

상관관계가 PSA 불확실성 분석 결과에 미치는 영향 연구

The Study on the Effect of Correlation in Uncertainty Analysis of PSA

이용석, 정창현

서울대학교

서울특별시 관악구 신림동 산56-1

요 약

본 연구에서는 상관관계가 PSA 불확실성 분석 결과에 미치는 영향 평가를 수행하였다. 기본사건의 점추정치를 사용한 PSA 정량화는 모든 기본사건 확률값들이 무작위, 독립적 변수라는 가정 하에 수행되는 것이지만, 실제로는 이러한 가정은 맞지 않으며 기본사건 확률값들간에는 상관관계가 존재한다. 본 논문에서는 기본사건 확률값들의 상관관계가 PSA 결과에 미칠 수 있는 사항들에 대하여 서술하였으며, 시범적으로 국내 표준원전 PSA 결과를 사용하여 상관관계가 위험도 및 중요도 계산결과에 미치는 영향에 대한 평가를 수행하였다. 상관관계를 고려하지 않고 불확실성 분석을 수행할 경우 위험도를 낙관적으로 예측할 수도 있음을 나타내었다.

ABSTRACT

The effect of correlation on uncertainty analysis in PSA was studied in this paper. The assumption in risk quantification using point estimate value of basic event probability is all basic event probability values are completely independent. Because there exists correlation in basic event probability values, PSA quantification using point estimate value of basic events can be inadequate. In this paper, PSA result of Korean Standard Nuclear Power Plant was used to evaluate the effect of correlation on risk and importance analysis results. It is shown that performing uncertainty analysis without considering correlation can underestimate risk of nuclear power plant.

1. 서론

RIR, RIA를 도입하기 위해서는 위험도 분석 결과에 대한 불확실성 평가가 필수적이며, 효과적으로 수행될 필요가 있다. 본 연구에서는 PSA 불확실성 분석 시 고

려되어야 할 사항으로서, 데이터들의 상관관계가 PSA 결과에 미치는 영향을 정성적으로 분석하였다. 원전의 PSA 수행 시 일반적으로 사용되는 확률값은 점추정치이다. 점추정치를 사용한 PSA 정량화의 기본적인 가정은 다음과 같다.

- (random), (independent)
- (mean)

그러나, 실제로는 기본사건 확률값 사이에는 상관관계가 있기 때문에 위의 가정은 적절치 않다. 상관관계를 고려하여 불확실성 분석을 수행할 경우, 위험도 계산 결과는 점추정치로 계산한 결과와 다른 값이 나올 수 있다. 따라서 본 논문에서는 기본사건 확률값들의 상관관계가 PSA 결과에 미칠 수 있는 사항들에 대하여 서술하였으며, 시범적으로 국내 표준원전 PSA 결과를 사용하여 상관관계가 위험도 및 중요도 계산결과에 미치는 영향에 대한 평가를 수행하였다. 본 연구에서 고려된 불확실성은 데이터 불확실성이며, 모델링 불확실성, 완결성 불확실성은 고려하지 않았다.

2. PSA 수행시 상관관계 분석 필요성

RIR에 대한 USNRC의 일반 규제지침 1.174^[1]를 보면 위험도 기준 의사결정을 위해서는 다음의 3가지 불확실성을 고려해야 한다고 되어있다.

- 데이터 불확실성
- 모델링 불확실성
- 완결성 불확실성

이들 중 데이터 불확실성은 PSA 수행 시 일반적으로 Monte Carlo 분석을 통하여 평가되며, 모델링 불확실성 및 완결성 불확실성에 대한 평가 방법은 확립된 것이 없다. 그러나, 비교적 방법론이 잘 수립되었다고 볼 수 있는 데이터 불확실성 평가도 상관관계가 고려되어야 하는 한계점이 있다고 규제지침 1.174에 언급되어 있다. 또한, 불확실성은 불확실성의 원인에 따라 aleatory 불확실성과 epistemic 불확실성으로 나뉠 수 있다.

- Aleatory 불확실성 : 근본적인 무작위성(randomness)에 의한 불확실성. 근본적인 불확실성이므로 불확실성 범위를 줄일 수 없음. (예: 주사위 던지기)
- Epistemic 불확실성 : 현상에 대한 이해, 지식 등의 부족으로 인한 불확실성. 현상에 대한 이해가 증가하면 불확실성 범위를 줄일 수 있음. (예: 전문가 판단)

국내 원전 PSA 수행에서 Monte Carlo를 사용한 불확실성 분석 결과에 내재된 기본 가정은 모든 기본사건은 무작위적인 불확실성을 갖고 있으며, 상호독립적이라는 것이다. 이는 곧 PSA 기본사건 확률분포에 포함되어 있는 불확실성은 100%가 aleatory 불확실성이라는 가정이 된다. 그러나, 실제로는 PSA 기본사건확률에 aleatory, epistemic 불확실성이 모두 포함되어 있다고 볼 수 있으므로 기본사건확률의 epistemic 불확실성을 고려하는 것이 필요하다. Aleatory는 개별 기본사건에 대

한 것인 반면, epistemic은 여러 기본사건들의 불확실성에 동시에 영향을 주는 요소이다. 따라서 epistemic 불확실성은 데이터 불확실성 측면에서 상관관계와 연관된다.

참고로, Burn의 논문^[2]에 나온 다음 예를 보면 상관관계를 고려한 경우와 고려하지 않은 경우의 계산결과가 매우 다르게 나옴을 알 수 있다.

$$R = T * MOV_A * MOV_B * X = 1E-3 * 3E-3 * 3E-3 * 0.1 = 9E-10 \text{ 일 때,}$$

- MOV_A 와 MOV_B 의 완전상관관계 고려
- Case 1A : Error Factor 10, 30, 30, 3
- Case 1B : Error Factor 3, 3, 3, 3

		평균값 (/Rx yr)	오차인자
Case 1A	MOV_A, MOV_B 완전독립	$\sim 9E-10$	230
	MOV_A, MOV_B 완전상관	$2E-8$	1330
Case 1B	MOV_A, MOV_B 완전독립	$\sim 9E-10$	10
	MOV_A, MOV_B 완전상관	$1.4E-9$	15

국내 표준원전 PSA 수행결과를 보면 점추정치 결과와 불확실성 분석에 의한 평균값이 거의 같게 나온다. 이는 불확실성 분석이 기본사건 확률값들이 상호독립적이라는 가정하에 수행된 것이기 때문이며, 상관관계를 고려할 경우 평균값은 점추정치보다 높은 값을 가질 수 있다.

3. 상관관계 평가방법

불확실성 분석에 있어서 상관관계를 적용하는 방법은 아직까지 이론적으로 정립되어 있지 않다. 이는 데이터 불확실성 분포에 있어서 aleatory가 차지하는 비율과 epistemic이 차지하는 비율을 명확히 알 수 없기 때문이다. 가장 단순한 방법은 같은 데이터원을 사용하는 기본사건 확률은 완전상관관계로 가정하고 나머지는 완전독립으로 가정하여 불확실성 분석을 수행하는 방법이 있다^[3]. 본 분석에서는 이 방법을 사용하였다.

그러나 실체는 같은 데이터원을 사용하더라도 기기고장확률이 완전상관관계에 있다고 볼 수는 없으며 개별적으로 aleatory 불확실성이 포함되어 있다고 볼 수 있다. 따라서 기본사건 확률값들은 근본적으로 불완전한 상관관계를 가지므로, 데이터 분석 또는 주관적인 판단에 의하여 상관계수들을 정의하여 불확실성 분석을 수행해야 한다. 불완전한 상관관계를 포함하여 평가하기 위한 방법들이 일부 개발되어 있으나^{[4][5]}, 통일된 방법론은 존재하지 않는다.

4. 상관관계 영향과 공통원인고장의 차이

상관관계를 고려한 불확실성 분석은 기본사건 확률값이 통계적으로 상호연관되어 있다는 것으로 공통원인고장과는 다르다.

공통원인고장이란 다수의 기기가 같은 원인에 의하여 동시에 고장나는 사건으로

서, 일반적으로 β 모델 또는 MGL 모델을 사용하여 기본사건 확률값에 조건부 확률 (β, ν, \dots)을 곱한 값으로 PSA에서 개별적으로 모델링된다. 반면 상관관계 영향은 통계적인 특성을 가지는 것으로서, 특정한 기기 유형(예: 전동구동밸브 (MOV))의 모든 기기에 대한 고장확률 분포를 구하기 위하여 동일한 데이터원 사용의 영향을 나타내는 것이다. 이를 고려할 수 있는 방법은 Monte Carlo를 사용한 불확실성 분석 시 같은 확률값을 동시에 생성해주는 것이다. 따라서, 상관관계 영향은 공통원인 고장과 같이 따로 모델링되지 않으며, 점추정치를 사용하여 계산할 경우에는 고려될 수 없다.

5. 상관관계의 원인요소

상관관계의 영향을 평가하기 위해서는 우선 상관관계의 원인이 되는 요소들을 미리 확인할 필요가 있다. 상관관계의 원인이 되는 요소들은 다음과 같이 생각할 수 있다.

● PSA 데이터 원

-> 국내 표준원전의 PSA 데이터는 대부분 EPRI ALWR URD의 데이터가 사용된다. 예를 들어, 표준원전 PSA의 MOV의 요구시 열림실패 고장확률은 $4E-3/\text{demand}$ 로 MOV가 포함된 계통에 관계없이 고장률이 같다. 발전소 고유 데이터베이스를 사용하여 MOV 기본사건이 베이지안 업데이트되어도 1개의 기본사건만 변경되는 것이 아니라 모든 계통의 MOV 기본사건 확률값이 똑같은 값으로 변경된다. 따라서 MOV 기본사건 확률값은 서로 독립적이라고 볼 수 없으며, 불확실성 분석 시 독립적으로 무작위 추출하여 계산하는 것은 적절치 못하다.

● PSA 분석에 참여한 전문가 (전문가 판단이 많이 작용한 경우 특히 중요)

→ 객관적인 데이터가 부족한 경우 전문가의 판단에 의하여 확률값이 설정되는 경우가 많다. 전문가의 판단 또한 PSA 기본사건 확률값에 공통적으로 영향을 미치는 요소로 볼 수 있으므로, 같은 전문가에 의하여 결정된 확률값들 간에는 상관관계가 존재한다.

● 사건 또는 고장발생 원인

→ 사건 또는 고장이 반복적이거나 동일한 원인에 의하여 일어난 경우 고장확률 간에 상관관계가 존재한다고 볼 수 있다. 예를 들어, 동일 원전에서 비슷한 시간에 사건 A와 사건 B가 유사한 원인으로 발생하였다면 A와 B의 상관관계가 고려될 필요가 있다.

● 발전소 고유 특성 (운전, 정비 프로그램 등)

→ 예를 들어, 발전소 고유의 특성인 운전, 정비 프로그램이 전체적인 기기 정비, 수리시간에 영향을 주어 기기 신뢰도, 이용도에 공통적으로 영향을 미치므로 상관관계가 존재한다.

● 공통 환경요소 (온도, 습도 등)

→ 예를 들어, 온도나 습도의 영향을 많이 받는 계측회로의 고장확률 등에도 상

상관관계가 존재한다.

6. PSA 기본사건 데이터에 상관관계가 미치는 영향

1) 초기사건

예를 들어, 국내원전 PSA 초기사건 발생확률은 EPRI 범주를 기준으로 다음과 같이 계산되는 경우가 있다.

$$\text{예) 초기사건 발생빈도} = \text{EPRI-xx} + \text{EPRI-yy} + \dots$$

설계원전 PSA에는 일반자료(generic data)를 사용하여 각 EPRI 범주에 따른 빈도값을 더해 주어 초기사건 빈도를 구한다. 초기사건의 평균값 및 오차인자는 Monte Carlo 계산을 통하여 독립적으로 난수를 발생시켜 구한다. 이 경우 각 EPRI 범주에 해당하는 사건발생확률들은 상호독립적이라는 가정 하에 있다. 그러나, 초기사건들 사이에도 상관관계가 존재할 수 있으며 이 영향이 고려되지 않으면 실제보다 위험도 절대값 또는 오차인자를 낮게 예측할 수 있다.

예를 들면, 아래 표와 같이 불시정지가 발생한 후 며칠 내에 동일 원전에서 불시정지가 발생하는 경우가 종종 있다. 이 경우 두 사건 간에는 상관관계가 존재한다고 볼 수 있다.

정지 날짜	정지 형태	정지 원인 (EPRI category)
11-Nov-91	불시(자동)	EPRI 3-제어봉 작동 고장 및 제어봉 낙하
13-Nov-91	불시(자동)	EPRI 34-주발전기 트립 및 고장

2) 기기고장확률

기기고장확률을 구할 때는 generic data를 사용하거나 다수 원전의 유사 기기 고장자료들을 취합하여 운전년수나 기동횟수 등으로 나누는 방식을 사용한다. 따라서, 동일 유형의 기기고장확률은 동일한 데이터베이스 원에서 사용하게 되며, 이에 의한 상관관계가 존재한다.

그러나, 기기고장확률의 경우에는 같은 계통 내의 기기에 대해서 공통원인고장이 모델링되어 있는 것이 특징이다. Burns의 논문에 따르면 공통원인고장확률의 영향이 상관관계 영향보다 크기 때문에, 같은 계통 내의 기기고장확률의 상관관계 영향은 공통원인고장확률에 이미 보수적으로 포함되어 있다고 볼 수 있다. 그러나, 일반적으로 다른 계통 내의 동일 유형 기기고장확률에 대해서는 공통원인고장이 모델링되어 있지 않으므로 상관관계 영향을 평가할 필요가 있다.

3) 시험 및 보수 이용불능도

시험 및 보수에 의한 이용불능도 역시 상관관계가 존재한다. 예를 들어, HPSI 펌프, LPSI 펌프의 시험 및 보수 이용불능도의 경우 표준원전 PSA에서는 Ocone PRA 자료를 이용하여 같은 평균값 및 오차인자를 적용하였다. 이러한 경우 HPSI 펌프의 시험 및 보수 이용불능도가 변화하는 경우 LPSI 펌프의 시험 및 보수 이용불능도도 변화하는 공통적인 특성을 가질 수 있다.

4) 인적오류

인적오류 확률값들도 상관관계가 존재한다. 국내 표준원전 설계 PSA에서는 인적 오류확률을 모두 THERP 또는 ASEP 핸드북의 자료를 사용하여 적용하였다.

5) 회복조치

예를 들어, 1시간 이내 교류전원 복구조치 기본사건과 5시간 이내 교류전원 복구조치 기본사건은 매우 높은 상관관계가 있으며 불확실성 분석 시 상호독립적으로 가정되어서는 안된다.

7. 상관관계 영향 고려 시 주의점

상관관계를 고려한 불확실성 분석을 제대로 수행할 수 있기 위해서는 다음의 사항들이 고려되어야 한다.

1) 공통원인고장과 중복적으로 사용되지 않도록 한다.

2) PSA 모델링 상세 정도가 일관적이어야 하며, 모듈화된 기본사건이 없어야 한다.

3) 각 기기들의 운전환경, 정비프로그램 등의 차이에 의한 상관관계 감소 영향이 포함되어야 한다.

1), 2), 3)을 고려하지 않을 경우 상관관계가 과다하게 고려되어 매우 보수적인 평가결과가 나올 수 있다.

8. 상관관계가 PSA 분석 결과에 미치는 영향 평가

상관관계가 미치는 영향 정도를 파악하기 위하여 시범적으로 표준 원전 PSA 계산결과인 CDF에 대한 정량적인 불확실성 분석을 수행하였다. 정량분석을 위해서 $1.0E-11$ 절삭치 이상인 1단계 PSA의 최소단절집합 결과들을 활용하였다. 상관관계를 고려한 경우에는 같은 기기유형(예: 전동구동밸브)의 기기고장 기본사건들 간의 확률값은 완전상관되어 있다고 가정하였다. CDF 척도를 기준으로 계산한 결과는 그림 1과 같다.

각 기본사건 확률값이 완전독립인 것으로 가정된 경우, CDF의 점추정치와 평균값이 거의 유사하지만, 상관관계를 고려한 경우 점추정치(약 $7E-6/yr$)보다 평균값(약 $2E-5/yr$)이 더 높게 나타났으며, 오차범위도 훨씬 크게 나타난다. 그러나 같은 유형의 기기 기본사건 확률이라도 이들이 완전상관이라는 가정은 매우 보수적인 것으로, 실제 노심손상빈도 평균값과 오차범위는 완전독립일 때보다는 크고 완전상관일 때보다는 작게 나타날 것이다.

또한, 상관관계가 중요도 척도에 미치는 영향을 알아보기 위해 중요도 불확실성 전산코드를 별도로 개발하였으며 중요도 불확실성을 분석해 보았다. 별도로 전산코드를 개발한 이유는 현재 국내 표준원전 PSA를 위해 전산코드 KIRAP에서는 CDF와 같은 최종적인 위험도 척도에 대한 불확실성 분석은 수행되지만, FV나 RAW

중요도와 같은 중요도 척도에 대한 불확실성 분석은 수행할 수 없기 때문이다.

표준원전 1단계 PSA의 FV 중요도에 대한 불확실성 분석 결과, 앞의 CDF에 대한 결과와는 달리 상관관계가 PSA 기본사건의 FV 중요도값에 미치는 영향은 크지 않은 것으로 나타났다. 그림 2와 3은 전동구동밸브 관련 기본사건들에 대한 중요도 불확실성 분석 결과로서, 완전독립으로 가정했을 경우와 완전상관으로 가정했을 경우의 결과가 크게 차이가 나지 않음을 알 수 있다.

9. 결론

본 연구에서는 불확실성 분석 시 PSA 기본사건 확률값들의 상관관계가 미치는 영향을 알아보기 위한 분석을 수행하였다. 시범 분석을 국내 표준원전 PSA를 사용하여 수행한 결과, 상관관계를 고려하지 않고 위험도 분석을 수행할 경우 위험도가 낙관적으로 예측될 수 있음을 알 수 있었다. 반면 FV 중요도에는 상관관계가 큰 영향을 미치지 않는 것으로 나타났다. 본 분석에서는 완전한 상관관계를 가정하였으나, 실제로는 대부분의 PSA 기본사건 확률값들은 불완전한 상관관계에 있다고 볼 수 있으므로 이에 대한 평가가 이루어질 필요성이 있다.

10. 참고문헌

- [1] USNRC, Regulatory Guide 1.174
- [2] E.T.Burns et al, "Uncertainty : Can Risk Informed Regulation Survive the Challenge", PSA'99
- [3] 한상훈 외, KCUT Manual
- [4] Q. Zhang, "A General Method Dealing with Correlations in Uncertainty Propagation in Fault Trees", Reliability Engineering and System Safety, 26, 1989, 231-247
- [5] Yuichi Watanabe, "Development of the DQFM method to consider the effect of correlation of component failures in seismic PSA of nuclear power plants", Reliability Engineering and System Safety, 79, 2003, 265-279

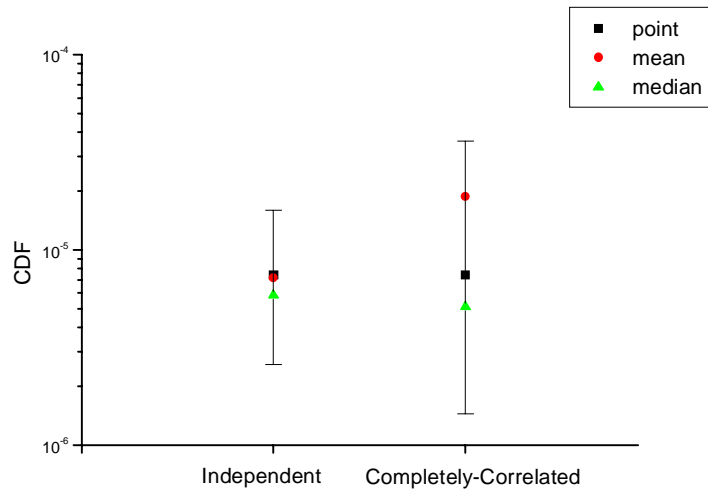


그림 1. 완전독립 또는 완전상관관계 가정 시 노심손상빈도 불확실성 분석 결과

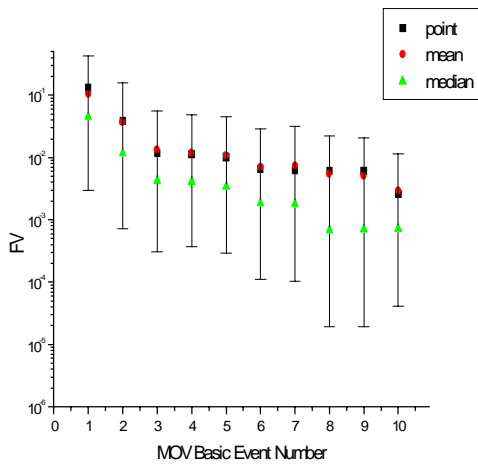


그림 2. 완전독립 가정 시 MOV 기본사건의 FV 중요도 분석 결과

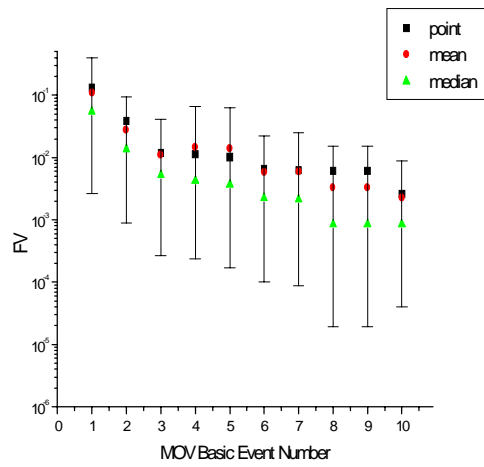


그림 3. 완전상관 가정 시 MOV 기본사건의 FV 중요도 분석 결과