on Risk-Informed and Performance-Based Analysis

Moon-Hak Jee, Byung-Kon Lee*

Korea Electric Power Research Institute, Chungbuk National University*

1. 서론

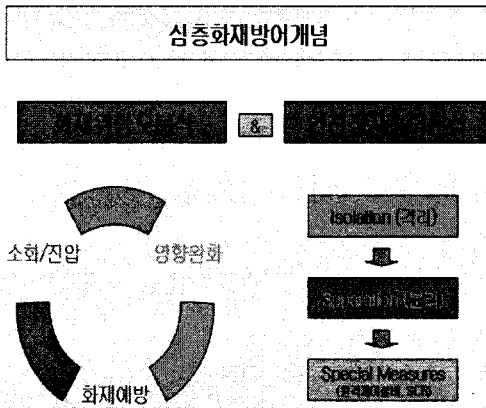
원자력발전소의 화재위험 분석 및 평가 방법론이 정성적 분석에서 정량적 평가로 변경되고 있다. 이러한 방법론의 변경은 정량화된 분석방법 및 평가기준이 있어야 가능하다. 미국 화재방호협회 (NFPA)에서 제정한 경수로 원전의 화재방호기술기준인 NFPA-803¹⁾는 결정론적 방법에 바탕을 둔 화재방호 기술기준을 담고 있으며 국내외 대부분 원전은 결정론적 방법에 의하여 원전의 화재방호 규정 및 기술기준을 적용하였다. 한편, 2001년 성능기반 화재방호 기술기준인 NFPA-805²⁾가 발행되었으며 2004년 6월 미국의 원전규제기관인 NRC는 성능기반 기술기준을 연방법인 10CFR50.48³⁾의 (c)항에 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, 원전에 실제 적용할 수 있는 화재방호규정의 구체적 적용 방안이 마련되어야 한다. 이를 위하여 본 소고에서는 미국의 원전사업자인 NEI에서 추진하고 있는 성능기반 화재방호 규정과 방법론의 적용 방안을 확인하고 이를 국내 원전의 화재방호 기술기준으로 적용할 수 있는 방법을 제시하고자 한다.

2. 본론

2.1. 원전 심층화재방어기준

기본적인 설계개념 또는 화재방호기준은 화재의 발생가능성을 사전에 차단(Prevention)하고 화재가 발생할 경우 최대한 빨리 이를 감지하여 소화(Protection)하며 화재로 인한 인적 및 물적 피해를 최소화하는 것이다. 원전의 경우 이러한 기본적 개념은 크게 다르지 않으나 화재발생시 원자로의 안전한 정지 및 방사성물질의 유출을 제한하기 위하여 다중성 (Redundancy), 다양성(Diversity), 독립성(Independence)을 기본설계개념에



[그림 1] 원전의 심층화재방어 개념

도입하여 건축물 설계, 소화설비 배치, 정상 운전시의 운영계획에 적용하며 화재시 주요 공정의 감시 및 제어를 이층으로 수행할 수 있는 심층화재방어개념⁴⁾(Defense-in-Depth Concept)을 적용하고 있다.

[그림 1]에서 볼 수 있는 바와 같이, 원전에서는 화재발생 원인을 줄이기 위한 화재 위험도분석(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 피해 범위를 제한하여 공공의 피해를 극소화하기 위한 목적으로 정량적 분석을 위해 가상화재를 기준한 확률론적 안전성분석 (Probabilistic

Safety Analysis for Fire)을 수행하여 실제화재에서 발생가능한 문제점들을 사전에 해결한다. 이러한 심층화재방어개념 및 분석방법은 일반 산업체에서 볼 수 없는 특수한 접근방법이다.

2.2 원전 화재방호규정의 변경

국내원전의 기본설계는 미국, 캐나다, 프랑스의 원전기관들이 수행한 것으로 국내의 화재방호규정 또한 대부분 미국의 설계기준을 적용하였다. 이에 따라 미국의 화재방호 규정 및 기술기준의 변화는 국내원전의 화재방호 정책에 직접적인 영향을 미치게 된다. 1990년 후반까지 미국의 원전 화재방호규정은 결정론적 방법과 규범적 요건을 중시하였으며 규제기관은 최근에도 결정론적 위험분석도구인 NUREG-1805⁵⁾를 개발하여 원전의 화재위험평가에 적용하고 있다.

[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	Brows 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

이와 같은 결정론적 화재방호 규정은 분석 과정에서 제반 입력요소의 불확실성을 포괄적으로 수용한 보수적인 방법이다. 반면, 정량적 위험분석 방법에 의한 성능기준 분석 기술은 원전의 화재위험을 보다 정량적이고 과학적으로 해석하는 방법이다. 따라서 기존의 결정론적 규범과 성능기반의 정량적 위험분석 방법의 조화는 원전의 안전성과 경제성을 동시에 구현할 수 있는 새로운 접근방법이라 할 수 있다.

국내원전의 경우 프랑스 기술기준을 적용한 울진 1,2호기를 제외한 모든 경수로 원전은 미국의 화재방호 규정과 기술기준을 적용하였으며 월성 1,2발전소의 경우 캐나다 기술기준이 적용되었다. 이에 따라 이들 원전은 설계국가의 화재방호규정과 기술기준을 따르지만 가장 우선시 되는 법률과 규정은 국내법에 따르는 것이 원칙이다.

[표 2] 미국 성능기반 화재방호기준 (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

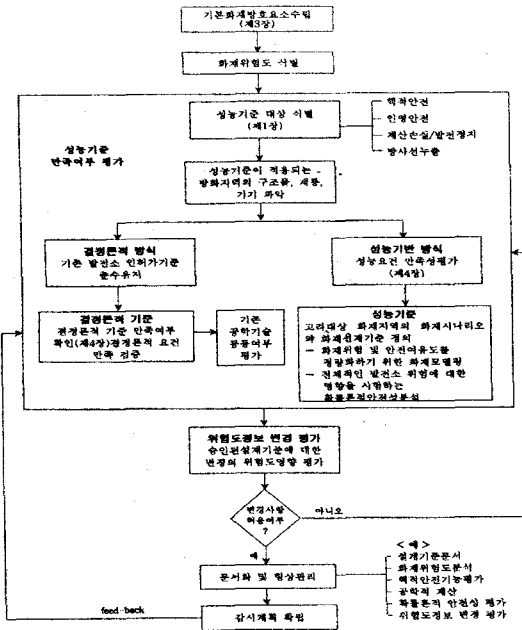
이러한 원칙에 따라 국내 소방관계법은 소방기본법, 시행령과 시행규칙 및 국가화재 안전기준을 적용하며 원자력 관련규정은 원자력법과 원자력시설에 관한 기술기준 및 과학기술부 고시를 적용하고 있다. 이와 같은 이원화된 원전 화재방호규정의 운영으로 인하여 국내 원전은 국내법의 적용뿐만 아니라 해외규정이 변경될 경우 변경된 규정의 국내 적용시 이의 타당성 및 안전성을 중심으로 화재방호규정의 반영 여부를 결정하여야 한다.

2.3 성능기반 화재방호 기술기준의 적용 방법론

국내 전력산업기술기준(KEPIC) FPN 805는 경수로 원전 성능기반 화재방호 기준을 다루고 있다. 이 기준은 NFPA-805의 한글본으로 이의 제2장 방법론에서 성능기반 기술기준을 적용하기 위한 일반적 접근방법을 설명하고 있다. 이 기준은 신규원전의 경우 발전사업자는 자발적으로 기본적인 화재방호 기술기준으로 채택할 수 있으며 현재 인허가를 받아 운영중인 원전의 경우일지라도 기존의 결정론적 규범에 따르거나 성능기반의 기술기준을 적용할 수 있다. 특히 이 기술기준은 원전 화재방호 설비나 요건의 변경 및 대규모 설비개선 또는

기술기준을 변경할 경우 기존의 규정을 충족하지 못하는 사항에 대한 해결책을 제시하고 있다. 즉, 화재방호 설계 또는 설비의 변경시 기존의 규범적 요건을 충족할 경우 간단한 검토로 화재방호 요건의 변경이 가능하나 결정론적 규정을 따르지 못하는 요건의 변경은 성능기반의 화재안전성 평가 및 위험도정보를 활용한 정량적 분석을 통하여 현재 규정의 적용을 면제받을 수 있다.

[그림 2]에서 도시된 바와 같이 성능기반 분석방법은 운전중인 원전에서 화재가 발생할 경우 원자로의 안전한 정지와 안전상태 유지를 위한 원자로 안전성능기준 (Nuclear Safety)과 방사성물질의 누출을 방지하기 위한 안전성능기준 (Radioactive Release)의 확보 여부를 평가하는 것이다. 원자로 안전성능기준의 확보 여부는 결정론적 방법과 성능기반 분석방법을 개별적으로 사용할 수 있다. 결정론적 방법이란 기존의 규범적 요건의 충족여부를 평가하는 것으로 이러한 요건을 만족할 경우 원자로 안전성능기준은 만족



[그림 2] 성능기반분석 방법론

한 것으로 평가된다. 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.

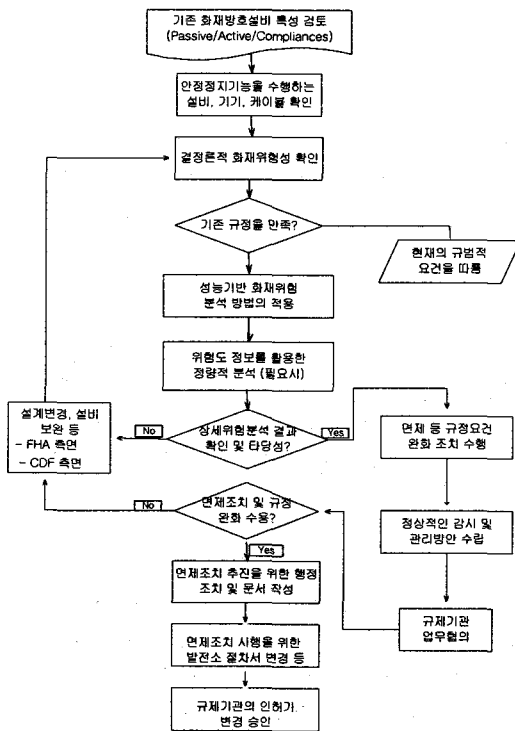
즉, 성능기반 분석방법론은 결정론적 규정을 충족할 경우 활용가치는 낮으나 발전소의 비정상적 상태, 계획예방정비기간, 대규모 설계변경, 화재방호 규정의 변경이 필요한 원전 등의 경우 화재의 일반성상 및 화재성장에 대한 정성적 및 정량적 평가와 함께 능동적 및 피동적 화재방호설비의 능력 및 화재방호구역의 배열변경 등에 대한 전반적인 화재위험 평가를 위하여 반드시 필요한 신기술이다.

2.4 원전 화재방호규정 적용방법 변경을 위한 프로세스

원전의 인허가 문서에 의하여 승인된 화재방호 기본 설계기준, 화재방호설비 및 운영 계획이 변경되거나 물리적 배열 또는 원전의 운영상태가 변경될 경우 원전의 화재방호 규정의 적용기준이 결정론적 방법 또는 성능기반 기술 등 적용기준에 무관하게 발전소 상태 변경으로 인한 영향을 정성적 및 정량적으로 평가하여야 한다. 주요 평가내용은 원래 상태 (Baseline)에서 변경이 일어났을 때 그 결과에 대한 정량적 화재위험도 증가

분 평가, 심층화재방어 유지, 안전을 확보, 변경상태에 대한 지속적 감시방법 및 문서화 조치로 이루어진다.

이와 같이 원전 화재방호규정의 적용방법 변경은 다양한 분석내용과 해석방법 및 평가기준에 대한 검토가 이루어져야 하나 국내 원전에서 화재방호규정의 적용기술을 변경할 경우 발전사업자와 규제기관에서 사용할 수 있는 변경(안)을 개발하여 [그림 3]에 제시하였다. 이 안에 따르면 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 분석 방법론에 의하여 정량적 위험분석을 수행하고 필요 설계보완 또는 설비개선에 의하여 면제조치를 추진하여 원전의 화재안전 성능기준을 확보하여야 한다. 후자의 추진 방안은 국내에서 처음으로 화재방호 요건의 해결을 위하여 면제조치 방안을 제시한 것이다.



[그림 3] 국내 원전 화재방호 규정 적용방법 변경(안)

호구역이 재배열되는 계획예방정비기간 또는 설계변경에 의하여 기본배열이 변경되는 경우 화재위험도의 정성적 및 정량적 평가를 수행하여 실질적인 화재 안전성을 평가하는 절차로 활용할 수 있다.

2.5 원전 화재방호 상태변경에 대한 평가 항목

미국의 원전사업자(NED)는 규제기관인 NRC의 검토를 거쳐 원전 화재방호규정 상태변경에 대한 평가 방법⁶⁾을 마련하였다. 이에 따르면 상태변경은 크게 3종류의 범주로

분류된다. 첫째 범주는 경미한 변경으로 별도의 조치가 없는 사항이며, 둘째 범주는 규정의 요건을 만족하지 못하나 성능기반 분석방법에 의하여 안전성능기준을 확보하는 사항이며, 기타 범주는 별도의 설비개선 또는 조치를 취하지 않을 경우 인허가 요건을 만족하지 못하는 중대한 위반사항으로 분류된다.

이러한 분류기준에 따라 국내 화재방호설비 상태변경에 적용하여 성능기반 분석 방법에 의한 면제조치 추진을 위한 평가항목 및 절차를 [표 3]에 열거하였다.

[표 3] 발전소 상태변경 사항, 위험도 평가항목 및 평가절차

I. 발전소 상태변경 사항 (정성적)			
	평가항목	판정	평가기준 (예)
1	경미한 변경사항	Y/N	선별기준 (NFPA-805, NEI 04-02 등)
2	화재방호규정 위반	Y/N	10CFR50 App. R, 10CFR50.48, NFPA
3	인허가 요건 변경 필요	Y/N	설계기준, 화재위험도, 안전정지능력 등
4	원자로 안전성능기준 위반	Y/N	반응도제어, 잔열제거, 압력/재고량 제어
5	방사성물질방출 안전성능기준	Y/N	10CFR20 적용기준
II. 발전소 위험도 평가 사항 (정성적/정량적)			
	평가항목	판정	평가기준 (예)
1	초기 화재위험도 선별기준 만족	Y/N	Preliminary Screening Process
2	화재위험도 정량적 평가	판정치	Fire-PSA, Reg. Guide 1.174
3	심층화재방어기준	평가	Fire Modeling, DID, Risk Balance
4	안전여유도 평가	판정치	Fire-Modeling, Reg. Guide 1.174
III. 성능기반 화재방호 기술의 상세평가 순서			
No	상세평가 순서	No	상세평가 순서
1	자료조사 및 화재시나리오 구성	6	화재리모델링 결과 상세 분석 및 재평가
2	화재모델링에 의한 위험 분석	7	Fire-PSA에 의한 CDF/LERF 분석
3	모델링 결과의 분석 및 평가	8	DID, Safety Margin 정량적 평가
4	실용성을 고려한 설비개선	9	Monitoring 및 발전소 절차서 개정(안)
5	설비개선 반영한 화재리모델링	10	행정조치 및 기술근거 자료 확보

3. 결 론

원전의 화재방호규정은 발전소 건설을 위한 초기단계에서 부터 개념설계, 상세설계에 이어 인허가 설계기준을 수립하여 최종적으로 결정된다. 이러한 규정은 발전소 정상상태를 기준한 것⁷⁾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 관리 기준을 제시하고 있으나 발전소 상태변경에 따른 정성적 및 정량적 평가를 위한 적용 기준이라기 보다 개념적 적용방법을 제시하고 있다.

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 위하여 국내 원전 화재방호규정 적용방법의 변경 방안과 발전소 상태변경 및 위험도 평가 항목을 구분하여 원전 화재방호 평가기술에 대한 새로운 적용방법을 제시하였다.

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. (2001.03)
3. NRC, 10CFR50.48, Fire Protection (1980.11)
4. NRC, 10CFR50 Appendix R, Fire Protection Program (1980.11)
5. NRC, NUREG-1805, Quantitative Fire Hazard Analysis Methods for the U.S. Nuclear Regulatory Commission Fire Protection Inspection Program (2004.12)
6. NEI 04-02, Guidance for Implementing a Risk-Informed, Performance-Based Fire Protection Program (2005.09)
7. NEI 00-01, "Guidance for Post-Fire Safe Shutdown Analysis (2003.05)