

# 지진 확률론적 리스크 평가를 위한 샘플링기반 접근법

곽 신 영<sup>1</sup>·임 승 현<sup>2†</sup>·박 준 희<sup>3</sup>·최 인 길<sup>4</sup>

<sup>1</sup>한밭대학교 건설환경공학과 조교수, <sup>2</sup>경북대학교 융복합시스템공학부 플랜트시스템전공 조교수,  
<sup>3</sup>한국원자력연구원 기계·구조안전연구부 선임연구원, <sup>4</sup>한국원자력연구원 기계·구조안전연구부 책임연구원

## Sampling-based Approach for Seismic Probabilistic Risk Assessment

Shinyoung Kwag<sup>1</sup>, Seunghyun Eem<sup>2†</sup>, Junhee Park<sup>3</sup> and In-Kil Choi<sup>4</sup>

<sup>1</sup>Assistant Professor, Department of Civil & Environmental Engineering, Hanbat National University, Daejeon, 34158, Korea

<sup>2</sup>Assistant Professor, School of Convergence and Fusion System Engineering, Kyungpook National University, Sangju, 37224, Korea

<sup>3</sup>Senior Researcher, Mechanical and Structural Safety Research Division, Korea Atomic Energy Research Institute, Daejeon, 34057, Korea

<sup>4</sup>Principal Researcher, Mechanical and Structural Safety Research Division, Korea Atomic Energy Research Institute, Daejeon, 34057, Korea

### Abstract

In this study, we develop a sampling-based seismic probabilistic risk assessment (SPRA) quantification technique that can accurately consider a partially dependent condition of component seismic fragility information. Specifically, the SPRA quantification method is proposed by combining the advantages of two representative methodologies: EPRI seismic fragility and JAERI seismic fragility input-based quantification. The most important feature of the proposed method is that it performs a SPRA using a sampling technique by transforming the EPRI seismic fragility input into JAERI seismic fragility input. When the proposed sampling-based approach was applied to an example of simple system and to a SPRA problem of a nuclear power plant, it was observed that the proposed method yields approximately similar system seismic fragility and seismic risk results as those of the exact solution. Therefore, it is believed that the approach proposed in this study can be used as a useful tool for accurately assessing seismic risks, considering the partial seismic dependence among the components; the existing SPRA method cannot handle such partial dependencies.

**Keywords** : system, seismic analysis, seismic performance, risk

### 1. 서론

최근 들어 국외의 2011년 동일본 대지진을 비롯하여 국내에도 2016년 경주지진, 2017년 포항지진 등 원자력발전소 부지 내에 설계기준을 뛰어넘는 지진이 발생하였다. 이러한 설계초과 지진 사건은 이미 설계기준지진으로 설계된 원전 주요 기기에 예측하지 못한 손상을 발생시키고, 더 나아가 플랜트 전체에 파괴를 유발할 수 있게 된다. 이러한 배경 아래 지진의 잠재적인 영향에 대한 원전의 안전성을 확률론적으로 평가할 수 있는 방법이 많은 엔지니어 및 연구자에 의해 수행되어 왔으며, 이를 지진 확률론적 안전성 평가(SPRA : Seismic Probabilistic Risk Assessment)라 한다. 일반적으로 원전에 적용하는 SPRA는 지진으로 인하여 노심에 손상이 일어날 가능성을

확률적으로 예측하고 이를 근거로 원전 전체의 지진에 대한 안전성을 평가한다. 또한, 이 방법을 통하여 지진 시 노심 손상에 큰 영향을 미치는 중요 취약 기기를 탐지하여 원전 안정성 제고에 큰 기여를 하게 된다. 방법론적으로 SPRA는 지진에 대한 안전성을 확률적으로 평가하기 위하여 지진재해도, 지진취약도, 사고 시나리오 분석 및 결과 정량화와 이와 관련한 변수의 무작위성 및 불확실성을 통합하여 고려하고, 이를 하나의 리스크인 노심손상확률로 도출하는 절차이다.

현재 SPRA를 수행하는 코드는 SEISM, SEISMIC, EQESRA, PRASEE 등(EPRI, 2002)이 있고, 모두 분포 기반 Boolean 대수 정량화 방법론이다(Ellingwood, 1990; Kim *et al.*, 2011; Kwag *et al.*, 2017). 언급한 코드의 공통점은 EPRI(Electric Power Research Institute)가 제안한 지진취약도 분석 방법론(EPRI, 1994)을 기반

†Corresponding author:

Tel: +82-54-530-1483; E-mail: eemsh@knu.ac.kr  
Received January 15 2020; Revised January 22 2020;  
Accepted January 28 2020

© 2020 by Computational Structural Engineering Institute of Korea

This is an Open-Access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution Non-Commercial License(<http://creativecommons.org/licenses/by-nc/3.0>) which permits unrestricted non-commercial use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.

하여 로그정규 확률밀도분포 입력 형식의 기기 지진취약도 정보( $A_m, \beta_r, \beta_u$ )를 받아들이고, 이를 기본적으로 Boolean 대수로 조합하여 시스템 지진취약도를 평가한다. 그러나 이러한 Boolean 계산을 통한 리스크 정량화 분석 방법은 기기 사이의 부분 종속 관계를 정확하게 평가하기 어렵다는 한계가 있다.

기기 간 종속관계는 다른 층 동종기기, 같은 층 이종기기 혹은 같은 층 동종기기 등에 나타날 수 있는 현상으로서 서로 다른 정도의 종속변수(correlation coefficient:  $\rho$ ) 값으로 정량화될 수 있고, 최근 이러한 종속관계는 실제 다수 원전의 민감도 분석을 통하여 SPRA 결과에 무시하지 못할 영향을 줌이 밝혀진 바 있다(USNRC, 2017). SSMRP(Seismic Safety Margins Research Program)(Wells *et al.*, 1984)에서는 이러한 부분 종속 관계를 정확하게 표현하기 위하여 Minimal Cut-set(MC) 내의 기기 간 부분 종속관계를 다중적분법(multiple integration method)를 통하여 고려하고, MC 사이의 관계는 독립 조건으로 가정하여 upper bound 값을 산정하여 원전 리스크를 평가한 적이 있었다. 그러나 이 또한 근사 방법으로서 부분 종속관계를 정확하게 고려하여 리스크를 평가하지 못하였고, 리스크를 과도하게 보수적으로 산정한다는 단점이 있었다. 최근에는 SPRA 방법 내에서 베이지안 네트워크 기법을 활용하여 기기 사이의 부분 종속 관계를 조건부확률(CPT: Conditional Probability Table)로 정량화하여 이를 고려한 리스크 정량화 시도는 있었으나, correlation coefficient와 CPT 사이의 관계를 명확하게 규명하지는 못했다(Kwag and Gupta, 2017; Kwag *et al.*, 2018).

이러한 배경아래 본 연구에서는 지진 시 기기 간 부분 종속 관계를 직관적으로 처리할 수 있는 샘플링 기반 SPRA 접근법을 제안하는 것을 목적으로 한다. 구체적으로 제안하는 방법은 EPRI 지진취약도의 입력을 기본으로 하여 이를 JAERI (Japan Atomic Energy Research Institute) 지진취약도 방법(Ebisawa *et al.*, 1994)의 입력 공간으로 치환(mapping)한다. 이러한 변경된 입력 공간을 기반으로 각각의 지진동 세기마다 응답  $R$  과 내력  $C$ 로 구분하여 샘플링하고, 이를 기반으로 기기의 상태를 안전("0") 혹은 파괴("1")로 구분한다. 이러한 기기 상태 정보를 바탕으로 시스템 로직 모델(fault tree: FT) 상에 여러 가지 논리 게이트를 통하여 sub-system과 top system의 상태를 기기와 마찬가지로 "0" 혹은 "1"로 평가하고, 이를 총 추출 샘플수와 파괴상태 샘플수("1"의 값을 가진 샘플 수)의 비로 각각의 파괴 확률을 평가한다. 이러한 절차를 각각의 지진동 세기마다 수행함으로써 최종적으로 기기 및 시스템 지진취약도를 도출하게 된다. 이렇듯 위에서 기술한 것과 같이 제안하는 방법은 언급한 방법론적 특징으로 인하여 샘플링 단계에서 기기 간 부분 종속 관계를 모두 고려할 수 있고, 충분한 샘플 수를 추출하면 정확한 해를 도출할 수 있게 된다는 장점을 가지게 된다.

## 2. 제안하는 방법

### 2.1 이론적 배경

지진동 및 기기의 무작위성 및 불확실성을 고려하여 지진동의 세기에 따른 기기의 조건부 파괴확률을 구하는 과정을 지진취약도 분석이라 한다. 이를 분석하기 위하여 여러 가지 접근 방법이 있지만, 현재 원자력 산업계에는 이미 개발된 SPRA 프레임워크(EPRI, 2002) 내에서 미국 EPRI에서 고안한 변수분리(SOV: Separation of Variable)방법(EPRI, 1994)을 일반적으로 사용하고 있다. 이 방법은 단일 기기의 지진취약도 함수를 아래와 같은 로그정규 누적확률밀도함수의 분포로 도출하고, 이를 세가지 주요 인자를 통하여 표현한다.

$$P_f(a) = \Phi\left(\frac{\ln(a/A_m)}{\beta_c}\right) \tag{1}$$

여기서,  $a$ 는 지진동의 세기(이 연구에서는 최대지반가속도(PGA)를 사용함.)를 의미하고,  $A_m$ 은 중앙내진성능 값을 나타낸다.  $A_m$ 은 설계기준지진을 기반으로 기기 지진내력과 실제적인 응답의 중앙값의 비로 표현된다.  $\beta_c$ 는 무작위성( $\beta_r$ ) 및 불확실성( $\beta_u$ )을 나타내는 로그표준편차를 통합한 인자로서,  $\beta_c = (\beta_r^2 + \beta_u^2)^{0.5}$ 를 통하여 산정할 수 있다.

현재, 원자력분야에서 활용하는 SPRA 리스크 정량화는 분포입력기반 Boolean 대수 정량화 방법(Ellingwood, 1990; Kim *et al.*, 2011; Kwag *et al.*, 2017)을 활용하여 수행되고 있다. 이는 기기 상호 간의 부분 상관성이 존재할 경우에 시스템 지진취약도 분석 정량화 시, 기본적으로 독립조건을 가정하는 Boolean algebra 혹은 MC 방법론은 적용하기 어렵고, 적용한다 하더라도 정확한 해를 도출하기 힘들다는 단점이 있다. MC 방법론을 활용하였던 SSMRP(Wells *et al.*, 1984)의 경우, 기기 간 "AND" 조건일 경우에는 다중적분법(multiple integration method)를 통하여 cut-set 내부의 상관성은 고려할 수 있었다. 그러나 이는 cut-set 간 "OR"조건 결합의 경우에는 이를 독립으로 가정하여 식 (2)를 통하여 정확한 값의 upper bound를 취하여 이를 보수적으로 평가하였다.

$$P_f(TS) = 1 - \prod_{i=1}^k [1 - P(MC_i)] \tag{2}$$

식 (2)에서  $MC$ 는 최소단절집합,  $TS$ 는 Top System을 나타내며  $P(MC)$ 는 최소단절집합의 손상확률,  $P_f(TS)$ 는 Top System의 손상확률을 나타낸다.

원자력 산업계에서 활용하는 지진취약도 분석의 또 다른 방법으로 소위 응답계수법(“Response factor method”)이라 하는 JAERI 접근법(Ebisawa *et al.*, 1994)이 있다. JAERI 접근법은 기본적으로 EPRI 변수분리방법과 유사하나 EPRI에서 활용하는  $A_m$  계수를 실제 응답  $R$ 과 내력  $C$ 로 좀 더 세분하게 구분하여 지진취약도 분포를 기술하는 것이 특징이다. 응답  $R$ 은 응답 계수와 설계 응답의 곱을 기반으로 도출하게 되고, 응답 계수는 지진파 생성, 지진파 전파, 건물 응답 및 기기 응답과 관련하여 설계에 포함된 응답 여유도를 각각 분리하여 평가하게 된다. 최종적으로 JAERI 접근법에 의한 기기의 대한 지진취약도는 아래와 같은 함수로 도출된다.

$$P_f(a) = \Phi\left(\frac{\ln(R_m(a)) - \ln(C_m)}{\sqrt{\beta_{Rc}^2 + \beta_{Cc}^2}}\right) \quad (3)$$

여기서,  $R_m$  및  $C_m$ 는 응답 및 내력에 관련한 중앙값을 의미한다. 방법론의 특성상,  $R$  및  $C$ 의 무작위성 및 불확실성에 대한 편차가 각각 존재하게 된다.  $\beta_{Rr}$  및  $\beta_{Ru}$ 는 각각 응답  $R$ 과 관련한 무작위성 및 불확실성에 관련한 로그 표준편차를 의미하고,  $\beta_{Cr}$  및  $\beta_{Cu}$ 는 각각 내력  $C$ 와 관련한 무작위성 및 불확실성에 관련한 로그 표준편차를 나타낸다. EPRI 변수분리방법과 마찬가지로 위의 각각의  $R$  및  $C$ 의 무작위성 및 불확실성을 나타내는 로그표준편차는 제곱합제곱근 방법( $\beta_{Rc} = (\beta_{Rr}^2 + \beta_{Ru}^2)^{0.5}$  &  $\beta_{Cc} = (\beta_{Cr}^2 + \beta_{Cu}^2)^{0.5}$ )을 통하여 통합될 수 있는데, 이렇게 되면 위의 식 (3)과 같은 하나의 분포함수로 표현할 수 있게 된다.

위에서 언급한 JAERI 접근법의 특징으로 인하여 이는 SPRA 수행할 때 하나의 기기 지진취약도 입력 자료와 관련하여 EPRI 지진취약도 표현 방법( $A_m, \beta_r, \beta_u$ )에 비하여 상대적으로 많은 입력( $R_m, C_m, \beta_{Rr}, \beta_{Ru}, \beta_{Cr}, \beta_{Cu}$ )을 요구한다는 단점이 있다. 그러나 이는 반면에 좀 더 세분하게 응답과 내력의 상관성을 분리할 수 있고, 또한, 시스템 지진취약도를 평가할 때 직관적으로 완전 샘플링 기반 취약도 분석으로 확장할 수 있다는 장점이 있다.

### 2.2 제안 알고리즘

본 연구에서는 위에서 언급한 두 가지 방법의 장점을 활용하여 지진 시 기기 간 부분 종속성을 정확하게 고려할 수 있는 샘플링기반 SPRA 코드를 제안하고자 한다.

구체적으로 SPRA 리스크 정량화를 위한 샘플링기반 접근법을 Fig. 1과 같이 개발하였다. 구체적으로 이를 설명하면 다음과 같다: (1) FT 모델, 지진재해도 정보 및 각각의 기기 지진

취약도 정보( $A_m, \beta_r, \beta_u$  및  $\rho$ )를 입력한다; (2) 다음 단계로, “ $\beta_r$ ” 및 “ $\beta_u$ ”를 “ $\beta_c$ ”로 결합한다; (3) 또한, “ $\beta_c$ ”를 “ $\beta_{Rc}$ ” 및 “ $\beta_{Cc}$ ”로 분해한다; (4) 지진재해 세기를 정의한다; (5) 정의된 지진재해 세기에 따라 각각의 기기와 관련하여 지진응답 “ $R$ ” 및 지진내력 “ $C$ ”의 분포를 포괄하는 충분한 수의 샘플을 추출하고, 각 추출된 샘플에서  $R$ 과  $C$  값을 서로 비교하여 각각의 해당 기기 상태를 binary state: safe (“0”) 혹은 fail (“1”)로 표현한다; (6) 기기의 “N” 샘플의 상태를 기반으로 FT 모델 정보를 통하여 sub-systems와 top system의 상태를 샘플 별로 판단한다; (7) 기기, sub-systems, 및 system(top event)에서 총 샘플 수(“N”)와 파괴 상태 샘플 개수(“F”)를 가지고 이에 대한 비율로 지진재해에 대한 파괴확률을 산정한다; (8) 정의된 지진재해 세기를 지속적으로 변경하고, 변경된 지진재해 세기마다 (5)~(7) 과정을 반복 수행하여 기기, sub-systems, 및 system 각각에서 지진취약도 곡선을 도출한다; (9) 도출된 지진취약도 곡선을 바탕으로 지진재해도 곡선과 통합하여(risk convolution) 리스크를 산정한다(통상적으로 annual core damage frequency로 표현함); (10) 마지막으로 기기, sub-systems 및 system과 관련된 주요 결과인 평균 지진취약도곡선, 대표 내진성능값(HCLPF: High-Confidential-Low-Probability-of-Failure), 시나리오별 리스크값 등을 정리한다.

### 3. 검증 예제 1: 병렬시스템

본 연구에서 제안한 알고리즘을 검증하기 위하여 C1 기기와 C2 기기로 이루어진 병렬시스템 예제에 적용해 보았다. 구체적으로  $P(C1 \cap C2)$  예제를 (1) 독립 조건일 때, (2) 완전 종속 조건( $\rho=1$ )일 때, (3) 부분 종속 조건( $\rho=0.7$ )일 때에 대하여 (a) Boolean 대수를 통한 계산(Boolean 방법) 혹은 다중적분법, (b) 제안하는 샘플링 방법을 통하여 시스템 지진취약도 값을 산정하였다. 여기서, C1과 C2 기기 모두  $A_m=0.5g, \beta_r=0.3, \beta_u=0.3$ 의 지진취약도 정보를 갖는다고 가정하였다. Boolean 방법의 경우, C1과 C2의 개별적인 지진취약도 값은 식 (1)을 통해 산정하였고,  $P(C1 \cap C2)$ 의 시스템 취약도 값은 독립일 때는  $P(C1) * P(C2)$ 으로 완전 종속일 때는  $\min(P(C1), P(C2))$ 를 통하여 도출하였다. 여기서 주목할 점은 Boolean 방법의 경우 독립 혹은 완전 종속일 경우 이러한 접근 방법을 통하여 정확한 해(exact solution)를 구할 수 있다. 그러나 부분 종속일 경우에는 Boolean 방법을 통하여 정확한 해를 도출할 수 없으므로 다중적분법을 통하여 정확한 해를 계산하였다. 모든 방법의 해석 시, 지진동 세기는 PGA를 기본으로 하였고, 0.01g에서 2g까지 0.01g 간격으로 총 200개로 세분화하였다. 제안하는 샘플링 접근법 수행 시, 기본적인 샘플링 방법은 몬테카를로방법을 따랐다.

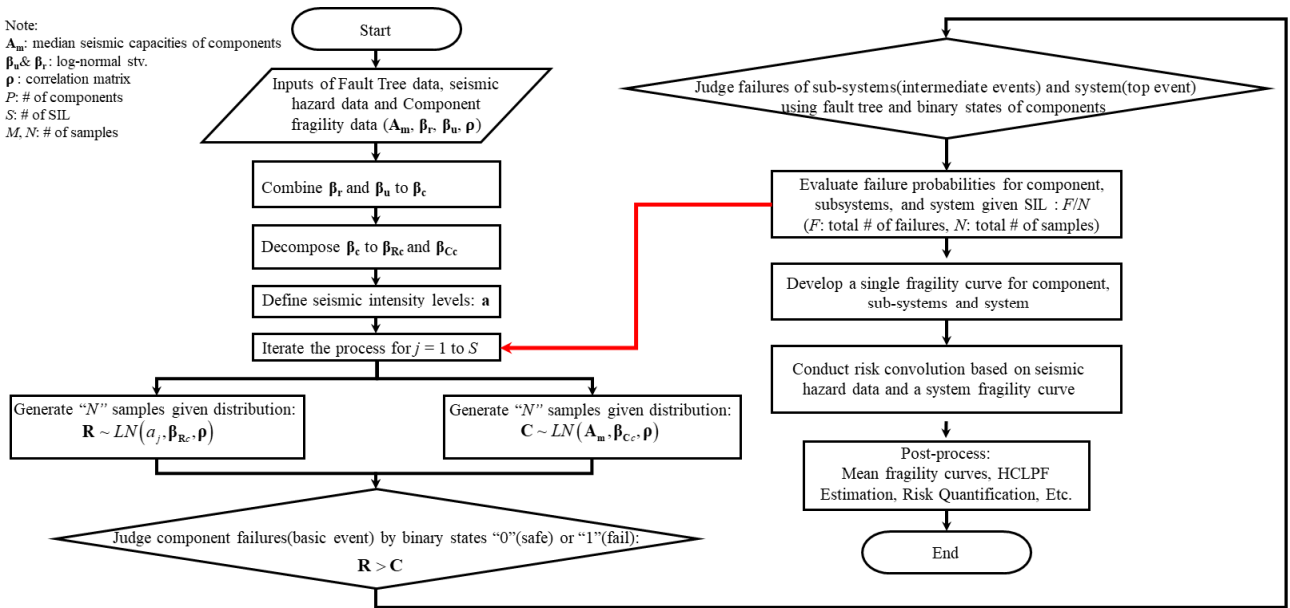


Fig. 1 Proposed sampling-based approach for a SPRA

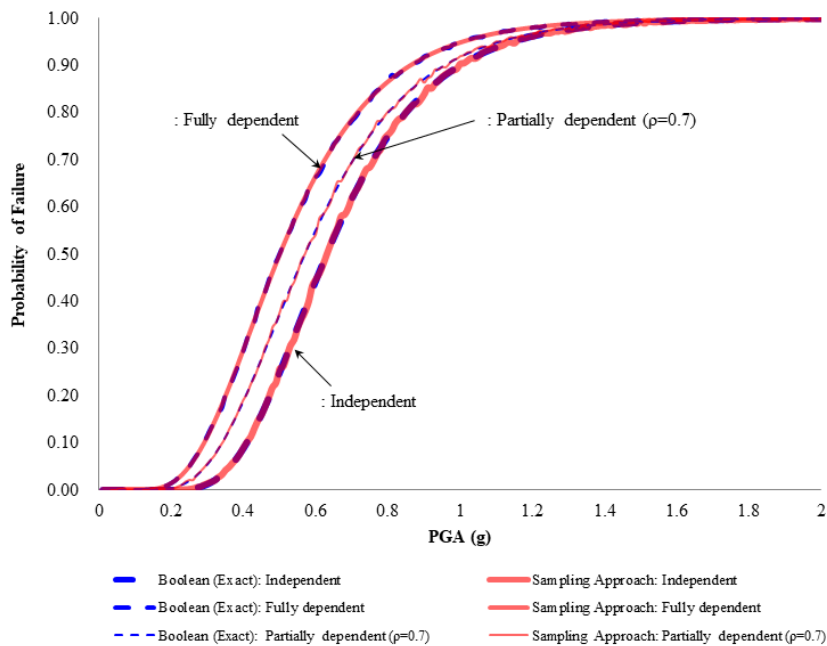


Fig. 2 System seismic fragility curve comparison: parallel system example

결과로서 Fig. 2는 평균 시스템 지진취약도 결과를 비교하여 보여주고 있다. Fig. 2에서 확인할 수 있듯이 제안하는 샘플링방법이 Boolean 방법 혹은 다중적분법의 결과의 정확해와 거의 일치함을 육안으로 확인할 수 있다. 이에 대한 정량적인 비교결과는 R2 및 RMSE(Root Mean Squared Error)를 통하여 수행하였고, 그 결과는 Table 1에 정리하였다. R2는 결정계수(Coefficient of Determination)를 의미하며 0에서 1사이 값을 가지고, 예측 값(제안하는 샘플링 접근법)과 정해의 상관관계가 높을수록 1에 가까워진다. RMSE는 예측 값과 정해의 차이

를 제공하고 합산한 후 제공된 한 값으로서 0에 가까울수록 두 데이터 셋의 상관관계가 높아진다. Table 1에서 보아 알 수 있듯이, 제안하는 샘플링 방법이 정해의 결과와 거의 일치함을

Table 1 Statistics of parallel system example(N=1E4)

Conditions	R2	RMSE
Independent( $\rho=0$ )	0.9999943	0.0009401
Fully dependent( $\rho=1$ )	0.9999929	0.0009717
Partially dependent( $\rho=0.7$ )	0.9999956	0.0007965

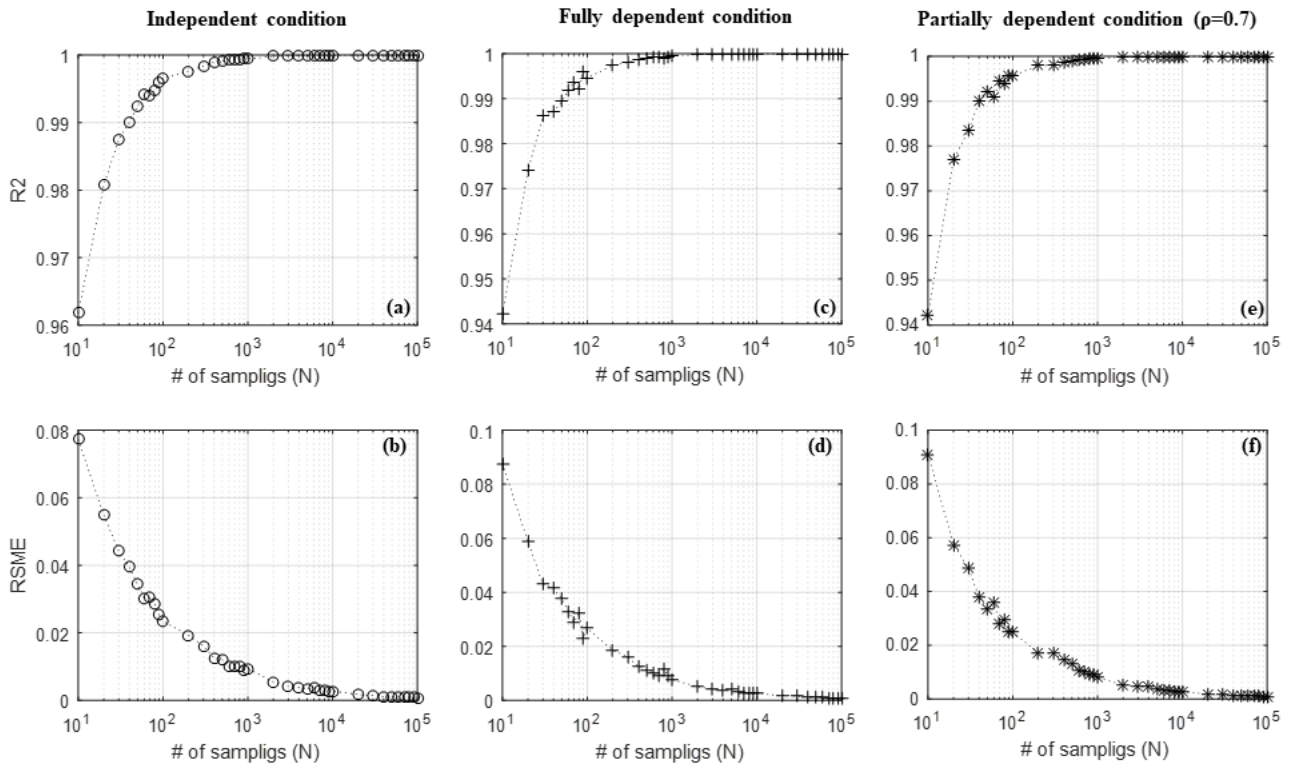


Fig. 3 Comparison of R2 and RMSE of the proposed sampling-based approach according to the number of sampling (N) in a parallel system example

알 수 있다. 추가적으로, 제안된 방법이 기본적으로 샘플링 접근법이기 때문에 샘플 수에 따른 해의 수렴성을 확인해 보았다. Fig. 3은 구체적으로 샘플링 개수 N에 따른 샘플링 접근법의 해의 수렴 결과를 보여주고 있다. 그림에서 확인할 수 있듯이 제안하는 샘플링 방법이 모든 조건에서 대략 N=1E3개 샘플 이상일 경우, 결과의 정확도가 거의 정해에 수렴하는 것으로 확인할 수 있다.

#### 4. 검증 예제 2: LGS 원전

이 장에서는 제안된 방법론을 실제 LGS(Limerick Generating Station) 원자력발전소(Nuclear Power Plant: NPP) SPRA 문제에 적용해 보았다. SPRA는 기본적으로 지진재해도 분석 결과와 기기 지진취약도 분석 정보에 기반한 시스템 해석을 통한 시스템 지진취약도 결과를 서로 컨볼류전하여 리스크를 평가한다(EPRI, 1994). LGS 원전과 관련한 지진재해도, 기기 지진취약도, 랜덤 고장 확률 정보는 Ellingwood(1990) 문헌에 자세히 기술되어 있다. 시스템 지진취약도 분석을 위한 시스템 모델 식은 아래에 나타내었다.

$$T_s E_s U X = S_1 \cap A \quad (4)$$

$$T_s R_b = S_4 \quad (5)$$

$$T_s R_{pw} = S_6 \quad (6)$$

$$T_s E_s C_m C_2 = S_1 \cap (S_3 \cup C_R) \cap (A \cup S_{10} \cup SLC_R) \quad (7)$$

$$T_s R_b C_m = S_4 \cap (C_R \cup S_3) \quad (8)$$

$$T_s E_s W_m = S_1 \cap \bar{A} \cap (\bar{S}_{17} \cap W_R \cup \bar{S}_2 \cap S_{17}) \quad (9)$$

$$CM = S_4 \cup S_6 \cup S_1 \cap [A \cup (S_3 \cup C_R) \cap (S_{10} \cup SLC_R) \cup (S_{17} \cup W_R)] \quad (10)$$

여기서,  $\bar{S}_i$ 는 기기 지진취약도  $S_i$ 의 역(complement)을 의미하고, A는 아래와 같이 정의된다.

$$A = S_{11} \cup S_{12} \cup S_{13} \cup S_{14} \cup S_{15} \cup S_{16} \cup DG_R \quad (11)$$

CM은 노심손상 사고를 나타내고, 식 (4)~(9)의 6가지 사고 시나리오의 합으로서 식 (10)과 같이 간략하게 표현할 수 있다. 위의 시스템 모델 식에서 확인할 수 있듯이 실제 원전 시스템 파괴(CM)은 기기 파괴 사이의 병렬 관계와 직렬 관계의 다양한 조합으로 평가된다. 또한, 입력 자료로 기기 지진취약도 정보와 랜덤 고장확률이 활용된다. 이 예제와 관련하여 Boolean 방법은 검증예제 1과 마찬가지로 독립 조건 혹은 완전 종속 조

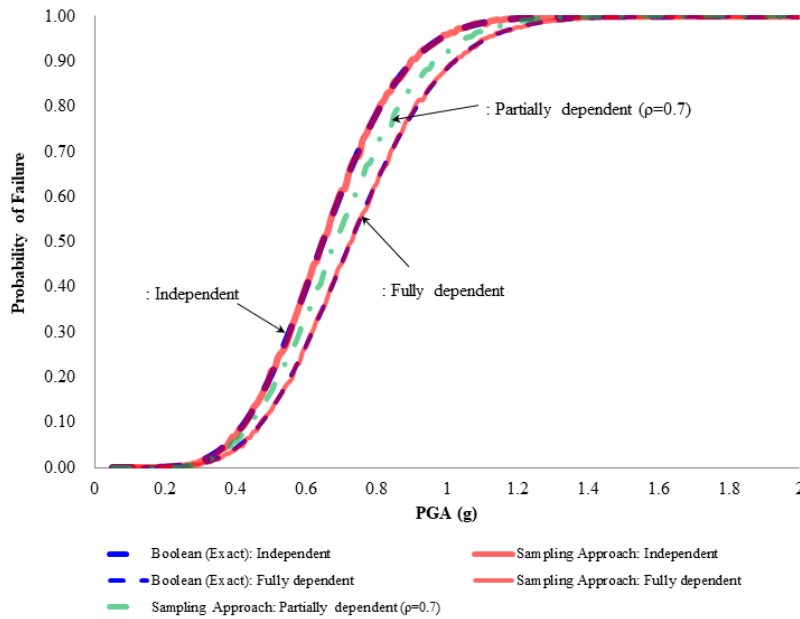


Fig. 4 CM sequence seismic fragility curve comparison: LGS NPP SPRA example

건에 대해서는 정확한 해를 구할 수 있으나, 부분중속 조건의 경우에 대해서는 정해를 도출할 수 없다. Boolean을 방법을 통해서 부분 중속의 경우를 고려하기 위해서는 SSMRP 접근법 (식 (2))을 활용하여 보수적으로 해를 근사할 수 있다. 그러므로 이 예제에 대해서는 기본적으로 3가지 경우를 살펴보았다: (1) 모든 기기 간 독립 조건, (2) 원자로건물 내 기기 S11, S12, S13, S14 완전 중속 & DG건물 내 기기 S15, S16 완전 중속 조건(이외 다른 모든 기기는 독립), 그리고 추가적인 경우로 (3) (2) 경우의 건물 내 완전 중속이 부분중속( $\rho=0.7$ )일 경우를 고려하였다. (3)의 경우는 Boolean 방법으로 정해를 구할 수 없기 때문에 제안하는 샘플링 방법의 결과만을 나타내었다. 이 예제에 관련하여 모든 방법론 적용 시, 지진동 세기 분포는 PGA를 기준으로 0.05g부터 2.0g까지 0.01g 간격으로 총 196개로 세분화하였다.

우선, 제안한 샘플링 접근법 및 Boolean 방법을 활용하여 LGS NPP 예제에 대해서 SPRA를 수행하였다. 부분 중속

조건((3) 경우)에 대해서는 정해가 없으므로 독립 조건((1) case: independent)과 완전 중속 조건((2) case: fully dependent condition)에 대해서만 CM sequence와 관련하여 제안하는 샘플링 접근법의 지진취약도 결과를 Boolean 방법을 통한 정해 결과와 함께 Fig. 4에 나타내었다. 정량적인 비교결과는 모든 사고 시나리오에 대하여 HCLPF 및 Risk를 Table 2 및 Table 3에 정리하였다. 또한, Table 2에는 추가적으로 타 연구에서 같은 예제 독립조건에서 수행된 SPRA 결과(Kim *et al.*, 2011)도 같이 나타내었다. Fig. 4 및 Tables 2와 3으로부터 확인할 수 있듯이 제안하는 샘플링 접근법이 거의 정확한 해에 일치하는 값을 도출함을 확인할 수 있다. 또한, 이 예제와 관련하여 샘플링 개수 N에 따른 샘플링 접근법 결과의 해의 수렴성 분석을 수행하였다. Fig. 5은 독립조건 및 완전중속조건일 때, 이러한 두 방법을 통한 샘플링수 N에 따른 해의 수렴성 결과를 보여주고 있다. 위의 예제들과 마찬가지로 대략 N=1E3개 이상일 때 두 샘플링 방법 모두 정해에 가깝게 수렴함을 확인할 수 있다. 마치

Table 2 Statistics for "LGS NPP" example: (1) Independent condition(N=1E4)

Sequence	Kim <i>et al.</i> (2011)	Boolean(Exact)		Sampling approach	
	HCLPF(g)	HCLPF(g)	Risk(/yr)	HCLPF(g)	Risk(/yr)
TEUX	0.295	0.290	3.84E-06	0.300	3.53E-06
TRb	0.416	0.410	1.14E-06	0.420	1.13E-06
TRpv	0.546	0.540	4.67E-07	0.540	4.65E-07
TECC	0.421	0.420	1.47E-06	0.430	1.46E-06
TRC	0.516	0.510	6.40E-07	0.510	6.39E-07
TEW	-	-	1.24E-07	-	1.50E-07
CM	0.281	0.280	5.44E-06	0.280	5.15E-06

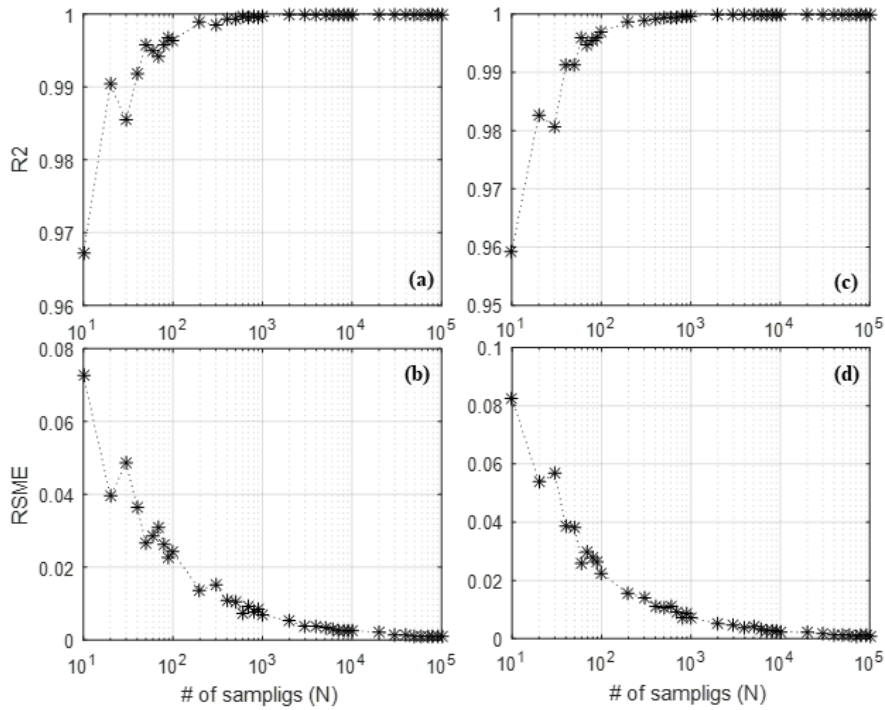


Fig. 5 Comparison of R2 and RMSE of the proposed sampling-based approach according to the number of sampling (N) in a CM sequence of LGS NPP example

Table 3 HCLPF and risk for “LGS NPP” example: (2) fully correlated condition(N=1E4)

Sequence	Boolean(Exact)		Sampling approach	
	HCLPF(g)	Risk	HCLPF(g)	Risk
TEUX	0.350	1.76E-06	0.350	1.50E-06
TRb	0.410	1.14E-06	0.420	1.13E-06
TRpv	0.540	4.67E-07	0.530	4.70E-07
TECC	0.470	8.27E-07	0.480	8.13E-07
TRC	0.510	6.40E-07	0.520	6.41E-07
TEW	-	1.27E-07	-	1.24E-07
CM	0.310	3.84E-06	0.310	3.58E-06

막으로, (3)의 부분 종속 조건에 대하여 제안하는 방법을 적용하여, CM sequence에 대한 지진취약도 곡선 결과를 Fig. 4에 독립조건 결과와 함께 나타내었다. 그림으로 확인할 수 있듯이 부분 종속 조건의 경우는 독립조건과 완전 종속조건 결과 값 사이에 있는 값으로서 이는 기존의 Boolean 방법을 통하여 도출할 수 없는 결과이다.

### 5. 요약 및 결론

본 연구에서 기기 지진취약도 정보의 부분 종속 관계를 정확하게 고려할 수 있는 샘플링 기반 SPRA 리스크 정량화 방법을 개발하였다. 구체적으로 두 가지 대표적 방법인 EPRI 지진취약도 입력기반 리스크 정량화 방법과 JAERI 지진취약도 입

력기반 방법의 장점을 결합하여 SPRA 리스크 정량화 방법을 제안하였다. 본 연구에서 제안하는 방법의 가장 중요한 특징은 EPRI 지진취약도 입력을 JAERI 지진취약도 입력 공간으로 치환하여 샘플링 방법으로 SPRA 리스크 정량화를 수행하는 것에 있다.

제안된 샘플링기반 접근법을 간단한 예제와 실제 원전 SPRA 예제에 적용한 결과는 다음과 같이 요약할 수 있다. 기기 부분종속의 정해가 존재하는 간단한 병렬시스템 예제에 관련하여 본 연구에서 제안하는 방법이 정해에 가까운 시스템 지진취약도 값을 도출함을 확인할 수 있었다. 제안된 방법을 실제 원전 SPRA 문제에 적용하였고, 적용 결과를 통하여 기존 연구 결과 및 다른 방법의 분석 결과와 거의 동일한 값을 산출함을 확인하였다. 마지막으로 두 예제에 대하여 제안된 방법

의 샘플링 개수를 변경하며 수치 안전성 및 결과의 정확도를 확인한 결과, 충분한 샘플 수를 확보한 경우에 대해서는 시스템 지진취약도 결과 값의 차이가 거의 발생하지 않음을 확인할 수 있었다. 그러므로 본 연구에서 제안하는 방법은 기존의 SPRA 리스크 정량화 방법이 다룰 수 없는 시스템 내 부분 중속 조건을 고려하여, 지진 리스크를 정확하게 평가할 수 있는 유용한 도구로 활용될 수 있을 것이라 기대한다.

### 감사의 글

이 논문은 2019학년도 한밭대학교 교내학술연구비의 지원을 받았음.

### References

- Ebisawa, K., Abe, K., Muramatsu, K., Itoh, M., Kohno, K., Tanaka, T.** (1994) Evaluation of Response Factors for Seismic Probabilistic Safety Assessment of Nuclear Power Plants, *Nuclear Eng. & Des.*, 147(2), pp.197~210.
- Ellingwood, B.** (1990) Validation studies of seismic PRAs, *Nuclear Eng. & Des.*, 123, pp.189~196.
- EPRI** (1994) *Methodology for Developing Seismic Fragilities*, TR-103959, Electric Power Research Institute.
- EPRI** (2002) *Seismic Fragility Application Guide*, TR-1002988, Electric Power Research Institute.
- Kim, J.H., Choi, I.K., Park, J.H.** (2011) Uncertainty Analysis of System Fragility for Seismic Safety Evaluation of NPP, *Nuclear Eng. & Des.*, 241, pp.2570~2579.
- Kwag, S., Gupta, A.** (2017) Probabilistic Risk Assessment Framework for Structural Systems under Multiple Hazards using Bayesian Statistics, *Nuclear Eng. & Des.*, 315(4), pp.20~34.
- Kwag, S., Oh, J., Lee, J.M.** (2018) Application of Bayesian Statistics to Seismic Probabilistic Safety Assessment for Research Reactor, *Nuclear Eng. & Des.*, 328, pp.166~181.
- Kwag, S., Oh, J., Lee, J.M., Ryu, J.S.** (2017) Bayesian based Seismic Margin Assessment Approach: Application to Research Reactor System, *Earthq. & Struct.*, 12(6), pp.653~663.
- USNRC** (2017) *Correlation of Seismic Performance in Similar SSCs (structures, Systems, and Components)*, NUREG/CR-7237, United States Nuclear Regulatory Commission, Office of Nuclear Regulatory Research.
- Wells, J.W., George, L.L., Cummings, G.E.** (1984) Dseismic Safety Margins Research Program, Phase 1 Final Report: Systems nalysis (Project VII), Vol. A8, NUREG/CR-2015, United States Nuclear Regulatory Commission.

### 요 지

본 연구에서 기기 지진취약도 정보의 부분 중속 관계를 정확하게 고려할 수 있는 샘플링 기반 지진 확률론적 리스크 평가 정량화 기법을 개발하였다. 구체적으로 두 가지 대표적 방법론인 EPRI 지진취약도 입력기반 정량화 방법과 JAERI 지진취약도 입력기반 정량화 기법의 장점을 결합하여 리스크 정량화 방법을 제안하였다. 본 연구에서 제안하는 방법의 가장 중요한 특징은 EPRI 지진취약도 입력을 JAERI 지진취약도 입력 공간으로 치환하여 샘플링 방법으로 SPRA 수행하는 것에 있다. 제안된 샘플링기반 접근법을 간단한 예제부터 실제 원전의 지진 확률론적 리스크 평가 문제에 적용한 결과, 본 연구에서 제안하는 방법이 정해에 가까운 시스템 지진취약도 및 지진리스크 값을 산출함을 확인할 수 있었다. 그러므로 본 연구에서 제안하는 방법론은 기존의 SPRA 정량화 방법이 다룰 수 없는 시스템 내 부분 중속 조건을 고려하여 지진 리스크를 정확하게 평가할 수 있는 유용한 도구로 활용될 수 있을 것이라 기대한다.

**핵심용어** : 시스템, 지진해석, 내진성능, 리스크