

다중기기 취약도곡선의 지진상관계수 조합 절차

Combination Procedure for Seismic Correlation Coefficient in Fragility Curves of Multiple Components

김정한^{1)*} · 김시영²⁾ · 최인길³⁾

Kim, Jung Han^{1)*} · Kim, Si Young²⁾ · Choi, In-Kil³⁾

¹⁾부산대학교 토목공학과 조교수, ²⁾부산대학교 토목공학과 석사과정, ³⁾한국원자력연구원 기기구조예측진단연구부 책임연구원

¹⁾Assistant Professor, Department of Civil Engineering, Pusan National University, ²⁾Master Course, Department of Civil Engineering, Pusan National University, ³⁾Principal Researcher, Structural Safety & Prognosis Research Division, Korea Atomic Energy Research Institute

/ A B S T R A C T /

For the important safety system, two or more units of identical equipment or redundant components with similar function were installed to prevent abnormal failure. If the failure probability of such equipment is independent, this redundancy could increase the system safety remarkably. However, if the failure of each component is highly correlated by installing in a structure or experiencing an earthquake event, the expected redundancy effect will decrease. Therefore, the seismic correlation of the equipment should be evaluated quantitatively for the seismic probabilistic safety assessment. The correlation effect can be explained in the procedure of constructing fragility curves. In this study, several methodologies to quantify the seismic correlation in the failure probability calculation for multiple components were reviewed and two possible ways considering the realistic situation were selected. Simple examples were tested to check the applicability of these methods. The conversion method between these two methods was suggested to render the evaluation using the advantages of each method possible.

Key words: Seismic fragility, Seismic correlation, Multiple failure, Probabilistic safety assessment, Response and capacity, Uncertainty

1. 서론

지진취약도는 지진 세기에 대한 손상확률을 나타내는 곡선으로 구조물 뿐만 아니라 기기와 같은 요소 단위에 대해서도 적용이 된다. 이 지진취약도 곡선은 확률론적 기법으로 평가되며 복잡한 시스템에 대해서는 해당 시스템이 지진에 의해 어느 정도의 확률로 기능을 유지하는지 추정하기 위하여 널리 사용된다. 원자력발전소 내에는 안전성 확보를 위해 여러 단계의 안전 관련 기기들이 존재한다. 발전소 전체 시스템에 심각한 손상을 주는 경우는 이러한 안전 관련 기기들이 특정 조합을 가지고 동시에 기능을 상실하는 경우이다. 이에 중요한 기기는 두 개 이상을 병렬로 설치하여 안전 여유도를 확보하기도 한다. 그러나 지진 발생시에는 지진동에 의해 영향을 받아 동시에 여러 기기가 손상을 입을 수 있기 때문에 이러한 안전 여유도가 감소할 수 있다. 따라서 지진 시에는 이러한 동시 손상 확률을 정확히 평가해야 합리적인 안전성 평가를 할 수 있으며 이때 지진취약도곡선이 이용된다.

원전에 설치되는 기기들은 격납건물과 보조건물 등의 구조물 내부에 위치하기 때문에 설치 위치에 따라서 지진에 의해 기기에 입력되는 진동이 달라진다. 그러나 동일 건물의 내부에 있으면 상대적으로 입력진동의 주파수 특성이 비슷하며 기기의 손상 모드까지 유사한 경우 동시에 파괴될 확률이 높아진다. 이와같이 각각의 기기에 입력되는 진동 특성의 유사성과 기기의 유사성 등에 의한 각 기기들의 손상확률이 관련지어지는 것을 지진 상관성 (seismic correlation)이라 하며 이를 고려하여 시스템의 취약도를 조합해야 한다.

지진상관성은 아직 세계적으로 연구가 진행 중인 단계이며 합의된 방법론이 없고 연구 목적 이외의 실제 산업에 구체적으로 적용된 사례가 없다. 이는 지진상관성이 확률통계적으로 의미를 가지고는 있지만 상관성 정도를 평가하기에는 데이터도 부족하고 절차도 까다롭기 때문이다. 여기서는 지진상관성을 다루는 몇 가지 방법을 분석하고 이들 중 적용 가능한 두 가지 방법에 대해서 상관계수를 평가하는 절차를 적용하고자 한다. 특히, 서로 다른 절차로 평가하는 두 방법론을 동시에 적용하기 위해 상관계수행렬을 구성하는 하나의 방법으로 표현할 수 있는 절차를 제시하였다. 이를 위해 각 상관성 평가 방법론의 상호 변환 방법을 개발하였고, 실제 취약도 값은 아니

*Corresponding author: Kim, Jung Han

E-mail: jhankim@pusan.ac.kr

(Received March 16, 2020; Revised April 13, 2020; Accepted April 13, 2020)

지만 절차를 보여줄 수 있는 단순화된 예제를 통해 구현하였다.

2. 지진취약도의 기본 가정

2.1 취약도곡선 모델

지진취약도곡선은 일반적으로 누적로그정규분포 식으로 표현되며, 이는 지진의 세기에 따른 구조물, 혹은 기기의 파괴확률을 나타낸다. 원자력 분야에서는 지진취약도를 불확실성 및 무작위성에 대한 확률분포를 적용하여 식 (1)과 같이 두 개의 표준편차를 가지는 이중로그정규분포(double log-normal distribution)로 표현한다[1].

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

여기서 Φ 는 누적로그정규분포함수이고 a 는 지진 세기로서 일반적으로 최대지반가속도(Peak Ground Acceleration, PGA)가 많이 쓰이며 스펙트럼가속도 등이 쓰이기도 한다. A_m 은 취약도곡선의 중앙값을 나타낸다. 두 개의 표준편차 중 β_R 은 무작위성에 의한 손상확률의 분포를 나타내며 이는 취약도곡선의 기울기를 결정하고, β_U 는 지식의 부족에 의한 불확실성으로 중앙값 위치의 확률분포 편차를 나타내며 Q 로 불확실성에 대한 신뢰도를 표현한다. 이 취약도곡선을 구성하기 위해서는 파괴확률에 영향을 미치는 인자들을 모두 조합해야 한다. 중앙값인 A_m 은 식(2)에서의 각 인자들의 안전여유도들에 대한 곱으로 표현 가능하다. β_R 과 β_U 는 식(3)에서와 같이 각 인자들의 불확실성과 무작위성 표준편차를 제곱합제곱근(Square Root of Sum of Squares, SRSS)을 취하여 구할 수 있다. Fig. 1은 이와 같은 수식에 의한 불확실성에 대한 신뢰도 95%, 50%, 5% 및 이들의 평균 취약도곡선을 나타낸다.

$$\begin{aligned} A_m &= F \cdot A_{SSE} \\ F &= F_C \cdot F_{RS} \\ F_C &= F_S \cdot F_\mu \cdot F_{RS} \\ F_{RS} &= F_{SA} \cdot F_\delta \cdot F_M \cdot F_{MC} \cdot F_{EC} \cdot F_{HD} \cdot F_{SS} \end{aligned} \quad (2)$$

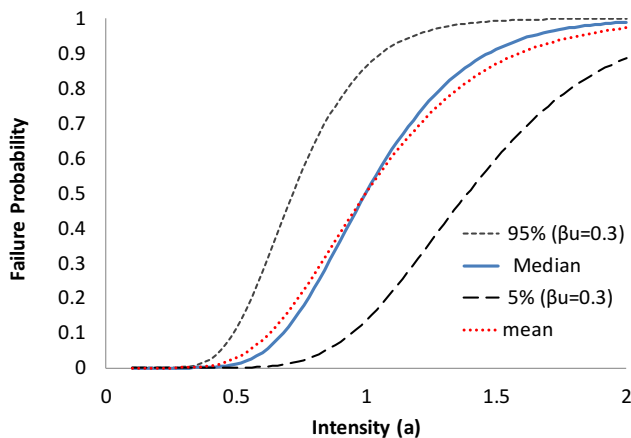


Fig. 1. Fragility curves expressed by double log-normal distribution

$$\begin{aligned} \beta_C &= \sqrt{\beta_R^2 + \beta_U^2} \\ \beta_R &= \sqrt{\beta_{SA}^2 + \beta_{HD}^2 + \beta_{MC}^2} \\ \beta_U &= \sqrt{\beta_\delta^2 + \beta_M^2 + \beta_{EC}^2 + \beta_{SS}^2} \end{aligned} \quad (3)$$

여기서 각 인자들의 첨자는 다음을 의미한다. SSE는 안전정지지진(Safe Shutdown Earthquake), C는 성능(Capacity), RS는 응답(Response), S는 강도(Strength), μ 는 비탄성에너지 흡수계수(Inelastic energy absorption), SA는 스펙트럼형상(Spectral shape), δ 는 감쇠(Damping), M은 모델링(Model), MC는 모드응답조합(Mode Combination), EC는 지진성분조합(Earthquake Combination), HD는 수평지진방향(Horizontal Direction), SS는 지반-구조물 상호작용(Soil-Structure)을 의미한다. 이와 같이 각 인자의 확률변수 분포에 대한 표준편차를 SRSS를 통해 최종 취약도곡선의 표준편차로 변환할 수 있는 것은 각 인자들끼리 서로 영향을 미치지 않는 완전독립 변수라고 가정하고 있기 때문이다. 취약도곡선이 누적로그정규분포 표현되는 이유가 파괴확률은 지진하중에 해당하는 응답(response)이 내력에 해당하는 성능(capacity)보다 큰 경우의 확률이고 이 두 가지가 각각 로그정규분포를 따른다고 가정하고 있기 때문이다. 응답과 성능은 모두 여러 가지 확률 인자들로 구성되어있고 이들이 모두 독립이라는 가정이 있다.

2.2 취약도곡선에서의 지진상관성

상기 기술된 취약도곡선과 같이 각 인자들을 로그정규분포로 가정하여 확률변수 개개를 독립적으로 고려하는 것은 각 인자들이 서로 독립에 가깝다는 가정 하에 타당하며 특히 하나의 기기나 요소에 대한 취약도곡선을 구성하는 경우 큰 문제가 없다. 그러나 여러 요소들이 동시에 기능을 수행해야 하는 시스템의 경우에는 시스템을 구성하는 모든 요소가 파괴되지 않을 확률을 구해야 취약도 곡선을 구성할 수가 있다. 이는 산업시설, 특히 원전과 같은 복잡한 시스템에 의해 안전을 확보하는 경우 적용해야 한다.

이러한 여러 요소들이 동시에 파괴될 확률, 혹은 파괴되지 않을 확률을 구하는 것은 단순하게는 시스템 내의 모든 요소에 대한 파괴확률을 확률적으로 합하거나(union) 곱하여(intersection) 구할 수 있다. 즉, 두 기기 A, B가 시스템을 구성할 때, 이 시스템의 요소들이 직렬로 연결되어 있다면 하나만 파괴되어도 시스템의 전체 파괴를 의미하므로 식(4)와 같이 파괴확률이 계산되며, 병렬로 연결되어 있다면 둘 다 모두 파괴되어야 시스템의 파괴를 의미하므로 식(5)와 같이 계산된다.

$$FP_{SYS} = FP_A + FP_B - FP_A \cdot FP_B \quad (4)$$

$$FP_{SYS} = FP_A \cdot FP_B \quad (5)$$

여기서 FP는 Failure Probability로 각각의 첨자는 A의 파괴확률, B의 파괴확률 그리고 A와 B로 이루어진 시스템의 파괴확률을 의미한다. 그러나 위 식들은 각 요소 A, B의 파괴확률이 완전독립인 경우에만 성립한다. 만약 이들 파괴확률을 산정할 때 인자들 간에 완전독립이 아닌 상관성이 존재하는 경우 다른 방식으로 계산되어야 한다. 이와 같은 지진취약도에서의 상관성을 지진상관성(seismic correlation)이라고 하며 이에 대한 확률론적 계

산 방법과 상관되어있는 정도에 대한 평가 방법 및 이 상관성을 고려했을 때의 영향이 여러 문헌에서 제시되어왔다.

지진상관성에 의한 손상확률 계산 방법은 SSMRP(Seismic Safety Margin Research Program) 연구에서 거의 최초로 다루어졌다[2]. 여기서는 응답과 성능으로 이루어지는 취약도곡선의 가정에서 바로 확률통계적 상관계수를 도입하여 상관성을 평가하는 가장 기본적인 방법을 다루었으며 동일한 입력 지진에 의해 발생하는 원전 기기들 응답의 상관성을 고려하였다. 이 SSMRP 방법은 NUREG-1150 보고서[3]에서 미국의 Zion 원전, Peach Bottom 원전 등에 대해서 연구 목적으로 적용되었다. 하지만 이 방법은 실제 상업용 원전의 SPRA에 적용된 사례는 없다. EPRI-NP 3562 보고서[4]에서는 지진상관성은 무시할 수 없는 효과를 보이며 지진상관성을 고려할 경우 원전의 노심손상빈도와 같은 지진리스크 값이 자릿수가 바뀔 정도의 영향이 있음을 보였다. 일본에서는 JAERI에서 지진상관성 연구를 수행하였으며 확률론적지진안전성평가 소프트웨어인 SECOM을 이용하여 상관성을 계산하였다. 여기서는 상관성을 샘플링 기반으로 직관적으로 구현하였으며 마찬가지로 노심손상빈도 계산 결과, 완전한 지진상관성과 완전독립인 경우 결과값에 한 자릿수의 차이가 발생하는 경우가 존재함을 보였다[5]. 이러한 지진상관성 고려 방법 및 최근 연구동향에 대해서는 NUREG/CR-7237 보고서[6]에서 자세히 기술되어있으며 여기서는 원전의 확률론적지진안전성평가 분석 결과 상관성에 의해 민감도가 가장 큰 부분은 취약도곡선의 약 5%에서 약 25% 또는 35%의 손상확률 영역에 있는 것으로 여긴다. 이는 취약도곡선의 매우 낮은 확률값 부분에서는 파괴모드가 특이하며 상관성이 큰 역할을 하지 않고 취약도곡선의 최고점에서는 두 개 이상의 기기들이 상관관계 여부와 관계없이 높은 확률로 파괴되는 것으로 계산되기 때문이다.

3. 지진상관성 수식 모델

3.1 지진상관성을 적용하기 위한 방법들

시스템의 안전성을 확률론적으로 평가하는 방법은 원전안전 분야에 서 체계적으로 개발되어왔으며 확률론적안전성평가(Probabilistic Safety Assessment, PSA)라는 방법론으로 발전되었다. 이를 적용하여 지진에 대한 원전 안전성을 평가하기 위해서는 지진취약도의 정보가 필요하고 이를 활용하여 확률론적지진안전성평가(Seismic PSA) 방법론이 개발되었다. 이 평가 방법에 지진상관성을 고려하기 위하여 몇 가지 방법론이 제시되었다. 이들 지진상관성을 고려한 확률통계적 수식들은 여러 모델들이 있으며 다음과 같은 특징을 가지고 있다.

- 다중적분 방법(Multiple integration method or SSMRP Method): 각 요소의 취약도 인자들에 대한 정확한 상관계수값을 토대로 상관계수행렬을 구성하여 파괴확률을 구하는 것으로 기본 확률이론에 근거함. 공학적으로 상관계수행렬을 구할 수 있어야 함.
- 취약도 변수분리 평가 방법(Reed-McCann procedure)[7]: 취약도의 변수분리법에 기반하여 상관성을 적용하는 것으로 취약도 인자들의 상관성 정도를 직관적으로 판단하여 이를 수식화할 수 있음. 따라서 전문

가 판단에 의한 상관성 분석 시 유용함.

- 경험규칙(Thumb rules)[2]: 기기의 상관계수를 단순화된 조건들에 따라서 전문가 판단으로 제시한 것으로 상관계수를 구하는 가장 기초 개념을 제시하고 있지만 이 상관계수를 이용하여 확률을 계산하는 방법은 다중적분 방법 등 다른 방법론을 적용해야 함.
- 승수법(Power method or Mankamo model)[8]: 동일기기, 즉 동일한 지진취약도 곡선을 가지는 경우에만 적용가능하며 이들의 동시손상확률을 구하는 방법. 기본적으로 다중적분 방법을 기반으로 하며, 승수 개념을 도입하여 도표로부터 쉽게 구할 수 있도록 하였음.
- 샘플링 기반 방법(Sampling based method): 지진취약도가 응답과 성능의 확률 분포에 의한 것이기 때문에 이 응답과 성능을 확률변수 샘플로 추출하되 상관성이 있는 샘플로 변환하여 평가하는 방법. Cholesky 행렬분해를 적용하여 상관성이 있는 샘플로 변환할 수 있음[9].
- 공통원인고장 모델링 방법(Split-fraction method or Pellissetti and Klapp model)[10]: 확률론적지진안전성평가에서 지진 취약도에 대한 모델이 아닌 일반 무작위성 손상에 대한 상관성(중속성)을 위한 방법론인 공통원인고장(Common Cause Failure, CCF) 모델을 활용하여 적용하는 방법임. 기존 확률론적안전성평가에 적용하기는 쉽지만 지진취약도가 응답과 성능을 로그정규분포로 가정한다는 기본 가정을 고려하지는 못함.

위에서 정리된 방법들이 기본적인 확률이론과 적용 가능성을 고려하여 제시된 방법이다. 기본적으로 지진취약도 곡선이 로그정규분포로 가정된 확률변수들이 독립이라는 가정하에 도출되었기 때문에 상관계수도 기본 확률이론에 근거해야 한다. 이를 만족시키지 못하는 공통원인고장 모델링 방법은 적용하기가 어렵다. 다른 방법들은 상관계수의 수학적 의미는 동일하지만 상관계수를 구하거나 상관계수에 따른 동시손상확률을 구하는 절차가 상이하다. 경험규칙과 승수법은 단순화된 가정에서만 적용할 수 있다. 샘플링 기반 방법은 직관적이지만 샘플링을 수행할 때마다 매번 계산값이 변동할 수 있고 정확도를 위해 많은 수의 샘플링이 필요하다는 단점이 있다.

이 연구에서는 기존 확률이론에 위배되지 않으면서 실제 상관계수나 상관된 정도를 정량적으로 평가하여 계산이 가능한 나머지 두 가지 모델, 다중적분 방법 및 취약도 변수분리 평가 방법에 대하여 적용하였다. 이들 두 방법은 각각 일본 및 미국에서 시범적인 적용 연구가 진행 중이며 무작위성 및 불확실성에 대한 상관성을 모두 적용할 수 있으므로 선택되었다. 여기서는 이들 두 방법론을 조사한 결과 각각의 장단점이 있으며 필요시 두 방법론을 모두 적용하여 조합하는 방법이 필요할 것으로 판단하였다. 이에 이 연구에서는 이 두 방법을 통합하는 절차를 제시하는 것을 주요 목적으로 한다.

3.2 다중적분 방법

지진상관계수는 성능의 지진상관계수와 응답의 지진상관계수의 조합으로 나눌 수 있다. 원전의 경우 기기에 입력되는 지진동은 격납건물이나 보조건물 등 구조물의 응답(response)으로 표현되고 진동에 대한 기기의 성능은 내력(strength or capacity)으로 표현되어 응답이 성능보다 크면 해당 기기가 손상이라고 간주하게 된다. 이때 n 개 기기들의 동시손상확률 P 는

식 (6)과 같다.

$$P = P[Z_1 > 0, Z_2 > 0, \dots, Z_n > 0] = \int_0^\infty \dots \int_0^\infty f_z(z_1, \dots, z_n) dz_1, \dots, dz_n \quad (6)$$

여기서 (X_1, \dots, X_n) 은 각 n 개 기기들 설치 위치에서의 응답값이고 (Y_1, \dots, Y_n) 는 기기들의 성능값이며 $Z = X - Y$ 이다. 모든 기기에 대하여 응답이나 성능이 독립이라면 동시손상확률은 단순히 각 기기들의 손상확률의 곱이 된다. 하지만 이들이 상관성을 가지고 있으면 각 기기들의 손상에 대한 상관행렬을 도입하여 위 적분을 식 (7)과 같이 표현할 수 있다[11].

$$P = \frac{1}{(2\pi)^n |C|^{1/2}} \times \int_0^\infty \dots \int_0^\infty \exp\left[-\frac{1}{2}(z - \mu_z)^T C^{-1}(z - \mu_z)\right] dz_1, \dots, dz_n \quad (7)$$

여기서 μ 는 평균값을 나타내며 $\mu_z = \mu_x - \mu_y$ 이다. C 는 각 기기들의 상관행렬로서 응답과 내력의 상관계수와 표준편차들을 이용하여 계산한다. 상관행렬에 들어가는 상관계수 값은 이론상으로는 -1부터 1 사이의 값이 들어가지만 음의 상관성을 가지는 경우는 거의 없기 때문에 0에서부터 1 사이의 값으로 주어진다. 이 상관계수는 동시에 손상을 입을 확률이 높으면 1에 가까운 값을 가지게 되고 완전 독립이면 0을 가지게 된다. i 번째 기기와 j 번째 기기의 상관계수는 식 (8)과 같이 얻어질 수 있다. 여기서 ρ 는 상관계수, R 은 응답(response), S 는 성능(strength)을 나타낸다. 따라서 이 방법을 적용하기 위해서는 확률변수 인자들 각각에 대한 상관계수가 주어져야 한다.

$$\rho_{i,j} = \frac{\beta_{R_i} \cdot \beta_{R_j}}{\sqrt{(\beta_{R_i}^2 + \beta_{S_i}^2)} \cdot \sqrt{(\beta_{R_j}^2 + \beta_{S_j}^2)}} \cdot \rho_{R_i, R_j} + \frac{\beta_{S_i} \cdot \beta_{S_j}}{\sqrt{(\beta_{R_i}^2 + \beta_{S_i}^2)} \cdot \sqrt{(\beta_{R_j}^2 + \beta_{S_j}^2)}} \cdot \rho_{S_i, S_j} \quad (8)$$

3.3 취약도 변수분리 평가 방법

취약도 변수분리 평가 방법은 기존 지진취약도 계산에서 응답 및 성능에 대한 확률변수들을 명확히 분리하여 평가하는 기본 개념으로부터 출발하여 상관성을 평가한다. 이들 확률변수들 사이의 상관된 정도, 혹은 종속성을 가지고 있는 부분과 독립적인 부분을 분리하는 방법으로 정량화한다. 예를 들어, 건물 내에 두 기기가 설치되어 있다고 할 때, 이들 기기는 구조물의 응답에 대한 확률변수가 공통 인자가 될 수 있다. 만약 지진취약도 인자들 중 구조물의 감쇠와 기기 앵커의 내력을 예로 한다면 하나의 기기에 대한 취약도곡선에서 각 인자들 사이는 독립적이라고 할 수 있다. 하지만 두 개의 기기가 동시손상될 확률을 구할 경우 두 기기 사이에서는 구조물 감쇠에 대한 확률변수는 이들 인자가 거의 종속성을 가질 수 있지만 앵커의 내력은 거의 독립이라고 볼 수 있다. 즉, i 번째 기기와 j 번째 기기가 구조물 감쇠 인자만 상관성이 있는 것으로 평가하는 것이며 이때 상관된 정도를 구조물 감쇠 인자에 대한 전체 표준편차 대비 어느 정도인지를 지정한다. 이러한 기기간 변수들의 종속성을 각 인자들에 대해 평가하여 반영하는 것이 취약도 변수

분리 평가 방법의 기본이다.

지진취약도 곡선은 취약도 영향 인자에 대해 응답과 성능의 두 가지 변수로 구분하기도 하지만 이들 각각은 다시 인식론적 불확실성(epistemic uncertainty)과 무작위성(aleatoric uncertainty)으로 나뉘어 이종로그정규분포를 가지게 된다. 따라서 이 두 불확실성에 대한 표준편차에 대해 각각 상관된 정도를 구분하여 평가해야 한다. 이 절치는 기존 연구에서 잘 제시되어 있으며[7] 이를 요약하면 아래와 같다.

첫 번째로, 여러 기기로 구성된 시스템 지진취약도를 도출하기 위해 불확실성을 고려하는 중앙값(median capacity)의 상관성을 고려하는 방법은 샘플링 기반으로 적용할 수 있다. 이는 시스템 내 모든 구성요소의 중앙값을 독립인자와 종속인자로 나누어 샘플링을 수행하여 고려할 수 있다. 어떠한 인자에 대한 전체 불확실성 표준편차(β_U)에서 종속에 해당하는 표준편차(β_U^*)를 제거하여 식 (9)와 같이 독립에 대한 표준편차(β_U')를 구할 수 있다.

$$\beta_U' = (\beta_U^2 - \sum \beta_U^{*2})^{1/2} \quad (9)$$

이렇게 구해진 독립에 대한 표준편차는 각 인자마다 독립적으로 샘플링을 하고 종속에 해당하는 표준편차는 한 번의 샘플링으로 여러 기기에 동일하게 적용함으로써 종속성을 반영할 수 있다.

다음으로는 무작위성 표준편차에 대한 상관성을 고려해야 한다. 기기 1과 2의 파괴확률을 고려할 경우 각각은 식 (10a)과 (10b)로 정의될 수 있다.

$$P_{f1} = P(c_1 < a_g) \quad (10a)$$

$$P_{f2} = P(c_2 < a_g) \quad (10b)$$

여기서 c_i 는 구성요소의 성능이고 a_g 는 최대지반가속도와 같은 지진세기에 대한 변수이다. 이때 c_1 과 c_2 는 각각 $c_1'x$ 과 $c_2'x$ 로 표현할 수 있는데, 여기서 c_1 과 c_2 는 성능의 독립적인 부분이고 x 는 종속적인 부분을 나타낸다. 이로부터 손상확률을 식 (11a)와 (11b)로 나타낼 수 있다.

$$P_{f1} = P(c_1' < a_g/x) \quad (11a)$$

$$P_{f2} = P(c_2' < a_g/x) \quad (11b)$$

이 두 기기의 동시손상확률 $P_f(1 \cap 2)$ 는 식 (12)와 같은 방정식에 의해 구할 수 있다.

$$P_f(1 \cap 2) = \int P(c_1' < a_g/x)P(c_2' < a_g/x)p(x)dx \quad (12)$$

이때 취약도 변수의 확률분포는 로그정규분포 모델로 가정하기 때문에 기기 1과 2의 매개변수는 각각 $LN(A_{m1}x, \beta_{R1}')$, $LN(A_{m2}x, \beta_{R2}')$ 의 분포를 따르며 x 에 대한 분포는 $LN(1, \beta_R^*)$ 을 따른다고 할 수 있다. 여기서 A_{m1} 과 A_{m2} 는 i 번째 기기의 중앙값이고, β_R^* 은 두 기기에 공통되는 무작

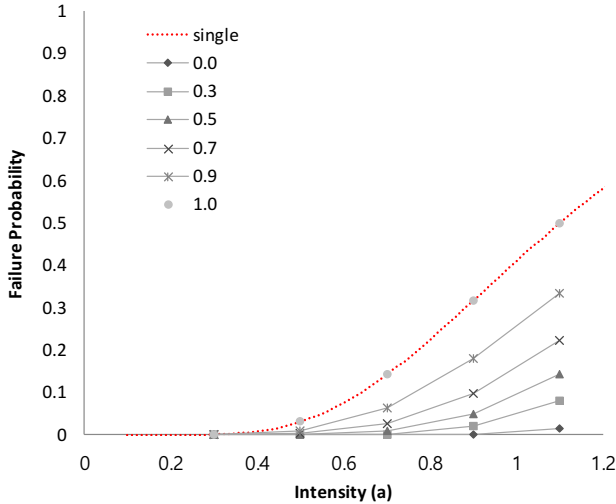


Fig. 2. Fragility curves of 6-train redundant equipment set with different seismic correlation coefficients

위성 표준편차이며 β_{R1}' 과 β_{R2}' 값은 식 (13)과 같이 구할 수 있다.

$$\beta_{Ri}' = (\beta_{Ri}^2 - \sum \beta_{Rj}^{*2})^{1/2} \tag{13}$$

이와 같은 방식으로 두 기기의 지진상관성을 고려한 동시손상확률을 구할 수 있고 이를 지진세기를 변경해가며 구하면 시스템의 지진취약도가 얻어진다. 이 방법을 적용하기 위해서는 앞서 다중적분 방법에서는 상관계수가 주어져야 하는 것과는 달리 여기서는 각 인자의 표준편차에서 상관된 부분이 어느 정도인지 주어져야 한다.

3.4 지진상관성을 고려한 취약도곡선 계산 예

시스템의 지진취약도 곡선에서 기기 간 상관성의 영향을 알기 위해 예제 모델을 구성하였다. 원전의 경우 비상디젤발전기는 동일한 여러 개가 하나의 발전소에 설치되어 하나가 손상되더라도 다른 것들이 기능을 유지하면 비상발전 시스템을 유지할 수 있도록 중복성(redundancy)을 가지고 있다. 이 디젤발전기 하나의 지진취약도곡선의 중앙값이 1.1 g라고 하고 2개를 설치했다고 가정하자. 그렇다면 1.1 g에서 발전기가 작동하지 않을 확률은 상관성이 없는 경우 $0.5 \times 0.5 = 0.25$ 가 될 것이다. 그러나 취약도 인자들의 모든 상관계수가 1이라면 하나가 손상되었을 때 다른 하나도 동일한 응답과 내력을 가지고 있기 때문에 무조건 손상이 일어났을 것이다. 따라서 이 경우는 발전기가 작동할 확률이 기기가 2개가 있다고 하더라도 하나와 같이 취급되어 동시손상확률은 0.5가 된다. 만약 한 호기에 발전기가 6개가 있다고 한다면 상관계수가 0인 경우(독립) 발전기가 작동하지 않을 확률은 0.5의 6승, 즉 0.015625가 될 것이고 상관계수가 1인 경우에는 하나인 경우와 마찬가지로 0.5가 될 것이다. 따라서 상관성은 동일기기가 여러 개 설치된 경우 그 결과에 매우 큰 영향을 미칠 수 있다. Fig. 2는 1.1 g를 중앙값으로 하는 기기가 6개인 경우 상관계수를 0~1 사이로 달리해가며 구한 6개 기기의 동시손상 취약도곡선이다.

4. 다중적분 방법

성능과 응답의 지진상관성을 계산하는 확률적 이론의 근거는 다중적분 방법이나 취약도 변수분리 평가 방법이 동일하다. 그러나 이를 현실적으로 구현할 수 있는 방법은 다르다. 따라서 성능과 응답의 지진상관계수를 현실에서의 지식과 전문가 판단 방법, 해석적 방법 등에 의해서 구할 수 있도록 제시할 필요가 있으며 이를 통합하여 지진상관성을 고려한 동시손상확률을 구할 필요가 있다.

일본에서는 응답과 성능 중 지진취약도에 기여가 큰 부분은 응답으로 가정하고 성능에 대해서는 따로 상관성을 고려하지 않음으로써 지진상관성을 고려한 확률론적안전성평가 사례가 있다[12]. 여기서는 각 응답 해석에 필요한 변수들의 상관성을 고려한 확률분포를 가정하여 수많은 해석을 수행한 후 결과값의 통계적 상관성을 도출함으로써 기기 간 응답의 상관계수를 구하였다. 반면 미국에서는 단순 모델에 대해서 해석에 의한 방법이 아니라 전문가의 판단에 의해 각 인자가 어느 정도의 독립 부분과 종속 부분을 가지고 있는지 결정하여 지진상관성을 평가하는 시범적 연구가 이루어졌다[6].

이와 같이 응답의 경우 해석적으로 평가가 가능하기 때문에 상관계수를 직접 구하여 다중적분 방법에 의해 상관성을 고려할 수 있다. 반면 해석적으로 접근하기 어려운 경우, 특히 전기 계통의 기기 내력에 대한 상관성 등은 현실적으로 수치적으로 구하기 어렵기 때문에 이 방법으로 지진상관계수를 구하기는 어렵다. 실험적으로 구한다고 하더라도 엄밀하게 동일한 조건으로 매우 많은 수의 반복실험을 통해서만이 특정 변수의 상관성을 구할 수 있을 것이다. 따라서 이러한 경우는 다중적분 방법에 적용하기 위한 상관계수를 평가하기에 어려움이 있으며 전문가 판단에 의한 취약도 변수분리 평가 방법이 대안일 수 있다.

SSMRP[2]에서는 경험규칙에 의해서 기기 설치 위치의 높이, 기기의 스펙트럼 민감 대역 등에 따라서 상관계수를 달리하는 것으로 가정하였다. 이를 해석적으로 구현해보기 위해 원전 격납건물과 내부구조물을 모델링하고 각 위치별 층응답스펙트럼을 분석하여 상관계수를 도출하였다.

응답의 지진상관계수는 상관성을 구하기 위한 기기들이 위치한 지점에서의 지진응답, 즉 층응답의 상관성을 정량적으로 평가하여 얻을 수 있다. 이를 위해서는 상관성에 영향을 미치는 변수들의 입력값에 대한 분포와 이 분포의 상관성이 먼저 정해져야 한다. 상관성이 없는 변수들의 경우는 완전 독립으로 확률분포만 고려하여 입력변수를 정할 수 있다. 이로부터 통계적 값을 얻을 수 있는 많은 수의 반복해석을 통해 상관계수를 구한다. 구해진 상관계수로부터 다중적분 방법을 적용하여 동시손상확률을 계산할 수 있다.

층응답으로 평가되는 응답값은 기기의 고유진동수, 설치조건, 파괴모드 등 여러 변수들의 영향을 받을 수 있다. 구조물의 해석 단계에서 구현될 수 있는 것은 고유진동수의 상관성이나 지진하중 방향에 대한 상관성이며 기기의 해석 단계에서는 기기의 감쇠비, 모드조합 등이 포함될 수 있다. 여기서는 응답의 상관계수를 해석적으로 구하기 위하여 다음과 같은 예제 해석 모델을 구성하였다. 예제모델 대상은 원전 격납건물 및 내부건물로 하였고 응답 도출 위치는 대표 3개 절점으로 정하였다. 이 위치는 각각 격납건물 최상단(node 1), 격납건물 중간높이의 2차 모드 변형점(node 2), 내부건물 최상단(node 3)으로 하였다. 상관계수 구성을 위한 위치 및 고유진동수에 따라서 아래와 같이 4개의 기기를 가정하였다. 이에 대한 구조물의 고유진동

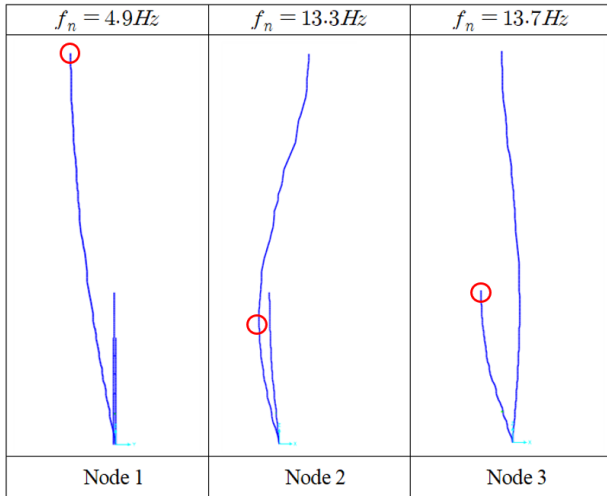


Fig. 3. Natural frequency and mode shape of structures

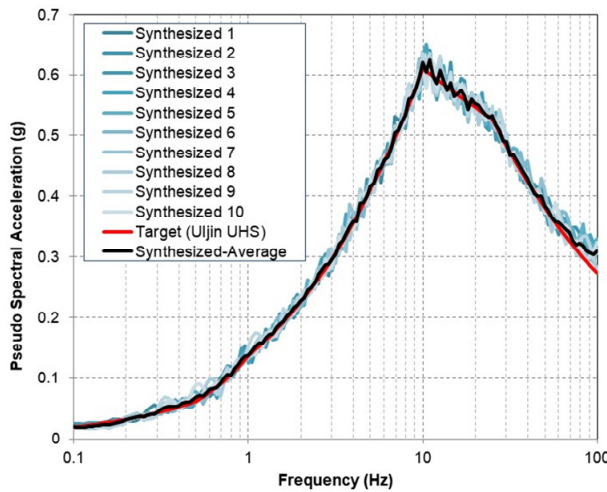


Fig. 4. Target response spectrum and response spectra of synthesized time histories

수 및 모드 형상은 Fig. 3과 같다.

- 격납건물 상단-격납건물 1차 고유진동수(4.9 Hz)에 해당하는 기기
- 격납건물 중간-격납건물 1차 고유진동수(4.9 Hz)에 해당하는 기기
- 격납건물 중간-격납건물 2차 고유진동수(13.3 Hz)에 해당하는 기기
- 내부건물 상단-내부건물 1차 고유진동수(13.7 Hz)에 해당하는 기기

해석에 적용된 확률변수는 입력지진의 시간이력 파형에 대한 변동성과 구조물 전체의 감쇠비 변동성을 선정하였다. 입력지진의 시간이력 파형의 변동성은 만약 등재해도스펙트럼(uniform hazard response spectrum)을 사용하는 경우 지반운동 스펙트럼의 요철에 대한 변동성은 포함하지 않기 때문에[13] 동일한 스펙트럼 형상을 사용하여야 한다. 예제로 사용한 국내 등재해도스펙트럼은 Fig. 4와 같다. 이에 대한 10개의 입력지진을 체계적 방법으로 합성하였고 이들 지진파에 대한 응답스펙트럼을 마찬가지로 Fig. 4에 도시하였다.

구조물 전체의 감쇠비에 대한 변동성은 해석 모델에서의 감쇠비를 확률

Table 1. Realization of damping ratio corresponding to the standard deviation of damping factor

Probability	Damping Sample
0.05	0.028116
0.15	0.034788
0.25	0.039486
0.35	0.043692
0.45	0.047849
0.55	0.052248
0.65	0.057219
0.75	0.063313
0.85	0.071864
0.95	0.088919

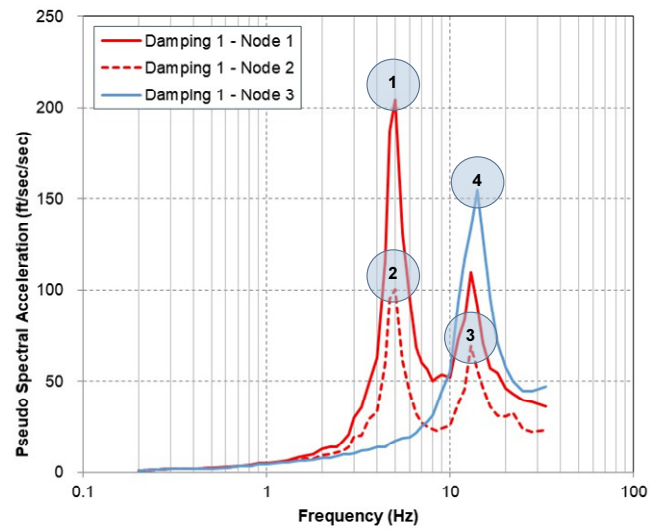


Fig. 5. Floor response spectra of target locations and frequencies

분포에 맞춰 각 케이스별로 입력함으로써 구현하였다. 이때 감쇠비의 확률 분포는 기존 지진취약도 변수에서 제시된 감쇠비에 대한 확률분포를 적용 하였다[14]. 이들 확률분포를 적용하여 10개의 해석 케이스에 대한 감쇠비 입력값을 산정하면 Table 1과 같다. 적용된 확률분포의 중앙값 감쇠비는 5%이고 로그표준편차는 0.35이다.

예제 해석모델에 대해서 지진파의 시간이력 변동성과 감쇠비의 변동성을 고려한 응답의 확률분포를 구하기 위해 각각의 확률변수를 Latin Hypercube Sampling 방법으로 조합하였다. 즉, 2개의 변수에 대해서 중복이 되지 않는 랜덤한 조합으로 10개의 입력 세트를 만들어서 해석을 수행하였다.

예제 모델의 해석 결과 중 하나의 케이스에 대해서 층응답스펙트럼을 도시하면 Fig. 5와 같다. 이 그래프에서 표시된 번호는 위치 및 진동수가 다른 4개의 가정된 기기에 대한 값을 의미하며 각각 격납건물 상단-격납건물 1차 고유진동수(4.9 Hz), 격납건물 중간-격납건물 1차 고유진동수(4.9 Hz), 격납건물 중간-격납건물 2차 고유진동수(13.3 Hz), 내부건물 상단-내부건물 1차 고유진동수(13.7 Hz)의 4곳을 표시한 것이다. 따라서 이들 4개의 위치에 대한 응답의 상관계수를 도출하면 가정된 4종 기기에 대한 지진상관계수로 입력할 수 있다. Table 2는 구하고자 하는 진동수와 설치 위치가 다른 4개 기기의 응답에 대한 상관계수를 층응답스펙트럼 첨두값을 기준으로

Table 2. Seismic correlation coefficient by statistical analysis

	Cont.Top – 1st Mode	Cont.Mid. – 1st Mode	Cont.Mid. – 2nd Mode	Int.Top – 1st Mode
Cont.Top - 1st Mode	1.000	0.989	0.718	0.397
Cont.Mid. - 1st Mode		1.000	0.685	0.346
Cont.Mid. - 2nd Mode			1.000	0.008
Int.Top-1st				1.000

Table 3. Application example of Reed-McCann procedure

Fragility Factor	Factor1			Factor2			Factor3			Total
	Comm.	Indep.	Stdev.	Comm.	Indep.	Stdev.	Comm.	Indep.	Stdev.	Stdev.
Comp1	0.15	0.20	0.25	0.20	0.15	0.25				0.35
Comp2	0.15	0.20	0.25	0.20	0.20	0.28	0.1	0.15	0.18	0.42
Comp3				0.20	0.25	0.32	0.1	0.20	0.22	0.39
Comp4							0.1	0.25	0.27	0.27

도출한 것이다.

감쇠비는 모든 모드에 모든 지점에 동일한 영향을 미치기 때문에 상관성이 거의 1에 가까운 값을 가질 것이다. 그러나 지진파의 시간이력에 대해서는 건물의 위치가 달라지고, 진동수 성분이 달라지고, 건물이 격납건물과 내부건물로 달라짐에 따라 점점 상관계수가 0에 가깝게 작아질 것이다. 따라서 Table 2와 같이 위치와 고유진동수가 달라지면 상관계수가 작아짐을 확인할 수 있다.

이와 같이 변수들의 확률분포를 고려하여 입력값을 구성하고 해석을 통해 그 응답의 확률분포에 대해서 상관계수를 구함으로써 고려된 변수들에 의한 전체적인 상관성을 상관계수행렬로 구성할 수 있다. 이 상관계수행렬은 식 (7)에서 C 행렬을 나타내며 다중적분 방법을 적용하여 동시손상확률을 구하기 위한 입력값으로 사용된다.

5. 취약도 변수분리 평가 방법

기존의 지진취약도 변수들에 대해서 성능에 관한 변수들의 상관성은 전문가 판단에 의해 지정하는 것이 가장 현실적인 방법이다. 이를 위해서는 취약도 변수분리 평가 방법의 적용이 가장 합리적이다. 그러나 해석적 방법을 기반으로 하는 다중적분 방법과 전문가 판단을 기반으로 하는 변수분리 방법을 동시에 적용하기 위한 절차는 제안된 적이 없다. 통계적으로 두 방법은 과정만 다를 뿐 상호 변환이 가능하다. 여기서는 변수분리 방법에 의한 절차를 상관계수로 변환하여 다중적분 방법에 적용할 수 있도록 수식을 도출하였다.

취약도 변수는 각각 독립변수와 상관변수로 분리된다. 상관변수 변환은 식 (14)와 같이 상관계수가 각각의 확률분포 표준편차(β_1, β_2)에 대한 공통인자(β_C)의 확률분포 표준편차 두 개를 곱하여 계산된다는 점에 착안하여 변환할 수 있다.

$$\rho_{12} = \frac{\beta_C}{\beta_1\beta_2} = \frac{\sum \beta_c^2}{\beta_1\beta_2} \quad (14)$$

이때 상관계수를 구하기 위한 기기 쌍을 선택하고 이들의 모든 확률변수

Table 4. Transformation to seismic correlation coefficient

Std.	0.35	0.42	0.39	0.27
	C1	C2	C3	C4
C1	1.0			Sym.
C2	0.43	1.0		
C3	0.29	0.31	1.0	
C4	0.00	0.09	0.09	1.0

들에 대한 공통인자를 추출함으로써 상관계수행렬로 변환할 수 있다. 이렇게 변환된 상관계수를 이용하여 다중적분 방법에 의해 동시손상확률을 산정할 수 있다.

이에 대한 구체적인 적용을 보여주기 위해 공통인자로부터 상관계수로 변환하는 방법에 대한 예제를 구성하였다. Table 3과 같이 4개의 기기(component 1~4)에 대해 각각 3개의 지진취약도 변수(factor 1~3)가 구성되었다고 가정한다. 여기서 지진취약도 변수는 어떠한 것이든 가능하기 때문에 특정하지는 않았다. 각 변수별 공통인자와 독립인자를 전문가 판단에 의해 분리하여 표현되었다고 가정하여 Table 3과 같이 전개할 수 있다. 이로부터 성능의 상관계수를 식 (14)를 적용하여 각각의 기기 쌍에 대해 식 (15)과 같이 계산할 수 있다. 이들을 상관계수행렬로 구성하면 Table 4와 같다.

$$\begin{aligned} C_1 - C_2 &: \frac{0.15^2 + 0.20^2}{0.35 \times 0.42} = 0.43 & C_1 - C_3 &: \frac{0.20^2}{0.35 \times 0.39} = 0.29 \\ C_1 - C_4 &: \frac{0}{0.35 \times 0.27} = 0.00 & C_2 - C_3 &: \frac{0.20^2 + 0.10^2}{0.42 \times 0.39} = 0.31 \\ C_2 - C_4 &: \frac{0.10^2}{0.42 \times 0.27} = 0.09 & C_3 - C_4 &: \frac{0.10^2}{0.39 \times 0.27} = 0.09 \end{aligned} \quad (15)$$

이와 같은 방법으로 취약도 변수분리 방법에 의한 상관성 고려 절차를 상관계수로 변형하여 다중적분 방법을 적용할 수 있도록 할 수 있다. 만약 두 가지 방법에 의해, 즉 응답은 해석으로 상관계수를 직접 구하고 성능은 취약도 변수의 공통인자를 판단하여 결정하는 경우 후자를 상관계수로 변형하여 통합된 상관계수를 사용함으로써 동시손상확률을 구할 수 있다. 이

때 두 개의 상관계수행렬 통합은 기본 통계 가정에 의해 식 (8)에서 제시된 응답과 성능의 상관계수 합성 방법을 적용하면 된다.

6. 결론

지진취약도곡선에서의 상관성에 대한 논의는 오래전에 시작되었다. 그러나 실질적인 적용을 위해서 상관성 정도를 평가하는 것이 매우 어렵고 전 세계적으로 합의된 절차가 없어서 아직 연구 단계에만 머물러 있다. 이에 이 연구에서는 각 지진상관성 함수 적용 방법에 대한 실제 구현을 시도해보고 각 방법의 장점을 살려 조합할 수 있는 방법을 개발하였다.

응답의 상관계수를 도출하기 위한 해석적 방법이 적용 가능하다고 판단되어 이를 적용한 예제를 구현하였다. 성능에 대한 상관계수는 일반적으로 실험적 연구가 필요하지만 이를 실제 기기에 대해서 구현하는 것은 사실상 매우 어렵다. 따라서 기존의 지진취약도 변수들에 대해서 성능에 관한 변수들의 상관성을 전문가 판단에 의해 지정하는 것이 가장 현실적인 방법이라 판단되어 취약도 변수의 공통인자 분리 방법에 의한 절차를 적용하였다.

기존 문헌들에서는 이들의 방법론을 따로 적용하는 것에만 국한하고 있지만 여기서는 취약도 변수분리 평가 방법을 다중적분 방법에 적용할 수 있도록 상관계수 변환 방법을 제시하여 두 방법이 동시에 적용될 수 있는 절차를 제시하였다. 아직까지 각 취약도 인자들 자체의 상관성이나 상관정도를 판단할 수 있는 데이터들이 부족하여 실제 상용 원전에 적용하기에는 많은 추가적인 연구가 필요하다. 이 연구에서는 매우 단순화된 경우에 대해 예제를 기반으로 방법론을 제시하였다. 실제 산업시설이나 원전과 같은 복잡한 모델의 경우에는 보다 많은 기기 개수와 다양한 확률변수들의 상관성이 포함되어야 하므로 이를 계산하기 위한 소프트웨어 또한 개발이 필요할 것이다. 이 연구는 실제 적용을 위한 방법 및 절차를 제시함에 있어서 그 기반이 될 수 있다.

/ 감사의 글 /

본 연구는 2017학년도 부산대학교 교내학술연구비(신입교수연구정착금) 및 산업통상자원부(MOTIE)와 한국에너지기술평가원(KETEP)의 지원을 받아 수행한 연구 과제(No. 20181510102410)입니다.

/ REFERENCES /

1. Kennedy RP, Ravindra MK, Seismic for Nuclear Power Plant Risk Studies, Nuclear Engineering and Design, 1984;79:47-68.
2. Wells JE, George LL, Cummings GE, Seismic Safety Margins Research

Program; Systems Analysis (Project VIII), NUREG/CR-2015, Lawrence Livermore National Laboratory, Livermore, CA, c1983.

3. USNRC, Severe Accident Risks: An Assessment for Five U.S. Nuclear Power Plants (NUREG-1150), U.S. Nuclear Regulatory Commission, c1990.
4. Ravindra MK, Banon H, Sues RH, Thrasher RD, Sensitivity Studies of Seismic Risk Models, Report EPRI-NP-3562, Electric Power Research Institute, c1984.
5. Watanabe Y, Oikawa T, Muramatsu K, Development of the DQFM Method to Consider the Effect of Correlation of Component Failures in Seismic PSA of Nuclear Power Plant, Journal of Reliability Engineering and System Safety, 2003;79:265-279.
6. Budnitz RJ, Hardy GS, Moore DL, Ravindra MK, Correlation of Seismic Performance in Similar SSCs (Structures, Systems, and Components) (No. NUREG/CR-7237), U.S. Nuclear Regulatory Commission, c2017.
7. Reed JW, McCann MW, Iihara J, Tamjed H, ICOSAR '85, 4th International Conference on Structural Safety and Reliability, Analytical Techniques for Performing Probabilistic Seismic Risk Assessment of Nuclear Power Plants, U.S. 1985 May;III 253-263.
8. Bohn MP, Lambright JA, Procedures for the External Event Core Damage Frequency Analyses for NUREG-1150, NUREC/CR-4840, Sandia National Laboratories, c1990.
9. Iman RL, Conover WJ, A Distribution-free Approach to Inducing Rank Correlation Among Input Variables, Communications in Statistics-Simulation and Computation, 1982;11(3):311-334.
10. Pellissetti MF, Klapp U, Transactions of Twenty-First SMiRT Conference, Integration of Correlation Models for Seismic Failures into Fault Tree Based Seismic PSA, 2011 Nov; New Delhi, India, Div-Vii:Paper ID# 604.
11. Wakefield D, Ravindra MK, Merz K, Hardy G, Seismic Probabilistic Risk Assessment Implementation Guide, EPRI TR-1002989, EPRI, Palo Alto, c2003.
12. Ebisawa K, Teragaki T, Nomura S, Abe H, Shigemori M, Shimomoto M, Concept and Methodology for Evaluating Core Damage Frequency Considering Failure Correlation at Multi Units and Sites and Its Application, Nuclear Engineering and Design, 2015;288:82-97.
13. EPRI, Seismic Fragility Applications Guide Update, EPRI 1019200, EPRI, Palo Alto, c2009.
14. EPRI, Seismic Fragility and Seismic Margin Guidance for Seismic Probabilistic Risk Assessments, EPRI 3002012994, EPRI, Palo Alto, c2018.