원전 화재위험도분석에서 전기회로분석 검증방안에 관한 연구

임현태 · 오승준 · 김위경

주식회사 피엔이·*한국원자력안전기술원 (2015. 4. 13. 접수 / 2015. 5. 14. 수정 / 2015. 5. 29. 채택)

A Study on the Verification Scheme for Electrical Circuit Analysis of Fire Hazard Analysis in Nuclear Power Plant

Hyuntae Yim · Seungiun Oh · Weekyong Kim ·

PNE Co., Ltd., *Korea Institute of Nuclear Safety (Received April 13, 2015 / Revised May 14, 2015 / Accepted May 29, 2015)

Abstract: In a fire hazard analysis (FHA) for nuclear power plant, various electrical circuit analyses are performed in the parts of fire loading analysis, fire modeling analysis, separation criteria analysis, associated circuit analysis, and multiple spurious operation analysis. Thus, electrical circuit analyses are very important areas so that reliability of the analysis results should be assured. This study is to establish essential electrical elements for each analysis for verification of the reliability of the electrical circuit analyses in the fire hazard analysis for nuclear power plants. Applying the results derived by the study to domestic nuclear power plants, it is expected to determine the adequacy of the fire hazard analysis report and contribute to the reliability of the fire hazard analysis of those plants.

Key Words: fire protection, fire hazard analysis, safe shutdown analysis, electrical circuit analysis, fire safety

1. 서론

원자력발전소 화재위험도분석(Fire Hazard Analysis, FHA)은 화재재해분석과 화재안전정지분석이 통합되어 수행되는 분석으로서 화재하중분석, 화재모델링분석, 안전정지케이블분석, 격리상태분석, 연계회로분석, 다 중오작동분석 등 전기회로분석이 광범위하게 포함되 어 있다¹⁻²⁾. 화재위험도분석에서 전기회로분석은 매우 중요한 분야이므로 분석결과의 신뢰성 확보가 필수적 이며, 이에 따라 전기회로분석의 검증이 요구된다.

본 연구에서는 원전 사업자가 제출한 화재위험도분 석보고서에 대해 규제기관이 화재위험도분석보고서의 적합성을 판단하는데 활용하기 위하여 화재위험도분 석에서 수행된 전기회로분석 및 검증에 필수적인 요소 를 도출하고, 전기회로분석 필수요소를 검증하기 위한 방안을 제시하고자 한다.

2. 전기회로분석 필수요소

화재위험도분석시 수행되는 전기회로분석에 대하여 실

제 분석을 통해 확인되고 검증된 경험적인 결과를 바탕으 로 전기회로분석 필수요소를 도출하였다.

2.1 화재하중분석

화재하중분석(Fire Loading Analysis)은 방화지역의 잠재된 화재위험을 정량화된 화재하중으로 제시하는 분석이다. 화재하중은 화재의 규모를 판단하는 척도로 서, 방화지역에 있는 모든 가연성물질의 완전연소로 발생되는 방화지역의 단위면적당 발열량(kcal/m²)으로 정의된다³⁻⁴⁾. 일반적으로 원전의 화재하중에서 케이블 로 인한 화재하증이 가장 큰 비중을 차지하므로 화재 하중분석에서 케이블 화재하중분석이 매우 중요하다. 따라서 케이블 화재하중분석 결과의 신뢰성을 확보하 기 위해서는 케이블 화재하중분석에 필요한 케이블의 정보를 정확하게 파악하는 것이 필수적이다.

화재하중분석분야에서 도출된 전기회로분석 필수요 소는 다음과 같다.

- (1) 설계 및 운영자료
 - 케이블 경로자료
 - 전산화 자료 또는 출력물

[†] Corresponding Author: Seungjun Oh, Tel: +82-2-3409-5310, E-mail: myosj1020@pnecorp.co.kr PNE Co., Ltd., 3rd Floor, 167 Achasan-ro, Seongdong-gu, Seoul 133-832, Korea

- 케이블트레이 배치도
- (2) 분석항목
 - 격실별 케이블목록
 - 격실명
 - 케이블(트레이) 번호
 - 케이블(트레이) 길이
 - 케이블 종류 : 전원, 제어, 계측
 - 격실별 화재하중 계산서
 - 케이블절연체량 산정기준
 - 케이블절연체 연소열

2.2 화재모델링분석

화재모델링분석(Fire Modeling Analysis)은 분석 대상 지역에서 발생 가능한 화재시나리오에 대해 역학적 보 존법칙과 경험적 자료 등에 근거한 화재모델을 이용하 여 화재의 성장, 환경조건, 구조물, 계통 및 기기 등에 미치는 영향을 정량적으로 예측하는 분석이다⁵⁻⁶⁾.

화재모델링분석에서 대상지역의 정확한 점화원, 가연물 및 목표물의 정보는 필수적이다. 일반적으로 원전의 화재모델링 대상지역에서 점화원, 가연물 및 목표물로서 가장 큰 비중을 차지하는 것이 케이블이므로 화재모델링분석에서 케이블분석이 매우 중요하다. 따라서 화재모델링분석 결과의 신뢰성을 확보하기 위해서는 케이블 관리자료에 근거하여 화재모델링분석에 필요한 케이블의 정보를 정확하게 파악하는 것이 필수적이다.

화재모델링분석분야에서 도출된 전기회로분석 필수 요소는 다음과 같다.

- (1) 설계 및 운영자료
 - 케이블트레이/전선관 배치도
 - 전원 및 제어캐비닛 배치도/상세도
- (2) 분석항목
 - 점화원 정보
 - 점화원 종류/위치
 - 가연물 및 목표물 정보
 - 케이블 번호
 - 목표물 여부
 - 전선로 번호/길이/위치
 - 케이블 배선경로
 - 케이블 종류 : 전원, 제어, 계측
 - 케이블절연체 재질/연소열

2.3 안전정지케이블분석

안전정지케이블분석(Safe Shutdown Cable Analysis) 은 안전정지분석의 초기단계에서 수행되는 분석으로 서 안전정지 기능을 수행하는 기기 및 케이블을 선정 하고 케이블의 경로를 파악하는 분석이다⁷⁾.

원자력발전소는 다중계열로 설계되어 있어 하나의 계열이 화재로 손상될 경우, 다른 계열의 안전정지 기기가 작동하여 안전정지 기능을 수행하도록 설계되어 있으므로 발전소 화재시 한 계열의 안전정지 기기는 손상되지 않고 안전정지 성공경로의 기능을 수행하여야 한다. 다중계열의 안전정지 케이블이 하나의 방화지역에 설치되는 경우에는 화재로 인하여 동시에 손상을 입을 수 있으므로 이 경우에 대한 전기회로 분석을수행하여 안전성을 분석하고 손상을 방지하기 위한 조치를 취하여야 한다.

안전정지케이블분석분야에서 도출된 전기회로분석 필수요소는 다음과 같다.

- (1) 설계 및 운영자료
 - 케이블 경로자료
 - 전산화 자료 또는 출력물
 - 케이블트레이/전선관 배치도
 - 계측기 배치도
 - 일반배치도
 - 방화지역도
- (2) 분석항목
 - 안전정지케이블 경로
 - 케이블 번호
 - 케이블 종류 : 전원, 제어, 계측
 - 케이블 계열 : A, B
 - 기기번호/기기명
 - 시작기기/종료기기
 - 케이블 경로(방화지역명)
 - 방화지역별 케이블 목록
 - 방화지역 번호
 - 케이블 번호
 - 케이블 종류 : 전원, 제어, 계측
 - 케이블 계열 : A, B
 - 기기번호/기기명
 - 시작기기/종료기기
 - 안전정지케이블 데이터의 설계변경사항 반영 여부

2.4 격리상태분석

격리상태분석(Separation Criteria Analysis)은 안전정 지케이블분석에서 선정된 안전정지 기기 및 케이블에 대하여 방화지역별로 다중계열간 격리요건의 만족여 부를 평가하는 분석이다^{3,7)}.

안전정지를 달성하고 유지하는데 필요한 다중의 전

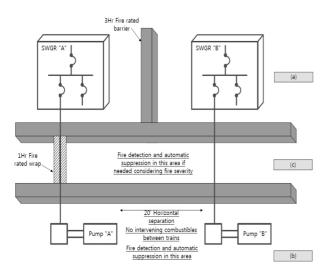


Fig. 1. Separation criteria between redundant cables (outside of primary containment).

기회로가 격납건물 외부의 특정 방화지역 내에 동시에 위치하는 경우에는 Fig. 1과 같이 다음 중 하나의 방안을 만족하여 안전정지에 필요한 하나의 전기회로 성공 경로가 확보되었는지를 확인하여야 한다^{3,7)}.

- ① 3시간 내화등급의 내화방벽으로 격리
- ② 6.1 m (20 ft) 이상 수평거리를 이격하고 중간에 가연물이 없으며 화재감지 및 자동진압설비 구비
- ③ 1시간 내화등급의 내화방벽으로 보호하고 화재감 지 및 자동진압설비 구비

그리고 격납건물 내의 격리요건은 위의 ①, ②, 또는 ③의 방안을 만족하거나 다음의 방안 중 하나를 만족하여야 한다^{3,7)}.

- ④ 6.1 m (20 ft) 이상 수평거리를 이격하고 중간에 가연물이 없음
 - ⑤ 화재감지 및 자동진압설비 구비
 - ⑥ 불연성 복사열 차폐체(30분 내화등급)로 격리

격리상태분석분야에서 도출된 전기회로분석 필수요 소는 다음과 같다.

- (1) 설계 및 운영자료
 - 방화지역별 케이블 목록(계열 표시)
 - 다중계열 공존지역의 안전정지 케이블 경로 도면
 - 격리요건 평가 자료
 - 방화지역 번호/지역명
 - 다중계열 공존지역 여부
 - 다중계열 기기 또는 케이블
 - A/B 계열 기기
 - 격리요건 만족 여부

- 격리요건 영향 평가
- (2) 분석항목
 - 다중계열 공존지역 현황
 - 다중계열 공존지역 케이블 목록
 - 격리요건 평가서
 - 다중계열 전선로(Raceway) 표시 도면
 - 안전정지 확보방안

2.5 연계회분석

연계회로분석(Associated Circuit Analysis)은 연계회로문제가 안전정지 능력을 저해하지 않도록 연계회로문제의 발생 가능성 여부를 발전소 수준에서 검토하는분석이다. 연계회로는 크게 공통전원, 공통배선함, 오작동의 3가지 유형으로 구분되며, 고온정지 달성에 필요한 계통의 다중계열 운전이 방해되거나 이상 운전을유발시킬 수 있는 비안전 연계회로에 대하여 격리설비의 구비를 요구하고 있다^{3,7)}. Fig. 2는 연계회로의 유형중에서 공통전원에 대한 문제를 예시하고 있다.

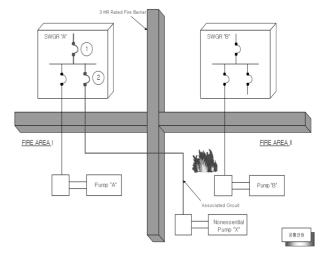


Fig. 2. Associated circuit (common power).

연계회로분석분야에서 도출된 전기회로분석 필수요 소는 다음과 같다.

- (1) 설계 및 운영자료
 - 전기 단선도(SLD)
 - 배전반별 부하목록
 - 기기번호/기기명
 - 안전정지 기기 여부
 - 방화지역
 - 계열
 - 보호계전기
 - 보호협조 설계서

- 차단기 및 퓨즈 점검절차서
- 케이블 난연성 인증자료
- 변류기 목록
- 방화벽관통부 성능평가 자료
- 배관 및 계장도(P&ID)
- 배선도(EWD)
- 제어논리도(CLD)
- (2) 분석항목
 - 공통전원 평가서
 - 차단기 번호
 - 공급전원/부하명
 - 평가내용
 - 차단기 보호협조 설계서
 - 변류기 이차발화 검토서
 - 다중고임피던스문제 평가서
 - 오작동문제 평가서
 - 안전정지 성공경로도

2.6 다중오작동분석

다중오작동분석(Multiple Spurious Operation Analysis) 은 기존의 화재위험도분석에서 화재시 한 번에 하나의 기기만 오작동 한다는 단일오작동 기준의 분석을 확장하여 화재시 두 개 이상의 기기가 오작동할 가능성을 반영하여 수행하는 분석이다⁷⁻⁸⁾.

다중오작동분석분야에서 도출된 전기회로분석 필수 요소는 다음과 같다.

- (1) 설계 및 운영자료
 - 다중오작동 시나리오 목록
 - 케이블경로자료
 - 전산화자료 또는 출력물
 - 케이블트레이 배치도
 - 전선관 배치도
 - 케이블 블록도(CBD)
 - 배선도(EWD)
 - 배관 및 계장도(P&ID)
- (2) 분석항목
 - 분석대상 시나리오 선별 목록
 - 다중오작동 시나리오 기기조합
 - 기기 위치 및 케이블 경로 정보
 - 격실별 기기케이블 분석표
 - 다중오작동문제 해결방안

본 장에서 도출된 전기회로분석 필수요소를 정리하면 Table 1과 같다.

Table 1. Essential elements for electrical circuit analysis

Analysis area	Essential elements	
	Plant data	Analysis items
Fire loading analysis	○ Cable routing data ○ Cable tray plan	○ Cable list by room ○ Fire loading calculation by room
Fire modeling analysis	Cable Tray/Conduit plan Power/control cabinet arrangement/details	○ Informations for ignition source ○ Informations for combustible and targets
Safe shutdown cable analysis	○ Cable routing data ○ Cable Tray/Conduit plan ○ Instrument location drawing ○ General arrangement ○ Fire area drawing	OSafe shutdown cable routing Cable list by fire area Update of Safe shutdown cable information by design change
Separation criteria analysis	Cable list by fire area Mark drawing of safe shutdown cable routing for areas containing redundant trains Separation evaluation material	O Areas containing redundant trains Cable list for redundant train coexistence area Evaluation sheet for separation criteria Mark drawing of safe shutdown cable routing for areas containing redundant trains Methods for satisfying separation criteria
Associated circuit analysis	○ Single line daigram ○ Load list by switchgear ○ Coordination design document ○ Maintenance procedure for circuit breaker and fuse ○ Cable flame test report ○ Current transformer list ○ Fire barrier penetration evaluation report ○ Piping and Instrument diagram ○ Elementary wiring diagram ○ Control logic diagram	Evaluation sheet for common power associate ciucuit Circuit breaker coordination study Evaluation sheet for current transformer secondary fire Evaluation sheet for multiple high impedance fault Evaluation sheet for spurious operation Mark drawing for safe shutdown paths
Multiple spurious operation (MSO) analysis	MSO scenario list Cable routing data Cable Tray/Conduit plan Cable block diagram Elementary wiring diagram Piping and Instrument diagram	Applicable MSO scenario list Equipment combinations for MSO scenarios Equipment and cable routing information Equipment and cable matrix by room Resolution scheme for MSO deficiencies

3. 전기회로분석 검증방안

본 장에서는 2장에서 도출된 전기회로분석 필수요 소를 검증하기 위한 방안을 기술한다.

3.1 화재하중분석분야

- (1) 격실별 케이블 목록
- 각 케이블의 번호, 길이, 종류 등 케이블 목록 분류의 정확성을 확인한다. ☞ 케이블 경로자료, 케이 블트레이 배치도면 등을 활용할 수 있다.
 - (2) 격실별 화재하중 계산서
- 케이블절연체량 산정 기준이 적절하게 고려되었는지를 확인한다. ☞ 케이블절연체량 산정 기준은다음과 같다⁴⁾. 첫째, 길이가 0.61 m (2 ft) 이상이며 환기가 되는 전기기기함 안의 케이블은 가연물로 간주한다. 그러나 금속으로 완전히 밀봉되어 있고 배기구가없는 접속상자와 현장제어반은 특별히 제외된다. 둘째, 강성도관 내의 케이블절연체량은 무시한다. 셋째, 배전반 및 패널에 대해서는 관례적으로 추정한다.
- 케이블 화재하중 계산에 적용된 케이블절연체의 연소열 안을 확인한다. ☞ 케이블절연체의 연소열은 케이블 공급자의 시험자료, 기타 일반자료(화재방호핸드북, NUREG 보고서 등)에서 제공하는 값을 적용할 수 있으며, 일반자료를 인용할 경우, 제조사별로 케이블의 용도, 종류 등에 따라 연소열의 제시범위가 상이하므로 케이블 화재하중이 과소평가되지 않도록 적절한 보수성이 확보되어 있는지를 확인한다.

3.2 화재모델링분석분야

- (1) 점화원 정보
- 화재시나리오에서 고려된 점화원 종류의 정확성을 확인한다. ☞ 화재유발 가능성이 있는 전기적 점화원인 전기캐비닛, 전기모터, 접속함, 변압기, 건조기, 부스 덕트, 축전지 충전기 등이 누락 없이 검토되었는지를 확인한다.
- 화재시나리오에서 고려된 점화원 위치의 정확성을 확인한다. ☞ 점화원의 위치정보가 정확하게 파악되었는지를 확인하며 전원 및 제어캐비닛 배치도, 전원 및 제어캐비닛 상세도, 기타 전기기기 배치도면, 현장실측 기록자료 등을 활용할 수 있다. 필요시 발전소 대표 지역을 선정하고 해당 지역에 대한 현장조사를 병행하여 점화원의 정확한 위치를 검증하도록 한다.
- 각 케이블의 번호, 길이, 종류 등 케이블 목록 분류의 정확성을 확인한다. ☞ 케이블 경로자료, 케이 블트레이 배치도면 등을 활용할 수 있다.
 - (2) 가연물 및 목표물 정보
- 화재시나리오에서 고려된 가연물 정보의 정확성을 확인한다. ☞ 화재시나리오에서 가연물로 정의된케이블에 대해 케이블 번호, 전선로 번호/길이/위치, 케이블 배선경로/용도, 케이블절연체 재질/연소열 등이

정확하게 파악되었는지를 확인한다. 필요시 발전소 대표 지역을 선정하고 해당 지역에 대한 현장조사를 병행하여 가연물 정보를 검증하도록 한다.

○ 화재시나리오에서 화재손상이 없도록 보호되어야 할 목표물로 고려된 정보의 정확성을 확인한다. ☞ 화재시나리오에서 목표물로 정의된 케이블에 대해케이블 번호, 목표물 여부, 전선로 번호/길이/위치, 케이블 배선경로/용도, 케이블절연체 재질 등이 정확하게 파악되었는지를 확인한다. 필요시 발전소 대표 지역을 선정하고 해당 지역에 대한 현장조사를 병행하여 목표물 정보를 검증하도록 한다.

3.3 안전정지케이블분석분야

- (1) 안전정지케이블 경로
- 안전정지케이블 선정의 적합성을 확인한다. ☞ 안전정지 기기의 기능 수행을 위한 필수적인 케이블이 선정되었는지를 확인하여야 한다. 안전정지케이블 선 정과정을 검증하기 위하여 다음과 같은 사항을 확인하여야 한다. 안전정지 기기목록에서 대표적인 기기를 선정하여 해당기기에 대한 다음과 같은 자료들을 검토하여 안전정지 기기의 기능 수행에 필요한 전원, 제어 및 계측 케이블들이 정확히 선정되었는지 확인한다.
 - 안전정지 기기 목록 (기능 및 기기 위치 포함)
 - 안전정지기기의 동작에 필요한 회로 정의 및 선정기준 자료
 - 케이블블록도(CBD), 배선도(EWD) 등 관련도면 확인 내역
 - 케이블별 기능 검토 내역
 - 케이블 선정사유
 - 안전정지 기기 케이블 목록
- 안전정지케이블 경로자료의 정확성을 확인한다. ☞ 안전정지 기기 목록중에서 선정된 대표기기들의 케이블에 대해서 케이블트레이 번호와 전선관 번호를 확인하고 케이블트레이 도면과 전선관 도면을 대조하여 기기 위치 및 케이블경로 데이터베이스가 정확한지 확인한다. 필요시 발전소 현장조사를 병행한다.
 - (2) 방화지역별 케이블 목록
- 방화지역별 케이블 목록에 아래와 같은 적절한 수준의 케이블정보가 포함되어 있는지 확인한다.
 - 방화지역 번호
 - 케이블 번호/종류/계열
 - 기기 번호
 - 시작기기/종료기기
 - (3) 안전정지케이블 데이터의 설계변경사항 반영여부 ○ 바정스에서 변으하고 있는 케이블경로 카르노
 - 발전소에서 보유하고 있는 케이블경로 자료는

설계변경시마다 갱신되어 있지 않을 수 있으므로 안전 정지 기기 또는 관련설비의 설계변경에 따른 케이블 변경사항이 반영되었는지를 확인하여야 한다. 이를 검증하기 위하여 분석대상 기간 동안의 설계변경서 검토 내역서에서 안전정지케이블의 포설경로 변경 등 안전 정지에 영향을 주는 설계변경서를 선정하여 케이블 변경사항이 안전정지 케이블 데이터에 반영되었는지를 확인한다.

3.4 격리상태분석분야

- (1) 다중계열 공존지역 현황
- - (2) 다중계열 공존지역 케이블 목록
- 다중계열 공존지역 케이블 목록의 건전성을 확 인한다. ☞ 다중계열 공존지역 케이블 목록에서 대표 케이블을 선정하여 케이블 경로 데이터베이스와 비교 를 통하여 공존지역 케이블 목록의 정확성을 검증한다.
 - (3) 격리요건 평가서
- 격리요건 평가서의 건전성을 확인한다. ☞ 격리요건 영향평가항목의 기술 내용을 검증하기 위하여기기배치도 및 다중계열 전선로 표시도면을 검토하고현장조사를 통하여 격리요건 만족여부를 확인한다.
 - (4) 다중계열 전선로 표시도면
- 다중계열 전선로 표시도면의 건전성을 확인한다. ☞ 다중계열을 색깔로 구분하여 표시한 도면을 검토하되 대표지역을 선정하고 현장조사를 통하여 격리요건 만족여부도 동시에 검증한다.
 - (5) 안전정지 확보방안
- 안전정지 확보방안의 타당성을 확인한다. ☞ 격리요건 불만족지역 기기들의 기능 및 관련 도면, 절 차서등을 확인하여 다중계열기기 손상에 따른 안전정 지 기능 상실유무, 대체가능 설비의 유무 등을 확인한 다. 필요시 현장조사를 통하여 안전정지 확보방안의 적절성을 확인한다.

3.5 연계회로분석분야

- (1) 공통전원 평가서
- 안전정지 기기에 전원을 공급하는 각 배전반별로 부하목록의 정확성을 확인한다. ☞ 부하목록에는 기기번호, 기기명, 안전정지기기 유무, 방화지역, 계열,

보호계전기 등의 정보가 입력되어 있다. 부하목록의 정확성을 검증하기 위하여 대표 배전반을 선정하여 전 기단선도와 부하목록의 일치여부를 확인하다.

○ 배전반의 계열과 부하측 연결기기의 계열을 확인한다. ☞ 배전반의 계열과 부하목록의 부하측 기기의 계열이 동일 할 경우 공통전원의 문제는 발생하지않으므로 검증을 완료한다. 그러나 다른 계열의 부하나 안전정지 성공경로가 아닌 부하가 연결되어 있을 경우, 배전반의 부하측 차단기와 상위차단기인 배전반공급측 차단기와의 보호협조 곡선을 검토하여 보호협조가 되어 있는지 확인한다.

- (2) 차단기 보호협조곡선 설계서
- 공통전원 문제의 확인을 위하여 안전정지 기기 전원공급 배전반에 다중계열의 기기가 연결되어 있을 경우 차단기의 보호협조를 검토하여야 한다. 따라서 차단기 보호협조 곡선이 발전소에 확보되어 있는지를 확인하다.
 - (3) 변류기 이차발화 검토서
- 변류기 이차발화 검토서의 적절성을 확인한다. 특정 배전반을 선정하여 전기단선도의 내용이 정확히 입력되었는지를 검토하며, 아래와 같은 변류기 문제를 검토하는 절차에 따라 적합하게 검토되었는지를 확인한다.
 - ① 변류스위치기어를 비롯한 전원계통 중 변류기를 포함하고 있는 전원을 파악한다.
 - ② 다음과 같은 특성을 갖는 변류기를 선별 제외 하다.
 - a. 변류기 이차회로가 변류기가 설치된 기기 의 방화지역을 벗어나지 않는 경우
 - b. 변류기 이차회로가 변환기(Transducer)에 의해 전기적으로 격리되고 변환기가 일차 모선의 패널과 동일한 방화지역에 위치하 는 경우
 - c. 변류기 이차회로가 단선되면 일차 회로의 전원차단기가 차단되는 경우
 - d. 변류기가 안전정지와 관련 없는 전원(비 1E 전원)에 설치된 경우
 - e. 변류기의 구조 및 주변 여건으로 보아 이 차회로의 잠재적 연소성이 없는 경우
 - ③ 선정결과, 이차회로 개방에 의한 이차발화로 안전정지에 문제가 유발될 가능성이 있는 변 류기에 대해서 해결방안을 수립한다.
 - (4) 다중고임피던스문제 평가서
- 다중고임피던스 문제 평가서의 적절성을 확인 한다. ☞ 공통전원 평가를 위하여 작성된 배전반별 부

하목록에서 다중계열 또는 안전정지 성공경로가 아닌 부하가 연결된 배전반을 선정하고, (1) 다중고임피던스 분석에 근거한 보호장치의 설치, (2) 전기 보호협조 분 석에서 다중고임피던스장애 가능성 검토 자료를 확인 한다.

(5) 오작동문제 평가서

○ 오작동문제 평가서의 적절성을 확인한다. ☞ 기기의 오작동을 유발할 수 있는 회로와 이들이 안전 정지 능력에 미치는 영향을 정확히 평가하였는지 확인한다. 오작동문제 대표기기를 선정하여 화재로 인하여기기가 오작동될 경우 발생가능한 사건을 도면 또는 절차서를 통하여 확인한다.

○ 오작동문제 기기에 대한 해결방안의 적절성을 확인한다. ☞ 오작동 문제에 대한 안전정지 확보방안이 타당한지를 검토한다. 예를 들어, 고압-저압 경계상에 위치한 밸브의 오작동은 냉각재상실사고(LOCA)를 유발시킬 수 있으므로 이들 밸브의 오작동은 반드시방지되어야 한다. 오작동 방지를 위해서는 케이블에화재방호체(Fire Wrap)를 설치하는 방법과 정상운전 중에 이들 밸브 중 최소한 하나의 밸브에 대해 차단기를자물쇠열림(Locked Open) 상태로 운전하는 방법이 있다. 차단기 자물쇠열림 방법을 적용할 경우에는 해당내용이 발전소 절차서에 명시되어야 한다. 그리고 오작동 문제를 해결하기 위한 방법으로 운전원 수동조치(Operator Manual Action)를 채택한 경우 해당 운전원수동조치의 타당성과 신뢰성이 확보되어야 한다.

(6) 안전정지 성공경로도

○ 안전정지 성공경로도의 정확성을 확인한다. ☞ 안전정지 성공경로를 검증하기 위하여 특정계통을 선 정하여 안전정지 기기 목록의 기기가 빠짐없이 표시되 었는지를 확인하고, 안전정지 수행을 위한 경로가 정 확히 표시되었는지를 확인한다.

3.6 다중오작동분석분야

(1) 분석대상 시나리오 목록

○ 다중오작동 분석대상 시나리오 목록에 대해서 전문가패널의 검토와 동의를 받았는지 확인한다. ☞ 다중오작동 시나리오의 적용성 검토는 반드시 전문가 패널의 검토와 동의가 요구되는데 전문가패널이 참여 하는 방식에는 두 가지가 있을 수 있다. 첫째, 전문가 패널을 구성하고 다중오작동 검토회의를 소집하여 여 기에서 검토대상 시나리오 하나하나에 대해서 토론을 거쳐 분석대상 시나리오를 선별, 결정하는 것이고 둘 째, 화재시 다중오작동 시나리오 현상과 발전소 설계 에 이해도가 높은 요원이 먼저 사전선별작업을 수행한 후 그 결과에 대해서 전문가패널의 검토와 동의를 받는 것이다. 다중오작동 시나리오 선별작업을 전문가패널에서 수행할 경우 패널회의 시간이 상당히 소요될수 있으므로 보통 사전 선별이 권장된다. 두 가지 경우 공히 선별된 다중오작동 시나리오 목록이 초기 선별에서 수행되었는지 전문가패널에 의해 수행되었는지에 대해 제대로 문서화되어 있는지 확인한다.

○ 전문가패널의 구성원이 적절한지 확인한다. □ 다중오작동 시나리오 검토 및 승인을 위한 전문가패널 에는 여러 분야의 전문가들이 포함되는데 최소한 다음 의 6개 분야의 전문가가 포함되어야 한다.

- 화재방호(Fire Protection)
- 화재안전정지(Fire Safe Shutdown)
- 확률론적안전성평가(PSA)
- 운전(Operation)
- 계통기술(System Engineering)
- 전기(Electrical Circuits)

논의되는 항목의 성격에 따라 다른 분야의 전 문가가 추가적으로 필요할 수 있으며 한 명의 전문가 가 여러 분야(예: 화재방호와 화재안전정지)를 담당할 수 있다.

○ 시나리오 목록에 누락된 것이 있는지 확인한다. ☞ 다중오작동 시나리오에서 제외된 사유가 케이블 배치, 회로설계, 전기 보호 등의 설계특징으로 되어있는지 확인하고, 운전원 수동조치 또는 운전배열(예:정상운전시 차단기 개방 유지) 때문에 시나리오 발생방지나 영향 완화된다고 하여 선별, 제거되었는지 확인한다. 이러한 시나리오들은 선별과정에서는 분석대상 시나리오 목록에 포함되어야 하며 시나리오 분석및처리 과정에서 발전소 고유의 설계 및 운전특성들을 반영하도록 한다.

○ 분석대상 시나리오의 분류가 정확한지 확인한다. ☞ 분석대상 다중오작동 시나리오 목록의 각 시나리오에 대해서 해당 기기의 대한 분류[고온정지 필수(Required for Hot Shutdown) 또는 안전정지 중요(Important to Safe Shutdown)]를 확인한다. 시나리오의 분류는 추후 문제 시나리오에 대한 해결방안 수립의 허용범위를 결정하기 때문에 신중해야 한다.

(2) 다중오작동 시나리오 기기조합

○ 다중오작동 시나리오를 유발하는 기기조합이 정확히 도출되었는지 확인한다. ☞ 단지 몇 개의 기기 로 구성된 기기조합인 경우에는 수작업으로 파악할 수 있지만 여러 개의 기기가 관여하는 시나리오인 경우에 는 수작업으로 하게 되면 오류가 발생할 가능성이 크 므로 전산도구를 이용하는 것이 적절하다. 전산도구로 는 보통 원전 PSA에서 고장수목분석이 사용된다. 먼저 분석대상 다중오작동 시나리오를 정점사건(Top Event) 으로 하는 고장수목을 작성하되 정점사건을 유발하는 사건들의 논리를 "AND" 또는 "OR" 게이트 또는 다른 논리게이트를 사용하여 연결하고 하부 사건 밑에는 이 하부사건을 유발하는 사건들의 논리를 또 다른 게이트를 사용하여 연결해 나간다. 이러한 식으로 논리를 계속 전개하여 맨 하부에는 기기의 오동작을 의미하는 기본사건으로 마감된다. 고장수목이 완성되면 정점사건에 대해서 최소단절군을 도출하면 이것이 대상 시나리오의 기기조합이 된다. 따라서 고장수목 논리와 최소단절군 요소들을 검토하여 오류가 없는지 확인한다.

○ 다중오작동 시나리오를 유발하는 기기조합을 구성하는 기기의 목록을 확인한다. ☞ 다중오작동 시 나리오 각각의 시나리오를 유발하는 기기조합을 구성 하는 기기들을 분석대상의 모든 다중오작동 시나리오 에 대해서 종합한 다중오작동 시나리오 기기목록을 확 인하여 누락된 것이 없는지 확인한다. 이때 시나리오 기기조합을 구성하는 기기들을 표시한 도면을 대조하 여 참조하도록 한다.

(3) 기기 위치 및 케이블경로 정보

○ 선정된 케이블목록의 건전성을 확인한다. ☞ 다중오작동 시나리오 기기목록중에서 대표기기 몇 개를 선정하여 해당 기기의 케이블블록도(CBD)를 검토하여 기기작동에 필요한 전원, 제어 및 계측 케이블들이 정확히 선정되었는지 확인한다. 케이블 종류별로 선정기준과 제외기준의 타당성도 정의되어야 한다.

○ 기기위치 및 케이블경로 데이터베이스의 정확성을 확인한다. ☞ 다중오작동 시나리오 기기목록중에서 선정된 대표기기들의 케이블에 대해서 케이블트레이번호와 전선관번호를 확인하고 케이블트레이 도면과 전선관 도면을 대조하여 기기위치 케이블경로 데이터베이스가 맞는지 확인한다.

(4) 격실별 기기케이블 분석표

○ 격실별 기기케이블 분석의 건전성을 확인한다. 다중오작동 시나리오별로 대표격실을 선정하여 해당 격실의 기기케이블 데이터와 도면을 대조 확인함으로써 분석표의 건전성을 확인한다. 필요시 발전소 현장조사를 병행한다.

(5) 다중오작동문제 해결방안

○ 다중오작동 시나리오 문제 해결방안의 분류가 정확한지 확인한다. ☞ 다중오작동문제가 되는 시나리 오 기기가 고온정지 필수기기로 분류된 경우 다중오작 동 시나리오의 발생가능성을 배제하기 위한 격리, 보 호, 재배치 등 물리적인 방안 이외에 운전원 수동조치, 화재모델링, 화재PSA 등 다중오작동 시나리오 발생후 영향완화 또는 시나리오의 위험성평가 등의 소프트웨 어적인 방법이 잘못 적용되었는지 확인한다. 안전정지 중요기기로 분류된 경우에는 물리적인 방법과 소프트 웨어적인 방법모두 허용된다.

○ 다중오작동 시나리오 문제 해결방안의 타당성을 확인한다. ☞ 제시된 다중오작동문제 해결방안이다중오작동 시나리오의 방지 및 영향완화를 실질적으로 달성할 수 있는지 확인한다. 예를 들어 다중오작동문제를 해결하기 위한 방법으로 운전원 수동조치(Operator Manual Action)를 채택한 경우 해당 운전원수동조치의 타당성과 신뢰성이 확보되어야 한다, 이를위해서는 NUREG-1852와 같은 요건에 따라 운전원수동조치의 가용시간과 실제 소요시간 사이의 시간적 여유분석에 의한 시간적 타당성 입증뿐만 아니라 수동조치의 절차화 및 주기적 훈련이 마련되어야 하고 작업에 필요한 휴대장비나 통신장비, 개인보호구 등이구비되어야 하며 환경, 기기성능 및 접근성, 지시계, 통신, 휴대장비, 개인보호구, 절차 및 훈련, 인원, 검증 등의 인자가 충족되어야 한다.

4. 결론 및 고찰

본 연구에서는 원전 화재위험도분석보고서의 적합성을 판단하는데 활용할 목적으로 화재위험도분석시수행되는 전기회로분석에 대하여 필수요소를 도출하고 필수요소를 검증하기 위한 구체적인 방안을 제시하였다. 전기회로분석 필수요소는 실제 분석을 통해 확인되고 검증된 경험적인 결과를 바탕으로 도출되었으며 필수자료와 필수분석항목으로 구분하였다.

본 연구에서 도출된 전기회로분석 필수요소 및 검증 방안을 활용하여 각 전기회로분석 및 분석 결과에 대 한 검증이 가능함을 확인하였다.

본 연구 결과를 바탕으로 규제기관에서는 원전 화재 위험도분석에서 수행된 전기회로분석의 필수요소를 확인하고 검증함으로써 화재위험도분석보고서의 적합 성을 판단하는데 활용할 수 있다. 또한 전기회로분석의 필수요소로 도출된 결과를 바탕으로 원전사업자는 전기회로분석의 필수자료 확보방안을 수립하는데 활용함으로써 원전의 화재안전성 및 분석결과의 신뢰도를 제고하는데 기여할 수 있을 것으로 기대된다.

감사의 글: 본 연구는 원자력안전위원회와 한국방사 선안전재단의 지원을 받아 수행한 원자력안전연구사 업의 연구결과입니다(No. 1305001).

References

- 1) USNRC, "NUREG-0800, Standard Review Plan 9.5.1.1 Fire Protection Program", Rev. 0, 2009.
- USNRC, "NUREG-0800, Standard Review Plan 9.5.1.2 Risk-Informed, Performance-Based Fire Protection Program", Rev. 0, 2009.
- 3) USNRC, "Regulatory Guide 1.189, Fire Protection for Nuclear Power Plants", Rev. 2, 2009.
- 4) NFPA, "SFPE Handbook of Fire Protection Engineering", 4th ed., 2008.

- USNRC, "Regulatory Guide 1.205, Risk-Informed, Performance-Based Fire Protection for Existing Light-Water Nuclear Power Plants", Rev. 1, 2009.
- NFPA, "NFPA 805, Performance-Based Standard for Fire Protection for Light-Water Reactor Electric Generating Plants", 2001.
- 7) NEI, "NEI 00-01, Guidance for Post Fire Safe Shutdown Circuit Analysis", Rev. 2, 2009.
- USNRC, "Enforcement Guidance Memorandum 09-002, Enforcement Discretion for Fire Induced Circuit Faults", 2009.