

원자력발전소의 화재 안전성 평가에서 화재 모델링 불확실성 분석

강대일 · 양준언
한국원자력연구원

Fire Modeling Uncertainty Analysis in Fire Safety Assessment of Nuclear Power Plants

Daeil Kang · Joon-Eon Yang
Korea Atomic Energy Research Institute

요 약

본 논문에서는 원자력발전소의 화재 안전성평가에서 제기되는 화재모델링 불확실성 분석 방법을 검토하고 논의하였다. 원자력발전소의 성능기반 화재 안전성평가에 대해서는 NUREG-1934를, 확률론적 화재 안전성 평가에 대해서는 NUREG/CR-6850를 중심으로 화재 모델링 불확실성 분석 방법을 소개하고 몬테칼로 시뮬레이션을 이용한 불확실성 분석 방법에 대해 논의하였다.

1. 서론

원자력발전소에서 화재모델링은 화재방호 요건에서 요구되는 안전기기의 이격거리 유지, 다중오동작(multiple spurious operation) 분석, 화재 확률론적 안전성평가에서 화재 점화원에 대한 안전 기기들의 영향을 평가시 유용하게 사용할 수 있는 도구이다. 원자력발전소에 대한 성능기반 화재방호 요건이 언급되어 있는 NFPA 805(NFPA 2003)와 화재 확률론적안전성평가(Probabilistic Safety Assessment: PSA) 기술요건이 기술되어 있는 ASME PRA Standard(ASME 2009)는 화재모델링시 불확실성 분석을 수행하라고 언급하고 있다. 성능기반 화재방호에서는 평가대상 기기나 케이블 등이 화재로 인해 손상되느냐 여부를 확인하는 것이 주된 목적이고 PSA에서는 화재로 인한 기기나 케이블 등의 손상여부 뿐만 아니라 손상시간 파악이 주된 목적이다.

본 논문에서는 화재모델링 불확실성분석과 관련해 성능기반 화재 안전성평가에 대해서는 NFPA 805 요건과 NUREG-1934(J.Dreisbach 외 2011)의 모델링 불확실성분석방법을, PSA에 대해서는 ASME PRA Standard 요건과 NUREG/CR-6850(Najafi 외, 2005) 방법을 소개하

고 논의하였다. 또한 몬테칼로 방법을 이용한 화재모델링 불확실성분석을 수행하고 NUREG-1934와 NUREG/CR-6850 방법 결과와 비교하고 논의하였다.

2. NFPA 805와 NUREG-1934 화재모델 불확실성 분석방법

NFPA 805에서는 화재모델링시 최대 예상 화재시나리오(maximum expected fire scenario: MEFS)와 제한화재 시나리오(limiting fire scenario: LFS) 2가지를 고려하라고 언급하고 있다. MFES는 합리적으로 예상되는 최대 심각한 화재로 정의하고 LFS는 화재모델링 입력 변수를 변동시켜 성능기준을 만족시키지 못하는 지점까지 계산하는 시나리오이다. LFS를 고려함으로써 MFES가 평가대상 기기나 케이블의 손상기준치와 합리적인 여유가 있음을 확인한다.

NUREG-1934에서는 결정론적 방법에 입각해 화재모델링 불확실성방법을 제시하고 있다. 표 1에는 NUREG-1934에서 제시된 화재모델링 도구 확인과 검증(Validation & Verification) 연구결과가 제시되어 있다. 표 1에서 δ 은 편향인자(bias factor), $\widetilde{\delta}_M$ 은 모델의 상대적 표준편차를 $\widetilde{\delta}_E$ 은 실험의 상대적 표준오차를 나타낸다. 점화원으로부터 안전관련 기기나 케이블이 손상되느냐 여부를 확률로 표시하게 되는데 NUREG-1934에서는 다음 식의 사용을 제안한다.

$$P(x > x_c) = \frac{1}{2} \operatorname{erfc}\left(\frac{x_c - \mu}{\sigma \sqrt{2}}\right), \operatorname{erfc}(x) = \frac{2}{\sqrt{\pi}} \int_x^{\infty} e^{-t^2} dt \quad (1)$$

위식에서 M: 모델 예측치, $\mu=M/\delta$: 예측되는 실제의 값 평균

$\sigma = \widetilde{\delta}_M(M/\delta)$: 예측되는 실제의 값 표준 편차, x_c : 설정치

예를 들어 케이블 손상 설정치가 11kw/m^2 이고 FDS를 이용한 평가대상 케이블의 최대 전체 열속(total heat flux)이 9kw/m^2 라고 할 경우에 모델링 불확실성을 고려해 케이블 손상확률을 평가하자. 이 경우 $M=9\text{kw/m}^2$ 이고 표의 데이터를 이용하면 $\mu=M/\delta=9/0.85 \cong 10.588\text{kw/m}^2$ 이고 $\sigma = \widetilde{\delta}_M(M/\delta)=0.22*10.588 \cong 2.33\text{kw/m}^2$ 이다. 실제 열속을 q'' 라 하면 q'' 가 설정치를 넘을 확률은 다음과 같다:

$$P(q'' > 11) = \frac{1}{2} \operatorname{erfc}\left(\frac{11 - 10.588}{2.33 \sqrt{2}}\right) \cong 0.4298$$

분석 결과가 설정치를 넘지않은 것으로 나타났지만 모델링 불확실성을 고려하면 실제 열속의 약 43%가 설정치를 넘는 것으로 나타났다.

표 1. 주요 화재모델링 도구의 확인/검증(V&V) 연구결과

Output Quantity	FDT		FIVE		CFAST		FDS		Exp
	δ	$\widetilde{\delta}_M$	δ	$\widetilde{\delta}_M$	δ	$\widetilde{\delta}_M$	δ	$\widetilde{\delta}_M$	$\widetilde{\delta}_E$
HGL Temperature rise	1.44	0.25	1.56	0.32	1.01	0.12	1.03	0.07	0.07
HGL depth	N/A		N/A		1.12	0.14	0.99	0.07	0.07
Ceiling Jet Temp. Rise	N/A		1.84	I.D.	1.01	I.D.	1.04	0.08	0.08
Plume Temp. Rise	0.73	I.D.	0.94	I.D.	1.01	0.28	1.15	I.D.	0.07
Flame Height*	I.D.	I.D.	I.D.	I.D.	I.D.	I.D.	I.D.	I.D.	I.D.
Oxygen Concentration	N/A		N/A		0.9	I.D.	1.08	0.14	0.05
Smoke Concentration	N/A		N/A		2.06	I.D.	2.7	I.D.	0.17
Room Pressure rise	N/A		N/A		0.94	0.37	0.95	0.51	0.2
Target Temp. Rise	N/A		N/A		1.19	0.27	1.02	0.13	0.07
Radiant Heat Flux	2.02	I.D.	1.42	0.55	1.07	0.54	1.1	0.17	0.1
Total Heat Flux	N/A		N/A		1.18	0.47	0.85	0.22	0.1
Wall Temp. Rise	N/A		N/A		1.38	0.48	1.13	0.2	0.07
Wall Heat Flux	N/A		N/A		1.09	0.43	1.04	0.21	0.1

I.D.: 데이터가 충분하지 않음, N/A: 계산 알고리즘이 없음

*: FDS를 제외하고 모두 Heskestad Flame Height Correlation 사용

위의 방법에는 입력변수 불확실성은 고려되지 않았다. NUREG-1934에는 또한 해석적인 방법으로 LES에 대해 분석하는 방법이 기술되어 있다. 통상적으로 화재모델링을 통해 화재안전관련 현안을 해결하는 성능기반 방법에서는 입력변수들의 값을 보수적으로 설정하여 분석을 한다. 다중오동작을 해결하는 사업자문서인 NEI 00-01(NEI, 2010)에서는 화재모델링시 열방출을 값을 98퍼센타일 값을 가지고 분석하고 불확실성분석을 또한 요구한다.

3. ASME PRA Standard와 NUREG/CR-6850 불확실성 분석방법

NUREG/CR-6850은 화재 PSA 절차를 기술한 문서이다. 화재 시나리오 i에 대한 노심손상빈도 식은 다음과 같이 표시된다:

$$CDF_i = \lambda_i * SF_i * NS_i * CCDP_i \quad (2)$$

위식에서

CDF_i : 화재 시나리오 i로 인한 노심손상빈도, λ_i : 화재 시나리오 i의 점화빈도

SF_i : 화재 시나리오 i에 대한 심각도인자, NS_i : 화재 시나리오 i에 대한 진압실패확률

$CCDP_i$: 화재 시나리오 i에 대한 조건부노심손상 확률

화재모델링은 위의 식에서 심각도인자 계산과 진압실패확률 계산에 필요하다. 심각도인자 계산은 화재 모델링을 통해 시나리오상의 기기나 케이블이 손상될 확률을 평가하고, 진압실패확률은 평가대상 기기나 케이블의 손상시간을 파악하여 계산한다.

화재모델링 불확실성과 관련된 ASME PSA standard 요건항목은 FSS-C1과 FSS-D2, FSS-E3이다. FSS-C1에서는 점화원의 강도와 시간측면에서 점화원을 특성화시키라고 요구한다. 잠재적으로 리스크에 기여하는 화재사건을 Category I에서는 한정되도록, Category

II에서는 2가지로, Category III에서는 전체 범위를 포함하라고 요구한다. FSS-E3에서는 화재모델링시 사용된 변수들의 불확실성 범위에 대해 Category I에서는 주요 화재시나리오에 대해 정성적으로 특성화하고, Category II에서는 평균과 통계적 표현을, Category III에서는 모델링된 화재 시나리오에 대해 평균과 통계적 표현을 하라고 요구한다.

PSA는 기본적으로 최적 평가에 기반을 둔 방법이지만 분석시 사용된 데이터의 불확실성을 고려해 화재모델링을 수행해야 한다. NUREG/CR-6850에는 화재모델링 결과에 가장 큰 영향을 주는 열 방출율에 대해 점화원별로 분포형태와 98퍼센타일 값과 75퍼센타일 값, 그리고 15개의 빈(bin)으로 분포를 나누었을때 값들이 제시되어 있다. 가장 이상적인 것은 화재모델링 변수의 불확실성을 고려해 몬테칼로 방법 등을 이용해 입력변수들을 추출해 반복적인 화재모델링을 수행하여야 한다. 하지만 이러한 방법이 어려울 경우에는 NUREG/CR-6850에서 제시한 것처럼 15개의 빈에 대해 화재모델링을 한다. 이 경우 공조설비와 같이 열방출을 이외의 다른 변수가 화재모델링 결과에 중요하다고 판단되는 경우에는 다른 변수를 별도로 고려하여 분석한다. Category II만 충족시킬 경우에는 열방출율 98퍼센타일 값과 75퍼센타일 값을, Category I만 충족시킬 경우에는 열방출율 98퍼센타일 값을 사용해 평가한다.

4. 불확실성 분석 예와 몬테칼로 시뮬레이션

NUREG-1934의 부록 D에 제시된 스위치기어실 모터제어반 화재에 대해 FDS 5.5(Kevin McGrattan 외, 2010)를 이용한 화재모델링에 대한 불확실성 분석 평가 예를 기술하였다. 화재는 모터제어반 캐비닛내에서 발화되며 열방출율 98퍼센타일 값은 702Kw이다. 분석 대상은 케이블 A의 온도이고 이 케이블의 손상 기준치는 NUREG-1934에서 제시한대로 400℃로 가정하였다. 공조설비도 있지만 본 분석에서는 분석의 편의를 위해 공조설비에 대한 불확실성은 고려하지 않았다.

먼저 NUREG-1934에서 제시한 모델링 불확실성을 평가해보자. MEFS 시나리오인 경우 합리적으로 예상되는 최대 심각한 화재 시나리오이기에 열방출율은 98퍼센타일 값을 사용한다. 분석결과 케이블 A의 온도는 543℃로 평가되어 표 1과 식 (1)을 사용하면 케이블 A가 손상될 확률은 0.986이다. NUREG-1934 제시 방법은 열방출율 이외의 다른 입력변수를 고려하지 않았으므로 98퍼센타일 열방출율은 고정시키고 다른 입력변수 값들의 불확실성을 고려해 몬테칼로 시뮬레이션을 수행하였다. 몬테칼로 시뮬레이션은 통계적으로 의미 있는 결과를 얻기위해 100회를 수행하였다. 시뮬레이션 결과 케이블 A의 평균 온도는 555.23℃로 평가되었고 100회 시뮬레이션중 모든 시뮬레이션 결과가 케이블 A를 손상시키므로 실패될 확률은 1로 평가되었다. 열방출이외의 다른 입력변수들의 고려는 케이블 최고온도와 케이블 손상확률을 다소 증가시키는 것을 알 수 있다.

화재 PSA에서는 심각도인자 계산과 진압실패확률 평가에 화재모델링 결과가 사용되므로 화재모델링을 수행하여 케이블 A가 손상되는 시간을 파악하였다. 열방출율을 98퍼센타일 단일 값 사용시 식(2)의 SF*NS는 0.698, 위의 화재모델링 불확실성 평가결과 고려시 0.688, NUREG/CR-6850 부록 E의 표 E3에 따라 15개 빈 사용시 SF*NS는 0.261로 평가되었다.

5. 결론

본 논문에서는 원자력발전소의 화재 안전성평가에서 제기되는 화재모델링 불확실성 분석 방법을 검토하고 논의하였다. 성능기반 화재모델링 불확실성에 대해서는 NUREG-1934에서 언급된 결정론적 방법에 토대를 둔 화재모델링 불확실성 방법을, PSA는 NUREG/CR-6850 불확실성 분석 방법을 소개하였고 이들 방법을 스위치기어실 모터제어반 화재모델링에 적용하였으며 몬테칼로 시뮬레이션 방법을 이용한 불확실성 분석 방법과 비교하였다. 몬테칼로 시뮬레이션을 이용한 불확실성 분석을 보다 더 효과적으로 수행하기 위해서는 메타모델(meta model) 적용에 대한 연구가 필요할 것으로 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. 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.
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. J.Dreisbach, D.Stroup, F.Joglar, D.Birk, and B.Najafi(2011, "Nuclear Power Plant Fire Modeling Application Guide(NPP FIRE MAG)(2nd Draft)", NUREG-1934, NRC
4. Najafi, B., Nowlen, S.P., Joglar, F., Funk, D., Anoba, R.C., Kazarians, M., Wyant, F., Kolaczowski, A., Hannaman, G., Forester, J.(2005), "Fire PRA Methodology for Nuclear Power Facilities", NUREG/CR-6850, USNRC.
5. NEI (2010), NEI-00-01, "Guidance for Post Fire Safe Shutdown Circuit Analysis"
6. 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