

[Research Paper]

# 결정론적 화재방호요건을 기반으로 한 원자력발전소 화재모델링 현장실사 수행절차 개발

문종설 · 이재호<sup>\*†</sup>

한국수력원자력(주) 중앙연구원 일반연구원, \*한국수력원자력(주) 중앙연구원 선임연구원

## Development of Walk-down Performance Procedures for Fire Modeling of Nuclear Power Plants based on Deterministic Fire Protection Requirements

Jongseol Moon · Jaiho Lee<sup>\*†</sup>

Assistant Researcher, Central Research Institute, Korea Hydro and Nuclear Power

\*Senior Researcher, Central Research Institute, Korea Hydro and Nuclear Power

(Received October 18, 2019; Revised November 11, 2019; Accepted November 11, 2019)

### 요 약

본 연구에서는 결정론적 화재방호 요건을 기반으로 하는 원자력발전소 화재모델링 현장실사(Walk-down) 수행절차를 개발하였다. 원전 화재모델링 현장실사 수행절차는 도면에 정확히 표시되지 않은 안전정지 기기 및 케이블에 대한 위치를 파악하고, 가연물 및 집화원의 존재여부와 위치를 파악하는 과정을 포함한다. 본 연구에서 개발한 현장실사 절차의 성능을 검증하기 위해서 가상의 다중오동작 시나리오에 대해 샘플 안전정지 중요기기 및 케이블을 선정하였다. 또한 선정된 안전정지 기기 및 케이블을 대상으로 가상의 화재모델링 시나리오를 도출하여 이에 대한 실제 현장실사를 수행하였다. 현장실사를 통해서 수집한 발전소 정보는 화재모델링을 위한 입력 값을 도출하는데 사용될 수 있도록 도면에서 얻은 정보와 비교·검토 되었다.

### ABSTRACT

A walk-down procedure for fire modeling of nuclear power plants, based on deterministic fire protection requirements, was developed. The walk-down procedure includes checking the locations of safety shutdown equipment and cables that are not correctly indicated on drawings and identifying the existence and location of combustibles and ignition sources. In order to verify the performance of the walk-down procedure developed in this study, a sample of important equipment and cables were selected for hypothetical multiple spurious operation (MSO) scenarios. In addition, the hypothetical fire modeling scenarios were derived from the selected safe shutdown equipment and cables and an actual walk-down was conducted. The plant information collected through the walk-down was compared to the information obtained from the drawings, so that the collected information may be used as input values for the fire modeling.

**Keywords :** Nuclear power plant (NPP), Deterministic fire protection, Multiple spurious operation (MSO), Fire modeling, Walk-down

## 1. 서 론

미국 브라운즈페리(Browns Ferry) 원자력발전소(이하 “원전”)에서 발생한 화재사고로 인하여 결정론적 화재방호 규제요건이 지속적으로 강화되어 왔다<sup>(1-3)</sup>. 미국 전력연구소(Electrical Power Research Institute, EPRI)는 케이블 화재 실

험 연구를 통하여 다중오동작(Multiple spurious operation, MSO) 발생으로 인한 안전정지 계통의 기능 상실 가능성을 실험으로 검증하였다<sup>(4)</sup>. 또한 Lee 등<sup>(5,6)</sup>은 EDISON/SAFE 코드를 활용하여 가상원전에 대한 케이블 다중오동작 화재 안전 정지분석 연구를 수행한 바 있다. 결정론적 화재방호 규제지침(RG 1.189, Rev.2)<sup>(3)</sup>은 다중오동작 회로분석을 고

<sup>†</sup>Corresponding Author, E-Mail: [jaiholee@khnp.co.kr](mailto:jaiholee@khnp.co.kr). TEL: +82-42-870-5459, FAX: +82-42-870-5449

© 2019 Korean Institute of Fire Science & Engineering. All right reserved.

려한 화재안전정지분석에 대한 요건을 포함하고 있으며, 미국 원자력에너지협회(Nuclear Energy Institute, NEI)에서 개발한 화재안전정지 회로분석에 대한 지침서(NEI 00-01, Rev.2)<sup>(7)</sup>의 방법론 사용을 승인하고 있다. 이에 결정론적 화재방호 요건을 기반으로 한 원전은 단일 및 다중오동작을 고려한 화재안전정지분석(Post fire safe shutdown analysis)을 수행해야 한다. 국내의 경우에도 모든 원전은 화재위험도 분석 기술지침인 원안위고시 2015-11호 이행을 위해 케이블 다중오동작 회로분석을 포함한 화재안전정지 분석을 수행해야한다<sup>(8)</sup>.

결정론적 화재안전정지 분석에서는 안전정지 기기 및 필수케이블에 대한 결정론적 화재방호 요건만족도(Compliance) 여부를 평가한다. 화재안전정지 기기들은 NEI 00-01에 따라 고온정지 필수기기(Required for hot shutdown) 및 안전정지 중요기기(Important to safe shutdown)로 분류된다. 이러한 분류법은 NEI 00-01의 3장과 부록 H에 잘 기술되어 있다. 결정론적 화재방호 요건 준수에 미흡한 기기 및 케이블들은 이 분류에 따라서 각기 다른 완화전략(Mitigation strategy)으로 해결될 수 있다. 결정론적 요건 준수에 미흡한 고온정지 필수기기는 설계변경 및 면제요구 등의 방법으로 해결된다. 반면, 안전정지 중요기기들은 고온정지 필수기기에 적용된 해결방안 또는 운전원 수동조치(Operator manual action, OMA), 집중범위 화재 확률론적 안전성평가(Focused-scope fire PRA) 및 화재모델링 중 한 방법으로 해결될 수 있다. 고온정지 필수기기 및 안전정지 중요기기에 적용가능한 각각의 완화전략들은 상황과 조건에 따라서 다양한 장단점을 가질 수 있다. 따라서 이러한 기기 및 케이블에 대한 완화전략 해결방안은 전문가패널(Expert panel)의 충분한 검토를 통해 마련되어야 한다.

안전정지 중요기기에 대한 해결방안으로 적용 가능한 화재모델링은 성능기반(Performance based) 화재방호에서도 매우 유용하게 사용되고 있는 기술이다. 원자력 발전소 내 화재안전에 대한 규제가 강화됨에 따라 2001년 미국 소방협회(National fire protection association, NFPA)는 가압경수로형 원자력 발전소에 대한 성능기반 화재관련 규제지침인 NFPA 805<sup>(9)</sup>를 제정하였다. 이에 미국 원자력 규제 위원회(Nuclear regulatory commission, NRC)는 원전 화재방호 규제 요건인 10 CFR 50.48(c)<sup>(10)</sup>를 수정하여 미국 원전 사업자들이 기존의 결정론적 화재방호 규제 요건에 대한 대체 방법으로 NFPA 805의 성능기반 화재방호 요건을 적용할 수 있도록 승인하였다.

결정론적 화재방호 프로그램에서 화재모델링이 안전정지 중요기기 해결방안으로 적용 될 때 적절한 화재모델링 시나리오를 선정하기 위해서 방화지역 내 상세 정보가 필요하다. 일반적으로 방화지역 크기에 대한 물리적 치수를 포함한 격실정보, 점화원 및 가연물의 존재 여부, 점화원의 위치, 환기조건, 격실 내 화재방호 설계특성, 2차 가연물의 위치 등이 이러한 정보에 포함된다. 방화지역 내 감지기 및

진압설비 등과 같은 화재방호 설비 특성, 자연환기 또는 기계통풍과 같은 환기조건, 격실 크기와 같은 물리적인 치수 등은 발전소 도면 및 관련 설계문서를 통해 어느 정도 파악이 가능하다. 그러나 점화원 및 가연물의 위치 등은 도면과 같은 설계문서에서 정확하게 예측하기 어렵다. 따라서 현장실사를 통한 위치정보 수집은 화재모델링 시나리오 선정을 위해 반드시 필요하다<sup>(11)</sup>.

원자력발전소 화재모델링 현장실사는 일반 산업설비와는 다른 절차와 방법으로 수행되어야 한다. 원전 화재방호의 가장 큰 특징은 화재 시 방사능 물질의 외부누출 방지이다. 이러한 이유로 화재가 발생하더라도 다중의 안전정지 계열의 한 계열은 반드시 화재로부터 안전하게 보호되어야 한다. 각 안전정지 계열은 다수의 안전정지 기기 및 케이블들로 구성되므로 원전 현장실사 시 방화지역 내 안전정지 기기 위치와 케이블 이동경로가 도면정보와 반드시 비교·검토되어야 한다. 또한 원전 현장실사는 방사능구역 및 보안구역 등 특수성을 가지는 지역에서 이루어질 수 있으므로, 발전소 현장 직원 이외의 일반인들의 접근이 제한되는 경우가 많다. 이러한 경우에 화재모델링 분석자는 직접 현장실사를 수행할 수 없으므로 도면에서 분석한 정보를 기반으로 화재모델링을 수행해야 한다. 만약 화재모델링에 필요한 정보가 도면에서 확인되지 않는다면, 화재모델링 분석자는 발전소 현장직원들이 그 정보를 수집하도록 요청해야 한다. 그러나 발전소 직원들은 화재모델링에 대한 전문지식을 가지고 있지 않으므로 화재모델링을 위한 정보를 효과적으로 수집하는데 어려움을 가질 수 있다.

NUREG-1934<sup>(12)</sup>는 현장실사에 필요한 기본적인 정보를 제공한다. 그러나 화재모델링 분석자와 현장실사 수행자간의 견교회와 현장실사 수행을 위한 사전준비 및 수행과정에 대한 상세한 절차를 제공하지 않는다. 본 연구에서는 원전의 특수성을 고려하여 원전 현장직원들이 쉽게 화재모델링 현장실사를 수행할 수 있도록 도움을 줄 수 있는 현장실사 수행절차를 개발하였다. 본 연구에서 개발한 현장실사 지침의 적용성을 검증하고 확인하기 위해서 원전에서 발생 가능한 샘플 다중오동작 시나리오 및 안전정지 중요기기를 가상으로 선정하고 분석하였다. 또한 가상의 안전정지 중요기기 및 케이블을 대상으로 샘플 화재모델링 시나리오를 개발하였다. 샘플 화재모델링을 위한 현장실사는 실제 발전소를 대상으로 수행되었으며, 현장실사를 통해 수집된 정보가 화재모델링에 적용될 수 있도록 도면정보와 비교·검토되었다.

## 2. 현장실사 절차개발

현장실사 수행절차 순서도를 Figure 1에 나타내었다. 수행절차 순서도에서 주요 항목은 9개로 구성되고, 푸른색 배경으로 표시되어 있다. 수행 절차의 주요항목에 대한 설명은 본 논문의 각 세부 절에서 구체적으로 기술된다.

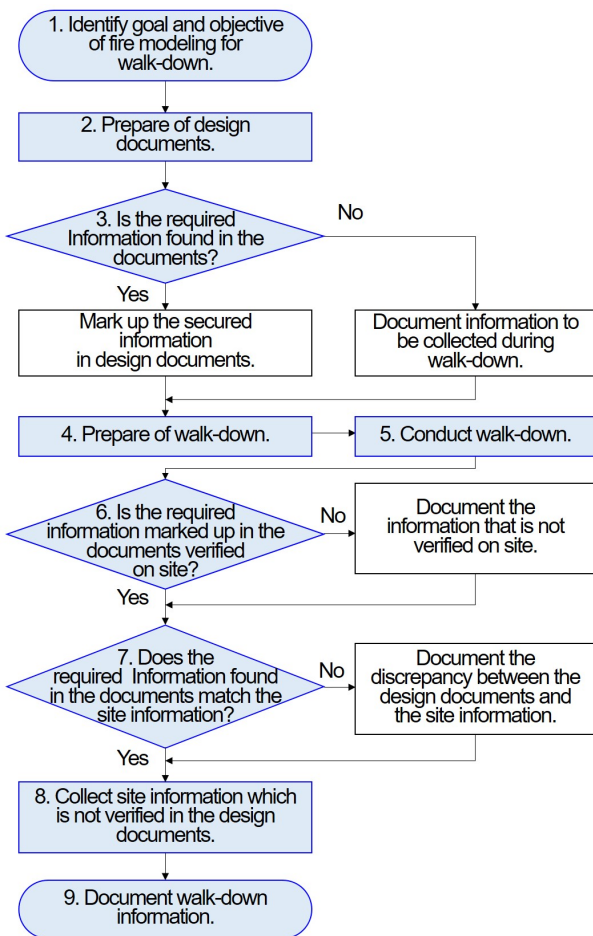


Figure 1. Walk-down performance procedure for fire modeling analysis of nuclear power plant based on deterministic fire protection requirement.

### 2.1 현장실사 수행을 위한 화재모델링 목표 및 목적 확인

현장실사 수행을 위한 화재모델링의 목표 및 목적을 확인하고, 화재모델링 수행 시 요구되는 필수 정보를 파악한다. 화재모델링을 위한 발전소 현장실사 수행의 첫 번째 목적은 도면이나 보고서에서 파악되지 않은 화재모델링 입력 변수에 대한 정보를 수집하는 것이고, 두 번째 목적은 현장실사 이전에 도면이나 보고서에서 파악한 정보와 실제 발전소 현장실사 정보와 비교하는 것이다.

### 2.2 설계문서 준비

화재모델링에서 요구되는 정보를 포함하는 설계문서를 준비한다. 경제적이고 효과적인 현장실사 수행을 위해서는 화재모델링에 대한 기본지식이 필요하다. 이를 위해 원전 화재모델링분석 지침서 NUREG-1934<sup>(12)</sup> 2장의 화재모델링 입력변수 값들에 대한 내용을 사전에 검토하여 기본적인 내용을 숙지 후 관련 설계문서를 수집한다.

### 2.3 설계문서 검토

현장실사 수행자는 수집된 설계문서 자료에서 관심 방화지역 내 가연물의 위치, 감지/진압설비 위치 등을 확인한다. 만약 화재모델링에 필요한 정보들이 설계문서에서 파악 가능하다면 각 정보들을 설계문서에 표시한다. 그러나 화재모델링에 필요한 정보를 설계문서에서 파악할 수 없다면, 현장실사 시 수집되어야 할 정보 목록을 별도의 문서로 작성한다. 두 경우 모두 발전소 도면에 표시를 하면 매우 유용하다.

### 2.4 현장실사 준비

현장실사 수행을 위해 현장실사 필요 인원 구성, 도구 준비, 경로설정 등의 준비를 한다. 발전소 현장에서 한 사람이 케이블 경로를 찾으면서 화재모델링 관련 모든 정보를 기록하기 위해서는 많은 시간이 요구되고, 누락된 정보가 많이 발생할 수도 있다. 따라서 효과적인 현장실사를 위해 현장실사 팀은 적어도 두 사람 이상으로 구성되어야 한다. 이때, 관심 방화지역에 익숙한 사람과 화재모델링 분석 지침 및 화재모델링 입력정보에 익숙한 사람을 포함하도록 한다.

### 2.5 현장실사 수행

현장실사 수행 준비가 완료되면 현장실사를 수행하도록 한다. 현장실사 수행자는 기 선정한 현장실사 경로를 따라 현장실사를 수행하며 고정 및 이동 점화원, 목표물 및 중간 가연물, 화재방호설비 등의 위치를 파악하도록 한다. 또한 케이블이 시작되는 지점의 기기와 케이블이 끝나는 지점의 기기에 대한 위치 및 크기 정보 등을 상세하게 기록하도록 한다. 사진, 비디오 등의 전자 장비를 활용하여 기록하는 것이 가장 효율적인 방법이나 발전소 보안 등의 문제로 이러한 장비 소지가 허용되지 않을 수 있다. 이때에는 현장의 모습을 손으로 스케치 하거나 메모를 하도록 한다. 케이블의 시작점, 전선관 및 케이블 트레이 경로, 케이블이 끝나는 지점을 효과적으로 검사하기 위해서는 다음의 절차를 따르도록 한다.

- (1) 케이블이 시작하는 지점부터 현장실사를 시작한다.
  - 케이블이 시작하는 지점에서 케이블의 전체 경로를 통해 도면에 표시한 부분을 위주로 케이블의 끝 지점까지 필요한 정보를 수집한다. 전선관 및 케이블 트레이에 대해서는 다음의 사항을 확인한다.
    - 전선관 및 케이블 트레이를 화재로부터 보호하기 위한 화재방벽, 전선관과 케이블 트레이의 래핑(Wrapping)이 있는지 확인한다.
    - 케이블 트레이 상단 및 하단에 금속의 덮개가 있는지 확인한다.
    - 고정 및 이동 점화원이 존재하는 위치에서 바닥으로부터 전선관 및 케이블 트레이의 상대적인 위치를 파악한다.

- 전선관 및 케이블 트레이를 따라서 현장의 모습을 기록한다. 이때, 점화원과 목표물 사이의 상대적인 위치를 파악하고, 화재모델링에서 현장의 모습을 그대로 재현할 수 있도록 전선관 및 케이블 트레이의 전체로 보일 수 있게 주의한다.
  - 도면에서는 식별되는 전선관이나 케이블 트레이가 현장실사 시 시각적으로 확인되는지를 확인하며, 접근성이 용이한지 확인한다.
- (2) 현장실사 수행 경로 내 케이블 근처에 있는 고정 점화원의 위치를 파악한다. 이때 점화원과 표적사이에 위치한 가연성 물질에 대한 정보를 함께 기록한다.
  - (3) 현장실사 수행 경로 내 케이블 근처에 있는 고정 또는 이동 점화원으로부터 화재가 발생 시 중간가연물로 화재를 전파시킬만한 물질의 위치를 확인 및 기록한다. 일반적으로 오픈된 케이블 트레이나 플라스틱 배관 등이 중간가연물에 포함된다. 중간 가연물로 파악되는 케이블 트레이에 대해서는 바닥에서부터 높이와 케이블 트레이 너비를 측정한다.
  - (4) 현장실사 경로 근처에 연기 감지기가 있다면, 감지기의 위치를 파악한다. 이때 감지기의 위치는 바닥면에서 감지기까지의 높이와 목표물로부터 감지기까지의 수평거리로 측정되어야 한다. 만약 감지기의 자동 제어가 가능하다면 자동제어 장치에 대한 정보도 함께 파악한다.
  - (5) 화재 시나리오 개발에 영향을 미칠 수 있는 방화지역별 기능을 기록한다. 방화벽과 중간 장애물은 화재 진행에 영향을 줄 수 있고, 화재로 인해 생성된 조건으로부터 목표물을 보호할 수 있으므로 방화벽과 중간 장애물에 대한 정보를 함께 기록한다.

## 2.6 설계문서 정보 현장 수집

현장실사 수행 전 설계문서에서 파악한 정보들을 현장에서 확인한다. 설계문서에 기술된 정보가 현장에서 확인되지 않는다면 불일치 사항에 대한 내용을 문서화 한다. 이러한 불일치는 사용된 설계문서가 최신 개정본이 아니거나, 설비 개선사항이 관련 설계문서에 반영되지 않은 경우에 발생할 수 있다.

## 2.7 설계문서 정보와 현장 정보 세부 비교 검토

설계문서에서 확인한 정보를 현장실사 결과와 비교 검토한다. 도면등과 같은 설계문서에 표시한 정보를 현장에서 확인하면 불일치가 발생할 수 있다. 만약 설계문서와 현장의 정보가 불일치된다면 관련 내용을 문서화한다. 설계문서 정보와 현장실사의 불일치는 발전소 형상관리와 연관되므로 불일치에 대한 문서화는 발전소 형상관리를 향상시키는데 도움이 된다.

## 2.8 설계문서 부족 정보 현장 수집

설계문서에서 확인하지 못한 정보를 현장에서 확인한다. 점화원, 가연물, 목표물 위치 등에 대한 정확한 3차원 정보는 설계문서에서 확인하기 어렵다. 이러한 정보는 현장실사를 통해서만 수집이 가능하다. 따라서 현장실사 수행자는 화재모델링에 필요한 방화지역 내 3차원 정보를 수집해야 한다. 예를 들어, 수평 및 수직방향으로의 3차원 케이블 이동 경로는 현장실사에서 수집한 사진 및 영상에서 정확한 위치를 파악할 수 있다.

## 2.9 현장실사 정보 문서화

현장실사에서 얻은 모든 정보를 문서화한다. 현장에서 얻은 정보(스케치, 사진, 비디오 등)를 문서화하는 과정에서는 화재모델링 분석자와 상호간 의견 교환이 적절하게 이루어져야 한다. 현장실사 수행자는 현장에서 정보를 수집하는 동안 파악한 불일치 사항이나, 발전소 보안등의 이유로 수집하지 못한 정보가 있었는지 등에 대한 사항을 화재모델링 분석자에게 알려 주어야 한다. 화재모델링 수행자가 필요로 하는 정확한 정보는 이러한 의견교환을 통해서 전달될 수 있다.

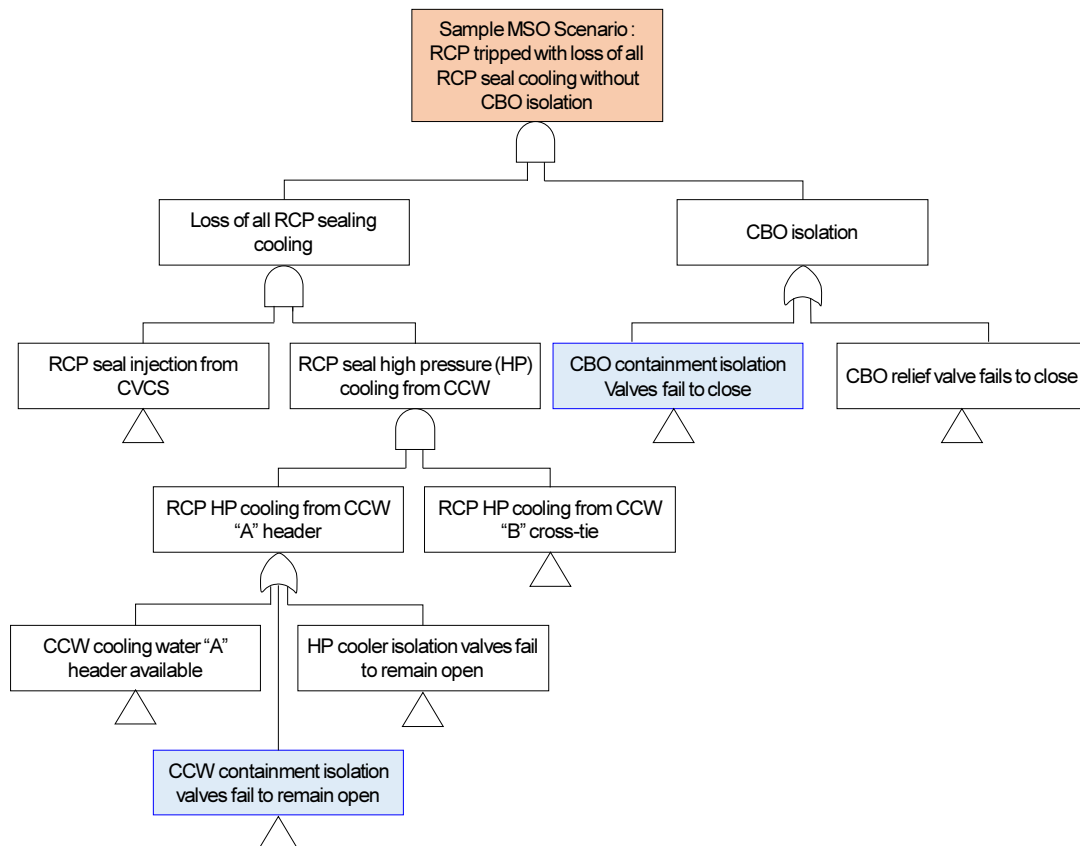
# 3. 샘플 화재모델링 가정

## 3.1 가상 다중오동작 시나리오 가정

본 연구에서는 화재모델링 현장실사 수행절차 개발을 위해 가상의 원자력 발전소를 가정하였다. 또한 연구를 목적으로 NEI 00-01의 다중오동작 시나리오 중 “원자로냉각재 펌프 밀봉 냉각” 시나리오를 샘플 시나리오로 선정하여, 결정론적 요건준수 미흡함 해결을 위한 완화전략으로 화재모델링을 적용하였다. Figure 2는 가상원전에 적용된 다중오동작 샘플 시나리오의 고장 수목도(Fault tree)를 나타낸다. 가상원전의 다중오동작 샘플 시나리오에서는 원자로 냉각재 펌프의 밀봉 냉각을 위해 “일차 기기 냉각수 계통(Component cooling water system, CCWS)” 및 “화학 및 체적 제어 계통(Chemical and volume control system, CVCS)”을 필요로 한다. 본 연구에서 적용된 가상원전의 다중오동작 샘플 시나리오에 적용되는 밸브 기기 번호는 다음과 같이 가정하였다.

- CCWS 격리밸브 : CCWS-V-01
- CVCS의 제어누설 격리밸브 : CVCS-V-01

가상원전의 다중오동작 샘플 시나리오 에서는 화재로 인한 케이블 손상으로 격납건물 내 CCWS 격리밸브가 오동작으로 닫히고, CVCS의 제어누설(Controlled Bleed-off, CBO) 격리밸브(CVCS-V-01)가 오동작으로 개방되는 경우를 가정한다. 이러한 시나리오가 발생되면 원자로냉각재 펌프의 밀봉수 냉각 기능이 상실될 수 있다. 상기 다중오동



**Figure 2.** Fault tree for assumed sample MSO scenario according to Table G-2 of NEI00-01<sup>(7)</sup>; Acronyms: Reactor coolant pump (RCP), Controlled bleed off (CBO), Chemical and volume control system (CVCS), Component cooling water (CCW).

작 시나리오와 관련된 안전정지 기기 및 필수 케이블들은 NEI 00-01 지침에 따라서 “안전정지 중요기기”로 분류되므로 결정론적 요건 준수 미흡 시 해결방안으로 화재모델링을 적용할 수 있다.

### 3.2 가상 화재모델링 목표 설정

NUREG-1934<sup>(12)</sup>는 원전 화재모델링 분석을 위한 수행 절차 및 방법을 제공한다. 화재모델링 분석자는 화재모델링 분석의 첫 단계로 화재모델링 목표 및 목적을 설정하고, 적절한 성능기준(Performance criteria)을 정해야 한다. NUREG-1934<sup>(12)</sup>에 따르면 성능기준은 화재 시나리오에서 고장 조건 발생여부를 판단하기 위해 적용되는 특정 목표물(Target) 및 목표물 그룹에 대한 손상 임계치(Threshold)로 정의된다.

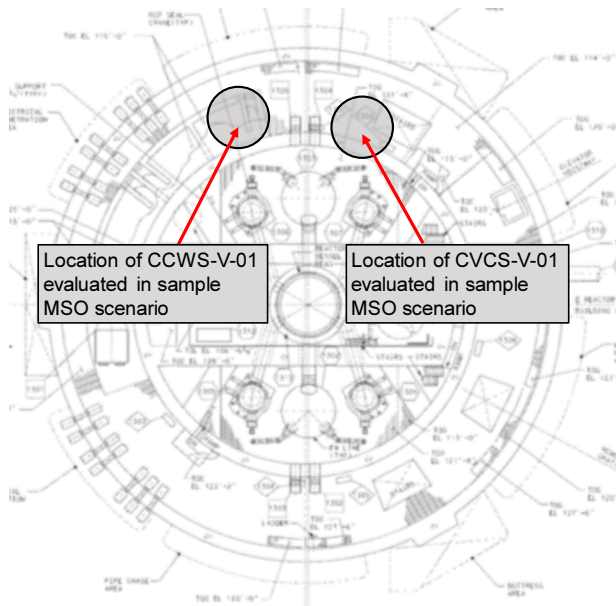
결정론적 화재방호 요건을 기반으로 한 원자력발전소 화재모델링에서 주요하게 다루어지는 목표물은 안전정지를 위한 기기들과 각 안전정지 기기에 연결된 필수 케이블이다. 따라서 화재모델링 시나리오를 설정할 때 화재모델링에 적용 가능한 안전정지 기기 및 케이블을 적절하게 선정해야 한다. 여기서 “적용 가능한”이란 화재모델링을 사용할 경우 공학적인 판단(Engineering judgement)으로 요건 준수 미흡함을 충분히 해결할 수 있다는 확신이 있다는

것을 의미한다. 화재모델링에 적용 가능한 안전정지 기기 및 케이블을 선정하기 위해서는 원자력 계통, 전기, 화재 확률론적 안전성평가(Probabilistic safety assessment, PSA) 및 화재 모델링 전문가로 구성된 전문가패널 검토회의가 필요하다.

화재모델링에 적용되는 안전정지 기기에는 다수의 케이블이 연결되어 있을 수 있으며, 각 기기 별 정상위치 및 안전정지 시 기능위치에 따라 필수 케이블들이 선정 되어야 한다. 이러한 필수 케이블의 선정은 화재 안전정지 분석의 일환으로 다중오동작 회로분석을 포함한 상세회로분석에서 수행된다. 전문가 패널 의견을 바탕으로 화재모델링에 적용 가능한 기기 및 케이블이 파악되면, 그 다음 순서로 관련 도면을 분석해야 한다. 도면 분석에서는 화재모델링 목표물로 선정된 기기 및 케이블의 위치를 파악한다.

본 연구에서는 화재모델링 절차개발을 목적으로 전문가 패널 검토가 수행되었다. 가상 원전을 대상으로 선정한 샘플 다중오동작 시나리오 1번을 화재모델링에 적용 가능한 시나리오로 선정하였다. 다중오동작 샘플 시나리오를 기반으로 한 화재모델링의 목표(Goal), 목적(Objective) 및 성능 기준(Performance criteria)은 다음과 같다.

- 목표 : 격납건물에서 화재가 발생하면 CCWS 격리밸브와 CVCS 제어누설 격리밸브가 동시에 그 기능을 상실하지 않는다는 것을 입증하라.



**Figure 3.** Physical location of the target valves and cable routes for the assumed sample MSO scenario according to Table G-2 of NEI00-01<sup>(7)</sup>.

- 목적 : 격납건물에서 고정 및 이동 점화원에 의한 화재 발생 시 격납건물 내 위치한 CCWS 격리밸브 및 CVCS 격리밸브의 기능과 연관된 케이블이 성능기준을 초과하는지 확인하기 위해서 계산을 수행하라.
- 성능기준 : 열가소성 케이블의 표면온도가 205 °C를 초과하거나, 복사열유속이 6 kW/m<sup>2</sup>을 초과하면 케이블이 손상된 것으로 간주한다.

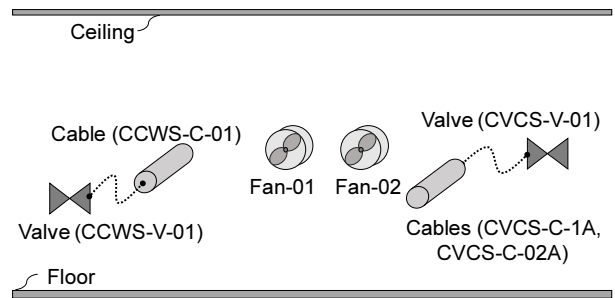
#### 4. 샘플 현장실사 절차 수행

본 연구에서 개발한 현장실사 수행절차의 타당성 및 신뢰성을 검증하기 위해서 Figure 1의 절차에 따라 가상의 화재모델링 시나리오 분석을 위해서 샘플 현장실사를 수행하였다.

##### 4.1 화재모델링 목표 확인 및 설계문서 준비

샘플 현장실사에서 본 단계는 Figure 1의 1, 2번 항목에 해당된다. 현장실사 수행의 첫 번째 단계는 화재모델링 목표 및 목적을 파악하는 것이다. 현장실사의 목적이 화재모델링분석을 위한 필수 정보 수집이므로, 현장실사 수행자는 화재모델링의 목표 및 목적을 확실하게 인지하고 있어야 한다.

화재모델링 시 요구되는 필수 정보가 무엇인지는 도면 및 설계문서 검토를 통해서 간접적으로 확인될 수 있다. 본 연구에서 적용된 가상의 샘플 화재모델링의 주 목적이 CVCS-V-01 및 CCWS-C-01가 화재로부터 동시에 영향을 받는지 확인하는 것이므로, 각 밸브의 안전정지 기능 위치를 우선적으로 파악해야 한다. 예를 들어, 시나리오에서 가



**Figure 4.** Schematic of fire modeling for the assumed sample MSO scenario before performing walk-down, according to Table G-2 of NEI00-01<sup>(7)</sup>.

정된 밸브 CVCS-V-01의 정상운전 위치는 “개방”이고, 안전기능 수행위치는 “닫힘”이다. 즉, CVCS-V-01의 정상운전 기능위치에서 안전기능 수행 위치로의 변환을 “개방:닫힘(Open:Closed)”과 같이 표현할 수 있다.

본 연구에서는 샘플 화재모델링에 대한 현장실사 절차 수행을 위해 격납건물 일반기기배치도 및 전선관 샘플 도면을 준비하였다.

##### 4.2 샘플 도면분석 및 현장실사 준비

샘플 현장실사에서 본 단계는 Figure 1의 3, 4번 항목에 해당된다. Figure 3은 화재모델링 목표물로 선정된 격납건물 내 밸브 및 케이블의 위치를 나타내는 샘플 일반 기기 배치도이다. 샘플 도면에서 두 밸브는 물리적으로 충분한 거리만큼 떨어져 있는 것이 확인된다. 그러나 화재모델링 목적을 달성하기 위해서 화재모델링 분석자는 현장실사를 통해 두 밸브 사이에 전기 팬, 케이블 트레이 등과 같은 고정 점화원과 중간 가연물의 존재 여부를 확인해야 한다.

Figure 4는 Figure 3에서 확인한 밸브 및 케이블 위치정보를 기반으로 재구성한 화재모델링 시나리오의 개략도를 보여준다. 실제의 경우 현장실사 팀은 화재모델링 분석자로부터 이와 같은 화재모델링 시나리오 개략도 정보를 얻을 수 있다. 화재모델링 분석자가 원하는 정보는 기기와 케이블의 연결 상태, 케이블 이동방향, 케이블 간 이격거리, 점화원의 유무 및 위치 등이 될 수 있다.

Table 1은 밸브 CVCS-V-01의 “개방:닫힘(Open:Closed)” 안전기능 위치수행을 위한 필수 케이블들의 경로 정보를 나타낸다. 일반적으로 케이블 정보는 Table 1과 같이 시작기기(From equipment), 종료기기(To equipment), 격실번호(Room number) 또는 방화지역 번호, 전선관 및 케이블 트레이 시퀀스(Sequence) 번호를 포함한다. 원자력발전소에서는 하나의 케이블이 시작기기에서 종료기기에 도달하기 위해서 한 개 이상의 격실 및 방화지역을 지나는 복잡한 경로를 가진다. 만약 케이블 정보에서 격실정보는 있지만 방화지역 정보가 누락되어 있다면 격실번호와 방화지역번호를 매핑(Mapping)하여 케이블이 관통하는 방화지역 번호를 확인하는 것이 좋다. 또한 하나의 케이블은 시작 기기에서 종료

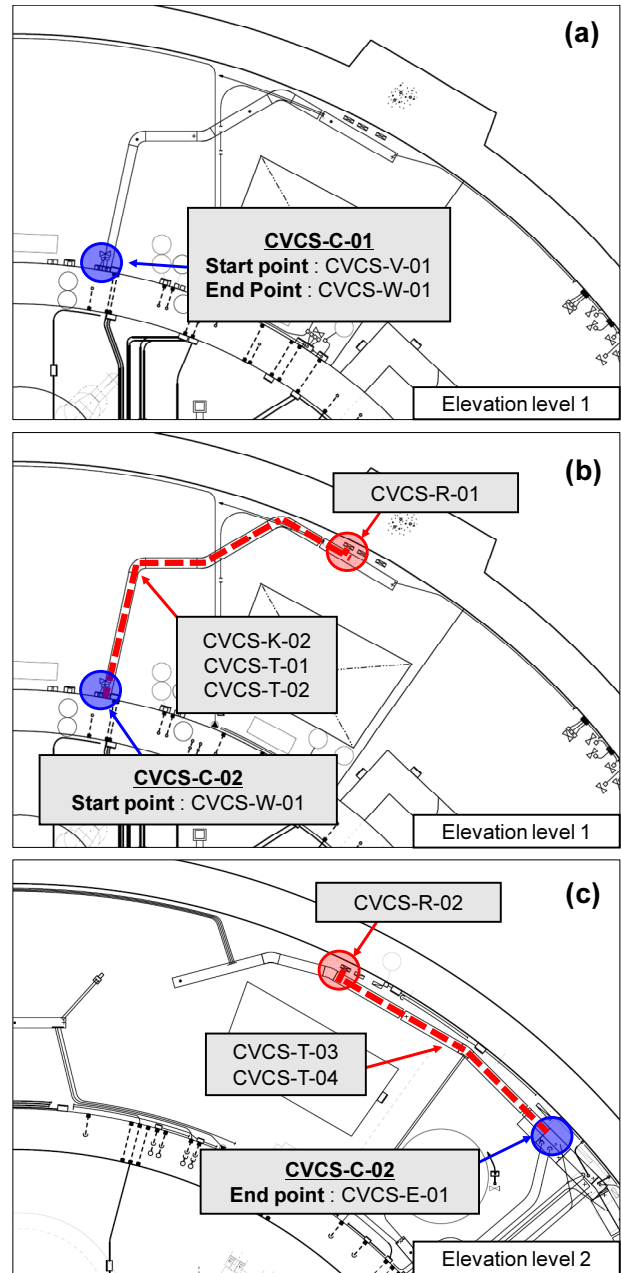
**Table 1.** An example of Cable Route Information

(a) Cable ID : CVCS-C-01			
Raceway ID	Sequence	Fire area	Drawing
CVCS-V-01	0	F001	Figure 5(a)
CVCS-K-01	1	F001	
CVCS-W-01	999	F001	
(b) Cable ID : CVCS-C-02			
Raceway ID	Sequence	Fire area	Drawing
CVCS-W-01	0	F001	Figure 5(b)
CVCS-K-02	1	F001	
CVCS-T-01	2	F001	
CVCS-T-02	3	F001	
CVCS-R-01	4	F001	Figure 5(c)
CVCS-R-02	5	F001	
CVCS-T-03	6	F001	
CVCS-T-04	7	F001	
CVCS-E-01	999	F020	

기기까지 복수개의 케이블 트레이 및 전선관을 통해 연결된다. 일반적으로 한 케이블의 이동경로 순서를 시퀀스로 정하는데, 본 연구에서는 시작 기기를 시퀀스 0으로, 종료기기를 시퀀스 999로 표현하였다. 경로 이름(Raceway ID)에서 전선관은 K, 터미널박스는 W, 케이블 트레이는 T, 라이저는 R, 격납건물 전기 관통부는 E로 표시하여 구분하였다.

Figure 5는 Table 1의 정보를 기반으로 화재모델링에 필요한 케이블 경로를 샘플 도면에 표시한 도면 분석 결과를 나타낸다. Figure 5(a)에서 케이블 CVCS-C-01은 밸브 CVCS-V-01에서 시작해서 전선관 CVCS-K-01을 지나 종료 기기인 터미널박스 CVCS-W-01 까지 연결된다. Figure 5(b)에서 케이블 CVCS-C-02는 좀 더 복잡한 경로를 가진다. 케이블 CVCS-C-02는 터미널박스 CVCS-W-01에서 시작해서 전선관 CVCS-K-02, 케이블 트레이 CVCS-T-01 및 CVCS-T-02를 거쳐 라이저 CVCS-R-01로 이동한다. Figure 5(c)에서 케이블 CVCS-C-02는 라이저 CVCS-R-02를 통해 레벨 1에서 레벨 2 높이로 이동한 후, 케이블 트레이 CVCS-T-03 및 CVCS-T-04를 거쳐 종료 기기인 CVCS-E-01에 도달 한다.

도면 분석을 통해서 화재모델링을 위한 대략적인 정보는 파악하였지만, 현장실사를 통해서 상세정보를 더 수집해야한다. 그러나 본 화재모델링 시나리오에 대한 샘플 기기 및 케이블은 격납건물 내 위치하므로, 원자력 발전소 종사자가 아닌 일반 화재모델링 분석자의 접근이 제한될 수 있다. 이러한 경우에 현장실사는 방사능 관리구역에 접근 가능한 발전소 현장직원에 의해서 수행되어야 한다. 따라서 화재모델링 분석자는 관련 도면과 설계문서를 통해 화재모델링을 위한 정보를 최대한 수집하고 분석하여, Figure 3 및 Figure 5와 같이 발전소 현장직원이 현장실사 경로를 쉽

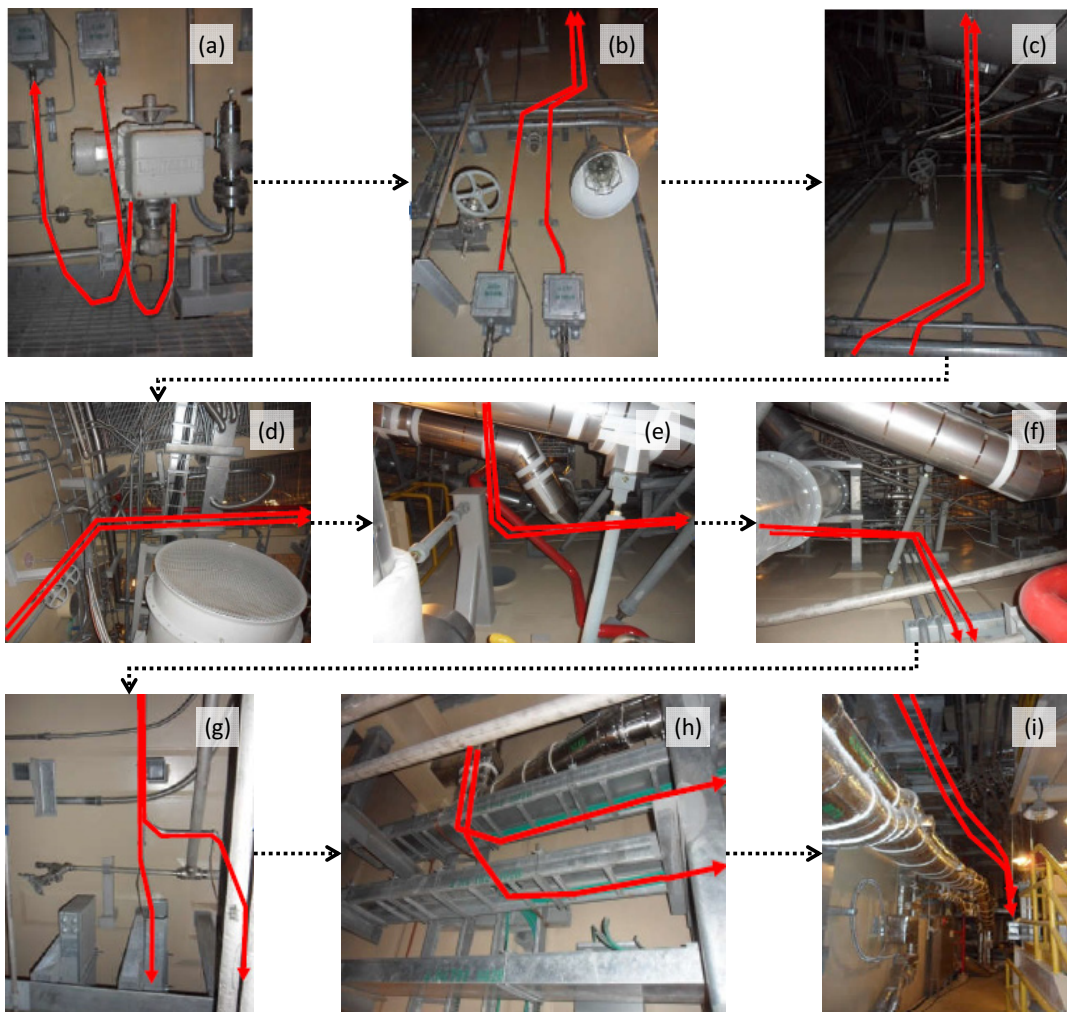


**Figure 5.** Examples of mark up for cable route information on the conduit drawings: (a) CVCS-C-01 at elevation 1, (b) CVCS-C-02 at elevation 1, and (c) CVCS-C-02 at elevation 2.

게 파악할 수 있도록 도면에 케이블 경로를 표시해주어야 한다. 도면에 표시된 정보를 기반으로 발전소 현장실사 수행자는 경로를 따라 화재 모델링에 필요한 기기 및 케이블, 이차가연물 등의 주요 정보를 수집하도록 한다.

### 4.3 현장실사 수행 및 정보 수집

샘플 현장실사에서 본 단계는 Figure 1의 5, 6번 항목에 해당된다. 가상의 화재모델링 샘플 시나리오에 대한 도면



**Figure 6.** Verification of cable route through walk-down: Red solid lines are overlapped on cable trays and conduit to indicate the cable route.

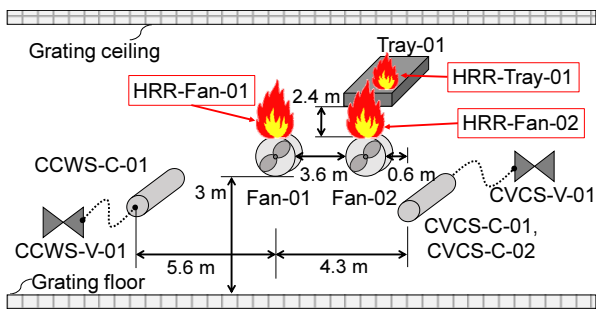
분석 결과를 기반으로 실제 현장실사를 수행하였다. 현장 실사를 통해서 Figure 4에서는 확인할 수 없었던 바닥 및 천장 정보를 수집할 수 있었다. 화재모델링 대상 공간은 격납건물 내 레벨 1과 레벨 2 높이 사이이며, 이 지역은 모두 그레이팅(Grating) 바닥과 천장으로 구성되었다. 또한 Figure 4에 표시된 전기 팬의 위치를 확인하였다. 그리고 전기팬 Fan-02에 인접하고 있는 케이블 트레이를 확인하였다. 현장 실사에서는 Figure 5와 같이 도면에 표시한 케이블 경로를 따라서 디지털 카메라를 이용하여 기기 및 케이블의 위치 및 이동경로정보를 수집하였다. 도면에 표시된 케이블 경로는 현장실사에서 거의 일치하는 것을 확인하였다. 다만 2차원 도면에서는 확인 불가능한 케이블의 수직방향 이동 거리 등을 확인 할 수 있었다. Figure 6은 절차에 따라 현장 실사를 통해 수집한 3차원 공간의 케이블 이동경로에 대한 사진을 보여준다.

현장실사 수행자는 Figure 6에서와 같이 현장실사를 통해 수집한 사진정보에 케이블 경로를 표시해야 한다. 이렇

게 표시한 자료는 화재모델링 분석자에게 현장정보를 효과적으로 전달하는 방법이다. 현장실사를 직접 수행하지 않은 화재모델링 분석자는 현장실사 수행자로부터 전달받은 도면에 표시된 자료를 토대로 안전정지 기기 및 케이블의 위치 파악이 가능하며, 이에 대한 정확한 위치를 화재모델링 입력 값으로 사용할 수 있다. Figure 6(a)에서 CVCS-C-01는 CVCS-V-01에서 시작하여 수직 방향으로 올라가고, Figure 6(b)-(d)에서 천장을 타고 전기팬을 인접하여 지나면서 바깥벽으로 진행하는 것을 확인하였다. Figure 6(e)-(g)에서 케이블 다시 벽에서 내려와 라이저로 진입하고, Figure 6(h)-(i)에서 다시 바닥면으로 내려와 케이블 트레이를 거쳐서 종료 기기로 진입하는 것을 확인하였다. 현장실사에서 확인한 케이블 경로는 동일한 레벨에서도 바닥과 천장을 위아래로 이동하면서 진행한다. 이러한 정보는 현장실사를 통해서만 수집 가능하다.

현장실사에서 전기 팬은 바닥에서부터 대략 3 m 높이에 위치하고 있었으며, 두개의 팬 Fan-01와 Fan-02 사이에 중





**Figure 7.** Schematic image of fire modeling reconstructed with collected information through walk-down and updated from Figure 4.

간 가연물이 존재하지 않으며, 두 개의 팬은 충분한 이격거리를 유지하고 있는 것을 확인하였다. 그러나 Fan-02 상부에 인접한 케이블 트레이 Tray-01은 화재의 영향을 받을 수 있으므로, Fan-02와 케이블 트레이간 수평 및 수직방향의 이격거리를 측정하였다.

#### 4.4 현장실사 수집정보 비교 및 검토

샘플 현장실사에서 본 단계는 Figure 1의 7~9번 항목에 해당된다. 현장실사 정보를 토대로 Figure 4의 화재모델링 시나리오 정보가 보완되었다. Figure 7은 현장실사를 통해 수집한 정보를 기반으로 하여 입력한 화재모델링 시나리오의 개략도를 나타낸다. 화재는 점화원인 전기팬 Fan-01 또는 Fan-02에서 발생 가능하며 각 점화원은 HRR-Fan-01, HRR-Fan-02 만큼의 최대 열방출률(Heat Release Rate, HRR)을 가질 수 있다. NUREG/CR-6850<sup>(4)</sup>는 전기팬에 대한 최대 HRR 값을 제공한다. 화재 시나리오는 다음과 같이 구체화될 수 있다.

- 시나리오 1 : 고정 점화원 Fan-01에서 화재발생, HRR-Fan-01 값이 화재모델링 시 적용
- 시나리오 2 : 고정 점화원 Fan-02 및 인접한 Tray-01에서 화재발생(HRR-Fan-02 및 HRR-Tray-01 값이 동시에 화재모델링 시 적용)
- 시나리오 3 : CVCS-C-01와 CCWS-C-01 사이의 이동 점화원 화재

시나리오 2의 경우, 현장실사에서는 트레이 Tray-01이 점화원 Fan-02의 중심선을 지나는 수직선 밖에 위치하고 있는 것이 확인되었다. 그러나 화재모델링에서는 팬의 직상부에 케이블 트레이가 있다고 가정함으로써 분석 마진(Margin)을 가지고 더 보수적인 결론을 도출할 수 있다.

### 5. 결 론

결정론적 화재방호 요건으로 설계된 원자력발전소의 화재안전정지 분석을 위해 필요시 안전정지 중요기기에 대해서 화재모델링 분석을 수행할 수 있다. 본 연구의 목적은 안전정지 중요기기에 대해서 화재모델링 분석을 수행할 때

필요한 현장실사 수행 절차를 개발하고, 실제 현장실사 수행을 통해서 절차의 적정성을 검증하는 것이다. 본 연구는 결정론적 화재방호 요건을 기반으로 한 원전의 화재모델링 분석을 위한 기초연구로 수행되었다. 본 연구의 주요 내용은 다음과 같이 요약된다.

- (1) 결정론적 화재방호 요건을 준수하는 원자력발전소 화재모델링 현장실사 절차는 “① 화재모델링 목적 파악, ② 도면 등 자료 수집 및 분석, ③ 현장실사 수행, ④ 현장실사 보고서작성” 으로 구성된다. 또한, 원자력발전소에 특화된 각 항목에 대한 세부적인 내용이 개발되었다.
- (2) 현장실사 절차의 적정성 검증을 위해 샘플 원전과 가상의 화재모델링 시나리오를 선정하여 실제 현장실사를 수행하였다. 현장실사를 통해 도면에서 분석한 케이블 경로가 실제 발전소에 어떻게 시공되어 있는지를 확인하고, 도면에서 파악할 수 없는 고정 점화원의 위치, 중간가연물의 위치, 목표물의 위치 등을 확인하였다.
- (3) 도면을 통해 파악되는 2차원 정보는 매우 제한적이다. 따라서 현장실사를 통해 얻는 3차원 공간정보는 화재모델링 시 유용하게 사용될 수 있다. 또한 현장실사를 통해서 이동 점화원의 가상의 위치를 확인할 수 있으며, 이러한 정보들을 토대로 화재모델링의 정확성과 보수성을 향상시킬 수 있다.
- (4) 본 연구에서 개발한 현장실사 절차에 따른 현장실사는 매우 성공적이었고, 화재모델링 수행을 위해 필요한 정보를 모두 수집할 수 있었다. 이러한 정보를 토대로 화재모델링 시나리오는 훨씬 더 구체화 될 수 있었다.
- (5) 일반 산업 시설과 달리 원자력발전소에서는 안전정지 기기 및 케이블의 위치 및 경로 파악이 중요하기 때문에 현장실사 수행이 필요하다. 따라서 원자력발전소 화재모델링을 위한 현장실사 수행 전에 본 연구에서 개발한 현장실사 절차와 방법을 숙지하면 현장실사 수행자에게 큰 도움을 줄 것으로 판단된다.

### References

1. U.S. NRC, “Guidance for Fire Protection for Nuclear Power Plants (BTP APCS 9.5.1)”, United States Nuclear Regulatory Commission, Washington, D.C. (1976).
2. U.S. NRC, “Fire Protection Program for Nuclear Power Facilities Operating prior to January 1, 1979 (10 CFR 50 Appendix R)”, United States Nuclear Regulatory Commission, Washington, D.C. (1979).
3. U.S. NRC, “Fire Protection for Operating Nuclear Power Plants (Regulatory Guide 1.189)”, United States Nuclear Regulatory Commission, Washington, D.C. (2009).

4. U.S. NRC, “EPRI/NRC-RES Fire PRA Methodology for Nuclear Power Facilities (NUREG/CR-6850)”, United States Nuclear Regulatory Commission, Washington, D.C. (2005).
5. J. Lee, J. Kim and K. Kim, “How to Use EDISON/SAFE Codes for MSO Analysis”, Proceedings of 2016 Spring Annual Conference, Korean Institute of Fire Science & Engineering, pp. 51-52 (2016).
6. J. Lee and J. Kim, “Development of a Virtual Nuclear Power Plant for Training of Post Fire Safe Shutdown Analysis including Multiple Spurious Operations”, Fire Science and Engineering, Vol. 32, No. 1, pp. 57-65 (2018).
7. NEI, “Guidance for Post-Fire Safe Shutdown Circuit Analysis”, NEI 00-01 (Rev.2), Nuclear Energy Institute, Washington, D.C. (2009).
8. J. Lee and T. Kim, “A Study on Technology Trends of Post Fire Safe Shutdown Analysis Considering Multiple Spurious Operation”, Proceedings of 2015 Fall Annual Conference, the Korea Society for Energy, No. 11, p. 149 (2015).
9. NFPA, “Performance-Based Standard for Fire Protection for Light Water Reactor Electric Generating Plants”, NFPA 805, National Fire Protection Association, Inc. (2001).
10. U.S. NRC, “Fire Protection (10 CFR 50.48(c))”, United States Nuclear Regulatory Commission, Washington, D.C. (2004).
11. J. Lee and T. Kim, “Development of Walk-down Guidance for the Deterministic Fire Modeling of Nuclear Power Plant”, Proceedings of 2018 Spring Annual Conference, Korean Institute of Fire Science & Engineering, pp. 85-86 (2018).
12. U.S. NRC, “Nuclear Power Plant Fire Modeling Analysis Guidelines”, NUREG-1934, United States Nuclear Regulatory Commission, Washington, D.C. (2012).