

# 다수기의 확률론적 지진안전성 평가를 위한 지진손상 상관계수의 적용

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

<sup>1</sup>경북대학교 융복합시스템공학과 플랜트시스템전공 조교수, <sup>2</sup>한밭대학교 건설환경공학과 조교수,  
<sup>3</sup>한국원자력연구원 첨단구조·지진안전연구부 책임연구원

## Feasibility Study of Seismic Probabilistic Risk Assessment for Multi-unit NPP with Seismic Failure Correlation

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

<sup>1</sup>Assistant Professor, Department of Convergence and Fusion System Engineering, Kyungpook National University, Sangju, 37224, Korea

<sup>2</sup>Assistant Professor, Department of Civil & Environmental Engineering, Hanbat National University, Daejeon, 34158, Korea

<sup>3</sup>Principal Researcher, Advanced Structural and Seismic Safety Research Division, Korea Atomic Energy Research Institute, Daejeon, 34057, Korea

### Abstract

The 2011 East Japan Earthquake caused accidents at a number of nuclear power plants in Fukushima, highlighting the need for a study on the seismic safety of multiple NPP (Nuclear Power Plant) units. In the case of nuclear power plants built on a site that shows a similar seismic response, there is at least a correlation between the seismic damage of structures, systems, and components (SSCs) of nuclear power plants. In this study, a probabilistic seismic safety assessment was performed for the loss of essential power events of twin units. To derive an appropriate seismic damage correlation coefficient, a probabilistic seismic response analysis was performed. Using the external event mensuration system program, we analyzed the seismic fragility and seismic risk by composing a failure tree of multiple loss of essential power events. Additionally, a comparative analysis was performed considering the seismic damage correlation between SSCs as completely independent and completely dependent.

**Keywords** : multi-unit, correlation, system, seismic analysis, seismic performance, risk

### 1. 서 론

국내에서 발생한 경주지진(2016년), 포항지진(2017년)으로 인하여 원자력발전소의 지진안전성에 대한 관심이 높아졌다. 지진에 대한 원자력발전소의 안전성은 확률론적 지진안전성 평가를 통해 평가된다(Eem *et al.*, 2021a). 지진은 제한된 지역이 아닌 매우 광범위한 지역에 영향을 미친다. 2011년 발생한 후쿠시마 사고는 단일 지진사건으로 지진해일이 유발되어 다수의 원자력발전소에 사고가 발생하였다. 따라서 원자력발전소 부지의 안전성 혹은 다수의 원자력발전소의 안전성에 관한 연구의 필요성이 대두되었다(Eem *et al.*, 2021b).

기존의 확률론적 지진안전성 평가는 대부분 단일 호기에 대해 수행되었으며, 지진사건으로 인한 인접한 주변 호기의 영향을 고려하지 않았다. 따라서 확률론적 지진안전성 평가는 주로 단일 호기를 대상으로 연구가 진행되었으며, 다수기에 관한 연구는 제한적으로 이루어졌다. 하지만 2011년 발생한 후쿠시마 사고로 인하여 단일 호기가 아닌 다수기의 안전성 평가의 중요성이 드러났다.

지진손상 상관성은 다수기의 확률론적 지진안전성 평가에서 중요한 부분을 차지한다(Choi *et al.*, 2021; Eem *et al.*, 2021b). 지진사건은 특정 원자력발전소가 아닌 원자력발전소 부지에 영향을 미치므로 원자력발전소 구조물, 시스템 및 기기

†Corresponding author:

Tel: +82-42-821-1109; E-mail: [skwag@hanbat.ac.kr](mailto:skwag@hanbat.ac.kr)

Received July 21 2021; Revised August 25 2021;

Accepted August 30 2021

© 2021 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.

(SSCs: Structure, system and Components)간의 지진손상확률에 서로 상관성이 존재하게 된다. SSCs간의 지진손상 상관성을 고려 여부에 따라 원자력발전소의 지진리스크는 크게 차이나는 것을 확인할 수 있다(Smith *et al.*, 1981). 지진손상 상관성에 관한 연구는 지진손상 상관성을 고려한 지진리스크를 정량화하는 연구와 SSCs간의 지진손상 상관계수를 산출하는 연구가 있다.

지진손상 상관성을 고려하는 대표적인 연구로는 미국 Lawrence Livermore National Laboratory에서 수행한 “Seismic Safety Margins Research Program(SSMRP)”의 연구가 있다(Smith *et al.*, 1981). SSMRP 연구에서는 다중적분방법을 활용하여 지진리스크를 정량화하는 방법을 제안하였으나 당시 컴퓨터의 성능 문제로 부분적으로 지진손상 상관성을 고려하였다. Ebisawa 연구에서는 원자력발전소의 지진응답해석을 통해 지진응답 상관성을 고려하는 방법을 제안하였다(Ebisawa *et al.*, 1994). 지진응답 상관계수를 경험규칙에 의해 산정하는 방법을 제안한 연구와 지진손상 상관계수에 따른 손상확률의 변화 대한 연구 및 국내 원자력발전소에서 활용이 가능한 지진응답 상관계수 산정 등 지진손상 상관성에 관한 연구가 수행되고 있다(Eem *et al.*, 2021c; Kwag *et al.*, 2020; Kwag *et al.*, 2021; USNRC, 1990). 저자에 의해서도 Extremal Event Mensuration System 프로그램을 활용하여 지진손상 상관성을 고려하여 리스크를 정량화하는 방법을 제안하였다(Eem and Choi, 2019a). Extremal Event Mensuration System 프로그램은 다중적분방법을 활용하여 지진리스크를 정량화하거나 MCS방법(Monte Carlo Simulation)을 활용하여 지진리스크를 정량화하는 방법을 사용한다. 또한, 저자에 의해 다수기 문제를 구성하는 SSCs간의 지진손상 상관계수를 계산하는 방법을 제안하였다(Eem *et al.*, 2021b). 그러나, 여전히 다수기 문제에서의 지진손상 상관성에 관한 연구는 미비한 실정이다.

국내의 경우 특정 부지에 다수의 원자력발전소가 건설된 경우가 많으므로 다수기의 지진안전성 평가 연구는 매우 중요하다. 따라서 본 연구에서는 현재까지 개발된 방법들을 활용하여 다수기의 지진안전성 평가를 수행하였다. 다수기의 필수전원상실사건에 대하여 SSCs간의 지진손상 상관계수를 구한 후 지진취약도 및 노심손상빈도(CDF: Core Damage Frequency)를 도출하였다. 또한 SSCs간의 지진손상 상관성을 독립, 완전종속으로 가정하여 비교분석을 수행하였다.

## 2. 다수기의 필수전원상실사건

국내의 경우 원자력발전소 부지에 다수의 원자력발전소가 건설되어 있으며, 또한 두 개의 호기가 쌍둥이처럼 건설되어

있다. 따라서 본 연구에서는 쌍둥이 호기의 필수전원상실사건에 대해 지진취약도 및 CDF를 계산하였다. 국내에 건설된 서로 인접한 쌍둥이 호기의 경우 대략 100m 정도이므로, 두 개의 호기는 Fig. 1과 같이 100m 떨어져 있다고 가정을 하였다. 지진에 의해 영향을 받는 범위 대비 100m는 상대적으로 가까우므로 쌍둥이 호기의 입력지진은 유사할 것이며, 쌍둥이 호기이므로 쌍둥이 호기를 구성하는 SSCs의 내진성능은 유사할 것이다. 따라서 쌍둥이 호기를 구성하고 있는 SSCs간에 지진손상 상관성이 존재하게 된다.

필수전원상실사건은 원자력발전소의 외부에서 전원이 공급되지 않은 상태에서 원자력발전소의 안전 관련 계통에 전원공급이 되지 않아 노심에 손상이 발생하는 사건이다. 보수적

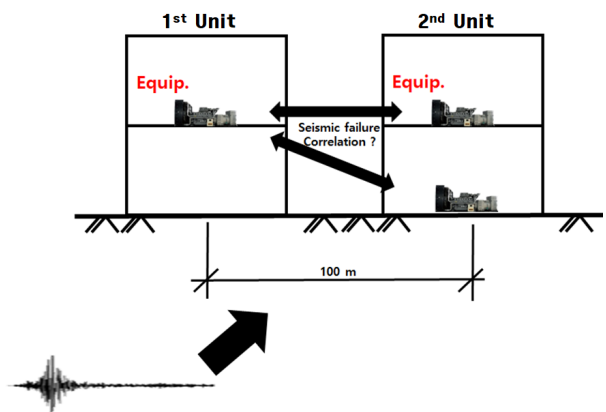


Fig. 1 Schematic diagram of the twin NPP

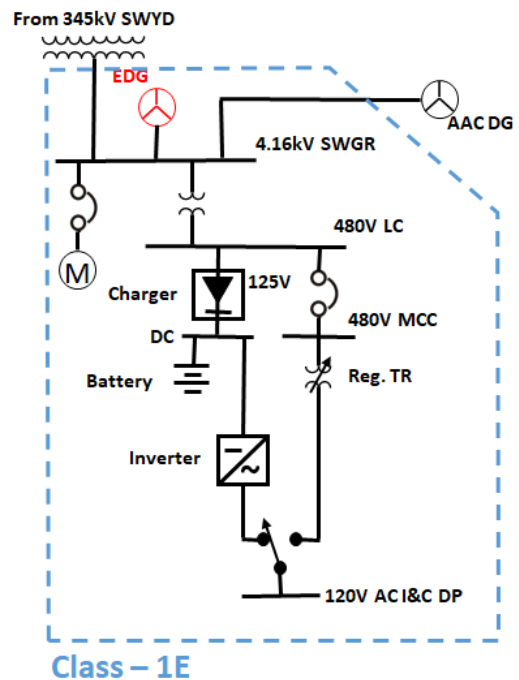


Fig. 2 Simplified power system in nuclear power plant(NPP) (Eem and Choi, 2019b)

Table 1 Configuration of seismic-induced loss of essential power events for twin unit

Structures or Components	Median(PGA)	$\beta_R$	$\beta_U$	Failure Modes	Event Codes for 1 <sup>st</sup> Unit	Event Codes 2 <sup>nd</sup> Unit
Diesel Generator	1.243	0.396	0.330	Structural failure	SDGSF <sub>1</sub>	SDGSF <sub>2</sub>
Battery Charger	1.133	0.308	0.308	Functional failure	SBCRC <sub>1</sub>	SBCRC <sub>2</sub>
4.16kV SWGR	1.463	0.363	0.319	Functional failure	SSWRC <sub>1</sub>	SSWRC <sub>2</sub>
Battery Rack	1.606	0.363	0.341	Structural failure	SBRSF <sub>1</sub>	SBRSF <sub>2</sub>
480V Load Center	1.650	0.352	0.319	Functional failure	SLCRC <sub>1</sub>	SLCRC <sub>2</sub>
125V DC Control Center	1.738	0.363	0.319	Structural failure	SDCSF <sub>1</sub>	SDCSF <sub>2</sub>
Auxiliary building	2.200	0.352	0.407	Structural failure	SSEAU <sub>1</sub>	SSEAU <sub>2</sub>
Inverter	1.507	0.363	0.330	Functional failure	SINRC <sub>1</sub>	SINRC <sub>2</sub>
Regulating Transformer	1.430	0.363	0.330	Functional failure	SRTRC <sub>1</sub>	SRTRC <sub>2</sub>

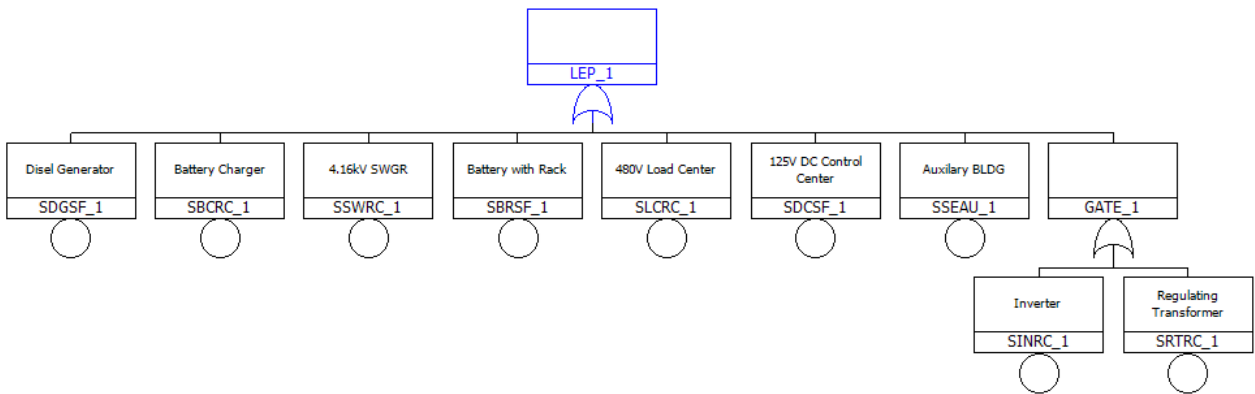


Fig. 3 Fault tree of seismic-induced loss of essential power for 1<sup>st</sup> unit

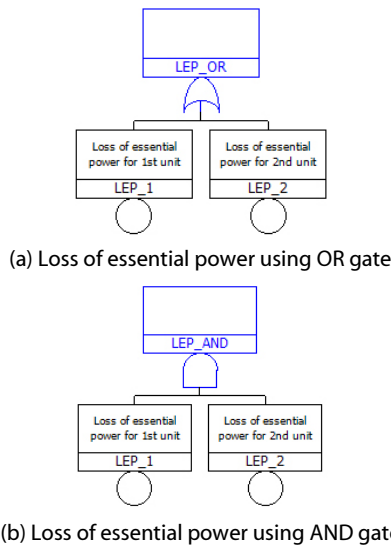


Fig. 4 Fault tree of seismic-induced loss of essential power for twin unit

으로 필수전원상실사건이 발생하면 바로 노심에 손상으로 이어지는 것으로 가정하였다(Eem *et al.*, 2021a). 원자력발전소의 전원 공급 계통은 Fig. 2에 간략히 나타내었다(Eem and Choi, 2019b).

본 연구에서는 필수전원상실사건을 구성하고 있는 이벤트와 지진취약도를 간략화하여 확률론적 지진안전성 평가를 수

행하였다. 필수전원상실사건과 관련한 구성 이벤트와 지진취약도 정보는 Table 1과 같이 가정을 하였다(Eem *et al.*, 2021a). Table 1의 각 호기의 이벤트 코드는 구성요소의 고장을 나타내며 고장수목 구성 시 활용하였으며 1호기의 필수전원상실사건의 고장수목은 Fig. 3에 나타내었다(Eem *et al.*, 2021c). 쌍둥이 호기에서 한 호기 이상에서 필수전원상실사건이 발생할 확률은 Fig. 3의 TOP Event로부터 OR Gate를 활용하여 Fig. 4(a)에 나타내었으며, 쌍둥이 호기에서 동시에 필수전원상실사건이 발생할 확률은 AND Gate를 활용하였으며 Fig. 4(b)에 고장수목을 나타내었다.

### 3. 다수기 SSCs의 지진손상 상관계수

원자력발전소의 SSCs의 지진손상 상관계수는 다음 식으로부터 계산이 된다(Eem *et al.*, 2021c).

$$\rho_{12} = \frac{\beta_{R1}\beta_{R2}}{\sqrt{\beta_{R1}^2 + \beta_{C1}^2} \sqrt{\beta_{R2}^2 + \beta_{C2}^2}} \rho_{R1R2} + \frac{\beta_{C1}\beta_{C2}}{\sqrt{\beta_{R1}^2 + \beta_{C1}^2} \sqrt{\beta_{R2}^2 + \beta_{C2}^2}} \rho_{C1C2} \quad (1)$$

여기서,  $\rho_{12}$ 는 최종적으로 얻고자 하는 두 SSCs간의 지진 손상

상관계수이며  $\rho_{R1R2}$ 는 두 SSCs간의 지진응답 상관계수,  $\rho_{C1C2}$ 는 두 SSCs간의 내진성능 상관계수를 나타낸다. 또한  $\beta_{R1}, \beta_{R2}$ 는 각각 1번 SSCs와 2번 SSCs의 지진응답 대수표준정규분포의 표준편차이며,  $\beta_{C1}, \beta_{C2}$ 는 각각 1번 SSCs와 2번 SSCs의 내진성능 대수표준정규분포의 표준편차이다. 따라서 SSCs간의 지진손상 상관계수는 두 SSCs의 지진응답 상관계수와 내진성능 상관계수로부터 결정된다.

본 연구에서는 SSCs의 지진손상 상관계수를 도출하기 위하여 내진성능 상관계수는 가정을 하였으며 지진응답 상관계수는 Eem 등(2021b)이 제안한 방법론을 참조하여 적용하였다. 두 호기 모두 NRC의 Regulatory Guide 1.60(anchored at PGA: 0.3g)의 원자력발전소 표준응답스펙트럼(US NRC, 2014)을 적용하였다. 확률론적 지진응답 해석을 수행하기 위하여 Fig. 5와 같이 Lumped-Mass Model으로 원자력발전소를 모델링하여 지진응답해석을 수행하였다(Eem *et al.*, 2021c). 지진응답

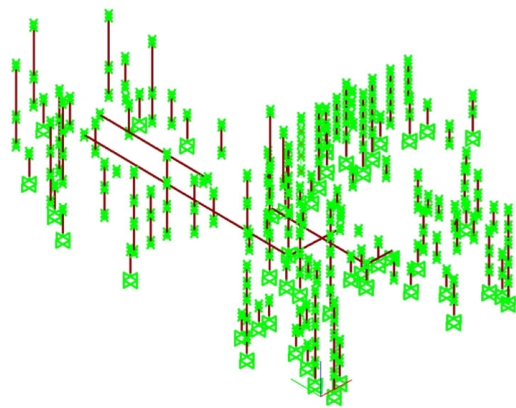


Fig. 5 Auxiliary-turbine-access control building complex model (Eem *et al.*, 2021c)

해석은 OpenSees 유한요소 프로그램을 활용하여 시간이력해석을 수행하였으며, 주요기기가 위치한 층에 대하여 가속도 시간이력을 도출하여 층응답스펙트럼을 작성하였다. 도출한 층응답스펙트럼을 활용하여 기기의 스펙트럴 가속도 값을 얻었다.

다수기의 필수전원상실을 구성하는 SSCs간의 지진손상 상관계수는 각 호기 동일기기에 대해서 적용을 하였으며, 지진응답 상관계수는 확률론적 지진응답해석으로부터 도출되었으며 내진성능 상관계수는 동일기기는 완전중속 그 외는 완전독립으로 가정을 하였다. SSCs간의 지진손상 상관계수는 Table 2에 나타내었다.

#### 4. 다수기 지진취약도 및 지진리스크 분석

확률론적 지진안전성 평가(Level 1)에서 원자력발전소의 지진안전성은 지진취약도와 CDF를 도출하게 된다. 본 장에서는 앞서 정의한 다수기의 필수전원상실사건에 대하여 지진취약도 및 CDF를 분석하였다. 총 4가지 CASE(A,B,C,D)에 대하여 비교 분석을 수행하였다. CASE A, B, C는 쌍둥이 호기의 필수전원상실사건에 대해 다루며 CASE D는 한 호기의 필수전원상실사건에 대한 결과이다. CASE A와 D는 필수전원상실사건을 구성하는 모든 SSCs간의 지진손상 상관계수를 독립으로 가정하였으며, CASE B는 SSCs간의 지진손상 상관계수를 Table 2의 결과를 사용하였다. CASE C는 SSCs간의 지진손상 상관계수를 완전중속으로 가정하였다. CDF는 Fig. 6(Eem *et al.*, 2021c)의 지진재해도 곡선을 활용하여 도출하였다. Fig. 6의 6개의 지진재해도 곡선을 각 확률을 고려하여 평균 지진재해도 곡선을 활용하였다.

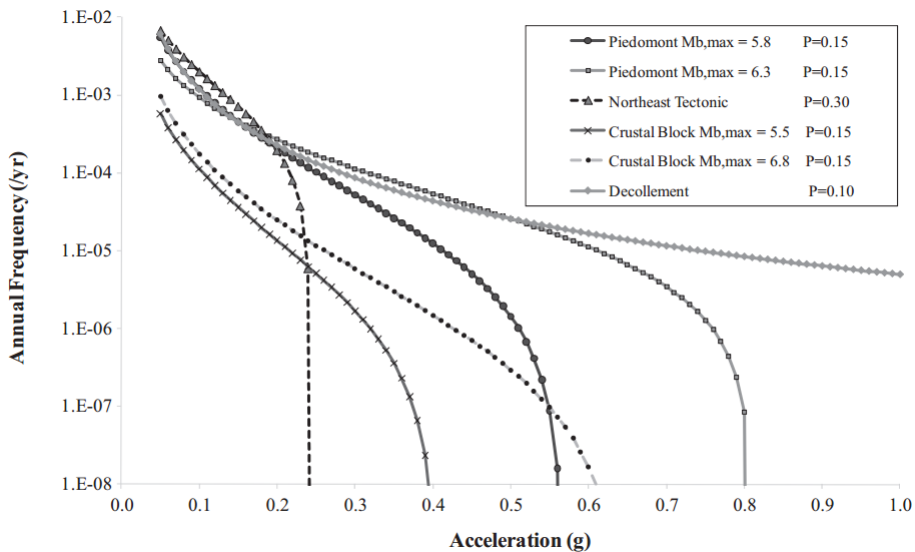


Fig. 6 Seismic hazard curves for all seismogenic zones at LGS site(Eem *et al.*, 2021c)

Table 2 Seismic failure correlation coefficient for the loss of essential power for twin unit

	SDGSF 1	SBCRC 1	SSWRC 1	SBRSF 1	SLCRC 1	SDCSF 1	SSEAU 1	SINRC 1	SRTRC 1	SDGSF 2	SBCRC 2	SSWRC 2	SBRSF 2	SLCRC 2	SDCSF 2	SSEAU 2	SINRC 2	SRTRC 2
SDGSF 1	1.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.545	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
SBCRC 1	0.000	1.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.367	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
SSWRC 1	0.000	0.000	1.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.596	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
SBRSF 1	0.000	0.000	0.000	1.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.472	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
SLCRC 1	0.000	0.000	0.000	0.000	1.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.601	0.000	0.000	0.000	0.000
SDCSF 1	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	1.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.554	0.000	0.000	0.000
SSEAU 1	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	1.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.665	0.000	0.000
SINRC 1	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	1.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.553	0.000
SRTRC 1	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	1.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.448
SDGSF 2	0.545	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	1.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
SBCRC 2	0.000	0.367	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	1.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
SSWRC 2	0.000	0.000	0.596	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	1.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
SBRSF 2	0.000	0.000	0.000	0.472	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	1.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
SLCRC 2	0.000	0.000	0.000	0.000	0.601	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	1.000	0.000	0.000	0.000	0.000
SDCSF 2	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.554	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	1.000	0.000	0.000	0.000
SSEAU 2	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.665	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	1.000	0.000	0.000
SINRC 2	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.553	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	1.000	0.000
SRTRC 2	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.448	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	1.000

Fig. 7은 필수전원상실사건에 대하여 쌍둥이 호기의 지진취약도 곡선(CASE A, B, C)과 한 개 호기의 지진취약도 곡선(CASE D)을 나타내었다. 고신뢰도저파손확률(HCLPF: High Confidence of Low Probability of Failure)는 CASE A의 경우 0.283g, CASE B는 0.294g, CASE C는 0.321g 그리고 CASE D는 0.321g이다. 지진재해도 곡선을 활용하여 지진리스크 즉, CDF를 계산하면, CASE A는  $4.562 \times 10^{-6}/yrs$ , CASE B는  $4.171 \times 10^{-6}/yrs$ , CASE C는  $2.578 \times 10^{-6}/yrs$ 이며, CASE D는  $2.597 \times 10^{-6}/yrs$ 이다.

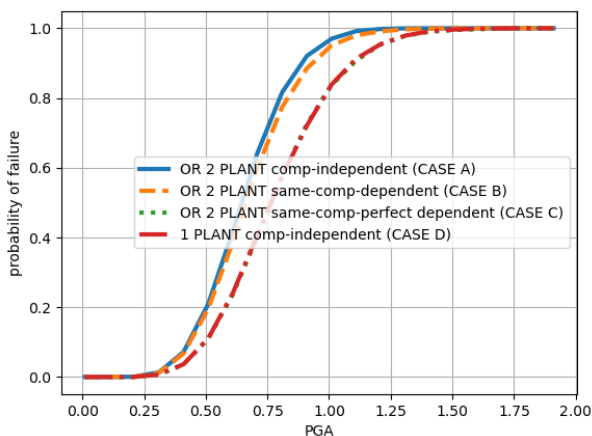


Fig. 7 Seismic fragility curve for each case(A,B,C,D)

필수전원상실사건을 구성하는 SSCs간의 지진손상 상관성을 독립으로 가정하는 경우, 두 개 호기(CASE A)의 손상확률이 한 개 호기의 손상확률(CASE D)보다 높은 것을 알 수 있다. 한 개 호기의 HCLPF를 대비 두 개 호기의 HCLPF 값이 11% 낮은 것을 확인할 수 있다. 쌍둥이 호기의 CDF 값은 한 개 호기의 CDF 값 대비 75% 크다.

지진손상 상관성을 고려하는 방법에 따라 두 개 호기의 필수전원상실사건에 대한 결과는 다음 같다. CASE A는 SSCs간의 지진손상 상관계수를 독립으로 CASE B는 두 개 호기의 동일기기에 대해서 적절한 지진손상 상관계수를 고려하였으며, CASE C는 두 개 호기의 동일기기에 대해 지진손상 상관계수를 완전종속으로 고려하였다. SSCs간의 적절한 지진손상 상관계수를 고려한 경우(CASE B)는 SSCs 간의 지진손상 상관계수를 완전독립으로 고려한 경우보다 고장확률이 낮으며, 완전종속으로 고려한 경우보다 고장확률이 높은 것을 알 수 있다. HCLPF의 경우 완전독립의 경우를 기준으로 CASE B의 HCLPF는 약 3% 낮으며 완전종속의(CASE C)보다 약 13% 낮은 것을 알 수 있다. CDF의 경우 CASE B는 CASE A에 비해 약 9% 낮으며 CASE C는 약 43% 낮다.

필수전원상실사건을 구성하는 두 호기 동일기기에 대하여 완전종속으로 고려한 경우(CASE C)와 한 호기내 필수전원상실사건을 구성하는 기기를 독립으로 고려한 경우(CASE D)와

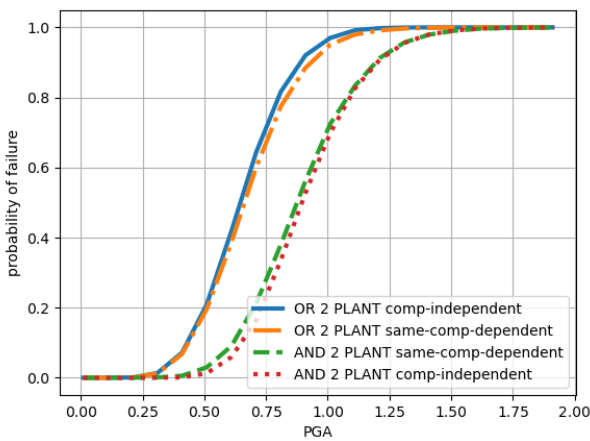


Fig. 8 seismic fragility curve for OR gate and AND gate

Table 3 Median and HCLPF values for each cases

CASE	Median(PGA)	HCLPF(g)
2 plant perfect independent(OR)	0.646	0.284
2 plant dependent(OR)	0.663	0.294
2 plant perfect independent(AND)	0.895	0.486
2 plant dependent(AND)	0.875	0.428

비교하면 지진취약도, HCLPF 및 지진리스크가 거의 동일한 것을 확인할 수 있다. 여기서, 유의하여야 할 점은 발생확률이 동일한 것이지 사고의 결과가 동일하다는 것을 의미하는 것은 아니다. 따라서 두 호기에 대한 지진안전성 평가를 수행할 시 한 호기 이상에서 사고가 발생할 확률과 두 호기 모두 사고가 발생할 확률을 분석할 필요가 있다.

두 개 호기에 대한 필수전원상실사건에 대해 SSCs간의 지진손상 상관성을 독립 및 종속, 그리고 한 호기 이상 사건 발생 및 두 호기 모두 사건 발생에 대한 지진취약도 곡선의 결과를 Fig. 8과 Table 3에 나타내었다. SSCs간의 지진손상 상관성을 독립 및 종속으로 고려한 경우 모두 한 호기 이상 사건이 발생할 확률(OR CASE)이 두 호기 모두 사건이 발생할 확률(AND CASE)보다 높은 것을 확인할 수 있다. SSCs간의 지진손상 상관성을 종속으로 고려한 경우 한 호기 이상에서 사고가 발생할 확률이 SSCs간의 지진손상 상관성을 독립으로 고려한 경우보다 필수전원상실사건 발생확률이 낮으며, 두 호기 모두 사고가 발생할 확률은 오히려 높은 것을 알 수 있다.

### 5. 요약 및 결론

지진사건은 광범위한 지역에 영향을 주어 다수의 원자력발전소가 동시에 영향을 받을 수 있다. 따라서 원자력발전소의 지진안전성 평가를 수행할 시 인접한 호기까지 고려하여 지진안전성 평가를 수행하여야 한다. 본 연구에서는 쌍둥이 호기

에 대한 필수전원상실사건에 대해 고장수목을 구성하고 필수전원상실사건을 구성하는 SSCs간의 지진손상 상관계수를 확률론적 지진응답해석을 통해 산출하였다. 두 개 호기의 필수전원상실사건에 대한 고장수목과 SSCs간의 지진손상 상관계수를 기반으로, External Event Mensuration System 프로그램을 활용하여 지진취약도 및 노심손상빈도를 성공적 도출하였다. SSCs간의 지진손상 상관성을 고려하여 다수 호기의 지진취약도 및 노심손상빈도를 충분히 도출 가능함을 확인하였으며, SSCs간의 지진손상 상관성을 고려하면 SSCs간의 지진손상 상관성을 독립으로 고려하는 경우와 결과가 달라지는 것을 확인하였다. 다수기의 지진안전성 평가에서 지진사건에 대해 SSCs간의 상관성을 완전독립으로 가정하는 것은 매우 보수적임을 확인할 수 있었다. 따라서 다수호기의 확률론적 지진안전성 평가를 수행하는데 적절한 SSCs간의 지진손상 상관계수를 산정하는 것의 중요성을 확인하였다. 다수기의 지진안전성 평가를 수행하는 경우 다수 호기 혹은 1호기 이상에서 사건이 발생할 확률 및 사고의 결과가 달라지므로 구분하여 안전성 평가를 수행하여야 함을 확인하였다.

### 감사의 글

본 연구는 2020년도 한국연구재단의 지원을 받아 수행한 연구과제입니다(No. 2020R1G1A1007570).

### References

Choi, G.G., Jung, W.S., Park, S.K. (2021) Sensitivity Study on the Correlation Level of Seismic Failures in Seismic Probabilistic Safety Assessments, *Energ.*, 14(10), 2955.

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, *Nucl. Eng. & Des.*, 147(2), pp.197~210.

Eem, S., Choi, I.K. (2019a) Influence Analysis of Seismic Risk due to the Failure Correlation in Seismic Probabilistic Safety Assessment, *J. Earthq. Eng. Soc. Korea*, 23(2), pp.101~108.

Eem, S., Choi, I.K. (2019b) Influence in Seismic Fragility of Systems due to Seismic Correlation, *In EESK spring workshop*, c2019. pp.115~116.

Eem, S., Kwag, S., Choi, I.K., Jeon, B.G., Park, D.U. (2021a) The Effects of Seismic Failure Correlations on the Probabilistic Seismic Safety Assessments of Nuclear Power Plants, *J. Earthq. Eng. Soc. Korea*, 25(2), pp.53~58.

Eem, S., Choi, I.K., Yang, B., Kwag, S. (2021b) Methodology of Seismic Response Correlation Coefficient Calculation for

Seismic Probabilistic Safety Assessment of Multi-unit Nuclear Power Plants, *Nucl. Eng. & Technol.*, 53(3), pp.967~973.

**Eem, S., Choi, I.K., Cha, S.L., Kwag, S.** (2021c) Seismic Response Correlation Coefficient for the Structures, Systems and Components of the Korean Nuclear Power Plant for Seismic Probabilistic Safety Assessment, *Ann. Nucl. Energy*, 150, 107759.

**Kwag, S., Choi, E., Eem, S., Ha, J.G., Hahm, D.** (2021) Toward Improvement of Sampling-based Seismic Probabilistic Safety Assessment Method for Nuclear Facilities using Composite Distribution and Adaptive Discretization, *Reliab. Eng. & Syst. Saf.*, 107809.

**Kwag, S., Eem, S., Park, J., Choi, I.K.** (2020) Sampling-based Approach for Seismic Probabilistic Risk Assessment, *J. Comput. Struct. Eng. Inst. Korea*, 33(2), pp.129~136.

**Smith, P.D., Dong, R.G., Bernreuter, D.L., Bohn, M.P., Chuang, T.Y., Cummings, G.E., Smith, P.D., Dong, R.G., Bernreuter, D.L., Bohn, M.P., Chuang, T.Y., Cummings, G.E., Johnson, J.J., Mensing, R.W., Wells, J.E.** (1981) Seismic Safety Margins Research Program, Phase I Final Report-Overview (No. NUREG/CR-2015 (VOL. 1)). *Lawrence Livermore Laboratory*, c1981.

**US Nuclear Regulatory Commission** (1990) Procedures for the External Event Core Damage Frequency Analyses for NUREG-1150 (NUREG/CR-4840). Washington, DC.

**US Nuclear Regulatory Commission** (2014) Regulatory Guide 1.60: Design Response Spectra for Seismic Design of Nuclear Power Plants. c2014.

## 요 지

후쿠시마 원전사고 발생으로 다수기의 지진안전성에 관한 연구의 필요성이 부각되었다. 한 부지에 건설된 원자력발전소의 경우 유사한 지진응답을 보이기 때문에 적게나마 원자력발전소 SSCs간의 지진손상에 대하여 상관성이 존재하므로 합리적 지진안전성 평가를 위하여 지진손상 상관성을 고려하여야 한다. 본 연구에서는 쌍둥이 호기의 필수전원상실사건에 대하여 확률론적 지진안전성 평가를 수행하였다. 적절한 지진손상 상관계수를 도출하기 위하여 확률론적 지진응답해석을 수행하여 적용하였다. External Event Mensuration System 프로그램을 활용하여 다수기의 필수전원상실사건의 고장수목을 구성하여 지진취약도 및 지진리스크를 분석하였다. 또한 SSCs간의 지진손상 상관성을 완전독립 및 완전종속으로 고려하여 비교 분석을 수행하였다.

**핵심용어** : 다수기, 상관성, 시스템, 지진해석, 내진성능, 리스크