

수동형 댐퍼를 장착한 구조물의 동적응답기반 신뢰성 해석 - 제2편: 시스템 파괴확률 산정

김승민 · 옥승용[†]

한경대학교 토목안전환경공학과

(2016. 7. 28. 접수 / 2016. 9. 19. 수정 / 2016. 9. 22. 채택)

Dynamic Response based System Reliability Analysis of Structure with Passive Damper - Part 2: Assessment of System Failure Probability

Seung-Min Kim · Seung-Yong Ok[†]

Department of Civil, Safety and Environmental Engineering, Hankyong National University

(Received July 28, 2016 / Revised September 19, 2016 / Accepted September 22, 2016)

Abstract : This study proposes a multi-scale dynamic system reliability analysis of control system as a method of quantitative evaluation of its performance in probabilistic terms. In this second paper, we discuss the control effect of the viscous damper on the seismic performance of the structure-level failure. Since the failure of one structural member does not necessarily cause the collapse of the structural system, we need to consider a set of failure scenarios of the structural system and compute the sum of the failure probabilities of the failure scenarios where the statistical dependence between the failure scenarios should be taken into account. Therefore, this computation requires additional system reliability analysis. As a result, the proposed approach takes a hierarchical framework where the failure probability of a structural member is computed using a lower-scale system reliability with the union set of time-sequential member failures and their statistical dependence, and the failure probability of the structural system is again computed using a higher-scale system reliability with the member failure probabilities obtained by the lower-scale system reliability and their statistical dependence. Numerical results demonstrate that the proposed approach can provide an accurate and stable reliability assessment of the control performance of the viscous damper system on the system failure. Also, the parametric study of damper capacity on the seismic performance has been performed to demonstrate the applicability of the proposed approach through the probabilistic assessment of the seismic performance improvement of the damper system.
Key Words : multi-scale system reliability analysis, hierarchical framework, lower-scale system reliability, higher-scale system reliability, viscous damper, statistical dependence

1. 서론

이 연구는 구조물의 내진보강시스템으로서 수동형 점성 감쇠기를 적용한 경우 구조물의 내진성능 향상 효과를 확률론적 관점에서 정량화하는 신뢰성 해석을 다루고 있다. 이 연구는 두 편의 동반논문(companion paper)으로 구성되어 있으며, 제1편¹⁾에서는 지진 작용 시간 동안 구조물의 부재가 파괴되는 확률(매 순간 부재 파괴확률을 요소 신뢰성 해석을 통하여 산정한 후, 이들의 합집합으로 구성되는 전체 지진 작용 시간 동안

최소 한 번이라도 파괴사건이 발생할 확률)을 시스템 신뢰성 해석기법을 이용하여 산정하는 내용을 다루고 있으며, 제2편에 해당하는 이 논문에서는 앞서 산정된 지진 발생 시간 동안 각 부재의 파괴사건들로부터 전체 구조시스템의 붕괴를 유발하는 시스템 파괴확률을 다시 한 번의 시스템 신뢰성 해석을 통하여 산정하는 내용을 다루고 있다.

제1편¹⁾에서는 3층 전단빌딩구조물에 감쇠장치가 층별로 설치된 경우, 감쇠장치의 부재별 파괴확률 저감 효과를 탐색하였으며, 해석결과의 타당성을 검증하고자 MCS

[†] Corresponding Author : Seung-Yong Ok, Tel : +82-31-670-5282, E-mail : syok@hknu.ac.kr

Department of Civil, Safety and Environmental Engineering & Construction Engineering Research Institute, Hankyong National University, 327, Jungang-ro, Anseong, Kyonggi-do 17579, Korea

기법²⁾을 적용했을 때와 결과를 비교 분석하였다.

이 논문에서는 각 부재별 신뢰성 해석결과로부터 얻어진 부재의 파괴확률과 신뢰성 지수를 이용하여 여러 부재의 조합으로 구성되는 파괴모드의 전체 합집합으로서 전체 구조 시스템의 파괴확률을 다루고자 한다. 이 논문의 구성은 제시하는 기법의 전체적인 개념과 방법론을 2장에서 기술하였으며, 3장에서는 예제 구조물에 대한 수치 예를 다루었으며, 4장에서는 결론 및 고찰을 제시하였다.

2. 구조물-감쇠시스템의 시스템 신뢰성 해석

이 연구는 부재 수준에서의 시스템 신뢰성 해석과 전체 구조물 수준에서의 시스템 신뢰성 해석을 다루는 다단계 신뢰성 해석 프레임워크를 제시하고 있으며, 이를 개념도로 제시하면 Fig. 1과 같다. 전체적인 프레임워크

는 Song 등³⁾이 제시한 방법과 유사하나 Song 등³⁾이 제시한 방법은 정적 응답에 기반한 공간적 상관관계만을 고려하는 기법인 반면, 본 연구에서는 동적 응답에 기반한 신뢰성 해석방법으로서 시간영역에서의 응답해석 기법 및 그에 따른 시간적 상관관계와 부재 배치에 따른 공간적 상관관계를 동시에 다룰 수 있는 방법으로서 차별을 갖는다. 보다 상세한 설명은 다음과 같다.

Fig. 1(a)에서와 같이 구조물의 응답은 지진하중의 가진 이력에 따라 진동하는 시간이력곡선으로 표현된다. 여기서, 각 층별 기둥 부재의 응답(기둥의 변형 또는 층간 변위)은 매 시점에서 허용치를 초과할 확률이 존재한다. 각 시점($t=t_i$)에서 k 층 기둥의 응답이 허용치를 초과할 파괴확률 $P(E_k^i)$ 은, Fig. 1(e)에서 제시한 바와 같이, FORM 또는 SORM과 같은 신뢰성 해석기법⁴⁾을 이용하여 산정할 수 있다. 이를 요소 신뢰성 해석(Component Reliability

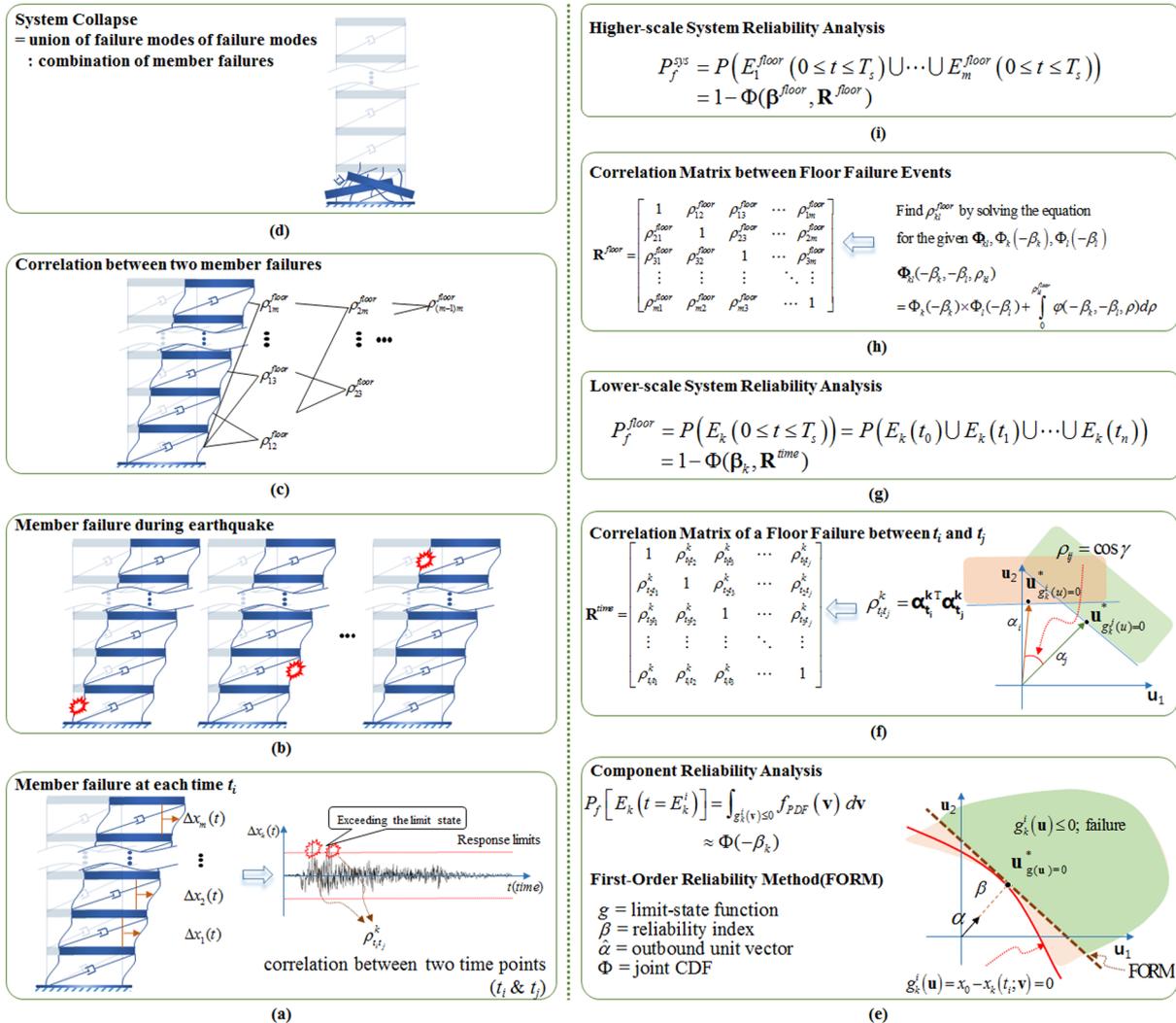


Fig. 1. Conceptual diagram and flowchart of multi-scale system reliability analysis.

Analysis)이라 한다. FORM은 각 시점에서의 파괴확률뿐만 아니라 표준정규공간에서 파괴면으로의 단위방향벡터(α_i^k)도 산정해준다. 따라서 두 시점 간 상관계수는 두 방향벡터의 내적($\rho_{i,t_j}^k = \alpha_{i,t_j}^{kT} \alpha_{i,t_j}^k$)으로부터 산정할 수 있으며, 이를 전체 시간영역으로 확장하면 Fig. 1(f)에서의 상관계수 행렬(correlation coefficient matrix)을 얻을 수 있다.

이로부터 지진 발생 시간동안 특정 부재(k 번째 부재)가 파괴될 사건(Fig. 1(b))은 전체 시간 동안 최소 한 번이라도 파괴가 발생할 사건들의 합집합으로 Fig. 1(g)의 식과 같이 정의되며, 이의 파괴확률은 시스템 신뢰성 해석에 해당한다. 이 연구에서는 이를 하위 단계 시스템 신뢰성 해석(lower-scale system reliability analysis)이라 명명하였으며, Genz 알고리즘⁵⁾을 이용하여 해를 산정하였다. 참고로, 여기서의 상관관계는 시간영역에서 두 시점에서의 파괴사건 간 상관관계를 의미한다. 즉, 시간적으로 인접한 두 파괴사건은 강한 상관관계를 가질 것이며 시간적으로 멀리 떨어진 사건은 약한 상관관계를 가질 것이다.

한편, Fig. 1(b)에서와 같이, 구조물의 붕괴를 유발하는 사건은 파괴모드(failure modes)로서 표현될 수 있다. 일반적인 경우, 파괴모드는 여러 부재들의 연쇄 파괴사건(combination of member failures)으로 구성될 수 있다. 이 연구에서는 전단빌딩모형으로 예제 구조물을 모델링하였으므로 어느 한 개의 기둥이 파괴되어도 전체 시스템이 붕괴되는 직렬시스템에 해당되므로, 기둥 하나의 파괴가 하나의 파괴모드를 구성하게 된다. 참고로, 프레임 구조물로 모델링하는 경우 파괴모드는 여러 부재 파괴의 교집합으로 구성된다⁶⁾. 최종적인 전체 시스템 파괴확률은 Fig. 1(d)와 Fig. 1(i)에서와 같이 파괴모드의 합집합으로 정의되며, 식 (1)과 같이 정의된다.

$$P_f^{sys} = P[(E_1^{floor}(0 \leq t \leq T_s) \cup \dots \cup E_m^{floor}(0 \leq t \leq T_s)] \quad (1)$$

여기서, 아래 첨자 m 은 전체 부재의 개수이다. 각 부재들은 공간상으로 인접해 있으며 서로 연결되어 있다. 따라서 Fig. 1(c)에서 나타낸 바와 같이, 각 부재의 파괴사건들은 인접한 부재와 확률적 의존성을 가지게 된다. 이러한 공간적 상관관계를 산정하기 위해서는 Fig. 1(h)에 제시된 식 (2)의 두 사건 간 상관계수 관계식⁷⁾을 이용할 필요가 있다.

$$\begin{aligned} \Phi_{kl}(-\beta_k, -\beta_l, \rho_{kl}) \\ = \Phi_k(-\beta_k) \times \Phi_l(-\beta_l) + \int_0^{\beta_{kl}^{floor}} \phi(-\beta_k, -\beta_l, \rho) d\rho \end{aligned} \quad (2)$$

여기서, $\phi(\cdot)$ 는 표준정규분포의 확률밀도함수(Probability Density Function; PDF)이며, $\Phi(\cdot)$ 는 표준정규분포의 누적분포함수(Cumulative Distribution Function; CDF)이다. $\Phi_k(-\beta_k)$, $\Phi_l(-\beta_l)$ 는 각각 k 층과 l 층 부재의 지진 발생 시간($0 \leq t \leq T_s$) 동안의 파괴확률에 상응하는 신뢰성지수로서 Kim 등¹⁾에서 제시한 방법으로 산정할 수 있으며, $\Phi_{kl}(-\beta_k, -\beta_l, \rho_{kl})$ 는 k 층과 l 층 부재가 동시에 파괴될 교집합의 확률로서 식 (3)과 같이 표현할 수 있다.

$$\begin{aligned} \Phi_{kl}(-\beta_k, -\beta_l, \rho_{kl}) \\ = P(E_k(0 \leq t \leq T_s) \cap E_l(0 \leq t \leq T_s)) \end{aligned} \quad (3)$$

식 (3)에서 각 층의 파괴확률은 각 시점별 파괴사건의 합집합이므로, 두 층의 동시 파괴확률은 식 (4)로서 표현될 수 있다.

$$\begin{aligned} P(E_k(0 \leq t \leq T_s) \cap E_l(0 \leq t \leq T_s)) \\ = P[\{E_k^0 \cup E_k^1 \cup \dots \cup E_k^n\} \cap \{E_l^0 \cup E_l^1 \cup \dots \cup E_l^n\}] \\ = P\left[\left\{ \overline{\left(\bigcup_{i=0}^n (E_k^i \cup E_l^i) \right)} \right\} \cap \left\{ \overline{\left(\bigcup_{i=0}^n (E_k^i \cup E_l^i) \right)} \right\} \right] \\ = 1 - P(\overline{E_k^0} \cap \overline{E_k^1} \cap \dots \cap \overline{E_k^n}) - P(\overline{E_l^0} \cap \overline{E_l^1} \cap \dots \cap \overline{E_l^n}) \\ + P(\overline{E_k^0} \cap \overline{E_k^1} \cap \dots \cap \overline{E_k^n} \cap \overline{E_l^0} \cap \overline{E_l^1} \cap \dots \cap \overline{E_l^n}) \end{aligned} \quad (4)$$

식 (4)에서 첫 두 확률 항은 모든 시점에서 파괴되지 않을 사건의 확률에 상응하므로, 식 (5)로부터 구할 수 있다.

$$P(\overline{E_k^0} \cap \overline{E_k^1} \cap \dots \cap \overline{E_k^n}) = \Phi(\beta_k, \mathbf{R}_k^{time}) \quad (5a)$$

$$P(\overline{E_l^0} \cap \overline{E_l^1} \cap \dots \cap \overline{E_l^n}) = \Phi(\beta_l, \mathbf{R}_l^{time}) \quad (5b)$$

여기서, β_k 와 β_l 은 각각 k 층과 l 층 부재가 지진 발생 시간($0 \leq t \leq T_s$) 동안 파괴되지 않을 확률에 상응하는 신뢰성 지수이며, \mathbf{R}_k^{time} 과 \mathbf{R}_l^{time} 은 각각 k 층과 l 층 부재의 각 시간별 상관계수행렬이다.

또한, 식 (4)에서 마지막 확률 항은 k 층과 l 층 부재들이 모두 파괴되지 않을 확률을 의미하며, 식 (6)으로서 정의된다.

$$\begin{aligned} P(\overline{E_k^0} \cap \overline{E_k^1} \cap \dots \cap \overline{E_k^n} \cap \overline{E_l^0} \cap \overline{E_l^1} \cap \dots \cap \overline{E_l^n}) \\ = \Phi\left(\begin{bmatrix} \beta_k \\ \beta_l \end{bmatrix}, \mathbf{R}_{kl}^{time}\right) \end{aligned} \quad (6)$$

여기서, \mathbf{R}_{kl}^{time} 은 두 층의 각 시간 간 상관계수로서 $[2n \times 2n]$ 크기의 행렬이며 식 (7)로 표현된다. 즉, 각

층별 방향벡터의 각 시간별 내적으로 산정된다.

$$\mathbf{R}_{kl}^{time} = \begin{bmatrix} \left\{ \alpha_{t_i}^k \alpha_{t_j}^k \right\} & \left\{ \alpha_{t_i}^l \alpha_{t_j}^l \right\} \\ \left\{ \alpha_{t_j}^k \alpha_{t_i}^k \right\} & \left\{ \alpha_{t_j}^l \alpha_{t_i}^l \right\} \end{bmatrix} \quad (7)$$

여기서, 위 첨자 k, l 은 각각 k 층과 l 층 부재를 나타내는 첨자이며, 아래 첨자 t_i, t_j 는 시각을 나타내는 첨자이다.

식 (5), (6)을 식 (4)에 대입하여 얻어진 두 층의 동시 파괴확률을 식 (2)에 대입하고, 이를 만족하는 상관계수 ρ_{kl}^{floor} 는 다양한 최적화 알고리즘을 이용하여 산정할 수 있다. 이 연구에서는 이분법(bi-section method)⁸⁾을 적용하여 산정하였다. 각 층별 상관계수를 산정함으로써 부재 간 상관행렬을 얻을 수 있으며, 최종적인 전체 구조물의 붕괴확률은 식 (1)로부터 식 (8)로 다시 표현된다.

$$P_f^{sys} = P(E_1 \cup E_2 \cup \dots \cup E_m) = 1 - \Phi(\beta^{floor}, \mathbf{R}^{floor}) \quad (8)$$

여기서, β^{floor} 는 각 층별 지진 발생 시간 동안의 파괴확률에 상응하는 신뢰성지수로 구성되는 벡터이며, $\mathbf{R}^{floor} = [\rho_{kl}^{floor}]$ 는 전술한 방법에 따라 산정되는 지진 발생 시간 동안 층 간 상관계수로 구성되는 행렬이다. 식 (8)의 해도 Genz 알고리즘을 적용하여 산정할 수 있다. 이를 상위 단계에서의 시스템 신뢰성 해석(higher-scale system reliability analysis)라 한다.

이 연구에서는 전단빌딩모형을 다루었으나, 프레임 요소를 사용하여 구조물을 모델링하는 경우에는 파괴모드가 여러 부재의 교집합으로 구성되므로 파괴모드의 파괴확률을 산정하기 위하여 시스템 신뢰성 해석을 수행할 필요가 있다. 또한, 전체 시스템의 파괴는 여러 파괴모드의 합집합으로 구성되므로 또 한번의 시스템 신뢰성 해석을 필요로 한다. 따라서 이 경우에는 3단계의 시스템 신뢰성 해석을 통하여 전체 구조 시스템의 붕괴확률을 산정할 수 있다. 이처럼 제시하는 기법은 대상 시스템에 따라 다단계 시스템 신뢰성을 통하여 파괴확률을 산정할 수 있는 프레임워크를 제공해주며 다양한 시스템들에 확장 적용될 수 있는 장점을 갖는다.

3. 수치 예

제시하는 전체 구조물의 시스템 해석방법에 대한 수치 예로서 Kim 등¹⁾에서 다루었던 3층 전단빌딩구조물을 고려하였다. 따라서 구조물의 층별 질량(m)은 3,500

(ton), 기둥 강성(k)은 1.35×10^9 (N/m), 감쇠비(c)는 2%의 모달비례감쇠를 적용하였다. 지진하중으로는 PGA (peak ground acceleration) 0.3 g에 상응하는 세기 $S_0 = 7.316 \times 10^{-3}$, 탁월주파수 $\omega_g = 5\pi$, 지반 감쇠비 $\zeta_g = 0.6$ 의 지반가속도가 10초 동안 지속되는 경우를 고려하였으며, 시간간격 $\Delta t = 0.02$ 초로 이산화하였다. 층간 변위의 한계치도 $x_0 = 4$ (cm)로 동일하게 설정하였다. 이 논문에서는 수동형 댐퍼를 장착한 구조물의 시스템 신뢰성 해석(파괴확률 산정)을 주제로 하므로, 수동형 감쇠기의 용량을 10, 15, 20%로 변화시켜가면서 제어성능 관점에서 시스템 파괴확률의 개선효과를 살펴보고자 한다.

3.1. 감쇠용량에 따른 층별 내진성능 비교

점성 감쇠시스템의 감쇠용량을 10%, 15%, 20%로 적용한 각 케이스에 대한 층별 파괴확률과 신뢰도지수를 산정하면 Table 1과 같다.

Table 1에서 확인할 수 있듯이, 감쇠용량이 10%~20%로 증가하면서 각 층별 파괴확률이 감소하고 신뢰도지수는 증가하는 효과를 정량적으로 확인할 수 있다. 일반적으로 신뢰도지수를 3이상으로 구조물을 설계한다고 했을 때, 해당 구조물에서는 2층과 3층의 경우 감쇠비 10% 이상만 사용하여도 만족하는 결과를 확인할 수 있다. 하지만 1층의 응답에서는 10%의 감쇠비를 적용하는 경우 신뢰도지수가 2.2725로서 목표 신뢰도지수를 만족하지 못함을 확인할 수 있다.

제시하는 기법에 의하여 산정된 결과를 검증하고자 MCS를 추가적으로 수행하였다. MCS에서는 확률변수의 확률분포로부터 임의의 생성(random sampling)된 변수들을 시스템의 운동방정식에 대입하여 동해석을 수행하고 지진 발생 시간동안의 최대 응답이 한계치를 만족하는 지 여부를 식 (9)를 이용하여 판별하고 전체 시뮬레이션 횟수로부터 초과하는 횟수의 비로서 파괴확률을 산정하게 된다.

Table 1. Reliability analysis results of each column member with respect to 3 damper capacities

Floor	Damper (10%)		Damper (15%)		Damper (20%)		
	Proposed	MCS	Proposed	MCS	Proposed	MCS	
1st	P_f	1.15×10^{-2}	1.72×10^{-2}	1.20×10^{-3}	2.09×10^{-2}	1.26×10^{-4}	2.43×10^{-4}
	β	2.2725	2.1149	3.0358	2.8649	3.6601	3.4884
2nd	P_f	3.09×10^{-4}	4.76×10^{-4}	9.00×10^{-6}	1.33×10^{-5}	1.98×10^{-8}	6.00×10^{-7}
	β	3.4238	3.3042	4.2883	4.2008	5.4924	4.8556
3rd	P_f	2.22×10^{-16}	0	0	0	0	0
	β	8.1259	∞	∞	∞	∞	∞

$$P = \frac{\sum_{i=1}^{N_T} n_i}{N_T} \quad \text{where } n_i = \begin{cases} 1 & \text{if } \max |u(t; \mathbf{v})| > u_0 \\ 0 & \text{otherwise} \end{cases} \quad (9)$$

MCS 방법에서 수렴조건은 산정되는 파괴확률의 COV(coefficient of variation)가 0.01 이하인 경우 샘플링이 종료되도록 설정하였으며, 최대 샘플링 개수는 10^6 (1층)~ 10^7 (2,3층)으로 설정하였다.

Table 1에서 제시하는 방법과 MCS에 의한 결과가 전반적으로 유사한 결과를 보이고 있으나 파괴확률이 작을수록 두 방법에 의하여 산정된 파괴확률의 차이는 커지는 결과를 보인다. Kim 등¹⁾에서도 기술하였다시피 두 방법에서의 결과가 차이를 보이는 이유는 방법 자체가 근사법이고 확률변수의 개수가 501개로서 많기 때문이다. 한편, 10%의 감쇠용량을 적용한 경우, 제시하는 기법은 3층의 파괴확률로서 2.22×10^{-16} 의 확률값으로 평가하는 반면, MCS는 0의 확률값을 제시하고 있음을 확인할 수 있다. 이처럼 서로 상이한 결과를 보여주는 이유는 MCS의 샘플링 개수가 부족하기 때문이다. 즉, 총 샘플링 개수는 10^7 인 반면 실제의 파괴확률은 (정해는 모르지만 제시하는 방법의 결과를 고려할 때) 10^{-16} 수준의 값이기 때문이다. 즉, MCS에서는 파괴가 발생하는 샘플이 추출되지 않았기 때문이다. 이처럼 파괴확률이 매우 낮은 경우 MCS 방법은 샘플 수를 늘림으로써 추정할 수는 있으나 그에 따른 연산시간은 기하급수적으로 늘어나므로 본 예제에서와 같은 수준의 파괴확률은 현실적으로 추정하기 불가능하다.

MCS 방법의 수렴성을 확인하기 위하여 각 시물레이션 횟수에 따른 파괴확률의 COV를 Fig. 2에 각 감쇠용량별 그리고 층별로 비교·도시하였다. 그림에서 확인할 수 있듯이, 감쇠용량 20%의 경우 MCS는 실질적으로 2층의 파괴확률을 제대로 추정하지 못하고 있음을 확인할 수 있다. 즉, Table 1에서 제시하는 기법에 의하여 산정된 파괴확률은 1.98×10^{-8} 인 반면, MCS는 6.00×10^{-7} 으로 과다 추정하고 있는데, Fig. 2의 COV 수렴성을 보면 10^7 번의 시물레이션에서도 COV가 0.4 수준까지만 감소하는 결과를 보이고 있다. 따라서 충분한 수렴을 하지 못하여 잘못된 결과를 보이고 있다. 또한, 감쇠비 10%의 3층 응답에 있어서도 제시하는 기법에 의하여 산출되는 2.22×10^{-16} 의 파괴확률을 추정하지 못하는 한계를 보이고 있다.

이상의 결과로부터, 진동제어시스템의 제어성능이 증가할수록 구조물의 파괴확률은 감소하게 되는데, MCS는 높은 제어성능에 대해서 충분한 정확도로서 파괴확률을 추정하지 못하는 한계를 가지는 반면, 제시

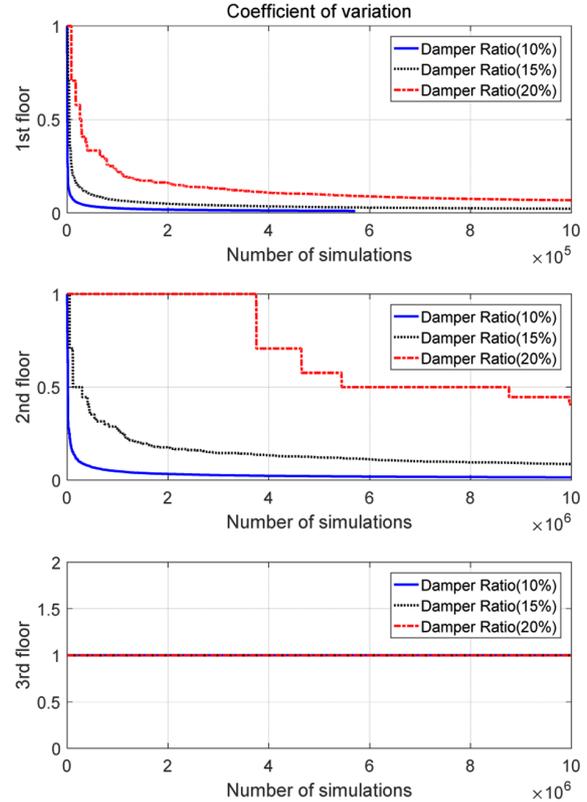


Fig. 2. MCS Convergence of floor failure probability.

하는 기법은 제어성능 증가에 따라 구조물의 파괴확률이 매우 작아지더라도 충분한 정확도로서 추정할 수 있음을 보여준다.

3.2. 감쇠장치 유무에 따른 시스템 파괴확률 산정

점성 감쇠장치 유무에 따른 시스템 파괴확률을 산정하기 위해 앞서 식 (3)~(6)에 해당하는 k 층과 l 층 부재가 동시에 파괴될 교집합의 확률을 구한 후 식 (2)에 대입하여 ρ_{ij} 를 Table 2와 같이 산정하였다.

따라서 원 구조물 및 감쇠용량에 따른 각 경우별 층간 상관계수 행렬은 다음과 같다.

Table 2. Computation of spatial correlation between two member failures

	Original (0%)	Damper (10%)	Damper (15%)	Damper (20%)
Φ_{12}	1.34×10^{-5}	4.54×10^{-4}	6.29×10^{-5}	2.94×10^{-6}
Φ_{13}	5.55×10^{-5}	2.23×10^{-4}	1.19×10^{-5}	4.90×10^{-6}
Φ_{23}	1.59×10^{-4}	1.01×10^{-5}	1.20×10^{-5}	8.31×10^{-10}
ρ_{12}	0.9999	0.9687	0.9687	0.9687
ρ_{13}	-0.1563	0.9687	0.9687	0.9687
ρ_{23}	0.3438	0.9687	0.9687	0.9687

$$\begin{aligned}
 \mathbf{R}^{floor} &= \begin{bmatrix} 1 & 0.9999 & -0.1563 \\ 0.9999 & 1 & 0.3438 \\ -0.1563 & 0.3438 & 1 \end{bmatrix} && \text{For Original} \\
 \mathbf{R}^{floor} &= \begin{bmatrix} 1 & 0.9687 & 0.9687 \\ 0.9687 & 1 & 0.9687 \\ 0.9687 & 0.9687 & 1 \end{bmatrix} && \text{For } \zeta_d=10\% \\
 \mathbf{R}^{floor} &= \begin{bmatrix} 1 & 0.9687 & 0.9687 \\ 0.9687 & 1 & 0.9687 \\ 0.9687 & 0.9687 & 1 \end{bmatrix} && \text{For } \zeta_d=15\% \\
 \mathbf{R}^{floor} &= \begin{bmatrix} 1 & 0.9687 & 0.9687 \\ 0.9687 & 1 & 0.9687 \\ 0.9687 & 0.9687 & 1 \end{bmatrix} && \text{For } \zeta_d=20\%
 \end{aligned} \tag{10}$$

주어진 상관계수 행렬(\mathbf{R}^{floor})과 Table 1의 층별 신뢰성지수(β^{floor})를 식 (8)에 대입하여 Genz 알고리즘을 적용한 결과, 시스템 전체의 파괴확률 및 신뢰성지수는 Fig. 3과 같이 산정되었다.

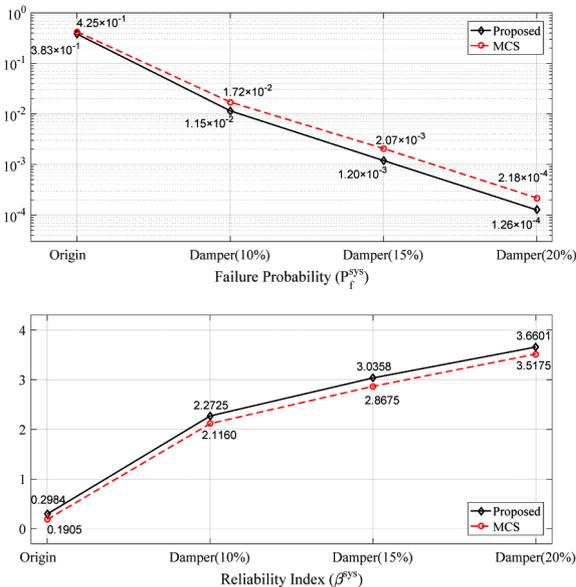


Fig. 3. System failure probabilities and reliability indices of original and damper-installed buildings.

Fig. 3에서 확인할 수 있듯이 원 구조물에서 감쇠용량이 10%~20%로 증가하면서 시스템 전체의 파괴확률은 각각 3.83×10^{-1} , 1.15×10^{-2} , 1.20×10^{-3} , 1.26×10^{-4} 으로 줄어들고 있으며, 시스템 전체 신뢰도 지수는 0.2984, 2.2725, 3.0358, 3.6601로 증가하는 결과를 보여주고 있다. 이러한 감쇠용량에 따른 진동 저감 효과는 널리 알려진 결과이지만, 이 연구에서는 파괴확률의 측면에서 제진성능을 정량화할 수 있다는 점에서 의의를 갖는다.

한편, 전체 구조시스템의 파괴확률값이 Table 1에서 제시된 1층의 파괴확률과 매우 유사한 값을 보여주고 있다. 이는 층별 파괴확률에서 2층과 3층에 대한 파괴

확률 값이 매우 작으므로 시스템 전체의 파괴확률에 반영이 되지만 미비한 값으로 적용된다. 이러한 결과로부터 예제 구조물에서는 1층 부재의 안전성이 전체 구조시스템의 안전성을 대변하고 있다고 판단된다.

제시하는 방법의 해의 정확성을 검증하고자 MCS를 적용한 결과도 Fig. 3에 함께 도시하였다. MCS에 의하여 산정된 파괴확률은 각각 4.25×10^{-1} , 1.72×10^{-2} , 2.07×10^{-3} , 2.18×10^{-4} 로, 신뢰도 지수는 0.1905, 2.1160, 2.8675, 3.5175로 산정되었으며, 이들 결과는 제시하는 기법과 유사한 결과를 보이고 있으나 감쇠용량이 증가함에 따라 차이가 미세하게 증가하는 결과를 보이고 있다. 이러한 차이는 제1편에서도 언급하였다시피 확률변수가 501개로서 매우 많은 상황에서 FORM방법과 MCS 방법이 모두 근사해법이기 때문이라고 판단된다. 덧붙여, MCS 방법의 수렴성을 확인하고자 시뮬레이션 회수(샘플링 개수)에 따른 시스템 파괴확률의 COV를 각 케이스별로 Fig. 4에 도시하였다. MCS 적용에 있어서 수렴조건은 시스템 파괴확률의 COV가 0.01 이하인 경우 또는 최대 샘플링 개수를 원구조물(Original)과 감쇠용량 10%(Damper (10%))인 경우에는 10^6 개, 감쇠용량 15%와 20%(Damper (15%), Damper (20%))인 경우에는 10^7 개로 설정하여 COV 조건을 만족하든지 아니면 최대 샘플링 개수에 다다르면 시뮬레이션이 종료되도록 설정하였다. Fig. 4에서 확인할 수 있듯이, 원구조물과 10%의 감쇠용량을 적용한 경우에는 시뮬레이션 10^6 회 이전에 0.01의 COV에 도달함으로써 시뮬레이션이 종료되었으며, 감쇠용량 15%인 경우에도 10^7 회 이전에 수렴조건을 만족하여 종료된 결과를 보인다. 그런데, 20%의 감쇠용량에서는 시뮬레이션 10^7 회에서도 COV가 0.0214로 수렴조건을 만족하지 못하고 최대 시뮬레

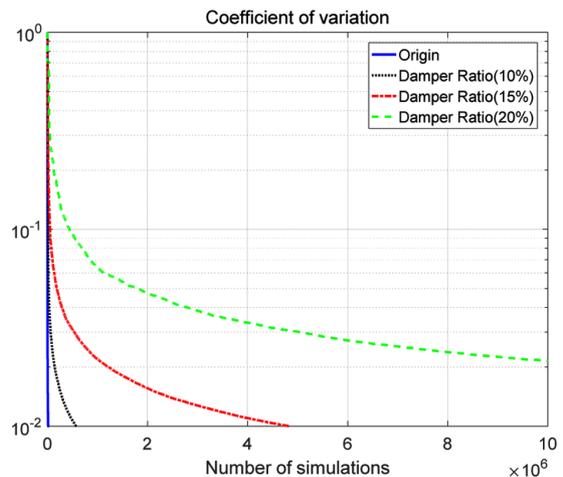


Fig. 4. MCS Convergence of system failure probability.

이선 횡수에 도달함으로써 종료되는 결과를 보이고 있다. 따라서 MCS 결과에서 감쇠용량 20%인 경우에 제시하는 방법과의 오차가 큰 이유로 이러한 COV의 수렴조건을 만족하지 못하였음에도 일부 기인한다고 판단된다.

4. 결론 및 고찰

이 연구는 동반논문으로서 제1편에서는 부재 수준, 제2편에서는 전체 구조시스템 수준의 파괴확률과 그에 상응하는 신뢰성지수를 산정하는 신뢰성 해석기법을 다루었다. 제시하는 기법은 동적 응답에 기반하여 구조물의 부재 수준, 파괴모드 수준 그리고 전체 시스템 수준의 다단계 동적 시스템 신뢰성 해석을 단계별로 수행할 수 있는 프레임워크를 제시해준다. 이 연구에서는 단일 부재의 파괴가 파괴모드에 해당하므로 2단계와 3단계가 동일한 관계로 2번의 시스템 신뢰성 해석만을 수행한 결과를 제시하고 있다. 각 단계에서 시스템 신뢰성 해석을 수행하기 위해서는 시간 영역에서 각 시간대별 파괴사건들의 확률적 의존관계와 부재 연결에 따른 공간적 확률적 의존관계도 고려할 수 있어야 하며, 제시하는 기법에서 이러한 시간적·공간적 상관관계를 다룰 수 있음을 제시하였다.

제시하는 방법에 따른 신뢰성 해석결과의 타당성을 확인하기 위하여 Kim 등¹⁾에서 다루었던 3층 전단빌딩 구조에 대한 신뢰성 해석을 수행하였으며, 비교 목적으로 MCS도 함께 수행하였다. 또한, 수동형 감쇠기의 파괴확률에의 영향성을 살펴보고자 감쇠 용량을 10%~20%로 변화시켜 가면서 제어성능의 변화 결과를 제시하였다. 해석결과, 점성형 감쇠시스템의 내진성능개선 효과를 시스템 파괴확률 측면에서 정량화하여 제시할 수 있었으며, MCS 방법과의 비교 결과 제시하는 방법이 합리적인 결과를 제공하고 있음을 확인할 수 있었다. 덧붙여, MCS 방법의 경우 확률변수의 개수가 증가함에 따라 그리고 감쇠용량이 증가함에 따라 오차 수준이 증가할 수 있는 반면, 제시하는 방법은 MCS방법 보다는 해의 정확도 및 결과의 신뢰성이 높음을 확인할 수 있었다.

감사의 글: 이 논문은 2013년도 정부(교육부)의 재원으로 한국연구재단의 기초연구사업 지원을 받아 수행된 것임(NRF-2013R1A1A2009782)

References

- 1) S.-M. Kim and S.-Y. Ok, "Dynamic Response based System Reliability Analysis of Structure with Passive Damper - Part 1: Assessment of Member Failure Probability", Journal of the Korean Society of Safety, Vol. 31, No. 4, pp. 90-96, 2016.
- 2) N. Metropolis and S. Ulam, "The Monte Carlo Method", Journal of the American Statistical Association, Vol. 44, No. 247, pp. 335-341, 1949.
- 3) J. Song and S.-Y. Ok, "Multi-scale System Reliability Analysis of Lifeline Networks under Earthquake Hazards", Earthquake Engineering and Structural Dynamics, Vol. 39, pp. 259-279, 2010.
- 4) A. Der Kiureghian, "First-and Second-order Reliability Methods", Engineering Design Reliability Handbook, Edited by E. Nikolaidis, D.M. Ghiocel & S. Singhal, CRC Press, Boca Raton, FL, Chapter 14, 2005.
- 5) A. Genz, "Numerical Computation of Multivariate Normal Probabilities", Journal of Computational and Graphical Statistics, Vol. 1, No. 2, pp. 141-149, 1992.
- 6) S.-Y. Ok and D.-S. Kim, "System Reliability Analysis of Rack Storage Facilities", Journal of the Korean Society of Safety, Vol. 29, No. 4, pp. 116-122, 2014.
- 7) O. D. Ditlevsen and H. O. Madsen. Structural Reliability Methods. Wiley: New York, NY, U.S.A., 1996.
- 8) R. Butt, Applied Linear Algebra and Optimization using MATLAB, Mercury Learning and Information, 2011.