

# 수동형 댐퍼를 장착한 구조물의 동적응답기반 신뢰성 해석 - 제1편: 부재별 파괴확률 산정

김승민 · 옥승용\*

한경대학교 토목안전환경공학과

(2016. 6. 30. 접수 / 2016. 7. 25. 수정 / 2016. 7. 27. 채택)

## Dynamic Response based Reliability Analysis of Structure with Passive Damper - Part 1: Assessment of Member Failure Probability

Seung-Min Kim · Seung-Yong Ok\*

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

(Received June 30, 2016 / Revised July 25, 2016 / Accepted July 27, 2016)

**Abstract :** This study proposes a dynamic reliability analysis of control system as a method of quantitative evaluation of its performance in probabilistic terms. In this dynamic reliability analysis, the failure event is defined as an event that the dynamic response of the structural system exceeds a displacement limit, whereas the conventional reliability analysis method has limitations that do not properly assess the actual time history response of the structure subjected to dynamic loads, such as earthquakes and high winds, by taking the static response into account in the failure event. In this first paper, we discuss the control effect of the viscous damper on the seismic performance of the member-level failure where the failure event of the structural member consists of the union set of time-sequential member failures during the earthquake excitations and the failure probability of the earthquake-excited structural member is computed using system reliability approach to consider the statistical dependence of member failures between the subsequent time points. Numerical results demonstrate that the proposed approach can present a reliable assessment of the control performance of the viscous damper system in comparison with MCS method. The most important advantage of the proposed approach can provide us more accurate estimate of failure probability of the structural control system by using the actual time-history responses obtained by dynamic response analysis.

**Key Words :** system reliability analysis, viscous damper, dynamic response, failure probability, structural safety

### 1. 서론

구조물의 안전성 향상을 위한 방법으로 구조제어시스템에 대한 연구가 활발하게 진행되어 왔다. 기존 진동제어 시스템의 성능평가는 확정론적 성능평가 또는 불규칙 진동(random vibration) 이론에 따른 평균 응답 평가가 대부분이며, 신뢰성해석 연구는 거의 없는 실정이다.

일반적인 구조시스템은 정적 응답 기반 신뢰성해석을 수행하여 왔으나, 지진이나 강풍 등에 의한 구조물의 실제적인 응답은 공진, 감쇠 등 동적특성에 의하여 최대응답이 크게 차이를 가지므로 정적 응답 기반 신뢰성 해석은 정확성의 측면에서 한계를 갖는다. 특히, 제어시스템은 외부 가진 하중에 의한 동적거동특성이

제어성능에 미치는 영향이 지대하므로 동적응답 기반 신뢰성 또는 파괴확률을 산정하는 것이 필수적이다.

확률론적 관점에서 제어시스템의 성능평가 연구는 Spencer 등<sup>1,2)</sup>을 제외하고는 거의 없으며, 이들 연구에서는 불규칙진동론(random vibration theory)에 기반하여 최초통과확률을 산정하였다. 그렇지만 최초통과확률에서의 한계상태를 판단하는 응답은 확률적 관점에서의 RMS 응답이지 실제 최대 응답은 아니라는 한계를 갖는다.

따라서 실제 구조물의 파괴확률을 산정하기 위해서는 동적응답해석을 통한 최대 응답이 한계상태를 통과하는 확률을 파괴확률로 규정하고 이의 확률을 산정할 필요가 있으며, 이 연구에서는 동적 응답에 기반하여 실제 최대응답이 한계상태를 초과하는 확률을 제어시

\* 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

스탬의 제진성능으로 규정하고 이를 평가하고자 한다.

## 2. 수동형 댐퍼를 장착한 구조물의 운동방정식

### 2.1. 수동형 댐퍼-구조시스템의 운동방정식

이 연구에서는 Fig. 1과 같이 지진하중을 받는 다자유도(multi-degree of freedom; MDOF) 전단빌딩구조물에 대각 브레이싱 형태의 수동형 감쇠시스템을 적용하는 경우를 고려하고자 한다. 이의 운동방정식은 식 (1)로 표현된다.

$$\mathbf{M}\ddot{\mathbf{x}}(t) + (\mathbf{C} + \mathbf{C}_d)\dot{\mathbf{x}}(t) + \mathbf{K}\mathbf{x}(t) = -\mathbf{M}\underline{\mathbf{1}}\ddot{x}_g(t) \quad (1)$$

여기서,  $\mathbf{M}$ ,  $\mathbf{C}$ ,  $\mathbf{C}_d$ ,  $\mathbf{K}$ 는 각각 구조물의 층 질량, 구조 감쇠, 점성댐퍼의 감쇠, 기둥 강성 행렬이며  $\ddot{\mathbf{x}}(t)$ ,  $\dot{\mathbf{x}}(t)$ ,  $\mathbf{x}(t)$ 는 시간  $t$ 에서의 구조물 가속도, 속도, 변위 응답 벡터이다. 그리고  $\ddot{x}_g(t)$ 는 지반가속도이며,  $\underline{\mathbf{1}}$ 은 지반가속도의 위치벡터를 나타낸다.

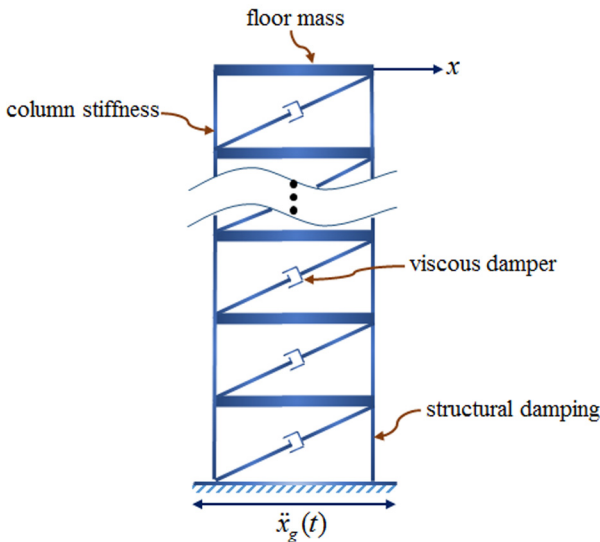


Fig. 1. MDOF structure with damper system.

불확실한 지반운동을 모사하기 위해서 Kanai-Tajimi 스펙트럼 밀도함수(power spectral density function)를 도입하였으며, 식 (2)로 정의된다<sup>3,4)</sup>.

$$S_{\ddot{x}_g \ddot{x}_g}(\omega) = \frac{\omega_g^4 + 4\zeta_g^2 \omega_g^2 \omega^2}{(\omega_g^2 - \omega^2)^2 + 4\zeta_g^2 + \omega_g^2 + \omega^2} S_0 \quad (2)$$

여기서,  $\omega_g$ ,  $\zeta_g$ ,  $S_0$ 는 각각 입력지진하중의 탁월주파수(dominant frequency), 지반 감쇠비(damping ratio), 그

리고 세기(intensity)를 나타낸다. Kanai-Tajimi 모델의 운동방정식은  $S_0$  세기의  $w(t)$ 가 작용할 때 지반운동의 상대변위  $x_g^r(t)$ 를 이용하여 식 (3)의 2차 미분방정식으로 나타낼 수 있으며, 이로부터 식 (1)의  $\ddot{x}_g(t)$ 는 식 (4)로 나타낼 수 있다.

$$\ddot{x}_g^r(t) + 2\zeta_g \omega_g \dot{x}_g^r(t) + \omega_g^2 x_g^r(t) = w(t) \quad (3)$$

$$\ddot{x}_g(t) = \ddot{x}_g^r(t) - w(t) = -2\zeta_g \omega_g \dot{x}_g^r(t) - \omega_g^2 x_g^r(t) \quad (4)$$

### 2.2. 상태공간방정식

식 (1)에서 지반가속도  $\ddot{x}_g(t)$ 은 식 (4)로 대체할 수 있으며, 이에 대한 최종적인 상태공간방정식은 식 (5a)로 표현된다. 제어 목표응답을 출력행렬( $\mathbf{C}_y$ ,  $\mathbf{D}_w$ )를 이용하여 식 (5b)로 정의할 수 있다.

$$\dot{\mathbf{z}} = \mathbf{A}_S \mathbf{z} + \mathbf{B}_w \ddot{x}_g(t) \quad (5a)$$

$$\mathbf{y} = \mathbf{C}_y \mathbf{z} + \mathbf{D}_w \ddot{x}_g(t) \quad (5b)$$

여기서, 상태벡터( $\mathbf{z}$ )는 각 응답변수로부터 식 (6)으로 정의되며, 시스템 행렬( $\mathbf{A}_S$ ,  $\mathbf{B}_w$ )과 출력행렬( $\mathbf{C}_y$ ,  $\mathbf{D}_w$ )은 식 (7)~(8)로 표현된다. 참고로, 식 (8)의 출력행렬은 층간 변위응답인 경우에 해당한다.

$$\mathbf{z} = \{x_1, x_2, x_3, \dot{x}_1, \dot{x}_2, \dot{x}_3, x_g^r, \dot{x}_g^r\}^T \quad (6)$$

$$\mathbf{A}_S = \begin{bmatrix} \mathbf{0} & \mathbf{I} & \mathbf{0} & \mathbf{0} \\ -\mathbf{M}^{-1}\mathbf{K} & -\mathbf{M}^{-1}(\mathbf{C} + \mathbf{C}_d) & \omega_g^2 \cdot \mathbf{I} & 2\zeta_g \omega_g \cdot \mathbf{I} \\ \mathbf{0} & \mathbf{0} & 0 & 1 \\ \mathbf{0} & \mathbf{0} & -\omega_g^2 & -2\zeta_g \omega_g \end{bmatrix} \quad (7)$$

$$\mathbf{B}_w = \begin{bmatrix} \mathbf{0} \\ \mathbf{0} \\ 0 \\ 1 \end{bmatrix}, \quad \mathbf{C}_y = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & \dots & \mathbf{0} \\ -1 & 1 & 0 & \dots & \mathbf{0} \\ 0 & -1 & 1 & \dots & \mathbf{0} \\ 0 & 0 & -1 & \dots & \mathbf{0} \\ \vdots & & & & \vdots \end{bmatrix}, \quad \mathbf{D}_w = [\mathbf{0}] \quad (8)$$

## 3. 구조물-감쇠시스템의 부재 파괴확률 산정

### 3.1. 특정시점에서의 부재별 파괴확률 산정

이 연구에서 구조물의 파괴는 각 층 기둥부재의 층간 변위 응답이 한계치를 초과하는 사건으로 정의하며, 각 시각  $t=t_i$ 에서  $k$ 층 기둥의 파괴사건( $E_k^i$ )은 식 (9)로 규정될 수 있다.

$$E_k^i: x_k(t_i) \geq x_0 \quad (9)$$

여기서,  $x_k(t_i)$ 는 시간  $t=t_i$ 에서의 구조물 변위응답이며,  $x_0$ 는 변위의 최대 허용치(maximum allowable limit)이다.

따라서, 파괴사건을 규정하는 한계상태함수(limit state function)  $g_k^i(\mathbf{v})$ 는 식 (10)으로 표현된다.

$$g_k^i(\mathbf{v}) = x_0 - x_k(t_i; \mathbf{v}) \leq 0 \quad (10)$$

여기서,  $\mathbf{v}$ 는 불확실성을 나타내는 확률변수 벡터(random variable vector)로서 구조물의 물성치(질량, 강성, 감쇠), 하중 특성치( $w_g, z_g, S_0$ ) 및 제어시스템의 매개변수(제어용량  $c_d$ ) 등을 고려할 수 있다.

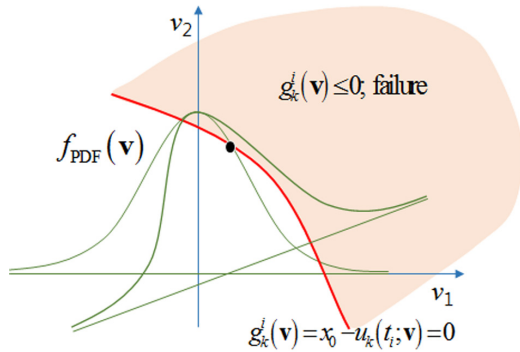


Fig. 2. Conceptual drawing of failure probability.

시간  $t=t_i$ 에서의  $k$ 층 기동부재의 파괴확률( $P$ )은 식 (11)의 다중적분식으로 정의되며, 이를 개념도로 나타내면 Fig. 2와 같다.

$$P_f = P(E_k^i) = \int_{g_k^i(\mathbf{v}) \leq 0} f_{PDF}(\mathbf{v}) d\mathbf{v} \quad (11)$$

여기서,  $f_{PDF}(\mathbf{v})$ 는 확률변수  $\mathbf{v}$ 의 결합 확률밀도함수(joint probability distribution function; joint PDF)이다.

식 (11)의 다중적분 산정은 수치적으로 산정하게 되는데, 확률변수의 개수가 증가함에 따라 연산시간이 기하급수적으로 늘어나므로 대부분 근사해법 FORM(First-Order Reliability Method)<sup>5)</sup>을 이용하여 산정하게 된다. FORM을 적용함에 있어서 한계상태식의 연산이 반복적으로 이루어져야 하며, 이는 결국 식 (10)의 매 시간 구조물의 응답 산정이 선행되어야 함을 의미한다. 구조물의 동적 응답은 일반적으로 많이 적용되는 Newmark- $\beta$  방법 또는 Duhamel 적분법<sup>6)</sup> 등을 이용하여

산정할 수 있다. 다만, 불확실성을 띄는 지진하중을 불규칙 프로세스(random process)로 모사할 필요가 있으며, 평균 0의 가우시안 분포(zero-mean Gaussian distribution)를 따른다고 가정할 때 식 (3)에서의  $S_0$  세기를 갖는 입력  $w(t)$ 는 식 (12)로 표현할 수 있다.

$$w(t) = \sqrt{\frac{2\pi S_0}{\Delta t}} v(t) \quad (12)$$

여기서,  $v(t)$ 는 표준정규분포를 따르는 확률변수로서 각 시점에서의 값들이 식 (11)의 확률변수벡터  $\mathbf{v}$ 를 구성하며,  $\Delta t$ 는 입력지진가속도를 이산화하는 시간간격을 의미한다. 따라서 기존 정적 신뢰성 해석 기법에서는 하중을 하나의 확률변수로 다루는 반면, 제시하는 기법에서는 하중의 시간이력을 모두 확률변수로 고려함으로써 그에 수반하여 산정되는 동적 응답을 확률론적 관점에서 다룰 수 있게 된다.

FORM 접근법은 확률변수 벡터  $\mathbf{v}$ 를 표준정규 확률변수(standard normal random variable)  $\mathbf{u}$ 로 변환하는데, 이 연구에서는  $\mathbf{v}=\mathbf{u}$ 이다<sup>7)</sup>. 그리고, Fig. 3에 도시한 바와 같이,  $\mathbf{u}$ -공간으로 변환된 한계상태곡선 상의 점 중 원점으로부터 최단 거리를 신뢰도 지수  $\beta$ 라 하며, 이는 결국 파괴확률과 식 (13)의 관계를 갖는다. 또한, 최단 거리를 갖는 점을 MPP(most probable point) 즉,  $\mathbf{u}_{g(\mathbf{u})=0}^*$ 로 표현할 때, MPP는 Fig. 3에 도시한 것처럼 방향벡터  $\alpha_i$ 를 이용하여 최단 거리를 찾아주며  $\beta = \|\mathbf{u}_{g(\mathbf{u})=0}^*\|$ 으로 표현할 수 있다.

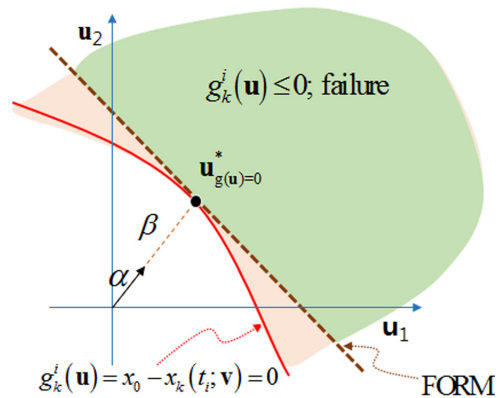


Fig. 3. FORM approach.

$$P_f(t_i) = P(E_k^i) \cong \Phi(-\beta_k^i) \quad (13)$$

여기서,  $\Phi(\cdot)$ 는 표준정규분포의 누적분포함수(Cumulative Distribution Function; CDF)이다.

### 3.2. 지진발생시간동안의 부재별 파괴확률 산정

전 절에서 산정한 파괴확률은 한 시점에서 파괴확률에 해당한다. 하지만 공학적인 관점에서 요구되는 파괴확률은 지진발생 시간 동안의 파괴확률이다. 따라서 지진 발생 후 지속시간을  $T_s$ 라 할 때  $0(=t_1) \sim T_s(=t_n)$  동안의 파괴확률은 식 (14)과 같이 각 시점 파괴사건들의 합집합에 해당한다.

$$P_f^{floor}(0 \leq t \leq T_s) = P(E_k(t_1) \cup E_k(t_2) \cup \dots \cup E_k(t_n)) \quad (14)$$

식 (14)를 산정하기 위해서는 두 시각  $t_i$ 와  $t_j$ 에서 발생한 파괴사건간 확률적 의존관계(statistical dependence)를 고려해야 하는데, 이는 상관계수(correlation coefficient)  $\rho_{t_i t_j}^k$ 로서 표현된다. 상관계수는, Fig. 4에 나타낸 바와 같이, 두 시점에서의 방향벡터들의 사이각의 cosine 값에 해당하며, 식 (15)로 상관계수 행렬을 표현할 수 있다.

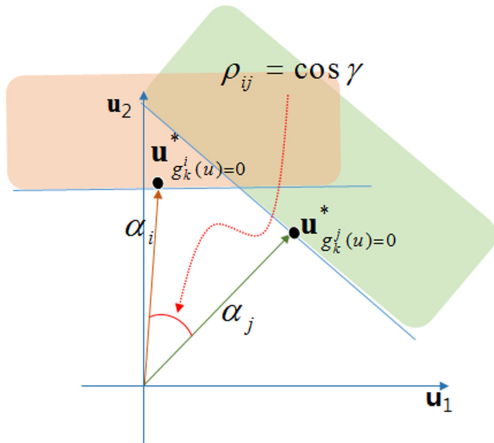


Fig. 4. Correlation coefficient.

$$R^{time} = \{\rho_{t_i t_j}^k\} = \{\alpha_{t_i}^k T \alpha_{t_j}^k\} = \begin{bmatrix} 1 & \rho_{t_1 t_2}^k & \rho_{t_1 t_3}^k & \dots & \rho_{t_1 t_n}^k \\ \rho_{t_2 t_1}^k & 1 & \rho_{t_2 t_3}^k & \dots & \rho_{t_2 t_n}^k \\ \vdots & \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ \rho_{t_n t_1}^k & \rho_{t_n t_2}^k & \dots & \dots & 1 \end{bmatrix} \quad (15)$$

따라서, 파괴사건 간 상관계수를 모두 고려한 최종적인 파괴확률은 식 (16)으로 표현되며, Genz 알고리즘<sup>8)</sup>을 적용하여 산정할 수 있다.

$$\begin{aligned} P_f^{floor}(0 \leq t \leq T_s) & \\ &= P(E_k(t_1) \cup E_k(t_2) \cup \dots \cup E_k(t_n)) \\ &= P\left(\bigcup_{i=1}^n \{\alpha_k^T \mathbf{u} \geq \beta_k^i\}\right) = 1 - P\left(\bigcap_{i=1}^n \{\alpha_k^T \mathbf{u} < \beta_k^i\}\right) \\ &= 1 - \Phi(\beta_k, R^{time}) \end{aligned} \quad (16)$$

여기서,  $\beta_k$ 는 각 시점별 신뢰성지수 벡터로서  $\beta_k = [\beta_k^1, \beta_k^2, \beta_k^3, \dots, \beta_k^m]$ 이다.

## 4. 수치 예

### 4.1. 문제 정의

제시하는 방법에 대한 수치 예로서 3층 전단빌딩구조물(Fig. 1 참조)을 고려하였다. 또한 감쇠시스템의 성능 비교를 목적으로 감쇠기를 장착하지 않은 원 구조물과 감쇠기를 장착한 제어시스템의 신뢰성해석을 각각 수행하였다.

예제 구조물의 층별 질량( $m$ )은 3,500(ton), 기둥 강성( $k$ )은  $1.35 \times 10^9$ (N/m), 감쇠비( $\zeta$ )는 2%의 모달비례감쇠를 고려하였다. 지진하중은 PGA(peak ground acceleration) 0.3g에 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. 따라서 확률변수는 총 501개로서 표준정규분포를 따르며 식 (12)에서의  $\mathbf{v}(t)$ 를 구성하게 된다. 층간 변위의 한계치  $x_0 = 4$ (cm)로 설정하였다. 제어시스템으로서 수동형 감쇠기의 용량은 15%의 층별 감쇠비( $\zeta_d$ )를 고려하였다.

### 4.2. 각 시점별 부재의 신뢰성 해석 결과

첫 단계로서, 주어진 조건에 따른 각 시점에서의 층별 파괴확률을 산정하였다. Fig. 5는 감쇠시스템이 설치되지 않은 원 구조물과 감쇠시스템을 장착한 구조물의 파괴확률을 시간별로 비교 도시한 결과이며, Fig. 6

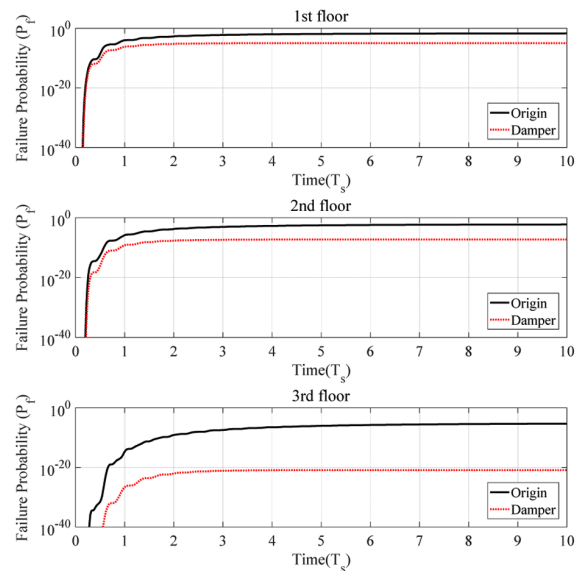


Fig. 5. Failure probability of original and damper-installed buildings.

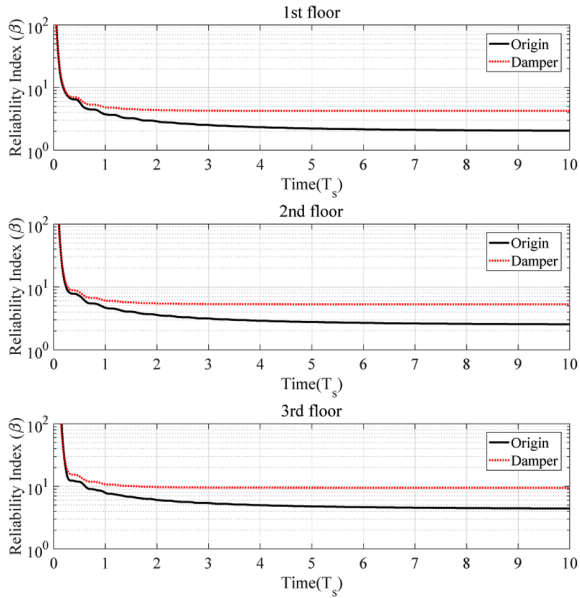


Fig. 6. Reliability index of original and damper-installed buildings.

은 신뢰성 지수를 도시한 결과이다. 두 그림으로부터 감쇠기를 장착함으로써 파괴확률(신뢰성지수)을 큰 폭으로 저감(증대)시키고 있음을 알 수 있다.

한편, 신뢰성해석 결과 중  $t=10(\text{sec})$ 에서 파괴를 유발하는 한계상태곡선 상의 점, 즉  $MPP(u_{g(u)=0})$ 를 Fig. 7의 첫 번째 이력곡선으로 도시하였으며, 이를 적용하여 파괴를 유발하는 입력지반가속도를 Fig. 7의 두 번째 이력곡선으로 도시하였다. 또한, 비교목적으로 랜덤하게 생성된 입력  $u(r(t))$ 를 식 (12)와 식 (3)~(4)를 이용하여 산정한 입력지반가속도를 Fig. 7의 세 번째 이력곡선으로 도시하였다.

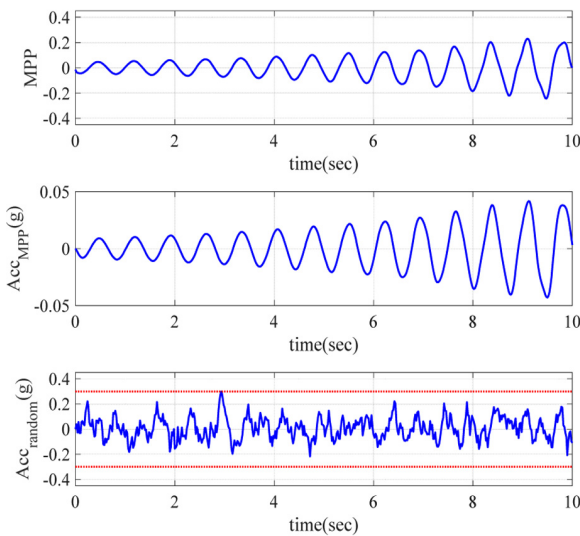
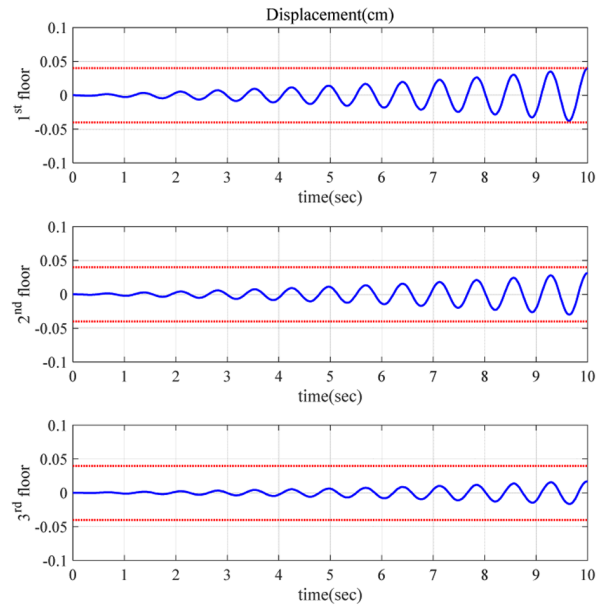


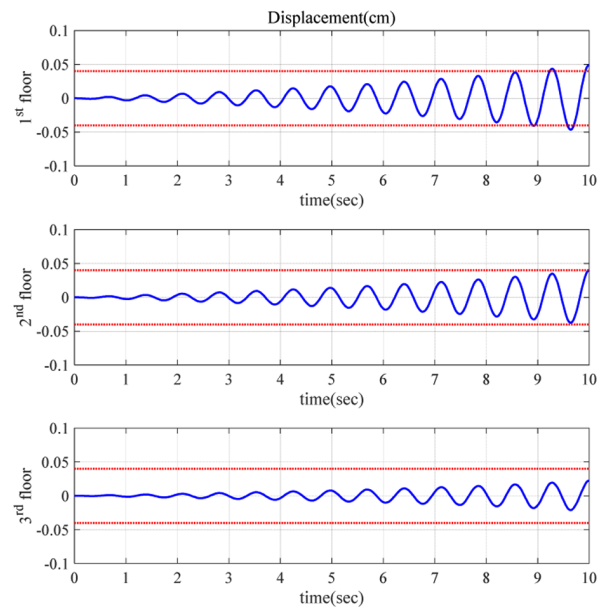
Fig. 7. MPP-based and randomly generated accelerations.

그림에서 확인할 수 있듯이, 랜덤하게 생성되는 입력에 의한 지반가속도의 PGA는 0.3g에 근접하는 크기를 갖는 반면, FORM에 의하여 산정된  $MPP(u_{g(u)=0})$ 는 매우 작은 PGA를 가지며 파형이 10초에 근접할수록 점점 증가하는 파형을 보인다.

앞서의 MPP에 따른 입력지반가속도를 적용한 경우, 감쇠기를 설치하지 않은 구조물의 층별 응답을 Fig. 8에 도시하였다. Fig. 8(a)는 1층의 파괴를 유발하는 입력에 의한 층별 응답이며, Fig. 8(b)는 2층의 파괴를 유

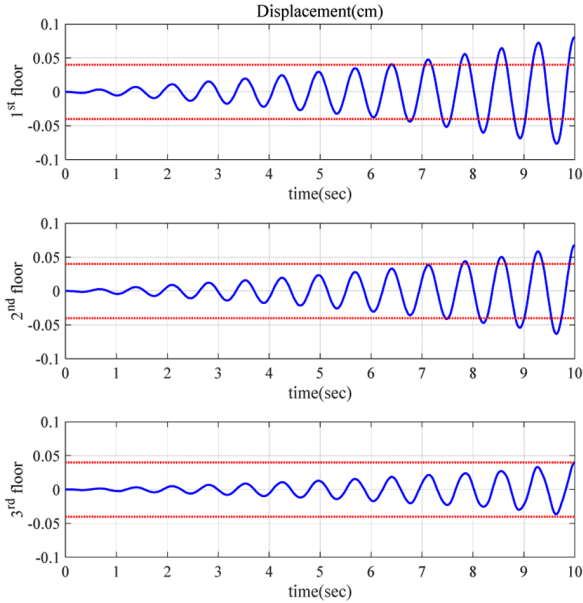


(a) MPP for 1<sup>st</sup> floor failure



(b) MPP for 2<sup>nd</sup> floor failure





(c) MPP for 3<sup>rd</sup> floor failure

Fig. 8. Displacement responses in failure event.

발하는 입력에 의한 층별 응답이다. 그림에서 점선은 응답의 한계치( $x_0=4\text{cm}$ )를 의미한다. MPP에 따른 입력 지반가속도가 비록 작은 PGA를 갖지만 점점 증가하는 파형으로 작용함으로써 각 층별 응답이 10초에서 한계치에 도달하여 기둥의 파괴를 유발하는 결과를 확인할 수 있다. 즉, Fig. 8(a)에서 1층의 변위응답이 10초에서 한계치에 도달하며, Fig. 8(b) 및 8(c)에서는 각각 2층과 3층의 변위응답이 10초에서 한계치에 도달하고 있다. 참고로, Fig. 8의 결과는 10초에서 파괴가 발생할 때의 결과이며, 특정 시점에서 각 층의 파괴가 발생하는 경우의 응답은 이와 다른 양상을 보일 수 있다.

#### 4.3. 지진하중에 의한 부재별 신뢰성 해석 결과

다음으로는, 지진지속시간 동안의 파괴확률을 산정하고자 한다. 이를 위해서는 상관계수행렬을 산정해야 한다. 앞서의 FORM 해석결과로부터 각 층별 각 시점에서의 방향벡터( $\alpha$ )를 얻을 수 있으므로, 식 (15)를 이용하여 상관계수행렬( $R^{time}$ )을 산정할 수 있다.

Fig. 6의 신뢰성지수( $\beta_k$ )와 상관계수행렬( $R^{time}$ )로부터 시간  $0 \sim T_s$  동안의 파괴확률은 Genz 알고리즘을 이용하여 식 (16)으로부터 산정하였다. 제시된 방법에 따라 산정된 해석 결과를 검증하고자 MCS(Monte Carlo Simulation)<sup>9)</sup> 방법을 적용하여 각 층별 지진발생시간동안의 파괴확률 및 신뢰도지수를 산정하였다. MCS 방법에서 수렴조건은 산정되는 파괴확률의 COV(coefficient of variation)가 0.01 이하인 경우 샘플링이 종료되도록

Table 1. Comparative results of the proposed method and MCS

	Original building		Damper-installed building	
	Proposed	MCS	Proposed	MCS
1st	$P_f$	0.3777	0.4275	0.0012
	$\beta$	0.3114	0.1827	3.0358
2nd	$P_f$	0.1334	0.1599	$9.004 \times 10^{-6}$
	$\beta$	1.1105	0.9947	4.2883
3rd	$P_f$	$2.655 \times 10^{-4}$	$3.62 \times 10^{-4}$	0
	$\beta$	3.4646	3.3803	$\infty$

설정하였으며, 최대 샘플링 개수는  $10^6$ (1층)~ $10^7$ (2,3층)으로 설정하였다. 원 구조물과 감쇠시스템을 장착한 구조제어시스템의 신뢰성 해석결과를 Table 1에 비교 수록하였다.

Table 1에서 알 수 있듯이, 댐퍼가 설치되지 않은 원 구조물의 1층의 파괴확률은 제시하는 방법과 MCS 방법에 따라 각각 0.3777과 0.4275로 평가되었으며, 2층의 파괴확률은 0.1334와 0.1599, 3층의 파괴확률은  $2.655 \times 10^{-4}$ ,  $3.62 \times 10^{-4}$ 으로 산정되었다. 따라서 1층에서 가장 높은 파괴확률이 발생하고 있음을 알 수 있다. 또한, MCS가 제시하는 방법보다는 다소 파괴확률을

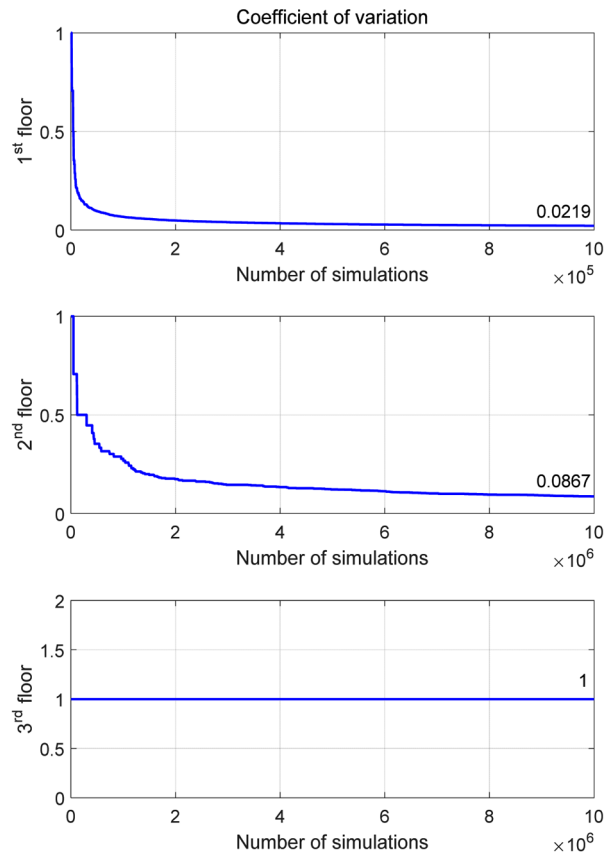


Fig. 9. Convergence of MCS.

높게 예측하고 있음을 확인할 수 있다. 이는 연구에서 다루고 있는 확률변수가 501개의 이산화된 지진하중을 모사하므로 확률변수의 개수가 매우 많은 상황이며, FORM방법과 MCS 방법이 모두 근사해법이므로 어느 정도의 오차가 존재하기 때문이다. 한편, 감쇠시스템이 장착된 구조물에서는 파괴확률이 매우 큰 폭으로 감소하는 결과를 보이며, 그에 상응하는 신뢰성지수는 3~4 정도의 값을 보임으로써 감쇠기가 충분한 제진성능을 발휘하고 있음을 확인할 수 있다.

MCS방법의 수렴성을 확인하기 위하여 MCS에 의하여 산정되는 파괴확률의 변동계수(coefficient of variation)를 샘플개수에 따라 Fig. 9에 도시하였다. 그림에서 확인할 수 있듯이, MCS 방법에서 2층의 경우 최대 반복회수에 도달하였음에도 불구하고 종료조건( $cov < 0.01$ )을 만족하지 못하고 샘플링이 종료되는 결과를 보이고 있다. 따라서 MCS에 의한 결과에서 오차가 있을 수 있다고 판단된다. 특히, 3층의 경우는 파괴가 발생하는 사건이 전혀 관측되지 않으므로 cov는 초기치(1.0)에서 변동이 없는 결과를 보인다.

### 5. 결론 및 고찰

이 연구에서는 점성감쇠기를 장착한 구조물의 내진 성능을 정량화하는 방법으로 동적응답에 기반한 구조물의 신뢰성해석기법을 다루었다. 이를 위하여 지진하중이 작용하는 시간 동안 매 순간 구조물의 동적 변위 응답이 한계치를 초과하는 사건을 파괴사건으로 정의하고 전체 지진 지속시간 동안의 파괴확률을 산정하였으며, 그 과정에서 인접하는 시간 사이의 파괴사건의 확률적 의존관계를 고려하였다. 신뢰성해석기법으로는 FORM 방법을 접목하였으며, 비교대상으로 샘플링에 기반한 MCS를 적용하여 신뢰성해석을 수행하였다.

해석결과, 점성형 감쇠시스템의 내진성능개선 효과를 구조물의 층별 파괴확률로서 정량화하여 제시할 수 있었다. 또한 제시하는 방법에 따른 신뢰성 해석결과의 타당성을 확인하고자 MCS결과와 비교하였으며, 그 결과 제시하는 방법이 합리적인 결과를 제공하고 있음을 확인할 수 있었다.

또한, MCS 방법은 파괴확률이 감소할수록 샘플링 수를 기하급수적으로 증가시켜야 하므로 연산시간도 기하급수적으로 증가하며 그림에도 불구하고 해의 정확도를 확보할 수 없을 수 있는 단점을 가지는데 반해, 제시하는 방법은 연산시간의 증가 및 해의 정확도에의 의존성이 높지 않다는 장점을 갖는다.

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

### References

- 1) B. F. Spencer, Jr., D. C. Kaspari, Jr. and M. K. Sain, "Structural Control Design: a Reliability-based Approach", Proc. American Control Conference, Baltimore, Maryland, WP11-4:00, pp. 1062-1066, 1994.
- 2) B. F. Spencer, Jr., M. K. Sain, C.-H. Won, D. C. Kaspari and P. M. Sain, "Reliability-based Measures of Structural Control Robustness", Structural Safety, Vol. 15, pp. 111-129, 1994.
- 3) K. Kanai, "Semi-empirical Formula for the Seismic Characteristics of the Ground", Bulletin of the Earthquake Research Institute, University of Tokyo, Vol. 35, No. 2, 309-325, 1957.
- 4) H. Tajimi, "A Statistical Method of Determining the Maximum Response of a Building Structure during an Earthquake", Proceeding of 2nd World Conference on Earthquake Engineering, Tokyo, Japan, Vol. 2, pp. 781-897, 1960.
- 5) 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.
- 6) A. K. Chopra, "Dynamics of Structures - Theory and Applications to Earthquake Engineering", 3rd ed., Pearson Prentice Hall, 2007.
- 7) A. Der Kiureghian, "The Geometry of Random Vibrations and Solutions by FORM and SORM", Probabilistic Engineering Mechanics, Vol. 15, pp. 81-90, 2000.
- 8) A. Genz, "Numerical Computation of Multivariate Normal Probabilities", Journal of Computational and Graphical Statistics, Vol. 1, No. 2, pp. 141-149, 1992.
- 9) N. Metropolis and S. Ulam, "The Monte Carlo Method", Journal of the American Statistical Association, Vol. 44, No. 247, pp. 335-341, 1949.