

가동중인 원전의 화재 안전정지 능력 평가

Evaluation of Post-fire Safe Shutdown Capability for Operating Nuclear Power Plants

박준현*, 정일석, 홍승열
한국전력공사 전력연구원
대전광역시 유성구 문지동 103-16

강승복, 고동학
한국전력공사 고리원자력 1발전소
부산광역시 기장군 장안읍 고리 216

요 약

가동원전의 화재 안전정지 능력 확보를 위해 10CFR50 App. R에 따라 화재안전정지능력 분석 방법론을 개발하였다. 본 방법론은 객관성을 유지하기 위하여 국제적으로 인정된 기준을 적용하고 해당발전소의 특수 상황을 반영하여 작성되었다. 본 방법론에 따라 장기 가동원전을 대상으로 안전정지분석을 수행중이다. 현재까지 연구결과, 가동원전의 케이블 포설 상태가 10CFR50 App. R의 물리적 격리요건을 만족하지 못하고 있는 것으로 나타나 상당한 설비개선이 필요한 것으로 판단된다. 구체적인 방안으로는 원격정지제어반의 기능을 보강하고 물리적 이격 거리를 만족하지 못하는 케이블은 NFR-8과 같은 내화케이블로 교체하는 방안을 검토중이며 또한 케이블 내화시험을 이용한 적정 물리적 이격 거리 산출도 진행중이다.

Abstract

To evaluate of post-fire safe shutdown capability, an evaluation methodology has been developed for the operating nuclear power plants. This methodology was mainly adopted world wide fire safety guide and adjusted to the situation of domestic operating nuclear power plant. At present, evaluation program of post-fire safe shutdown capability is undergoing to this methodology. As of now, some discrepancies against the physical separation requirements of 10CFR50 Appendix R are revealed, and this represents certain amounts of redesigns or modifications would be necessary to fit the requirements. Reinforcement of Remote Shutdown Panel, replacement of cables by fire resistance cable, NFR-8, or recalculation of appropriate physical separation distance were considering as an alternatives.

1. 서 론

1975년 Brown Ferry 원전에서 발생한 화재사고 이후에 미국에서는 화재방호 규정(10CFR50.48, Fire Protection)이 제정되어 건설 또는 가동중인 원전이 이 규정에 따라 화재방호 프로그램을 이행하고, 1979년 이전에 건설된 원전에서는 10CFR50 Appendix R에 따라 화재방호 설비에 대한 안전

성을 평가하고 불만족 사항에 대해서는 설비를 보완할 것을 의무화하였다. 미국의 모든 원전에서는 이 규정에 따라 화재에 대한 위험도 분석, 안전정지 분석 등을 수행하였으며 물리적 이격거리를 준수하지 못하는 발전소에서는 안전정지능력을 확보하기 위해 원격정지제어반(RSP, remote shutdown panel) 보강 또는 전용정지제어반(DSP, dedicated shutdown panel) 설치 등의 설비개선을 수행하였다. 1986년 Chernobyle 원전 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 원전 보유국에서 미국, IAEA 또는 자국의 화재방호 규정에 따라 화재 위험도 분석, 안전정지 능력 분석, 설비개선 등을 수행하였다.

90년대 중반부터 국내에서도 원전의 화재 안전성향상을 위해 가동중인 원전에 대해 철차서 보완, 화재 위험도 분석 등 다양한 화재방호 프로그램 및 설비 개선을 추진하였다. 1998년에 수행한 가동 원전의 화재 위험도분석(Fire Hazard Analysis)에서는 NRC BTP APCSB 9.5-1에 따라 화재방호 구역별로 화재방호 설비의 적절성을 평가하였다. 이 분석에서 취약사항으로 도출된 “케이블 포설실의 케이블 트레이 격리요건 불만족”에 대해서는 10CFR50 App. R 요건에 따라 화재 안전정지능력 분석을 수행한 후에 개선 방안을 수립할 것을 권고하였다. 국내 가동 원전 중에서 비교적 초기에 건설한 고리 1, 2와 월성 1호기는 10CFR50 App. R에 따라 화재안전정지능력 분석이 필요한 상태이며 고리 3호기 이후부터는 10CFR50.48요건을 모두 만족하고 있으므로 안전정지능력분석이 불필요하다.

신규 원전은 설계 단계에서 10CFR50.48에 따라 발전소 비정상 상태 시의 안전정지능력을 분석하고는 있으나 이러한 안전정지분석 방법은 10CFR50 App. R에서 요구하고 있는 안전정지능력 분석과는 차이점이 많다. 신규 원전에서는 설계단계부터 화재방호요건을 만족하도록 설계되고 있는 반면에, 가동 원전의 안전정지능력 분석은 이미 설치되어 있는 기기 상태, 케이블 포설 상태, 물리적 격리 상태 등의 현장여건을 고려하여 화재안전정지능력을 확보하도록 설비개선 사항들을 도출하여야 하므로 신규 원전의 안전정지분석과는 기술적 관점이 다르다. 또한 10CFR50 App. R을 적용받는 발전소는 케이블의 물리적 격리가 만족하지 못한 상태에서 안전정지능력을 분석하게 되므로 분석에 많은 비용과 노력이 수반된다. 전력연구원에서는 '99년부터 가동중인 원전의 화재안전정지능력 분석 방법론을 개발중이며 이 방법론에 따라 Westinghouse형 원전을 대상으로 안전정지 분석을 수행하고 있다. 본 고에서는 현재까지 개발된 안전정지능력 분석 방법론을 검토하고 안전정지능력 분석 과정 중에 도출된 문제점 및 개선사항들에 대해서 언급하고자 한다.

2. 안전정지능력 분석 절차

10CFR50.48이 제정되기 이전에 건설된 원전은 다중 케이블의 물리적 격리와 같은 화재방호 개념이 도입되지 않은 상태에서 케이블 분배실이 설계되었기 때문에 10CFR50 App. R의 물리적 격리 요건을 만족하지 못하고 있다. 가동원전에서 케이블의 물리적 격리요건을 만족하기 위해서는 방화벽을 신설하거나 케이블을 재포설하는 등 대규모 설비개선이 수반되어야 하며 현실적으로 이의 이행이 곤란한 실정이다. 동 규정을 만족하기 위해 무리하게 설비개선을 수행할 경우에는 물리적 격리요건은 만족하는 반면에 발전소 전체적인 화재 안전성에 저해를 가져온다는 관점도 대두되고 있다. 이러한 문제점을 고려하여 케이블의 물리적 격리요건을 만족하지 못하는 가동원전에서는 어떠한 화재가 발생하더라도 발전소가 안전하게 정지될 수 있고 이 안전정지 상태를 유지할 수 있음을 입증하면 최소한의 화재 안전성은 확보될 수 있다고 보는 개념을 10CFR50 App. R III.L(alternative and dedicated shutdown capability)에서 반영하고 있다. 따라서 1979년 이전에 건설된 가동원전에서도 10CFR50 App. RIII-L에 따라 안전정지능력을 분석하고 안전정지능력을 확보를 위한 종합적인 개선방안을 마련하는 것이 필요하다.

그림 1은 가동원전의 안전정지능력분석 절차를 보여주고 있다. 먼저, 발전소가 고온정지 또는 저온정지를 달성하고 유지하는데 필요한 기능을 정의하고 안전정지 기능을 수행하는데 필요한 계통을 선정한다. 안전정지 계통에는 직접 안전정지 기능을 수행하는 계통뿐만 아니라 이들을 보조하는 계통도 포함된다. 안전정지에 필요한 기기를 선정하고 이와 관련된 전원 및 제어 케이블을 파악하여 목록을 작성한다. 이 단계에서 안전정지에 직접 관련되지 않은 회로의 손상으로 인한 2

차적인 영향도 평가한다. 화재구역 및 화재 소구역을 구분하는 도면을 확보한다. 이 도면에는 화재구역 고유번호와 구역경계를 보여주며 도면상의 화재구역별로 안전정지 분석이 수행된다. 기기 배치도 및 계통 도면을 이용하여 각 화재구역에 존재하는 안전정지 기기 및 케이블을 파악한다. 파악된 안전정지 기기 및 케이블 배선을 확인하기 위하여 화재구역에 대한 현장 답사를 실시한다. 현장답사 시에는 기기 위치를 확인하며 화재구역의 물리적 상태, 화재방호설비 등에 대하여 조사한다. 각 화재구역에 대해서 화재가 발생할 때 안전정지 능력에 미치는 영향을 분석한다. 해당 화재구역에 위치하는 모든 기기와 케이블이 화재에 의해 손상되는 것으로 가정하고 안전정지 성공여부를 판단하고, 화재 자동감지 및 진압설비, 수동진압 수단 등을 검토하여 인접 구역으로 화재가 전파될 가능성에 대해서도 평가한다. 안전정지 영향평가 결과를 바탕으로 화재 취약부분을 도출하고 화재 취약부분에 대하여 이행 가능한 개선안을 마련한다.

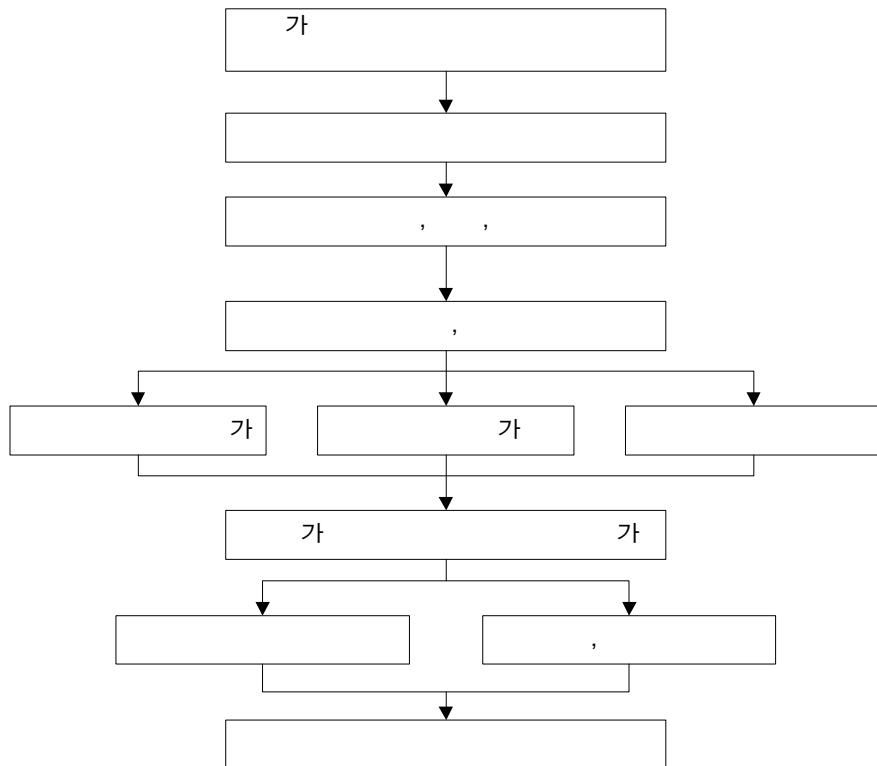


그림 1 가동원전의 안전정지능력분석 절차

안전정지능력 분석을 위한 발전소 초기조건과 가정사항들은 다음과 같다. 초기조건 및 가정사항들은 안전정지능력 분석의 객관성을 유지하기 위하여 국제적으로 인정된 기준을 적용하고 해당 발전소의 특수 상황을 고려하여 작성한다.

● 초기 조건

- 화재가 발생되거나 이에 따른 소외전원 상실 시에 발전소는 100%로 출력 운전중이다.
- 안전정지 기기는 기술지침서(TS)의 운전제한조건(LCO)에 따라 운전 가능한 상태이다.
- 운전원은 교대근무 수칙과 소방관리 규칙에 따라 근무중이다.

● 가정 사항

- 화재는 발전소 어느 곳에서도 발생 가능하며 발생한 화재가 화재방호설비에 의해 밀폐될 경우 인접 화재구역 및 화재 소구역으로의 전파는 고려하지 않는다.
- 인접 호기에서 화재가 동시에 발생하는 것은 가정하지 않는다. 그러나 양 호기 공유설비에서

화재가 발생한 경우에는 두 호기에 동시에 영향을 미칠 수 있다.

- 화재에 의해 직접 나타나는 사건과 소외전원상실을 제외하고는 추가적인 단일고장(single failure)은 발생하지 않는다.
- 화재에 기인한 설계기준사고 외에 독립적인 설계기준사고는 발생하지 않는 것으로 가정한다. 화재시 지진, 태풍, 침수 등 외부 자연재해는 없는 것으로 가정하며 지진에 의한 화재도 마찬가지로 가정한다.
- 발전소 정지에 필요한 기기를 운전, 보수, 수리하기 위해 비상 절차에 따라 추가 인원의 동원이 가능하다.
- 밸브, 열교환기, 배관 등 수동 기기들은 화재에 노출되더라도 건전성을 유지한다.
- 밸브의 개폐, 전동기기의 동작 등에 의한 오작동은 가능성이 낮은 사건으로 간주한다. 화재에 의한 오작동만이 화재와 동시에 발생한다고 보고 그 외의 오작동은 단일 사건으로 취급한다.
- 주제어실 화재에 의해 상주불능이 초래되는 경우를 제외하고 주제어실에 근무자가 상주하고 있다. 주제어실 철수 전에 원자로가 자동 또는 수동으로 정지되고 제어봉 삽입이 확인되는 것으로 본다.
- 안전정지에 필요한 모든 전동밸브는 수동조작이 가능하다. 공압밸브(AOV)의 수동조작이 불가능한 경우 시간이 충분하다면 질소통을 이용하여 조작이 가능하다.
- 정상시 닫혀 있는 수동밸브는 화재에 손상되지 않고 격리기능을 수행하는 것으로 본다.
- 모든 케이블에는 적절한 과전류 보호장치가 구비된 것으로 가정한다. 만일 구비되지 않았다면 안전정지분석 전후에 설치하는 것으로 본다.

3. 안전정지 기기 선정 및 현장 실사

안전정지능력 분석은 화재가 발생하였을 경우에 발전소 정지와 관련된 기기들이 화재로부터 안전하게 고유기능을 수행하는지를 평가하는 것이므로 안전정지에 직접 관련된 계통 및 간접 관련된 계통의 기능을 정의하고 이 기능 달성에 관련된 기기를 선별하는 작업이 필요하다. 먼저, 발전소가 고온정지 또는 저온정지를 달성하고 유지하는데 필요한 기능을 정의하고 안전정지 기능을 수행하는데 필요한 계통을 선정한다. 초기조건에서 발전소가 100% 출력운전 중인 것으로 가정하고 있으므로 발전소를 안전하게 정지하기 위해서는 출력감발, 고온정지, 저온정지의 단계를 거쳐야 한다. 가압경수로형 원전에서 안전정지와 관련된 기능과 이를 담당하는 대표적인 계통은 다음과 같다.

- 고온정지와 관련된 기능: 원자로정지, 냉각재 수위조절, 냉각재 압력조절, 잔열제거, 공정감시, 보조기능(전원, 냉각수, 공기조화설비)
- 저온정지관련 기능: 잔열제거, 공정감시, 보조기능(전원, 냉각수, 공기조화설비)

안전정지관련 계통이 선정되면 안전정지를 유지하는데 직간접으로 관련된 기기(펌프, 모터, 밸브, 제어설비 등)를 선정한다. 수동밸브, 전원이 없는 수동기기, 안전방출밸브, 임시설비 등은 대상 기기에서 제외된다. 안전정지 기기가 선정되면 표 1과 같이 대상 기기 목록을 작성한다. 본 연구가 진행중인 가동원전에서는 원자로냉각재계통을 포함한 27개 계통과 잔열제거펌프를 포함한 412개의 기기가 안전정지 기기로 선정되었다. 선정 결과의 검증을 위해 비상운전 절차서와 비교, 원격정지제어반 기기와 비교, 운전원 면담, 해외 원전과의 비교 등이 수반되었다.

표 1 안전정지 기기 목록

XPP-37A	Residual heat removal pump A	Decay heat removal	1-13	stop	stop	operating			XSW-4A	
XPP-37B	Residual heat removal pump B	Decay heat removal	1-13	stop	stop	standby			XSW-4B	
VRH-8701A	Loop 1 hot leg to RHR pump A	Decay heat removal	1-13	closed	closed	open			XMC-4	LOCA 가
VRH-8701B	Loop 2 hot leg to RHR pump B	Decay heat removal	1-13	closed	closed	open			XMC-7	LOCA 가

안전정지 기기가 선정되면 이와 관련된 전원 및 케이블을 파악하여 표 2와 같이 케이블 목록을 작성한다. 목록에는 가급적 케이블의 사양과 이동 경로가 상세히 나타나야 한다. 케이블 확인은 1차적으로 도면, 케이블 보고서, Cable Block Diagram, Schematic Diagram 등과 같이 케이블 자료를 통해 경로를 파악하고 관련 자료로부터 케이블 포설 상태가 정확히 파악되지 않는 경우에는 현장 조사를 통해 경로를 파악한다. 경우에 따라서는 Phase Tracer와 같은 케이블 추적장비를 활용할 수 있으나 발전소 정상중이나 정지시에도 사용상 제약을 받기 때문에 활용이 용이치 않다. 안전정지 케이블에는 다음과 같은 종류가 있다.

- 동력전원 회로(Power Circuit)
- 제어전원 회로(Control Power Circuit)
- 제어 회로(Control Circuit)
- 지시 회로(Indication Circuit)
- 계측 회로(Instrument Circuit)
- 허용/연동 회로(Permissive/Interlock Circuit)
- 오작동 회로(Spurious Circuit): 오제어 회로, 오지시 회로, 오허용/연동 회로
- 연계 회로(Associated Circuit)

표 2 안전정지관련 케이블 목록

						1	2	3	4	5
EL	XTF-1A	Startup transformer	2-67	154KV Sinko		D00-10				
	XTF-1B	Startup transformer	2-67	154KV Bukko		D00-11				
FE	FT-3503	AFW pump A discharge flow Tr	2-5		FE 1230 CR					
	FT-3503	AFW pump A discharge flow Tr	2-5		FE 1233 CR	J30-06	J30-02B	J30-02A	J30-02C	J30-03A
MS	VMS-152A	SG 1 main steam isolation Vv bypass	2-1		MS 1012 MR	J40-01	J40-02			
	VMS-152A	SG 1 main steam isolation Vv bypass	2-1		MS 1157 KR	J40-01	J40-02			
MS	VMS-20B	SG 2 main steam isolation Vv bypass	2-1		ED 1228 DR	J30-06				

원전에서는 안전정지 기기 사이에 물리적인 격리를 유지하고 있어 다중의 안전정지 기기가 화재에 의해 손상될 가능성을 줄이고 있다. 이러한 화재 격리로 인해 발전소는 고유한 화재구역으로 구분되며 이 화재구역은 화재 방호체로 둘러 쌓여 있거나 다른 건물 또는 구조물과 분리되어 있다. 화재구역내 이러한 지역들을 화재 소구역이라 한다. 모든 건물과 주요 옥외 구조물이 우선 고려되나 안전정지 기기를 포함하거나 안전정지 기기에 인접한 건물과 옥외 구조물에 대해서 화재 구역/소구역 번호를 할당한다. 화재 구역/소구역 번호 할당은 안전정지 영향평가 결과에 따라 추가, 삭제, 통합될 수 있다. 발전소 배치도에는 건물의 벽체, 격실, 옥외구조물 경계 등이 나타나 있으므로 배치도에 굵게 표시하거나 색으로 구분하여 화재 구역/소구역을 나타내고 해당 번호를 기입한다. 화재위험도분석에서 이미 작성해 놓은 화재구역도를 활용하여 다음의 절차에 따라 도

면 및 번호를 기입하였다.

- 발전소 건물 및 옥외 구조물 목록에서 안전정지 기기를 포함하거나 안전정지 기기에 인접한 건물과 옥외 구조물을 선정한다.
- 선정된 옥외 구조물에 대해서 경계를 구분하여 화재구역과 소구역을 지정하고 고유번호를 할당한다.
- 선정된 옥내 건물을 화재구역과 소구역을 구분하고 고유번호를 할당한다.

기기와 케이블들의 위치는 분석의 용이성을 위하여 최소 단위(격실, 화재 구역, 화재 소구역)로 구분되어야 한다. 안전정지 기기들의 위치는 쉽게 파악이 되지만 케이블의 위치는 분명하지는 않기 때문에 현장확인 작업을 필요로 한다. 현장 확인시에는 다음과 같은 절차를 따른다.

- 케이블과 배선 관계: 케이블과 배선구조물(도관, 케이블 트레이, junction boxes, pull boxes 등)과의 관계를 수립한다.
- 배선과 화재구역 관계: 배선 구조물과 화재 구역/소구역과의 관계를 정리한다.
- 케이블 종점 위치: 케이블 종점이 그 케이블을 포함하는 배선이 없는 지역일 수 있으므로 케이블의 종점위치를 파악한다.
- 화재 구역별 안전정지기 및 관련 케이블 확인
- 출입문, 관통부, 구조물, 가연성물질, 화재방호설비 상태 확인
- 배수, 환기 비상등, 통신설비 상태 확인

케이블 도면 및 자료가 잘 정리되어있는 발전소에서는 위와 같은 현장실사 작업이 비교적 용이하지만 turn-key 형태로 건설된 발전소는 케이블과 관련된 자료가 미흡하므로 현장실사에 많은 노력이 소요되게 된다.

4. 격리요건 및 간섭영향 평가

다중 트레인 케이블간의 화재전파 등을 방지 또는 완화하기 위해서 10CFR50, App R, III.G에서는 다음과 같은 물리적 격리를 요구하고 있다.

- 격납건물 내부 격리기준
 - 다중 트레인의 케이블, 기기 및 비안전관련 회로는 수평으로 20ft 이상 격리하고 그 사이에 가연성 물질이 없어야 한다.
 - 화재감지기와 자동화재진압계통을 화재구역에 설치해야 한다.
 - 다중 트레인의 케이블, 기기 및 그와 연계된 비안전관련 회로는 불연성의 복사열 차폐체에 의하여 격리되어야 한다
- 격납건물 외부 격리기준
 - 다중 트레인의 케이블, 기기 및 그와 연계된 비안전 관련회로는 3시간 내화등급의 방화벽으로 격리해야 한다.
 - 다중 트레인의 케이블, 기기 및 그와 연계된 비안전관련회로는 중간에 가연물이나 화재위험이 없도록 수평거리 20ft 이상 격리시켜야 하며 화재감지장치 및 자동소화설비를 화재지역에 추가 설치해야 한다
 - 다중 트레인의 케이블, 기기 및 비안전관련 회로는 1시간 내화등급의 방화체로 둘러싸고 화재 감지장치 및 자동소화 설비를 설치하여야 한다.

위 요건중에서 격납건물 내부는 3가지 조건을 모두 만족하여야 하며 격납건물 외부지역은 3가지 중에 한가지만 만족하여도 물리적 격리요건이 달성된 것으로 본다. 현재까지 국내 가동중인 Westinghouse형 원전에서는 위의 격리요건을 만족하지 못하고 있으며 특히, 케이블 분배실은 물리적 이격거리를 만족하기가 매우 어려운 상태이며 케이블 트레이의 포설률도 부분적으로 상한치를 초과하고 있는 것으로 나타났다. 따라서 대상 원전에서는 물리적 이격거리를 만족시키기 위해 무리한 설비개선을 추진하는 것 보다는 10CFR50 App. R-III.L에 따라 대체적인 방법으로 안전정지능력을 확보하는 방안이 바람직한 것으로 판단된다.

케이블 간섭영향평가는 화재에 의해 케이블이 손상되었을 경우에 안전정지에 미치는 영향을 분

석하는 것으로 각 화재구역에 대하여 발생할 수 있는 모든 고장 형태를 파악하는 것이 중요하다. 화재분석에서 고려해야되는 케이블의 고장형태는 다음과 같이 4가지로 구분된다.

- 합선(Short Circuit)
- 지락(Short to Ground)
- 단선(Open Circuit)
- 통전 합선(Hot Short)

간섭영향평가에서 고려되는 연계회로 분석은 공통 전원, 공통 배선함, 오작동, 다중임피던스 문제 등이다.

● 공통 전원(Common power supply)

공통전원 문제는 비안전정지 기기 관련 케이블의 화재로 인하여 안전정지 기기의 공급전원이 상실되는 것이다. 공통전원 분석에서는 전원공급 기기로부터 전원을 공급받는 기기(케이블)가 화재로 손상 받았을 때 차단기, 퓨우즈 및 기타 보호설비에 의하여 손상된 기기가 전원으로부터 적절히 차단되어 전원공급 기기 자체의 건전성이 유지되는가를 분석한다.

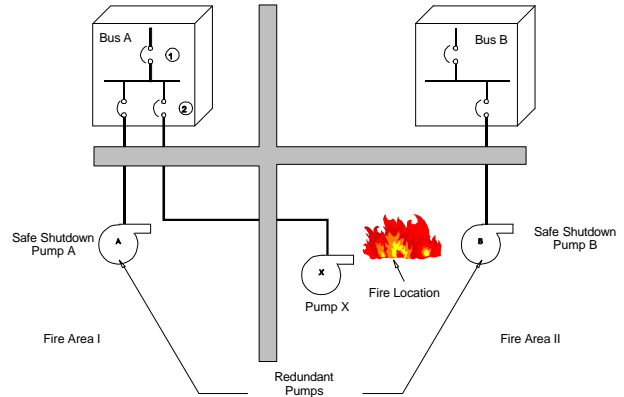


그림 2 공통 전원

● 공통 배선함(Common Enclosure)

비안전 관련 케이블은 케이블 트레이, 패널, 분기함 등과 같은 배선함에서 안전관련 케이블과 공존할 수 있으며 이때 비안전관련 케이블에서 화재가 발생하면, 이 화재가 안전관련 케이블로 전파되거나, 과부하로 타구역에 위치하는 케이블에서 이차 화재가 발생하여 안전관련 케이블에 영향을 줌으로써 안전정지 기능에 지장을 초래할 수 있다. 따라서 공통 배선함 분석에서는 안전관련 케이블이 위치하는 배선함에 비안전 관련 케이블이 존재하는가를 조사하고 또한 변류기의 화재영향을 분석한다.

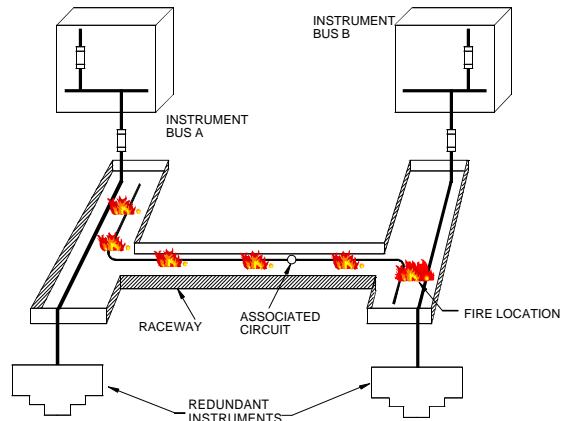


그림 3 공통 배선함-화재 전파

● 기기 오동작(Spurious operation)

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

● 다중 고임피던스(Multi high impedance fault)

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

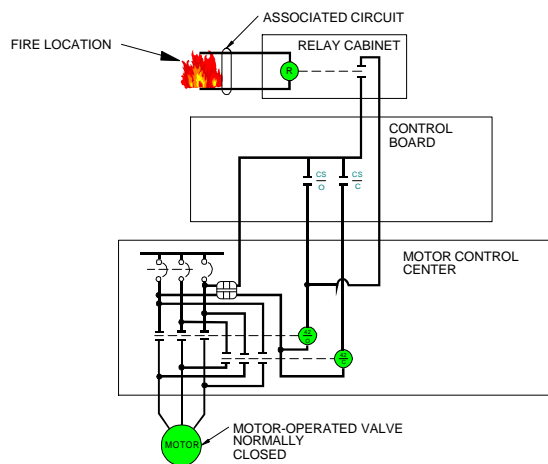


그림 4 기기 오작동

케이블의 내화특성을 확인하기 위해 발전소에서 사용중인 동일한 케이블을 확보하여 케이블의 내화시험을 수행하는 것이 필요하다. 이 시험을 통해 취득한 자료는 케이블의 화염전파 속도 계산, 적정한 물리적 이격 거리 계산 등에 활용이 가능하다. 본 연구에서는 기동중 원전에서 사용중인 것과 동일한 케이블(EPR/CSP)과 내화전선인 NFR-8을 확보하여 수직화염전파성 시험(IEEE 383), 화재시 회로의 건전성 시험(IEC 60331), 수평화염전파성 시험(UL 910)을 수행하였다. 내화전선인 NFR-8 케이블은 IEC 60331 시험에서 케이블 피복재가 전소된 후 1시간 45분 정도 통전 기능을 유지하고 있어 90분 내화성능이 요구되는 곳에 격리요건 준수를 위해 사용이 가능한 것으로 나타났다. 또한 UL 910 시험기준은 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.

5. 안전정지영향 평가

발전소 안전정지 기능을 수행하거나 사고를 완화시키기 위한 계통/기기의 화재 손상여부를 분석하고 이들 기기가 화재에 의해 손상되었을 때 발전소에 미치는 영향을 각 화재구역별로 종합적으로 평가하여 안전정지 기능이 유지되는 지를 평가한다. 조사된 안전관련 기기의 위치가 화재구역으로 구분되지 않았다면 화재위험도 분석에서 구분한 화재구역 경계를 수정하여 활용한다.

- 화재 영향을 받는 계통 및 기기의 파악

화재구역별로 화재시 손상되는 안전정지 기기 목록을 작성한다. 손상 기기 목록에는 최소한 다음 사항들을 포함하여야 한다.

- 기기 및 연계 회로 또는 그 지역에 설치된 계기용 튜브 등에 의해 영향을 받는 기기들
 - 보조 계통(냉각수, 공기조화) 운전상태 또는 전원상실로 인해 영향을 받는 안전정지 기기들
- 기기의 상호관계를 나타내 주는 도구들 (논리도, 고장수목 등)을 사용하여 화재에 의해 손상되는 기기와 그 손상 원인을 파악한다. 기기 손상의 원인은 해당 화재구역에 위치하거나 케이블이 통과하거나 전원이 상실되는 것 등이 있다.

- 성공경로 파악

화재의 영향을 받는 계통을 파악하고 안전정지 성공경로를 파악하는 방법은 다음과 같다.

- 보조계통이 공정계통에 미치는 영향을 평가한다. 보조 계통을 먼저 분석함으로써 공정계통의 분석시 시간을 단축시킬 수 있다. 마찬가지로 공급용수나 기기냉각수계통도 이들이 공급되는 공정계통의 분석을 수행하기 전에 먼저 분석한다.
- 화재 발생시 공정감시 계기에 대한 분석이 다른 공정계통의 가용성을 평가하기 전에 우선적으로 수행되어야 한다.
- 화재에 영향을 받는 기기와 그 상호관계를 이용하여 모든 안전정지능력 기준에 대한 성공경로를 파악한다. 잔열제거계통 격리밸브와 같이 정상 운전시나 발전소 냉각초기에는 닫혀있지만 잔열제거 운전이나 장시간의 잔열제거의 안전기능을 지원할 때에는 열려야 하는 기기 즉, 기능이 한가지 이상인 기기들에 대해서는 주의가 필요하다.
- 화재에 노출된 계기들(RTD, 온도계, 압력전송기 등)은 손상되어 기능을 상실한다고 가정한다.
- 배관, 체크밸브, 스트레이너, 탱크 등은 화재시에도 기능을 유지한다고 가정한다. 계기 튜브는 용접부를 제외하고는 건전성이 유지된다고 보나 온도상승으로 인해 측정값의 정확도가 영향을 받을 수 있다.
- 배제분석(exclusionary analysis): 이상의 방법을 대체할 만한 것으로 배제분석이 있다. 이는 안전정지능력을 달성하기 위해 화재구역 외에 성공경로가 이용 가능한지를 확인하는 것이다. 단, 기기의 상호관계나 수동조작가능성 등의 기초적인 부분은 동일하게 고려된다. 공통전원과 공동 배선함의 결함으로 인한 기기의 잠재적 상실도 역시 고려된다.

- 성공경로 선정 방법

- 화재의 크기와 지속시간 또는 그 복잡성 때문에 회로의 고장정도와 시기를 예측하기는 어렵

다. 모든 회로고장의 조합을 언급하는 것은 불가능하므로 고장모드영향분석까지는 수행하지 않는다. 반면에 화재 구역내에서 발생 가능한 모든 오작동에 대해 영향을 감소시키는데 초점을 맞춘다. 화재로 인한 회로의 결함으로 인해 다수의 오작동이나 오신호가 발생할 수 있다. 그러나 화재가 다중의 기기에 영향을 미칠 수 있는 회로의 고장을 일으키지 않는 한 독립적인 다중고장이 동시에 발생한다고 가정하지는 않는다. 각각의 오작동은 화재방호 조치를 통해 적절히 완화되어야 한다.

- 운전원의 개입없이 하나의 오작동만 발생한다는 가정은 성공경로의 확인에서 바람직한 접근 방법이 아니다. 잠재적인 오작동의 영향을 완화하는 방법을 파악하는데 있어 다른 오작동 영향을 고려하지 않은 채 하나의 오작동 영향만을 완화시키는 것은 바람직하지 않다.
- 고압, 저압 경계의 기기: 직렬로 연결된 고압-저압 경계 밸브의 케이블에 단일 화재가 영향을 미치는 경우에는 이들 밸브가 동시에 작동 가능성을 고려해야 한다. 정상운전시 2개 이상의 직렬 고/저압 경계 밸브들의 전원을 제거하는 것은 추가적인 분석이나 화재방호 조치 없이도 원자로냉각재계통의 건전성을 보장할 수 있는 방법이 된다.
- 화재 구역에 대하여 안전정지가 성공적임을 나타내는 근거는 체계적으로 문서화되어야 한다. 다중의 안전정지 기기가 해당 구역에 있고 안전정지능력 기준을 유지, 달성하기 위해 물리적인 격리, 수동적 화재방호 조치, 능동적 화재방호 조치, 수동조작이나 보수 등에 의존할 경우에 문서의 중요성은 더욱 높아진다.
- 해당 구역에서 화재로 손상된 기기를 포함하는 성공경로는 표준화된 허용기준을 적용하여 문서화되어야 한다.
- 수동조치는 오작동의 영향을 완화시키고 안전정지의 달성 및 유지를 위해 수행될 수 있다. 수동조치가 필요한 경우 조치장소, 실제 조치장소, 그리고 조치를 수행하는데 걸리는 시간 등을 종합하여 수동조치 가능성을 평가하여야 한다.

이상에서 각 화재구역 및 화재 소구역별로 화재발생시 안전정지 달성여부를 분석하고 분석 과정에서 발견된 취약점을 화재구역별로 그리고 계통 또는 설비별로 정리한다. 가동중인 원자력발전소에서 예상되는 화재 취약부분은 비상등, 비상통신, 배수, 공기조화설비 등이 주류를 이루고 있다. 앞의 단계들이 완료되면 모든 화재 취약부분이 파악되고 구분된다. 이들 취약부분을 해결하는 방법은 여러 가지가 있다. 개선기법을 결정하기 전에 먼저 모든 잠재적인 취약부분에 대한 개선책을 계통과 구역별로 파악할 필요가 있으며 그 후에 여타 문제들을 해결하는 접근방식을 사용한다. 각 구역의 취약부분에 대한 재검토가 이루어진 후에는 주어진 설계변경 사항이 가능하면 많은 취약부분을 해결할 수 있도록 해야 한다. 예를 들어 만약 전동밸브가 4개 구역에서 취약부분으로 나타났다면 각 구역에 대해 4개의 설계변경을 시행하는 것보다 하나의 케이블을 재배치시킴으로서 4개 구역의 취약부분을 동시에 해결할 수 있게 된다.

파악된 취약부분에 대한 개선책을 수립하는 도중에 또 다른 취약부분을 만들어 내지 않도록 주의가 필요하다. 발전소에 대한 설비개선이 고려하지 않은 새로운 화재 취약부분을 생성해서 현재의 평가결과가 불분명해지지 않도록 설계에 대한 통제가 수반되어야 한다. 이상에서 개발된 개선안의 목록을 재검토하여 이들 변경이 이루어졌을 경우 화재방호와 관련이 없지만 발전소의 이용률 및 효율성의 증가, 보수작업 감소 등 발전소에 유리한 개선안을 선정한다. 개선방안 제시가 곤란한 취약사항에 대해서는 화재방호요건의 면제 가능성을 검토하고 규제기관의 면제를 받기 위한 기술적 보완자료를 작성하고 화재방호 계획서 개선이 필요한 사항은 구체적인 개선안 제시한다.

현재까지 수행된 가동원전의 안전정지영향 평가에서 다수의 화재구역에서 화재발생시에 안전정지기능을 달성이 곤란한 것으로 나타났다. 이러한 부분에 대해서는 안전정지제어반 보강, 내화케이블로 교체, 면제요건 검토 등 다각적인 방향으로 해결방안을 모색중이다.

6. 결론

가동원전의 화재 안전정지 능력 분석은 정부와 규제기관에서 원전 화재방호설비 안전성 향상을 위해 지속적으로 요구하고 있는 현안사항이며 가동원전의 안전성 향상, 주기적 안전성 평가

및 수명연장 운전을 위해서도 반드시 수행되어야 하는 사항이다. 이러한 요구에 부합하기 위해 가동원전의 화재 안전정지능력 분석 방법론을 수립하였으며 이 방법론에 따라 안전정지능력을 분석하고 있다. 현재까지 연구 내용에 의하면 가동원전의 상당 화재구역에서 안전정지기능 달성이 곤란한 것으로 나타나 다각적인 해결방안을 모색하고 있다. 구체적인 방안으로는 원격정지제어반의 기능을 보장하고 물리적 이격거리를 만족하지 못하는 케이블은 NFR-8과 같은 내화케이블로 교체하는 방안을 검토중이다. 또한 케이블 내화시험을 이용한 적정 물리적 이격거리 산출도 진행중이다.

미국에서는 '79년 이전에 건설된 원전에 10CFR50 App. R의 규정을 만족시키기 위해 화재방호설비 개선에 많은 비용을 투자한 바 있으나, 이러한 화재방호설비 개선 노력이 발전소의 화재 안전성 향상에는 기여하였으나 발전소 전체 안전성 향상에는 기여한 바 적다는 지적을 받게되었다. 이러한 지적은 비용 대 효과 측면을 중시하는 가동중 원전에서는 중요한 사항으로 다루어진다. 최근의 Risk-informed regulation 영향을 받아 화재 위험도 분석으로부터 해결이 어려운 문제가 도출될 경우에 Risk-Informed and Performance-Based 방법을 통해 선별적으로 문제를 해결하려는 노력이 NRC에서 시도되고 있음. 이와 관련하여 NRC에서는 NUREG DG-1521를 발행하여 의견 수립중에 있으나 아직까지 미국에서도 화재방호설비 개선에 Risk-Informed and Performance-Based 방법을 적용한 사례는 없는 실정이다. 따라서 본 연구에서는 안전정지 분석 방법론 및 수행 기술 개발에 역점을 두고 추진중이며 안전성 향상을 위한 설비 개선안은 비용-이득 분석을 바탕으로 기존 설비 개보수를 최소화하도록 검토하고 있다. 가동원전의 화재 안전정지 분석결과, 10CFR50 App. R 요건을 만족하지 못하는 사항에 대해서는 규제기관에 면제를 신청하거나 Risk informed & performance based fire analysis를 통하여 해결방안을 모색해야 할 것으로 판단된다.

참고문헌

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. Exemptions from 10CFR50, Appendix R, Case Studies, EPM, May 2000
4. 10CFR50 Appendix R, Fire Protection Program for Nuclear Power Facilities Operating Prior to January 1, 1979, USNRC, May 1988
5. Generic Letter 81-12, Fire Protection Rule, USNRC, Feb. 1981
6. Generic Letter 86-10, Implementation of Fire Protection Requirements, USNRC, Apr. 1986
7. IE Information Notice No. 84-09, Lessons Learned from NRC Inspections of Fire Protection Safe Shutdown Systems(10CFR50, Appendix R), USNRC, Feb. 1984
8. Kewaunee Nuclear Power Plant Appendix R Design Description, Wisconsin Public Service Corporation, Dec. 1990
9. Ginna Station Fire Protection Program Report Rev. 0, Jun. 1998
10. 고리 1호기 화재위험도분석 보고서, 고리 1발전소, 1998. 4.
11. YGN3&4 FSAR Appendix 9.5B, Safe Shutdown Analysis
12. 원자력법 시행령 제60조(대통령령 제 12729호)
13. 소방법(법률 제4419호)
14. IEEE-383, Standard for Type Test of Class IE Electrical Cable, Field Splice, and Connections for Nuclear Power Generating Stations
15. National Fire Protection Association Codes and Standards
16. NRC BTP-CMEB9.5-1
17. 화재예방 기술기준, FPN-원자력발전소 화재 예방, 대한전기협회, 2000