

# NEI 방법론을 적용한 중수로 주제어실의 화재안전정지분석에 관한 연구

김인환<sup>†</sup> · 임혁순 · 배연경

한국수력원자력 중앙연구원

## Study of Post-Fire Safe-Shutdown Analysis of a CANDU Main Control Room based on NEI 00-01 Methodology

In-Hwan Kim<sup>†</sup> · Heok-Soon Lim · Yeon-Kyoung Bae

Fire Safety Group, KHNP Central Research Institute

(Received June 9, 2016; Revised June 23, 2016; Accepted June 23, 2016)

### 요 약

원자력발전소의 화재방호 목적은 예방, 화재의 진압 및 영향을 완화하는 데 있으며, 화재가 발생하면 원자로를 안전하게 정지하여 유지하고 환경으로 방사성물질의 유출을 최소화하는 것이다. 미국의 원자력규제위원회는 10CFR50.48과 10CFR50 APP.R을 발행한 이래 지난 20여년간 화재방호와 관련하여 많은 일반 통신문(Generic Communications)을 발행하였으며, 미국원전 발전사업자(Nuclear Energy Institute)에서는 회로고장 해결을 위한 다중오동작과 관련된 결정론적 방법 등을 사용과 연계하여 위험도정보를 활용한 화재 안전정지분석 방법론을 개발하였다. 본 논문에서는 중수로원전의 주제어실 화재시 화재안전정지분석 방법론을 적용하여 안전정지용 한 계열의 안전관련 계통 및 기기가 손상되어도 원자로의 사고 후 안전정지를 달성하고 유지함을 확인하였다.

### ABSTRACT

When the fire takes place in Nuclear Power Plants(NPPs), the reactor should achieve and maintain safe shut-down conditions and minimize the radioactive material released to the environment. The U.S. Nuclear Regulatory Commission (NRC) has issued numerous generic communications related to fire protection over the past 20 years, after it issued its requirements in the Fire Protection Rule set forth in Title 10, Section 50.48 of the Code of Federal Regulations (10 CFR 50.48) and Appendix R to the 10 CFR 50. The and Nuclear Energy Institute (NEI) has developed a Methodology for Risk Informed Fire Safe-Shutdown Analysis, which is related to the Deterministic Method for Multiple Spurious Operations solutions. The aim of this study was to identify, achieve, and maintain Post-Fire Safe-Shutdown of the Main Control Room (MCR) of the CANDU reactor, even though one train of the multiple Safety Structures, Systems, and Components (SCCs) fail by the technical specification and analysis method.

**Keywords :** Nuclear power plant, Post-fire safe-shutdown, Safe-shutdown analysis

## 1. 서 론

원자력발전소 화재방호의 목적은 화재의 발생 가능성 및 결과를 최소화하여 화재시 발전소를 안전하게 정지시키기 위하여 동일 기능을 수행하는 다중 계열 중 한 계열의 기능이 상실되어도 나머지 한 계열이 기능을 수행하여 원자로를 안전하게 정지하여 안전정지상태를 유지하고 환경으로 방사능 방출을 최소화하는 것이다. 본 논문에서는 미국원전 발전사업자협회에서 개발한 안전정지분석방법론을 산업현장에 적용하는 방법을 연구하였으며, 중수로원전의 주제어실 화재시 안전기능을 수행하는 계통의 한 계열

이 상실되었을 때 동일 기능을 수행하는 나머지 계열에 의해 원자로를 안전정지하여 원자력 발전소의 안전성이 확보됨을 확인하였다.

## 2. 안전정지분석 방법론

원자력발전소의 화재 안전정지분석시 원자력안전위원회에서 요구하는 원자로 안전정지 · 잔열제거 · 변수감시 및 방사성물질 유출방지능력을 입증하기 위해, 안전에 중요한 구조물, 계통 및 기기들은 설계기준화재 시 화재손상요건을 만족해야하고, 이들이 포함된 인접된 방화지역에 대해

<sup>†</sup>Corresponding Author, E-Mail: kiminh77@khnp.co.kr  
TEL: +82-42-870-5672, FAX: +82-42-870-5999

<b>Collect Plant Data</b>
- Initial Condition - Regulatory Requirements, etc
<b>Determine Safe Shutdown(SSD) Function</b>
- Plant System, Function - Supporting Function
<b>Select Safe Shutdown System</b>
- Safe Shutdown System - Safe Shutdown Path
<b>Select Safe Shutdown Equipment</b>
- Safe Shutdown Equipment List
<b>Select Safe Shutdown Cables</b>
- Identify Cables - Analysis Associate Cables
<b>Fire Area Assessment</b>
- Determine Safe Shutdown Equipment Path - Circuit Analysis
<b>Develop Method for Prevention or Mitigation</b>
- Reroute of Cable and Circuit of Concern - Redesign - Operator Manual Action

Figure 1. Post-fire shutdown analysis process<sup>(1)</sup>.

설계기준화재시 영향분석을 수행하여야 한다. 또한 소화 활동이나 안전정지 기능에 영향을 줄 수 있을 정도로 연기, 고온가스 또는 소화재가 다른 방화지역으로 전파되지 않음을 보증하여야 하고, 안전정지 기능에 영향을 미치는 경우에는 독립된 대체정지능력을 보유하고 있음을 입증하여야 한다. 원자력발전소의 일반적인 화재안전정지분석 방법론은 Figure 1과 같이 발전소 자료 수집에서부터 개선방안의 과정으로 수행한다.

**2.1 발전소 고유자료 수집**

발전소 자료를 수집하는 과정으로서, 각종 인허가 및 기술기준 자료, 화재위험도분석자료, 발전소 계통설명서, 발전소 설계도면, 운영절차서, 기기목록, 화재방호계획서 등을 포함한 각종 문서를 수집하여 활용하며, 수집된 자료를 검토하고 필요시 자료의 적합성 판단을 위한 현장조사를 수행한다.

**2.2 안전정지기능 분석**

원자로 안전정지의 목적은 화재시 발전소를 안전정지 상태로 만들어 노심내 핵연료봉의 건전성을 유지하고 원자로 압력용기 및 부속배관, 그리고 격납건물의 건전성을 확보하는 것이다.

화재시 원자로를 안전하게 정지시키는 데 중요한 아래와 같은 기능을 결정하여, 이 기능을 수행할 성능이 있는 계통이 방화지역내의 단일 화재에 의해 악영향을 받지 않아야 한다.

- 반응도제어(Reactivity Control)
- 원자로냉각재 보충 제어(Reactor Coolant Makeup Control)
- 원자로냉각재 압력 제어(Reactor Coolant Pressure Control)
- 잔열제거(Decay Heat Removal)
- 변수감시(Process Monitoring)

**2.3 안전정지계통 선정**

안전정지계통 선정은 공정상에서 요구되는 각 정지기능의 달성 가능한 계통이나 계통의 조합을 확인하는 과정으로써, 안전정지계통의 계열 A, 계열 B 등으로 분류하여 안전정지 성공경로 분류한다.

**2.4 안전정지기기 선정**

선정된 안전정지 계통을 대상으로 안전정지 수행에 필요한 기기를 선정하는 과정으로, 기기 선정지침을 수립하고 해당 계통도면 및 절차서를 기준으로 운전요구되는 기기와 오동작으로 안전정지 계통의 성능에 미치는 기기를 파악한다. 특정 안전정지 경로를 위해 필요한 안전정지 계통의 운전요구되는 기기는 고온정지 요구기기로, 특정 안전정지 경로에 영향을 줄 수 있는 기기로 고온정지 요구되는 기능 수행 계통의 유로변경과 연관이 없다면 안전정지 중요 기기로 분류한다.

**2.5 안전정지 케이블 선정**

안전정지 기기들에 대한 전기도면을 이용하여 안전정지 기기의 운전을 위해 기기와 직접 연결된 케이블 뿐만 아니라 이차배선도를 통해 일차 전기도면에 연동된 케이블도 파악하여 안전정지 케이블 목록을 작성한다.

화재로 인한 비필수 전원의 손상이 정지 기능에 직접적인 영향을 미치지 않더라도 화재로 인한 비필수 전원의 손상으로 인해 케이블이 손상되어 요구 전원의 공급이 손실된다면, 정지능력에 영향을 미치는 문제 해결을 위해서 전기배선계통에서 안전정지 기기를 파악하여 연계회로분석을 통해 오동작이나 부적절한 작동이 없는지 확인하여 적절한 운전을 보장하여야 한다.

연계회로는 안전정지에 필요한 다중계열의 케이블을 물리적, 전기적으로 상호 연결하는 비안전정지 관련 케이블로써 다음의 사항을 검토 및 분석하여 안전정지 능력에 영향이 미치는 문제가 없음을 확인한다.

**2.5.1 공통전원**

공통전원 문제는 비안전정지기기 케이블에 화재가 발생하면 부하측과 인입측의 차단기나 퓨즈 등이 적절히 보호협조(Coordination)되어 있지 않을 때 안전정지기기에 공급되는 전원의 상실을 유발할 수 있는 상황을 말하며, Figure 2는 방화지역 II에서 화재가 발생하여 펌프 A를 운

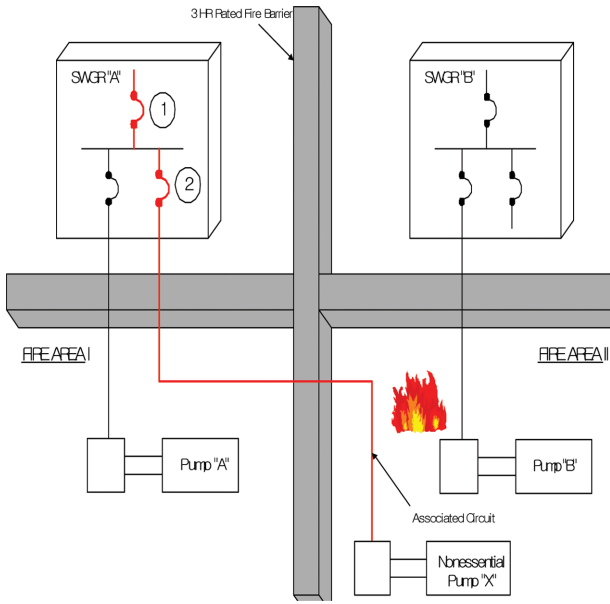


Figure 2. Common power source associated circuit.

전할 수 없게 되는 것을 보여준다.

2.5.2 공통배선함

공통배선함 문제는 지역적인 화재의 영향이 배전선로를 통해 주변으로 확산되어 다중 계열 기기를 이용 불가능하게 한다.

1) 이차발화

이차발화 현상은 화재로 인한 전기적인 결합이 보호조치가 부적절한 케이블에 영향을 미치는 경우로써 B 계열의 과전류로 인한 발화가 A계열의 케이블에 이차발화를 발생시키는 경우로써, 차단기 및 퓨즈의 차단기 보호협조로 보호할 수 있다면 공통전원 문제가 발생하지 않는다.

2) 화재전파

어떤 지역에서 발생한 화재가 케이블 절연체 등 가연성 물질을 통해 인접 지역으로 전파되는 경우로써, A와 B 계열 트레이가 연결되는 부분에 화재전파 방지를 위한 밀폐재가 설치되어 있거나 화염억제특성을 갖는 케이블 절연체를 사용하였다면 화재전파는 발생하지 않는다.

3) 변류기

변류기는 배전 계통의 전류를 감시하기 위해 사용되며, 일-이차 간 전류비를 일정하게 유지하는데 필요한 값을 가지나, 이차 회로가 열리게 되면 전류비를 유지하기 위해 이차 회로에 위험 최고 전압이 걸리게 되며 이것은 변류기가 발화되는 원인이 된다. Figure 3은 변류기 회로의 발화에 의한 화재의 예를 나타내었다.

2.5.3 오작동

연계회로 오작동 문제는 안전 및 비안전정지기 관련 케이블에서 화재가 발생할 경우 오작동 신호에 의해 다른 방

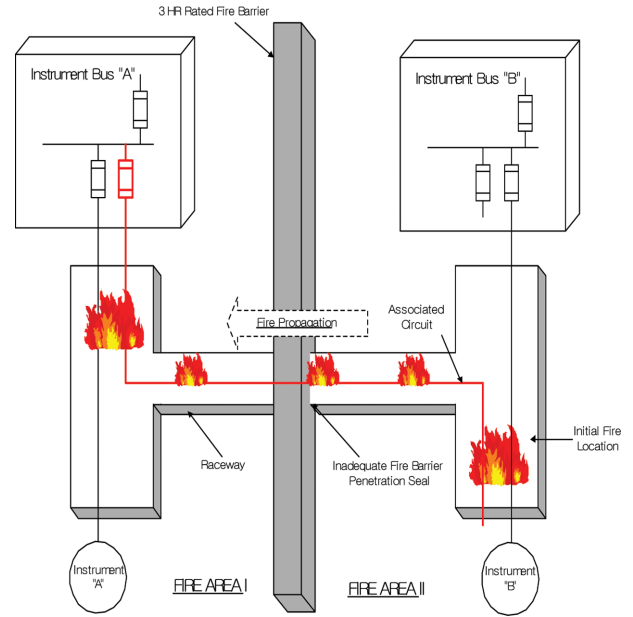


Figure 3. Fire propagation.

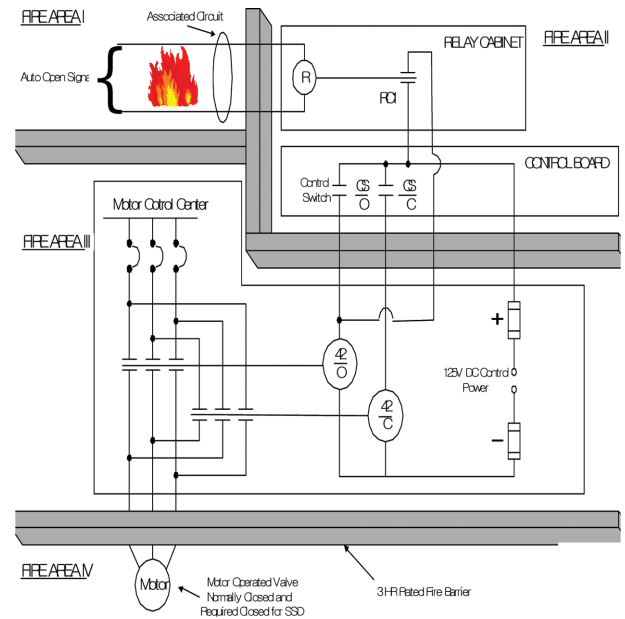


Figure 4. Spurious actuation.

화지역에 있는 안전정지기의 오작동을 유발하는 것이다. Figure 4는 방화지역 I에 있는 연계회로에서 화재가 발생하여 방화지역 IV에 위치한 전동밸브의 오작동을 유발하는 상황을 보여준다.

2.5.4 다중 고임피던스 고장

다중 고임피던스 고장(Multiple High Impedance Fault, MHIP)은 하나의 전원에 연결된 모든 케이블이 화재로 손상되어 고임피던스 고장을 유발하여 안전정지에 영향을 미치는 것으로, 적절한 전기적 보호협조가 되어 있다하여

도 다수의 비안전 관련 케이블이 동시에 고임피던스 상태에 도달하여 각각의 차단기가 개방되기 이전에 안전정지 모선(bus)의 차단기가 트립된다.

**2.6 화재지역 영향평가**

화재로 인한 각 화재지역 평가는 화재에 영향을 받지 않는 한 계열의 기기에 의해 원자료를 바로 고온정지조건으로 정지할 수 있음을 증명할 수 있어야 한다.

저온정지를 달성하고 유지할 필요가 있는 계통은 화재에 의해 손상될 수 있지만 제한시간 이내에 보수 및 정지 조건을 달성되도록 화재에 의한 이러한 계통의 손상정도는 제한되어야 한다. 회로분석은 고온정지 및 안전정지에 필요한 기기를 감시 및 제어하고 전원을 공급하는 회로의 화재로 인한 잠재적 영향에 대한 정보를 제공한다.

**2.6.1 단선(Open Circuit)**

단선은 화재로 인한 케이블이 손상되어 끊어짐으로써 전도체가 회로의 연속성이 상실되는 파열되는 것으로, Figure 5는 단선의 예를 보여주고 있으며 위치에 따른 특성은 아래와 같다.

- ① 단선 위치 No. 1 : 대상기기의 작동이 되지 않는다.
- ② 단선 위치 No. 2 : 대상기기의 open/start 작동이 되지 않으나 대상기기의 close/stop 능력에는 영향을 미치지 않는다.

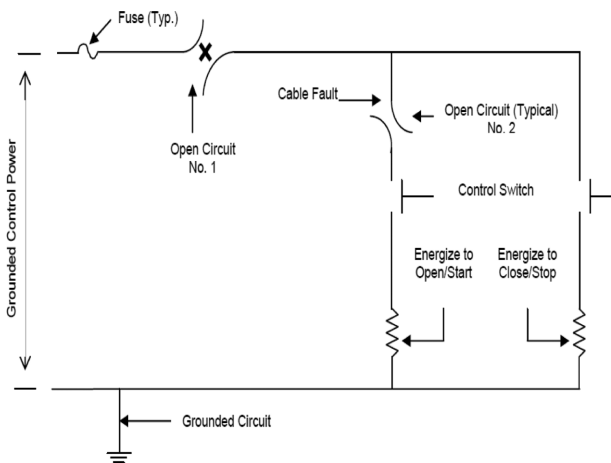
**2.6.2 지락(Short to Ground)**

지락은 케이블 피복시스템이 화재로 인해 파열되어 전도체가 대지와 접촉하는 경우로써, 안전정지 기기에 요구되는 전기 또는 제어가 상실된다.

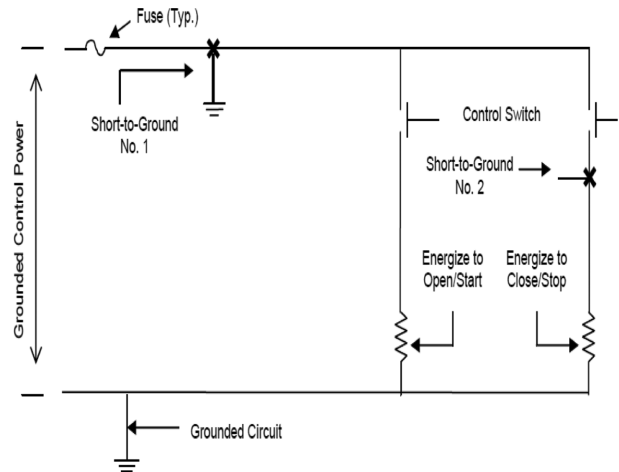
**1) 접지회로에서의 지락**

Figure 6은 접지회로에서의 지락의 예를 보여주고 있으며 위치에 따른 특성은 아래와 같다.

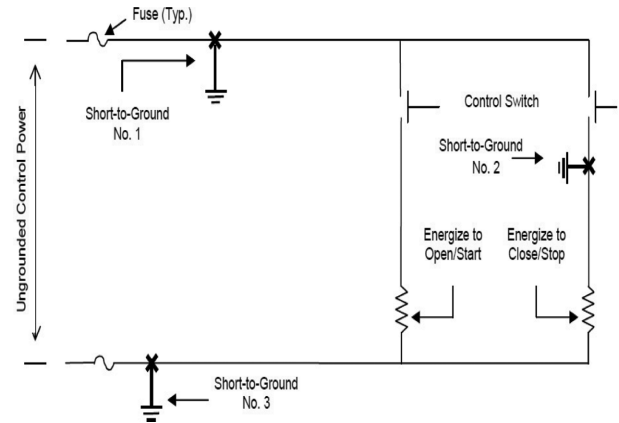
- ① 지락 위치 No. 1 : 제어전원의 퓨즈를 손상하여 제어



**Figure 5.** Open circuit.



**Figure 6.** Short to ground on grounded circuits.



**Figure 7.** Short to ground on ungrounded circuits.

회로의 전원이 손실된다.

- ② 지락 위치 No. 2 : 대상기기의 close/stop 스위치를 누르기까지는 영향을 미치지 않으나 누른후에는 No. 1을 누른 것과 동일한 효과를 나타낸다.

**2) 비접지회로에서의 지락**

Figure 7은 비접지회로에서의 지락의 예를 보여주고 있으며 위치에 따른 특성은 아래와 같다.

- ① 지락 위치 No. 1 : No. 3 또는 다른 곳의 동일한 전원에 지락이 발생한다면 제어전원의 퓨즈를 손상하여 제어회로의 전원이 손실된다.
- ② 지락 위치 No. 2 : 지락 위치 No. 3과 조합하여 대상기기의 close/stop 스위치를 누르기까지는 영향을 미치지 않으나 누른 후에는 No. 1을 누른 것과 동일한 효과를 나타낸다.

**2.6.3 단락(Hot Short)**

단락은 케이블 피복시스템이 화재로 인해 파열되어 같은 케이블의 전도체간 또는 다른 케이블의 전도체간에 발생하는 전도체에 발생하는 원하지 않는 전압 강하가 발생

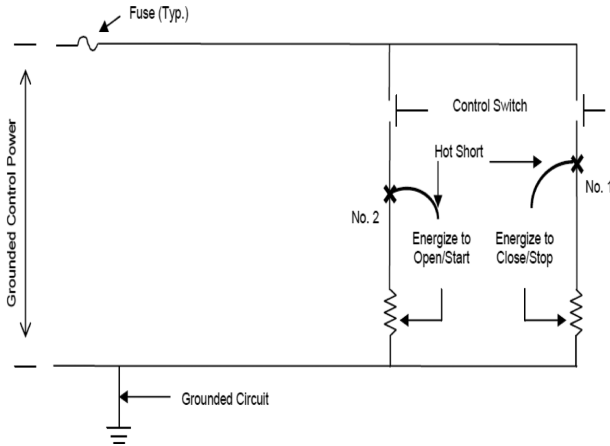


Figure 8. Hot short on grounded circuits.

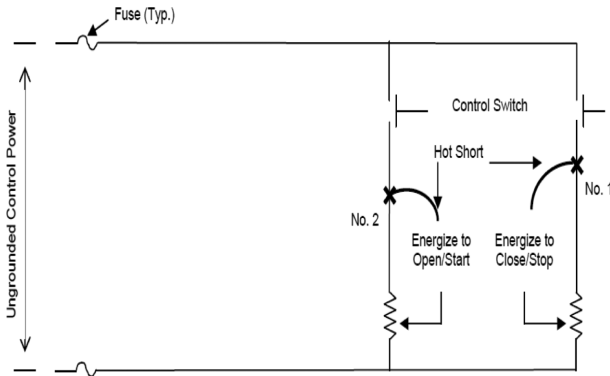


Figure 9. Hot short on ungrounded circuits.

한다.

1) 접지회로에서의 단락

Figure 8은 접지회로에서의 단락의 예를 보여주고 있으며 위치에 따른 특성은 아래와 같다.

① 단락 위치 No. 1 : close 릴레이를 여자시키고 모터구동밸브를 원하지 않는 방향으로 close시킨다.

② 단락 위치 No. 2 : open 릴레이를 여자시키고 모터구동밸브를 원하지 않는 방향으로 open시킨다.

2) 비접지회로에서의 단락

Figure 9는 비접지회로에서의 단락의 예를 보여주고 있으며 위치에 따른 특성은 아래와 같다.

① 단락 위치 No. 1 : 동일한 전원에서 발생하는 이지점의 단락은 close 릴레이를 여자시키고 모터구동밸브를 원하지 않는 방향으로 close시킨다.

② 단락 위치 No. 2 : 동일한 전원에서 발생하는 이지점의 단락은 open 릴레이를 여자시키고 모터구동밸브를 원하지 않는 방향으로 open시킨다.

2.7 문제점 도출 및 개선방안

발전소 계통 및 보조 기능은 고온 및 저온정지조건을 달성하고 유지할 수 있어야하며, 정지계통은 지정된 요구 정지기능과 설정된 고유의 안전정지경로를 달성가능하여야 한다. 정의된 정지경로와 관련하여 각 경로의 확인되고 문서화된 안전기기목록 기기의 적절한 운전의 보증을 필요로 한다.

3. 분석결과

중수로 원자력발전소의 주제어실에서 화재가 발생하였을 경우를 가정하여 본 방법론을 적용하여 원자로 안전정지분석을 수행하였다.

3.1 안전정지기능 분석

해당 발전소의 적용 기술기준의 화재안전평가 요건에 명시하고 있는 원자로 정지, 잔열제거, 변수감시, 분열생성물 누출 제한 및 보조 기능을 원자로 안전정지를 달성하기 위한 5개 안전정지기능<sup>(2)</sup>으로 정의하였다.

3.2 안전정지계통 선정

3.1 항에서 선정된 안전정지기능을 달성하기 위해 최종 안전성분석보고서 및 화재위험도분석보고서등을 참조하여 19개 안전정지계통<sup>(3)</sup>을 선정하였다. 선정 계통을 안전정지 경로 그룹별(A, B)로 분류하여 안전정지기능을 중심으로 작성하였다.

3.3 안전정지기기 선정

작성된 성공경로도면, 설계 매뉴얼 및 설계지침서 등의 계통설계 자료를 분석 및 검토, 검토결과와 화재위험도분석보고서 및 최종안전성보고서등에서 선정된 기기를 비교

Table 1. Example of Safety Shutdown Equipment List

Total Equipment Number	System	System Equipment Number	Equipment No.	Description	Success Path	Room	Etc
1	SDS#1	1	63730-SAM1	Shutoff Rod Drive Motors	A	R501	Fail-Safe
2	SDS#1	2	63730-SAM2	Shutoff Rod Drive Motors	A	R501	Fail-Safe
			~				
146	SDS#2	25	68337-PT1G	Pressurizer Low Level Trip	B	R113	Fail-Safe
147	SDS#2	26	68337-PT1H	Pressurizer Low Level Trip	B	R113	Fail-Safe

**Table 2.** Example of Cable Path Database

No	System	Equipment No	Description	Equip. side_1	Equip. side_2	Channel	Signal	RM 1	RM 2	RM 3	RM 4	RM 5	RM 5	RM 6	RM 7	RM 8	RM 9	RM 10
1	SDS#1	63730-POST1SAM1	Shutoff Rod Drive Motors	63730-POST1SAM1	5542-MCC22B	AL	L	R501	R403	R401	R405	R501	R601	PET 423	S318	S307	S305	S304
2	SDS#1	63730-POST1SAM1	Shutoff Rod Drive Motors	5542-MCC22B	66810-CDF	B	C	S304	S145	S307	S318	S317	S328					
					~													
182	SDS#2	68337-LT1G	Pressurizer Low Level Trip	68337-LT1G	66611-PL53	G	C	S031	S031A	S030	S014	S014A						
183	SDS#2	68337-LT1G	Pressurizer Low Level Trip	68320-PL109	66110-PL02	G	C	S014A	S014	S030	S013	S167	S230	S326				

여기서

전원(L, M, H): 저전력(Low-power), 중전력(Mid-power)  
고전력(High-power)

제어(C) : Control

SDS : Shutdown System

하여 최종적으로 안전정지에 필요한 680개 기기 목록을 작성하였으며 Table 1의 예와 같다.

### 3.4 안전정지 케이블 선정

케이블은 기기와 패널, 기기와 제어반 등을 연결해주는 중요한 요소로써, 전동구동기기의 경우 전원케이블과 제어 케이블, 공기구동기의 경우 솔레노이드밸브와 제어케이블을 포함하여 케이블을 선정한다.

케이블의 확인된 시작 및 최종지역 자료를 근거로 배치도면(General Arrangement)을 추적하여 각 케이블 별 경로를 완성하고, 이 때 케이블이 지나가는 경로는 방(room)번호를 기준으로 분석하여 케이블 목록과 경로에 관한 Database를 작성하였으며 Table 2의 예와 같다.

### 3.5 연계회로분석

#### 3.5.1 공통전원

주제어실 및 제어기기실 화재로 해당방호구역내 화재안전정지 기능이 상실되더라도 제 2제어실과 비상전력공급 계통이 기능적, 물리적으로 독립되어 공통전원에 영향이 없는 것으로 확인되었다.

#### 3.5.2 공통배선함\_이차발화

공통배선함 이차발화 분석결과 공통전원 문제와 동일하게 차단기 보호협조곡선 설계 검토를 통해 안전한 것으로 확인되었다.

#### 3.5.3 공통배선함\_화재전파

주제어실 및 제어기기실 화재시 컴퓨터실과 제어기기실 사이, 제어기기실과 주제어실 사이의 관통부와 비방화문이 확인되었으며 이의 개선 조치가 완료된다면 화재전파의

영향이 없는 것으로 평가되었다.

#### 3.5.4 공통배선함\_변류기

변류기 5가지 선별기준에 따라 제외한 후 나머지 변류기를 개선대상으로 선정하여, NUREG/CR-7150<sup>(4)</sup>에 근거하여 권선비가 1,200:5 이하의 변류기는 이차발화에 대한 신뢰도를 확보할 수 있으며 평가결과 모두 1,200:5 이하의 권선비를 가진 것으로 확인되었다.

#### 3.5.5 오작동

안전정지기기로 선정된 기기와 고-저압압력경계 밸브에 대한 오작동분석을 수행하였다. 주제어실 및 제어기기실 화재 시 모든 기기에서 오작동 가능성뿐만 아니라 제 2제어실 지역에서 안전그룹 2 계통을 통해 안전정지를 수행 가능성을 검토하여 오작동 문제가 안전정지에 미치는 영향이 없는 것으로 평가되었다.

#### 3.5.6 다중 고임피던스

하나의 전원에 연결된 다수의 케이블이 화재로 손상되어 고임피던스 고장을 유발할 수 있으나, 분석결과 NEI 00-01<sup>(5)</sup>의 화재안전정지분석에서 다중고임피던스 문제를 고려하지 않아도 됨을 명시하고 있어 고려하지 않았다.

### 3.6 화재지역 영향평가

두 안전그룹의 계통과 특수안전계통의 안전계통 격리요건을 검토하고, Wiring 분석, Block Diagram, Elementary Diagram, Schematic Diagram, General Arrangement (GA) 도면 등 관련 도면을 통해 케이블의 포설 현황을 분석하여 기술요건 만족상태, 안전그룹2에 속하는 계통의 기기와 제 2제어실에서의 안전기능 수행 가능여부 등을 종합적으로

분석하였다. 분석결과, 주제어실 및 제어기기실 화재로 인해 해당지역 내 기능이 모두 상실된다고 하여도 제 2제어실에서 성공경로 B로 정의된 계통을 사용하여 화재안전정지를 달성할 수 있는 것으로 분석되었다.

#### 4. 결 론

화재 안전정지분석방법론에 따라 중수로형 원자력발전소 주제어실지역에 대해 안전정지 성공경로별로 안전정지 계통 및 안전정지기기를 선정하고 화재안전정지분석을 수행하였다.

원자력발전소 규제요건과 기술기준에 따른 화재안전정지분석방법을 적용하였을 때, 주제어실 화재 발생시 계통 및 기기 손상 가능성을 평가하고 안전정지 성공경로를 확보하여 원자로를 안전 정지함으로써 발전소 안전성 향상에 기여하였다.

#### References

1. NRC Knowledge Base for Post-Fire Safe Shutdown Analysis, NUREG-1778, pp. 6-1~44, January (2003).
2. Canadian Standards Association, Fire Protection for CANDU Nuclear Power Plants. CAN/CSA- N293-M87, pp. 21-22, July (1987).
3. KHNP, Wolsong Unit 3&4 Fire Hazard Assesment Report, p. 112, 10. (2010).
4. United States Nuclear Regulatory Commission, Joint Assessment of Cable Damage and Quantification of Effects from Fire, NUREG/CR-7150, Vol. 1, pp. 6-4~9, October (2012).
5. Nuclear Energy Institute, Guidance for Post Fire Safe Shutdown Circuit Analysis, NEI 00-01, B.1-1~36, Rev3, October (2011).