

화재 모델링의 불확실도 평가방안

박종석 · 이창주

한국원자력안전기술원

Uncertainty Evaluation of Fire Modeling Analysis Results

PARK, JongSeuk · LEE, ChangJu

Korea Institute of Nuclear Safety

요 약

NFPA-805 불확실도 분석 요건에 따른 경수형 원전 스위치기어실 모터제어반의 화재시나리오에 대한 입력변수 불확실도 평가를 수행하였고 이를 통해 화재모델링의 불확실도 평가방안을 제시하였다. 화재모델링은 FDS5를, 불확실도분석은 MOSAIQUE를 사용하였고 Wilks 방법에 근거하여 93회의 latin hypercupe 샘플링을 수행하였다. 스위치기어실 케이블의 최소 평균손상시간은 212초로 예측되어 화재발생시 스위치기어실의 화재진압은 약 4분 이내에 이루어져야 하는 것으로 확인되었다.

1. 서 론

1975년 3월에 발생한 Browns Ferry 원전의 화재사고에 대한 후속조치로써 1990년대부터 미국은 기존의 일반적인 화재방호 개념에서 원자로 안전정지능력 확보 위주의 화재방호에 초점을 두게 되며 리스크정보활용 및 성능기반 규제 개념을 화재방호에 적용하게 된다. 2001년 미국 화재방호협회(NFPA)는 경수로형 원자력발전소의 성능기반 화재방호기준인 NFPA-805(NFPA, 2001)를 개발하였다. 원전 화재방호의 목적은 화재발생 확률과 화재피해를 최소화하는 데 있으며 이를 위해 심층방어개념을 적용하고 있다.

가동원전의 성능기반 화재방호프로그램에서 주요한 부분인 화재지역의 상세분석은 화재로 인한 대상물의 손상여부 및 화재지역의 취약점을 파악하기 위해 수행된다.

NFPA 805의 성능기반 화재방호에서는 화재모델링과 불확실도 분석을 요구하고 있다. 화재모델링은 해당 화재지역 및 대상물에 대해 화재로 인한 손상여부를 파악하기 위해 수행되며 불확실도 분석은 화재방호프로그램에서 성능기준의 만족여부와 대상물의 손상시간에 대한 확률분포를 구하기 위해 수행된다.

본 연구에서는 화재모델링 코드인 FDS5와 입력변수 샘플링은 Latin Hypercube Sampling 방법을 사용하여 NUREG-1934 (US NRC, 2010)에서 제시된 스위치기어실 모터제어반 화재시나리오에 대한 불확실도를 분석하였다. 이러한 불확실도 분석을 통해

NFPA 805의 불확실도 분석요건에 따른 불확실도 평가방안을 제시하고자 한다.

2. 스위치기어실에 대한 FDS5 모델링

2.1 해석조건 및 가정사항

원자력발전소 스위치기어실은 원자로건물에 위치하고 있으며 다중의 모터제어반과 스위치기어 캐비닛들이 설치되어 있다. 스위치기어실은 콘크리트 건물이며 천정의 높이가 각각 3 m, 9 m인 이중 천정 구조를 가지고 있다. 캐비닛과 케이블 트레이는 철판으로 구성되어 있고 폴리에틸렌으로 절연된 직경 약 1.5 cm의 케이블들이 케이블 트레이에 교차 결합되어 설치되어 있다.

화재는 모터제어반 캐비닛 상부에서 발생한다고 가정하며 화재강도는 화재 발생 12분 후에 702 kW의 최대값을 갖는 t^2 곡선을 따라 성장하며 8분 동안 일정한 상태를 유지한 다음 12분 뒤에 직선으로 감소하여 소멸된다. 캐비닛의 화재강도 최고치 702 kW는 열방출율의 98%tile 값이다.

환기구는 $0.5 \times 0.5 \text{ m}^2$ 의 단면적을 가지고 있으며 캐비닛 높이는 2.4 m이다. 화재는 캐비닛 내부에서 발생하며, 연기, 열, 화염은 캐비닛 상부의 환기구를 통해 배출된다고 가정한다. 설비들의 물성치는 표 1에 기술되어 있으며 케이블의 내부 온도가 320 °C에 도달하거나, 열속이 11 kW/m^2 에 도달했을 때, 케이블은 손상된다고 가정한다(US NRC, 2005). 화재 시 공기조화계통은 정상 작동하고 있으며 체적유량 $0.735 \text{ m}^3/\text{s}$ 의 공기가 환기구를 통해 공급·배출되고 방화문은 닫혀있다. 스위치기어실의 크기는 $17.1 \times 8.5 \times 9.0 \text{ (m}^3\text{)}$ 이다.

FDS 5.5.2를 이용하여 스위치기어실을 모델링하였다. 격자크기는 평균 0.2 m이며 낮은 천정부분은 40x40x15, 높은 천정부분은 40x40x45의 격자갯수를 가지고 있다. 그림 1은 스위치기어실에 대한 FDS5의 모델링을 보여주고 있다. 케이블트레이는 낮은 천장영역에 2개 높은 천장영역에 1개씩 모델링하였으며 그림 1에서 검은색으로 나타나 있다.

화재로 인한 케이블의 손상을 극대화시키기 위해 화원은 케이블 트레이 바로 밑에 위치하고 있으며 크기는 0.18 m^2 ($0.6 \text{ m} \times 0.3 \text{ m}$)이다.

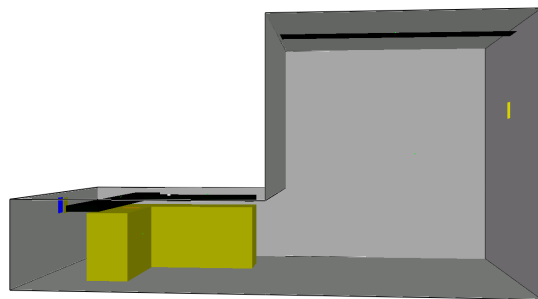


그림 1. 스위치기어실에 대한 FDS5 모델링

2.2 불확실도 분석

복잡한 화재현상을 수치적으로 단순화시켜 구한 해석결과와 실제 현상과 차이를 가지게 되며 이는 화재모델이 자체적으로 가지고 있는 오차이다. 통계분포나 일반 참고자료로부터 구한 입력변수값을 사용한 해석결과도 불확실도를 포함하게 된다. 본 연구에서는 NFPA 805의 불확실도평가요건에 따라 입력변수의 불확실도를 분석하였다.

표 1. 스위치기어실의 물성치

재료	열전도성, k (W/m/K)	밀도, ρ (kg/m ³)	비열, c (kJ/kg/K)	출처
콘크리트	1.6	2400	0.75	NUREG-1805
강철	54	7850	0.465	NUREG-1805
케이블	0.235	0.235	1.39	NUREG/CR-6850

표 2. 불확실도 분석대상 입력변수

입력변수	평균값	불확실도 분포	출처
HRR	702 kW	Gamma	Table G-1 of NUREG/CR-6850, Vol. 2
Emissivity	0.95	Uniform	입의 가정
Air flow rate	0.735 m ³ /s	Uniform	입의 가정

화재모델 입력변수의 불확실도 분석대상으로 선정된 입력변수는 OECD/NEA 화재실증 실험 프로젝트인 PRISME 실험결과 분석(Walter Klein-Heßling, Martin Höhne, 2009)에서 제시된 열방출율(heat release rate, HRR), 복사율(emissivity), 그리고 환기율이며 표 2는 이들 입력변수들의 분포특성을 기술하고 있다.

불확실도분석을 위한 샘플링은 LHS(Latin Hypercube Sampling)방법을 사용하였으며 Wilks 방법 (Mohamad, 2007)에 따라 95%신뢰도에서 95%확율을 나타낼 수 있는 93회의 계산을 MOSAIQUE 코드 (Lim & Han, 2009)를 사용하여 수행하였다.

FDS5는 표면온도 예측에 통상 25%의 오차 (US NRC, 2007)를 가지고 있으므로 본 연구에서는 표면온도가 240 °C에 이르면 대상물이 손상되는 것으로 판정하였다.

2.3 불확실도분석 결과

그림 1은 평균값을 사용한 경우에서 각 케이블트레이의 케이블 온도를 보여주고 있다.트레이 A와 B에 설치된 케이블들의 온도는 손상온도를 초과하고 있으나 트레이 C의 케이블의 온도는 손상온도보다 낮게 예측되고 있다.

93회 샘플링 계산결과 트레이 A 케이블의 평균 손상시간은 212초이며 트레이 B 케이블의 평균 손상시간은 853초로 분석되었다. 그림 2와 3은 93회 샘플링 계산

결과에 따라 트레이 A와 B의 케이블 손상시간에 대한 히스토그램을 보여주고 있다. 그림 2에서 보는바와 같이 195초와 230초 사이에서 트레이 A의 케이블들이 손상되며 그림 3에서 보는 바와 같이 트레이 B의 케이블은 800초와 925초 사이에서 손상되고 있다.

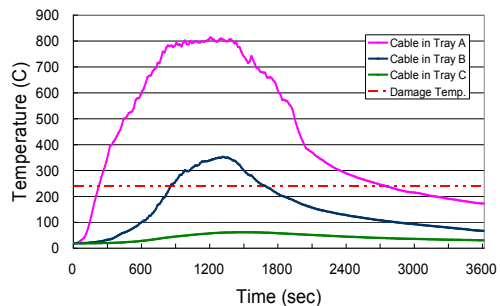


그림 2. 각 케이블 트레이의 케이블 온도

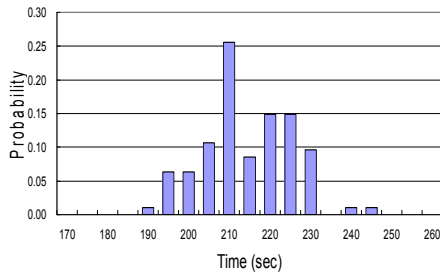


그림 3. 트레이 A의 케이블 손상시간

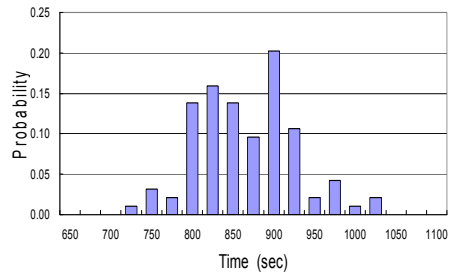


그림 4. 트레이 B의 케이블 손상시간

따라서 본 화재시나리오에서 케이블의 건전성을 확보하기 위해서는 약 4분 이내에 화재가 진압되어야 한다.

3. 결 론

NFPA-805 불확실도분석요건에 따라 FDS5를 사용하여 스위치기어실에 대한 화재모델링 입력변수의 불확실도를 평가하였다. 본 연구에서 적용한 불확실도 평가방법을 통해 대상물 손상시간에 대한 확률분포를 구함으로써 화재방호프로그램에서 스위치기어실의 화재진압 시간을 구할 수 있었다.

감사의 글

본 연구는 한국연구재단의 2011년도 중장기연구과제의 일환으로 수행되었다.

참고문헌

1. NFPA-805, "Performance-Based Standard for Fire Protection for Light Water Reactor Electric Generating Plants", NFPA, 2001 Ed.
2. H.G. Lim, S.H. Han, (2009) "MOSAIQUE Users Guide," KAERI-ISA-Memo-2009-MOSAIQUE-01, KAERI .
3. P. Mohamad (2007), "Integrated Methodology for Thermal-Hydraulics Uncertainty Analysis (IMTHUA)", pp. 88-89, Dissertation of Ph. D., Univ. of Maryland.
4. US NRC, (2005), "Fire PRA Methodology for Nuclear Power Facilities," NUREG/CR-6980, Vol. 2, Table H-3, pp. H-6.
5. US NRC, (2007), "Verification & Validation of Selected Fire Models for Nuclear Power Plant Applications," NUREG-1824 Vol. 7, pp.6-29.
6. Walter Klein-Heßling, Martin Höhne, (2009), "Uncertainty and Sensitivity Study on PRISME Pool Fire Experiment PRS-SI-D1 inside the DIVA Facility," Presented OECD PRISME PRG 8th Meeting.
7. US NRC, (2010), "Nuclear Power Plant Fire Modeling Application Guide (NPP FIRE MAG)", NUREG-1934, App. D.