C-15

스마트 화재 확률론적안전성평가 민감도분석

강대일 · 진영호
한국원자력연구원

Sensitivity Analysis on Fire Propabilistic Safety Assessment for the SMART

Daeil Kang · Young-Ho Jin
Korea Atomic Energy Research Institute

요 약

본 논문에서는 설계중인 스마트원전에 대한 화재 PSA 방법과 결과 그리고 민감도분석 결과를 기술하였다. 기존 국내 원전 화재 PSA에서는 EPRI의 fire PRA implementation guide에 따라 수행해왔었다. RG 1.189에 따르면 NFPA 805를 채택하는 원전이나 신규원전은 NUREG/CR-6850 방법에 따라 화재 PSA를 수행해야만 한다. 스마트는 설계단계의 원전이기에 화재 PSA 수행위한 충분한 설계정보가 없고 스마트의 선행호기도 없다. 따라서 NUREG/CR-6850 방법을 스마트에 모두 적용할 수 없어 EPRI fire PRA implementation guid와 NUREG/CR-6850 방법을 사용하여 스마트 원전에 대한 화재 PSA를 수행하였다. 화재 PSA 결과에 중요한 영향을 미치는 요인들에 대해 민감도분석을 수행하였다.

1. 서론

새로이 설계되는 원자력발전소는 화재사건에 대한 원자력발전소의 안전성을 확인하기 위하여 결정론적 방법과 확률론적 방법을 사용하여 안전성 평가를 수행해야 한다. 지금까지 국내 원자력발전소의 확률론적 안전성평가는 미국 전력연구원에서 개발된 fire PRA implementation guide[1]에 따라 수행되어 왔었다. 그러나, 미국의 원자력규제기관에서 발간된 RG 1.189 [2]는 성능기반화재방호를 채택하는 기존 원전이나 신규원전의 화재 확률론적안전성평가(Probabilistic Safety Assessment: PSA)는 NUREG/CR-6850 [3]에 따라 수행할 것을 요구하고 있다.

스마트원전은 규제기관의 표준설계인가(Standard design approval)를 받기위해 한국원자력연구원에서 설계중인 중.소형 원자로이다. 일반적으로 원자력발전소의 화재 PSA를 수행하기 위해서는 화재를 유발할 수 있는 화원파악뿐만 아니라 원전의 안전정지에 영향을

미칠 수 있는 케이블 정보와 기기들의 회로정보 등이 파악되어야 한다. 하지만 케이블 정보 및 정확한 화원위치 등의 정보는 원전의 건설단계에서 파악되기에 화재 PSA에 NUREG/CR-6850 방법을 완전히 적용하는 것은 불가능하다. 만일 스마트의 선행호기가 있다면 스마트의 불충분한 설계정보 대용으로 스마트의 선행호기 설계정보를 사용할 수도 있지만 스마트는 전 세계에서 처음으로 설계되는 원전이기에 선행호기가 없다. 따라서 스마트의 화재 PSA에 NUREG/CR-6850과 fire PRA implementation guide를 적용하였다. 이 논문에서는 스마트 화재 PSA의 방법과 결과를 기술하였다. 그리고 민감도분석 결과를 기술하고 논의하였다.

2. 스마트 화재 PSA 방법론

2.1 화재로 인한 노심손상빈도 식

원자력발전소의 화재로 인한 노심손상빈도 (core damage frequency: CDF) 식은 다음처럼 표시될 수 있다:

$$CDF = \sum_{k=1}^{n} \lambda_k SF_k NS_k CCDP_k \qquad (1)$$

λ_k= 화재 시나리오 k 또는 화재구역 k의 화재빈도
SF_k= 화재 시나리오 k의 심각도인자, 화재구역 평가시는 일반적으로 심각도인자는 1
NS_k= 화재 시나리오 k의 진압실패확률, 화재구역 평가시는 일반적으로 진압실패확률은 1
$CCDP_k$ = 화재 시나리오 k 또는 화재구역 k의 조건부 노심손상확률

화재시나리오나 화재구역별 화재빈도 평가는 평가 대상 점화원을 파악하고 파악된 점화원과 동일한 점화원 수를 전체 원전에 대해 계산한 후 일반 점화원 빈도를 이용하여 평가한다. EPRI PRA implementation guide와 NUREG/CR-6850의 점화원 빈도 평가 방법과 빈도에는 커다란 차이가 없다. NUREG/CR-6850에서는 심각도인자를 화재모델링을 통해 평가한다. 하지만 , EPRI PRA implementation guide에서는 점화원 특성에 따라 평가한다. 진압실패 확률 평가는 노심손상까지 운전원에게 주어지는 여유시간을 통해 평가한다. NUREG/CR-6850과 EPRI PRA implementation guide의 진압실패확률 평가 방식은 유사하나 진압실패확률 데이터 값에는 차이가 있다. 화재유발 기기 오동작 확률 추정은 기기들의 회로분석을 통해서만 가능하다. PRA implementation guide에서는 회로분석에 대해 명시적인 언급이 없다. 기존 국내 원전 PSA에서는 화재로 인한 기기들의 오동작 확률로 0.1을 사용해왔다. NUREG/CR-6850에서는 상세회로분석에 대한 방법과 데이터가 기술되어 있는데 상세회로분석을 하지 않고 일반 데이터를 사용할 경우 EPRI PRA implementation

guide에서 제시한 오동작확률보다 높다.

2.2 스마트 화재 PSA 방법

스마트 화재 PSA에서는 점화빈도계산, 화재로 인한 기기 오동작확률 평가, 진압실패확률 평가는 NUREG/CR-6850에 따라 수행하였다. 하지만 기기배치와 케이블 배치 등의 상세 설계정보가 없기 때문에 심각도계산은 PRA implementation guide에 따라 수행하였다. 그 외 스마트 화재 PSA 방법이 기존 국내 원전 화재 PSA 방법과 다른 사항은 다음과 같다:

- 정량적 선별분석과 상세분석시 one top 화재사건 PSA 모델 사용
- 내부사건 PSA에 모델링한 사고후 인적오류 사건 재평가
  - ▷ 주제어실 밖 운전원행위의 수행오류 5배로 평가
  - ▷ 주제어실 운전원행위의 수행오류 2배로 평가
- NUREG/CR-6850에 따른 화재빈도 평가
- NUREG/CR-6850에 따른 정량적 선별분석 평가
- NUREG/CR-6850에 따른 오동작확률 평가
  - ▷ 밸브를 제외한 대기중인 기기 오동작확률:1
  - ▷ 밸브를 제외한 가동중인 기기 오동작확률: 0.39
  - ▷ 전동구동밸브 오동작확률: 0.17
  - ▷ 전동구동밸브이외의 다른 밸브 오동작확률: 0.25
- 주제어실 평가에 화재모델링 사용

3. 스마트 화재 PSA 결과와 민감도 분석

3.1 스마트 화재 PSA 결과

화재 PSA는 분석 대상 화재구역에서의 화재발생이 발전소를 정지시키지 않거나 안전계통에 영향을 주지 않는다면 분석 대상 구역을 제외시키는 정성적 분석부터 시작된다. 스마트의 242개 화재구역을 정성적으로 분석한 결과, 145개 지역이 정량적 분석지역으로 파악이 되었다. 145개의 정량적 분석지역에는 전파구역별 화재시나리오가 725개로 파악되었다. 정량적 선별분석은 보수적인 데이터와 가정을 사용하여 정량화 한다. 예를 들면 선별분석 단계에서는 심각도와 진압실패확률 모두를 1로 평가하고 정량화한다. 선별분석 결과 145개의 화재구역중 23개의 화재구역이 상세분석대상 화재구역으로 파악이 되었다. 선별분석시 사용된 기준치(screening criteria)는 NUREG/CR-6850의 방법에 따라 선별된 화재구역 전체 CDF 합이 내부사건 CDF의 10%보다 작아야 하기에 7.0E-9/yr로 설정하고, 정량화 절단치(cut-off value)는 내부사건 PSA와 일치하도록 1.0E-13/yr를 사용하였다.

스마트의 화재사건 PSA 결과 전체 CDF는 1.035E-6/yr으로 평가되었다. 주제어실이 전체 CDF에 주요 기여인자로 파악되어 전체 CDF의 90.4%로 나타났다. 다음 기여인자는 일반구역 A5GC로 전체 CDF 기여는 3.9%로 나타났다. 전체 CDF 중 주제어실 화재가 CDF에 상대적으로 높게 차지한 이유는 스마트의 내부사건 CDF가 기존 국내 원전 내부사건 CDF보다 낮게 평가되었기 때문인 것으로 판단된다. 원전의 주제어실 이외의 화재는 내부사건 CDF와 밀접히 연관되어 있지만 주제어실 화재는 내부사건과 별도로 피난 시나리오를 고려해야 하기 때문이다.

3.2 스마트 화재 PSA 민감도 분석

주제어실 화재가 전체 화재 CDF에 차지하는 비중이 제일 커서 주제어실 화재 CDF에 영향 미치는 인자들을 파악하고 기존 국내 화재 PSA 수행시 사용하였던 데이터 등도 검토하여 민감도 분석 항목을 다음과 같이 선정하였다:

- 사고후 인적오류 확률
- 화재로 인한 기기 오동작 확률
- 주제어실 피난실패확률과 진압실패확률
- 기존 국내 원전 주제어실 화재 PSA 사용 데이터 이용

사고후 인적오류 확률에 대해서는 표 1처럼 3가지의 경우에 대해 평가하였다. 평가결과 스마트 PSA에서의 사고후 인적오류 확률 변화는 화재로 인한 CDF에 커다란 영향을 주지 않은 것으로 나타났다. 화재로 인한 모든 기기의 오동작 확률은 기존 국내원전처럼 모두 0.1로, 그리고 보수적으로 0.39로 평가된다고 보고 CDF를 정량화 하였다. 정량화 결과 기기 오동작 확률이 0.1로 평가시에는 현재 평가된 CDF보다 0.59배 낮게 평가되었고, 0.39인 경우에는 CDF가 3.11배 증가한 것으로 나타나 스마트의 화재로 인한 CDF는 기기 오동작 확률에 크게 좌우된다는 것을 알 수 있었다. 스마트 주제어실 피난 화재시 피난실패확률은 0.03을 사용하였지만 기존 아나로그형 주제어실 피난실패확률은 0.3을, 디지털형 주제어실은 실패확률 0을 사용하였다. 스마트에서 주제어실 피난시 심각도와 진압실패 사건을 고려한 확률이 시나리오에 따라 0.002와 0.00622를 사용했지만 기존 원전에서는 0.00085를 사용하였다. 기존 국내 아나로그 형 주제어실 원전 화재 PSA와 동일한 데이터를 사용할 경우 스마트의 CDF는 1.314E-6/yr로, 디지털형 주제어실 원전 화재 PSA와 동일한 데이터를 사용할 경우 2.543E-7/yr로 평가되었다. 따라서 피난실패 확률과 심각도, 진압실패 확률이 스마트 CDF에 커다란 영향을 미치는 것을 알 수 있었다. 인적오류 확률, 오동작 확률, 피난확률 등 모두를 기존 국내 원전 화재 PSA처럼 2가지 즉, 아나로그 형 주제어실과 디지털형 주제어실 원전으로 나누어 스마트 CDF를 평가하였다. 기존 국내의 아나로그형 원전처럼 주제어실을 평가할 경우 CDF는 현재 평가된 CDF보다 다소 낮게 평가되었다. 디지털형 원전처럼 평가할 경우에 CDF는 4.095E-8/yr로 평가되었다.

4. 결론

스마트가 설계단계 원전이고 선행호기가 없기 때문에 NUREG/CR-6850과 fire PRA implementation guide을 사용하여 스마트 화재 PSA를 수행하였다. 화재 PSA 수행 결과 주제어실 화재사건이 전체 스마트 화재사건 CDF를 대부분 차지한 것으로 나타났다. 민감도 분석 결과 스마트 화재 PSA는 인적오류에 크게 영향을 받지 않고 기기 오동작 확률과 주제어실 피난실패 확률에 크게 영향을 받는 것으로 나타났다. 스마트 설계가 완성되면 회로분석과 화재모델링 등에 좀 더 노력을 경주할 필요가 있다. 실제적인 설계정보를 토대로 한 화재 PSA 수행 결과는 화재사건에 대한 이상운전 절차서 개발과 화재방호 절차서, 그리고 중대사고 절차서 개발에 입력으로 사용되리라 판단된다.

참고문헌

1. EPRI, “Fire PRA Implementation Guide”, EPRI TR-105928 Dec. 1995
2. Regulatory Guide 1.189(Rev.2), “Fire Protection for Nuclear Power Plants”, 2009
3. EPRI/NRC-RES “Fire PRA Methodology for Nuclear Power Facilities”, EPRI 1011989, NUREG/CR-6850 Final Report, Sep. 2005
4. Daeil Kang et al., “An approach to the construction of a one top fire event PSA model”, Nuclear Engineering and Design 239, 2514-2520,2009

표 1 스마트 화재 PSA 민감도분석 결과

민감도 분석 항목		값 변화	CDF(/yr)
사고후 인적오류 확률	내부사건과 동일	-	1.029E-6/yr
	주제어실 밖 사고후 인적오류	5배	1.03E-6/yr
	모든 사고후 인적오류	5배	1.107E-6/yr
화재유발 기기 오동작 확률	기존 국내원전과 동일	0.1	6.152E-7/yr
	보수적	0.39	3.227E-6/yr
피난실패 확률 / 심각도/ 진압실패확률	기존 국내 아나로그형 주제어실	피난실패확률: 0.3, 심각도와 진압실패 확률곱: 8.5E-4	1.314E-6/yr
	기존 국내 디지털형 주제어실	피난실패확률: 0, 심각도와 진압실패 확률곱: 8.5E-4	2.543E-7/yr
기존 국내 원전 주제어실 평가 데이터와 동일	아나로그 형 주제어실	5배의 주제어실 밖 인적오류, 오동작 확률 0.1, 피난실패확률 0.3	8.944E-7/yr
	디지털 형 주제어실	5배의 주제어실 밖 인적오류, 오동작 확률 0.1, 피난실패확률 0	4.095E-8/yr