

원자력발전소의 화재위험성 평가 (Fire Hazard Assessment for the Nuclear Power Plant)

업 식*

1. 머리말

산업의 발달과 국민 생활의 향상으로 국내의 에너지 소비는 경제성장률을 앞서면서 상당한 추세로 증가하고 있으나 현재의 기술로는 국내의 부족한 에너지원을 개발하는 것이 극히 한정되어 있고 국내 경제에 막대한 영향을 미치는 이러한 에너지원을 불안정한 국제 동향에 의존하는 위험부담을 줄이고 안정적이고 지속적인 에너지원의 확보 필요성에 따라 원자력발전소의 건설은 에너지 공급의 안정성과 에너지원의 확보 필요성에 따라 원자력발전소의 건설은 에너지 공급의 안정성과 에너지원의 균형적 설비 및 경제적인 측면에서 장기전원개발계획에 따라서 꾸준히 건립이 추진될 것이다. 그러나 많은 사람들이 1986년 구 소련의 체르노빌 원자력발전소의 사고 후 발전소의 안정성에 대중적인 관심을 갖게 되었고 발전소의 크고 작은 모든 사건에 상당히 민감한 반응을 보이고 있으나, 현재 국내에서 운전 중이거나 설치되고 있는 가압경수로형과 중수로형의 원자력발전소에서는 이러한 만약의 방사성물질의 누출 사고에 대비하여 다중의 방호개념으로 방사선의 외부 누출을 철저히 차단하고 있는 것이다.

원자력발전소의 화재에 대비한 방화대책은 1975년 미국의 Browns Ferry 원자력발전소에서 발생한 화재 이후에 중요사항으로 대두되었고, 미국을 비롯한 세계각국에서 화재로 인한 발전소의 운전 정지나 방사성물질의 누출에 따른 피해를 최대한 감소시키기 위하여 화재예방에 관련되는 규

정을 점차 강화하는 방향으로 나아가게 되었으며, 원자력발전소의 방화대책의 기본목적은 화재발생시 원자로의 안전정지 능력을 유지하고 방사성물질의 방출에 따른 위험성을 극소화시키며 경제적 손실을 줄이기 위해서, 예상되는 화재의 특성을 파악하고 분석하여 적절한 방화계획으로 화재의 가능성과 화재의 영향을 최소화하는 방호수단을 제공하는 것이다.

2. 화재위험성의 평가목적

원자력발전소의 소방설비의 설계는 발전소에 대한 적절한 방호 수단을 선정하여 화재의 위험에서 운전원의 안전을 보장하고 발전소의 설비보존과 전력생산의 연속성을 보장해야 되지만, 무엇보다도 화재발생시 발전소의 안전정지기능의 수행 능력을 유지하고 대중의 안전과 건강에 영향을 미칠 수 있는 방사성물질의 외부누출을 최소화되도록 평가하는 것이다. 이는 원자력발전소의 정상운전 중에 사용되는 가연성 물질과 임시 저장하고 있는 가연성 위험물질의 종류와 물질의 보유량을 조사하고, 화재가 발생한 경우에 원자로 안전정지 능력과 방사선 차폐능력에 미치는 영향을 평가하며, 원자력발전소의 규제위원회 규정에 따른 원자로 안전에 중요한 구조물, 계통 및 기기가 설치된 모든 구역에 대하여 화재를 예방, 감지, 진압 및 차단을 하고, 원자로 정지능력에 관한 규정을 검토하는 것이다.

* 한국전력기술(주) 기계기술처

3. 소방설비의 설계개념

3.1 방화구획의 선정기준

발전소에서 유사한 화재형태나 어떤 특정한 형태의 예상되는 사고나 화재를 일정한 구역으로 제한하고 다른 구역에 영향을 미치지 않고 화재를 진압하기 위하여 건물을 구획하여 방화구역(Fire Area)을 설정하기 위하여 고려되는 선정기준으로는 1) 발전소의 계통에 대한 각각의 역할과 특징의 동질성 2) 설치된 기기의 성능과 주요기능 3) 운전상태의 유사성 4) 방사성물질 함유여부 및 저장되는 연소물질의 종류 5) 동질의 화재의 발생 가능성과 화재감지와 진화의 개념을 고려하여 적절하게 분류되어야 하며 6) 원자력발전소의 특유의 안전운전과 안전정지 개념과 병행하여 동일한 역할을 수행하는 원자력 안전정지 기능이 동시에 손상을 입지 않도록 독립적인 구역이 설정되도록 한다.

이와같이 선정된 방화구역은 내화능력을 갖어야 하며 방화구역의 형성을 위하여 고려하는 사항은 다음과 같다.

- (1) 안전관련 계통이나 기기가 포함되어 있는 구역은 인접한 화재가능 지역으로부터 화재의 전파를 방지하기 위하여 내화능력을 가진 방화벽으로 격리해야 하고, 안전관련 계통의 다중 방호개념으로 설계된 설비나 전선 및 기기들 사이에도 내화능력을 가진 방화벽으로 격리시킨다.
- (2) 화재하중이 큰 장소나 화재시 인접구역에 상당한 영향을 미치는 가연물질을 저장하는 장소는 내화능력을 가진 방화벽으로 격리하여 설치한다.
- (3) 가능하면 방화구역은 관통하지 않도록 설계하지만 방화벽에 배관이나 전선, 전선로 및 닥터가 관통하는 경우에는 방화벽과 동급이상의 내화성능을 갖은 재질로 밀봉한다.
- (4) 공기조화설비가 방화벽을 관통하는 경우에 관통부의 개구부는 방화뎀퍼를 설치한다.
- (5) 방화벽에 설치하는 출입구는 스스로 닫히

는 구조의 내화성능을 갖는 방화문을 설치한다.

- (6) 모든 방화구역에는 화재가 발생하는 경우에 사람이 대피하거나 소방대의 접근이 용이하도록 필요한 통로를 설치하고, 방화구역의 내벽이나 구조물, 내부 마감재는 불연성 재질을 사용해야 한다.

3.2 소방설비의 설계기준

원자력발전소에 설치되는 소방설비의 설계기준은 다음의 목적을 만족하도록 해야한다.

- (1) 원자력발전소 내에서 발생한 화재로 인하여 방화구역의 외부로 방사선 누출을 유발할 정도로 화재가 확대되지 않도록 소방설비를 설치한다.
- (2) 발전소에 적용되는 건축법, 소방법 및 소방관계 전기법령에 따라 화재위험으로부터 발전소와 운전원을 보호해야 한다.
- (3) 화재로 인하여 전력생산이 중단되거나 감소되는 운전의 방해를 최소화 해야한다.
- (4) 화재로 인하여 구조물이나 계통과 기기 및 발전소내의 물품 등에 경제적인 손실을 최소화한다.

원자력발전소에 설치되는 소방설비는 심각한 정도의 화재 발생을 차단하고, 주변구역으로의 화재전파를 억제함으로써 원자로의 정지능력을 확보하고 안전정지 상태로 유지하여 대형의 화재가 발생하여도 외부로 방사능의 방출을 극소화하기 위한 심층방어(Defence in Depth) 개념이 도입된다. 이 개념의 원칙은 우선 화재가 발생되지 않도록 해야하고, 만약에 화재가 발생한다면 신속히 화재를 감지하여 발생한 화재를 신속히 적절한 방법으로 진압하며 그 손상의 범위를 최소화하도록 하는 것이다.

그리고 이러한 심층방어 개념에 따라 안전정지 기능을 수행하는데 영향을 미치지 않도록 관련 방사선 안전관련 계통에 다음과 같이 다중으로 화재방호 개념을 설정하는 것이다.

- (1) 안전성관련 구역의 화재방호는 하나의 화재방호설비 이외에 적합한 보조화재진압설비를 함께 설치하여 하나의 계통의 파손으로 이들 모든 계통의 화재진압설비의 기능

이 상실되지 않아야 한다.

- (2) 안전정지에 필요한 기기들이 설치되어 있는 구역의 화재진압계통에는 안전정지지진(SSE) 후에도 작동할 수 있도록 내진설계된 화재진압설비를 설치해야 한다.
- (3) 심각한 자연재해보다 규모가 작으나 빈번하게 발생하는 자연재해나 인위적 사고에 의한 재해에서 본래의 기능이 유지되어야 한다.

3.3 방사선 안전관련 기준

원자력발전소는 안전관련 계통에 아래와 같은 기능을 항상 유지할 수 있도록 다중(redundancy) 방호개념으로 계통을 설계해야 하고, 화재가 발생하여도 다중방호 계통 중에서 적어도 하나는 본래의 기능을 유지할 수 있도록 방호설비와 소방설비를 설치해야 한다.

- (1) 원자로의 안전정지 및 안전정지 상태를 유지하는 기능
- (2) 운전 정지후 원자로 내의 핵연료로부터의 잔열과 핵분열 생성물에 의해 발생하는 붕괴열을 제거하는 기능
- (3) 방호벽의 상태를 유지하여 방사선 구역을 외부와 차단하는 기능을 유지
- (4) 상기에 관련된 기능의 주제어나 통제계통의 안전성과 운전성을 확보하는 기능
- (5) 방사선 안전관련 계통과 원자로 안전정지 계통의 정상적인 작동을 위하여 필요한 보조기능을 확보해야 한다.

4. 원자력발전소에서 화재위험물질

원자력발전소의 화재하중은 화력발전소와 일반 산업공장에 비하여 비교적 작다고 할 수 있으나, 화재시 미치는 파장이 엄청나고 원자력발전소에 존재하는 화재위험 물질, 점화원, 그리고 화재시 영향을 미칠 수도 있는 독성화학약품이 다양하기 때문에 방사선 방호개념의 적용과 더불어 적절하게 방화구역을 설정하여 화재가 확대되는 것을 방지해야 한다.

4.1 연소성/가연성물질

- (1) 발전소의 비정상운전을 할 경우에 작동해

야 하는 비상발전기용으로 지하 탱크에 저장되는 디젤연료, 옥외 탱크에 저장되는 보조보일러용 연료유, 보조급수 펌프나 소방 펌프 구동용 연료유.

- (2) 원자로 냉각수펌프, 주급수펌프, 복수펌프, 일반냉각수펌프와 같은 대형기에 사용되는 윤활유와 기기의 유지보수에 사용되는 세척용제류.
- (3) 주터빈/발전기와 터빈구동 계통의 베어링 윤활유와 윤활유 정제계통, 발전기 냉각용 수소의 밀봉유 및 유압제어용 유류.
- (4) 절연체로써 기름이 사용되는 대형 변압기와 고압/저압 배전반, 전동기류, 전동기 제어반, 축전지류, 전산기기 및 제어반과 같은 전기 전자기기의 내부 연소물질과 전선.
- (5) 가연물질이면서 점화원으로도 상당한 역할이 가능한 전원공급용 전선이나 제어통제용 전선의 피복.
- (6) 공기정화계통에 사용되는 필터류, 공기 중에 부유하는 방사성물질의 제거를 위해 사용하는 탄소필터 및 윤활유 정제계통의 각종 윤활유 정제필터.
- (7) 계통설비의 배관이나 기기에 사용되는 보온재.
- (8) 발전소 내에서 사용하는 고압가스와 가연성 가스인 발전기 냉각용 수소가스, 수소가스 교체 매개 역할을 하며 중수로형에서 원자로 연료관의 동심관 사이에 충전되는 탄산가스, 용접이나 절단기에 사용되는 산소와 아세틸렌가스, 노심에서 방사분해로 발생하는 산소와 수소가스.
- (9) 일반 가연성물질로서 각종 기계나 기기의 포장물질, 사무용집기나 가구의 가연성 플라스틱류, 나무류, 종이류와 운전보수에 사용되는 기기 세척용 용제와 윤활유, 페인트, 기름걸레 등등.

원자력발전소 내에서는 방화관련 계획 단계에서부터 연소물질의 사용을 억제하고, 화재 위험원을 가능한 제거하고자 노력하고 있지만, 예상되는 점화원으로는 다음과 같은 것들이 있다.

- (1) 전기적 요인-전선이나 변압기, 배전반, 제어반 등의 전기 기기의 과부하나 단락, 누전, 전열기기의 과열, 전기불꽃 및 정전기 등의 전기적인 원인
- (2) 기계적 요인-대형펌프, 공기압축기, 송풍기, 냉동기 등의 베어링 파손에 의한 과열과 충돌접촉에 의한 불꽃 등의 기계적 요인
- (3) 열 관련 설비의 요인
 - 주중기나 보조중기 계통과 터빈계통 등에 속하는 기기나 배관 등의 고온표면(정상적인 상태는 보온재로 덮여 있다)
 - 비상발전기나 보조중기 발생기의 고온표면과 과압의 발생 및 고온의 배기 연소가스
 - 난방기의 과열
- (4) 화학적 요인-사용하는 화학약품의 화학적 반응에 따른 열에너지
- (5) 인위적 요인-운전, 유지 및 보수기간 중에 운전원이나 작업자의 기기용접, 절단 등과 같은 불꽃사용의 잘못과 실수에 의해 유발되는 화재

4.3 화학약품

화재가 발생하는 경우 발전소의 운전이 지장을 초래하거나 소방대의 접근이나 피난에 영향을 미칠수도 있는 독성 화학약품으로는 다음과 같은 것들이 있다.

- (1) 발전소의 순환수 물 처리에 사용되는 황산과 수산화나트륨 혹은 몰포린, 용존산소 제거용 하이드라진 용액 및 순환수의 pH 조절용 리튬과 암모니아
- (2) 원자로의 반응도를 조절하는 붕산과 중수로형에 긴급안전 반응도 조절용 물질인 카들리움
- (3) 냉각수로 사용하는 해수 중에서 번식하는 해조류와 어패류 및 미생물을 제거하기 위해 사용되는 차아염소산 나트륨 등이 있다.

5. 원자력발전소의 화재위험성 평가

5.1 화재위험성 평가단계와 방법

현재 국내의 원자력발전소에 대한 화재 위험성은 경수로형에서는 NFPA 803과 중수로형에서는

CAN/CSA-N293에 의한 기술기준에 따라서 평가되고, 대체로 다음과 같은 단계와 방법으로 수행된다.

- (1) 유사한 화재형태나 예상되는 사고를 일정한 구역으로 제한하기 위하여 3.1절에 기술된 방화구획 선정기준에 따라서, 선정된 방화구역(Fire Area)의 위치와 경계구역을 정의하고 방화구역별로 고유의 특성을 파악하며, 방화구역 경계에 개구부와 관통부의 설치여부를 확인한다.
- (2) 방화구역 내에 설치되는 펌프, 가열기, 압축기, 압력용기, 연료탱크와 같은 기계기기류, 공기조화기, 공기정화설비, 냉난방설비와 같은 공조기기류 및 발전기, 전동기류, 배전반, 차단기, 제어반, 각종 전선리플을 포함하는 전기기기류를 종류별로 구분하여 기기번호와 기기이름을 조사한다.
- (3) 특히 각각의 방화구역에 설치되어 있는 원자로 안전정지나 방사선 차폐에 관련되는 기기는 모든 운전 조건에서 각각 어떠한 기능들을 수행하고 있는지를 파악하고 있어야 하며, 방사성물질을 함유하고 있는 기계와 기기의 번호와 기기이름을 조사하고, 저장된 방사성물질의 종류와 보유량을 확인하여 화재로 인하여 발생할 수 있는 방사선 누출 가능성을 평가한다.
- (4) 각 방화구역별로 보유하고 있는 연소물질의 종류와 보유량을 조사하고 화재를 유발시키는 점화원을 파악하며, 화재가 발생하는 경우에 그 구역의 화재 특성과 화재의 확대 및 성장과정을 평가하고, 화재 발생시 개구부나 출입문을 통하여 인접 방화구역으로 화재전파나 유독물질의 이동 가능성을 예측한다. 이때는 방화구역내의 화재하중, 불꽃전파의 경로, 연기생성과 유독물질의 생성에 대해서도 고려해야 한다.
- (5) 조사된 연소물질의 보유량에 따라 각 방화구역의 연소하중(Heat Load)과 화재구역의 면적 및 화재하중(Fire Load)을 계산하고, 화재하중에 따른 화재가속도의 등가시간으로 화재구역의 고유 내화등급을 선정

한다. 이때 방화구역 경계부의 벽, 바다, 천정에는 선정된 내화등급에 적절한 방화벽을 설치하고 방화벽에 면한 구역의 개구부에는 방화문의 기준을 규정하고, 방화구역을 관통하는 배관, 전선/전선로 및 닥터의 관통부는 방화벽과 동등 이상의 내화성능을 갖도록 한다.

- (6) 각 방화구역에 설치된 방호대상물의 종류별 특성과 방화구역의 기능과 방화구역내의 연소물질 종류 및 화재하중을 검토한 후, 기존 원자력발전소의 화재 경험과 원자력발전소 설계의 일반기준 및 관련법규의 설계기준에 따라 가장 적절하고 유용한 화재감시설비와 진압설비를 선정한다. 모든 구역에는 최소한 2종류 이상의 화재진압설비가 준비되도록 하기 위하여 일반적으로 발전소 전구역에 기본적인 소화설비로 옥내소화전 설비를 선정하고, 화재구역과 연소물질의 특성에 따라 선정되는 화재감지설비와 화재진압설비는 소방법과 NFPA 803 등의 설계기준에 따른다.
- (7) 설계기준 화재(Design Basis Fire)는 방화구역에서 발생할 수 있다고 예상되는 가장 심각한 화재를 말하며, 이는 어느 구역에서 화재가 발생된 경우, 소화설비나 소화기기의 사용이나 소화활동을 행하지 못하고 화재가 성장하여 그 구역내의 모든 가연물질이 연소되면서 내부의 모든 기기와 설비에 손상을 입혀서 작동을 불가능하게 만드는 화재를 말한다.
- 모든 방화구역에 대해서 설계기준 화재를 가정하여 그 구역의 화재 등급을 결정하고, 그 구역의 모든 설비와 기기가 손상된다는 가정하에 화재로 인하여 영향을 받는 계통과 기기를 조사하고 기능의 상실에 따른 원자력 발전소의 안정성과 운전성을 평가해야 한다. 이때 손상이 될 수 있는 안전 관련 계통이나 기기는 다중개념의 계통이나 기기에 의하여 본래의 안전기능이 유지될 수 있는지 조사해야 한다. 또한 기본 화재진압설비가 파손되거나 불작동하는 경우에 대

응할 수 있는 설비나 기기를 명시하고 화재와 진압행위로 인하여 다른 구역에 미칠 수 있는 영향을 평가해야 한다.

- (8) 운전원이나 상주원의 인명 안전에 고려할 사항은 일반산업공장의 경우와 유사하지만 원자력발전소에는 건물의 크기에 비하여 정상운전의 경우에 상주인원의 밀도가 적은 특성과 방사선이 피폭과 방사선 오염 가능구역에 대한 접근과 보안성이 추가로 고려되어야 하며, 건물의 구조설계에서는 발전소 운영요원의 안전한 대피와 화재진압을 위하여 방화구역에는 최소한 2개 이상의 접근로가 제공되고 있는지를 평가한다. 또한, 건설기간이나 유지보수 기간 중에는 정상운전 기간보다 많은 인원이 작업하고 있음을 감안하여 출구 및 대피로의 크기를 고려해야 한다.

5.2 화재결과에 따른 영향평가

(1) 각 방화구역에서 설계기준 화재가 발생한 경우에 그 결과를 얻기 위하여, 적용되는 정보에 상당히 여유있는 값을 갖는 계수를 사용하여 평가한다. 특히 방사선 안전관계통이나 원자로 안전정지관련 계통/기기는 그 구역의 화재에서 손상받는 계통의 기능과 운전조건을 상술하여서 방사선 안전관련을 평가해야 한다.

- (a) 화재 발생시 소화설비와 방호벽의 기능이 유지되면서 화재의 직접적인 영향으로 손상될 수 있는 계통과 기기를 파악한다.
- (b) 화재 발생시 소화설비와 방호벽의 기능이 유지되면서 연기나 열기와 같은 화재의 간접적인 영향으로 손상될 수 있는 계통과 기기를 파악한다.
- (c) 화재 발생시 소화약제의 사용이나 소방진압설비의 사용으로 인하여 손상되거나 영향을 받는 계통과 기기를 파악한다. 일반소화기에 대해서는 그 결과가 미미하여 영향을 고려할 필요가 없겠지만, 옥내소화설비와 스프링클러설비는 방사선에 기기나 제어반 등에 소화수의 분사와 그 충격에 따른 직접적인 피해를 예상해야

한다. 또한 탄산가스계 소화설비는 기기의 동결피해를 예상해야 하고 실내 압력의 증가로 인하여 기기나 계기 등에 미치는 영향을 평가해야 한다. 방사선 구역에서의 비정상적인 실내 압력의 증가는 인접구역으로 방사성물질이 누출될 수도 있음을 주지해야 한다.

- (d) 옥내소화전설비와 스프링클러설비는 방사시에 방출수의 범람에 따른 피해를 예견하여 중요한 기기들은 방출수의 바닥 잔존 최대높이(Flooding Level) 이하에 설치되지 않도록 한다. 모든 구역에서 옥내 소화전 설비는 일정한 방출량을 가정하여 계산하고, 자동진압설비의 설치구역은 가장 큰 스프링클러나 물분무설비가 작동할 때의 방출량을 더하여 계산하며, 소방대에서 사용하는 예상 소화용수도 별도로 고려하여 방출수의 예상 최대 잔존높이 이내로 유지될 수 있도록 배수설비를 충분히 설치한다. 방사성물질의 오염구역 내에서 방사된 소화수는 액체 방사성 폐기물 처리계통을 통하여 방사성물질을 제거한 후 외부로 배출해야 한다.
- (e) 발전소의 한 계통이 손상되면서 상호 연관되거나 보조 역할을 하고 있는 다른 계통에 연쇄적인 피해를 줄 수 있는 가능성을 평가한다. 예를들면 냉각수계통이나 압축공기계통의 손상은 이들을 사용하고 있는 다른 계통의 운전에 영향을 미칠 수 있는 것이다.
- (f) 설계기준 화재의 결과에 따라 화재가 그 구역 내로 한정될 수 있는 가능성을 검토하고, 손상되지 않은 계통과 기기로 원자로 안전정지 기능을 적절히 수행할 수 있는 가능성을 평가하며, 화재에 의하여 방사성물질의 누출이나 유독성 화학물질의 유출로 주변 환경이 받는 영향을 평가한다.
- (g) 설계기준 화재의 결과로 인한 운전원과 작업원의 인명 안전 여부를 평가한다.

(h) 설계기준 화재에 따른 경제적인 손실을 평가한다.

- (2) 설치되는 소방설비의 합리성 평가에서 설계 취약점을 확인하고 적어도 한가지 이상의 보조수단으로의 소방설비를 사용할 수 있어야 한다.
 - (a) 화재가 발생했을 때 화재 감지설비와 진압설비가 어떤 이유에서 제기능을 수행하지 못할 정도로 손상되었다면 발전소의 안전을 위한 심층방호 개념으로 다른 화재 방호수단을 강구한다.
 - (b) 화재시 신뢰성이 있어야 하는 방호벽이 내화도의 문제나 화재하중의 증가 또는 방화문이나 방화담퍼의 개방으로 인하여 파손되는 경우에 화재에 의한 영향을 감소시키기 위하여 소화진압설비를 사용하거나 화재시 방출되는 연기와 열을 배출하여서 방호벽을 파손하는 화재에 대응하거나 방호개념을 적용해야 한다.

6. 원자력발전소 화재사건분석

원자력발전소에서 발생 가능한 모든 사고를 고려하여 위험도를 종합적이고 체계적으로 평가하는 확률론적 안전성평가는 기기의 기계적 고장, 기기의 이용불능 조건, 운전원의 실수에 의한 고장등과 같이 발생가능한 모든 사고를 고려하여 위험도를 정량화 하는 것이다. 이런 사건분석에는 계통분석, 신뢰도분석, 사고추이분석과 같은 내부사건 분석(Internal Event Analysis)과 지진분석, 화재분석, 홍수분석, 극태풍분석과 같이 외부적 요인에 의한 외부사건 분석(External Event Analysis)이 있다.

여기서 설명하는 외부사건 중에서 화재사건의 분석은 화재사고의 거동을 이해하고, 화재사건에 의한 발생가능한 주요 노심손상 사고 추이를 파악하며, 화재사건에 대한 종합적인 안전성을 평가하여 화재에 대한 취약점을 도출하고 화재사고로부터 원자력발전소의 안전 수준을 향상시킬 수 있는 설계나 설비개선 및 대응 운전절차를 제시하고자 수행하는 것이다.

화재사건에 대한 확률론적 안전성 분석을 위한 수행단계는 다음과 같다.

1) 발전소에 화재와 관련되는 자료를 수집하여, 화재구역내에서 발생 가능한 화재의 영향을 평가하고 이를 정성적으로 선별하고, 이러한 정성적 선별분석에서 선정된 화재구역에 대해서는 보수적인 가정을 사용하여 예상 화재 시나리오가 노심손상빈도에 미치는 영향을 판단하기 위하여 정량적으로 선별분석을 수행한다. 2) 선별분석 단계에서 잠재적으로 중요하다고 판단된 화재구역에 대하여 보수성을 가능한한 배제하여 현실성 있는 자료로써 상세하게 분석을 수행하며, 이 분석 단계의 목적은 결정론적 방법과 확률론적 방법을 사용하여 소방대상물이 손상을 받는데 걸리는 시간을 예측하고 화재의 성장 가능성과 단계를 평가하는 것이다. 3) 마지막 단계는 불확실성 인자의 사용에 따른 분석의 타당성을 검토하기 위하여 민감도분석 및 불확실성 분석을 수행한다.

이러한 안전성분석의 결과에서 구역내의 모든 점화원에 의한 각각의 화재 성장단계의 기여도가 합산되어 해당구역의 전체 노심손상빈도를 산출하면, 화재에 의한 노심손상빈도가 대체로 전체의 30%~40% 정도로 나타나고 있으며, 그중에서 주 제어실, 제어반실, 스위치기어실이 화재에 가장 취약한 구역이 되고, 전선 관통부실 및 전선 밀집 포설구역도 상당한 주의를 요하는 구역으로 도출된다.

6.1 화재사건의 선별분석

화재사건 분석은 5장에서 언급한 화재위험성 평가에 따라 화재구역내의 화재하중과 점화원 및 화재구역내의 안전정지에 관련되는 모든 계통과 기기등을 파악하고 이들 계통과 기의 고장이나 손상이 발전소 운전에 미치는 영향과 화재가 발생하는 경우에 인접구역에 화재전파 가능성 등의 화재사고 추이를 분석한다.

6.1.1 정성적 선별분석

선별분석은 보수적인 가정을 사용하여 보다 세밀한 분석이 요구되는 화재구역을 선정하기 위하여 수행되는 것이며, 화재에 노출되는 모든 기기는 화재의 크기에 상관 없이 기기 고유의 기능을 상실한다고 가정하게 된다. 이때 특정구역내 화재

또는 타 구역으로부터의 화재 전파가 안전정지 기기에 손상을 주지 않고, 기기의 오동작 가능성을 초래하지 않으며 발전소 정지를 유발시키지 않을 경우에는, 발전소 위험도에 영향을 미치지 않는다고 가정하여 해당구역을 상세분석 대상에서 제외하게 된다.

화재구역간의 화재 전파 가능성은 충분한 양의 가연성 물질이 존재해야 하고, 자동 또는 수동 화재진압설비의 작동이 실패하며, 방화문, 방화 덩어, 관통부의 밀봉재등이 임의 고장 또는 운전원 오류에 의해 차폐 기능을 상실하였을 때 존재하고, 화재 전파 가능성의 평가는 인접한 구역으로만 화재가 전파된다고 가정한다.

6.1.2 정량적 선별분석

화재구역과 관련된 정보와 화재 시나리오를 이용하여 정성적 선별분석에서 선정된 구역을 체계적이고 정량적인 방법으로 선별분석의 과정을 다음과 같이 수행하여 노심손상 빈도에 중요하게 기여하는 구역을 선정한다.

(1) 기존 발전소의 화재경험과 화재구역내의 기기와 가연성 물질량에 따른 미국 경수로형 발전소의 화재사고 발생빈도의 EPRI 데이터 베이스(Data Base)를 이용하여, 유사한 특성을 갖는 화재구역의 화재발생빈도(F_i)을 산출하며, 데이터가 부족하여 직접 화재빈도를 구하기가 어려운 구역은 점화원의 형태별로 화재발생빈도(F_{id})를 구한 후 그 구역의 전체 화재빈도를 산출한다.

(2) 인접한 구역에서 전파되는 화재에 의하여 그구역의 기기나 계통이 손상받을 가능성은 화재성장시간, 설치된 소화감지기, 화재진압계통, 소방대의 조치방법 등에 따르게 되고, 구역내의 실제화재보다 설계화재 등급이 큰 경우에 화재방호장치에 대한 실패 확률로써 규정값을 사용하고 작은 경우에는 화재방호를 실패한다고 본다.

(3) 특정 구역의 화재로 인하여 발전소에서 가장 심각하게 영향을 미치는 초기사건(Initiating Events)을 선정하여야 하며, 일반적으로 고려되는 초기사건으로는 원자로의

자동/수동정지, 터빈정지, 주급수상실, 주중기 격리밸브 닫힘으로 발생하는 일반과도사건(Uncomplicated Transients), 화재로 인한 소외전원 상실사고(Loss of Off-Site Power), 압력방출 밸브의 개방, 냉각재 펌프의 밀봉주입 상실 등으로 야기되는 원자로 냉각재 상실사고(Loss of Coolant Accidents) 등을 고려할 수 있다. 선별분석에서는 화재구역과 화재가 전파된 구역의 모든 기기와 전선은 손상 받는다고 가정하고, 안전관련계통, 동력변환계통 및 소외전원 공급계통의 기능이 있는 기기와 관련설비의 설치구역과 위치를 파악해야 한다.

- (4) 화재로 인한 사고추이 빈도의 정량화를 위하여 사고경위를 도형으로 간략히 표현한 사건수목(Event Tree)과 계통분석을 위하여 사고경위별 평가분석을 표현한 고장수목(Fault Tree)을 구성한 후 이에 따라 구역별로 각 화재구역을 정량화하여 화재가 발생하였을 때의 조건부 노심손상확률(P_{CCDP})을 계산하고, 해당 화재구역에서 화재에 의한 노심손상빈도(CDF_i)는 화재발생 빈도와 조건부 노심손상확률로부터 산출한다.

$$\text{노심손상빈도 } CDF_i = F_i \times P_{CCDP}$$

이때 상세분석을 결정하는 선별기준으로 화재사고 추이 빈도값이 내부사건 분석에서의 전체 노심손상 빈도(CDF_i)의 선별기준값 이상이면 상세분석을 수행하기 위한 주요구역으로 선정하게 되지만, 그이하의 값에서도 필요한 경우에는 주요구역으로 선정할 수 있다.

6.2 화재사건의 상세분석

상세분석에서는 선별분석에서 노심손상 빈도가 크다고 선정된 화재구역에 대하여 현실적인 자료를 근거로한 분석을 수행한다. 선별분석에서는 화재가 발생하는 경우에 화재구역내의 모든 기기가 즉시 손상받는 것으로 가정하고 노심손상빈도를 계산하였지만, 상세분석에서는 대상기기 또는 전

선이 손상받기까지의 화재 성장 중간단계의 손상 가능성을 고려하고, 이의 영향을 평가하며, 발전소 화재사고 발생빈도의 고유데이터에 근거하여 계산한다. 또한 상세분석에서는 화재에 의해 영향을 받지 않는 구역에 설치된 밸브의 조작과 같은 현장 회복조치와 진압과정을 동시에 고려하게 된다.

- (1) 상세분석을 위해서는 화재구역의 특성에 맞는 화재 시나리오를 작성하여야 하며, 각 화재구역의 화재 및 다른 화재구역으로의 전파와 관련해서 일반적으로 3,4개의 화재 시나리오가 선정되어 화재손상단계로 이루어진다. 구역내 존재하는 개개의 점화원은 독립적으로 분석되나 화재 성장율과 화재 손상단계가 동일할 경우는 여러개의 점화원을 동시에 고려할 수 있다.
- (2) 특정한 장소의 화재에서 일정한 거리에 있는 기기가 손상받기까지의 시간을 결정론적 방법으로 계산하기 위하여 컴퓨터(COMPBRN IIIe-EPRI 발행)를 사용하고, 화재진압 가능시간 내에 중요기구나 전선의 손상을 초래할 수 있는 특정 점화원의 영향범위를 예측하게 된다. 이는 화재구역의 크기, 분석대상물과 점화원의 위치, 화염온도, 열속 및 고온가스층 온도 등의 열적상태의 특성을 입력자료로 하여 공간과 시간의 함수로 표현한다.
- (3) 화재로 인하여 일정한 거리에 있는 분석 대상물이 손상받는 시간이 결정되면, 화재 감지기의 반응시간, 화재감지기와 자동소화설비의 신뢰도 및 수동진압 가능성을 고려하여, 그 시간내에 화재를 감지하고 진압할 수 있는 가능성을 확률적으로 평가한다. 자동소화설비에 의한 화재진압의 경우, 분석 대상물이 손상받기 전에 소화설비의 작동이 가능하면 자동소화설비는 EPRI의 신빙성 관련자료(Reliability Data)에서 제시된 실패확률에 따라 고장난다고 가정하게 된다. 자동진압설비의 작동이 실패하였을 경우에는 이에 대한 회복 조치 가능성을 각 화재

손상 단계별로 분석한다. 수동 화재진압 가능성은 화재 발생 지점, 발전소내의 소방훈련 정도 등에 따라 특성을 달리하기 때문에 수동 화재진압 모델을 구성하는 경우에는 특별한 주의를 해야한다.

이와 같은 상세분석 결과를 토대로 하여 어느 구역에서 특정 화재손상단계에 도달할 확률 $Q(FDS)_i$ 는 다음식으로 표시된다.

$$Q(FDS)_i = \int_0^{\infty} f_{ix}(t) (1 - F_{ix}(t)) dt$$

여기서, $F_{ix}(t)$: 시간 t 이전에 화재진압이 성공할 확률이며,

$f_{ix}(t)$: 화재손상단계(i)에 도달할 화재 지속시간이 t와 t+dt 사이에 있을 확률.

화재손상단계 도달확률($Q(FDS)_i$)은 시간 내에 화재를 진압할 확률에 따르지만, 여기에는 화재의 감시 및 진압, 소방설비 실패 확률, 소방대 조치시간, 감지기 응답시간 등의 불확실성이 존재하게 된다. 이에 따라서 손상단계 도달시간에 대한 분포 ($f_{ix}(t)$)를 얻기 위해서 가연성물질의 배치와 발전소 구역의 초기화재의 크기, 전선이나 가연성유류의 특성과 같은 입력값에 따라 특성을 변화시키면서 분석대상의 손상단계에 도달하는 시간을 분석한다.

화재진압실패 확률($1 - F_{ix}(t)$)은 화재 감시 시간과 진압시간 이내에 진압하지 못할 가능성과 화재감지나 진압시스템의 기계적인 실패 및 진압설비가 작동했으나 적절히 화재를 진압하지 못하는 형태를 고려하고, 화재감지와 진압시스템의 실패확률은 시간의 함수이므로 화재손상 시간의 범위 내에서 단순화된 임의 기기의 고장확률을 사용하여 불연속적 시간 간격으로 정량화하여 선정하게 된다.

- (4) 각각의 점화원과 화재손상단계에 대한 노심손상빈도는 각 점화원의 화재 발생빈도, 특정 화재손상단계 이전에 화재를 진압하

지 못할 확률, 그리고 화재로 인한 기기 손상에 따른 조건부 노심손상확률을 종합한 화재 사건 수목을 구성하여 계산한다. 화재 손상 항목을 고려한 단순 고장수목은 정량적 선별 과정에서 사용한 방법과 동일한 것을 사용하나 운전원의 기기 회복을 위한 조작능력과 운전오류 등은 화재 시나리오에 대하여 각각으로 평가한다.

6.3 화재사건의 민감도분석

불확실성 및 민감도분석은 사고추이 정량화과정을 통하여 도출된 분석 결과에 대한 불확실성에 대한 평가와 가정사항이나 인수값의 변화가 그 결과에 미치는 영향을 파악하는 것이며, 화재분석에 관련된 주요 불확실성 인자는 화재빈도, 화재진압 확률, 화재장벽 실패확률, 운전원의 복구조치가 있으며 이들 인자의 변화를 통한 민감도분석을 수행하여 전체분석 결과의 타당성을 확인하는 것이다.

7. 원자력발전소 안전성평가

7.1 안전성 기능의 개요

(1) 원자력발전소 안전계통의 개념

원자력발전소에서의 안전관련 계통과 구조물에는 정상운전계통의 고장이나 자연발생 현상에 의하여 발생한 사고의 영향을 줄이기 위하여 능동적인 안전 기능을 수행하는 계통과 구조물이 있고, 정상운전 동안에 방사성 물질을 규정된 구역 내로 정치시키며 방사선 안전기능을 수행하는 수동적인 개념의 안전관련 계통과 구조물이 있다. 이러한 계통이나 구조물의 손상은 정상적인 허용누설값을 초과하게 되거나, 사고의 결과 이 계통이 파손되면 다른 안전관련 계통의 방사선 안전기능에 영향을 미칠 수 있는 것이다.

(2) 안전정지능력

- (a) 발전소내의 어느 한 곳에서 화재가 발생하여도 다른 구역에서 안전정지 조건을 유지하면서 충분히 운전이 가능하도록 해야한다. 발전소의 안전정지 시키기 위

한 운전조건으로는 고온정지 운전과 저온정지 운전이 있다. 원자로가 정지하기 위하여 미입계상태에서 부반응도를 유지하면서 원자로내의 잔열을 제거하여 1차 냉각수 온도가 350°F 정도가 될 때까지의 운전이 고온정지 운전이고, 잔열제거를 통하여 1차 냉각수 온도를 200°F 이하의 상온으로 낮추는 것이 저온정지 운전이다. 이때 주제어실이나 2차 제어실에서 원자로의 고온정지 운전을 할 때에, 사용되는 다중방호 개념으로 설계된 설비들 중의 적어도 하나는 화재에 영향을 받지 않아야 하고, 저온정지 운전에서 사용되는 계통의 모두가 단일 화재에 의하여 손상을 받은 경우에는 최소한 72시간 이내에 수리가 가능해야 한다.

- (b) 고온정지를 위한 다중안전정지 계통이 동일구역내에 존재하면 이들 계통은 3시간 이상의 내화능력을 가진 방화벽으로 격리하거나, 1시간 이상의 내화능력을 가진 방화벽으로 보호하고 그 구역에 화재감지기 와 화재진압설비를 설치하거나, 관련기기들 사이의 회로를 수평으로 20ft 이상 격리하여 설치하고 그 사이에 가연성물질이 없도록 하며 그 구역에 화재감지기와 화재진압설비를 설치한다.
 - (c) 다중개념의 안전정지 계통이 설치된 장소가 상기의 요건에 만족시키지 못하거나, 동일 화재구역 내에 존재하는 다중 안전정지 계통의 화재진압과정에서 또는 화재진압계통의 파손이나 오동작으로 손상을 받을 가능성이 있는 장소에는 독립적인 보조정지 설비와 관련회로를 설치한다.
- (3) 방사선 안전을 위한 물리적 격리 설계 개념
- (a) 예상되는 사고나 화재로 인하여 방사선 안전관련 계통의 어느 하나를 사용할 수 없을 경우, 안전계통 상호간에 영향을 주지 않도록 병렬로 설치하여 독립성을 부여하며 안전정지관련 계통과 기기는 보호벽이나 다른 방법으로 물리적 및 기능

적으로 격리하여 외부에 방사선이 제한적인 값 이상 누출되지 않도록 규정적으로 유도하는 것이다.

- (b) 발전소의 설계에서 고려되는 사고에 대한 안전관련 계통 상호간의 독립성을 유지하기 위해서는 발전소 계통을 정상운전시 방사선 안전기능 및 전력 생산기능을 수행하는 계통과, 사고를 감소시키기 위한 방사선 안전기능을 수행하는 계통으로써 정상운전 중에는 어느 기능도 수행하지 않고 사고가 발생할 경우에만 작동하는 계통으로 분리하며 다중설계 개념에 따라 동일한 기능을 수행하는 설비를 다중으로 마련해야 한다.

7.2 안전성 기능의 평가기준

원자력발전소의 안전성의 목적은 정상운전의 경우나 사고의 경우에 효과적인 방사선 방어를 확립하고 유지하여 발전소 종사자, 일반대중 및 자연환경을 보호하는 것이며, 안전성 목적을 달성하기 위한 방법의 하나로 화재위험성 평가를 수행하여 다음과 같이 안전관련 기능이 유지되도록 한다.

(1) 원자로 안전정지 기능

원자로 안전정지 기능에는 원자로의 반응도 제어기능과 냉각재의 유지와 보충의 기능이 있으며, 반응도 제어기능으로는 경수로형의 경우 원자로 제어계통과 봉산을 주입하여 반응도를 조절하는 기능이 있고, 중수로형에는 안전정지계통과 독극물인 카들리움을 주입하여 반응도를 조절하는 계통이 있다. 또한 냉각재의 유지와 보충의 기능은 가압기(Pressurizer) 내의 수위가 정상위치에 유지할 수 있도록 해야 하며, 이러한 계통의 각 요소는 물리적 분리개념에 의해 상호간에 영향이 없도록 분리하여 설치되고 주제어실까지의 제어 및 통제 전선은 다중으로 설계되고 분리된 경로에 따라 포설되어야 한다.

주중기공급 계통과 주급수계통은 원자로 냉각(열수송)계통이 비정상적인 상태에서 원자로를 정지시킬 때 비상정지 냉각수계

통, 비상냉각수계통, 비상노심 냉각계통이 정상적으로 장기간 동안 열제거 기능을 수행할 때까지 초기 발생열을 제거하기 위해 과열증기를 응축기나 대기로 방출하면서 안전정지 기능을 보조하게 되며, 보조급수 계통은 원자로가 정지하고 상용전원의 상실이나 주급수계통의 기능이 상실될 때에 정상적인 냉각정지 기능이 작동될 때까지 증기발생기에 급수를 공급하면서 고온정지 운전을 한다.

(2) 원자로의 잔열제거 기능

원자로의 운전정지 후에는 원자로 내의 잔열과 핵분열 생성물질에 의한 붕괴열을 제거하여 원자로내의 온도 상승을 억제하면서 핵연료가 손상되지 않도록 하는 기능이 상온정지 상태까지 계속 유지되어야 하며, 이에 관련된 다중계통이나 기기중 적어도 하나는 화재에 영향을 받아서는 안된다. 잔열 제거기능을 수행하는 계통으로는 경수로형에서는 정지냉각계통이나 잔열제거계통, 주증기계통, 안전주입계통, 보조급수계통이 있고 중수로형에는 주증기계통, 급수계통, 비상냉각수 공급계통과 비상정지 냉각수계통이 있다. 이들 계통은 단일화재로 동일한 기능을 갖는 계통 모두가 영향을 받지 않도록 분리하여 설치한다.

비상노심 냉각계통(안전주입계통)은 냉각재 상실사고나 2차측 냉각재 상실사고로 인하여 정상절차에 의한 원자로 노심의 냉각이 불가능해지면 과열에 의한 핵연료와 원자로의 손상을 막기 위해, 저장중인 냉각수 저장탱크에서 즉각적으로 냉각수(경수로형은 고농도의 붕산수를 함유한 냉각수)를 공급하여 원자로를 미임계상태로 유지하는 기능을 수행한다.

(3) 주제어 및 감시/통제설비의 기능

주제어실은 운전원과 제어기기를 보호하기 위하여 사고에 따른 위험물로부터 방어되고 방사선을 차단하며, 방사선 준위와 화재 상태를 감시할 수 있어야 한다. 또한 안전 관련 계통의 기능을 유지하고 운전원이 발

전소의 상태를 인지하여 정확한 운전조작을 실행할 수 있도록 공기청정계통, 비상조명설비 등을 설치하고 필요한 계기와 제어설비가 화재의 영향을 받지 않도록 한다.

주제어실에는 최소한의 발전소 안전정지 운전을 위하여 안전정지 계통을 관할하는 계기류, 가압기의 압력과 수위, 원자로 냉각재의 온도와 노심 출구온도, 증기발생기의 압력과 수위, 안전정지에 사용되는 저장탱크의 수위를 제어할 기능이 있어야 하며, 중수로형에서는 안전 관련계통을 제어하는 기능을 주제어실과 2차 제어실에 중복으로 설치하고 단일화재로 양쪽제어실이 모두 손상되지 않도록 분리설치 한다.

(4) 안전기능의 보조설비

상기의 안전기능을 수행하기 위하여 필요한 보조설비는 비상용전원과 전원 공급설비, 공기조화설비, 냉각수 및 압축공기를 공급하는 기기나 계통이 기능을 상실하는 경우 결국은 방사선 안전관련 목적을 위한 운전이 불가능하거나 오동작을 유발할 수도 있으므로 다중보호설비의 적어도 하나는 화재로부터 손상받지 않아야 한다.

또한, 방사능 방호 차폐설비는 격납건물 내부의 냉각재 상실사고, 주증기 배관 파단사고 혹은 핵연료 취급사고와 같은 대형사고가 발생하는 경우, 핵분열 생성물이 외부로 누출되는 것을 방지하기 위하여 격납용기 경계부의 기밀성을 확보하고 사고 완화에 필요한 필수계통 이외에는 격납용기 경계를 차단하여 방사선 오염구역을 철저히 격리 구분한다. 방사선누출 방어벽이나 그와 관련되는 방사선 차폐계통은 화재로부터 안전해야 하고 그러한 구역의 경계가 파괴되는 경우를 대비하여 2차의 방호계통을 형성하고 있어야 한다.

7.3 안전성 기능의 평가방법

각 방화구역별로 그 구역의 연소물질에 따라 화재를 예상하고 초기 고찰에서 그 구역내의 모든 것이 손상된다고 가정하여 원자로 안전정지에 관련된 주요 기기나 설비가 있는 구역은 화재에 의

하여 다중설비의 기능이나 제2의 원자로 안전정지 기능을 수행하는 구역과 상호간에 영향을 미칠 수 있는지를 평가한다.

만약 안전정지에 관련된 기기나 설비가 다중설비의 기능이나 제2의 원자로 안전정지 기능을 갖는 기기나 설비와 상호 영향을 미치지 않는 경우에는 원자로 안전정지 기능을 만족하게 수행하지만, 안전정지에 관련된 기기나 설비가 다중설비의 기능과 상호 영향을 미친다고 판단되면 화재전파의 가능성을 평가하여 화재전파를 억제하는 조치를 취하여 본래의 방사선 안전기능의 작동에 이상이 없다는 것을 보증해야 한다.

8. 맺음말

국내의 제반여건상 안정적인 에너지 공급을 위하여 원자력발전소의 건설이 계속되고 있는 상황에서 일반대중의 안전과 건강을 위하여 발전소를 보다 안전하고 신뢰성 있는 체제로 구축하는 것이 중요한 일이고, 이에 따른 화재 안전성 분석은 원자력발전소의 전반적인 안전분석의 일환으로써 상당히 중요한 부분이 되고 있으며, 안전성을 최우선으로 하고 있는 원자력발전소에서는 발전소 운전에 영향을 줄 수 있는 화재에 대하여 적절히 대응함으로써 발전소의 불시 정지에 따른 손실과 방사선 안전계통에 영향을 미치지 않도록 많은 노력을 기울이고 있다. 이는 화재를 단독적인 사고로써 뿐만 아니라 방사선 누출사고 및 지진등과 같이 발생 가능한 모든 사고를 고려한 종합적인 개념으로 방호체제를 설정하여 설계의 초기단계에서부터 세심하게 고려되어야 한다.

일반적으로 화재는 대수롭지 않던 곳에서도 발생하는 의외성이 있기 때문에 발전소의 설계시 화재가 발생할 수 있는 원인 제공을 철저히 차단하여 화재 하중을 감소시키고 발화의 가능성을 최소화하는 것이 가장 좋은 방법이며, 발전소의 설계 단계 이후의 운전이나 유지보수 단계에서도 보다 객관적이고 현실적인 정보를 취합하고 경험적인 업무처리를 흡수하여 화재 위험성의 평가방법을 계속해서 보완할 필요가 있는 것이다.

참고 문헌

1. KOPEC, 영광 3,4호기 원자력발전소의 설계기준서와 계통설명서
2. U.S. Nuclear Regulatory Commission, Standards Review Plan BTP CMEB 9.5-1-Fire Protection System (1981)
3. U.S. Nuclear Regulatory Commission, Regulatory Guide 1.120-Nuclear Power Plant-Fire Protection Guidelines (1977)
4. National Fire Code, NFPA 803-Standard for Fire Protection for Light Water Nuclear Power Plants (1993)
5. Sargent & Lundy Transfer Technology Course No. CL-MEC-3 Fire Hazard and Safe Shutdown Analysis
6. KOPEC, Fire Protection Report-Fire Hazard Analysis 영광 3,4호기 원자력발전소 (1994)
7. National Nuclear Risks Insurance Pools and Associations, International Guidelines for the Fire Protection of Nuclear Power Plant (1983)
8. Atomic Energy Canada Limited, 월성 원자력발전소의 설계기준서와 계통설명서
9. Atomic Energy Canada Limited, CANDU Safety Design Guide (1994)
10. Canadian Standards Association, CAN/CSA-N293-M87 Fire Protection For CANDU Nuclear Power Plant (1987)
11. CANATOM/KOPEC, 월성원자력 발전소 Fire Hazard Assessment (1995)
12. Atomic Energy Canada Limited, Fire Hazard Assessment for Reactor Building (1994)
13. KEPSCO, 원자력발전소 안전성점검연구(외부사건분석) 보고서 영광 3,4호기 발전소 (1993)
14. KEPSCO, 고리 3 & 4 영광 1 & 2호기-확률론적 안전성 평가 (1992)
15. Electric Power Research Institute, TR-100370s, Fire Induced Vulnerability Evaluation, April (1992)
16. 한국원자력 안전위원회, 안전심사지침 화재방호 기준 9.5-1 (1992)
17. NFPA, Industrial Fire Hazard Handbook-NFPA 3rd Edition (1990)
18. Electric Power Research Institute, NSAC

- 178L, Fire Events Data Base for US Nuclear Power Plants, (1992)
19. Electric Power Research Institute, NSAC 179L, Automatic and Manual Suppression Reliability Data for Nuclear Power Plants
- Fire Risk Analysis, February (1994)
20. Electric Power Research Institute, Advanced Light Water Reactor Utility Requirements Document Volume II, Chapter 1, Appendix A, December, (1992)