

원자력발전소의 스위치기어실 화재모델링 입력모수 불확실성 분석

강대일* · 박종석** · 한상훈*

*:한국원자력연구원, **: 한국원자력안전기술원

Uncertainty Analysis of Fire Modeling Input Parameters for Switchgear Room of Nuclear Power Plants Dae Il Kang* · Jong Seuk Park** · Sang Hoon Han*

*:Korea Atomic Energy Research Institute, **:Korea Institute of Nuclear Safety

요 약

본 논문에서는 원자력발전소의 스위치기어실 화재로 인한 케이블 손상시간과 케이블 온도를 평가하기 위해 화재모델링 입력모수 불확실성 분석을 수행하였다. 화재모델링은 FDS 5.5를 사용하였으며 입력모수 샘플링은 Wilks 식에 따라 93회를 수행하였다. 단순히 입력모수 평균 값을 사용한 화재모델링 분석결과와는 화재모델링 불확실성 분석결과보다, 케이블 손상시간은 최대 1.6배 늦게, 케이블 온도는 최대 0.45배 낮게 평가될 수 있는 것으로 나타났다.

1. 서론

원자력발전소는 결정론적 방법에 따라 안전성분석이 수행되어 왔었지만 최근에는 국내, 외적으로 리스크 정보활용/성능기반 방법(risk-informed/performance-based approach)이 안전성분석에 허용되고 있다. 이전에 결정론적 안전성분석 방법에서는 보수적인 방법과 데이터만의 사용이 허용되었지만 리스크정보활용/성능기반 방법에서는 보수적이지만 실제적인(realistic) 방법과 데이터 사용이 허용된다.

화재모델링은 화재방호 요건에서 요구되는 안전기기의 이격거리 유지, 다중오동작 분석(multiple spurious operation), 화재 확률론적 안전성평가에서 화재 점화원에 대한 안전 기기의 영향을 평가시 유용하게 사용할 수 있는 도구이다. 원자력발전소에 대한 리스크정보활용/성능기반 화재방호 요건이 언급되어 있는 NFPA 805(NFPA 2003)와 화재 확률론적 안전성평가(Probabilistic Safety Assessment: PSA) 기술요건이 기술되어 있는 ASME

PRA Standard(ASME 2009)에서는 불확실성을 분석하라고 요구한다. NFPA 805에서는 화재모델링에서 가장 많이 예상되는 화재시나리오(maximum expected fire scenario: MEFS)와 제한화재 시나리오(limiting fire scenario: LFS) 2가지를 고려하라고 언급하고 있다. NFPA 805에서 LFS는 MEFS에서 입력모수 값의 제한치를 변동시키면서 분석 가능하다고 언급하고 있다.

본 논문에서는 NUREG-1934(J.Dreisbach 외 2010)에 기술된 화재시나리오에 대해 FDS 5.5(Kevin 외 2010)를 이용하여 케이블 손상시간과 케이블 온도를 평가하였다. 본 연구에서는 NUREG-1934에서 제시된 시나리오를 MEFS로 가정하고 LFS는 FDS 입력모수 불확실성 분석을 통해 평가하였다.

2. 화재모델링 불확실성분석 방법론

불확실성(uncertainty)은 추정치가 합당한가에 대한 척도로서 추정된 값이 얼마나 실제와 관련있는지 또는 나타내는지를 말한다(Mahammad Modarres 2006). 이러한 불확실성은 추정대상의 상태나 과정 그리고 현상 등에서 기인한 것으로 정량적 표현은 대부분 확률로 표시한다.

화재모델링에서 불확실성은 크게 화재 시물레이션시 예측한 값과 실험결과 값과의 차이에서 오는 불확실성으로 분류할 수 있다(J.Dreisbach 외 2010, Mahammad Modarres, 2006). 화재시물레이션 불확실성에서는 화재 시물레이션시 사용된 입력모수 값에서의 불확실성, 시물레이션 코드내에 사용된 유체역학과 화재역학 등의 모델과 수치해석 등에 기인한 불확실성이 있다. 실험결과와 불확실성에는 실험조건과 분석대상 조건과의 차이로 인한 불확실성, 실험 현상자체의 불확실성, 그리고 실험시 사용된 계측기 등의 불확실성이 있다. 화재모델링 도구를 이용하여 화재를 시물레이션하여 분석할 경우에는 이러한 불확실성 모두를 고려하여야 하지만 현실적으로는 용이하지가 않다. 본 연구에서는 화재 시물레이션시 사용된 입력모수 불확실성만을 다룬다.

시물레이션 수행에 대한 불확실성 전과분석 방법에는 모멘트방법(moment method)과 몬테칼로방법(Monte Carlo sampling)이 있다(Mahammad Modarres, 2006). 모멘트방법은 모델링 추정치 함수를 테일러 급수(Taylor series)로 전개하여 모델링 추정치의 평균과 분산을 구하는 방법이고, 몬테칼로방법은 입력모수를 랜덤하게 샘플링하여 모델링 추정치의 평균과 분산을 구하는 방법이다. 모멘트방법은 분석대상 물리적 모델이 간단하게 표현될 때 사용될 수 있기 때문에 화재모델링에서는 몬테칼로 방법이 주로 사용된다. 최근에 많이 사용되는 몬테칼로 방법으로는 분포에 따라 샘플링을 일정하게 하는 라틴하이퍼큐브 샘플링(Latin Hypercube Sampling: LHS) 방법이 있다. 일반적으로 몬테칼로 방법을 사용하면 수 천번의 샘플링을 실시해야 하기 때문에 컴퓨터 시물레이션시간이 오래 소요되는 FDS를 사용하는 경우 불확실성 분석이 불가능할 수 있다. 이러한 경우 Wilks의 허용구간

(tolerance interval) 식(Mahammad Modarres, 2006)을 이용하면 100회이내의 시뮬레이션으로 의미있는 불확실성 분석결과를 얻을 수 있다. 본 연구에서는 Wilks의 허용구간식에서 제시된 93회의 샘플링을 수행하여 LHS 방법으로 불확실성 분석을 수행하였다. LHS를 이용한 샘플링과 FDS 프로그램 구동은 한국원자력연구원에서 개발한 MOSAIQUE(임호곤, 한상훈, 2010)을 사용하였다.

3. 스위치기어실 화재

3.1 설계사양과 화재시나리오

원자력발전소의 스위치기어실에는 일반적으로 동력구동기기의 전원을 공급하는 차단기가 캐비닛 형태로 있다. 분석대상 4.16KV 스위치기어실은 직사각형 크기 27.5m, 19.5m, 6.6m로 3개의 캐비닛이 있고 각 캐비닛위로 3개의 케이블 트레이가 있다(J.Dreisbach 외 2010). 그 외 주요 설계사양은 다음과 같다:

- 건물구조
 - 격실 바닥, 천정, 벽은 콘크리트 두께 0.5m
 - Cabinet과 cable tray 1.5mm 강철
 - 격실 온도 20℃, 대기압
- 케이블: PE/PVC 피복 제어케이블
- 화재감지기: 2개의 연기감지기(4.9%/m, UL 등급)
- 환기: 3개의 강제식 공급/배출 환기구가 있으며 격실은 닫혀있음

NUREG-1934(J.Dreisbach 외 2010)에서 제시된 화재 시나리오는 중간 캐비닛내의 케이블에서 화재가 발화되며 화재가 시작된 캐비닛의 상부에는 공기 환기구가 있다. 평가대상은 화재가 발화된 캐비닛 상부에 있는 케이블 손상시간과 케이블 온도이다. NUREG-1934에서는 이러한 화재의 경우 화재성장을 초고속(Ultrafast) 성장으로 보고 평가하라고 제시한다. NUREG-1934에 제시된 열방출율은 12분내에 최대치 464 kW/m² 가 되기까지 초고속으로 성장하여 8분동안 지속되며 이후 12분내에 선형적으로 감소된다. 그 외 NUREG-1934에서 제시된 입력모수 값들은 다음과 같다:

- 콘크리트: 밀도-2400kg/m³, 열전도계수-1.6 W/m/K, 비열-0.75kJ/kg/k
- 케이블: 밀도-1380kg/m³, 열전도계수- 0.192 W/m/K, 비열-1.289kJ/kg/k
- 화원 연료: 열방출율- 176.28KW/464KW, 연소열- 24,000KJ/Kg, Co yield- 0.038, Soot yield-0.1
- 환기: 공조계통 정상작동이며 volume 유속은 0.472m³/s

3.2 최대 예상 시나리오 분석

FDS 5.5(Kevin 외 2010)를 이용하여 모델링하였으며 그리드 크기는 참고문헌에서 제시한대로 0.2m를 하였다. 케이블 온도 예측에 대해서는 THIEF(Thermally Induced-Failure Model) 모델(Kevin 외 2010)을 사용하였고 열방출율은 램프(ramp) 입력으로 처리하였다. THIEF 모델은 실제 케이블 실험결과를 바탕으로 만들어진 케이블 손상 예측 모델이기에 FDS의 다른 명령어를 사용하는 경우보다 케이블 손상을 실제적으로 예측할 수 있다. 그림 1에 FDS로 모델링한 smokeview 화면이 나타나 있다.

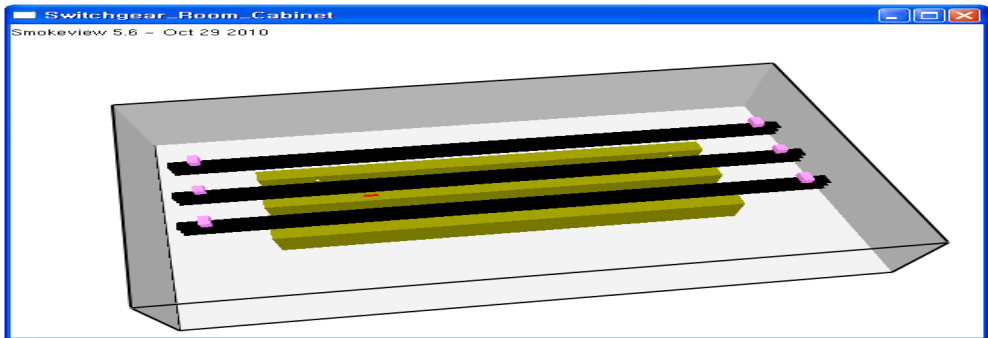


그림 1. Smokeview로 나타낸 4.16KV 스위치기어실 기하학적 구조

최대 예상 시나리오는 2가지를 수행하였다. 하나는 화재모델링 결과에 영향을 크게 주는 열방출율에 대해 평균 값을 사용한 경우이고, 다른 경우는 주어진 열방출율에 대해 98퍼센타일을 사용한 경우인데 그 이유는 다음과 같다:

- 평균 최대 예상 시나리오 : 일반적인 화재모델링에서 사용하는 값 대부분은 평균
- 98퍼센타일 최대 예상 시나리오 : 원자력발전소의 화재 PSA(Najafi 외, 2005)와 다중 오동작 분석서 NEI-001(NEI, 2010)에서 보수적으로 98퍼센타일 값을 사용하여 분석하라고 요구

그림 1의 화원 상부에 있는 트레이내의 케이블이 손상되는 시간과 온도를 평가하였다. 케이블 손상온도는 NUREG-1934에서 제시하는 대로 200℃라고 가정하였다. 케이블 손상 시간과 최대온도는 화원상부에 있는 트레이의 32개지점을 선정하여 평가하여 가장 높게 나타나는 케이블 온도를 선정하였다. 그림 2와 3에는 각각 열방출율 평균 값, 176.28,과 98퍼센타일, 464, 사용할 경우의 케이블 온도가 나타나 있다. 분석결과는 다음과 같다:

- 평균 열방출율 (176.28) 최대 예상 시나리오: 200℃ 도달시간 754초, 최대온도 330.9℃
- 98퍼센타일 열방출율 (464) 최대 예상 시나리오: 200℃ 도달시간 506초, 최대온도 592.9℃

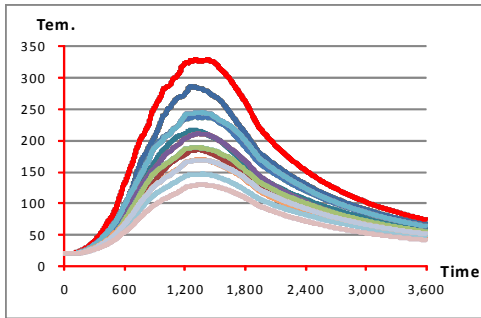


그림 1. 평균 값 사용시 케이블 온도

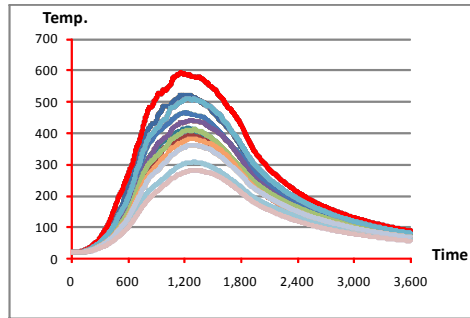


그림 2. 98퍼센타일 값 사용시 케이블 온도

3.3 입력모수 불확실성분석

분석대상 물질에 대한 성분이 상세히 제시되어 있지않아 입력모수들에 대한 분포 및 관련 모수들을 참고문헌(Incropera 외 2008; J.Dreisbach 외 2010; Najafi 외, 2005; SFPE, 2008; Tom Elicson, 2008)을 검토하여 설정하였다. 입력모수들의 온도에 따른 데이터가 상세히 나오지 않는 경우는 기본적으로 정균분포를 가정하고 표준편차는 평균의 20%(Tom Elicson, 2008)라고 가정하였다. 표 1에 본 연구에서 사용된 입력모수의 분포 및 관련 데이터들이 나타나 있다.

샘플링은 93회씩 2번을 수행하여 분석하였다. 한번은 표 1에 제시된 모든 입력모수들을 샘플링하여 분석하였고, 다른 한번은 열방출율을 98퍼센타일 고정 값으로 하고 다른 입력모수들을 샘플링하여 분석하였다. 그림 3과 4에는 케이블 온도에 대한 불확실성 분석 결과가, 표 2에는 케이블 손상시간과 케이블 온도에 대한 분석결과가 나타나 있다.

3.4 결과와 논의

모든 입력모수들을 샘플링하여 시뮬레이션한 경우 20번의 시뮬레이션에서 케이블 손상이 발생되지 않았다. 이는 케이블 손상확률이 0.778이라는 의미이다. 손상된 케이블 중 케이블 손상시간 범위는 466~1267초로, 손상 평균시간은 771.6초로 나타났다. 평균 열방출율을 사용하는 최대 예상 시나리오 분석 경우는 손상시간이 754초로 불확실성분석에서 얻어진 평균시간보다 짧게 나타났다. 케이블 최고 온도 범위는 45.3~752℃이고 평균 케이블 온도는 310.7℃로 계산되어 최대 예상 시나리오 분석 경우인 330℃보다 다소 낮게 나타났다. 케이블 손상확률 평가측면에서 불확실성 분석 결과는 최대 예상 시나리오 분석경우보다 실제적인 케이블 손상확률 값을 제공한다. 하지만 불확실성분석 결과 중 케이블 최소시간과 케이블 최대온도를 LFS로 보고 이를 원전의 화재방호 의사결정에 사용한다면, 최대 예상 시나리오 분석결과는 케이블 손상시간을 1.6배 늦게, 케이블 최고온도는 0.45배 낮게 평가할 수 있다. 98퍼센타일 열방출율 값을 사용하고 다른 입력모수들은 모두 샘플링하여 분석한 경우 모든 시뮬레이션에서 케이블 손상이 발생되었다. 이는 케이블 손상확률이 1

이라는 의미이다. 케이블 손상시간 범위는 477~577초이며 손상 평균시간은 523.2초이다. 98퍼센타일 열방출을 최대 예상 시나리오 분석 경우는 손상시간이 506초로 불확실성분석에서 얻어진 평균시간보다 짧았다. 케이블 최고 온도 범위는 495.5~632.5℃이고 평균 케이블 온도는 600.3℃로 최대 예상 시나리오 분석 경우인 592.9℃보다 다소 높게 나타났다. 케이블 손상확률 평가측면에서 불확실성 분석 결과와 최대 예상 시나리오 분석 경우와는 차이가 없어 불확실성분석 수행의 잇점이 없다. 불확실성분석 결과 중 케이블 손상 최소 시간과 케이블 최대온도를 LFS로 보고 이를 원전의 화재방호 의사결정에 활용한다면, 열방출율을 제외하고 다른 입력모수들 평균 값만을 사용하여 화재모델링한 분석결과는 케이

표 1. 입력모수 확률 분포

Parameter description	Nominal Value	Parameter uncertainty	Uncertainty distribution	Reference
Concrete Wall				
Specific Heat	0.75 kJ/kg/K	$\sigma = 0.15, \sigma/\mu = 20\%$	Normal	[4, 11]
Conductivity	1.6 W/m/K	$\sigma = 0.32, \sigma/\mu = 20\%$	Normal	[4, 11]
Density	2400 Kg/m ³	$\sigma = 480, \sigma/\mu = 20\%$	Normal	[4, 11]
Cabinet-Steel				
Specific Heat	0.465 kJ/kg/K	$\sigma = 0.2325, \sigma/\mu = 50\%, \text{min}-0.372, \text{max}-1.2$	Normal	[3, 4]
Conductivity	54 W/m/K	$\sigma = 27, \sigma/\mu = 50\%, \text{min}-30, \text{max}-64.8$	Normal	[3, 4]
Density	7850 Kg/m ³	$\sigma = 1570, \sigma/\mu = 20\%$	Normal	[4, 11]
Cable -PE/PVC composition				
Specific Heat	1.289kJ/kg/K	$\sigma = 0.5158, \text{min}-0.81, \text{max}-2.5$	Normal	[4, 10]
Conductivity	0.192 W/m/K	$\sigma = 0.0384, \sigma/\mu = 20\%$	Normal	[4, 11]
Density	1380 Kg/m ³	$\sigma = 276, \sigma/\mu = 20\%$	Normal	[4, 11]
Ventilation				
Supply Fan	(-0.472 m ³ /s)	0, -0.472	Discrete	공학적 판단
Return Fan	0.472 m ³ /s	0, 0.472	Discrete	공학적 판단
Fuel				
HRR	176.28/464 kW	$\alpha = 2.6, \beta = 67.8$	Gamma	[4, 7]
Combustion	24000 kJ/kg	$\alpha = 25.34, \beta = 947.07$	Gamma	[4, 10]
CO Yield	0.038	$\sigma = 0.01887$	Normal	[4, 10]
SOOT Yield	0.1	$\sigma = 0.05102,$	Normal	[4, 10]

표 2. 케이블 손상시간과 케이블 온도 불확실성 분석결과

	시물레이션 시간	케이블손상 시간범위	케이블손상 시간 평균	케이블손상 시간 표준편차	케이블온도 범위	케이블온도 평균	케이블온도 표준편차
모든 변수 샘플링	3,000초	466~1267	771.6	175.6	45.3~752	310.7	132.2
HRR 제외 샘플링	1,500초	477~577	523.2	19.22	495.5~632.5	600.3	20.49

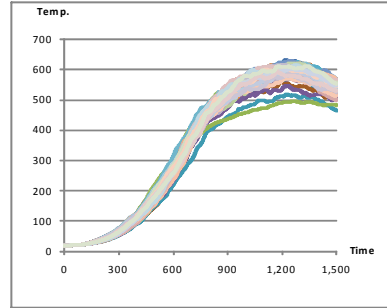
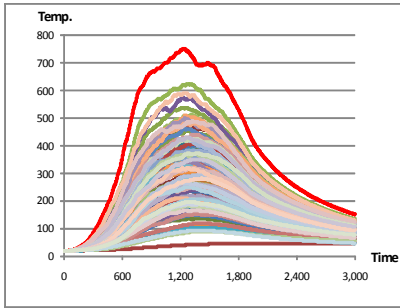


그림 3. 모든 변수 랜덤 샘플링 경우 그림 4. HRR 제외 모든 변수 랜덤 샘플링 경우

블 손상시간은 1.06배 늦게, 케이블 최고온도는 1.06배 낮게 평가할 수 있다.

불확실성분석 결과 본 연구에서 분석대상으로 하는 화재시나리오는 화재가 시작되는 캐비닛의 화원 열방출율에 따라 케이블 손상시간과 케이블 손상온도가 크게 변화됨을 알 수 있다. 화재모델링시 입력모수 평균값만을 사용할 경우에는 낙관적인 분석결과를 얻을 수가 있어 엄격한 불확실성분석 수행이 필요하다고 판단된다. 하지만 열방출 98퍼센타일 값을 사용하고 다른 입력모수는 평균 값을 사용하여 화재모델링 할 경우에는 불확실성분석 결과로 얻어지는 제한치(limiting value)와 큰 차이가 없어 불확실성 분석의 잇점이 크지 않다. 이는 화재 PSA의 선별분석시 98% 열방출율을 화재모델링에서 사용하라는 NUREG/CR-6850(Najafi 외, 2005)의 제안과 일치한다. 화재 PSA의 선별분석에서는 별도의 불확실성 분석이 요구되지 않는다.

4. 결론

본 논문에서는 원자력발전소의 스위치기어실 화재로 인한 케이블 손상시간과 케이블 온도를 평가하기 위해 화재모델링 입력모수 불확실성 분석을 수행하였다. 화재모델링은 FDS 5.5를 사용하였으며 입력모수 샘플링은 Wilks 식에 따라 93회를 수행하였다. 불확실성분석 결과 본 연구에서 분석대상으로 하는 화재시나리오는 화재가 시작되는 캐비닛의 화원 열방출율에 따라 케이블 손상시간과 케이블 손상온도가 크게 변화됨을 알 수 있다. 또한 화재모델링시 입력모수 평균값만을 사용할 경우에는 낙관적인 분석결과를 얻을 수가 있어 엄격한 불확실성분석 수행이 필요하다고 판단된다. 추후 화재모델링과 실험결과의 불확실성 모두를 고려한 연구가 수행될 필요가 있다고 판단된다.

감사의 글

This work was supported by the Nuclear Research & Development Program of the National Research Foundation of Korea grant funded by the Korean Government (MEST).

참고문헌

1. 임호곤, 한상훈(2010), "MOSAIQUE Users Guide (Version 1.3)", KAERI-ISA-MEMO-MOSAIQUE-01, 한국원자력연구원
2. ASME(2009), ASME/ANS RA-Sa-2009, "Standard for Level 1/Large Early Release Frequency Probabilistic Risk Assessment for Nuclear Power Plant Applications"
3. Incropera, DeWitt, Bergman, and Lavine(2008), "Fundamentals of Heat and Mass Transfer", 번역판, 교보문고
4. J.Dreisbach, D.Stroup, F.Joglar, D.Birk, and B.Najafi(2010), "Nuclear Power Plant Fire Modeling Application Guide(NPP FIRE MAG)(Draft)", NUREG-1934, NRC
5. Kevin McGrattan, Randall McDermott, Simo Hostikka, Jason, Floyd (2010), "Fire Dynamics Simulator (Version 5) User's Guide", NIST Special Publication 1019-5, National Institute of Standards and Technology, FDS Version 5.5, Gaithersburg, MD
6. Mahammad Modarres (2006), "Risk Analysis in Engineering: Techniques, Tools, and Trends", CRC Press
7. Najafi, B., Nowlen, S.P., Joglar, F., Funk, D., Anoba, R.C., Kazarians, M., Wyant, F., Kolaczkowski, A., Hannaman, G., Forester, J.(2005), "Fire PRA Methodology for Nuclear Power Facilities", NUREG/CR-6850, USNRC.
8. NEI (2010), NEI-00-01, "Guidance for Post Fire Safe Shutdown Circuit Analysis"
9. NFPA (2003), NFPA 805, "Performance-Based Standard for Fire Protection for Light Water Reactor Electric Generating Plant", National Fire Protection Association, Brainerd, MA, Standard 805, 2001 Edition.
10. SFPE (2008), "SFPE Handbook of Fire Protection Engineering", 4th Edition, National Fire Protection Association
11. Tom Elicson (2008), "Addressing Uncertainty in Detailed Fire Modeling of Nuclear Power Plant Single Compartment Fire Scenarios Using Latin Hypercube Sampling", PSA 2008 Topical Meeting, USA