

국내 원자력발전소 화재안전 대책에 관한 연구

A Study on the Fire Safety Measures of Korean Nuclear Power Plants

김학중, 손봉세*, 허만성**

한국전력기술(주), 경원전문대학*, 우송대학**

ABSTRACT

The fire protection system of Nuclear Power Plants(NPPs) is an integrated system that is applied multi-field technology. So, it needs synthetic design and analysis, that is, the plan of fire protection, fire compartment, fire detection, fire suppression, and success of safety shut down, etc. In case of a fire in NPPs, secure the safety of reactor and minimize the radioactivity contamination. For this purpose, perform the fire risk analysis and make up the deducted problem through the improvement of design or the change of operation process.

1. 서론

원자력 발전소 화재사고는 일반 건축물이나 산업설비에서 발생하는 화재와는 달리 원자력 발전소의 안전성 제고 차원에서 매우 중요한 요소이다. 이는 많은 발전소의 확률론적 화재위험도 분석 결과 화재사고에 의한 노심손상확률이 다른 유형의 사고보다도 높게 나타나고 있다는 사실로써 알 수 있다. 그러나, 1975년 미국의 Browns Ferry 발전소 화재 사고 이전에는 원자력 발전소 화재의 중요성이 인식되지 못하여 일반 산업설비와 유사한 정도로 화재방호 계획 및 설계가 이루어져왔다. Browns Ferry 발전소 화재 사고를 계기로, 원자력 발전소 화재사고 발생시 원자력 발전소의 안전성에 미치는 영향을 전면적으로 검토하고 체계적인 원자력 발전소 화재방호 설계기준을 마련하여 현재 원자력 발전소 설계에 적용해 오고 있다. 이러한 원자력 발전소 화재방호 설계기준은 대부분 1970년대 중반부터 1980년대 중반 사이에 확립된 것으로, 그 이전에 건설된 발전소들은 물론이고 이 기간 동안에 건설된 발전소들도 체계적인 화재방호 기준을 만족하지 못하고 있었다.

우리나라의 경우 영광 3,4호기를 통해 처음으로 원자력 발전소 화재방호 설계 및 분석 기술을 전수 받아 지금까지 미국의 설계기준을 중심으로 후속 원자력 발전소의 화재방호 설계에 적용 하고 있다. 그런데 영광 3,4호기 이후 원자력 발전소 화재방호 분야에 있어서 새로운 현안들이 많이 제기되었으며, 영광 3,4호기 이전의 국내 원자력 발전소는 체계적인 화재방호 기준에 따라 설계되지 않았으며, 그 후에 별다른 보완도 없었으므로 화재 안전측면에서 매우 취약하다고 볼 수 있다. 따라서, 본 연구를 통하여 2000년 이전에 완공되어 운전 중인 원자력 발전소 화재방호 관련 주요 기술항목에 대하여 국내 발전소별

로 자료를 분석, 비교, 검토하여 기존 원자력 발전소 화재방호 설비보완을 포함한 원자력 발전소 화재방호 안전대책을 제시하고자 한다.

2. 국내 원자력발전소의 화재방호기준 분석

2.1 화재방호 설계기준

국내에는 현재 총 16기의 가동 중인 원자력 발전소가 있다. 국내 발전소는 1970년대 초에 건설되기 시작한 고리 1호기를 포함하여 90년대 초에 착공한 울진 3,4호기 및 월성 3,4호기에 이르기까지 착공 시기를 기준으로 볼 때 약 20년의 격차가 있으며, 울진 3,4호기와 월성 3,4호기의 완공시기까지 포함하면 약 30년의 경험을 가지고 있다. 그리고, 국내에는 미국형 발전소(Westing House 및 ABB-CE)를 비롯하여 CANDU형 발전소, 프랑스형 발전소 등 종류도 다양하다. 국내에 건설된 원자력 발전소에 적용된 화재방호 관련 기준 및 내용에 대하여 요약하여 정리하면 표1.과 같다.

표 1. 국내 원자력 발전소 화재방호 기준

2.2 화재위험도 분석

항목	고리 1호기	월성 1호기	고리 2호기	고리 3,4호기	영광 1,2호기	울진 1,2호기	영광/울진 3,4호기	월성 2,3,4 호기
Code Cutoff 년도	1969	1975	1975	1977	1978	1980	1986/ 1989	1989
화재 방호 설계 기준	BSI	NBC of Canada	Reg. Guide 1.70.4 & IGL	App.A to BTP APCSB 9.5-1	App.A to BTP APCSB 9.5-1	RCC- I (1981)	BTP CMEB 9.5-1	CAN/CSA -N293-M87
화재 방호 인허가 기준	App.A to BTP APCSB 9.5-1	없음	BTP APCSB 9.5-1 BTP CMEB 9.5-1	BTP APCSB 9.5-1 BTP CMEB 9.5-1	BTP CMEB 9.5-1	RCC- I (1981)	BTP CMEB 9.5-1	CAN/CSA -N293-M87
설계자	GAI	AECL	GAI	Bechtel	Bechtel	Framatom e	KOPEC	AECL /CANATOM
화재 위험도 분석	화재재해 분석수행	미수행	수행	미수행	미수행	미수행	수행	수행

영광 3,4호기 이전의 국내 원자력 발전소 가운데 설계 당시부터 화재위험도 분석을 수행하여 그 결과를 화재방호 및 안전성관련 계통의 설계에 반영한 발전소는 고리 2호기뿐이다. 나머지 발전소는 설계 및 건설 당시에 구체적인 화재위험도 분석 기준이 없었거나(고리 1호기), 화재방호 설계자의 의도에 의해 누락되었다. 그리고, 고리 2호기의 경우에도 설계 당시에 유효한 화재방호 기준인 BTP APCSB 9.5-1 또는 BTP CMEB 9.5-1의 기준을 적용하지 않고, 인허가 문서인 안전성분석보고서 작성 기준(RG 1.70.4)에 따라 분석이 수행되었다. 따라서, 분석범위와 내용에 있어서 현행 규제기준에서 요구하는 것과 많은 차이가 있다.

고리 1호기의 경우에는 1998년 4월에 화재위험도 분석 중 화재재해 분석만 수행 완료하였다. 그러나, 화재위험도 분석의 궁극적인 목적은 발전소 화재 사고발생시 원자로 안전성을 확보하는 것이므로 추후 안전정지 분석을 수행하여 그 결과를 반영하여야 한다. 그리고, 울진 1,2호기의 경우, 프랑스의 설계기준인 RCC-I에 따라 설계되었다. 그런데, 당시에 적용되었던 1981년 RCC-I은 화재위험도분석에 대한 기준이 명시되어 있지 않다. 그러나, 1992년에 개정된 RCC-I에는 화재위험도 분석의 수행을 요구하고 있다.

화재위험도 분석의 수행 결과는 설계변경 또는 운전절차 개선의 형태로 반영된다. 화재위험도 분석 중 안전정지 분석을 수행할 경우, 설계변경 대신 발전소 운전원의 수동조치를 통한 안전정지능력 확보방안을 도출할 수 있다. 이러한 운전원의 수동조치는 일반적으로 발전소 운전 절차서에 반영되는데 영광 3,4호기 이전의 발전소 가운데 이러한 운전절차가 정립된 발전소는 없다. 또한, 이러한 운전원의 수동조치를 위해서는 비상조명설비가 설치되어야 하는데 일부 발전소에는 비상조명설비가 설치되어 있으나 앞에서 기술한 상세 안전정지 분석에 따라 필요한 곳에 정확히 설치되지 않았다.

2.3 화재방호 설비

국내 원자력 발전소의 화재방호설비를 화재탐지 및 통신설비, 수계 소화설비, 가스계 소화설비로 구분하여 살펴보면 다음 표 2. 3. 4.와 같다.

표 2. 발전소별 화재탐지설비 현황

호기	주제어실 바닥	케이블 포설실	원자로 냉각재 펌프실	소화펌프 설치현황
고리 1,2	준비작동식 SP	습식 SP: 보조건물 준비작동식 SP: 중간건물	1호기: 없음 2호기: 수동식 WS	MD:1 ED:1 ED:1(해수)
고리 3,4	준비작동식 SP	준비작동식 SP	자동식 WS	MD:1 ED:1 JP:1 ED:1(해수)
영광 1,2	준비작동식 SP	수동식 WS	자동식 WS	MD:1 ED:2 JP:1
영광 3,4	수동식 CD	수동식 CD	수동식 WS	MD:1 ED:2 JP:1
울진 1,2	할론 1301 소화설비	할론 1301 소화설비	수동식 WS	MD:2
울진 3,4	자동 및 수동식 Inergen 소화설비	자동 및 수동 CD	수동식 WS	MD:1 ED:2 JP:1
월성 1,2	1호기: 습식SP 2호기: 준비작동식SP	습식 SP	1호기: 분말소화기 2호기: 옥내소화전	MD:2 JP:1
월성 3,4	준비작동식 SP	습식 SP	옥내 소화전	MD:2 JP:1

표 3. 발전소별 수계소화설비 설치현황

구분	수신기	감지기	배선방식	발신기	이차전원	
고리	1호기	P형	일반감지기	단일회로	P형 1급	스위치기어실의 배터리 사용
	2호기	P형	일반감지기	단일회로	P형 1급	스위치기어실의 배터리 사용
	3,4호기	P형	일반감지기	단일회로	P형 1급	스위치기어실의 배터리 사용
월성	1호기	P형	일반감지기	단일회로	Pall Down Type 및 P형 1급	스위치기어실의 배터리 사용
영광	1,2호기	P형	일반감지기	단일회로	P형 1급	별도의 축전지 설치
	3,4호기	P형	일반감지기	단일회로	P형 1급	수신기에 배터리 내장 (24시간 용량)
울진	1,2호기	P형	일반감지기	단일회로	P형 1급	스위치기어실의 배터리 사용
	3,4호기	R형	아날로그감지기와 일반감지기 겸용	다중회로	P형 1급	수신기에 배터리 내장 (24시간 용량)

표 4. 발전소별 가스계 소화설비 설치현황

호기	이산화탄소 소화설비	할론 1301 소화설비	청정 소화약제
고리 1,2	-	유지창고	-
고리 3,4	-	변전설비, 유지창고, 폐기물창고	-
영광 1,2	-	자료관리실, 345kV 변전실, 케이블분배실, 배터리실, 제어반	-
영광 3,4	주제어실 바닥하부지역, 전기기기실 바닥하부지역, 대체교류 발전기 연료유저장탱크실, 발전기실, 일일탱크실(고압식), 여자기 하우스, 디젤 발전기실, 일일 탱크실, 윤활유 탱크실, 케이블분배실(저압식)	-	-
울진 1,2	디젤 발전기실(고압식)	자료관리실, 유지창고 (터빈용 윤활유 옥내저장소), 케이블포설실 (중앙제어실 아래)	-
울진 3,4	디젤 발전기실, 연료유저장탱크실, 일일 탱크실, 윤활유 탱크실, 비IE 디젤 연료유저장실, 대체교류 디젤 발전기실, 연료유 저장탱크실, 윤활유탱크실, 케이블분배실, 변전소 제어건물	-	주제어실, 컴퓨터실, 전기기기실
월성 1,2	1호기: 공조기기실 2호기: 제어기기실, 주제어실, 발전소 제어컴퓨터실	1호기: Body Shop, Bio Sample Room	-
월성 3,4	제어기기실, 주제어실, 발전소 제어컴퓨터실	-	-

2.4 화재방호 계획

현재 운전 중인 국내 원자력 발전소들은 모두 각 발전소별로 화재방호계획을 작성하여 운영하고 있으며, 울진 1,2호기, 영광 1,2호기, 영광 3,4호기, 그리고 울진 3,4호기는 10 CFR 50 Appendix R 기준을, 고리 1,2,3,4호기와 월성 2호기의 경우는 국내 소방방법을 기준으로 작성되었다. 국내 원자력 발전소에 적용되는 원자력 발전소 화재방호 계획에 관한 현행 기준은 BTP CMEB 9.5-1이며 고리 1호기의 경우 Appendix R 기준을 적용 가능하다. 그러나, 나머지 발전소들은 BTP CMEB 9.5-1 또는 도입국의 기준을 따라야 한다. 국내 소방방법의 경우, 소방법 제 9조 및 시행령 제 10조에 소방계획에 관한 규정이 있으나 원자력 발전소에 적용 가능한 구체적인 기준이 미흡하다.

고리 1,2,3,4호기, 울진 1,2호기, 영광 1,2호기, 영광 3,4호기, 월성 1,2호기, 그리고, 울진 3,4호기를 대상으로 현재 사용 중인 화재방호 계획서 내용을 비교 검토한 결과, 국내 원자력 발전소는 일반적으로 2개호기를 하나의 발전소로 운영하고 있으므로 화재방호 계획의 경우도 2개호기를 하나의 화재방호 계획서를 통해 관리하고 있다. 그러나, 고리 발전소의 경우 4개호기를 하나의 화재방호 계획서로 통합하여 운영하고 있다.

3. 국내 원전 화재 안전대책

원자력 발전소 화재방호의 기본 개념은 심층방호기준을 적용하는 것이다. 심층방호개념은 가능하면 화재가 발생하지 않도록 하고, 화재가 발생할 경우에는 신속하게 탐지하여 소화할 수 있도록 하며, 만약 화재소화에 실패하더라도 원자로 안전정지능력에 영향을 주지 않도록 하는 것이다. 이러한 심층방호의 모든 요소들이 적절히 반영되어 있는지를 확인하는 것은 상세 화재위험도 분석을 통해 가능하다. 국내 원자력 발전소의 화재안전성 확보를 위해서는 먼저 상세 화재위험도 분석을 수행하여 문제점을 파악하고, 그 결과에 따라 필요한 화재방호설비 및 안전정지관련 설비를 개선하여야 한다. 이러한 분석 및 설비개선은 많은 시간과 비용을 필요로 한다. 따라서, 국내 모든 원자력 발전소에 대한 종합적인 장기 계획을 수립하여 각 발전소별로 추진하는 것이 바람직하다.

현재 고리 1호기와 월성 1호기에 대하여 화재안전정지 능력 분석 및 화재위험도 분석이 수행되어 결과를 반영 중에 있으며, 한국 원자력 안전위원회에서는 화재위험도 분석 기술기준 및 화재방호 계획서 작성 기준을 규제화 하는 방안을 검토 중이다. 발전소 화재사고는 다른 설계기준사고와는 달리 적절히 방호되지 않을 경우 그 영향이 광범위하고 열에 의한 직접적인 영향뿐만 아니라 연기와 가스에 의한 간접적인 영향도 초래한다. 그리고, 전기관련 설비의 화재발생시에는 해당 기기의 손상 외에 전기적인 단락이나 접지, 단선 등에 의한 기기의 오동작도 유발한다. 따라서, 발전소 화재사고로부터 재산과 인명, 그리고 원자로 안전성을 보호하기 위해서는 각종 화재방호수단이 강구되어야 한다. 원자력 발전소에 이용되는 화재방호수단은 발전소 설계초기의 건물 및 기기 배치설계를 비롯하여 화재탐지 및 소화설비, 그리고 운전 중의 방화관리에 이르기까지 모든 요소들이 복합적으로 고려되고 있다. 발전소 화재발생시 원자로 안전성을 보호하고 방사성물질의 누출을 최소화 할 수 있도록 이러한 모든 화재방호 요소들이 적절히 고려되어 있는지를 확인하기 위해서는 실제 성능위주의 화재위험도 분석을 수행하여야 하며, 그 결과 도출된 화재취약점은 적절한 설계개선이나 운전절차 반영 등을 통해 보완하여야 한다. 운전중인 원자력 발전소의 화재안전성을 확보하기 위해 필요한 조치사항 및 안전대책은 발전소별로 다음과 같다.

- (1) 주소형 아날로그 감지기 및 다중회로 배선방식을 적용하고 R형 수신기 설치
 - 고리 1,2,3,4호기, 월성 1호기, 영광 1,2,3,4호기, 울진 1,2호기
- (2) 수신기의 이차전원을 수신기 내부 자체 전원 공급방식으로 개선

- 고리 1,2,3,4호기, 월성 1호기, 영광 1,2,3,4호기, 울진 1,2호기
- (3) 화재 위험도 분석 실시
 - 고리 1,3,4호기, 월성 1호기, 영광 1,2호기, 울진 1,2호기
- (4) 운전원의 수동조치를 통한 안전정지능력 확보 방안을 운전절차서에 반영
 - 고리 1,2,3,4호기, 월성 1,2,3,4호기, 영광 1,2호기, 울진 1,2호기
- (5) 비상조명설비 설치 - 고리 1호기
- (6) 내진등급 I, Class 1E 소화펌프 적용 - 월성 1,2호기
- (7) 내진등급 I, 소화전설비 적용 - 고리 1,2호기, 울진 1,2호기, 월성 1호기
- (8) 화재방호 설비 운전제한 기준 수립 - 영광 3,4호기, 울진 3,4호기

4. 참고 문헌

- (1) 10 CFR 50, App. R, "Fire Protection Program for Nuclear Power Facilities Operating Prior to January 1, 1979"
- (2) App. A to BTP APCSB 9.5-1, "Guidelines for Fire Protection for Nuclear Power Plants Docketed Prior to January 1, 1979"
- (3) BTP CMEB 9.5-1, "Guidelines for Fire Protection for Nuclear Power Plants"
- (4) BTP APCSB 9.5-1, "Guidelines for Fire Protection for Nuclear Power Plants Docketed Prior to January 1, 1979"
- (5) CAN/CSA-N293-M87, "Fire Protection for CANDU Nuclear Plants, Canadian Standards Association"
- (6) UCN 3&4 Fire Protection Report, Rev.1. July 30, 1997
- (7) Wolsong 2,3 &4 Final Fire Hazard Assessment, June 20, 1995
- (8) Wolsong 2 Recommendations for the Fire Protection Program, Nov. 6, 1996
- (9) YGN 3&4 Fire Protection Report, Rev.1. July 30, 1994
- (10) 고리 1,2,3,4 FSAR Section 9.5.1 : Fire Protection
- (11) 영광 1,2,3,4 FSAR Section 9.5.1 : Fire Protection
- (12) 영광 1,2 호기 화재방호계획서, 1990
- (13) 월성 1,2,3,4 FSAR Section 9.5.1: Fire Protection
- (14) 월성 2호기 화재방호계획서, 1996
- (15) 울진 1,2,3,4 FSAR Section 9.5.1: Fire Protection
- (16) 울진 제 1발전소 화재방호계획서, 1996