



# 원자력발전소의 화재위험도 평가

글 박찬호 KPPA 대구경북지부 차장

## 1. 머리말

세계 최초의 상업용 원자력발전소는 아인슈타인의 질량에너지 변환공식( $E=mc^2$ )을 이용하여 1956년 영국의 콜더 홀(Calder Hall) 발전소에서 시작되었으며, 1975년 원자력의 평화적 이용촉진 및 군사적 전용 억제를 목적으로 국제원자력기구(IAEA : International Atomic Energy Agency)가 설립되면서 각국의 원전 개발은 활발하게 추진되었다.

KFPA(Korean Fire Protection Association, 한국화재보험협회)는 지난 1999년 9월 고리 1호기 원자력발전소의 화재안전정지능력분석 용역을 계기로 2010년 5월 원자력발전소 화재방호 점검절차서 표준화용역까지 총 6건의 용역을 수행하였으며, 지난 38년 동안 축적하여온 전문기술을 집약하여 원자력발전소의 화재안전을 향상시키는데 기여해 왔다.

원자력발전은 화석연료와는 달리 환경에 영향을 미치지 않고 깨끗하다는 장점 때문에 선호되어 왔다. 그러나 일본 원자력발전소 사고에서 볼 수 있듯이 노심손상 등을 통하여 외부 환경으로 방사능이 누출되어 방사능 오염 등과 같은 추가적인 재해가 발생하면 돌이킬 수 없는 피해를 초래하고 다른 사고와는 달리 장기적이고 피해액의 예측이 불가능할 정도로 크다는 단점을 갖고 있다.

원자력발전소에서 발생할 수 있는 설계기준사고를 분석하여 보면 화재사고가 지진, 내부 기기고장 등으로 인한 사고보다도 노심손상에 의한 사고의 확률이 높게 나타나고 있다. 또한 IPE(Individual Plant Examination of External Events) Program에 의해 가동 중인 미국 내 원자력 발전소에 대한 화재위험(Fire Risk)을 평가한 결과, 화재사고가 원자로

CDF(Core Damage Frequency, 노심손상빈도)에 가장 중요한 위험요소로 작용하는 것으로 파악되어 원전의 화재안전은 다른 분야보다도 더 중요하다고 할 수 있다.

## 2. 원자력발전소의 화재안전

### 가. 원자력발전소의 방사선 안전

원자력발전소는 우라늄이나 플루토늄과 같은 무거운 원자핵이 거의 같은 질량을 갖는 두 개의 원자핵으로 갈라지는 핵분열 연쇄반응을 이용하여 막대한 에너지를 뿜아내어 발전한다. 이때 에너지와 함께 방출되는 알파선, 베타선, 중성자선 등의 입자선과 엑스선, 감마선 등의 전자기파를 포함한 방사선을 방출하는 방사성물질이 생성된다. 원자력발전소는 이러한 방사성물질을 사용하는 한, 안전개념의 가장 중요한 부분은 방사선 안전이라고 할 수 있다.

원자력발전소는 방사선에 의한 피폭을 최소화하기 위해서 설계단계에서부터 모든 경우의 사고를 가정하고, 이에 대처할 수 있는 다중성(Redundancy)과 다양성(Diversity)의 방호기능을 보유하고 있다. 특히 안전정지에 관련되는 계통이나 설비의 모든 기능이 발전소 내부사고의 영향으로 상실되지 않도록 하여 방사성물질의 누출을 방지하도록 하고 있다.

다중성이란 안전장치를 한 대만 설치한 상태에서 설비의 결함이 발생하면 정비를 해야 하므로 안전장치를 한 대 더 설치한다는 개념이며, 다양성이란 같은 종류의 설비를 설치하게 되면 설계자나 제작자 등에 의하여 결함이 동시에 발생할 수 있으므로 같은 기능을 하는 다른 종류의 설비를 갖춘다는 의미이다.

#### 나. 원자력발전소 안전설비의 화재방호

원자력발전소는 핵분열을 일으키는 중성자를 감속시키는 감속재와 에너지를 이용하는 방법 등에 따라 가압경수로(경수로), 가압중수로(중수로), 흑연로, 비등경수로, 고속증식로(증식로) 등으로 구분되며 우리나라에는 가압경수로와 가압중수로가 설치되어 있다. 가압경수로형 원전의 경우에는 다중성을 부여하기 위하여 안전계통 내에 2대의 안전정지 관련 펌프를 2개의 계열로 분리하여 설치되어 있다. 가압중수로형 원전의 경우에는 다양성을 부여하기 위하여 같은 기능을 수행하는 안전장치를 그룹 1 안전계통과 그룹 2 안전계통으로 분리하여 설치되어 있다.

가압경수로형 원전과 가압중수로형 원전 설계단계에서의 화재방호개념도 이와 같은 안전계통 설계 개념에서 출발한다. 가압경수로형 원전은 화재 발생 시 원자로를 정지시키고 방사능 누출을 방지시키는 안전계통 내 두 개의 계열이 동시에 영향받지 않도록 두 대의 안전정지 관련 펌프가 방화지역 등으로 격리되어 있으며 전력 및 신호를 전달하는 케이블트레이도 격리되어 있다. 가압중수로형 원전의 안전설비 화재방호 설계개념도 이와 동일하며 두 개의 계열 분리대신 두 개의 안전그룹이 분리되어 있다.

원자력발전소의 안전관련 계통은 원자로의 안전정지 및 안전정지 상태를 유지하는 기능과 운전 정지 후 원자로 내의 핵연료로부터의 잔열과 핵분열 생성물에 의해 발생하는 붕괴열을 제거하는 기능 등을 항상 유지할 수 있도록 다중방호개념으로 설계되어 있고, 화재가 발생하여도 다중방호 계통 중에서 적어도 하나는 본래의 기능을 유지할 수 있도록 방호설비와 소방설비가 설치되어 있다.

#### 3. 원자력발전소의 화재위험도 평가

원자력발전소의 화재위험도 평가에는 화재위험도 분석(FHA : Fire Hazard Analysis), 화재안전정지 분석(FSSA : Fire Safety Shutdown Analysis), 확률론적 안전성평가(PSA : Probability Safety Assessment) 등 크게 3분야로 나눌 수 있다.

화재위험도분석은 원자력발전소에서의 화재예방, 화재감지 및 화재진압 능력의 적절한 조합으로 화재 발생 가능성 및 화재에 의한 영향을 최소화하고 발생된 화재를 한정된 구역 내로 제한하는 것은 물론, 원자력발전소의 안전을 위하여 다중방호개념으로 설치된 안전정지에 관련되는 계통이나 설비의 모든 기능이 발전소 내부 화재의 영향으로 상실되지 않도록 하여 원자력발전소에 안전정지 기능을 유지시키고 방사선물질의 누출을 최소화하도록 하는 것이다.

화재안전정지분석은 원자력발전소 방화지역 내에서 화재가 발생하여도 화재 발생장소와는 별도로 기타부분에서 안전정지를 달성하고 유지하는데 필요한 기기의 기능이 보존됨을 입증하고, 단일 방화지역 내에서 화재시 안전정지에 영향을 주지 않는 것을 입증하는 것이다.

원자력발전소에서의 화재사건은 원자로 정지를 유발함과 동시에 안전정지 또는 사고완화 기능을 수행하는 다수의 기기를 동시에 손상시킬 수 있으며 화재가 발생하고 이를 진압하는 과정에서 화재와 무관한 일련의 기기 고장이나 운전 오류가 발생할 수 있다. 이러한 사고 가능성을 확률론적 분석기법을 통하여 체계적이고 종합적으로 평가함으로써 안전성 수준을 정량화된 형태로 제시할 수 있는 것이 확률론적 안전성평가이다.

〈표〉 원자력발전소의 화재위험도분석 및 화재안전정지분석

화재위험도분석(FHA)	화재안전정지분석(SSA)
<ul style="list-style-type: none"> <li>▷ 방화지역 설정                             <ul style="list-style-type: none"> <li>- 화재발생 위험구역</li> <li>- 주요 설비 구역</li> <li>- 안전정지관련 구역</li> <li>- 화재방호설비 구역</li> </ul> </li> <li>▷ 가연성 물질 파악</li> <li>▷ 접화원 파악</li> <li>▷ 화재유형 파악</li> <li>▷ 화재하중 산정</li> <li>▷ 방화구획 및 격리상태 파악</li> <li>▷ 화재방호시설 평가*                             <ul style="list-style-type: none"> <li>- 연소확대 방지설비</li> <li>- 경보 및 초기소화 설비</li> <li>- 수계 및 가스계 소화설비</li> <li>- 피난설비</li> <li>- 기타 방화상 필요한 설비</li> </ul> </li> <li>▷ 화재방호 프로그램 평가</li> <li>▷ 화재영향 평가</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>▷ 안전정지 기능정의                             <ul style="list-style-type: none"> <li>- 고온정지 기능</li> <li>- 저온정지 기능</li> </ul> </li> <li>▷ 안전정지 계통 선정                             <ul style="list-style-type: none"> <li>- 고온정지 계통</li> <li>- 저온정지 계통</li> <li>- 고온 및 저온정지 계통</li> </ul> </li> <li>▷ 기기, 케이블 선정                             <ul style="list-style-type: none"> <li>- 오동작 분석</li> <li>- 연계회로 분석</li> </ul> </li> <li>▷ 기기 및 케이블 확인                             <ul style="list-style-type: none"> <li>- 현장실사</li> <li>- 격리요건 평가</li> </ul> </li> <li>▷ 안전정지 영향평가                             <ul style="list-style-type: none"> <li>- 고장수목 분석</li> <li>- 안전정지 불능 대책</li> </ul> </li> <li>▷ 면제사례 검토</li> </ul>

\* 화재방호시설 평가 설명

- 1) 연소확대방지설비 : 방화벽, 개구부, 방화문, 관통부, 방화담퍼
- 2) 경보 및 초기 소화설비 : 자동화재탐지설비, 비상방송설비, 소화기
- 3) 수계 및 가스계 소화설비 : 수원, 펌프, 소화전, 스프링클러, CO2, 할론
- 4) 피난설비 : 비상조명등, 비상구, 유도등
- 5) 기타 방화상 필요한 설비 : 제연설비, 배출설비, HVAC설비

〈표〉는 원자력발전소의 화재위험도분석 및 화재안전정지분석 내용을 정리한 것이며, 일반건물의 화재위험도분석 절차와는 다소 차이가 있다. 또한 교육과학기술부고시 제2009-37호(2009. 9. 23.)에서 요구하는 원자력발전소의 특수요구조건은 다음과 같다.

### 가. 화재위험도분석

- (1) 핵연료재장전, 부분충수운전, 유지보수작업, 개조작업 등의 일상 작업 중에 발생하는 일시적인 가연성 물질의 증가 및 밀집
- (2) 발전소 안전정지를 위해 상주해야 하는 지역으로부터 대피하게 하는 상황을 포함한 안전에 중요한 구조물, 계통 및 기기들에 대한 노

출화재, 열, 연기 등에 의한 직·간접적인 영향 등

### 나. 화재안전정지분석

- (1) 원자로의 정지 또는 잔열을 제거하기 위해 요구되거나 방사성물질을 포함하는 안전에 중요한 구조물, 계통 및 기기들은 설계기준화재(Design Basis Fire) 시 화재손상 제한요건 만족
- (2) 안전에 중요한 구조물, 계통 및 기기들이 포함된 방화지역의 설계기준화재의 영향분석은 해당 방화지역뿐만 아니라 이러한 방화지역에 중대한 화재위험을 끼칠 수 있는 인접된 방화지역에 대해서도 수행

#### 다. 확률론적 안전성평가

확률론적 안전성분석(PSA) 기법의 목적은 원자력 시설로 인한 위험도를 정량적으로 계산하는 것이다. 이 기법은 1960년도 후반 영국에서 개발되었으며 1970년대 중반 미국의 Rasmussen 등에 의해 발전되었으며 WASH-1400으로 흔히 알려져 있다. 화재 PSA방법에는 정성적 선별분석법과 정량적 선별분석법 있다. 정성적 선별분석의 목적은 방화지역을 설정하여 화재가 발생하더라도 발전소 정지를 유발하지 않으며 안전정지 기능에 영향을 미치지 않는다는 것을 증명함으로써 방화지역을 선별한다. 정량적 선별분석법은 정성적 선별분석을 통하여 추가분석을 요하는 방화지역을 선정할 수 있으며 이때 선정된 방화지역은 정량적 선별분석을 요하는 구역이 된다. 정량적 선별분석에서는 각 방화지역별 화재발생빈도와 화재전파확률, 화재가 발생한 구역에서의 기기 손상과 화재가 전파되었을 때의 추가 기기손상을 고려하여 화재로 인한 조건부 노심손상확률을 계산하고, 이로부터 노심손상빈도를 평가하고 보다 상세한 분석이 필요한 방화지역을 선별하여 원자력발전소의 안전성을 평가한다.

### 3. 맺음말

일본 원자력발전소 사고 이후 국내 원자력발전소의 안전에 대한 국민들의 불안감이 높아지고 있으나 고도의 산업발전에 따른 에너지의 수요증가 등으로 인해 전기에너지의 수요는 예측할 수 없을 정도로 폭등하여 에너지의 수요증가에 따른 원자력발전소 증설은 필연적인 것으로 예측된다. 이 시점에서 원자력발전소의 안전성 향상을 위해 위험이 발생할 수 있는 모든 가능성을 제거하는 것은 필수적이라 할

수 있으므로 원자력발전소의 위험관리기법을 재정립할 필요가 있다. 따라서 국내 화재전문기관들은 원자력발전소 화재위험성평가에 적극 참여하여 원자력발전소 화재안전성을 대외적으로 입증함으로써 원자력발전소에 대한 대 국민 신뢰성을 향상시키는 데 기여해야 할 것으로 판단된다. ☞

#### [참고문헌]

1. 화재예방기술기준(원자력발전소용), 대한전기협회, 1999
2. 원전의 화재위험성 평가, 방재와 보험, 2001
3. 원전의 화재안전분야에 대한 협회의 접근방향, 방재와 보험, 2001
4. 원자력발전소의 화재위험도 평가, 한국도시방재학회지, 2001
5. 원자력안전규제 관련용어, 한국원자력안전기술원, 2010
6. EPRI TR-105928, Fire PRA Implementation Guide, Electric Power Research Institute, 1995.12
7. 10CFR50, Appendix A, Criterion 3, Fire Protection
8. USNRC Standard Review Plan(Branch Technical Position) 9.5-1, Fire Protection Program
9. 10CFR50.48, Fire Protection
10. 10CFR50, Appendix R, Fire Protection Program for Nuclear Power Facilities Operating Prior to Jan 1, 1979
11. Appendix A to BTP APCSB 9.5-1, Guidelines for Fire Protection for Nuclear Power Plants Docketed Prior to January 1, 1979
12. USNRC BTP CMEB 9.5-1, Guidelines for Fire Protection for Nuclear Power Plants