C-14

화재요인 제어를 통한 원전 성능기반 화재방호 실용화 기술

지문학
한국수력원자력(주) 중앙연구원

Performance-based Pragmatic Fire Protection Technology by the Control of Fire Triangle at Nuclear Power Plants

Jee, Moon Hak
Central Research Institute of KHNP

요 약

화재가 지속되기 위해서는 화재 3요소 또는 4요소가 충족되어야 하지만 역으로 한 개 이상의 화재 요소를 제어하거나 통제할 경우 화재를 진압할 수 있다. 원자력발전소에서는 화재방호계획에 의해 방화지역마다 화재 요인인 점화원, 가연성물질, 산소 등 지연성가스를 분석하고 연속적인 연소반응을 억제할 수 있도록 화재위험 요인을 관리하고 있다. 최근에는 정량화된 화재위험 분석도구인 화재모델을 활용한 성능기반 화재방호 기술이 원자력발전소의 화재리스크 관리를 위해 도입되고 있다. 성능기반 화재위험 분석 방법은 일반 산업계에서도 사용되고 있으나 원자력발전소의 경우 화재로 유발될 수 있는 원자로 손상 가능성을 수치화하고 통제하기 위하여 위험도정보 활용기술과 성능기반 기술을 통합하여 사용하고 있다. 본 논문에서는 원자력발전소의 화재요인 관리 방법을 위험도정보 활용기술과 성능기반 화재방호 기술에 의거하여 분석하는 방법을 제시하였다. 이 분석의 목적은 원자력발전소의 화재위험 관리 방법을 산업계의 화재방호 전문가들이 공유하고 산업계의 특화된 방법과 원자력발전소의 전문화된 분석기술을 실용화하여 화재리스크를 효과적으로 관리할 수 있는 방법을 마련하기 위한 것이다.

1. 서 론

화재 또는 연소는 화재 3요소 (Fire Triangle) 또는 4요소 (Fire Tetrahedron)가 충족되어야 한다. 이 원리는 일반 산업계와 특수 산업시설의 화재위험 관리를 위해 동일하게 적용된다. 본 논문에서는 화재를 통제 또는 진압하기 위한 목적으로 일반 산업계에서 사용하고 있는 성능기반 화재방호기술과 미국의 원자력발전소 (원전)를 중심으로 도입되고 있는 동일 주제의 성능기반 화재방호 기술과의 차이점을 분석하고 원전의 성능기반 화재방호기술의 특이점을 파악하였다.

2. 원전 화재리스크 관리

일반 산업계의 화재리스크 관리에서 가장 우선시되는 사항은 인명안전과 재산보호이며 화재로 인하여 기업 이미지 상실 또는 브랜드 가치가 떨어지는 것도 방지하여야 한다. 화재리스크 관리로 일차적인 경제적 손실을 줄이는 것도 중요하지만 부가적으로 손해보험 등을 이용한 손실보상을 구현하기도 한다. 반면, 원전 화재리스크 관리의 최대 목표는 화재로 인한 인명손상을 최소화하는 것이다. 재산보호, 기업 이미지, 손실보상 등 일반 산업계에서 추구하는 방법과 달리 원전 화재리스크 관리의 최우선 목표는 일반 주민의 보호이다. 이를 위해 화재의 발생가능성을 최소화하고 원자로를 안전하게 정지하고 안정된 상태를 유지하기 위하여 심층화재방호 (Fire Defense-In-Depth)의 안전철학을 사용한다.

2.1 원전 심층화재방호

심층화재방호는 실용적이고 합리적으로 이용가능한 방법과 기술을 이용하여 화재리스크의 영향 또는 피해를 최소화하기 위한 안전철학 개념이다. 이 접근은 원전의 설계와 건설 및 운영의 모든 과정에서 화재요소를 적극적으로 통제하고 관리한다. 원전의 심층화재방호 철학은 다음과 같이 요약된다.

첫째, 원전 방화지역의 고정 또는 임시 가연성물질을 최소화 하며 점화원을 최대한 통제한다.

둘째, 방화지역에서 화재가 발생할 경우 즉시 경보하며 최대한 짧은 시간 이내에 소화한다.

셋째, 낮은 확률이지만 화재가 발생할 경우 원자로를 안전하게 정지하고 안정상태를 유지할 수 있도록 다중으로 안전정지기능을 설치하고 방사성물질의 유출을 최소화할 수 있도록 설계한다.

2.2 화재방호계획에 의한 화재리스크 관리

운영중인 원전의 화재방호는 교육과학기술부고시 2010-27호인 화재방호계획의 수립 및 이행에 관한 규정과 고시 2009-37호인 화재위험도분석에 관한 기술기준을 적용한다. 화재방호계획은 운영중인 원전의 화재예방, 화재진압, 화재방호운영방법에 대한 규정을 다룬다. 화재위험도분석은 방화지역 내부의 화재로 인한 피해 가능성 분석, 화재의 확대 가능성 평가 등 안전정지 확보를 위한 조치를 다룬다.

3. 일반산업계와 원전의 화재요소 관리

국내 대다수를 차지하고 있는 경수로 원전의 성능기반 화재방호기술기준은 2002년 NFPA-805에 의해 제정되었으며 미국 원전규제기관인 NRC는 이 기술기준은 2004년 공식적으로 인정하여 원전사업자가 자발적으로 사용할 수 있도록 법적기준을 마련하였다. NFPA-805는 성능기반 화재방호기술기준이지만 화재리스크를 관리하고 위해의 발생가능성을 줄이기 위한 수단은 화재요인을 관리하는 방법과 동일한 요건을 담고 있다.

3.1 성능기반 화재방호기술에 따른 화재요소 관리항목

NFPA-805에서는 화재모델링에 의해 화재리스크를 정량적으로 다루는 기술을 제시하고 있다. 화재모델링에 의한 화재리스크 정량화 분석은 화재모델링 입력항목을 결정하여야 한다. 산업계에서 사용하는 화재리스크 정량화 분석과 원전의 정량화 모델 입력항목은 아래와 같이 크게 다르지 않다.

○ 가연성물질의 종류 및 물량 분석
- 구획된 방화지역 공간 내부에서 실제 연소에 이용될 수 있는 가연성물질
- 환기지배, 연료지배 등 연소 형태에 따른 가연물 및 고정된 가연물과 임시 유입된 가연물

○ 점화원의 종류와 특성
- 고정된 점화원 및 유지보수 등의 작업을 위해 일시적으로 발생하는 점화원
- 테러, 방화 등 특수한 목적으로 생성되는 인위적 점화원

○ 산소 또는 지연성가스의 제어
- 구획화된 방화지역에서 강제환기 또는 자연환기의 운전방식 변경 및 이용가능한 산소량
- 밀폐된 방화지역의 한계산소농도, 연소범위, 연소지속성

○ 연쇄반응 제어
- 복사, 대류, 전도 특성과 화원의 위치에 따른 영향
- 소화설비, 환기설비에 의한 산소희석, 냉각효과, 불연가스 제어

○ 기타 위험관리 항목
- 구획된 밀폐공간의 압력상승 및 폭연과 폭굉 전이 가능성
- 건축구조물의 열적 손상에 따른 소손과 붕괴 가능성
- 방사선 관리구역에 대한 화재진압 및 외부소방대 합동 화재진압 대응전략

3.2 산업계와 원전의 성능기반 화재리스크 분석 방법 비교

원전에서는 1980년대에는 결정론적 방법의 화재위험분석 프로그램인 COMPBRN, FIVE[1]을 사용하였으나 2000년 이후에는 정량적 분석기능이 크게 강화된 존 모델과 전산유체역학 모델을 사용하고 있다. 최신 엔지니어링 관계식은 FIVE-EPRI, FDTs[2]를 사용하며 성능기반 분석 모델은 CFAST, MAGIC, FDS[3] 등을 사용하고 있다. 이에 따라 산업계와 원전의 화재리스크는 화재요인의 상세 분석에서 많은 차이점이 있다. 이를 항목별로 분석하면 표 1에서 제시된 바와 같이 다양한 차이점을 발견할 수 있었다.

---

1) COMPBRN, FIVE : 단일공간 고온층과 하부층 분석 모델, 화재로 유발된 취약성 분석 도구
2) FIVE-EPRI, FDTs : 공학적인 엔지니어링 관계식을 엑셀프로그램을 이용하여 계산하는 관계식 모음 도구
3) CFAST, MAGIC, FDS : 존모델 및 필드모델로서 최신 화재모델링 분석 도구

표 1. 산업계와 원전의 화재요소 관리 방법 비교

화재요소	세부분석항목	분석방법	
		산업계	원전
1. 가연성 물질관리	1.1 가연물 종류와 특성	일반 분류 (A,B,C,D,K)	열발생율에 따라 구분
	1.2 가연물 크기(물량)의 위험성	가혹도, 화재세기 구분	화재하중 (내화능력분석)
	1.3 연소에 이용될 수 있는 가연물량	화재 진행상태에 따름	전량 연소 (설계기준화재)
	1.4 가연물 입출입 관리	인원 출입통제가 목적	화재방호계획으로 관리
2. 점화원 관리	2.1 점화원의 종류와 특성	일반적인 점화원 분류	고정, 임시 가연물 분류
	2.2 점화원 유무 - 화재 가능성 판단	점화원 유무로 판단가능	상시 점화원을 가정함
	2.3 고의에 의한 점화원 존재 여부	특수한 경우에 한함	의도적 점화원 존재
	2.4 유지보수 등 고온작업 점화원	일반적인 작업방법 적용	고온작업 점화원 관리
3. 공기, 산소	3.1 이용가능한 공기량의 분석	화재 진행상황에 따름	한계산소지수(LOI) 활용
	3.2 구획화된 공간의 연소 현상	건물 용도에 따라 설계	의도적으로 구획화함
	3.3 밀폐된 공간의 이용가능 산소량	별도 분석 내용 없음	필요시 밀폐공간 유지
	3.4 환기방식에 따른 영향	배연설비 기술기준 적용	환기방식 변경으로 제어
4. 연쇄 반응	4.1 화원의 위치에 따른 열적 영향	화재 진행상태에 따름	열원과 화원 상세 분석
	4.2 소화설비에 의한 소화효과	설비에 따른 소화효과	설계시 소화효과 제외
	4.3 연소생성물에 의한 소화효과	별도 분석 내용 없음	화재모델링으로 반영
	4.4 고온열가스층의 열적 영향	별도 분석 내용 없음	고온가스층 영향 분석
5. 기타 요소	5.1 실내 압력상승에 의한 피해 영향	특수한 경우에 한함	압력상승의 영향 분석
	5.2 건축구조물의 열적 소손의 영향	특수한 경우에 한함	구조물 손상 영향 분석
	5.3 방사선 관리구역 내부 소화방법	별도 분석 내용 없음	방사성물질 확산 관리
	5.4 외부소방대와의 합동 진압전략	별도 진압전략 없음	합동 진압전략 공동수행

3.3 화재요소 관리를 통한 화재리스크 효과적 관리 방안

산업계와 원전의 화재요소 관리 방법을 비교한 결과 산업계에서는 정성적인 분석이 주류를 이루며 원전의 경우 엔지니어링 관계식 또는 화재모델링을 이용한 정량적 분석을 사용한다. 따라서 산업계와 원전의 전문화된 화재방호 기술을 실용화하기 위해서는 화재요소 항목별 분석방법의 정립이 필요하다. 이에 따라 표 1에서 제시된 내용을 중심으로 산업계와 원전에서 실용적으로 사용할 수 있는 성능기반 기술기준의 화재리스크 관리 방법과 향후 공동 개발이 필요한 항목을 분석하여 표 2에 제시하였다.

표 2. 성능기반 기술기준의 화재리스크 관리 항목

화재요소	세부분석항목	화재요소 기준 화재리스크 관리 항목
1. 가연성 물질관리	1.1 가연물 종류와 특성	가연물 특성별 열발생율을 기준한 기술자료 개발
	1.2 가연물 크기(물량)의 위험성	화재구역 내부의 가연물을 기준한 화재위험도 정의
	1.3 연소에 이용될 수 있는 가연물량	화재구역 구조, 환기조건, 한계산소지수의 정량화
	1.4 가연물 입출입 관리	화재방호계획의 가연물량 입출입통제 방법 실용화
화재요소	세부분석항목	화재요소 기준 화재리스크 관리 항목
2. 점화원 관리	2.1 점화원의 종류와 특성	점화원 종류, 활성화 조건, 고정/임시 가연물 구분
	2.2 점화원 유무 - 화재 가능성 판단	고정, 임시 점화원 분류 및 점화원 범주 분석
	2.3 고의에 의한 점화원 존재 여부	고의에 의한 점화원 및 화재발생 시나리오 반영
	2.4 유지보수 등 고온작업 점화원	고온작업, 유입을 고려하여 화재유발 가능성 확대
3. 공기,	3.1 이용가능한 공기량의 분석	화재모델링 또는 엔지니어링 공학식을 활용

산소	3.2 구획화된 공간의 연소 가능성	화재모델링 또는 엔지니어링 공학식을 활용
	3.3 밀폐된 공간의 이용가능 산소량	화재모델링 또는 엔지니어링 공학식을 활용
	3.4 환기방식에 따른 영향	자연환기, 강제(제1,2,3종) 환기방식의 특성 반영
4. 연쇄 반응	4.1 화원의 위치에 따른 열적 영향	열기류층, 고온가스층, 천정류를 구분하여 열영향 분석
	4.2 소화설비에 의한 소화효과	소화설비의 역효과, 동작불능, 지연동작을 반영
	4.3 연소생성물에 의한 소화효과	화재모델링을 이용하여 연소생성물 불연효과 분석
	4.4 고온열가스층의 열적 영향	화원 위치에 빠른 열적 영향에 포함하여 해석
5. 기타 요소	5.1 실내 압력상승에 의한 피해 영향	수동계산식 또는 화재모델링에 의한 상세 분석
	5.2 건축구조물의 열적 소손의 영향	동적하중 및 열적 영향에 의한 구조물 영향 분석
	5.3 방사선 관리구역 내부 소화방법	화재방호계획에 따른 화재진압 상세 절차 반영
	5.4 외부소방대와의 합동 진압전략	명령 지휘 체제의 구축 및 합동진압전략 개발

4. 결론

미국 원전규제기관 (NRC)에서 제시된 NUREG-1805와 미국 전력연구원 (EPRI)의 FIVE 엔지니어링 분석도구는 화재리스크를 선별 분석하는데 크게 도움이 되었다. 존모델과 필드모델은 화재의 열적거동과 연소 메커니즘의 정량적 분석을 수행할 수 있다. 또한 산업계에서 사용한 엔지니어링 공학기술은 원천기술에 기반을 둔 기술이므로 원전의 정량적 화재리스크 분석기술과 상호 결합할 경우 일반 산업계와 원전의 화재리스크는 다음과 같은 방법으로 실용적인 화재방호 기술로 개발될 수 있을 것으로 기대된다.

○ 가연물과 점화원에 대한 종류, 특성, 연소조건, 물성치에 대한 정량화 데이터베이스 개발
○ 엔지니어링 공학식과 화재모델링 분석 방법을 조합한 정량화 화재리스크 분석 탬플릿 개발
○ 화재리스크 분석을 위한 입력변수 및 결과치에 대한 불확실도 해석 및 유효성 검증
○ 산업계와 원전 화재방호 전문가의 상호 협력체제 강화 및 공동연구를 통한 기술소통 기회 확대

참고문헌

1. NFPA 805, Performance-Based Standard for Fire Protection for Light Water Reactor Electric Generating Plants. (2001 Edition)
2. User Guide for FAST : Engineering Tools for Estimating Fire Growth and Smoke Transport
3. NUREG-1824, "Verification and Validation of Selected Fire Models for Nuclear Power Plant Applications", 2006.
4. NRC, Fire Dynamics Tools (FDTs) : Quantitative Fire Hazard Analysis Methods for the US NRC fire protection inspection program, 2004.
5. EPRI, “TR-100370: Appendix of FIVE, Analysis of the Transient Thermal Response of Target, FIVE”, 1992.