



## 원전의 화재안전정지능력분석

정창기\*, 이복영\*\*, 김기옥\*\*, 박찬호\*\*\*, 안병호\*\*\*

### I. 연구배경

1975년 Brown Ferry 원자력발전소에서 발생한 화재사고 이후에 미국에서는 화재방호 규정 (10CFR50.48 Fire Protection)이 제정되어 건설 또는 가동중인 원자력발전소는 이 규정에 따라 화재방호 프로그램을 이행하고, 1979년 이전에 건설된 원자력발전소에서는 10CFR50 Appendix R에 따라 화재방호설비에 대한 안전성을 평가하고 불만족 사항에 대해서는 설비를 보완할 것을 의무화하였다. 미국의 모든 원전에서는 이 규정에 따라 화재에 대한 안전정지능력을 확보하기 위해 원격정지제어반(RSP, Remote shutdown panel) 보강 또는 전용정지제어반(DSP Dedicated Shutdown Panel) 등의 개선설비를 수행하였다. 원자력발전소는 일반발전소와는 달리 발전을 정지하더라도 잔열(decay heat)이 발생하므로 원자로를 정지시킨 후에도 당분간은 계속해서 냉각이 필요하다. 잔열제거 혹은 핵연료 냉각에 실패하게 되면 핵연료가 녹아 핵연료 안에 포함된 방사능이 누출될 수 있으므로 원자력발전소에서의 안전정지는 매우 중요한 사항이다. 원자력발전소의 안전정지능력분석은 필수적인 구조물, 계통 및 기기에 대한 화재피해를 제한하는 방법을 제공하여 원자로의 안전정지능력을 확보하고, 방사능 누출을 방지하자는 것을

주된 목적으로 하고 있다.

본고에서는 원자력발전소의 화재안전측면에서 원전 화재시 안전정지능력확보를 위한 방안을 검토해보고자 한다

### II. 원자로 안전정지 분석의 개요

#### 1. 정의

원자력 발전소의 안전정지분석을 이해하기 위하여 몇가지 용어를 알아둘 필요가 있다

##### 가. 안전정지요건

안전정지 상태란 다음요건이 충족되는 상태를 말한다.

- 미임계 상태의 유지
- 1차계통 냉각재의 유량 및 압력의 감시 및 제어
- 붕괴열의 제거

##### 나. 고온정지(Hot Shutdown)

원자로가 미임계상태에 있으며, 1차 냉각재계통의 평균온도가 176.7℃이상인 원자력발전소상태를 말한다.

##### 다. 저온정지(Cold Shutdown)

원자로가 미임계상태에 있으며, 1차 냉각재 계통의 평균온도가 98.9℃이하인 원자력발전소 상태를 말한다.

주) \*개발연구팀장, \*\*방재설비부 선임연구원, \*\*\*방재설비부 연구원

## 2. 안전정지능력의 확보요건

발전소 안전정지능력을 확보하기 위해서는 필요한 구조물이나 계통기기에 화재방호 설비를 설치하여야 하며, 이 설비들은 다음과 같이 화재로부터 안전관련기기를 보호하여야 한다.

- 가. 중앙제어실이나 원격정지제어반으로부터 원자로를 고온정지 상태로 유지하는데 필요한 계통 중 한 트레인은 화재로 인한 영향이 없어야 한다.
- 나. 중앙제어실이나 원격정지제어반으로부터 원자로를 저온정지 상태로 유지하는데 필요한 계통은 72시간 이내에 수리가 가능하여야 한다.

상기 가. 항의 기준을 만족시키기 위해 설치되는 다중트레인의 하나는 화재로 인한 영향을 받지 않도록 해야 한다. 만일, 격납건물 내·외부에서의 격리기준을 만족시키지 못할 경우에는 안전정지를 위한 보조수단을 그러한 화재구역의 케이블이나 계통기기 등과 독립적으로 설치하여야 한다.

## 3. 보조 안전정지능력의 확보요건

특정한 화재구역에 적용하는 보조 안전정지능력을 확보하기 위해서는 원자로의 미입계 반응도를 유지하고, 원자로 냉각재 용량을 유지하며, 가압경수로형 원자로에서는 고온대기(Hot standby) 상태로 유지하고 그후 72시간 이내에 저온정지 상태로 유지할 수 있어야 한다. 화재발생후 원자로 정지기간 중에 원자로 냉각재계통의 변수는 정상적인 AC 전원 상실시에 예상되는 값의 범위내에서 유지하여야 하며, 핵분열 생성물이 존재하는 압력 경계부의 건전성을 유지하여야 한다. 즉 핵연료 피복재에 손상 또는 일차

냉각재 경계나 격납용기 경계의 파손이 발생하지 않아야 한다.

이 때에 수행하는 원자로 정지 기능의 목표는 다음과 같다.

- 반응도 제어기능은 저온정지 반응도 조건을 유지할 수 있어야 한다.
- 원자로 냉각재 보충 기능은 가압기내의 수위지시계 범위 이내로 유지할 수 있어야 한다.
- 원자로 잔열제거 기능은 붕괴열을 제거할 수 있어야 한다.
- 원자로 상태 감시 기능은 위의 기능을 제어하고 수행하는데 필요한 여러가지 운전변수를 직접 읽을 수 있어야 한다.
- 지원 기능은 원자로 안전정지 기능에 사용되는 기기의 운전에 필요한 냉각이나 순환 기능을 수행할 수 있어야 한다.

## III. 가정사항 및 분석절차

### 1. 초기조건 및 가정사항

화재 안전정지 분석을 일관성 있게 수행하기 위해서는 아래와 같은 초기조건 및 가정사항을 전제로 한다.

#### (1) 초기조건

화재발생 또는 이에 따른 소의전원 상실시 발전소는 100%로 출력운전 중에 있으며, 안전정지에 필요한 기기는 기술사양서 (Technical Specification)의 운전 제한조건(LCO)에 따라 운전 가능한 상태에 있다. 그리고 운전원은 교대 근무 수칙 및 소방인력 요건에 따라 근무중에 있다.

#### (2) 가정사항

화재는 발전소 어느 장소에서도 발생할 수 있는



것으로 가정하며 발생한 화재가 발전소 화재방호 장치에 의해 밀폐될 경우 인접 화재구역 및 화재소구역으로의 전파는 고려하지 않으며 발전소내 두 호기에서 화재가 동시에 발생하는 것은 가정하지 않는다. 그러나 양 호기 공유설비에서의 화재가 발생한 경우에는 두 호기에 동시에 영향을 미칠 수 있다. 그리고 화재 발생시 화재에 의해 직접 나타나는 사건과 소외원상실을 제외하고 추가적인 단일고장(Single Failure)은 발생하지 않는다. 화재에 기인한 설계기준사고(Design Basis Accidents) 외에 독립적인 설계기준사고는 발생하지 않는 것으로 가정한다.

화재시 지진, 태풍, 침수 등 외부 자연재해는 없는 것으로 가정하며, 지진에 의한 화재도 마찬가지이다. 비상소집 절차에 의해 발전소 정지에 필요한 기기를 운전, 보수, 수리하기 위해 추가적인 인원의 동원이 가능하며, 밸브, 열교환기, 배관 등 수동적 기기들은 화재에 노출되더라도 건전성을 유지한다. 이러한 기기들은 화재진압 후 현장에서 운전 가능한 경우(예 : 밸브의 핸드휠) 사용될 수 있다. 밸브의 개폐변동, 전동기기의 정지/기동 등의 오작동(Spurious Operation)은 발생 가능성이 낮은 사건으로 간주하며, 화재에 의한 사건의 결과로 발생하는 오작동만이 화재와 동시에 발생한다고 보고 그 외의 오작동은 단일 사건으로 취급한다.

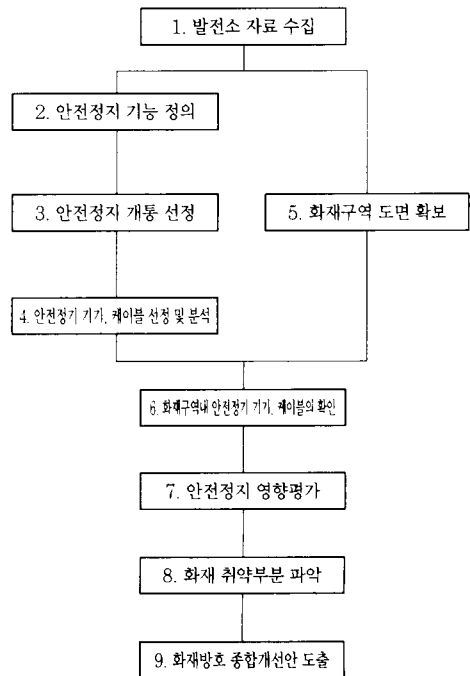
주제어실 화재에 의해 주제어실의 거주불능(Uninhabitability)이 초래되는 경우를 제외하고 주제어실에 근무자가 상주하고 있다. 주제어실 화재의 경우 주제어실 요원의 소개(Evacuation)를 가정하며 이때 주제어실 철수 전에 원자로가 자동 또는 수동으로 정지되고 제어봉의 삽입이 확인되는 것으로 본다. 안전정지에 필요한 모든 전동밸브(MOV)는 수동조작이 가능하다. 공압밸브(AOV)의 수동조작이 불가능한 경우, 조치에 이용가능한 시간이 충분하다면 질소통(Nitrogen Bottle)을 이용하여 조작이 가능하다.

정상시 닫혀 있는 수동밸브는 화재시 손상받지 않고 격리기능을 수행하는 것으로 본며, 모든 케이블에는 적절한 과전류 보호장치가 구비되어 있는 것으로 가정한다. 만일 구비되어 있지 않다면 안전정지분석 전 또는 후에 설치하는 것으로 본다.

정상시 닫혀 있는 수동밸브는 화재시 손상받지 않고 격리기능을 수행하는 것으로 본며, 모든 케이블에는 적절한 과전류 보호장치가 구비되어 있는 것으로 가정한다. 만일 구비되어 있지 않다면 안전정지분석 전 또는 후에 설치하는 것으로 본다.

## 2. 분석절차

가동중 원자력발전소 화재 안전정지능력분석의 단계를 도시하며 다음과 같다





가. 필요한 자료의 수집

안전정지 분석을 수행하기 위하여 필요한 자료를 수집한다. 수집대상 자료는 사용된 자료의 발행일자와 개정번호를 확인하여야 한다.

나. 안전정지 기능 정의

발전소 고온정지 및 저온정지를 달성하고 유지하는데 필요한 기능을 정의한다. 안전정지 기능의 목표는 화재 발생후 원자로 핵연료봉의 건전성을 유지하고 일차측 압력을 한계치 이내로 제한하는 것이다. 이 목표를 달성하기 위하여 다음과 같은 안전정지 기능이 요구된다.

■ 고온정지 기능

- 원자로 정지(Reactor Shutdown),

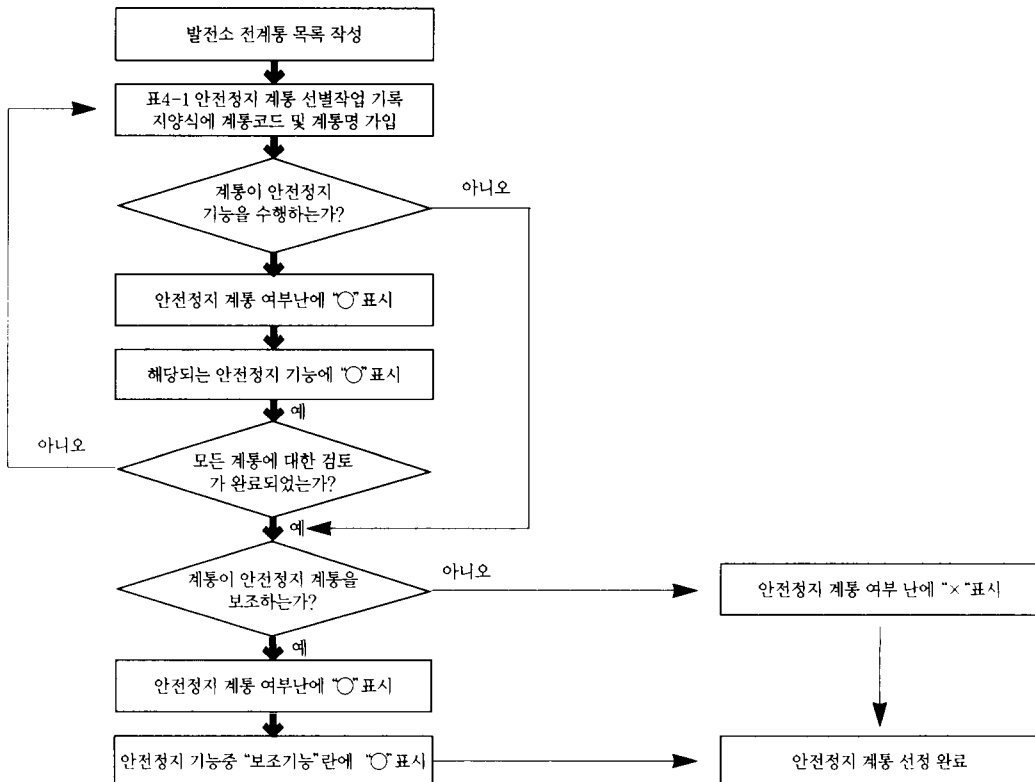
- 냉각재 수위조절(Inventory Control),
- 냉각재 압력조절(Pressure Control),
- 잔열 제거(Decay Heat Removal),
- 공정 감시(Process Monitoring),
- 보조 기능(Support Functions)

■ 저온정지기능

- 잔열 제거(Decay Heat Removal),
- 공정 감시(Process Monitoring),
- 보조 기능(Support Functions)

다. 안전정지 계통 선정

앞에서 정의된 안전정지 기능을 수행하는 발전소 계통들을 선정하는 단계를 도시하면 다음과 같다.



### (1) 안전정지계통

각각의 안전정지기능에 해당하는 안전정지계통에 관한 설명은 아래와 같다.

#### 원자로냉각재계통

원자로냉각재계통에는 가압기와 가압기방출탱크가 있으며 운전제어에 필요한 계측장비가 설치되어 있다. 계측장비로 각 루프마다 저온관 및 고온관 온도계가 있고 가압기 압력 및 수위 지시기가 있다. 가압기를 이용한 압력제어를 위하여 히터와 살수장치가 있다. 발전소에서 화재가 발생하면 소외전원이 상실되는 것으로 가정하므로 원자로냉각재펌프는 정지된다. 따라서 이때 잔열제거는 원자로냉각재의 자연순환(Natural Circulation)에 의해 이루어진다. 자연순환 상태에서 적절한 냉각재 유량과 열전달을 위하여는 일차측 및 이차측의 수위가 적절히 유지되어야 한다. 원자로냉각재계통 수위조절은 화학 및 체적제어계통의 충전유로 또는 안전주입 유로의 작동으로 이루어지며 이차측 수위는 보조급수계통과 주증기계통의 작동으로 조절된다.

#### 화학 및 체적제어계통

화학 및 체적제어계통의 충전부분은 발전소 정지시 붕산수를 원자로냉각재계통에 주입함으로써 반응도 제어와 원자로냉각재 수위유지의 두 가지 안전정지 기능을 동시에 수행한다. 정상적인 원자로정지 반응도는 제어봉의 삽입으로 제공되며 정지후 제논 붕괴와 발전소 냉각에 대한 반응도 보상을 위하여 붕산수 주입이 필요하다. 화학 및 체적제어계통 내에 저장되어 있는 붕산수의 양은 가장 큰 반응도를 갖는 제어봉의 완전 인출을 가정하고도 저온정지 농도에 필요한 양보다 많으며 또한 원자로를 고온정지 상태를 유

지하고 그 이후의 제논(Xenon)효과를 보상하기 위해 요구되는 양보다 많아야 한다.

#### 안전주입계통

안전주입계통은 원자로 정지시 화학 및 체적제어계통의 충전부분과 동일한 기능을 수행할 수 있으며 안전주입펌프, 핵연료 재장전수탱크, 그리고 부대 배관 및 밸브로 구성되어 있다. 발전소 정지시 안전주입계통을 이용하면 핵연료 재장전수 탱크로부터 붕산수를 받아 안전주입펌프를 이용하여 원자로냉각재계통 각 루프의 저온관으로 붕산수를 주입한다. 저온관 주입 외에 원자로용기에 직접 주입하는 라인도 구비되어 있다.

#### 잔열제거계통

잔열제거계통은 발전소 정지중 노심의 잔열을 제거하고 원자로냉각재계통의 온도를 낮추는 기능을 수행한다. 발전소 저온정지 중에는 원자로냉각재계통의 고온관에서 냉각재를 흡입하여 잔열제거펌프를 통하여 잔열제거 열교환기의 튜브측을 통과하여 저온관으로 주입된다.

#### 원자로 보충수계통

원자로 정지후 체적제어탱크 고갈시 원자로냉각재 수위 유지를 위한 냉각재 보충을 위하여 원자로 보충수계통을 이용할 수 있다.

#### 기기냉각수계통

기기냉각수계통은 발전소 정지시 잔열제거 열교환기를 통하여 원자로 내의 잔열을 제거하고 정상 출력운전시에 유출 열교환기 냉각을 담당하며 일차측 여러 기기에서 폐열을 회수한다. 회수된 열은 기기냉각수 열교환기를 통하여 기기냉각해수로 전달된다.

### 기기냉각해수계통

기기냉각해수계통은 해수를 취수하여 기기냉각수 열교환기를 통하여 기기냉각수계통으로부터 열을 제거하고 바다로 방출된다.

### 보조급수계통

보조급수계통은 발전소 정지후 고온대기 및 고온정지 기간중 일차측의 잔열을 제거하는 기능을 수행한다.

### 주증기계통

발전소 정지후 고온정지 및 냉각시 주증기계통의 수위와 압력이 허용치 이내로 유지되는 것이 필수적이다. 증기발생기의 수위는 보조급수계통을 이용하여 유지되며 압력은 주증기계통의 증기방출 설비를 이용하여 조절된다.

### 전원공급계통

발전소 정상운전시 공학적 안전부하 및 보조 부하의 전원은 주발전기로부터 보조변압기를 거쳐 공급된다. 주발전기의 기능이 상실되면 전원은 보조변압기로부터 기동변압기로 전환된다. 기동변압기는 154KV 송전망으로부터 전원을 공급받으며 발전소 기동 또는 정지시 필요한 전원을 공급한다. 소외전원이 상실되면 대기중인 디젤발전기가 자동으로 기동하여 공학적 안전설비에 전원을 공급하게 된다. 공학적 안전설비 전원계통은 채널 A와 채널 B, 2개의 독립적인 다중그룹으로 구성되어 있고 각 그룹은 4,160V, 480V, 118V AC, 125V DC 계통으로 구분된다. 직류계통은 회로차단기 제어와 필수 계측 및 제어용으로 사용된다. 소외전원이 상실되면 소외전원이 복구되거나 비상발전기가 이용 가능할 때까지 배터리가 직류계통에 전원을 공급한다. 계측 및

제어에 요구되는 118V 교류계통은 직류계통으로부터 인버터를 통하여 전기를 공급받는다.

### 공기조화계통

공기조화계통은 발전소 모든 지역에서 인원의 안전하고 쾌적한 작업환경과 기기의 운전환경요건을 위하여 주위 온도를 유지하는 계통으로 격납건물, 제어실, 보조건물, 배터리실, 기기냉각수 펌프실, 디젤발전기실, 터빈건물, 기기냉각해수 펌프실 등 건물별로 설치되어 있다.

### 냉수계통

냉수계통은 발전소 곳곳의 냉각코일에 냉수를 공급하며 안전관련 냉수계통과 비안전관련 냉수계통으로 구분되어 있다.

### 계기용 공기계통

압축공기계통은 서비스 공기계통과 계기용 공기계통으로 구분된다. 서비스 공기계통은 공기압축기 1대와 주변 필터, 냉각기, 습분분리기, 공기저장실로 구성되어 있고 발전소내 보수 및 기타 용도로 사용된다. 계기용 공기계통은 2대의 공기압축기와 주변 기기, 그리고 공기건조기로 구성되어 있고 공기로 구동되는 계측 및 제어기에 공기를 공급한다. 정상시 한 대의 공기압축기로 충분한 양의 계기용 공기를 공급하며 필요시 대기중인 공기압축기가 자동으로 기동된다. 그리고 계기용 공기계통의 압력이 90psig 이하로 떨어지면 서비스 공기와 계기용 공기를 연결하는 자동밸브가 열려 서비스 공기가 계기용 공기계통으로 공급된다.

### 소화계통

화재방호계통은 발전소내 화재시 감지, 경보, 소

화의 기능을 담당한다. 첫 번째 기능은 고정식 및 소화호스 라인에 적절한 양의 소화수를 공급하여 화재를 진압하고 화재에 노출된 기기를 냉각하며 화재가 인접 지역으로 전파하는 것을 방지하는 것이다. 두 번째 기능은 케이블 포설실 및 케이블 체이스에 설치된 자동식 스프링클러와 디젤발전기 일일연료유 탱크의 화재시 소방 시스템에 용수를 공급하여 해당 기능을 효율적으로 수행하도록 하는 것이다. 세 번째 기능은 소화전의 소화호스를 신속히 사용하여 화재를 진압하는 것이며, 네 번째 기능은 휴대용 소화기를 구비함으로써 소형 화재를 진압하는 것이다.

라. 안전정지 기기, 케이블 선정 및 분석

선정된 안전정지 계통을 기준으로 안전정지에 필요한 기기를 선정하고 이와 관련된 전원 및 케이블을 파악하여 목록을 작성한다. 이 단계에서 안전정지에 직접 관련되지 않은 회로의 손상으로 인한 2차적인 영향도 평가한다.

(1) 선정 지침(Guidelines)

안전정지 기기 및 케이블로 선정되는 기기는 다음과 같다.

- 계통 경계를 구성하는 밸브와 댐퍼는 화재에 의해 개폐상태가 변할 수 있는 경우 안전정지 기기에 포함된다.
- 계통 유로상에 위치한 밸브와 댐퍼는 안전정지 기기에 포함된다. 해당 밸브/댐퍼의 구동체도 기기의 일부로 고려된다.
- 설비보호를 위하여 설치된 동력구동의 방출밸브는 안전정지 기기에 포함된다.
- 탱크의 경우 입구관과 출구관에 대하여

그 기능 및 격리요건을 판단하여 탱크 수위 감소를 일으킬 수 있는 격리밸브는 안전정지 기기에 포함된다.

- 안전정지 기기와 안전/비안전 정지 기기 사이의 연동 회로를 검토하여 안전정지 기기를 추가한다.
- 안전정지 기능 수행에 전력이 요구되는 기기의 경우에는 배전반(Switchgear)을 포함한 전원공급 설비가 안전정지 기기에 포함된다.
- 배전반의 경우 그 전원공급 장치도 안전정지 기기에 포함된다.
- 공정감시 기능에 관하여는 안전정지 계통의 작동 및 제어를 위하여 충분한 최소한의 계장설비가 이용가능 하여야 한다.

(2) 케이블 분석

(가) 케이블 고장 형태

각 케이블에 대하여 손상시 안전정지 기기에 미치는 영향을 검토한다. 각 화재구역에 대하여 발생할 수 있는 모든 고장 형태를 파악하는 것이 중요하다. 화재분석에서 고려되는 고장 형태는 합선(Short Circuit), 지락(Short to Ground), 단선(Open Circuit), 통전 합선(Hot Short) 같이 4가지 형태로 구분된다.

(나) 연계회로 분석

발전소의 안전정지 능력에 영향을 미치는 연계회로(Associated Circuit)는 공통 전원, 공통 배선함, 오작동, 그리고 다중 고임피던스 문제의 4종류로 구분된다.

- 공통전원(Circuits Associated by Common Power Supply)

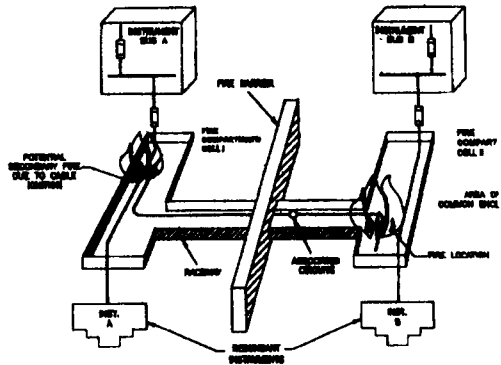


공통전원 문제는 비안전정지 기기 관련 케이블의 화재로 인하여 안전정지 기기에 공급되는 전원의 상실을 초래하는 것이다. 이런 사고는 안전정지 전원 공급을 위한 차단기나 퓨즈 등이 화재로 인하여 손상된 케이블의 차단기나 퓨즈 등과 적절하게 보호 협조되어 있지 않을 때 일어날 수 있다. 공통전원분석에서는 전원공급 기기로부터 전원을 공급받는 기기(케이블)가 화재로 손상 받았을 때 차단기, 퓨즈 및 기타 보호설비에 의하여 손상된 기기가 전원으로 부터 적절히 차단되어 전원공급 기기 자체의 건전성이 유지되는가를 분석한다. 또한 공통전원분석이 완료되면 공통배선함의 2차발화 문제는 자동적으로 해결된다.

#### ■ 공통 배선함 (Circuits Associated by Common Enclosure)

공통배선함의 경우에는 공통배선함의 2차 발화와 화재전파로 나눌 수 있다.

공통배선함의 2차 발화는 그림에서 보는 바와 같이 계기 B에서 발생한 화재는 전기적으로 보호조치가 적절하지 않은 경우 과전류로 인한 점화로 계기 A의 케이블에 2차 화재를 발생시키게 되고 결국 2개의 다중 트레인의 상실을 초래하게 되는 것이며, 화재전파는 한 구역에서의 화재가 케이블 피복재 등 가연성 물질을 통해 인접 구역으로 전파될 수 있다는, 공통배선함 고장모드의 한 형태이다. 공통배선함분석에서는 안전관련 케이블이 위치하는 배선함에 비안전관련 케이블이 존재하는가를 조사하고 또한 변류기의 화재영향을 분석한다.



#### ■ 기기의 오동작 (Circuits Associated by Spurious Operation)

MOV, SOV, AOV 또는 차단기 등은 화재로 인한 오동작 발생 가능성이 있으며 오동작시 안전정지에 지장을 초래할 수 있으므로 오동작이 유발될수 있는 기기를 선정하고 오동작 시 안전정지 기능에 미치는 영향을 분석한다.

#### ■ 다중 고임피던스

(Multiple High Impedance Fault)

연계회로의 또 다른 문제점은 하나의 전원에 연결된 모든 케이블이 손상되어 고임피던스 장애를 유발하는 것이다. 고임피던스 장애는 480V이상에서 발생하게 되며 수동조치, 보호장치 설치. 전기적인 보호협조분석에서 다중 고임피던스 장애 가능성 분석 등을 통해 해결이 가능하다.

#### (3) 격리요건 평가

10CFR50, App R, III.G에서는 안전정지에 중요한 구조물, 계통, 기기에는 아래 요건을 달성하기 위하여 화재방호시설을 설치하여야 하는데 이를 격납건물 내.외부로 나누어 규제하고 있으



며 그 주요내용은 다음과 같다.

(가) 격납건물 외부에서의 격리기준

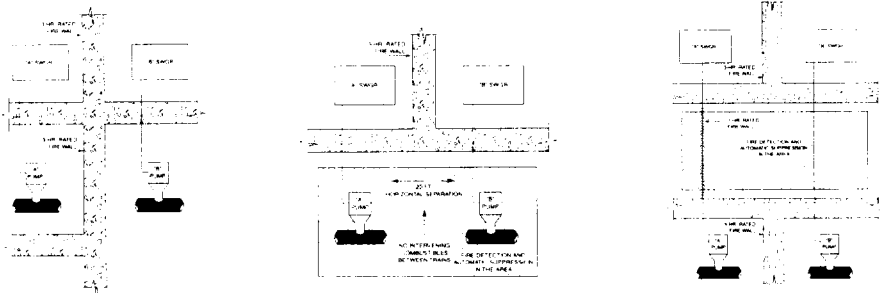
격납건물 외부(격납건물 내부를 제외한 그 외의 지역)에서 케이블 격리요건의 준수는 다음 요건 중 어느 하나를 충족해야 한다.

- (a) 다중트레인의 케이블, 기기 및 그와 연계된 비안전 관련회로는 3시간 내화등급의 방화벽으로 격리해야 한다.
- (b) 다중트레인의 케이블, 기기 및 그와 연

계된 비안전관련회로는 중간에 가연물이 나 화재위험이 없도록 하되 수평거리 20ft(6.1m) 이상 격리시켜야 하며, 화재감지장치 및 자동소화설비를 당해 화재지역에 추가 설치해야 한다.

- (c) 다중트레인의 케이블, 기기 및 그와 연계된 비안전관련회로는 1시간 내화등급의 방화체(Fire Barrier)로 둘러싸고(Enclosed) 화재감지장치 및 자동소화 설비를 당해 화재지역에 부설해야 한다.

격납건물 외부의 케이블 격리기준도



(a)

(b)

(c)

(나) 격납건물 내부에서의 격리기준

불활성화 되지 않은 격납건물 내부에는 격납건물 외부의 격리기준 중 어느 하나를 설치하거나 아래와 같은 화재방호수단 중 어느 하나를 설치해야 한다.

- (a) 다중 트레인의 케이블, 기기 및 비안전 관련 회로는 수평으로 20ft이상 격리하고 그 사이에 가연성 물질 등 화재위험이 없어야 한다.
- (b) 화재감지기와 자동화재진압계통을 당해 화재구역에 설치해야 한다.
- (c) 다중 트레인의 케이블, 기기 및 그와 연계된 비안전 관련 회로는 불연성의 복사열

차폐재에 의하여 격리되어야 한다

(4) 케이블의 내화특성 시험 및 분석

케이블의 내화특성을 확인하기 위해 발전소에서 사용중인 동일한 케이블을 사용하여 케이블의 내화시험을 수행하는 것이 필요하다. 이 시험을 통해 취득한 자료는 케이블의 화염전파 속도 계산, 적절한 물리적 이격거리 계산 등에 활용이 가능하다. 본 연구에서는 가동중 원전에서 사용 중인 것과 동일한 케이블(EPR/CSP)과 내화전선인 NFR-8을 확보하여 수직화염전파성 시험(IEEE 383), 화재시 화로의 건전성 시험(IEC 60331), 수평화염전파성 시험(UL 910)을 수행하



였다. 내화전선인 NFR-8 케이블은 IEC 60331 시험에서 케이블 피복재가 전소된 후 3시간 정도 통전 기능을 유지하고 있어 3시간 내화성능이 요구되는 곳에 격리요건 준수를 위해 사용이 가능한 것으로 나타났다. 또한 UL 910 시험 기준은 시간대별 온도변화와 단위시간당 화염확산 거리를 산출할 수 있으므로 이를 활용하여 다중 트레인 간의 적정 이격거리의 산출이 가능하므로 격리요건을 보다 탄력적으로 적용할 수 있을 것으로 판단된다.

#### 마. 화재구역 도면 확보

화재구역/화재소구역 도면은 발전소 배치도(Arrangement Drawing)에 근거하여 작성한다. 발전소 배치도는 이미 각 건물의 벽체, 구획된 실, 옥외구조물 경계 등이 나타나 있으므로 배치도에 굵게 표시하거나 색으로 구분하여 화재구역/화재소구역으로 나타내고 해당 번호를 기입한다. 화재구역 및 화재소구역 고유번호는 건물과 구조물을 구분할 수 있고 화재구역 및 화재소구역을 구분할 수 있어야 하며 각 구역은 일련번호를 부가하여 구분해야 한다..

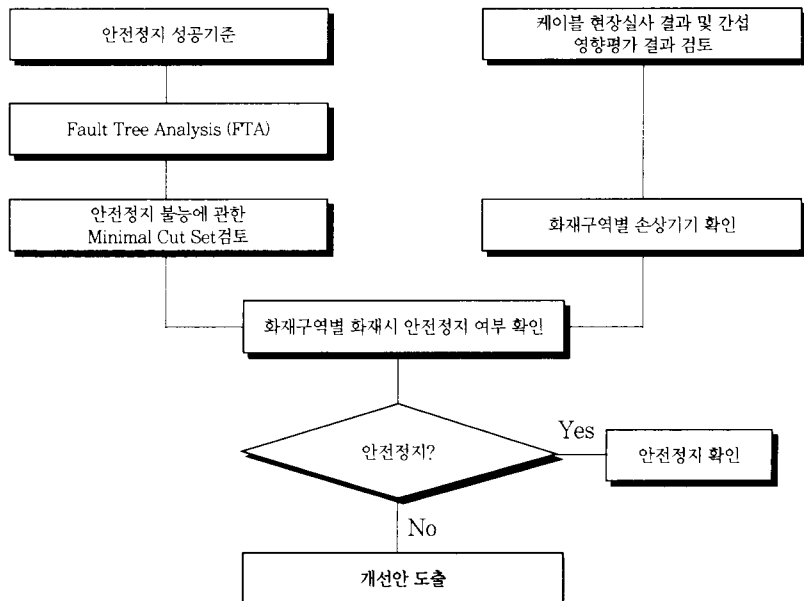
바. 화재구역내 안전정지기, 케이블의 확인  
이 단계의 목적은 앞에서 선정된 안전정지기 및 케이블의 위치를 파악하기 위한 것이다. 케이블과 배선 데이터베이스(또는 도면)는 케이블과 그 경로 사이의 관계를 나타내 준다. 현장확인시 이들 정보를 바탕으로 대상회로의 위치를 파악할 수 있다. 본 절에서는 개별 화재구역 및 화재소구역에 대한 현장확인을 위한 지침을 기술한다. 화재구역 현장확인의 목적은 (1) 안

전정지 기기 및 케이블 경로의 위치를 현장에서 직접 확인하고, (2) 화재구역/화재소구역의 설계 데이터를 확인하는데 있다. 현장확인 작업 전에 설계자료 및 도면 등을 참고로 하여 점검목록에 기록하고 현장확인 수행중에는 기록된 내용을 확인하면서 추가로 얻은 정보를 기록하여 점검목록을 완성한다.

#### 사. 안전정지 영향평가

이상에서 안전정지 계통, 기기 그리고 케이블의 연관성이 구축되었다. 각 화재구역에 대한 평가는 화재발생시 안전정지 능력 달성 여부를 판단하기 위해 수행된다. 화재구역에서 예상되는 기기 또는 케이블의 상실을 바탕으로 성공경로가 형성되어 있는지를 확인하기 위하여 안전정지 기기 목록과 그들의 상호 관계들을 분석해야 한다. 화재로 인하여 이러한 안전정지 관련 계통 및 기기가 손상되었을 때 발전소 안전정지에 미치는 영향을 평가한다. 이를 위하여 안전정지의 성공기준을 근거로 안전정지 실패에 관한 Fault Tree를 작성하고 FTA 결과로 나타난 안전정지 실패의 Minimal Cut Set을 면밀히 검토함으로써 안전정지 불능이 유발되는 사건의 조합을 파악한다.

그리고, 케이블 현장실사 및 간섭영향 평가 결과를 바탕으로 화재구역별로 화재 발생시 손상되는 계통 및 기기를 파악하고 이를 FTA 결과와 비교, 검토하여 해당 손상기기의 조합이 안전정지 불능의 조합인지를 확인함으로써 안전정지 가능/불능 여부를 판단하여 정리한다.



### 아. 화재 취약부분 파악

이상에서 각 화재구역 및 화재소구역별로 화재발생시 안전정지 달성여부를 분석하고, 분석 과정에서 발견된 취약점을 화재구역별로 그리고 계통 또는 설비별로 정리한다. 기존 가동중인 원자력발전소에서 예상되는 화재 취약부분의 예는 다음과 같다.

#### 비상조명등

화재 안전정지 분석에서 화재와 관련한 여러 잠재적인 문제에 대하여 수동조치의 역할이 중요하게 되는데 작업자가 수동조치를 안전하게 완수하기 위하여는 충분한 조명이 필요하다. 작업장어의 접근 경로, 작업장 부근, 귀환경로 등 모든 부분에 조명이 요구된다. 화재시에는 소외전원이 상실될 가능성이 있으므로 수동 조치를 위

한 조명은 소외전원과 무관해야 한다.

#### 비상통신

화재시 발전소의 안전정지를 위하여는 주제어실과 소방대, 그리고 현장 작업자 사이의 확실한 의사소통이 필수적이다. 통신설비가 이용불가능한 경우에 효율적인 화재진압 및 안전정지 달성이 매우 곤란하게 된다. 화재시 소외전원 상실의 가능성이 있으므로 비상등의 경우와 마찬가지로 비상통신 설비도 소외전원과 무관해야 한다.

#### 배수

화재진압 과정에서 상당한 양의 소화수가 요구될 가능성이 많으며 이 소화수는 고정식 진화설비 및 소화호스 등으로부터 자동 또는 수동으로 화재 지역에 뿌려진다. 이 소화수는 적절히 배수



되어야 하며 배수가 적절하지 않을 경우 침수로 인해 필요한 기기가 작동 불능상태가 될 수 있다.

### 공기조화

안전정지 기기가 원활히 작동되기 위하여는 기기실 냉각 등 공기조화 계통이 필요하다. 적절한 공기조화 설비가 구비되어 있지 않다면 기기실을 개방한다든지 이동식 팬을 사용한다든지의 수동조치가 필요하다.

#### 자. 화재방호 종합개선안 도출

이상의 단계들이 완료되면 모든 화재 취약 부분이 파악되고 구분된다. 이들 취약부분을 해결하는데는 여러 가지 방법이 있다. 대체기기의 사용이나 절차변경 등을 통해 해결될 수 있다면 발전소의 어떤 취약부분도 해결될 수 있다. 개선기법을 결정하기 전에 먼저 모든 잠재적인 취약부분에 대한 개선책을 계통과 구역별로 파악할 필요가 있다.

특정한 화재구역에 대한 정지능력은 그 지역에서 유일한 것이거나 또는 그러한 모든 화재구역에서 계통들이 조합된 유일한 형태일 수도 있다. 어느 경우이든 보조안전정지능력은 특정 화재구역과는 독립되어야 하며, 소외전원이 사용 가능하거나 또는 소외전원이 72시간 동안 사용이 불가능한 경우에는 그 능력을 유지하여야 한다.

원자로 저온정지를 유지하는 능력이 화재로 인하여 상실된 경우 원자로 고온대기나 고온정지 상태로 유지하는데 필요한 계통기기는 원자로가 저온정지에 도달할 때까지 그 기능을 유지하여야 한다. 만일 그러한 기기가 화재로 인하여 소

내 및 소외전원 모두를 공급받지 못하는 경우에는 독립적인 소내전원 설비를 설치하여야 한다. 소방대원을 제외하고 그러한 기기의 운전이 필요한 발전소 운전근무조의 인원이 발전소에 항상 있어야 한다.

원자로 저온정지를 유지하는 기기는 화재에 의해 손상되지 않거나 또는 그 손상범위가 제한되어 기기가 72시간 이내에 운전이 가능하여 원자로 저온정지를 유지할 수 있어야 한다. 이 때, 수리작업에 사용될 부품 등은 발전소내에 비치되어 있어야 하며 작업수행을 위한 절차가 수립되어야 한다. 만약 화재발생 후 72시간 이전에 사용되는 기기에 화재로 인하여 소내 및 소외전원 모두가 공급되지 않을 경우 독립적인 소내전원 계통설비를 설치하여야 한다. 72시간 이후에 사용되는 기기는 소외전원 단독으로도 전원공급이 가능하다.

화재발생 후 원자로를 정지시키기 위해 설치된 정지계통은 기존의 안전계통에 대한 연결상의 문제나 충격 또는 화재로 인한 밸브 작동상의 문제점 등의 이유로 특별히 필요한 경우를 제외하고는 지진분류 I 설계기준이나 단일사고 기준 등의 요건에 따라 설계할 필요는 없다. 각각의 화재구역에 설치된 안전정지 계통기기는 그 화재 지역내의 관련회로부터 격리하여 관련회로의 누전이나 단선 또는 단락으로 인하여 안전정지 계통기기의 운전이 영향을 주지 않아야 한다. 한 안전정지 계통의 트레이나 전선관과 중복 계통의 관련 회로가 있는 전선관을 격리하거나 또는 안전정지 계통기기로 부터 이러한 관련회로를 격리시킴으로써 회로상의 화재로 인하여 안전정지 기능에 영향을 주지 않도록 하여야 한다.



#### IV. 맺음말

1986년 Chermobyle 원자력발전소 사고 이후에 IAEA를 중심으로 화재방호에 대한 중요성이 재인식되었으며 1992년에 제정된 IAEA-50-SG-D2에 화재방호 개념이 도입되어 원자력 안전협약(Convention on Nuclear Safety)이행 사항으로 채택되었다. 이 협약에 따라 영국, 일본, 프랑스, 캐나다, 스웨덴 등 다수의 원자력발전소 보유국에서 미국, IAEA 또는 자국의 화재방호 규정에 따라 화재위험도분석, 안전정지 능력분석, 설비 개선 등을 수행하였다. 국내에서도 정부와 규제기관에서 가동중인 원자력발전소의 화재 안전정지능력분석을 원전 화재방호설비 안전성 향상을 위해 지속적으로 요구하고 있는 현안사항이며,

가동중인 원자력발전소의 안전성 향상, 주기적 안전성 평가 및 수명연장 운전을 위해서도 반드시 수행되어야 하는 사항이다. 이러한 요구에 부합하기 위해 가동중인 원자력발전소의 화재 안전정지능력분석에 관한 연구가 지속적으로 이루어져야 하며, 특히 안전정지기능 달성이 곤란한 곳에는 시뮬레이션과 mock-up test 등을 통하여 성능에 기반한(Performance based) 공학적 해결방안을 찾아야 할 것이다. 그리고 화재안전정지 능력분석방법의 활용은 원자력발전소의 안전성 향상뿐만 아니라 화재안전분야에도 많은 성과를 얻을 수 있을 것으로 사료된다. (FILK)

#### 【참고 문헌】

1. "United States Department of Energy Reactor Core Protection Evaluation Methodology for Fires at RBMK and VVER Nuclear Power Plants", Revision 1, DOE/NE-0113, US Department of Energy, June 1997
2. "Nuclear Power Plant Safe Shutdown Assessment(SSA) Methodology" Training Manual, EPM, May 2000
3. "Fire Protection and Appendix R Program", EPM, May 2000
4. "Exemptions from 10CFR50, Appendix R, Case Studies", EPM, May 2000
5. 10CFR50 Appendix R, "Fire Protection Program for Nuclear Power Facilities Operating Prior to January 1, 1979", USNRC, May 1988
6. Generic Letter 81-12, "Fire Protection Rule", USNRC, Feb. 1981
7. Generic Letter 86-10, "Implementation of Fire Protection Requirements", USNRC, Apr. 1986
8. IE Information Notice No. 84-09, "Lessons Learned from NRC Inspections of Fire Protection Safe Shutdown Systems(10CFR50, Appendix R)", USNRC, Feb. 1984
9. "Kewaunee Nuclear Power Plant Appendix R Design Description", Wisconsin Public Service Corporation, Dec. 1990
10. "Ginna Station Fire Protection Program Report" Rev. 0, Jun. 1998
11. NUREG-0050, "Recommendations Related to Browns Ferry Fire" Report by Special Review Group, February 1976
12. NUREG-75/087, "Standard Review Plan for the Review of Safety Analysis Reports for Nuclear Power Plants"
  - Section 9.5.1 "Fire Protection Program"
13. Appendix A "General Design Criteria for Nuclear Power Plants" to 10 CFR Part 50, "Licensing of Production and Utilization Facilities" General Design Criteria 3, "Fire Protection"