

원전 화재사건의 확률론적 안전성평가



정 범 회
한국전력기술(주)
전력기술개발연구소
책임연구위원

목 차

1. 머리말
2. 화재 PSA 방법
3. 맺는 말

1. 머리말

원자력발전소에서 가장 중요하게 다루어지는 것은 안전성이며 이를 확보하기 위해 설계 단계에서부터 모든 경우의 사고를 가정하여 이에 대처할 수 있는 다중(Redundancy), 다양(Diversity)의 기능을 보유하도록 하고 있다. 이에 해당하는 사고의 하나가 화재사고이며 원전은 발전소 내 어느 곳에서 화재가 발생하더라도 발전소를 안전정지시킬 수 있도록 설계하고 설계 개념을 저해하지 않는 수준으로 발전소를 운영, 관리하도록 하고 있다.

그러나 화재는 발화원과 가연성물질이 존재하는 곳이라면 언제라도 발생하고 확산될 가능성이 있으며 현실적으로 이러한 조건을 완벽히 배제할 수 없는 원전 역시 심층방어개념의 화재방호설계에도 불구하고 예외가 될 수는 없다. 따라서 원전에서의 화재는 어떠한 형태로든 안전성에 영향을 줄 수 있다.



원전에서의 화재사건은 원자로 정지를 유발함과 동시에 안전정지 또는 사고완화 기능을 수행하는 다수의 기기를 동시에 손상시킬 수 있으며 화재가 발생하고 이를 진압하는 과정에서 화재와 무관한 일련의 기기 고장이나 운전 오류가 발생한다면 발전소의 필수안전기능이 상실되어 원자로의 노심이 손상되는 사고가 발생할 수 있다.

이러한 사고 가능성을 확률론적 분석 기법을 통하여 체계적이고 종합적으로 평가함으로써 안전성 수준을 정량화된 형태로 제시할 수 있는 것이 확률론적 안전성평가(Probabilistic Safety Assessment: PSA)방법이다.

여기서는 PSA의 한 분야인 화재 PSA가 어떠한 것인지를 이의 수행 방법을 설명함으로써 소개하고자 한다.

2. 화재 PSA 방법

가. 정성적 선별분석

정성적 분석의 목적은 화재구역 경계를 정의하고 이들 구역의 물리적, 기능적 특성을 파악하여 화재가 발생하더라도 발전소 정지를 유발하지 않으며 발전소 안전정지 기능에 영향을 미치지 않는다는 것을 보임으로써 화재구역을 선별하는 것이다.

(1) 화재구역 경계 정의

화재 PSA에서는 원전의 모든 구조물을 대상으로 하여 3시간(일부 2시간) 이상의 내화등급을 만족하는 방화벽으로 경계가 이루어진 곳을 화재구역으로 정의한다. 이를 위해 설계 단계에서 정의된 화재구역 경계를 화재 PSA에서 사용할 수 있는지를 판단하고 필요한 경우에는 설계 단계에서 정의된 화재구역 경계를 화재 PSA 목적에 맞게 재조정한다.

(2) 분석 대상 계통 및 기기 파악

화재구역에서 발생한 화재에 의해 야기될 수 있는 초기사건을 선정하고 발전소 안전정지 기능

에 미치는 영향을 평가하기 위하여 어떠한 기기가 화재 환경에 노출될 수 있는가를 파악하여야 한다.

우선 분석 대상 계통을 선정하고 이들 계통을 구성하는 기기를 조사하는데 일반적으로 분석 대상 기기에는 화염, 고온가스, 복사열 등에 노출되었을 때 기기의 고유 기능이 상실될 수 있는 기기가 포함된다. 이러한 기기뿐만 아니라 기기의 운전에 필수적인 전원/제어 케이블은 화재에 노출되는 경우 쉽게 기능이 상실될 수 있는 대표적인 것으로 케이블의 손상은 분석 대상 기기의 기능 상실 여부와 직접적인 관계가 있기 때문에 이들 케이블의 설치 정보, 즉 분석 대상 기기에 연결되는 케이블이 어떠한 화재구역에 위치하는가를 확인하는 것은 대단히 중요하다.

(3) 화재전파 경로

화재구역 경계는 화재가 발생하더라도 이웃 화재구역으로 전파되지 못하도록 하여 화재가 발생한 구역에 한해 제한된 손상을 입히도록 설계한다. 그러나 화재구역 경계를 구성하는 방화문, 방화담뽀, 케이블 관통부 밀봉재 등의 화재차단설비에서 화재와 무관한 임의 고장이 발생하거나 운전요원의 실수로 이들 화재차단설비의 건전성이 상실되면 화재가 발생하였을 때 화재는 전파될 수 있다.

이러한 화재전파 가능성을 파악하기 위하여 화재차단설비의 위치, 형식 및 수량 파악이 필요하다.

(4) 정성적 선별

화재구역별로 조사된 분석 대상 기기와 화재전파 경로를 토대로 화재구역을 정성적으로 선별한다. 정성적인 선별 과정을 거쳐 선별 제거될 수 있는 화재구역은 다음의 두 선별 조건을 만족하여야 한다.

- 화재가 발생한 구역과 화재 전파가 가능한 구역에는 기기의 화재 손상으로 인해 발전소 정지가 이루어지지 않아야 한다.

• 화재가 발생한 구역과 화재 전파가 가능한 구역에는 사고 완화 기능을 수행하는 기기가 설치되어 있지 않아야 한다.

위 두 조건을 만족하는 화재구역은 발전소의 위험도에 기여하는 바가 낮기 때문에 이에 대해서는 더 이상의 분석을 수행하지 않는다. 위 기준에 따른 정성적 선별분석에서는 화재는 모든 화재구역에서 발생 가능하며 이웃 화재구역간의 경계에 화재전파 경로가 존재하면 화재는 틀림없이 전파된다는 보수적인 가정을 적용한다. 또한 운전 요원과 자동 소화설비에 의한 화재 진압 가능성을 배제한다.

나. 정량적 선별분석

정성적 분석을 통하여 추가 분석을 요하는 화재구역을 선정할 수 있으며 이 때 선정된 화재구역이 정량적 선별분석을 요하는 구역이 된다.

정량적 선별분석에서는 각 화재구역별 화재발생빈도와 화재전파확률 그리고 화재가 발생한 구역에서의 기기 손상과 화재가 전파되었을 때의 추가 기기 손상을 고려하여 화재로 인한 조건부 노심손상확률을 계산하고 이로부터 노심손상빈도를 평가하여 보다 상세한 분석이 필요한 화재구역을 선별한다.

(1) 화재발생빈도

화재발생빈도는 발전소 내에 존재하는 발화원에 일반화재데이터와 원전의 고유데이터를 사용하여 계산할 수 있다. 일반데이터원의 하나는 NSAC- 178L[1]이며 화재발생빈도 계산 방법은 EPRI TR- 105928[2]에 기술되어 있다. <표 1>에서는 NSAC- 178L에 제시된 데이터의 예를 보여주고 있다.

(2) 정량화 모델

구역에서의 화재 위험도를 정량적으로 평가하기 위해서는 발전소 정량화 모델을 구성하여야 하며 이를 위해 고장수목과 사건수목 분석기법을 사용한다.

<표 1> 화재발생 데이터

발화원	화재발생빈도
디젤발전기	2.6×10^{-2}
전기케비넷	$2.4 \times 10^{-3} \sim 1.9 \times 10^{-2}$
펌프	$4.0 \times 10^{-3} \sim 1.9 \times 10^{-2}$
축전지	3.2×10^{-3}
터빈발전기	2.3×10^{-2}
케이블	6.3×10^{-3}
변압기	7.9×10^{-3}
용접절단	3.6×10^{-2}

정량화 모델에는 화재와 무관한 기기의 임의고장, 공통원인고장, 시험 및 보수로 인한 이용불능 등의 기본사건과 기기의 화재에 의한 이용불능의 기본사건들로 구성된다. 또한 화재 환경 하에서 운전요원 스트레스 수준을 고려하여 인간오류 가능성을 포함시킨다. 이들 기본사건을 포함한 고장수목의 간단한 예를 [그림 1]에 나타내었다.

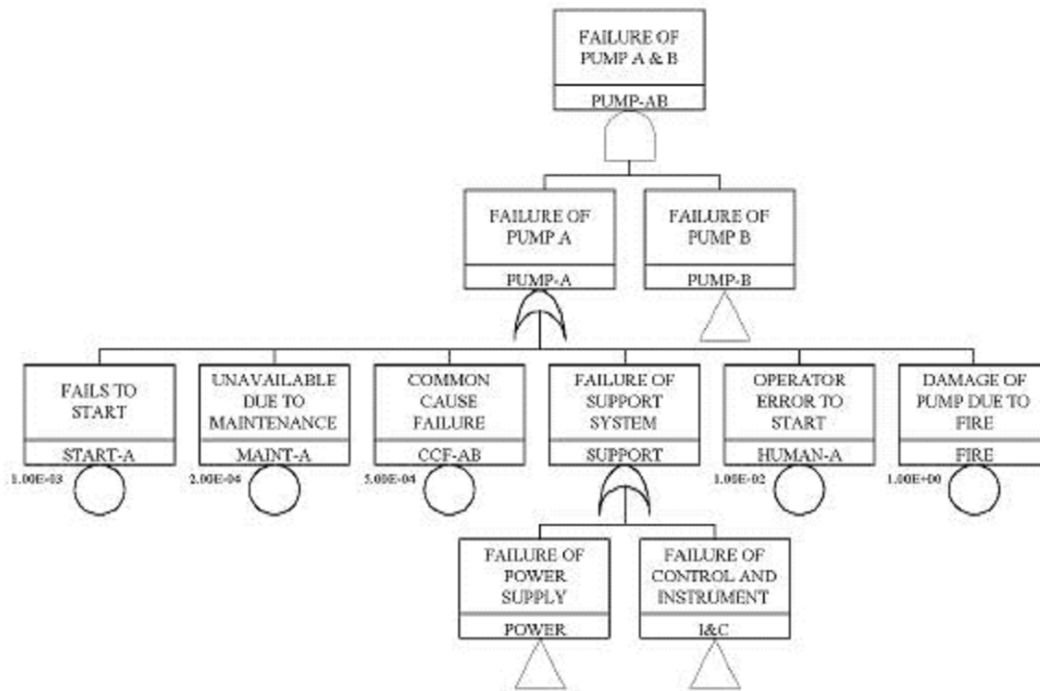
(3) 화재 초기사건

화재구역별 화재 시나리오를 정량화하기 위해서는 화재구역에서 어떠한 사건이 발생 가능한가를 파악하여야 하며 이는 각 화재구역 내에 존재하는 기기를 검토함으로써 가능하다.

(4) 화재 전파 가능성 평가

화재가 전파되어 위험도를 증가시키기 위해서는 다음과 같은 조건이 만족되어야 한다.

- ① 화재구역 내에는 발화원과 발화원에 노출된 충분한 가연성물질이 존재하여야 한다.
- ② 화재가 발생한 구역에서의 화재 진압이 실패하여야 한다.
- ③ 화재구역 경계에 설치된 화재차단설비가 제작, 설치 또는 운전상의 실수로 기능이 상실되어야 한다.
- ④ 화재가 전파된 구역에 존재하는 기기는 화재가 발생한 구역에 위치하는 기기와 달라야 함은 물론 기기의 손상에 의한 계통 차



[그림 1] 고장수목의 예

원의 영향이 달라야 한다.

위의 첫 번째 항목과 관련하여 선별분석에서는 모든 분석 대상 구역에는 발화원과 충분한 양의 가연성물질이 존재한다고 가정하며, 화재 차단 설비의 고장에 의한 전파 가능성은 앞에서 파악한 화재전파 경로상의 차단설비에 대해 고장확률을 보수적으로 반영한다.

(5) 정량화

화재구역별 발생 가능한 초기사건, 화재발생 빈도, 화재로 인해 손상받을 수 있는 기기 및 화재 전파 가능 구역 등이 파악됨으로써 구역별 화재에 의한 노심손상빈도를 구할 수 있는 준비가 되었다.

정량적 선별분석을 위한 화재구역별 노심손상 빈도(CDF_{FAi})는 다음 식에 의해 구할 수 있다.

$$CDF_{FAi} = F_i \times (CCDP_{a+} + P_{fh} \times CCDP_{a-b})$$

여기서, F_i 는 화재구역의 화재발생빈도, $CCDP_{a+}$ 는 화재가 발생한 구역에서의 조건부노심 손상확률이다. 조건부노심손상확률은 구역 내에 존재하는 기기들의 화재손상항목을 고장수목에 반영하여 해당 초기사건의 사건수목을 정량화함으로써 계산할 수 있다. P_{fb} 는 화재 발생구역과 이웃한 구역 사이에 존재하는 화재차단설비의 실패확률이다. $CCDP_{a-b}$ 는 이웃 구역으로 화재가 전파되어 두 구역 내에 위치하는 안전정지 기기가 모두 손상되었을 때의 조건부노심손상확률이다.

위에서 얻은 정량화 결과를 선별기준과 비교함으로써 보다 상세한 분석을 요하는 화재구역을 선별해 낼 수 있다.

다. 상세 분석

선별분석을 통해 선정된 노심손상빈도에 크게

기여하는 화재구역에 대하여 보수성을 배제한 상세분석을 수행하며 분석 대상 기기 또는 케이블이 손상되기까지의 화재성장 중간단계의 가능성을 고려하고 이의 영향을 평가한다. 또한 화재에 영향을 받지 않는 구역에서의 밸브 조작과 같은 현장 회복 조치 등을 고려한다.

(1) 화재 시나리오에서의 화재손상단계 정의

화재 시나리오를 작성하기 위해서는 먼저 화재 발생시 손상될 수 있는 화재구역 내의 분석 대상 기기와 케이블의 기능 및 위치를 파악하여야 하며 이의 손상 임계점을 온도 또는 열속으로 나타내야 한다.

또한 전기캐비닛, 모터 등과 같이 가연성물질을 포함하고 있는 발화원과 기름종이, 차폐복과 같은 임시 가연성물질의 위치 및 특성을 조사한다.

발화원과 분석 대상 기기의 위치가 결정되면 각 발화원에서 화재가 시작되어 주요 기기가 순서대로 손상을 입는 여러 화재손상단계를 정의한다.

각각의 화재손상단계는 화재로 인해 이용불능 되는 기기의 범위에 따라 정의한다.

(2) 화재 성장률 및 분석 대상물의 화재 노출 시간 예측

화재손상단계 정의 과정에서 조사한 분석 대상물과 각 발화원의 위치 및 특성을 코드에 입력하여 최종적으로 분석 대상물이 손상되는데 걸리는 시간을 평가하는 과정이 필요하며 이를 위해 COMPBRN IIIe 전산프로그램[3]을 사용할 수 있다. 그러나 COMPBRN IIIe는 기술적인 제한 사항이 있으며 이는 구역 특성을 고려한 별도의 수학적 계산을 통해 보완할 수 있다.

(3) 화재 탐지 및 진화 가능성

여기서는 전 단계에서 계산한 각각의 화재손상 단계에 걸리는 시간에 대하여 그 이전에 화재를 감지하고 진화할 수 있는지를 확률적으로 평가한다. 이 때 화재 감지기의 반응시간과 신뢰도, 자

동진화설비의 신뢰도 및 수동 화재진압 가능성을 고려한다.

자동소화설비에 의한 화재진압의 경우 소화설비가 분석 대상물이 손상되기 전에 작동되는지의 여부를 확인하여야 하며 만일 적시에 작동하면 자동소화설비는 선택된 고장률에 따라 고장난다고 가정한다. 자동소화가 실패하였을 경우에는 이에 대한 회복 조치 가능성을 각 화재손상단계별로 평가한다.

수동 화재진압 가능성은 화재 발생 지점, 발전소내의 소방 훈련 정도 등에 따라 특성을 달리하기 때문에 수동 화재진압 모델 구성에 특별한 관심을 두어야 한다.

(4) 화재성장 및 진화 모델의 조합

특정 화재손상단계(i)에 도달할 확률 Q(FDS)는 다음 식을 사용하여 평가한다.

$$Q(FDS)_i = \int_0^t f_{ig}(t) (1 - F_{ig}(t)) dt$$

여기서, $F_{ig}(t)$ 는 시간, t 이전에 화재진압이 성공할 확률이며, $f_{ig}(t)$ 는 화재손상단계(i)에 도달할 화재 지속시간이 t와 t+dt 사이에 있을 확률이다.

(5) 화재에 의한 노심손상빈도 평가

각각의 발화원과 화재손상단계에 대한 노심손상빈도는 각 발화원의 화재 발생빈도, 특정 화재손상단계 이전에 화재를 진압하지 못할 조건부 확률, 그리고 화재손상단계 도달, 즉 화재로 인한 기기 손상에 따른 조건부노심손상확률을 종합한 [그림 2]와 같은 화재 사건수목을 구성하여 계산한다.

라. 결과 도출

전 단계에서 주요 화재구역에 대해 정량화한 결과를 모든 발화원과 각각의 화재손상단계에 대해 노심손상빈도를 더함으로써 화재에 의한 전체 노심손상빈도를 계산한다. 이는 화재사건의 상대적 중요성을 판단하는 수단을 제공하며 주요 화

Fire in Electrical Cabinets	Large Fire	Fire not in ESF SWGR	Fire not in LC 12SA	Fire in Non-IE Elec. Cabin.	Fire not Affect One NSPB	Fire not Affect Both NSPBs	CCDP	Seq. No.	Status	Frequency
Fire	LF	SWGR	LC12	NCLE	PBO	PBT	CCDP			
5.0E-3	8.75E-1	3.4E-1	2.1E-1	2.6E-1	2.0E-1	2.1E-1	1.0E-5	S01	OK	1.96E-9
							4.1E-5	S02	CM	
							3.0E-4	S03	OK	
							3.0E-4	S04	CM	
							3.0E-4	S05	OK	
							3.0E-4	S06	CM	
							3.0E-4	S07	OK	
							3.0E-4	S08	CM	
							1.4E-2	S09	OK	
							3.0E-4	S10	CM	
							3.0E-4	S11	OK	
							2.1E-1	S12	CM	
							2.6E-2	S13	OK	
							1.0E-5	S14	CM	
							1.0E-5	S15	OK	
							4.1E-5	S16	CM	
							4.1E-5	S17	OK	
							3.0E-4	S18	CM	
							3.0E-4	S19	OK	
							3.0E-4	S20	CM	
							3.0E-4	S21	OK	
							3.0E-4	S22	CM	
							3.0E-4	S23	OK	
							3.0E-4	S24	CM	
							4.2E-2	S25	OK	
							2.6E-2	S26	CM	

[그림 2] 화재 사건수목 예

재사건경위를 선택하는 기준이 된다.

설계 개선안이 필요한 경우 취약도에 기여하는 화재 시나리오의 순위를 결정하고 분석시 사용된 가정 사항 등을 검토하고 민감도 분석을 수행하여 개선안을 도출한다.

3. 맺는 말

화재 PSA의 장점은 노심손상빈도에 대한 각각의 화재손상단계의 기여도를 쉽게 파악할 수 있고 화재방호설비의 취약부 파악을 용이하게 함

으로써 가장 효과적인 안전성 향상 방안을 수립할 수 있다는 것이다.

발전소 PSA 결과로 도출된 노심손상빈도, 주요 사고경위 등의 유용한 정보는 주로 설계 개선, 절차서 개정 및 운전요원 훈련에 반영하여 발전소 안전성을 높이는데 사용되어 왔으며 최근에는 PSA 응용 범위가 규제에까지 확대되어 자원분배의 우선 순위 결정, 품질보증 및 검사기준 평가, 비상계획 수립 등에까지 이용되고 있다.

참고문헌

- [1] NSAC- 178L, Fire Event Database for U.S. Nuclear Power Plants, Electric Power Research Institute, 1993. 1.
- [2] EPRI TR- 105928, Fire PRA Implementation Guide, Electric Power Research Institute, 1995. 12.
- [3] EPRI NP- 7282, COMPBRN III: An Interactive Computer Code for Fire Risk Analysis, Electric Power Research Institute, 1991. 5.
- [4] NSAC- 179L, Automatic and Manual Suppression Reliability Data for Nuclear Power Plant Fire Risk Analysis, 1994. 2.