

지진취약도 곡선의 응답변수에 대한 상관계수 평가 및 변수별 조합

김시영¹·김정한^{2†}

¹부산대학교 토목공학과 석사과정, ²부산대학교 토목공학과 조교수

Evaluation and Combination of Correlation Coefficient for Response Variable of Seismic Fragility Curve

Si Young Kim¹ and Jung Han Kim^{2†}

¹Master Course, Department of Civil Engineering, Pusan National Univ., Busan, 46241, Korea

²Assistant Professor, Department of Civil Engineering, Pusan National Univ., Busan, 46241, Korea

Abstract

Seismic fragility assessments include a procedure to combine the random variables of response and capacity to produce the relationship between failure probability and seismic intensity. The evaluation of the failure probability of simultaneous multiple failures of two or more components assumes that the failure probability of each component is independent of those of the others. However, a correlation is expected to exist because several random factors have the same cause. The multiple-failure probability can differ depending on this correlation and may be unconservative without considering the seismic correlation. Therefore, a practical methodology for fragility assessment should be evaluated using the seismic correlation and correlation coefficient for each random variable. In this study, several random variables were selected for numerical evaluation of the correlation coefficient. The correlation coefficient was then compared with each variable and the combined variables. The correlation coefficient using simplified and complex models were also compared to determine and analyze the differences between each of the approaches.

Keywords : probabilistic seismic safety assessment, seismic correlation, multiple failure, response spectrum, natural period

1. 서론

확률론적지진안전성평가(Seismic Probabilistic Safety Assessment, Seismic PSA)를 위한 지진취약도 평가는 지진 세기에 대한 손상확률을 나타내어 해당 구조물, 기기, 시스템 등의 파괴 또는 손상확률을 추정하는 과정이다. 이때 사용되는 지진취약도 곡선은 수평축에 지진 세기, 수직축은 0~1.0으로 표현되는 손상확률로 이루어진다. 이 지진취약도 곡선은 대수정규확률분포 모델로 표현되며 중앙값 성능(Median Capacity)과 무작위성(Randomness) 및 불확실성(Uncertainty)에 대한 대수 표준편차가 사용된다. 이러한 지진취약도 평가는 Kenndy와 Ravindra(1984)에 의해 개발되어 지속적으로 발전하여 왔다.

한편 원자력발전소(원전)의 경우 발전소 전체 시스템 손상

을 막기 위해 동일 기능을 하는 주요 안전 관련 기기를 두 개 이상 설치하여 여유성(Redundancy)을 확보한다. 그러나 이러한 기기들은 설치 위치에 따라 입력되는 진동이 달라질 수 있다. 이때 입력 지진동의 특성이 비슷하고 각 기기의 손상 모드가 비슷한 경우, 이 기기들의 손상 관계는 완전히 독립이라고 할 수 없다. 이러한 진동 특성의 유사성에 의해 기기들의 손상확률이 서로 연계되는 특성을 지진상관성(Seismic Correlation)이라 하며 0~1.0 사이의 상관계수 값에 따라 상관 정도를 표현한다. 즉, 하나의 기기에 대한 손상확률을 산정할 때는 영향이 없지만 두 개 이상의 기기가 동시에 손상되는 경우의 확률은 상관성 유무에 따라 달라진다. 원전 리스크 평가에 지진상관성의 중요성은 U.S.NRC의 WASH-1400 보고서(Norman, 1975)에서 제시되었으며, Lawrence Livermore National Laboratory

[†]Corresponding author:

Tel: +82-51-510-2352; E-mail: jhankim@pusan.ac.kr
Received September 29 2020; Revised October 14 2020;
Accepted October 15 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.

에서 수행한 SSMRP(Wells *et al.*, 1983)에서 상관성에 의한 지진 리스크에 대해 연구하였다. 각 기기의 손상확률의 상관관계가 높은 경우, 기기 간의 예상되는 손상확률의 여유성은 낮아지는 결과를 보였다. 이는 손상확률이 독립적이라고 가정한 것보다 현실적인 결과라 할 수 있다.

Ebisawa 등(2015)은 여러 변수를 고려하여 원전 기기를 대상으로 상관관계 해석을 한 바가 있지만, 아직까지 각 확률변수의 상관계수를 어떻게 구하고 통합하는지에 대한 합의된 사례나 절차는 없다. Ebisawa의 연구에서는 모든 취약도 변수들을 모두 반영하여 상관계수를 산정하였는데 일반적으로 원전의 지진취약도는 변수는 변수분리법에 의해 산정되므로 상관계수도 변수들에 따라 각각 평가할 필요가 있다. 따라서, 이 연구에서는 변수별 상관계수를 해석적으로 구하고 적용한 모든 변수를 통합하여 구한 후, 이들의 비교를 통해 변수별 상관계수의 타당성을 검증하고자 하였다. 그리고 복잡한 원전 보조 건물 모델과 이를 단순화시킨 2 자유도 모델에 대하여 변수 통합 상관계수를 비교하여 단순 모델의 해석적 평가 적용 가능 여부를 검증하고자 하였다.

2. 지진상관성과 상관계수 연구

2.1 지진취약도 함수

원전의 지진안전성 평가는 일반적으로 확률론적 방법으로 이루어지고 있다. 이때 구조물 혹은 기기의 손상확률을 구하기 위해서는 지진취약도 곡선이 필요하다. 지진취약도 곡선의 예는 Fig. 1과 같이 지진 세기에 따른 구조물 및 기기의 파괴확률로 나타내며 식 (1)로 표현된다.

$$F(a) = \Phi\left[\frac{\ln(a/A_m) + \beta_U \Phi(Q)}{\beta_R}\right] \quad (1)$$

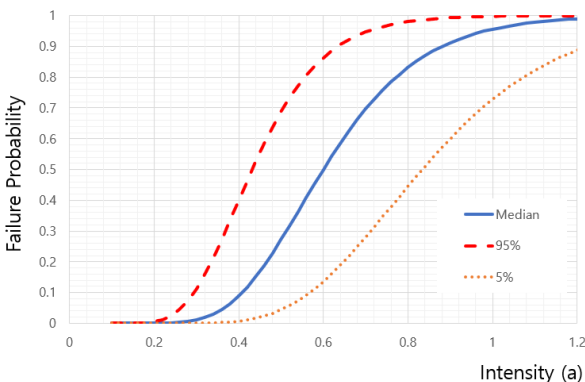


Fig. 1 Seismic fragility curve

여기서, Φ 는 누적 정규분포함수, a 는 최대지반가속도(Peak Ground Acceleration, PGA), A_m 은 지진취약도의 중앙값(Median), Q 는 불확실성에 대한 신뢰도이며, 대수표준편차 β 는 무작위성과 불확실성에 의한 표준편차로 β_R 과 β_U 로 구분하여 대입한다. 여기서 무작위성에 대한 표준편차 β_R 은 취약도 곡선의 기울기를 결정하는 변수이다. 불확실성에 대한 표준편차 β_U 는 취약도 곡선의 신뢰도에 따라 중앙값을 결정하는 변수이다.

2.2 지진상관성을 고려한 손상확률 계산

기기에 입력되는 지진동은 구조물의 응답(Response)으로 표현되고 진동에 대한 기기의 성능은 성능(Capacity) 또는 내력(Strength)으로 표현된다. 이때 n 개의 기기에 대한 응답이나 성능이 독립이라고 가정하면 동시손상확률은 각 기기의 손상확률의 곱이다. 하지만 이들이 상관성을 가지고 있으면 단순 곱으로 동시손상확률을 계산할 수 없다. 만약 상관계수가 1.0 이라면 두 기기가 동일한 거동을 한다는 의미이므로 두 개 기기의 동시손상확률은 한 개 기기 손상확률의 제곱이 아닌 한 개 기기와 손상확률과 동일한 값을 가지게 된다. 상관계수가 -1과 1의 사이인 경우 다중적분방법 혹은 SSMRP 방법이라는 식 (2)를 통해 표현한다.

$$P = \frac{1}{(2\pi)^n |C|^{1/2}} \times \int_0^\infty \dots \int_0^\infty \exp\left[-\frac{1}{2}(z - \mu_z)^T C^{-1}(z - \mu_z)\right] dz_1, \dots, dz_n \quad (2)$$

여기서, μ 는 평균값을 나타내며 $\mu_z = \mu_x - \mu_y$ 이다. C 는 각 기기의 상관행렬로서 응답과 성능의 상관계수와 표준편차들로부터 계산된다. 상관행렬에 들어가는 값은 -1~1 사이의 값으로 기기 사이에 상관성이 클수록 1에 가까운 값을 가지게 된다. 일반적으로 상관계수는 0.1~0.3이면 약한 선형관계, 0.3~0.7이면 뚜렷한 선형관계, 0.7~1.0이면 강한 선형관계를 의미한다.

대상 구조물에 i 부터 j 까지의 기기가 있다고 가정하면 i 번째 기기와 j 번째 기기의 상관계수는 식 (3)과 같이 계산할 수 있다.

$$\rho_{i,j} = \frac{\beta_{Ri} \cdot \beta_{Rj}}{\sqrt{(\beta_{Ri}^2 + \beta_{Si}^2)} \cdot \sqrt{(\beta_{Rj}^2 + \beta_{Sj}^2)}} \cdot \rho_{Ri, Rj} + \frac{\beta_{Si} \cdot \beta_{Sj}}{\sqrt{(\beta_{Ri}^2 + \beta_{Si}^2)} \cdot \sqrt{(\beta_{Rj}^2 + \beta_{Sj}^2)}} \cdot \rho_{Si, Sj} \quad (3)$$

여기서, ρ 는 상관계수이며 β_R 은 응답에 대한 대수표준편차, β_S 는 성능에 대한 대수표준편차이다. 상관성 개념을 도입한 동

시손상확률을 계산을 하려면 각각의 확률변수에 대한 상관행렬 C 를 결정해야 한다.

2.3 지진상관성 선행 연구

기존 확률론적지진안전성 평가에서는 각 손상 사건에 대해 독립적으로, 즉 보수적인 방식으로 처리해 왔다. 하지만 EPRI-NP3562 보고서(Ravindra *et al.*, 1984)에서 구조물 내에 위치한 구조 요소와 기기에 대해 지진으로 인한 손상확률 사이에 상관성이 있을 가능성을 인지하였으며, 이는 SSMRP 연구에서 최초로 다루어졌다. NUREG-1150 보고서(Bohn and Lambright, 1990)에서는 미국의 Zion 원전 등 5개 원전에 연구목적으로 지진상관성이 적용되었다. 여기서는 완전한 상관관계와 부분적 상관관계의 노심 손상 빈도에 미치는 영향에 대해 평가하였다. 수행한 안전성 평가 결과에 따르면 지진 상관성을 고려할 경우 지진리스크 값의 자릿수가 바뀌는 결과를 보였다. 지진상관성 연구들에 대한 비교는 NUREG/CR-7237 보고서(Budnitz *et al.*, 2017)에 자세히 기술되어 있다. 일본 JAERI에서는 지진상관성에 대한 연구로 지진상관성평가 소프트웨어 SECOM을 개발하여 DQFM(Direct Quantification of Fault Tree using the Monte Carlo Simulation) 방법을 통해 손상확률을 계산하였다.

2.4 상관계수 평가 연구

상관성에 의한 동시손상확률을 평가하는 방법론과는 별개로 계산에 필요한 입력값인 상관계수를 결정하는 방법이 필요하다. NUREG/CR-4840 보고서(Bohn and Lambright, 1990)에서는 조건에 따른 대략적인 상관계수에 대한 Thumb Rules를 제시하고 있다. 같은 층에 위치한 같은 주파수 민감 구간을 가지는 기기의 경우 1.0, 같은 층에 위치한 다른 민감 구간을 가지는 기기의 경우 0.5, 다른 층에 위치한 같은 민감 구간을 가지는 기기의 경우 0.75 등으로 상관계수를 제시하고 있다. Kim과 Kim(2020)은 다중기기 취약도 평가에 필요한 지진 상관계수를 조합하는 절차를 제시했다. 원전 격납 건물과 내부구조물을 대상으로 1차 및 2차 고유진동수에 맞는 기기를 대상으로 감쇠비와 입력 지진을 확률변수로 고려해 상관행렬 C 를 계산하였다. 그 결과 같은 건물 내부의 기기들은 상관관계를 보였으나 건물이 다를 시 상관관계가 작아지는 결과를 보였다. 또한 Ebisawa 등(2015)은 원전의 비등경수로(Boiling Water Reactor) 다수기를 대상으로 감쇠비와 고유진동수를 확률변수로 고려하여 상관성을 평가했다. 그 결과 주기가 유사할수록 감쇠비의 변화에 관계없이 강한 선형관계를 보이는 결과를 보였다. Eem과 Choi(2019)은 시스템의 조합 방법에 따라서 손상확률이 달라짐을

제시했다. 대상 기기 A, B가 병렬(교집합)로 조합되면 상관성이 큰 경우 동시손상확률이 높아지고, 직렬(합집합)로 조합되면 상관성이 작은 경우 동시손상확률이 높아짐을 확인하였다.

3. 해석 확률변수와 모델링

3.1 확률변수

지진취약도에 대한 가정사항을 적용하면 상관성은 구조물의 성능, 구조물의 응답, 기기의 성능, 기기의 응답으로 분류하여 제시할 수 있다. 이 연구에서는 해석적으로 구현이 가능하고 상관성에 큰 영향을 미치는 구조물의 응답에 관한 확률 변수만을 택하여 상관계수를 평가하였다. 해석에 사용되는 응답에 관한 구조물의 확률 변수는 Table 1과 같다. 위 확률 변수 중 지진응답해석으로 상관성을 평가할 수 있는 변수들 4가지를 선정하였다. 모드 형상 및 비틀림은 단순화된 집중질량모델에서는 고려할 수 없어 배제하였고, 지반-구조물 상호작용 역시 고정 기초로 가정하여 배제하였다. 지반운동에서는 설계스펙트럼에 부합하면서 시간이력에서 발생 가능한 변동성을 고려하였으며, 추가적으로 수평 양방향의 세기 차이에 의해 발생하는 최대방향 응답의 변동성에 대해 고려하였다. 기기 손상이 구조물의 탄성 거동 영역에서 발생한다고 가정하여 구조모델은 탄성으로 모델링하였다.

상관성을 평가하기 위한 확률변수는 구조물 감쇠비, 구조물 고

Table 1 Structure response variables for fragility evaluation

Structure Response Category	Structure Response Variable	Variable Symbol	Variability	
			β_R	β_U
Ground motion	Spectral shape	FSA	✓	
	Horizontal direction peak response variability	FHDPR	✓	
	Vertical to horizontal (V/H) variability	FV	✓	
Damping	Damping	$F\delta$ S		✓
Modeling	Frequency	Ffs		✓
	Model fidelity	FMs		✓
	Torsional coupling	FTC		✓
Structure response phasing	Time-history	FTH	✓	✓
	Mode combination	FMCs	✓	
Foundation-structure interaction	Ground motion incoherence	FGMI		✓
	Soil - structure interaction analysis	FSSI		✓
	Vertical spatial variation	FVSV	✓	✓
Inelastic structure response	Inelastic structure response	FIR	✓	✓

Table 2 Structure response variables for analysis

Response Variable	Variable Symbol	Variability	
		β_R	β_U
Structure Damping	$F\delta$ S		0.35
Time History	FTH	0.15(Single Set)	0(5 Sets) 0.15(Single Set)
Structure Frequency	Ffs		0.15-0.35
Horizontal Direction peak Response Variability	FHDPR	0.13	

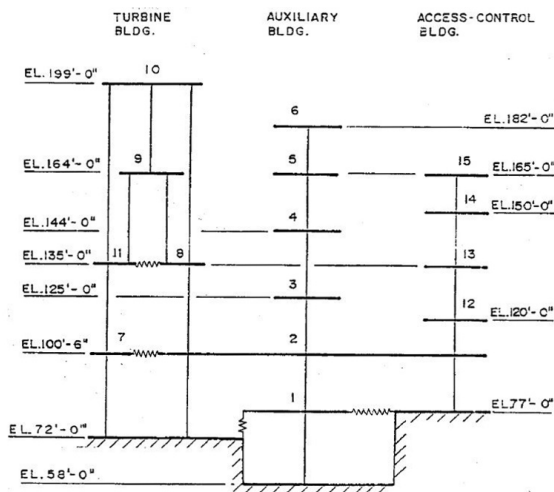


Fig. 2 Seismic model for aux-building

유진동수, 입력지진의 시간이력, 수평방향 최대응답(Horizontal Direction Peak Response, HDPR)으로 총 네 개를 선정하였다. 선정된 변수는 Table 2에서 제시하였다. 피어슨 상관계수를 이용한 상관성 평가에서 David(2009)는 최소한의 표본 수를 25 개 이상을 사용하도록 하고 있다. 이에 각 계수의 표준편차에 대한 확률분포를 적용하여 각각 30개의 해석 케이스를 생성하였다. 상관성을 고려하는 확률 변수의 변동성은 무작위성과 불확실성을 따로 구분하지는 않았다.

3.2 모델링

이 논문에서는 기기 설치 위치 간의 상관성을 고려한 해석적 상관계수 평가 방법에 관한 연구를 수행하였다. 상관성 평가를 위해서 원전 보조건물인 Fig. 2에서 절점 1~6에 해당하는 구조물의 진동 특성을 가지는 2자유도 집중질량모델(Lumped Mass Stick Model)을 Fig. 3과 같이 구성하였다. 대상 건물 1차 모드의 최대응답이 발생하는 최상단 지점과 2차모드의 변곡점에 해당하는 중간 지점 위치로 대상 기기의 설치 위치를 가

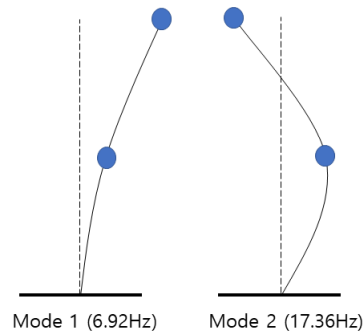


Fig. 3 Mode shapes and natural frequencies of 2-DoF model

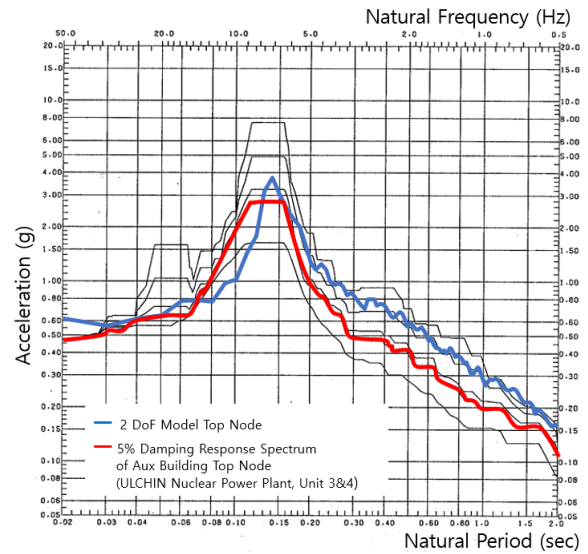


Fig. 4 Design response spectra for aux-building

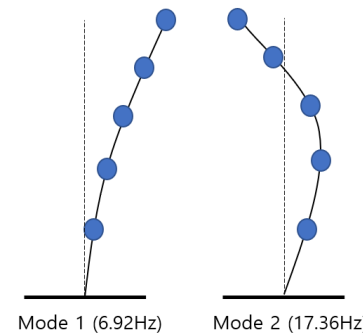


Fig. 5 Mode shapes and natural frequencies of aux building model

정하였다. 이 2 자유도 모델은 해석적 상관계수 평가를 보다 용이하게 하기 위해 복잡한 원전 구조물을 단순화하기 위한 목적이고 타당성을 보이기 위해 실제 원전 보조건물의 층응답스펙트럼(Fig. 4)을 참고하여 스펙트럼 형상을 비교 후 사용하였다. 모델은 휨 변형이 발생하지 않고 수평 변위만 발생하는 전단 건물로 작성하였으며, 질량과 강성을 조정하여 2자유도 구조물의 1, 2차 고유주기가 원전 보조건물의 1, 2차 고유주기와 맞

도록 조정하였다. Fig. 5는 Fig. 2의 보조건물 부분에 대한 1차 모드 고유진동수 6.92Hz, 2차모드 고유진동수 17.36Hz를 가지는 모드형상이다.

Fig. 6에서 제시하는 원전 보조 건물의 최상단층(Roof Floor, 6th Floor)와 중간층(4th Floor)를 각각 1차모드의 최상단 지점, 2차모드의 중간 지점을 해석 대상으로 선정하였다. 상관성 해석 대상 기기는 위치와 기기의 고유진동수에 따라 두 가지씩 네 가지 조합에 대해 가정하였다. 이 두 층에 위치한 기기의 감쇠비는 5%로 모두 동일하게 가정하였고, 고유진동수가 다른 두 개의 기기가 설치되어 있음을 가정한 후, 위치한 기기들에 대한 응답의 상관계수 평가를 수행하였다.

- Top_6.92Hz: 최상단 지점에 위치하며 건물의 1차모드 고유진동수와 유사한 고유진동수를 가지는 기기(6.92Hz)
- Top_17.36Hz: 최상단 지점에 위치하며 건물의 2차모드 고유진동수와 유사한 고유진동수를 가지는 기기(17.36Hz)
- Mid_6.92Hz: 중간 지점에 위치하며 건물의 1차모드 고유진동수와 유사한 고유진동수를 가지는 기기(6.92Hz)
- Mid_17.36Hz: 중간 지점에 위치하며 건물의 2차모드 고유진동수와 유사한 고유진동수를 가지는 기기(17.36Hz)

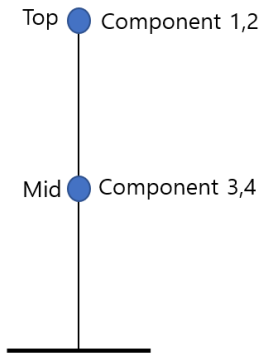


Fig. 6 Location of components

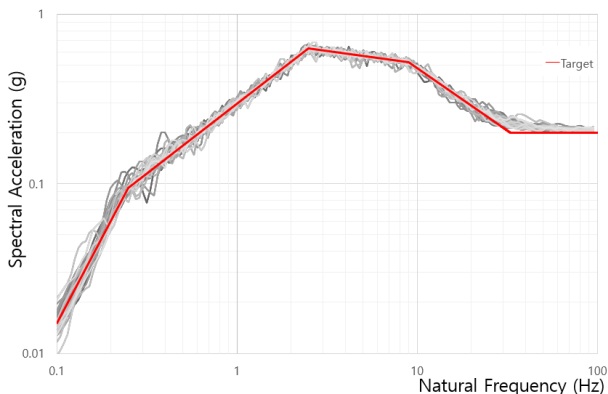


Fig. 7 Response spectra of synthesized time histories

Fig. 7의 입력지진 응답스펙트럼은 Reg Guide 1.60(USNRC, 2014)에서 규정하고 있는 Peak Ground Acceleration 0.2g의 5% 감쇠비를 가진 스펙트럼에 부합하는 스펙트럼으로서 추계학적으로 시간이력을 생성하여 모델에 입력하였다.

4. 독립 변수 해석 결과

모든 변수를 함께 고려한 통합적인 상관성 평가에 앞서 각각의 확률 변수들에 대하여 상관계수 평가를 위한 해석을 수행하였다. 다음은 구조물 감쇠비, 구조물 진동수, 시간이력세트, 수평방향 최대응답에 대한 분포 근거와 상관계수 해석 결과이다.

4.1 구조물 감쇠비

감쇠로 인한 응답의 변동성은 불확실성에 대해서만 고려한다. SSMRP에서 구조물 감쇠의 중앙값은 5%, 대수표준편차는 0.35를 제시하고 있다. 이를 확률분포를 적용하여 30개의 해석 케이스를 생성하여 모델에 적용하였다. 층응답스펙트럼을 구하기 위한 기기의 감쇠비는 모두 5%로 동일하다고 가정하였다.

Fig. 8은 감쇠비의 변동에 대한 층응답스펙트럼이고 네 기기에 작용하는 지진하중은 각 기기 진동수에서의 스펙트럼가속도 값에 해당한다. 이들의 상관계수와 표준편차는 Table 3과 같다. 감쇠비의 변동은 구조물 전체에 작용하므로 층별 기기 간의 상관성은 1.0에 가까운 강한 선형관계를 가진다.

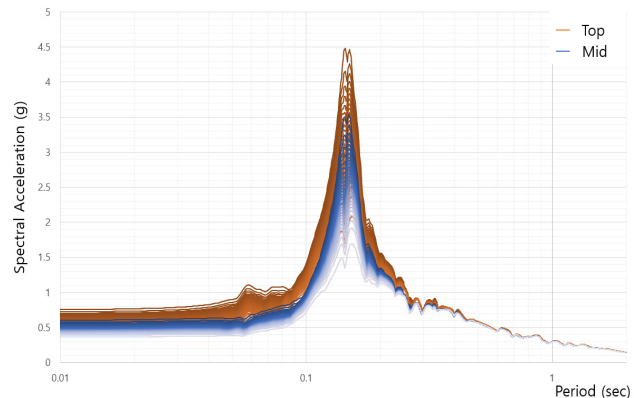


Fig. 8 Response spectra by damping variation

Table 3 Components correlation coefficients for damping

Correlation	Top_6.92Hz	Top_17.36Hz	Mid_6.92Hz	Mid_17.36Hz
Top_6.92Hz	1	0.999	0.998	0.997
Top_17.36Hz		1	0.999	0.997
Mid_6.92Hz			1	0.997
Mid_17.36Hz	sym.			1
STDEV.	0.182	0.146	0.211	0.118

4.2 구조물 진동수

고유진동수는 구조물의 질량과 강성의 비에 의해 결정된다. 이때 입력되는 재료 특성의 불확실성이 주는 효과가 모델에 반영되는 구조물의 고유진동수를 변화시킨다. 이에 구조물의 진동수 변화에 따른 각 층의 응답 차이에서 발생하는 상관성에 대해 해석하였다. 구조물의 강성을 변경하여 1차모드 주기를 SSMRP에서 제시한 대수표준편차 0.35로 하는 30개의 진동수 분포를 가지는 구조모델을 만들어 해석하였다.

Fig. 9는 진동수의 변동에 대한 층응답스펙트럼이고 마찬가지로 각 기기 진동수에서의 스펙트럼가속도 값에 해당하는 네 기기에 대한 상관계수와 표준편차는 Table 4와 같다. 구조물의 고유진동수 변화로 고유진동수가 다른 기기들은 상관성이 다소 낮아지는 경향을 보인다. 반대로 기기가 위치한 층이 다르더라도 같은 고유진동수를 가진 기기들은 상관성이 1에 가까운 결과를 보인다.

4.3 시간이력세트

목표응답스펙트럼에 부합하게 생성된 지진파 시간이력의 불확실성을 고려하였다. Reg Guide 1.60에서 규정하고 있는 Peak Ground Acceleration 0.2g의 5% 감쇠비를 가진 스펙트럼에 부합하는 가속도 시간이력을 체계적으로 30개 무작위 생성한 후 모델에 적용하였다. Fig. 10은 시간이력세트의 변동에 대한 응답스펙트럼이고, 네 기기의 상관계수와 표준편차는 Table 5와 같다.

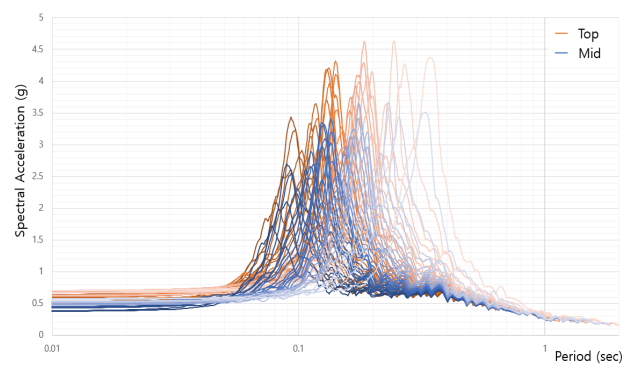


Fig. 9 Response spectra by natural frequency variation

Table 4 Components correlation coefficients for frequency

Correlation	Top_6.92Hz	Top_17.36Hz	Mid_6.92Hz	Mid_17.36Hz
Top_6.92Hz	1	0.771	0.996	0.748
Top_17.36Hz		1	0.749	0.900
Mid_6.92Hz			1	0.733
Mid_17.36Hz	sym.			1
STDEV.	0.176	0.208	0.173	0.132

4.4 수평방향 최대응답

지반운동의 변동성에 영향을 미치는 변수 중 수평 방향 최대응답(HDPR)을 선정하였다. HDPR의 변동성은 양방향 수평 성분의 대표 스펙트럼가속도에 대한 임의의 한 방향의 수평 스펙트럼가속도의 비의 대수표준편차로 표현된다. 기기는 축대칭이라고 가정하여 SSMRP에 제시된 네 가지 경우 중 축대칭 기기의 최대방향응답(Axisymmetric Largest Direction Response Average Direction Response)으로 양방향 수평성분의 조합을 고려하였다.

이 축대칭 수평방향 최대응답의 상관계수 해석절차는 다음과 같다. X축 Y축에 대한 입력 지진파 각각 30개를 생성하여 모델에 입력한 후 구조물을 방향별로 해석한다. 이로부터 각 층의 기기에 작용하는 층응답 시간이력을 수평 양방향에 대해

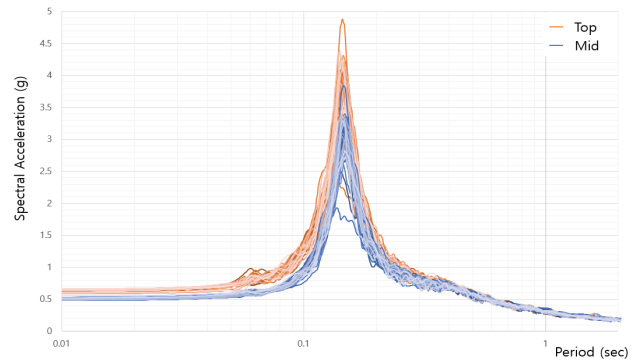


Fig. 10 Response spectra by time history variation

Table 5 Components correlation coefficients for time history

Correlation	Top_6.92Hz	Top_17.36Hz	Mid_6.92Hz	Mid_17.36Hz
Top_6.92Hz	1	0.540	0.995	0.319
Top_17.36Hz		1	0.498	0.002
Mid_6.92Hz			1	0.350
Mid_17.36Hz	sym.			1
STDEV.	0.118	0.064	0.124	0.040

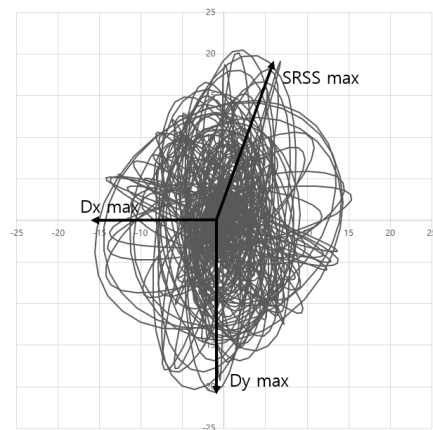


Fig. 11 Displacement response on horizontal plane(mm)

구할 수 있다. 이 응답 시간이력이 기기의 입력지진동으로 작용하게 되므로 기기를 단자유도모델로 구성하여 그 응답이력을 구한다. 이 때 Fig. 11처럼 각 단자유도 모델의 X축, Y축에 따른 응답 변위를 매 시간 단계에 따라 벡터합으로 구한다. HDPR은 식 (4)와 같이 각 축의 최대 응답 변위 2개를 기하평균한 것에 대한 벡터합으로 구해진 최대응답변위의 비로 구해진다. 이 HDPR의 표준편차와 상관계수를 평가하는 절차로 해석했다. 이 HDPR에 대한 네 기기의 상관계수와 표준편차는 Table 6과 같다.

$$Ratio = \frac{SRSS_{max}}{\sqrt{Dx_{max} \times Dy_{max}}} \quad (4)$$

Table 6 Components correlation coefficients for HDPR

Correlation	Top_6.92Hz	Top_17.36Hz	Mid_6.92Hz	Mid_17.36Hz
Top_6.92Hz	1	0.566	0.993	0.609
Top_17.36Hz		1	0.585	0.670
Mid_6.92Hz			1	0.618
Mid_17.36Hz	sym.			1
STDEV.	0.068	0.068	0.068	0.075

5. 변수 통합 해석 결과

통합된 변수들의 파괴확률에 대한 상관성을 고려하기 위해 Latin Hypercube Sampling 방법을 이용하여 감쇠비, 진동수, 시간이력세트에 대한 변수를 무작위 조합하여 30개 케이스를 생성하였다. 2 자유도 모델과 실제 원전 보조건물 모델의 상관계수 해석의 차이를 비교하기 위해 원전 보조건물을 대상으로 통합 변수에 대한 상관계수 평가를 수행하였다. 해석은 2 자유도 모델과 동일한 방식으로 수행하였으며 Latin Hypercube Sampling으로 조합된 30개의 케이스에 대한 응답스펙트럼을 Fig. 12에 제시하였다. Fig. 13에서 2 자유도 모델로 구해진 변수 통합 상관계수, 보조건물모델로 구해진 변수 통합 상관계수, 2 자유도 모델로 구해진 변수별 상관계수를 이용하여 조합식 식 (5)으로 계산된 상관계수 결과를 제시하였다.

$$\rho_{i,j} = \frac{\beta_{\delta i} \cdot \beta_{\delta j}}{\sqrt{(\beta_{\delta i}^2 + \beta_{\delta i}^2)} \cdot \sqrt{(\beta_{\delta j}^2 + \beta_{\delta j}^2)}} \cdot \rho_{\delta i, \delta j} + \frac{\beta_{f_{si}} \cdot \beta_{f_{sj}}}{\sqrt{(\beta_{f_{si}}^2 + \beta_{f_{si}}^2)} \cdot \sqrt{(\beta_{f_{sj}}^2 + \beta_{f_{sj}}^2)}} \cdot \rho_{f_{si}, f_{sj}} + \frac{\beta_{THi} \cdot \beta_{THj}}{\sqrt{(\beta_{THi}^2 + \beta_{THi}^2)} \cdot \sqrt{(\beta_{THj}^2 + \beta_{THj}^2)}} \cdot \rho_{THi, THj} \quad (5)$$

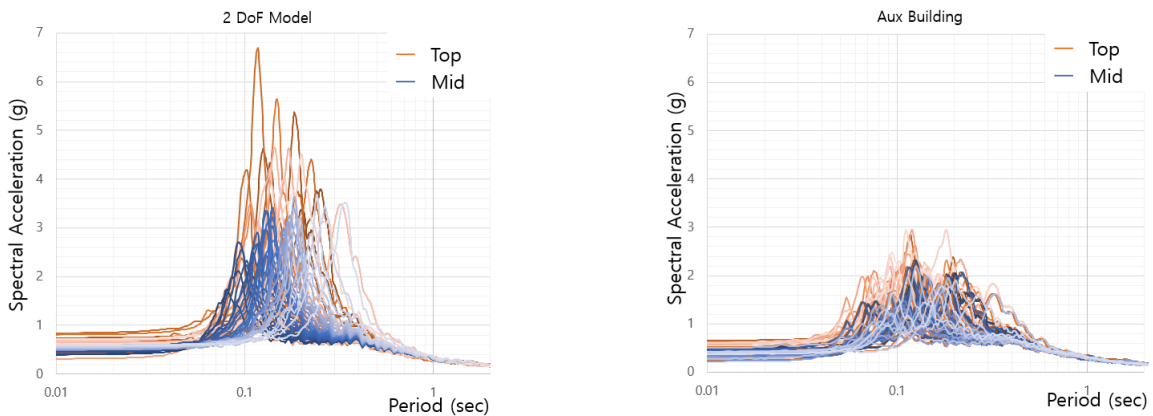


Fig. 12 Response spectra for (a) 2 DoF model and (b) aux building with combined variables

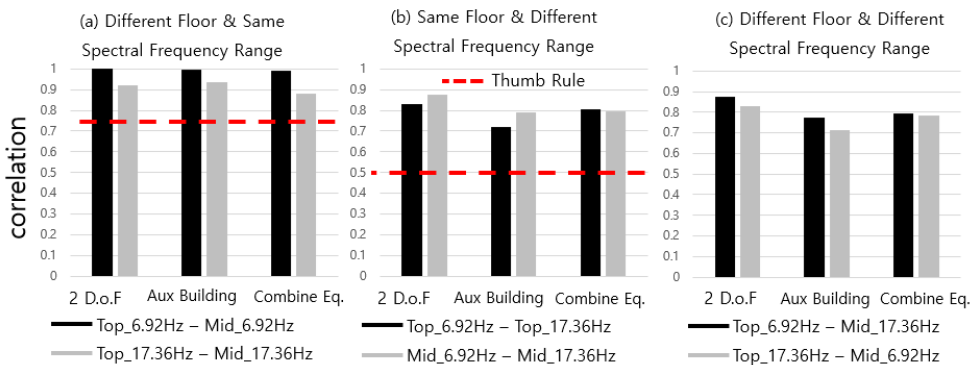


Fig. 13 Correlation coefficients obtained by (a) 2 DoF model, (b) aux building, and (c) combination equation

여기서, ρ 는 상관계수이며 β_s 은 감쇠비에 대한 대수표준편차, β_{fs} 는 고유진동수에 대한 대수표준편차, β_{TH} 는 시간이력세트에 대한 대수표준편차이다.

이 때 NUREG/CR-4840(Bohn and Lambright, 1990) 보고서에 제시된 Thumb Rules을 점선으로 표시하였다. 이들에 대한 주요 결과를 종합적으로 정리하면 다음과 같다.

- (1) 확률 변수를 독립적으로 입력하여 상관성을 평가한 결과 감쇠비의 변동성에 대한 상관성은 구조물 전체에 걸쳐서 작용하기 때문에 1에 가깝다. 하지만 고유진동수와 입력 지진파의 변동성은 구조물의 주기를 변화시키므로 기기의 응답의 상관성을 저하시킨다. 확률 변수를 통합하여 입력한 결과, 감쇠비에 의한 상관성이 강한 선형관계가 있고 표준편차가 고유진동수 확률변수의 17.36Hz 기기들을 제외하면 다른 변수들의 값보다 높아 고유진동수 및 입력 지진파의 상관계수 영향을 희석시키므로 각 변수들의 상관계수를 독립적으로 고려했을 때보다는 상관성이 높아짐을 확인했다.
- (2) 확률 변수를 통합적으로 입력하여 상관성을 평가한 결과 Fig. 13(a)의 다른 층에 위치한 고유진동수가 동일한 기기가 상관성 0.881~0.999로 Fig. 13(b)의 같은 층에 위치한 다른 고유진동수를 가지는 기기 상관성 0.711~0.830보다 높았다. Fig. 13(c)의 경우, Thumb Rule이 따로 제시되어 있지 않으나 상관성은 0.711~0.875로 뚜렷한 선형관계를 나타낸다. 따라서 같은 건물 안에 위치한 기기의 경우 보고서에 제시된 상관 계수보다 상관성이 높은 결과가 나올 수 있다. 그러나 여기서 제시된 변수들 이외에도 상관성이 추가적으로 고려되면 다른 결과가 나올 수도 있다.
- (3) 해석적 방법과 상관계수 조합식과의 차이가 발생하는 원인을 분석하기 위해 Fig. 14에서는 최상단 지점 두 개의 기기에 대해 정규분포를 따르는지 히스토그램과 함께

제시하였다. 두 기기의 상관성은 0.719~0.830으로 강한 선형관계를 보이지만, 히스토그램과 정규분포 곡선을 비교하면 정규분포의 가정을 정확히 만족한다고 보기 힘들다. 따라서 변수들이 정규분포라고 가정하여 구해지는 상관계수 조합식 (5)의 결과와는 차이가 발생하였다.

- (4) Fig. 13에서 보조건물의 상관성이 단순화시킨 2 자유도의 상관성보다 낮은 결과를 보인다. Fig. 12에서 보듯이 2 자유도 모델의 1차모드 응답의 첨두값이 매우 높아 2차모드 주기에서의 첨두값이 뚜렷하게 나타나지 않는다. 2차모드 주기에 해당하는 가속도가 전체 스펙트럼의 증가 곡선의 일부에 위치해 있기 때문에 상관성이 높게 나올 수 있음을 추측하였다. 하지만 Top_17.36 Hz - Mid_17.36 Hz의 경우 2 자유도 모델보다 Aux Building 모델의 상관성이 높게 나온 것(0.919-0.938)으로 볼 때 모드의 복잡성에 대한 상관성의 변화는 추가적인 연구가 필요할 것으로 판단된다.

6. 결론

지진취약도 곡선을 이용한 확률론적 안전성평가 시 기기 간의 동시손상확률은 각각 독립으로 가정하여 이루어져 왔다. 하지만 여러 연구를 통해서 지진 특성과 기기 응답의 상관성에 의해 동시손상확률이 변화할 수 있음을 인지하였다. 그러나 아직 기기 간의 동시손상확률 계산에 필요한 상관행렬을 결정할 때, 취약도 별수 별로 해석적 상관계수를 구하는 절차는 없다. 따라서 이 연구에서는 지진취약도 곡선에 필요한 상관행렬을 계산할 때 필요한 확률변수들을 동시에 고려했을 시의 기기 간의 상관계수를 구하고 기존 변수별 상관계수의 결과를 제시하였다. 또한 복잡한 원전 구조물을 단순화시킨 모델의 층 응답을 이용해 상관성을 평가하여 타당성을 검증하고자 하였다. 해석 결과 층이 다르고 주기가 같은 기기의 경우가 층이 같

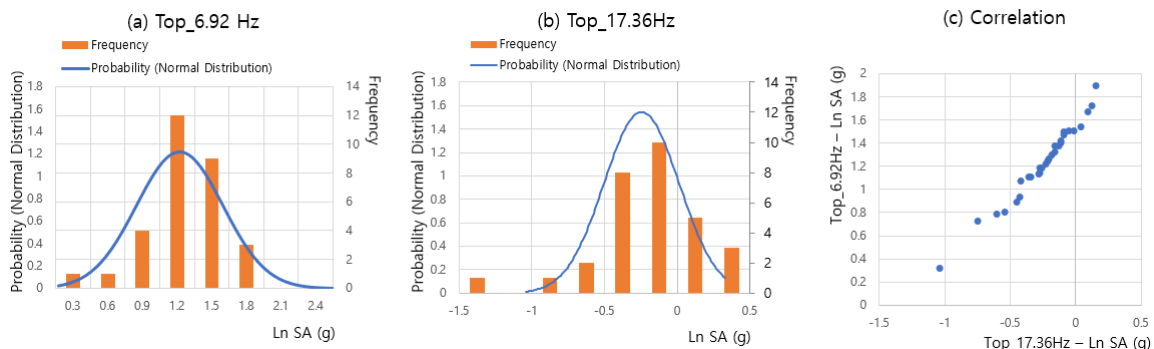


Fig. 14 Normal distributions of (a) Top_6.92Hz, and (b) Top_17.36Hz, and their correlation of components (c)

고 주기가 다른 기기의 경우보다 상관성이 높은 경향을 보였다. 또한 해석적 방법에 따른 상관계수의 차이가 존재함을 확인하였다. 이는 보고서에 제시된 Thumb Rule의 대략적인 상관계수를 사용하여 계산된 손상확률과 실제 상관성 평가를 통한 손상확률이 다를 수 있음을 인지하고 현실적인 상관계수 평가를 수행하여야 할 것으로 보인다. 해석 모델이 복잡해짐에 따라 전체적으로 상관계수가 낮아지는 원인에 관해서는 추가적인 연구가 필요할 것으로 보이며, 본 해석에 사용된 확률변수 외에 추가적인 변수를 사용하여 보다 다양한 변수의 조합이 상관성의 변화에 미치는 영향에 대한 분석이 필요할 것으로 판단된다.

감사의 글

본 연구는 산업통상자원부(MOTIE)와 한국에너지기술평가원(KETEP)의 지원을 받아 수행한 연구 과제입니다(No. 20181510102410).

References

- Bohn, M.P., Lambright, J.A.** (1990) *Procedures for the External Event Core Damage Frequency Analyses for NUREG-1150, NUREG/CR-4840*, U.S. Nuclear Regulatory Commission, Washington DC, p.152.
- Budnitz, R.J., Hardy, G.S., Moore, D.L., Ravindra, M.K.** (2017) *Correlation of Seismic Performance in Similar SSc (Structures, Systems, and Components)*, NUREG/CR-7237, U.S. Nuclear Regulatory Commission, Washington DC, p.149.
- David, F.N.** (2009) *Tables of the Ordinates and Probability Integral of the Distribution of the Correlation Coefficient in Small Samples*, Cambridge University Press, Cambridge, p.112.
- Ebisawa, K., Teragaki, T., Nomura, S., Abe, H., Shigemori, M., Shimomoto, M. Shimomoto** (2015) *Concept and Methodology for Evaluating Core Damage Frequency Considering Failure Correlation at Multi Units and Sites and its Application*, *Nucl. Eng. & Des.*, 288, pp.82~97.
- Eem, S.H., Choi, I.K.** (2019) *Influence Analysis of Seismic Risk due to the Failure Correlation in Seismic Probabilistic Safety Assessment*, *Earthq. Eng. Soc. Korea.*, 23(2), pp.101~108.
- Kennedy, R.P., Ravindra, M.K.** (1984) *Seismic Fragilities for Nuclear Power Plant Risk Studies*, *Nucl. Eng. & Des.*, 79, pp.47~68.
- Kim, J.H., Kim, S.Y.** (2020) *Combination Procedure for Seismic Correlation Coefficient in Fragility Curves of Multiple Component*, *Earthq. Eng. Soc. Korea.*, 24(3), pp.141~148.
- Norman, R.** (1975) *Reactor Safety Study, WASH-1400*, U.S. Nuclear Regulatory Commission, Washington, DC. p.210.
- Ravindra, M.K., Banon, H., Sues, R.H., Thrasher, R.D.** (1984) *Sensitivity Studies of Seismic Risk Models*, NP-3562, Electric Power Research Institute, Palo Alto, California, p.89.
- USNRC** (2014) *Regulatory Guide 1.60 Design Response Spectra for Seismic Design of Nuclear Power Plants*, 301-415-7000, U.S Nuclear Regulatory Commission, Washington DC, p.13.
- Wells, J.E., George, L.L., Cummings G.E.** (1983) *Seismic Safety Margins Research Program; Systems Analysis (Project VIII)*, NUREG/CR-2015, Lawrence Livermore National Laboratory, Livermore, CA, p.62.

요 지

확률론적 지진취약도 평가는 구조물 혹은 기기의 손상확률을 각 취약도 변수별 조합을 통해 이루어진다. 지진취약도로부터 구해지는 2개 이상 기기의 동시손상확률 계산은 기존에는 각 기기의 손상확률을 독립으로 가정해 왔다. 하지만 기기별 손상확률에 상관성이 있으며, 이를 평가한 결과 상관성에 따라 동시손상확률이 변화할 수 있는 결과를 보였다. 이 지진상관성을 무시하면 비보수적인 결과가 나오므로 이를 고려해서 계산되어야 한다. 이 연구에서는 지진상관계수를 해석적으로 평가하기 위해 몇 가지 확률 변수를 선정하여 각 변수별로 혹은 통합하여 평가하고 그 차이를 비교했다. 그리고 단순화된 모델과, 복잡한 모델에 대한 상관계수 차이도 비교하였다. 이들 방법에 따른 상관계수의 결과와 차이를 분석했다. 그 결과 각 변수별로 평가하는 것과 통합하여 평가할 때 변수별 영향의 차이에 따라 상관성이 변화함을 확인하였고, 모델이 단순할수록 상관성이 높아짐을 확인하였다.

핵심용어 : 확률론적지진안전성평가, 지진취약도, 지진상관성, 동시손상확률, 응답스펙트럼, 고유주기