

C-02

원자력발전소의 화재하중 산출 방법론

오승준, 박준현*

(주)케이엠이엔티, 한국전력공사 전력연구원*

Methodology of Fire Loading Calculation for Operating Nuclear Power Plants

Seung-Jun Oh, Jun-Hyun Park*

Knowledge Management Engineering & Technology Inc.

Korea Electric Power Research Institute*

1. 서론

원자력발전소의 화재안전성을 향상시키기 위해서는 발전소 고유의 화재위험도분석(Fire Hazard Analysis)을 통해 국제적인 기준에 따라 화재방호설비의 적합성을 평가하고 화재발생시에 발전소를 안전하게 정지시킬 수 있는 능력을 분석하여 미흡한 화재방호설비와 화재방호계획(Fire Protection Program)을 보완하는 등의 적절한 조치가 필요하다. 또한 발전소의 운영중에 발생하는 설계변경 등이 화재안전성에 미치는 영향에 대한 주기적인 재검토가 이루어져야 한다¹⁻⁴⁾.

기술도입국 규제기관의 기술보고서⁵⁻⁷⁾와 국내 관련 산업계의 기술기준⁸⁾ 및 선행 화재위험도분석보고서⁹⁾ 등에서는 화재위험도분석을 수행하는 방법 및 절차에 관한 일반적인 지침을 안내하고 있으며 화재하중에 대한 분석과 화재위험성을 평가하는 과정에서 특별히 고려해야 할 사항들을 기술하고 있다. 그러나 발전소의 방화지역별로 존재하는 화재위험성평가 단계에서 연소에 의한 영향을 평가하기 위한 가연성 물질량의 정량화 과정에서는 화재방호기술자의 공학적인 판단에 의존해야 하는 경우가 빈번하게 발생하므로 판단에 필요한 객관적인 근거가 확립되어야 하며 판단 결과에 대한 충분한 보수성이 입증되어야 할 필요성이 있다.

본 논문에서는 가동 원전의 화재위험성평가 단계에서 화재하중을 산출하기 위한 가연성 물질량의 정량화 과정에서 고려해야 할 구체적인 방법론을 제시하였으며 선행 기술기준에서 제시한 방법론에 관한 적합성을 검토하여 개선이 요구되는 향후 과제를 제안하였다.

2. 화재위험도분석 절차

화재위험도분석을 수행하는 일반적인 절차의 흐름도는 그림 1과 같으며 단계별 주요 사항은 다음과 같다.

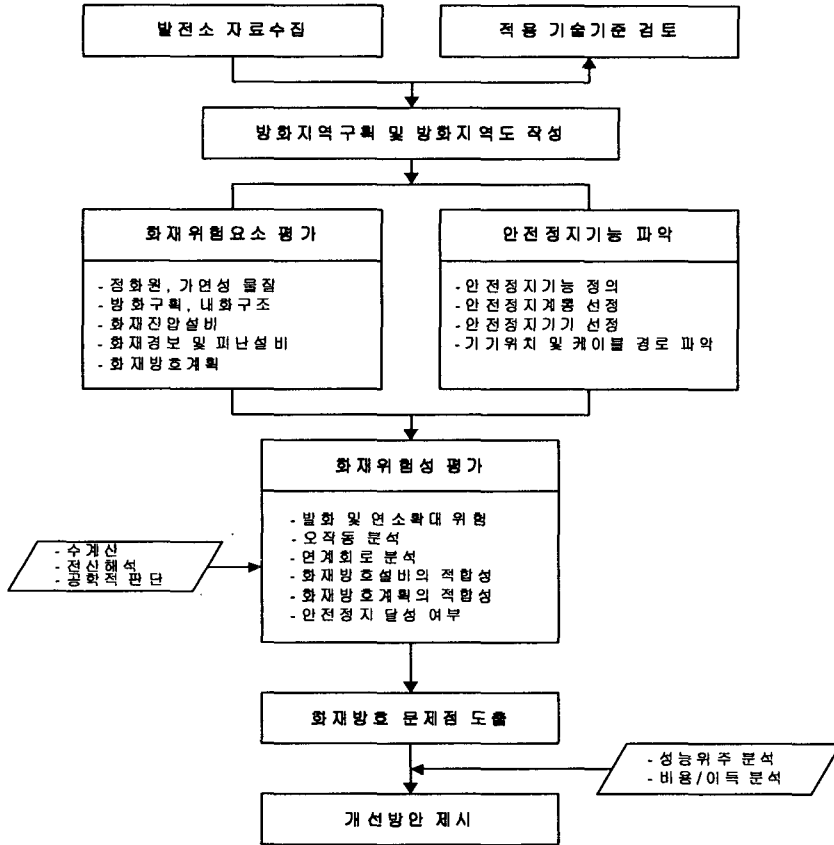


그림 1. 화재위험도분석 절차의 흐름도

- 발전소 자료수집: 각종 도면, 절차서, 화재방호계획서 등 화재방호와 관련된 발전소 자료를 수집한다.
- 적용 기술기준 검토: 발전소 설계시 적용하였던 법규 및 기술기준과 화재위험도분석에서 적용해야 하는 법규 및 기술기준을 상호 비교, 검토한다.
- 방화지역 구획 및 방화지역도 작성: 내화구조, 계통 및 기기 배치, 화재방호설비, 가연성 물질 등을 고려하여 방화지역을 구획하고 방화지역도를 작성한다.
- 화재위험요소 평가: 방화지역별 점화원 및 가연성 물질량 산정, 내화구조, 화재방호설비, 화재방호계획을 확인한다.
- 안전정지기능 파악: 안전정지기능을 정의하고 안전정지계통 및 기기를 선정하여 기

기 위치 및 케이블 경로를 파악한다.

- 화재위험성 평가: 화재방호설비 및 화재방호계획의 적합성, 안전정지 달성여부 등을 평가하며 화재위험성을 평가하는 과정에서 수계산, 전산해석, 화재방호기술자의 공학적 판단이 활용된다.
- 문제점 도출 및 개선방안 제시: 화재위험성평가 결과를 바탕으로 화재방호 측면에서 보완이 필요한 사항을 분야별로 정리하여 화재방호 개선방안을 제시하고 현장여건을 고려하여 현실적으로 실행 가능한 합리적인 대안을 마련한다.

3. 화재하중 산출 방법론

화재하중 산출 절차의 흐름도는 그림 2와 같으며 단계별로 고려해야 할 주요 사항 및 방법론은 다음과 같다.

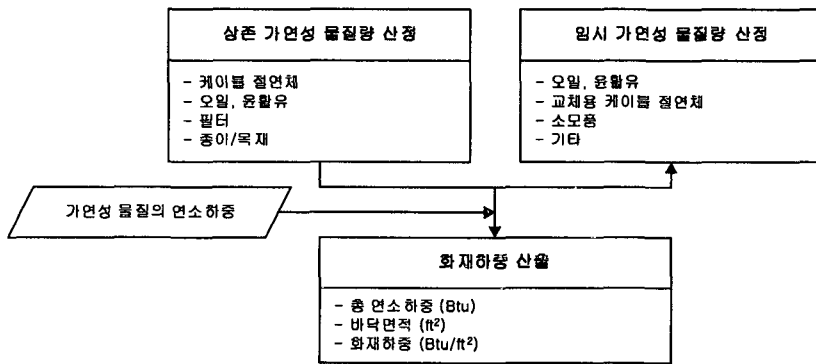


그림 2. 화재하중산출 절차의 흐름도

◎가연성 물질의 연소하중(Combustible Loading) 산출

발전소내의 가연성 물질은 상존 가연성 물질(Fixed Combustible)과 임시 가연성 물질(Transient Combustible)로 대별되며 가연성 물질의 연소하중 산출시 고려해야 할 주요 가정사항은 다음과 같다.

○공통 가정사항

- 산소의 공급량, 점화원과 가연물의 배치상태, 불완전 연소에 의한 영향 등을 배제하고 가연성 물질의 완전연소로 발생 가능한 최대 발열량을 기준으로 연소하중을 계산한다.
- 가연성 물질의 실제 고정물량을 정확히 산정하기 곤란한 경우에는 충분히 보수적으로 평가한다.

○연소하중 산출시 제외사항

- 금속 전선관이나 밀폐된 캐비닛 내의 케이블
- 불연성 용기 내의 통상적인 가연물

- 승인된 안전용기 내의 인화성, 가연성 액체
- 완전 밀폐된 금속 기어박스나 베어링하우징내의 비액체 가연물
- 작동 유체를 통해 완전 유회된 펌프나 모터
- 저장탱크, 배관, Sump, 금속 용기 등에 포함된 소량의 가연물
- MOV(Motor Operated Valve)와 관련된 가연성 물질
- 모터 내의 전기 절연체
- 화염전파율 25미만인 가연성 덮개(HVAC 보온재, 카펫, 천장 타일 등)

발전소 내에 존재하는 전형적인 가연성 물질에 대한 연소하중 산출 방법 및 주요 고려 사항은 다음과 같다.

○케이블 절연체

발전소내의 대표적인 가연성 물질인 케이블 절연체의 연소하중을 산출하기 위해서는 케이블 전체를 대상으로 케이블 절연체의 양과 재질을 파악해야 하나 이러한 방법은 비효율적이며 현실적으로 불가능하므로 케이블 트레이 정보 및 현장실사로부터 케이블 절연체량을 산정한다. 일반적으로 케이블은 전력용, 제어용, 계측용으로 구분되며 케이블 트레이에 설치되는 케이블은 용도별로 포설방법을 달리 하므로 발전소의 케이블 포설 관련자료를 참조하여 단위 케이블 트레이 길이당 케이블 절연체량을 산정하여 케이블 트레이 길이 정보로부터 케이블 절연체의 연소하중을 산출한다.

○유회유 및 연료유

펌프 등의 기기에 포함되어 있는 유회유량은 발전소의 주유절차서 및 기기 사양서에 근거하여 산정하며 여기에서 누락된량은 유사 기기의 유회유량을 보수적으로 가정하여 사용한다.

○전기 패널

MCC(Motor Control Center), 스위치 기어, 주제어실 패널, 기타 전기 패널 등에 포함된 가연성 물질에서 인입 케이블의 절연체와 내부 배선은 고려하며 패널 내부의 Terminal Board, Adapter 등은 연소하중에 미치는 영향이 적으므로 무시한다. 전기 패널 내의 케이블 절연체와 배선량은 전형적으로 다음과 같이 측정하여 산정한다.

- 480V MCC 및 4.16kV Switchgear: 20 lb
- 480V Switchgear: 40 lb
- 주제어실 패널: 50 lb/각 20 in 길이
- 기타 전기 패널: 30 lb/각 20 in 길이

○각종 필터

발전소 내부의 공기조화기기에 사용되는 Charcoal Filter, Pre-Filter, HEPA Filter 및 Cellulose Filter는 필터 사양서에 명시된 크기로부터 가연성 물질량을 산정한다.

○임시 가연성 물질

통상적으로 많은 양이 존재하지는 않으나 정상운전 혹은 정비작업의 결과로 기대될 수 있는 가연성 물질로서 그 지역에 상존하는 가연성 물질의 유형 및 물량과 밀접한 관련이 있으므로 다음과 같이 가정한다.

- 펌프 등 기기류의 경우 기기에서 함유하고 있는 윤활유량을 고려한다.
- 케이블 트레이의 경우 평균 300 ft의 교체용 케이블을 고려한다.
- 소모품의 경우 가연성 재료의 대체물(400,000 Btu)을 고려한다.

또한 임시 가연성 물질은 발전소 내에서 위치가 이동될 수 있으므로 보수적으로 가정하여 각 지역에 적용하는 방법을 동시에 고려하여 사용한다(예시).

- 5 gallon의 윤활유
- 75 lb의 목재
- 75 lb의 고무

○부수 가연성 물질

다음을 포함한 다양한 가연성 물질의 최소량을 고려하며 이러한 가연성 물질을 개별적으로 정량화하는 것은 비실용적이므로 대략 분배된 화재하중 값(예. 400 Btu/ft²)을 바닥면에 곱하여 사용한다. (400 Btu/ft²은 일반적으로 화재하중의 범위가 0-10 lb/ft², 8,000 Btu/lb인 Power Generating Station에 전형적인 값이다.)

- 비상조명의 가연성 물질
- 기기 식별표, 꼬리표, 표지판
- 임시 케이블
- 전화기, 플라스틱 손잡이 및 스위치

◎화재하중(Fire Loading) 산출

화재하중은 단위 바닥면적당 연소하중으로서 전체 바닥면적의 잠재적인 열방출 영향을 고려하므로 화재영향을 사실적으로 표현할 수 있으며 내화구조의 적합성을 평가하는 근거자료로 활용된다.

4. 선행 기술기준 검토 및 향후 과제

표 1은 국내 관련 업계에서 제정한 선행 기술기준인 KEPIC에서 제공한 자료로서 발전소 내에 존재하는 주요 가연성 물질의 연소열 값을 제시하고 있다⁸⁾.

가연성 물질에 대한 연소열은 SFPE Handbook에서 제공하는 연소열 값을 사용할 수 있으나 복합 성분으로 구성되어 있는 가연성 물질의 경우에는 이러한 기술기준에서 제공하는 순물질의 연소열을 직접 적용하는데 한계가 있다¹⁰⁾. 또한 유사 종류에 다양한 재질이 존재하는 경우에도 점유비율과 연소열 등을 종합 고려한 대표 재질을 선정하여야 하므로 이 과정에서 화재방호기술자의 적절한 공학적 판단이 필요하며 객관성 및 보수성을 입증

하기 위한 충분한 근거가 마련되어야 한다.

표 1. 여러 가지 가연성 물질의 연소열

구 분	연 소 열			
공업 세정액	10,320	kcal/L	155,000	Btu/gal
윤활유 또는 그리스	10,320	kcal/L	155,000	Btu/gal
변압기 오일	9,520	kcal/L	143,000	Btu/gal
디젤유	9,720	kcal/L	146,000	Btu/gal
제2호 연료유	10,320	kcal/L	155,000	Btu/gal
케이블 절연체				
- 계측 케이블	749	kcal/m	907	Btu/ft
- 전력 및 제어케이블	1,332	kcal/m	1,612	Btu/ft
종이/나무	4,435	kcal/kg	8,000	Btu/lb
축전지(아크릴로니트릴 스티렌)	10,035	kcal/kg	18,100	Btu/lb
셀룰로오스 여과기	4,331	kcal/cart.	17,185	Btu/cart.
플렉시블 접속채(HVAC)	5,544	kcal/kg	10,000	Btu/lb
HEPA 여과기	4,032	kcal/mod.	16,000	Btu/mod.
프리필터	4,032	kcal/mod.	16,000	Btu/mod.
탄소 여과기	7,762	kcal/kg	14,000	Btu/lb
덕트 외부단열재	3,021	kcal/kg	5,450	Btu/lb
덕트 내부라이닝(가스킷)	4,435	kcal/kg	8,000	Btu/lb
차음용 블랑킷트류	5,544	kcal/kg	10,000	Btu/lb
아세톤	5,877	kcal/L	88,275	Btu/gal
메탄올	4,265	kcal/L	64,064	Btu/gal
클로르에탄	4,416	kcal/L	66,329	Btu/gal
의류	3,992	kcal/kg	7,200	Btu/lb
고무류	4,435	kcal/kg	8,000	Btu/lb
수소	2,838	kcal/m ³	319	Btu/ft ³
아세틸렌	13,350	kcal/m ³	1,500	Btu/ft ³
LNG Gas	10,600	kcal/m ³	1,190	Btu/ft ³

한편, 선행 기술기준인 KEPIC은 화재하중 산출과 관련된 유의한 지침자료를 제공하고 있으나 부분적으로는 적용기준 및 산출근거가 불명확하므로 연소열 값의 인용시 주의를 기울여야 할 필요가 있다. 예를 들어 발전소 내의 대표적인 가연성 물질인 케이블 절연체의 경우, 단위 케이블 길이당 연소열 값을 정의하고 있으나 용도별로 다양한 종류의 케이블에서 어떠한 근거로 연소열이 산출되었는지가 불명확하며, 케이블의 크기에 대한 정보가 없으므로 단위 케이블 길이당 연소열 값 대신 단위 케이블 트레이 길이당 연소열 값으로 제시가 가능하다면 보다 실용적인 활용이 기대된다. 또한 필터류의 경우 단위량 모듈 혹은 카트리지가 등으로 불명확하므로 용어와 적용기준이 보다 명확하게 정의되어야 하며 동일한 종류라도 발전소별로 공급되는 제품이 서로 다르므로 가연성 물질량을 산정하는 상세한 방법론 제시에 관한 내용으로 보완되는 것이 바람직하다.

궁극적으로는 화재방지기술자에게 객관적인 지침으로 활용 가능한 화재하중 산출방법에 관한 기술적인 표준화가 이루어져야 할 필요성이 있다.

5. 결론

원자력발전소의 화재하중 산출 방법론에 관한 연구를 통하여 다음과 같은 결과를 도출하였다.

- 1) 원자력발전소의 방화지역별 화재하중을 산출하기 위해 가연성 물질량을 정량화하는 과정에서 고려해야 할 구체적인 방법론을 제시하였다.
- 2) 선행 기술기준의 적합성을 검토한 결과, 부분적으로 적용기준 및 산출근거가 불명확하여 기술기준의 보완이 요구되는 향후 과제를 제안하였다.
- 3) 가연물 관리 및 내화구조의 적합성 평가 측면에서 중요한 정보로 활용되는 화재하중을 산출하는 방법에 관하여 화재방호기술자에게 유용한 지침으로 활용 가능한 객관적인 표준 기술이 확립될 필요성이 있다.
- 4) 화재위험요소로 작용하는 가연성 물질은 적정 수준으로 관리되어야 하며, 발전소 운전중의 설계변경사항이 화재하중평가 결과에 반영되어 주기적으로 재검토되어야 한다.

참고문헌

1. “화재방호계획의 수립 및 이행에 관한 규정”, 과학기술부 고시 제2003-19호, 2003. 11
2. “화재위험도분석에 관한 기술기준”, 과학기술부 고시 제2003-20호, 2003. 11
3. “10CFR50.48 Fire Protection”, USNRC, 1981
4. “Regulatory Guide 1.189 Fire Protection for Operating Nuclear Power Plants”, USNRC, April 2001
5. “Methods of Quantitative Fire Hazard Analysis”, EPRI TR-100443, May 1992
6. “Fire-Induced Vulnerability Evaluation”, EPRI TR-100370, April 1992
7. “Fire PRA Implementation Guide”, EPRI TR-105928, December 1995
8. “전력산업기술기준-FP 화재예방”, 대한전기협회, 2000
9. “고리 1호기 화재위험도분석”, 한국전력공사 고리 제1발전소, 1998. 4
10. “The SFPE Handbook of Fire Protection Engineering”, 3rd Ed., 2002