[Research Paper]

국내 원자력발전소에서의 임시 점화원 화재 리스크 평가

유정현

(주)미래와도전 신뢰도기술부 부장

Fire Risk Assessment of Transient Ignition Sources in Domestic Nuclear Power Plants

Jung-Hyun Ryu

General Manager, Department of Reliability Engineering, FNC Technology Co. Ltd.

(Received April 14, 2021; Revised May 12, 2021; Accepted May 24, 2021)

요 약

원자력발전소의 화재 리스크는 크게 고정 점화원과 임시 점화원으로 나누어 평가한다. 화재 리스크 관점에서 임시 점화원의 비중은 매우 적으나 가정 사항과 모델링 방법의 차이로 인한 불확실성이 상대적으로 크므로 이에 대한 방법론의 정립이 필요하다. 본 연구에서는 NUREG/CR-6850의 새로운 임시 점화원 평가 방법, NUREG-2169의 개정된 화재발생빈도 및 NUREG-2233에 제시된 입력 매개변수를 활용하여 임시 점화원 화재 리스크 평가를 수행하였다. 신규 방법론은 구역 특성을 토대로 임시 점화원의 구역별 화재발생빈도를 정량적으로 평가하며, 구역 내 평가는 임시 점화원의 위치를 고려한 면적 기반 시나리오 평가 방법을 제안한다. 참조 원전의 스위치기어실에 대하여 신규 방법론을 적용한 결과, 기존 EPRI TR-105928 방법 대비 약 70%의 리스크 감소를 확인하였다. 향후 본 연구의 결과를 원자력발전소의 임시 점화원에 대한 화재 리스크 평가에 활용할 경우 보다 현실적인 분석으로 화재 발생 시 중요 구역을 도출할 수 있으며, 고평가된 화재 리스크 저감에 도움을 줄 수 있을 것으로 기대한다.

ABSTRACT

The fire risk of a nuclear power plant is evaluated using fixed and transient ignition sources. In terms of the overall fire risk, the proportion of transient ignition sources is very small. However, because the uncertainty due to the difference between the assumptions and the modeling method is relatively large, it is necessary to establish a methodology to address this. In this study, the new transient ignition source evaluation method presented in NUREG/CR-6850, the ignition source frequency revised in NUREG-2169, and the input parameters for transient fire modeling presented in NUREG-2233 were used to evaluate the fire risk assessment for transient ignition sources. In this new evaluation methodology, the fire ignition frequency is quantitatively evaluated based on the characteristics of the area, and an area-based scenario evaluation method considering the location of the transient ignition source is proposed for the evaluation within the area. As a result of applying the new methodology to the switchgear room of a reference nuclear power plant, an approximately 70% risk reduction was confirmed compared to the existing EPRI TR-105928 method. In the future, if fire risk assessment for transient ignition sources in nuclear power plants is applied using the results of this study, it is expected that areas whose control is important in the event of a fire can be determined, which should help reduce highly rated fire risks.

Keywords: Fire probabilistic safety assessment, Transient ignition source, Transient fire assessment, NUREG/CR-6850, CDF

1. 서 론

원자력발전소의 1단계 화재 확률론적안전성평가(probabilistic

safety assessment, PSA)는 발전소 내의 냉각재상실사고나 과도사건으로 인한 노심손상빈도(core damage frequency, CDF)를 결정하는 1단계 확률론적안전성평가⁽¹⁾와 달리, 발

Table 1. EPRI TR-105928 Transient Ignition Source and Frequencies

Ignition source	Fire frequency
Transients	1.3×10^{-3}
Cable fires caused by welding	5.1×10^{-3}
Transient fires caused by welding and cutting	3.1×10^{-2}

전소 화재구역에 존재하는 점화원에 의한 화재 발생 시 발전소의 안전정지 또는 사고완화에 영향을 미치는 기기의 손상을 파악하여 노심손상빈도를 평가하는 것을 목적으로 한다. 각 화재구역의 화재 리스크는 구역에 존재하는 점화원과 각 점화원의 화재에 의해 손상을 받는 기기 및 케이블의 영향을 평가하여 결정하므로, 구역 점화원의 종류 및 수량이 중요한 역할을 차지한다. 국내에서 사용 중인 기존 화재 PSA 방법론인 EPRI TR-105928⁽²⁾은 원자력발전소를 여러 개의 대표지역(plant location)으로 나누고 각 대표지역의 점화원을 지역의 고유 점화원과 발전소 전역(plant-wide)에 존재하는 점화원으로 분류하였으며, 발전소 전역에 존재하는 점화원을 고정 점화원(fixed ignition sources)과 임시 점화원(transient ignition sources)으로 분류하였다. EPRI TR-105928에서 분류한 임시 점화원은 임시 점화원, 용접에 의한 케이블 화재, 용접 및 절단에 의한 임시 화재(transient fire)의 세 종류이며 각 화재발생빈도는 Table 1과 같다.

기존 화재 PSA 방법론⁽²⁾에서는 위의 세 가지 임시 점화원이 발전소의 화재구역에 동일하게 존재하는 것으로 가정하여 화재발생빈도를 모든 화재구역에 동등하게 분배한다. 이는 상대적으로 임시 점화원의 화재 리스크가 적은 구역에서도 임시 점화원의 화재에 의하여 구역 내 위치한 주요 기기 및 케이블에 대한 화재 리스크를 과평가 할 가능성이 있음을 의미한다.

2005년 NRC와 EPRI가 공동으로 발간한 신규 화재 PSA 방법론인 NUREG/CR-6850⁽³⁾은 이전 방법론과 점화원의 분류

를 달리하였으며, 각 점화원의 화재발생빈도 뿐만 아니라 심각도 및 분석법도 새롭게 제시하였다. 2015년 이후에는 NRC와 EPRI가 공동으로 NUREG-2169⁽⁴⁾ (EPRI 30002002936)을 발간하여 NUREG/CR-6850에서 제시한 점화원의 분류와 화재발생빈도를 일부 수정하였다. 또한 2020년에는 임시 점화원의 열 방출률과 화재 특성에 대한 실험 결과 보고서 NUREG-2232⁽⁵⁾ (EPRI 3002015997)과 NUREG-2233⁽⁶⁾ (EPRI 3002018231)을 발간하여 원자력발전소의 임시 점화원에 대한 보다 실제적인 분석이 가능하도록 하였다.

이러한 배경으로 NUREG/CR-6850 발간 이후 제시된 임시 점화원의 분석과 관련된 연구와 데이터를 참조 발전소의 스위치기어실(switchgear room) 분석에 적용하여 평가하고 기존 방법론과 리스크를 비교하였다. 국내 화재 리스크 평가는 주로 고정 점화원⁽⁷⁾이나 주제어실⁽⁸⁾을 대상으로 수행되어, 이러한 임시 점화원에 대한 분석은 화재구역의 임시 점화원에 대한 보다 현실적인 평가로 화재 리스크에 있어 보다 중요한 구역이나 기기 등을 파악하는데 유용할 것으로 기대된다.

2. 신규 방법론의 임시 점화원 분석

2.1 임시 점화원의 분류 및 화재발생빈도

발전소 전역에 존재하는 임시 점화원에 대하여 일괄적인 화재발생빈도를 제시하였던 EPRI TR-105928과 달리, NUREG/CR-6850은 임시 점화원의 위치를 격납건물, 제어/보조/원자로 건물, 발전소 전역 및 터빈건물로 나누었다. 또한 격납건물의 임시 점화원에 고온작업(hot work)을 포함하고, 모든 지역의 케이블 화재의 점화원으로 절단(cutting)을 추가하였다. NUREG/CR-6850에서 제시된 화재발생빈도는 이후 2010년 발간된 NUREG/CR-6850 Supplement 1⁽⁹⁾에서 개정되었으며, NUREG-2169로 최종 수정되었다. 개정된 화재발생빈도는 Table 2로 제시하였다. 3가지 자료를 비교한 결과 기존 화재발생빈도에 비하여 용접 및 절단에 의한 케

Table 2. Transient Ignition Source and Frequencies

Ignition source	Location	Bin	Fire frequency		
			NUREG/CR-6850	NUREG/CR-6850 Supp.1	NUREG-2169
Transients	Control / Aux / Reactor building	7	3.9×10^{-3}	4.81×10^{-3}	3.33×10^{-3}
	Plant-wide components	25	9.9×10^{-3}	8.28×10^{-3}	8.54×10^{-3}
	Turbine building	37	8.5×10^{-3}	3.41×10^{-3}	6.71×10^{-3}
Transients and hotwork	Containment (PWR)	3	2.0×10^{-3}	2.34×10^{-3}	4.21×10^{-4}
Cable fires caused by welding and cutting	Control/Aux/Reactor building	5	1.6×10^{-3}	1.25×10^{-3}	7.83×10^{-4}
	Plant-wide components	11	2.0×10^{-3}	9.43×10^{-4}	2.77×10^{-4}
	Turbine building	31	1.6×10^{-3}	4.50×10^{-4}	3.47×10^{-4}
Transient fires caused by welding and cutting	Control/Aux/Reactor building	6	9.7×10^{-3}	2.46×10^{-3}	4.44×10^{-3}
	Plant-wide components	24	4.9×10^{-3}	3.65×10^{-3}	4.79×10^{-3}
	Turbine building	36	8.2×10^{-3}	7.55×10^{-3}	4.67×10^{-3}

이불 화재와 임시 화재의 화재발생빈도는 감소하였으나, 임시 점화원에 의한 화재발생빈도는 증가하였음을 확인할 수 있다. 또한 NUREG-2169에서 마지막으로 제시된 임시 점화원들의 화재발생빈도는 NUREG/CR-6850에서 처음 제시된 화재발생빈도보다 감소하였다.

2.2 가중치 계수

점화원 가중치 계수(Ignition source weighting factor) $W_{IS,J,L}$ 은 지역 L의 구역 J에 존재하는 점화원(IS)의 비율이다. $W_{IS,J,L}$ 은 발전소 경계 정의 및 구역화 단계에서 확인된 모든 구역과 그 구역에서 확인된 모든 점화원에 대하여 평가된다. 각 점화원의 bin은 셀 수 있는 항목, 임시 점화원 및 큰 시스템의 세 가지 범주로 분류 될 수 있으며 그 중 임시 점화원의 가중치 계수는 NUREG/CR-6850의 Task 6에 다음과 같이 제시되어 있다.

임시 점화원 가중치를 평가하는 대상은 모든 임시화재와 관련된 bin인 3, 5, 6, 7, 11, 24, 25, 31, 36 및 37에 적용되며, 각 bin에 대해 별도의 상대적 순위 분석을 수행하여야 한다. NUREG/CR-6850에 제시된 임시 가연물 또는 활동과 관련된 화재 점화 가능성의 가장 중요한 세 가지 영향 요인은 구역의 점유 수준(Occupancy level), 가연물의 저장(Storage of flammable materials), 유지보수 활동의 유형 및 빈도(Type and frequency of maintenance activities)로 구분하였다. 이후 FAQ 12-0064에 의하여 고온 작업의 유형 및 빈도(Type and frequency of hot work type activities)를 영향 요인에 추가하고 유지보수 활동을 기타 일반 유지보수 활동(Other general maintenance activities)으로 수정하였으며 등급 수준을 조정하였다. 네 가지 영향 요인 각각에 등급 수준을 할당하는 것은 발전소별 레이아웃과 관행을 반영하는 주관적인 판단에 따른다. 할당에 사용하는 등급 수준은 다음과 같다.

1. 없음(0)
2. 매우 낮음(0.3)
3. 낮음(1)
4. 중간(3)
5. 높음(10)

특정 경우에 한하여 극도로 낮음(0.1)과 매우 높음(50) 등급도 적용할 수 있다. 일반적인 임시 화재(Bins 3, 7, 25 및 37)의 경우 일반 유지보수, 점유 및 저장 영향 요인을 모두 평가해야하며, 용접 및 절단으로 인한 임시 화재(Bins 6, 24 및 36)의 경우 고온 작업 영향 요인만 평가한다. 용접 및 절단으로 인한 케이블 화재(Bins 5, 11 및 31)의 경우 다른 용접 및 절단 사례와 마찬가지로 고온 작업 영향 요인만 평가한다. 출입이 엄격히 관리되는 구역에는 “매우 낮음” 등급을 지정할 수 있다.

2.3 열 방출률과 임시 화재 성장률

NUREG/CR-6850에서 제시한 권장 열 방출률(heat release

Table 3. HRR Distribution

Ignition Source	HRR kW		Gamma distribution	
	75th	98th	α	β
NUREG/CR-6850	142	317	1.8	57.4
NUREG-2233 Generic	41.6	278	0.271	141
NUREG-2233 TCCL	24.6	143	0.314	67.3

rate, HRR)과 임시 점화원에 대한 추가 화재 실험을 통하여 NUREG-2233에서 제시한 일반 임시 화재(generic transient fire) 및 임시 가연물 통제 지역(transient combustible control location, TCCL)에 대한 열 방출률 및 분포를 Table 3으로 제시하였다.

NUREG-2233에 제시된 일반 임시 화재의 열 방출률은 NUREG/CR-6850에 제시된 값보다 낮아 임시 화재의 영향이 감소하였음을 확인할 수 있다.

임시 화재 성장률(transient fire growth rate)은 임시 점화원의 최대 방출 에너지(total energy release, TER)에 의하여 결정된다. NUREG-2233의 표 5-4에 따르면 최대 열 방출률이 278 kW인 98th 화재의 최대 방출 에너지는 123 MJ이며 이로 인한 화재 성장기는 322 s, 안정기 39.5 s, 감쇄기는 1311 s로 계산된다.

2.4 영향 영역

NUREG/CR-6850에 제시된 열 방출률 분포의 중요한 결과 중 하나는 케이블이나 기기를 손상시킬 수 있는 화재의 주변으로 넓은 영역이 존재한다는 것이다. 이 영역을 영향 영역(Zone of influence, ZOI)이라고 한다. 화재 PSA의 표적은 98th 화재에 대해 영향 영역 내에 있는지 여부를 확인하여 선별된다. 열가소성(thermoplastic, TP) 및 열경화성(thermoset, TS) 케이블에 대한 영향 영역을 사용하여 98th 화재 크기인 317 kW에 대한 영향을 설명할 수 있다. NUREG-2232에 의하면 권장 화재 지속시간이 없는 경우, 일반적인 화재 PSA는 Table 3에 있는 317 kW의 일정한 화재 크기와 전기 케이블의 임계 손상 기준을 사용하여 영향 영역을 계산한다. 영향 영역은 화재 직경에 따라 달라지기 때문에 화재는 불이 타는 강도의 무차원 척도인 화재 Froude 수를 갖는 것으로 가정한다. 이 가정에서 317 kW 화재는 0.61 m (2 ft) 직경과 Heskestad 상관관계에 따라 1.7 m (5.6 ft)의 화염 높이를 갖는다. 수직(화재 플룸) 및 수평(열 복사) 영향 영역은 플룸 온도 및 열 유속에 대한 FDT[®] (fire dynamics tools) 상관관계를 사용하여 결정된다. 98th 화재의 경우 수직 영향 영역은 열가소성 케이블의 경우 2.9 m (9.5 ft)이고 열경화성 케이블의 경우 2.2 m (7.1 ft)이다.

복사 영향 영역은 열가소성의 경우 화재 가장자리에서 0.86 m (2.8 ft), 열경화성의 경우 0.45 m (1.5 ft)이다. 구석 화재의 경우 플룸 영향 영역은 열가소성의 경우 최대 5.0

Table 4. 98th ZOI for TS Cable

Distribution	Horizontal (m)	Vertical (m)	Vertical in a corner (m)
NUREG/CR-6850	0.45	2.16	3.78
NUREG-2233 generic	0.11	1.47	2.43
NUREG-2233 TCCL	0.05	0.80	1.40

m (16.5 ft), 열경화성의 경우 3.8 m (12.4 ft)까지 확장된다. 원자력 발전소의 케이블 트레이는 높이가 1.8~2.1 m (6~7 ft)인 전기 캐비닛보다 0.3~0.6 m (1~2 ft) 위에 위치하는 것이 일반적이므로 2.2 m (7.3 ft) 이상의 수직 영향 영역은 98th 화재 크기가 많은 케이블 트레이를 선별 제거 할 수 없을 정도로 충분히 크다는 것을 의미한다.

원전에서 일반적으로 사용되는 케이블인 열경화성 케이블에 대한 NUREG/CR-6850과 NUREG-2233의 영향 영역을 Table 4에 나타내었다.

NUREG/CR-6850에 비하여 NUREG-2233에 제시된 ZOI가 모두 낮음을 확인할 수 있으며, 일반적인 케이블 트레이의 최저 높이 2.2 m를 고려할 때 임시 점화원 화재의 풀름은 케이블에 영향을 미치지 못하는 것으로 판단된다. 따라서 일반적인 높이의 케이블에 대한 임시 점화원 시나리오는 대부분 선별제거가 가능하다.

3. 임시 점화원 리스크 평가

3.1 기존 방법론에 따른 리스크 평가

기존 화재 PSA 방법론인 EPRI TR-105928에 따라 임시 점화원의 리스크를 평가하였다. 리스크 평가는 참조원전의 스위치기어실을 대상 화재구역으로 하였으며, 임시 점화원의 비교 평가를 위하여 고정 점화원의 평가는 제외하였다. 분석에 적용한 임시 점화원에 의한 화재 시나리오는 다음과 같다.

- 스위치기어실 화재구역의 임시 화재는 임시 점화원, 용접에 의한 케이블 화재, 용접 및 절단에 의한 임시 화재의 세 가지 점화원으로 유발되며, 각 점화원의 화재발생빈도는 EPRI TR-105928에서 제시한 화재발생빈도를 발전소의 총 화재구역(약 300개로 가정)으로 나누어 할당함.
- 운전원이 5 min 내에 임시 점화원에 의한 화재 진압에 실패하면 화재가 화재구역 전체로 번져 구역의 기기 및 케이블을 모두 손상시킴.
- 구역의 조건부 노심손상확률은 노심손상빈도 계산을 위하여 0.0001로 가정함.
- 이웃 화재구역과의 전파 경로가 존재하고 운전원이 15 min 내에 화재 진압에 실패하며 구역간 화재방호설비가 실패 할 경우, 이웃 화재구역으로 화재가 번져 이웃구역의 기기 및 케이블을 모두 손상시킬 수 있음

나 단일 화재구역만의 평가를 위하여 이웃 화재구역의 전파 시나리오는 제외함.

- 평가 대상인 스위치기어실 화재구역에 자동화재진압설비는 설치되어 있지 않음
 - 케이블 화재의 심각도는 0.21, 임시 점화원 및 임시 화재의 심각도는 0.5를 적용함
 - EPRI NSAC-179L⁽¹⁰⁾에 따라 케이블 화재의 5 min 내 수동진압실패 확률은 0.61, 임시 점화원 및 임시 화재의 5 min 내 수동진압실패 확률은 0.69를 적용함
- 위의 가정을 반영하여 각 임시 점화원의 화재발생빈도를 가정하면 다음과 같다.

- 임시 점화원: $1.3 \times 10^{-3} \div 300 = 4.33 \times 10^{-6}/(\text{년})$
- 절단에 의한 케이블 화재: $5.1 \times 10^{-3} \div 300 = 2.04 \times 10^{-5}/(\text{년})$
- 용접 및 절단에 의한 임시 화재: $3.1 \times 10^{-2} \div 300 = 1.03 \times 10^{-4}/(\text{년})$

각 점화원에서 유발된 화재로 인한 리스크는 각 점화원의 화재발생빈도와 점화원의 화재로 인한 영향을 PSA 모델에 반영하여 평가한 결과인 조건부 노심손상확률의 곱으로 평가하며, 이 과정에 각 화재구역에 설치된 자동화재진압설비의 실패확률과 점화원 고유의 심각도 및 운전원에 의한 수동화재진압실패확률을 반영한다. 이는 아래와 같이 나타낼 수 있다.

$$CDF = F \times A \times SF \times M_s \times CCDP \quad (1)$$

여기서 CDF는 점화원에 의한 노심손상빈도, F는 점화원의 화재발생빈도, A는 자동화재진압설비 실패확률, SF는 점화원의 심각도, M_s 는 점화원에 의한 화재를 운전원이 5 min 내에 수동으로 진압하는 데에 실패 할 확률, CCDP는 점화원에 의하여 유발된 화재로 인한 조건부 노심손상확률이다.

위의 식 (1)을 이용하여 스위치기어실 화재구역의 각 임시 점화원이 유발하는 화재에 의한 노심손상빈도를 계산하면 아래와 같다.

- 임시 점화원: $1.49 \times 10^{-10}/(\text{년})$
- 절단에 의한 케이블 화재: $2.61 \times 10^{-10}/(\text{년})$
- 용접 및 절단에 의한 임시 화재: $3.55 \times 10^{-09}/(\text{년})$

스위치기어실 화재구역에서 기존 방법론에 따른 임시 점화원 화재에 의한 노심손상빈도는 $3.96 \times 10^{-09}/(\text{년})$ 으로 계산되었다.

3.2 신규 방법론에 따른 리스크 평가

NUREG/CR-6850에 따라 임시 점화원의 리스크를 평가하였다. 점화원의 종류에 따라 심각도와 수동진압실패 확률값이 정해져 있던 기존 방법론과 달리, 신규 방법론에서는 점화원과 표적과의 거리에 따라 표적을 손상시킬 수 있는 최대 열방출률이 결정되고, 심각도와 손상시간, 진압실패확률을 결정하게 된다. 즉 점화원의 종류 뿐 아니라 점화원에서 시작된 화재에 영향을 받는 표적과의 시나리오에

Figure 1. Transient fire section drawing.

따라 다른 값을 가지게 됨을 의미한다.

신규 방법론의 임시 점화원 분석을 수행하기 위해서는 각 화재구역의 가중치 계수를 평가하여 화재구역의 임시 점화원의 화재발생빈도를 배분하는 작업이 필요하다. 그러나 이번 연구에서는 스위치기어실 단일 화재구역의 평가만 수행하였으므로 점화원 계수에 따른 화재발생빈도 평가는 수행하지 않고, 신규 화재발생빈도 중 제어/보조/원자로 건물에 해당하는 빈도를 약 200개의 화재구역으로 나누어 아래와 같이 할당하였다.

- (Bin 5) 용접 및 절단에 의한 케이블 화재:

$$7.83 \times 10^{-4} \div 200 = 3.92 \times 10^{-6}(/\text{년})$$

- (Bin 6) 용접 및 절단에 의한 임시 화재:

$$4.44 \times 10^{-3} \div 200 = 2.22 \times 10^{-5}(/\text{년})$$

- (Bin 7) 임시 점화원:

$$3.33 \times 10^{-3} \div 200 = 1.67 \times 10^{-5}(/\text{년})$$

위의 화재발생빈도를 적용하기 위하여 스위치기어실 화재구역을 Figure 1과 같이 17개의 임시점화원 분할구역(transient fire section)으로 분할하고 각 분할구역의 면적에 따라 빈도를 할당하였다. 이 중 용접 및 절단에 의한 케이블 화재는 케이블 직접 손상에 의하여 유발되므로 분할구역의 면적에 따른 할당을 고려하지 않고 전체 구역에 대하여 적용하였다. FAQ 14-0007에 따르면 각 분할구역에 영향요인을 반영하여 빈도를 할당 할 수 있으나 영향 요인 반영을 위한 자료가 부족하여 동등하게 분배하고, 표적 캐비닛의 실제 크기와 배치 등을 이용하여 분석을 수행하였다.

스위치기어실 화재구역에서 각 분할구역의 면적에 따른

Table 5. Fire Scenario of TS

Scenario	Area (m ²)	Wg	Shortest target distance (m)	Fire condition
TS#1	6.02	1.80E-02	2.02	Plume
TS#2	10.78	3.23E-02	0.84	Radiant
TS#3	8.85	2.65E-02	0.00	Radiant
TS#4	4.66	1.40E-02	0.00	Radiant
TS#5	5.42	1.62E-02	0.00	Radiant
TS#6	9.95	2.98E-02	0.00	Radiant
TS#7	9.34	2.80E-02	0.00	Radiant
TS#8	13.29	3.98E-02	0.00	Radiant
TS#9	3.56	1.07E-02	0.00	Radiant
TS#10	4.04	1.21E-02	0.00	Radiant
TS#11	24.25	7.27E-02	0.00	Radiant
TS#12	9.60	2.88E-02	0.00	Radiant
TS#13	5.16	1.55E-02	0.00	Radiant
TS#14	20.95	6.28E-02	0.00	Radiant
TS#15	9.87	2.96E-02	0.00	Radiant
TS#16	14.42	4.32E-02	0.00	Radiant
TS#17	69.31	2.08E-01	2.02	Plume

가중치를 계산하여 Table 5에 제시하였으며, 각 분할구역에서 가장 가까운 표적까지의 거리와 화재 유형을 함께 나타내었다. 분할구역의 임시 화재가 표적 캐비닛과 인접하여 발생하는 경우 복사열에 의하여 표적을 손상시킬 수 있으

Table 6. Damage Criteria for Cables

Cable type	Radiant heating criteria	Temperature criteria
Thermoplastic	6 kW/m ²	205 °C
Thermoset	11 kW/m ²	330 °C

Table 7. Probability Distribution for Rate of Fires Suppressed Per Unit Time, λ

Suppression curve	Number of events in curve	Total duration (m)	Rate of suppressed (λ)			
			Mean	5th	50th	95th
Welding fires	52	484	0.107	0.084	0.107	0.133
Transients fires	43	386	0.111	0.085	0.111	0.141

며, 복사열이 캐비닛에 영향을 미치지 못하는 경우에도 열 기동에 의한 케이블 손상을 유발할 수 있다.

NUREG-1805⁽¹¹⁾에 제시된 McCaffrey, Quintiere, and Harkleroad 상관식을 이용하여 표적 케이블 손상에 필요한 열방출률을 계산하였다. NUREG/CR-6850에 제시되어 있는 케이블의 손상 조건을 Table 6에 나타내었다.

각 분할구역 임시점화원 화재의 진압실패 확률은 화재 탐지설비의 이용률도 및 신뢰도, 표적의 손상시간 그리고 탐지시간에 영향을 받는다. 화재탐지설비의 이용률도도는 1%, 신뢰도는 95%로 가정하였으며 용접이나 절단에 의한 임시화재나 케이블 화재의 경우 NUREG/CR-6850 Appendix P의 Table P-1에 의하여 작업자에 의하여 바로 탐지가 가능한 것으로 보았다. CFAST 화재모델링 결과 임시화재는 3.1 min에 탐지되었으며, NUREG-2169에 제시된 용접 화재와 임시 화재의 진압률을 Table 7에 나타내었다.

위의 값들을 이용하여 각 분할구역의 노심손상빈도를 계산한 결과는 Table 8과 같다. Table 8의 Critical Q는 표적에 손상을 유발하기 위하여 필요한 열 방출률로 화재 유형과 표적과의 거리에 따라 달라진다. 점화원과 표적과의 거리가 가까울수록 Critical Q의 값이 낮아지며, 이에 따라 심각도와 진압실패 확률은 증가하게 된다. 플룸에 의한 손상인 경우, 임시 점화원의 98th 열 방출률인 278 kW와 비교하여 Critical Q가 높으면 영향이 없는 것으로 분석하였다. 표적의 손상에 필요한 열방출률 계산 결과와 Table 3의 NUREG-2233 임시 점화원(generic transient fire) 화재 감마 분포를 이용하여 심각도 SF를 계산하였으며, 임시 점화원(generic transient fire) 화재의 성장과 감쇄가 NUREG-2233에서 제시한바와 동일하다는 가정 하에 표적의 손상시간을 계산하였다. 화재로 인한 조건부 노심손상확률은 기존 방법론에 의한 평가와 동일하게 0.0001의 가정값을 사용하였다.

용접이나 절단에 의한 케이블 화재는 표적 케이블에 직접 손상을 일으켜 화재발생빈도 전체가 노심손상으로 이어

Table 8. Transient Section Fire Scenarios

Scenario	Critical Q (kW)	SF	Time to dam (m)	Pns	λ	CDF (/yr)
TS#1	279	0.00	5.34	0.68	0	0
TS#2	11	0.45	1.06	0.94	5.37E-07	5.37E-11
TS#3	11	0.45	1.06	0.94	4.41E-07	4.41E-11
TS#4	11	0.45	1.06	0.94	2.32E-07	2.32E-11
TS#5	11	0.45	1.06	0.94	2.70E-07	2.70E-11
TS#6	11	0.45	1.06	0.94	4.95E-07	4.95E-11
TS#7	11	0.45	1.06	0.94	4.65E-07	4.65E-11
TS#8	11	0.45	1.06	0.94	6.62E-07	6.62E-11
TS#9	11	0.45	1.06	0.94	1.77E-07	1.77E-11
TS#10	11	0.45	1.06	0.94	2.01E-07	2.01E-11
TS#11	11	0.45	1.06	0.94	1.21E-06	1.21E-10
TS#12	11	0.45	1.06	0.94	4.78E-07	4.78E-11
TS#13	11	0.45	1.06	0.94	2.57E-07	2.57E-11
TS#14	11	0.45	1.06	0.94	1.04E-06	1.04E-10
TS#15	11	0.45	1.06	0.94	4.91E-07	4.91E-11
TS#16	11	0.45	1.06	0.94	7.18E-07	7.18E-11
TS#17	279	0.00	5.34	0.68	0	0

지며 그로 인한 노심손상빈도는 3.92×10^{-10} (/년)으로 계산되었다.

스위치기어실 화재구역에서 신규 방법론에 따른 임시 점화원 화재에 의한 노심손상빈도는 1.16×10^{-09} (/년)으로 계산되었다. 이는 기존 방법론에 의한 결과인 3.96×10^{-09} (/년)에 비하여 70.7% 감소한 결과를 나타낸다.

3.2.1 화재 모델링에 의한 임시 점화원 영향 평가

신규 방법론인 NUREG-2233에 제시된 임시 점화원의 특성을 이용하여 임시 점화원에 의한 표적의 손상여부를 확인하기 위하여 CFAST를 이용한 화재 모델링을 수행하였다. 모델링을 위한 임시 화재의 입력은 일반 임시점화원에 해당하는 NUREG-2233 표 5-4의 98% 값을 사용하였다.

표적과 점화원 사이의 거리에 따라 심각도, 손상시간 및 진압실패 확률이 달라지며 점화원의 복사열이 표적의 직접 손상을 일으키는 범위 이내의 거리에서는 동일한 값을 유지하나, 거리가 멀어질수록 심각도와 진압실패 확률은 낮아지고 손상시간은 증가한다. 이번 분석에서는 손상 경계 내의 범위에서는 심각도 및 진압실패 확률은 동일한 것으로 가정하여 분석하였으며, 모델링 결과를 분석하여 손상 범위를 파악하는 것을 목적으로 하였다.

CFAST 화재 모델링은 여러 분할구역 중 대표 구역으로 TS#1과 TS#2 구역에 대하여 수행하였다. FDT® 분석결과 임시 점화원에 의한 화재가 표적에 영향이 없는 것으로 분석된 분할구역인 TS#1과 TS#17 중 TS#1을 표본으로 CFAST 화재 모델링에 의한 임시 점화원의 영향을 평가하였으며, 분할구역이 표적과 인접한 TS#2~TS#16 분할구역의 경우

Figure 2. CFAST modeling simulation of transient fire in SWGR room.

Figure 3. Surface temperature of targets.

TS#2 구역을 표본으로 임시 점화원의 위치에 따라 표적에 영향을 미치는 범위를 확인하였다.

1) 분할구역 TS#1의 임시 점화원 영향 분석

임시 점화원 분할구역 TS#1은 표적과의 거리가 떨어져 있어 복사에 의한 직접적인 손상보다는 화염에 의한 손상이나 플룸에 의한 케이블 손상을 고려하였으며, FDT® 분석 결과 표적에 영향이 없는 것으로 분석되어 최종 노심손상 빈도 계산에서 제외되었다. 따라서 CFAST 모델링을 이용하여 TS#1 분할구역에서 13.8 kV 스위치기어 캐비닛과 가장 가까운 임시 화재의 위치를 설정하고 캐비닛의 온도와 열유속을 측정하여 표적의 손상 영향을 검토하였으며, 추가적으로 캐비닛 상부에 위치한 케이블 트레이에 대한 영향도 함께 검토하였다.

표적의 손상여부 판단을 위한 기준으로는 Table 6의 열경화성 케이블 손상 조건을 사용하였다. 스위치기어실의 CFAST 모델링은 Figure 2와 같이 수행되었다.

스위치기어실 TS#1에서의 임시 점화원 화재를 모델링한 결과는 Figure 3 및 Figure 4와 같다. 모델링 결과에 따르면 분할구역 TS#1 중 스위치기어 캐비닛과 가장 가까운 곳

Figure 4. Heat flux of targets.

에서 발생한 임시 점화원 화재는 캐비닛의 온도를 25.5 °C, 케이블 트레이의 온도를 24.2 °C까지 증가시켜, 표적의 손상온도 조건인 330 °C에 미치지 못하는 것으로 나타났다. 또 다른 손상조건인 열유속은 캐비닛과 케이블 트레이 모두 손상조건인 11 kW/m²에 미치지 못하여 열유속에 의한 손상 역시 불가능한 것을 확인하였다.

이와 같은 결과로 임시 점화원 분할구역 TS#1에서 발생 가능한 임시 화재는 스위치기어실의 표적에 영향을 미치지 못하며, 이 분할구역에 존재하는 임시 점화원 모두를 제외시킬 수 있음을 재확인 하였다.

2) 분할구역 TS#2의 임시 점화원 영향 분석

임시 점화원 분할구역 TS#2는 표적 캐비닛인 스위치기어와 인접하여 분할구역 내에서 임시 점화원에 의한 화재가 발생할 경우 화염의 복사에 의한 직접 손상을 고려하였다. NUREG-2233에 제시된 98th 임시 점화원 화재의 수직 ZOI인 1.78 m를 고려하였을 때 캐비닛 상부 케이블 트레이는 상대적으로 높은 4.1 m에 위치하여 임시 점화원의 영향 분석에서 제외하였다. 스위치기어 캐비닛은 철제 외함으로 둘러싸여 있어 화염 복사에 의한 직접적인 영향으로 내부의 케이블이 손상될 가능성은 낮으나, 보수적인 분석을 위하여 복사열에 의한 직접 손상을 가정하였다.

FDT®를 이용한 계산결과 98th 임시 점화원 화염 복사가 표적 케이블에 영향을 미칠 수 있는 거리는 약 0.84 m로 표적과 0.84 m 이상 떨어져 발생하는 임시 화재의 화염 복사는 케이블을 손상시키지 못한다. 임시 점화원 분할구역 #TS2의 구역 내에서 표적인 스위치기어와 가장 먼 곳의 거리는 약 1.1 m이며, CFAST 분석을 통하여 이 지점에서 임시 화재가 발생한 것으로 가정하고 표적의 거리를 감소시켜 표적 케이블의 손상 유무를 평가하였다. 보다 정확한 분석을 위해서는 측정하고자 하는 표적의 위치를 고정하고 화원의 위치를 변경하여 분석을 수행하여야 하나, 시간에 따른 화재의 성장과 감쇄에 따른 분석의 특성상 화염의 위치를 고정하고 표적의 거리를 달리하여 분석하였다.

Figure 5. Heat flux within 0.3~1.1 m.

Figure 6. Heat flux within 0.440~0.445 m.

CFAST를 이용한 분석은 두 단계로 수행하였다. 첫 번째 분석에서는 화염과 표적과의 거리를 1.1 m, 0.7 m, 0.5 m, 0.4 m, 0.35 m, 0.3 m로 점차 줄여가며 화염의 영향 거리를 대략적으로 확인하고, 두 번째 분석에서는 첫 번째 분석에서 확인한 화재 영향 범위의 경계인 0.4~0.5 m의 범위에 대하여 CFAST에서 확인 가능한 최대 분석 간격인 0.001 m 간격으로 0.440~0.445 m까지 분석을 수행하였다. 두 단계의 모델링 결과를 Figure 5 및 Figure 6으로 나타내었다.

CFAST 모델링 분석결과에 의하면 임시 화재의 화염 복사는 표적과 화원의 거리가 약 0.441 m의 범위 안에 있을 경우에만 영향을 미친다. 이 범위는 FDT® 분석에 의한 범위인 0.84 m보다 좁으며 분할구역의 상부에 케이블이 존재하지 않아 화염 복사의 영향만을 고려할 경우, 표적에 인접한 임시 점화원 분할구역을 설정할 때 표적에서부터 약 0.45 m로 설정할 수 있음을 의미한다. 이는 임시 점화원의 영향을 모든 구역에서 동등하게 평가한 기존 분석 방법론에 비하여 현저히 낮은 임시 점화원에 의한 노심손상빈도를 나타낼 뿐 아니라, FDT® 분석 결과에 비해서도 낮은 결과를 얻을 수 있어 임시 점화원의 과평가에 의한 전체 리스크 평가 결과의 보수성을 줄일 수 있다.

4. 결 론

본 연구에서는 신규 화재 PSA 분석 방법론을 적용하여 임시 점화원의 리스크 영향을 평가하였다. 기존 EPRI-105928 방법론과 비교하여 신규 방법론의 주요한 차이점은 다음과 같다.

1) 지역별 화재발생빈도 구분: 기존 방법론의 임시 점화원 화재발생빈도는 발전소 전역(plant-wide)에 대하여 제시되었으나, 신규 방법론은 제어/보조/원자로 건물(control/aux/reactor building), 터빈건물(turbine building), 발전소 전역(plant-wide)의 세 가지 지역으로 나누어 빈도를 제시함. 임시 화재의 경우 제어/보조/원자로 건물의 화재발생빈도가 낮게 할당되고 발전소 전역에 높은 화재발생빈도가 할당되어 기존 방법론에 비하여 주요 화재구역이 위치한 건물들에서 임시 화재에 의한 영향이 낮게 평가될 수 있음

2) 화재구역별 가중치 적용: 동일 지역 내에서도 화재구역의 점유 수준, 가연물의 저장량, 구역 내 유지보수 활동의 유형 및 빈도의 상대적 순위에 따라 화재발생빈도를 차등 분배함. 따라서 주요기기가 존재하지 않아 조건부 노심손상확률이 높지 않으나, 작업량이 많은 기계공작실과 같은 구역의 임시 점화원 화재발생빈도가 높아지고 주요 구역의 빈도는 낮아질 수 있음

3) 심각도 및 진압실패확률: 동일한 심각도 및 진압실패확률을 적용한 기존 방법론과 달리 신규 방법론에서는 표적과의 거리 및 위치에 따라 확률분포의 값으로 심각도와 진압실패확률이 결정됨. 기존 방법론에 따른 화재 분석에서 일반적으로 임시 화재의 심각도는 0.05, 5 min 내 진압실패확률로 0.572의 값을 적용한 것과 비교하면 복사열에 의한 직접 손상의 경우 심각도와 진압실패확률이 증가하는 영향을 확인함. 이는 시나리오 빈도를 증가시킴

위의 주요한 차이점을 적용할 경우 신규 방법론의 임시 점화원 화재 리스크는 기존 방법론을 적용하는 경우에 비하여 더욱 현실적인 평가가 가능하며 이는 발전소 화재 위험도 및 확률론적 안전성평가 측면의 화재 취약점 분석에도 보다 실제적인 평가가 가능할 것이라 예상된다.

후 기

본 연구는 원자력안전위원회의 재원과 한국원자력안전재단의 지원을 받아 수행한 원자력안전 연구사업의 연구결과입니다(No. 1805002).

References

1. U.S.NRC, "PRA Procedures Guide", NUREG/CR-2300 (1983).
2. EPRI and U.S.NRC, "Fire PRA Implementation Guide", EPRI TR-105928, Final Report (1995).
3. EPRI and U.S.NRC, "Fire Probabilistic Risk Assessment

- Methods Enhancements”, NUREG/CR-6850 and EPRI 1011989, Final Report (2005).
4. EPRI and U.S.NRC, “Nuclear Power Plant Fire Ignition Frequency and Non-Suppression Probability Estimation Using the Updated Fire Events Database”, NUREG-2169 and EPRI 3002002936, United States Fire Event Experience Through 2009 (2015).
 5. EPRI and U.S.NRC, “Heat Release Rate and Fire Characteristics of Fuels Representative of Typical Transient Fire Events in Nuclear Power Plants”, NUREG-2232 and EPRI 3002015997 (2020).
 6. EPRI and U.S.NRC, “Methodology for Modeling Transient Fires in Nuclear Power Plant Fire Probabilistic Risk Assessment”, NUREG-2233 and EPRI 3002018231, Technical Report (2020).
 7. S. H. Lee, M. H. Kim, S. K. Lee, J. E. Lee and M. C. Lee, “Analysis of Combustion and Smoke Characteristics According to the Aging of Class 1E Cables in Nuclear Power Plants”, Fire Science and Engineering, Vol. 35, No. 1, pp. 20-27 (2021). <https://doi.org/10.7731/KIFSE.970c894b>.
 8. H. S. Han, J. O. Lee, C. H. Hwang, J. S. Kim and S. K. Lee, “Assessment of the Habitability for a Cabinet Fire in the Main Control Room of Nuclear Power Plant using Sensitivity Analysis”, Fire Science and Engineering, Vol. 31, No. 2, pp. 52-60 (2017). <https://doi.org/10.7731/KIFSE.2017.31.2.052>.
 9. EPRI and U.S.NRC, “Fire Probabilistic Risk Assessment Methods Enhancements, NUREG/CR-6850 Supplement 1 and EPRI 1019259, Technical Report (2010).
 10. EPRI, “Automatic and Manual Suppression Reliability Data for Nuclear Power Plant Fire Risk Analyses”, NSAC-179L, Final Report (1994).
 11. U.S.NRC, “Fire Dynamics Tools (FDT[®]): Quantitative Fire Hazard Analysis Methods for the U.S. Nuclear Regulatory Commission Fire Protection Inspection Program”, NUREG-1805, Final Report (2004).