

목표신뢰성을 만족하는 구조물-감쇠기 복합시스템의 다목적 통합최적설계

Multi-Objective Integrated Optimal Design of Hybrid Structure-Damper System Satisfying Target Reliability

옥승용¹⁾ · 박관순²⁾ · 송준호³⁾ · 고현무⁴⁾

Ok, Seung-Yong · Park, Kwan-Soon · Song, Junho · Koh, Hyun-Moo

국문 요약 >> 이 논문에서는 구조물의 내진성능 향상을 위한 방법으로 구조부재 및 수동형 감쇠기의 통합최적설계기법을 제시한다. 이는 구조부재 및 감쇠기의 최적배치를 다루는 최적화기법이다. 통합시스템의 최적설계를 위하여 다목적최적화기법을 도입하고, 이를 보다 효율적으로 다루기 위하여 목표신뢰성 제한조건을 갖는 다목적최적화문제로 재구성하였다. 수치해석 예제를 통하여 다양한 Pareto 최적해를 제시하였으며, 이들이 기존 설계방법에 상응하는 순차적 설계방법 및 가중합방법에 따른 단일목적함수 최적화방법을 포괄함을 검증하였다. 여러 Pareto 최적해로부터 강성 및 감쇠장치의 사용량을 달리하는 3가지 대표설계안을 선택하고 이들의 내진성능을 다양한 지진하중에 대하여 비교 분석하였다. 이로부터 제시하는 방법이 구조물의 내진성능 향상을 위한 설계방법으로서 효율적으로 적용될 수 있을 것으로 기대된다.

주요어 목표신뢰성, 통합최적설계, 복합시스템, 다목적최적화기법, 구조제어시스템

ABSTRACT >> This paper presents an integrated optimal design technique of a hybrid structure-damper system for improving the seismic performance of the structure. The proposed technique corresponds to the optimal distribution of the stiffness and dampers. The multi-objective optimization technique is introduced to deal with the optimal design problem of the hybrid system, which is reformulated into the multi-objective optimization problem with a constraint of target reliability in an efficient manner. An illustrative example shows that the proposed technique can provide a set of Pareto optimal solutions embracing the solutions obtained by the conventional sequential design method and single-objective optimization method based on weighted summation scheme. Based on the stiffness and damping capacities, three representative designs are selected among the Pareto optimal solutions and their seismic performances are investigated through the parametric studies on the dynamic characteristics of the seismic events. The comparative results demonstrate that the proposed approach can be efficiently applied to the optimal design problem for improving the seismic performance of the structure.

Key words Target Reliability, Integrated Optimal Design, Hybrid System, Multi-Objective Optimization Technique, Structural Control System

1. 서론

지난 20여 년 동안 많은 연구자들에 의하여 수동형, 능동

형, 준능동형 및 복합형 등 다양한 종류의 구조제어장치가 제시되었으며, 각 장치별 특성에 따라 제어성능을 극대화할 수 있는 최적 제어이론 및 최적 설계방법이 연구되었다⁽¹⁻³⁾. 이들 연구들은 대부분 특정 제어장치의 사용을 가정한 후 그 장치의 특성을 활용함으로써 제어성능을 극대화할 수 있는 최적 제어알고리즘이나 최적 설계방법 개발에 집중되어 있다고 할 수 있다. 그러나 실구조물에서 진동문제가 발생하는 경우에는 먼저 설계 변경을 통하여 구조부재를 보강함으로써 문제를 해결하고자 하는 것이 일반적이다. 이는 설치비용뿐만 아니라 지속적인 유지비용도 요구되는 구조제

¹⁾ 박사후 연구원, Civil and Environment Engineering, University of Illinois at Urbana-Champaign, 공학박사

²⁾ 정회원·동국대학교 건축공학부 조교수, 공학박사
(교신저자: kpark@dongguk.edu)

³⁾ Assistant Professor, Civil and Environment Engineering, University of Illinois at Urbana-Champaign, 공학박사

⁴⁾ 정회원·서울대학교 지구환경시스템공학부 교수, 공학박사

본 논문에 대한 토의를 2008년 6월 30일까지 학회로 보내 주시면 그 결과를 게재하겠습니다.

어시스템에 비해, 구조부재를 이용한 강성 보강방법이 다소 시공이 편이하며 경제적이기 때문이다. 한편, 부재보강만으로는 충분한 성능 개선을 얻지 못하는 경우에는 보다 높은 성능을 발휘할 수 있는 제어시스템의 적용을 고려할 수 있다. 때때로 목표 성능의 수준이 매우 높은 경우에는 부재보강과 제어시스템을 병용함으로써 목표 성능을 달성할 수도 있다. 이러한 구조부재의 보강 설계→구조제어시스템 설계의 순차적 설계(sequential design)는 시공의 편이성과 경제성뿐만 아니라 설계 과정도 용이하므로 기존 설계 과정에서 보편적으로 이루어지고 있는 방법이라 할 수 있다⁽⁴⁾.

순차적 설계방법이 주어진 구조물에 대하여는 경제적인 구조부재의 보강설계안을 결정해줄 수 있으며 또한 보강된 구조물에 대하여도 제어시스템을 결정할 수 있으나, 이렇게 설계된 시스템이 최적의 설계안이라고 보기는 힘들다. 이는 구조물과 제어시스템의 상호 작용에 의하여 보다 최적인 해가 따로 존재할 수 있기 때문이다. 즉, 기설계된 보강안에 대하여 제어시스템이 결정되었으나 이렇게 결정된 제어시스템에 대한 보강부재의 최적설계안은 다르게 설계될 수 있다. 따라서 설계된 제어시스템에 대하여 구조부재의 보강안은 또 다시 최적화가 가능하며, 이에 따라 제어시스템은 첫 번째 해와 또 다르게 설계될 수 있다. 이러한 반복설계과정을 피하기 위하여 이 연구에서는 구조제어시스템과 구조물을 통합된 하나의 시스템으로 간주하고 구조물 및 제어시스템의 설계변수를 동시에 고려할 수 있는 통합최적설계기법(integrated optimal design technique)을 제시하고자 한다. 이는 두 가지 시스템을 동시에 최적 설계하므로 동시최적설계기법(simultaneous optimal design technique)이라고도 할 수 있다.

구조물-제어장치의 복합시스템에 대한 통합최적설계는 구조부재의 사용량 및 제어시스템의 용량뿐만 아니라 구조물의 응답도 동시에 최소화하는 다목적최적화문제로 구성된다. 기존 연구로는 Park and Koh⁽⁴⁾, Park et al.⁽⁵⁾ 및 박관순 등⁽⁶⁾을 고려할 수 있다. Park and Koh⁽⁴⁾는 선호도에 기반한 최적화방법을 제안한 바 있으며, Park et al.⁽⁵⁾는 생애주기비용(Life-Cycle Cost)의 측면에서 가장 경제적인 최적설계해를 제시하는 연구를 하였으며, 박관순 등⁽⁶⁾은 구조부재와 제어장치의 사용량 및 구조물의 응답 크기에 대하여 다단계의 설계목표를 산정하고 이를 점진적으로 만족하도록 최적화과정을 유도하는 목표갱신유전자알고리즘(Goal Updating Genetic Algorithm, GUGA)를 제안한 바가 있다. 그러나 이들 연구에서는 가중합방법을 이용하여 다목적함수를 단일목적함수로 치환하는 최적화방법을 사용하기

때문에 가중치 또는 설계목표에 따라 최적해가 달라질 수 있다. 따라서 합리적인 설계안을 얻기 위해서는 구조부재 및 제어장치의 설치에 따른 소요비용 등을 비교함으로써 가중치 또는 설계목표를 신중하게 결정하는 과정이 요구된다. 그러나 제어장치의 소요비용은 단순한 사용량뿐만 아니라 설치위치에 따라서도 달라질 수 있으므로 이를 미리 선정하는 것은 쉽지 않다.

한편, 이 연구에서 다루고자 하는 최적화문제는 구조물의 응답, 구조부재의 사용량, 감쇠기의 사용량을 동시에 최적화하므로, 최소 3개의 목적함수를 가진다. 참고로, 능동제어시스템까지 설계에 추가될 경우, 4개의 목적함수를 갖는 다목적최적화문제로 확장된다. 비록 다목적최적화기법이 정해진 개수의 해를 목적함수 영역 내에서 균등하게 분포되도록 검색을 수행하지만, 목적함수가 증가할수록 목적함수 영역 내에서 해가 충분히 분포될 수 있도록 검색하여야 하는 해의 개수도 일정 수준으로 증가되어야 한다. 즉, 목적함수가 3개인 경우에는 3차원 영역에서 균등 분포되기에 충분한 개수의 해를 검색하여야 하며, 목적함수가 4개인 경우에는 4차원 영역에서 균등 분포될 수 있도록 충분한 개수의 해를 검색하는 것이 필요하다. 이는 최적화과정에서의 검색시간이 기하급수적으로 늘어나는 것을 의미한다. 또한, 설계변수로서 각 구조부재 및 제어장치의 위치별 최적 배치를 다루므로, 매우 넓은 설계영역을 갖게 된다. 이처럼 넓은 설계영역과 많은 목적함수를 갖는 최적화문제에서는 높은 수준의 연산능력 및 검색시간이 요구된다. 이러한 문제를 해결하기 위하여, 이 연구에서는 가능한 목적함수의 개수를 줄일 수 있도록 대상 최적화문제를 제한조건을 갖는 다목적최적화문제(constrained multi-objective optimization problem)로 재구성하였다. 구조부재의 사용량과 제어시스템의 사용량 등은 비용의 측면에서 고려되는 항목인 반면, 구조물의 응답은 제어성과 관련한 항목으로서 경제성과는 차별화된다. 이 연구에서는 구조물의 응답에 대하여 목표신뢰성을 도입하고 이를 항상 만족하는 제한조건으로 치환함으로써 목표신뢰성을 만족하는 구조물-제어시스템의 통합최적화문제로 재구성하였다. 이는 일반적인 설계과정과도 부합하는 장점을 가진다. 즉, 대상 구조물의 응답이 목표신뢰성을 만족하는 내에서 가장 경제적인 설계안을 찾는 것이 일반적인 설계과정이라 할 수 있다. 그러므로 제시하는 방법은 목표신뢰성 제한조건을 만족하면서 각 구조부재 및 제어시스템의 사용량, 즉 비용을 최소화하는 설계문제로 다루어진다.

이 논문의 구성은 다음과 같다. 먼저 2장에서는 불규칙 지진하중을 받는 빌딩구조물의 신뢰성 평가방법을 기술한

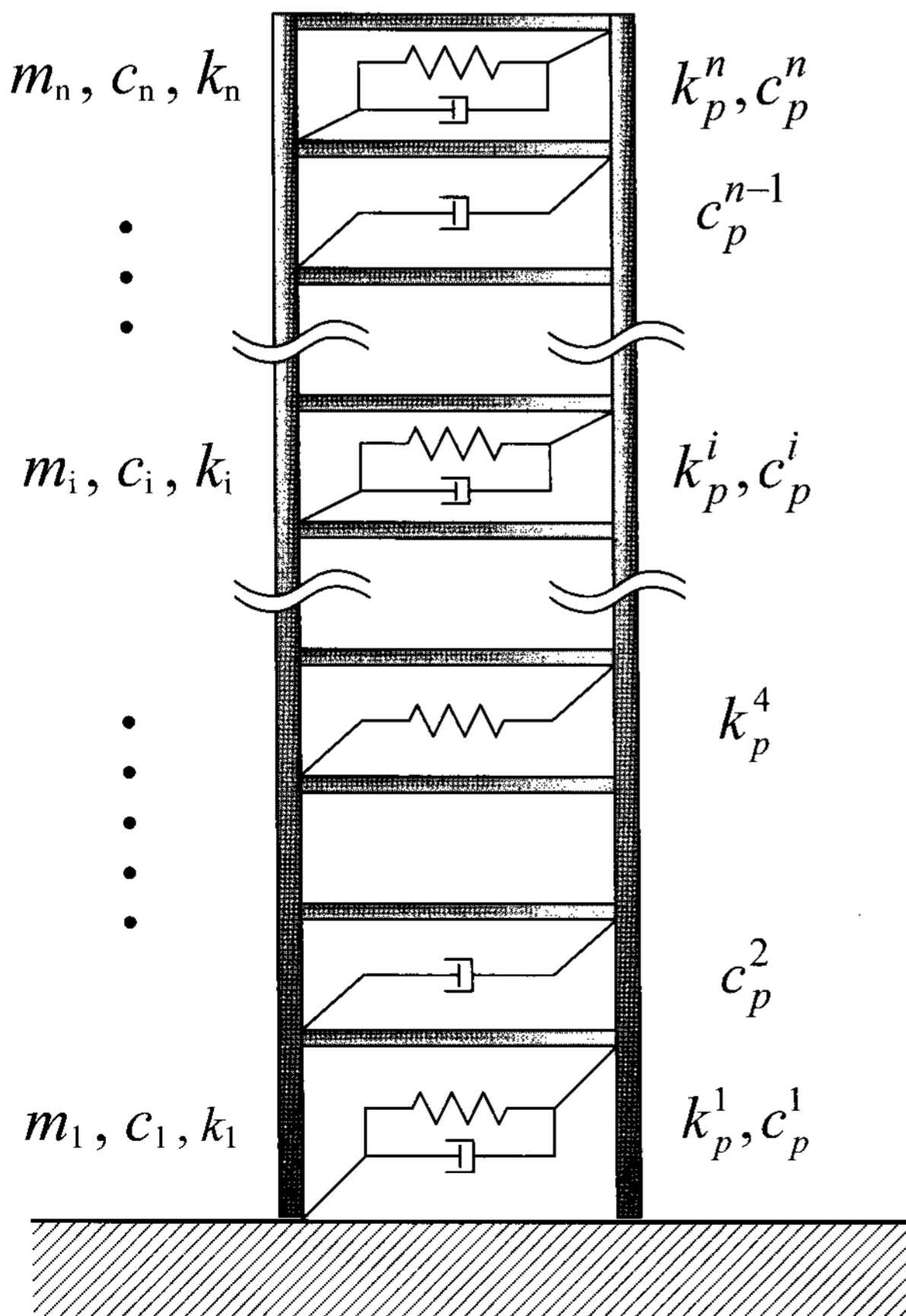
다. 다음으로 3장에서는 목표신뢰성을 만족하는 구조물-제어장치의 복합시스템 설계를 위한 제한조건을 갖는 다목적 최적화기법을 다룬다. 그리고 4장에서는 제안하는 방법에 대한 수치 예로서 20층 빌딩구조물에 대한 구조부재-수동감쇠기의 통합최적설계 및 설계결과에 대하여 토의하고 마지막으로 결론을 제시한다.

2. 불규칙지진하중에 대한 빌딩구조물의 신뢰성 평가

2.1 상태공간방정식

대상 구조물로는 그림 1에 제시한 n 층 전단빌딩을 고려하며, 내진성능 향상을 목적으로 추가적인 구조재를 이용한 강성보강 또는 제어장치를 적용하고자 한다. 제어장치로는 속도에 비례하는 감쇠력을 발휘하는 선형점성감쇠기(linear viscous damper)를 사용한다. 따라서 구조보강은 강성행렬(stiffness matrix)로, 선형점성감쇠기는 감쇠행렬(damping matrix)로 모델링될 수 있다. 이에 따른 운동방정식은 식 (1)의 2차 상미분방정식으로 표현된다.

$$M_s \ddot{u}(t) + (C_s + C_d) \dot{u}(t) + (K_s + K_d) u(t) = E_w \ddot{u}_g(t) \quad (1)$$



〈그림 1〉 구조물-감쇠기 복합시스템

여기서, M_s, C_s, K_s 는 각각 $[n \times n]$ 크기의 질량, 감쇠, 강성행렬이고, $\ddot{u}(t), \dot{u}(t), u(t)$ 는 구조물의 가속도, 속도, 변위벡터로서 $[n \times 1]$ 의 크기를 갖는다. K_d 와 C_d 는 각각 구조보강 및 선형점성감쇠기로 인한 부가적 강성 및 감쇠에 상응하는 행렬로서 각 구조부재 및 감쇠기의 설치 위치별 자유도에 따라 구성된다. E_w 는 입력지반가속도 $\ddot{u}_g(t)$ 의 작용위치벡터로서 $-M_s \mathbf{1}$ 로 정의된다. 여기서, 벡터 $\mathbf{1}$ 은 모든 요소가 1인 $[n \times 1]$ 크기의 열벡터(column vector)이다.

주파수응답함수(frequency response function)를 유도하기 위하여 식 (1)의 운동방정식은 식 (2)의 상태공간방정식(state space equation)으로 변환된다⁽⁷⁾.

$$\dot{x}(t) = A_s x(t) + B_w \ddot{u}_g(t) \quad (2a)$$

$$y(t) = C_y x(t) + D_w \ddot{u}_g(t) \quad (2b)$$

여기서, $x(t)$ 는 $[2n \times 1]$ 크기의 상태벡터벡터이며, A_s 와 B_w 는 각각 시스템행렬과 하중위치벡터이다. 이들은 식 (3)으로 정의된다.

$$x(t) = \begin{bmatrix} u(t) \\ \dot{u}(t) \end{bmatrix} \quad (3a)$$

$$A_s = \begin{bmatrix} 0 & \mathbf{I} \\ -M_s^{-1}(K_s + K_d) & -M_s^{-1}(C_s + C_d) \end{bmatrix} \quad (3b)$$

$$B_w = \begin{bmatrix} 0 \\ -\mathbf{1} \end{bmatrix} \quad (3c)$$

식 (2b)에서 출력벡터 $y(t)$ 는 해석을 통하여 얻고자 하는 구조물의 응답이다. 식에서 C_y 와 D_w 는 어떠한 구조물의 응답을 출력벡터로서 정의하는지에 따라 결정되는 출력행렬(output matrix)로서 각각 $[l \times 2n]$ 및 $[l \times 1]$ 의 크기를 갖는다. 여기서, l 은 출력응답 $y(t)$ 의 크기이다. 예를 들어, 인접한 층간상대변위를 출력벡터로 할 때, 출력행렬 C_y 와 D_w 는 식 (4)와 같다. 여기서, 0은 모든 요소가 0(zero)인 행렬 또는 벡터이다.

$$C_y = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & & \\ -1 & 1 & 0 & \dots & 0 \\ 0 & -1 & 1 & & \\ \vdots & & \ddots & \ddots & \vdots \\ 0 & & & \dots & 1 & 0 \\ & & & & -1 & 1 \end{bmatrix} \quad (4a)$$

$$D_w = [0] = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ \vdots \\ 0 \end{bmatrix} \quad (4b)$$

입력지반가속도 $\ddot{u}_g(t)$ 은 식 (5)의 Kanai-Tajimi power spectral density(PSD) 함수를 사용하여 모델링하였다^(8,9).

$$\Phi_{\ddot{u}_g \ddot{u}_g}(\omega) = \frac{\omega_g^4 + 4\zeta_g^2 \cdot \omega_g^2 \cdot \omega^2}{(\omega_g^2 - \omega^2)^2 + 4\zeta_g^2 \omega_g^2 \omega^2} \Phi_0 \quad (5)$$

여기서, ω_g , ζ_g 및 Φ_0 는 각각 입력지진 PSD의 탁월주파수(dominant frequency), 밴드폭(bandwidth) 및 세기(intensity)를 결정짓는 계수이다.

식 (5)의 Kanai-Tajimi 입력지진 모델은 기저(base)에 대한 지반운동의 상대변위 $u_g^r(t)$ 에 대하여 식 (6)의 2차 상미분 방정식에 상응한다.

$$\ddot{u}_g^r(t) + 2\zeta_g \omega_g \dot{u}_g^r(t) + \omega_g^2 u_g^r(t) = w(t) \quad (6)$$

여기서, $w(t)$ 는 세기 Φ_0 를 갖는 백색잡음(white noise)이다.

따라서 지반운동에 대한 상태공간방정식 및 절대 지반가속도 $\ddot{u}_g(t)$ 는 식 (7)로 표현될 수 있다.

$$\dot{\mathbf{u}}_g(t) = \begin{bmatrix} \dot{u}_g^r(t) \\ \ddot{u}_g^r(t) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & 1 \\ -\omega_g^2 & -2\zeta_g \omega_g \end{bmatrix} \begin{bmatrix} u_g^r(t) \\ \dot{u}_g^r(t) \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 \\ 1 \end{bmatrix} w(t) = \mathbf{A}_g \mathbf{u}_g(t) + \mathbf{B}_g w(t) \quad (7a)$$

$$\ddot{\mathbf{u}}_g(t) = \ddot{u}_g^r - w = \begin{bmatrix} -\omega_g^2 & -2\zeta_g \omega_g \end{bmatrix} \begin{bmatrix} u_g^r \\ \dot{u}_g^r \end{bmatrix} = \mathbf{C}_g \mathbf{u}_g(t) \quad (7b)$$

식 (7b)를 식 (2)의 입력지반가속도 $\ddot{u}_g(t)$ 에 대입함으로써 식 (2)와 식 (7)이 결합된(augmented) 식 (8)의 새로운 상태공간방정식을 얻을 수 있다.

$$\dot{\mathbf{z}}(t) = \begin{bmatrix} \dot{\mathbf{x}}(t) \\ \dot{\mathbf{u}}_g(t) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \mathbf{A}_s & \mathbf{B}_w \mathbf{C}_g \\ 0 & \mathbf{A}_g \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \mathbf{x}(t) \\ \mathbf{u}_g(t) \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 \\ \mathbf{B}_g \end{bmatrix} w(t) = \mathbf{A}_z \mathbf{z}(t) + \mathbf{B}_z w(t) \quad (8a)$$

$$\mathbf{y}(t) = \begin{bmatrix} \mathbf{C}_y & \mathbf{D}_w \mathbf{C}_g \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \mathbf{x}(t) \\ \mathbf{u}_g(t) \end{bmatrix} = \mathbf{C}_z \mathbf{z}(t) + \mathbf{D}_z w(t) \quad (8b)$$

여기서, 행렬 \mathbf{D}_z 는 $[l \times 1]$ 크기의 영행렬이다.

시스템 이론⁽¹⁰⁾에 따라, 입력하중에 대한 출력응답의 주파수응답함수는 식 (9)에 의하여 계산된다.

$$\mathbf{H}(\omega) = \mathbf{C}_z (i\omega \mathbf{I} - \mathbf{A}_z)^{-1} \mathbf{B}_z + \mathbf{D}_z \quad (9)$$

여기서, ω 는 가진 주파수(excitation frequency)이다.

따라서 식 (4)에서 주어진 출력행렬 \mathbf{C}_y 와 \mathbf{D}_w 을 고려할 때, 식 (9)의 주파수응답함수는 지진 입력에 대한 층간변위응답의 주파수응답을 나타낸다.

2.2 최초통과확률(first passage probability) 및 신뢰성

앞서 구한 주파수응답함수로부터 얻어지는 출력응답 $y(t)$ 가 평균 0인 추계학적 프로세스(zero mean stochastic process) $Y(t)$ 를 따른다고 할 때, $Y(t)$ 가 시간 τ 동안 특정값(threshold) a 를 최초로 초과할 확률은 식 (10)으로 정의될 수 있다.

$$p(a; \tau) = P(\alpha \leq \max_{0 \leq t \leq \tau} |Y(t)|) \quad (10)$$

그런데, 일반적으로 식 (10)에 대한 정해(exact solution)를 구할 수는 없으므로, Lutes & Sarkani⁽¹¹⁾는 근사해법으로서 식 (11)을 제시하였다.

$$p(a; \tau) \cong 1 - A \exp \left[- \int_0^\tau \alpha(a; t) dt \right] \quad (11)$$

여기서, A 는 시각 $t=0$ 일 때 확률과정 $Y(t)$ 의 크기가 a 를 초과하지 않을 확률이며, $\alpha(a; t)$ 는 확률과정 $Y(t)$ 가 a 를 초과하지 않는 조건 하에서 시각 t 에서의 조건부 평균 초과율(conditional mean crossing rate)을 의미한다. 일반적인 경우, 확률과정 $Y(t)$ 에 대한 조건부 결합밀도함수(conditional joint density function)는 알려져 있지 않으므로 조건부 평균 초과율을 얻는 것은 불가능하다. 대신, 무조건부 평균 초과율(unconditional mean cross rate)을 도입함으로써 이에 대한 근사값을 구할 수 있으며, 이를 포아송 근사(Poisson approximation)라 한다. 무조건부 평균 초과율을 $\nu(a; t)$ 라 할 때, 식 (11)의 초과확률은 식 (12)로 재정의된다.

$$p(a; \tau) \cong 1 - A \exp \left[- \int_0^\tau \nu(a; t) dt \right] \quad (12)$$

여기서, 계수 A 와 초과율 $\nu(a; t)$ 는 식 (13)으로 정의된다.

$$A = P[|Y(0)| < a] = \int_{-a}^a f_Y(y; 0) dy \quad (13a)$$

$$\nu(a; t) = \nu^-(a; t) + \nu^+(a; t) = - \int_{-\infty}^0 \dot{y} f_{Y\dot{Y}}(-a, y; t) dy + \int_0^{\infty} \dot{y} f_{Y\dot{Y}}(a, y; t) dy \quad (13b)$$

여기서, $f_Y(y; t)$ 는 확률과정 $Y(t)$ 의 주변확률밀도함수(marginal probability density function; marginal PDF)이며, $f_{Y\dot{Y}}(y, \dot{y}; t)$ 는 확률과정 $Y(t)$ 와 그 미분변화율(derivative) $\dot{Y}(t)$ 의 결합밀도함수(joint PDF)를 나타낸다. 또한, $\nu^-(a; t)$ 와 $\nu^+(a; t)$ 는 확률과정 $Y(t)$ 가 시각 t 에서 각각 음의 방향으로 $-a$ 를, 양의 방향으로 a 를 초과할 무조건부 평균 초과율이다.

확률과정 $Y(t)$ 가 평균 0의 정상상태 가우시안 과정(zero-mean

stationary Gaussian process)을 따르는 경우, 계수 A 및 초과율 $\nu(a;t)$ 는 다음의 식 (14)로 간단히 표현될 수 있다⁽¹²⁾.

$$A = 1 - 2\Phi(-r) \quad (14a)$$

$$\nu(a;t) = \frac{\sigma_y}{\pi\sigma_y} \exp\left(-\frac{r^2}{2}\right) \quad (14b)$$

여기서, $\Phi(\cdot)$ 는 표준정규누적확률함수(standard normal cumulative probability function)이며, 계수 $r = a/\sigma_y$ 은 한계치 a 를 응답의 표준편차(standard deviation)로 정규화한 계수이다. σ_y 와 $\sigma_{\dot{y}}$ 는 각각 확률과정 $Y(t)$ 과 미분변화율 $\dot{Y}(t)$ 의 표준편차이다. 식 (14b)에서 알 수 있듯이, 초과율 $\nu(a;t)$ 는 시간 t 에 대하여 불변하는 상수가 된다.

비록 전술한 포아송 근사법이 쉽게 적용가능하다는 장점을 가지지만, 교차사건들(crossing events)간의 확률적 의존성을 고려하지 않으므로 확률과정의 밴드폭이나 초과후 지속시간에 따라 심각한 오차를 유발할 수 있는 단점을 가진다. 이에 VanMarcke⁽¹³⁾는 개선된 공식으로서 식 (15)를 제안하였다.

$$p(a;\tau) \cong 1 - B \exp\left[-\int_0^\tau \eta(a;t) dt\right] \quad (15)$$

식 (15)에서 계수 B 및 초과율 $\eta(a;t)$ 는 식 (16)으로 정의된다.

$$B = P(E(0) < a) = \int_0^a f_E(e;0) de \quad (16a)$$

$$\eta(a;t) = \frac{P[E(t) \geq a] \nu(0;t)}{P[E(t) < a]} \left[1 - \exp\left(\frac{-\nu_E^+(a;t)}{P[E(t) \geq a] \nu(0;t)}\right) \right] \quad (16b)$$

여기서, $E(t)$ 는 확률과정 $Y(t)$ 의 포락과정(envelope process)을 나타내며, $f_E(e;t)$ 는 $E(t)$ 의 주변확률밀도함수, 그리고 $\nu_E^+(a;t)$ 는 포락과정 $E(t)$ 의 양방향으로의 무조건부 평균 초과율(unconditional mean up-crossing rate)을 의미한다.

VanMarcke 공식에서 평균 0의 정상상태 가우시안 과정에 대하여 Cramer & Leadbetter⁽¹⁴⁾에 의하여 정의되는 포락함수(envelope function)를 사용할 때, 계수 B 및 초과율 $\eta(a;t)$ 는 더욱 간단히 정리되어 식 (17)이 된다⁽¹³⁾.

$$B = 1 - \exp\left(\frac{r^2}{2}\right) \quad (17a)$$

$$\eta(a;t) = \nu(a;t) \left\{ \frac{\left[1 - \exp\left(-\sqrt{\frac{\pi}{2}} \delta^{1.2} r\right) \right]}{\left[1 - \exp\left(-\frac{r^2}{2}\right) \right]} \right\} \quad (17b)$$

여기서, 정규화된 밴드폭(normalized bandwidth) δ 는 확률과정 $Y(t)$ 의 밴드 폭을 특징짓는 형상계수로서 식 (18)로 정의되며,

$$\delta = \sqrt{1 - \frac{\lambda_1^2}{\lambda_0 \lambda_2}} \quad (18)$$

식에서의 계수 λ_i 는 i -번째 spectral moment로서 식 (19)로 정의된다.

$$\lambda_i = \int_0^\infty \omega^i G_{YY}(\omega) d\omega \quad (19)$$

여기서, $G_{YY}(\omega)$ 는 확률과정 $Y(t)$ 의 one-sided PSD 함수로서 식 (9)의 주파수응답함수를 이용하여 $G_{YY} = 2|H(\omega)|^2$ 으로 정의된다. 따라서 λ_0 및 λ_2 는 각각 σ_y^2 및 $\sigma_{\dot{y}}^2$ 에 상응한다. 각 계수 λ_i 는 식 (9)의 주파수응답함수로부터 얻어지는 PSD 함수를 식 (19)에 대입한 후 적분함으로써 얻을 수 있다.

이 연구에서는 출력응답으로서 층간상대변위를 정의하였으므로, 확률 $p(a;\tau)$ 는 시간 τ 동안 층간상대변위가 허용치 a 를 초과하는 한계상태에 대한 파괴확률이 되며, 식 (15)로부터 얻을 수 있다. 최종적으로 층간상대변위가 허용치 a 를 초과하지 않을 신뢰성지수 β 는 식 (20)에 의하여 산정된다.

$$\beta = \Phi^{-1}[1 - p(a;\tau)] \quad (20)$$

3. 제한조건을 갖는 다목적최적화기법

3.1 신뢰성 제한조건을 갖는 다목적함수의 구성

다목적최적화방법에서는 식 (21)과 같이 여러 개의 목적함수를 벡터형식으로 정의함으로써 각 목적함수를 동시에 최소화하도록 진행된다.

$$\text{Min } F(\mathbf{x}) = \text{Min} \begin{bmatrix} f_1(\mathbf{x}) \\ f_2(\mathbf{x}) \\ \vdots \\ f_n(\mathbf{x}) \end{bmatrix} \quad (21)$$

여기서, \mathbf{x} 는 최적화문제의 설계변수로서, 이 연구에서는 구조물의 각 위치별 구조부재의 강성 및 감쇠기의 감쇠계수를 나타낸다. 최소화 대상이 되는 목적함수 $f_i(\mathbf{x})$ 는 구조부재의 사용량 및 제어장치의 용량, 그리고 구조물의 최대응답이 허용값 a 를 초과하는 한계상태에 대한 파괴확률이 될 수 있다.

다목적최적화과정에서는 목적함수가 많아질수록 검색하여야 하는 설계변수는 기하급수적으로 증가한다. 이 연구에서는 구조물의 파괴확률을 최적화과정에서 항상 만족하는 제한조건으로 치환함으로써 목적함수의 개수를 줄일 수 있도록 최적화문제를 구성하였다. 이에 대한 목적함수는 목표신뢰성에 대한 제한조건을 가지는 형식으로 식 (22)로서 정의된다.

$$f_1(\mathbf{x}) = \frac{1}{n \times k_{\max}} \sum_{j=1}^{n_k} k_j(\mathbf{x}) + 10^9 \times \max[0, \beta_T - \beta(\mathbf{x})] \quad (22a)$$

$$f_2(\mathbf{x}) = \frac{1}{n \times c_{\max}} \sum_{j=1}^{n_c} c_j(\mathbf{x}) + 10^9 \times \max[0, \beta_T - \beta(\mathbf{x})] \quad (22b)$$

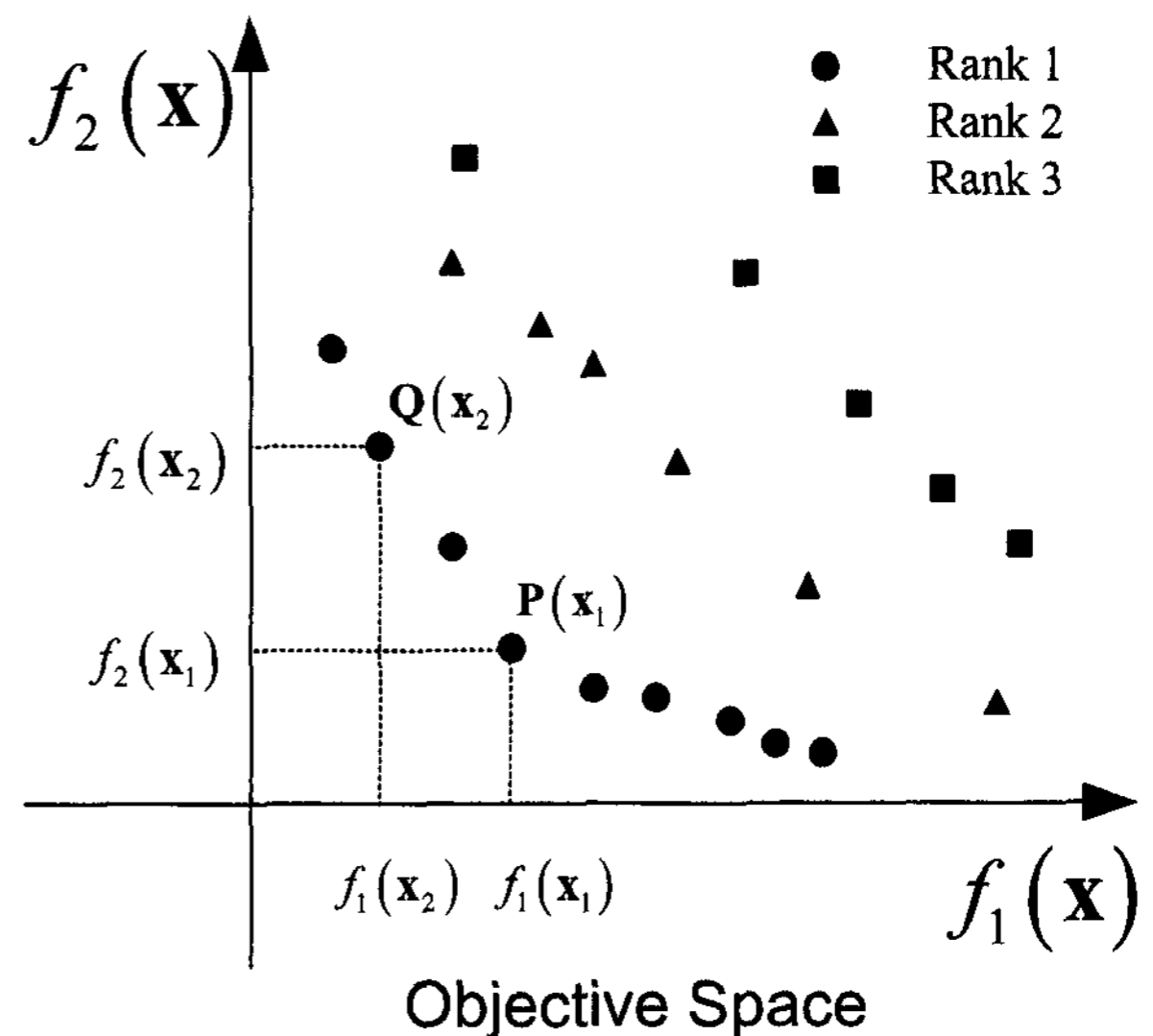
여기서, n 은 설치 가능한 총 층수, k_{\max} 및 c_{\max} 는 정규화를 위하여 도입한 최대 강성 및 감쇠계수 값이다. 그리고 n_k 와 n_c 는 강성 및 감쇠기의 총 개수이며, k_j 및 c_j 는 각각 j 번째 강성 및 감쇠계수이다. 또한, 최적화과정에서 제한조건을 최우선적으로 만족하도록 가중치 10^9 을 적용하였다. 한편, β_T 는 목표신뢰성지수(target reliability index)로서 주어진 한계상태에 대하여 설계자가 미리 정하는 신뢰성의 목표치이다. 또한, $\beta(\mathbf{x})$ 는 설계변수 \mathbf{x} 에 대한 구조시스템의 신뢰성지수로서, 다음의 과정을 통하여 산정된다. 설계변수 \mathbf{x} 는 구조물의 각 위치별 강성 및 감쇠계수에 해당하므로, 이로부터 식 (1)의 부가적인 강성행렬 K_d 와 감쇠행렬 C_d 을 구성할 수 있다. 부가 강성 및 감쇠를 원 구조물에 적용함으로써 전체 시스템에 대한 주파수응답함수를 식 (9)로부터 얻을 수 있으며, 이에 대한 식 (19)의 적분을 통하여 식 (20)의 신뢰성지수 $\beta(\mathbf{x})$ 를 산정할 수 있다.

3.2 다목적최적화기법

다목적최적화문제에서는 본질적으로 다수의 최적해가 존재하며, 이를 Pareto 최적해라 한다^(15,16). 이는 여러 개의 목적함수가 서로 상충하는 특성에 기인한다. 즉, 대부분의 공학문제에서 어느 하나의 목적함수에 대하여는 우수한 해가 존재할 수 있지만 모든 목적함수에 대해서 절대적으로 우수한 해는 유일하지 않는 것이 일반적이다. 예를 들어, 개체 “A”는 다른 개체들에 비해서 대부분의 목적함수에서 열등하지만 첫 번째 목적함수에 대해서는 가장 우수한 해이고, 개체 “B”는 두 번째 목적함수에 대해서 가장 우수한 해라고 하자. 비록 두 개체 모두 하나의 목적함수를 제외하고는 열등하지만 가장 우수한 성능을 보이는 목적함수에 대해서는 다른 어느 개체보다 우수하다고 할 수 있다. 이처럼 여러 개의 목적함수에 대해서 절대적으로 열등하지 않은 해, 또는

특정 목적함수에 대해서 다른 해들보다 우수한 성능을 보이는 해는 모두 최적해라고 할 수 있다. 이러한 개념에 따라, 다목적최적화기법은 실현가능한 해 영역 내에서 서로 열등하지도 않으며 우수하지도 않은 해(non-inferior or non-superior solutions)들을 가장 효과적으로 구하는 것을 목표로 한다. 대표적인 방법으로 NPGA(Niched-Pareto GA)⁽¹⁵⁾, MOGA(Multi-Objective GA)⁽¹⁶⁾, NSGA(Non-dominated Sorting GA)⁽¹⁷⁾, SPEA(Strength Pareto Evolutionary Algorithm)⁽¹⁸⁾, PAES(Pareto Archived Evolutionary Strategy)⁽¹⁹⁾, PESA(Pareto Enveloped-based Selection Algorithm)⁽²⁰⁾ 그리고 Micro GA⁽²¹⁾ 등이 있다. 여기서 주목할 점은 모든 다목적최적화기법이 유전자알고리즘을 차용하고 있다는 점이다. 이는 유전자알고리즘이 다수의 해를 동시에 검색할 수 있는 “multi-point parallel searching” 특성을 가지므로 다목적최적화문제에 매우 효과적으로 적용될 수 있기 때문이다. 이 연구에서는 여러 알고리즘 중에서 가장 널리 사용되고 있는 방법 중의 하나인 NSGA-II 기법⁽²²⁾을 사용하였다. 이는 NSGA⁽¹⁷⁾의 개선된 알고리즘으로서 세부적인 사항은 Deb 등⁽²²⁾에서 확인할 수 있으며, 여기서는 여타 알고리즘과 대별되는 2가지 특성인 non-dominated sorting 개념과 밀집정도를 판별하는 crowding distance(밀집도)를 기술한다.

NSGA-II는 기존 유전자알고리즘과 동일한 방식으로 다수의 개체(individual)를 임의의 생성함으로써 한 세대(generation)를 구성하게 된다. 각 개체는 최적화문제에서 다루는 설계변수 정보를 나타낸다. 여기서는 각 층에 설치되는 강성 및 감쇠계수에 해당한다. 임의의 생성된 개체들은 식 (22)를 이용하여 목적함수를 산정하게 되며, 이들은 그림 2와 같이 목적함수 공간에서 분포된다.



〈그림 2〉 Non-Dominated Sorting Concept

그림 2는 2개의 목적함수를 최소화하는 최적화문제에서 20개 개체를 생성한 경우이다. NSGA-II는 목적함수 $f_1(\mathbf{x})$ 과 $f_2(\mathbf{x})$ 의 값에 따라 각 개체의 우열을 결정하게 된다. 예를 들어, 개체 $P(x_1)$ 는 목적함수 $f_2(x)$ 에 대해서 개체 $Q(x_2)$ 보다 작은 값을 가지므로 우수한 개체가 된다. 그러나 목적함수 $f_1(x)$ 에 대해서는 개체 $Q(x_2)$ 보다 큰 값을 가지므로 열등한 개체가 된다. 반대로, 개체 $Q(x_2)$ 는 목적함수 $f_1(x)$ 에 대해서는 개체 $P(x_1)$ 보다 우수하지만 목적함수 $f_2(x)$ 에 대해서는 열등하다. 따라서 두 목적함수가 모두 동일한 중요도를 가질 때, 어느 개체가 더 낫다고 할 수 없다. 이 때, 두 개체 $P(x_1)$ 과 $Q(x_2)$ 는 서로 지배되지 않는다(non-dominated)고 하며, 어떠한 개체가 다른 모든 개체들에 의하여 지배되지 않을 때, 이는 Pareto 최적해가 된다. 따라서 Pareto 최적해들은 어떠한 개체에 의해서도 지배되지 않으므로, 최상위 순위(rank)를 가지며 'rank 1'로 분류된다. 한편, 'rank 1'인 개체들을 제외했을 때 가장 우수한 개체들은 'rank 2'로 분류된다. 즉, 'rank 2'인 개체들은 'rank 1'인 개체들에 의해서만 지배되며, 그 외의 개체들에 대해서는 지배되지 않는 개체들이다. 이러한 방식으로 20개의 개체에 대하여 순위를 그림 2와 같이 결정할 수 있으며, 이를 non-dominated sorting이라 한다.

한편, 각 개체의 순위만으로 우수개체를 보존할 경우, 유전자알고리즘은 다음으로 검색되는 Pareto 최적해를 특정 목적함수 공간으로 밀집시키는 현상을 유발할 수 있다. 이는 다목적최적화기법의 목적인 해의 다양성(diversity)을 구현하지 못하도록 한다. 이를 방지하고 Pareto 최적해가 목적함수 공간에서 균등하게 분포되도록 유도하기 위하여, 각 개체의 주변에 존재하는 여타 최적해의 밀집정도를 평가할 수 있는 밀집도가 평가된다. 이는 동일한 순위를 갖는 해들에 대해서 목적함수 공간에서 다양하게 분포되도록 하기 위함으므로, 평가 대상이 되는 개체와 동일한 순위를 갖는 개체들에 대하여만 산정된다. 그림 3에 나타낸 바와 같이, 특정 개체의 밀집도는 그와 인접한 두 개체에 대하여 각 목적함수별 거리의 정규화된 합으로서 식 (23)과 같이 정의된다.

$$\sigma_d^i = \sum_{k=1}^m \frac{d_k^i}{d_k^{\max}} \quad (23)$$

여기서, σ_d^i 는 i 번째 개체의 밀집도이며, m 은 목적함수의 개수이다. 한편, 최외측의 두 개체는 항상 선택될 수 있도록 무한대(∞)의 밀집도 값으로 할당된다.

식으로부터 알 수 있듯이, 밀집도가 클수록 해당 개체는

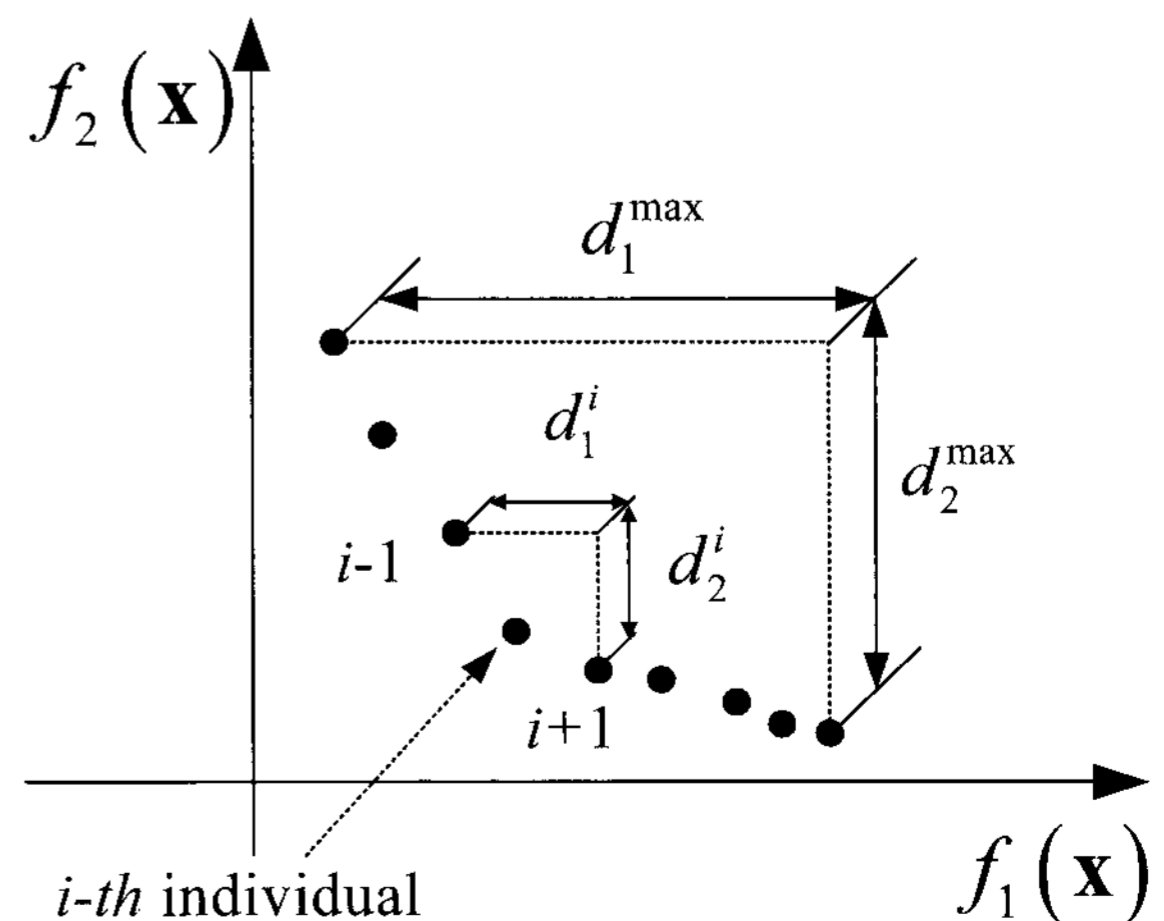
주변에 위치한 최적해와 멀리 떨어져 있음을 의미하며, 반대로 밀집도가 작을수록 해당 개체는 인접한 개체들이 밀집되어 있음을 의미한다. 따라서 해의 다양성을 위해서는 큰 값의 밀집도를 갖는 개체가 우선적으로 선택되어야 할 것이다.

두 가지 척도인 순위와 밀집도를 이용한 개체 선택은 다음과 같다. 먼저 각 개체의 순위에 따라 'rank 1'의 개체가 우선적으로 선택된다. 그리고 'rank 1'인 두 개체 사이에서는 밀집도의 값이 큰 개체가 우선적으로 선택된다. 선택된 개체들은 현 세대의 부모 개체가 되며, 이들은 기존 유전자 알고리즘과 동일한 방식으로 교배(crossover) 및 돌연변이(mutation) 과정을 거쳐서 다음 세대의 자손 개체를 생성하게 된다. 이러한 반복 연산을 통하여 NSGA-II는 목적함수 공간에 우수한 개체들을 균등하게 분포시키며, 이들은 세대가 진행될수록 점점 우수한 개체로 진화해 간다. 이러한 일련의 연산은 최적 반복횟수에 도달함으로써 종료된다. 알고리즘의 이해를 위하여 그림 4에 개략적 순서도를 도시하였다.

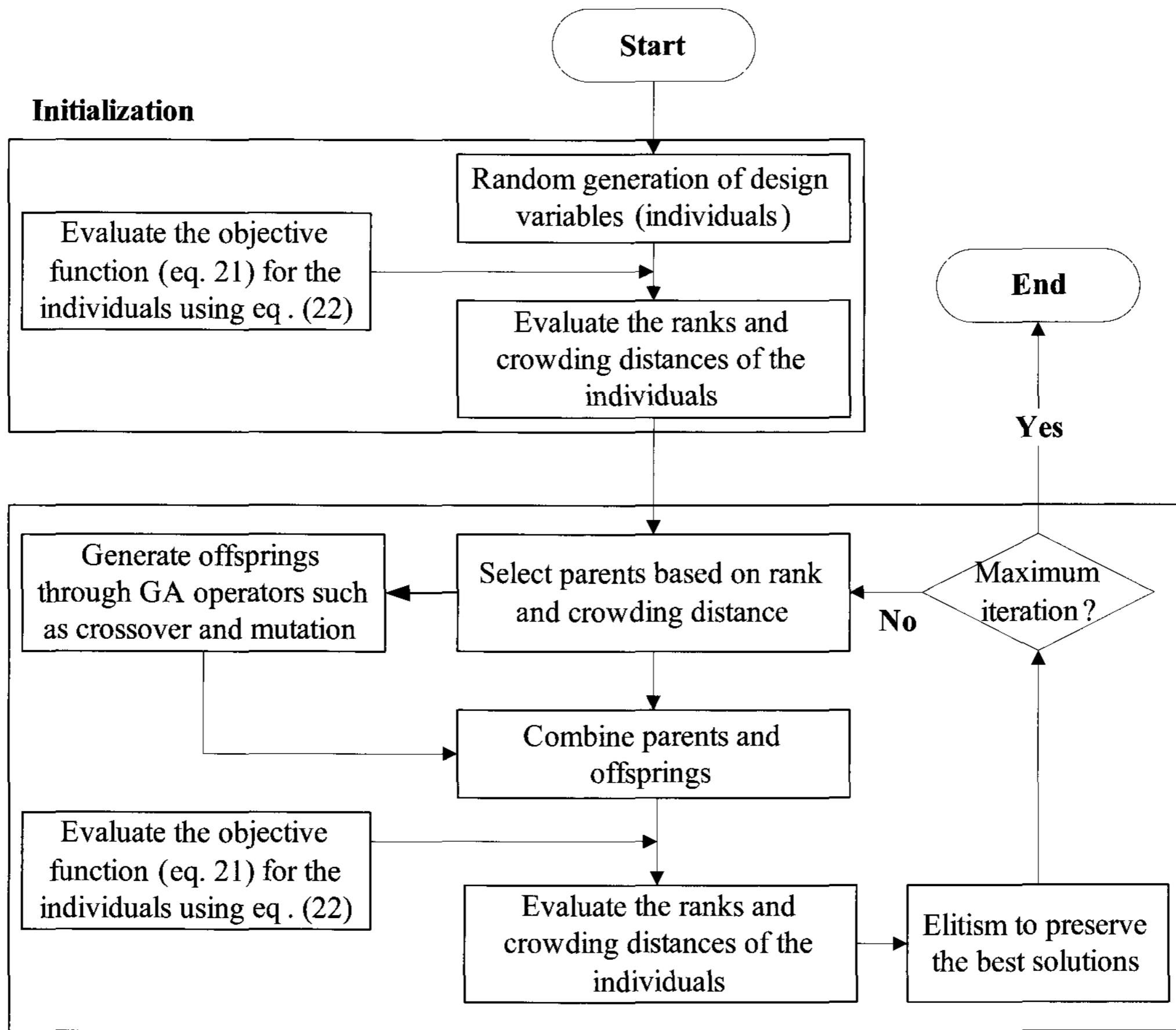
4. 수치 예제

4.1 대상구조물

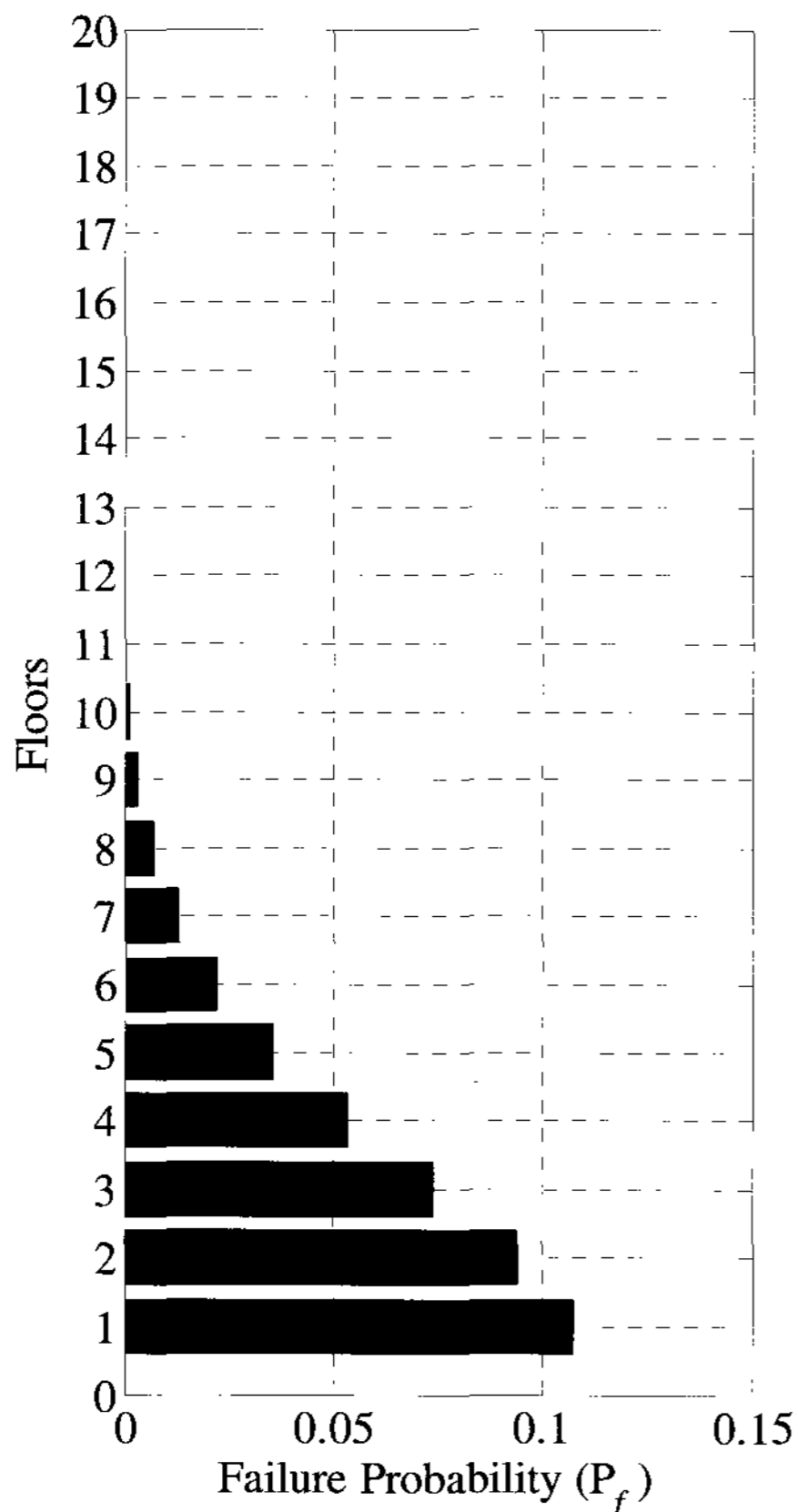
대상구조물은 20층 전단빌딩으로서 각 층의 질량은 800ton이며 층간 기둥 강성은 5400MN/m으로 일정하다. 감쇠는 모든 모드에 대하여 2%의 비례감쇠(proportional damping)를 가정하였다. 설계지진하중으로는 계수 $\omega_g = 5\pi(\text{rad/sec})$, $\zeta_g = 0.6$, $\Phi_0 = 0.0433$ 를 갖는 Kanai-Tajimi 모델을 고려하였다. 이 구조물에 대한 층간상대변위의 허용치(a)를 4.5cm로 고려할 때⁽⁵⁾, 입력지진으로 인한 각 층별 파괴확률은 식 (15)를 이용하여 산정할 수 있으며 그 결과는 그림 5와 같다. 가장 파괴확률이 높은 부분은 1층으로서 10.75%의 값을 갖는다. 이는 신뢰성지수 $\beta = 1.24$ 에 상응한다. 어느 한 층의 상대



〈그림 3〉 Crowding distance



〈그림 4〉 다목적 최적화방법의 순서도

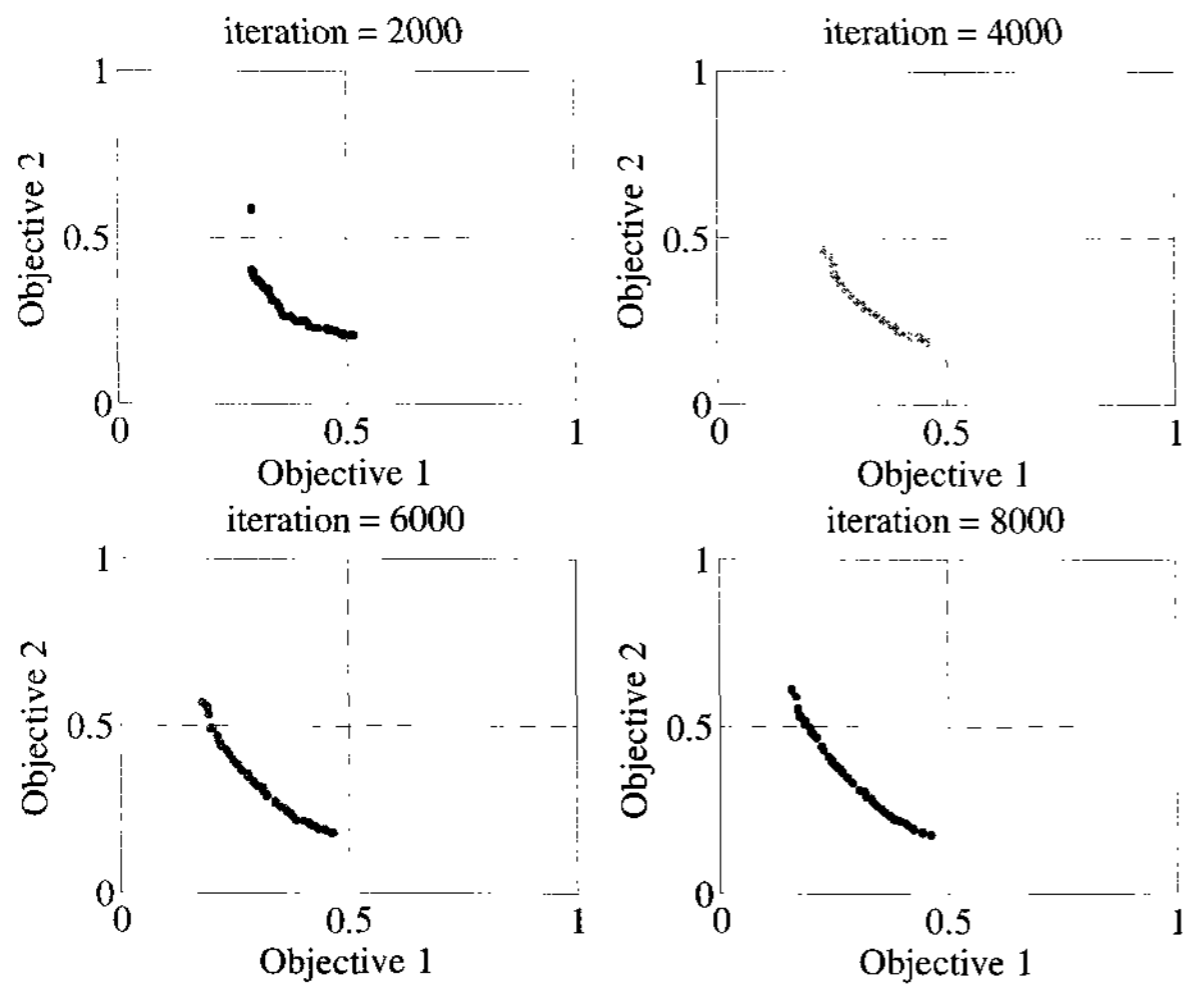


〈그림 5〉 층간상대변위 허용치 4.5cm를 초과할 파괴확률

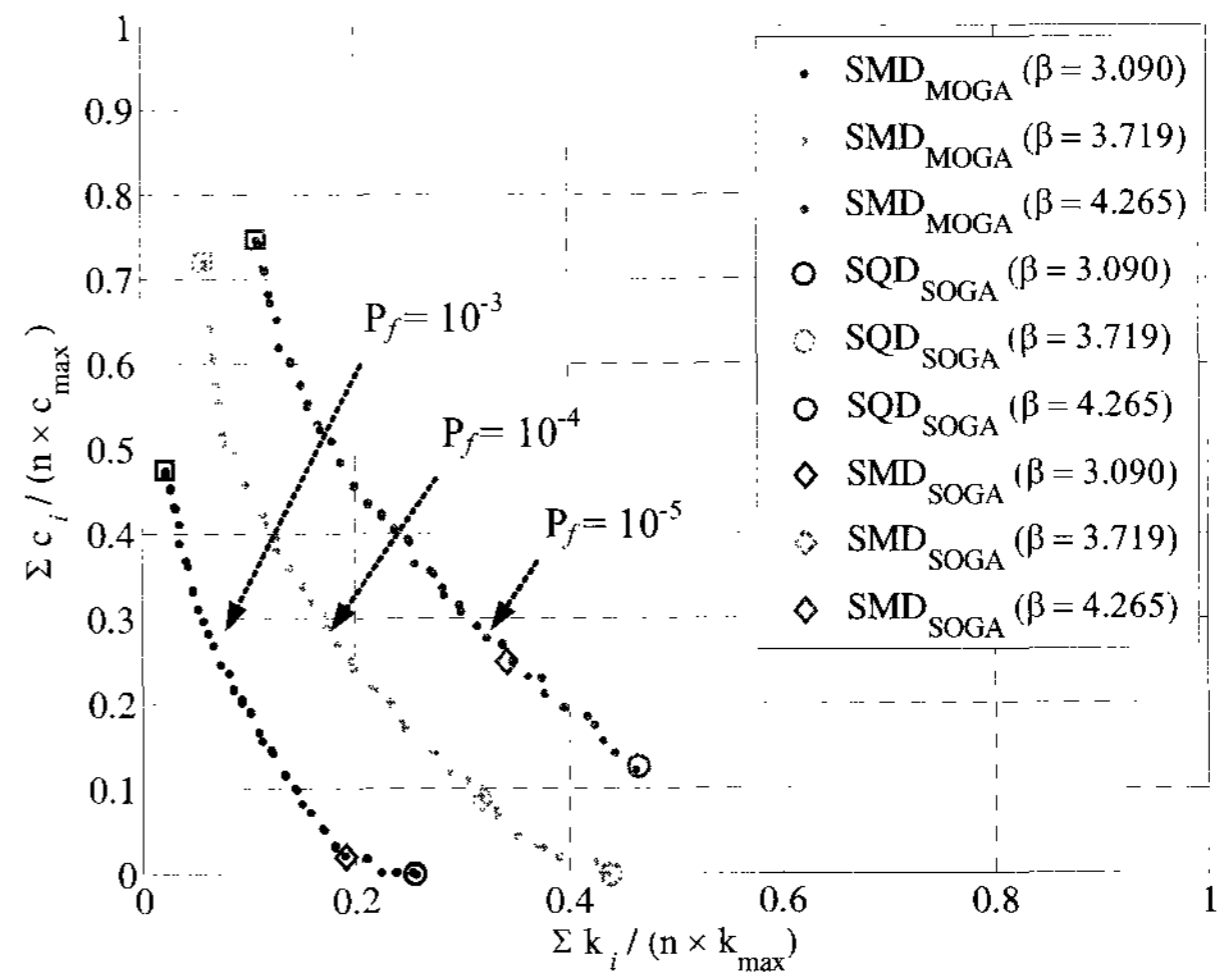
변위가 허용치를 초과할 때 전체 시스템이 파괴한다고 가정할 때, 대상 구조물은 설계 지진에 대하여 10.75%의 파괴확률을 갖는 매우 취약한 구조물이다.

4.2 구조물-감쇠기 복합시스템의 최적설계

구조물의 안정성을 향상시키기 위한 방법으로 보강부재 및 감쇠장치를 이용한 통합최적설계를 수행하였다. 설계변수로는 각 층간 기동강성과 감쇠계수로서 40개의 변수가 사용되었으며, 이들은 0부터 최대 기동강성 값(= k_{max}) 5400(MN/m) 과 최대 감쇠계수(= c_{max}) 2.5×10^7 (N-s/m) 이내의 범위에서 검색되었다. 이처럼 많은 설계변수로 인하여 넓은 검색 영역을 가지므로, 최적해를 검색하기 위해서는 매우 많은 검색시간이 요구될 것으로 예측된다. Pareto 최적해의 수렴성을 검증하기 위하여 최대 반복횟수에 따른 Pareto 최적해의 검색결과를 그림 6에 도시하였다. 그림에서 알 수 있듯이, 6000회 이상 유전자 검색을 수행한 결과 Pareto 최적해들이 수렴하는 것을 알 수 있으나, 8000회의 반복횟수에 대해서도 미세한 양이나 Pareto 최적해들이 개선되는 결과를 확인하였다. 이를 바탕으로 최종적으로 적용한 최대 반복횟수는 10,000회이며, 한 세대별 개체는 50개를 생성하였다.



〈그림 6〉 반복횟수에 따른 Pareto 최적해의 분포

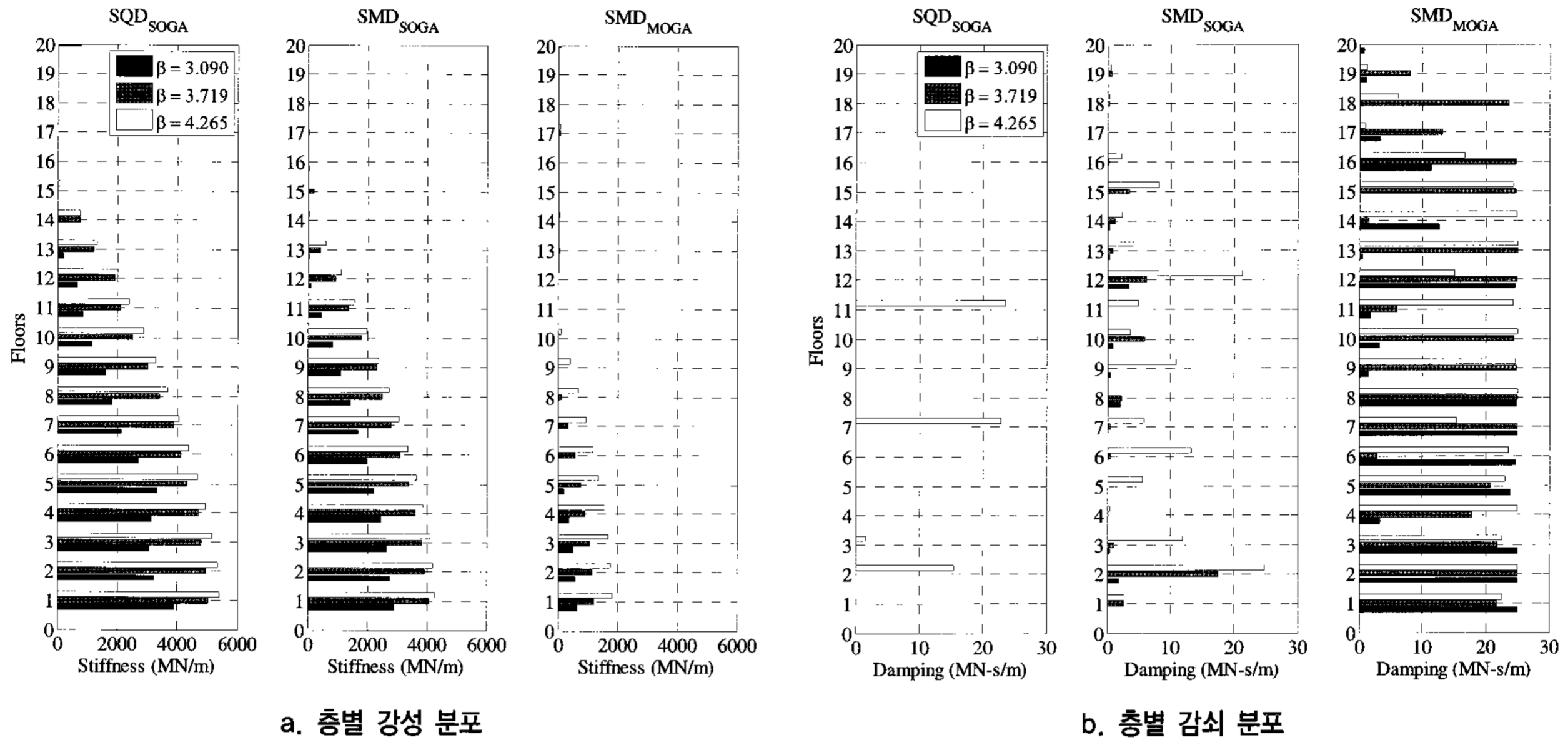


〈그림 7〉 목표신뢰성지수에 따른 Pareto 최적해

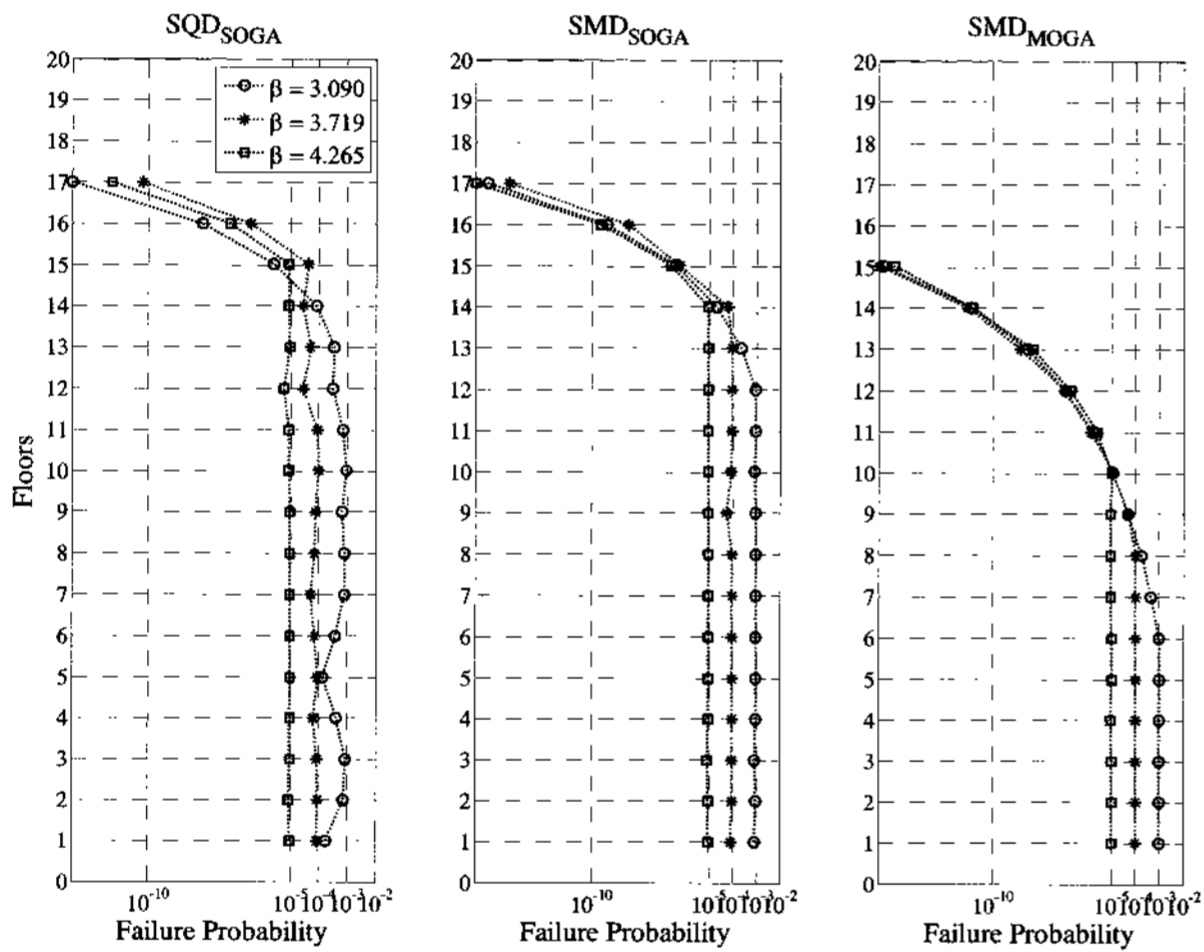
목표신뢰성지수로는 파괴확률 10^{-3} , 10^{-4} , 10^{-5} 에 해당하는 $\beta = 3.090$, $\beta = 3.719$ 및 $\beta = 4.265$ 의 3가지 경우를 고려하였으며, 각 목표신뢰성지수별 최적설계를 반복 수행하였다. 세 가지 목표성능을 만족하는 Pareto 최적해를 검색한 결과를 그림 7에 도시하였다. 수평축은 강성량에 대한 목적함수로서 식 (22a)의 $f_1(x)$ 이며, 수직축은 식 (22b)의 감쇠량에 대한 목적함수 $f_2(x)$ 이다. 이들은 모두 목표신뢰성지수를 만족하는 것을 확인하였으며, 이에 따라 각각 정규화된 총 강성량 및 감쇠량의 합과 동일한 값을 나타내었다. 따라서 Pareto 최적해의 분포로부터 강성의 사용량과 감쇠기의 사용량은 서로 상충하고 있음을 확인할 수 있다. 이는 강성을 많이 사용하든지 또는 감쇠기를 많이 사용함으로써 목표신뢰성을 만족할 수 있음을 의미한다. 제시한 방법에 따른 최적해들은 다목적함수의 동시최적결과이므로, SMD_MOGA(SiMultaneous Design based on Multi-Objective GA)로 표기하였다. 또한, 최적화결과의 검증에 위하여 두 가지 설계방법에 따른 결과를 비교 도시하였다. 첫 번째는 순차적 최적화방법에 따른 설계로서 먼저 강성만을 목적함수로 사용하여 그 사용량을 최소화한 후 감쇠량을 최소화하였다. 이는 단일목적함수 기반 최적설계를 따르므로 SQD_SOGA(SeQuential Design based on Single-Objective GA)로 표기하였다. 두 번째는 강성 및 감쇠를 동시에 최적 설계하지만 이들의 사용량을 단순히 합하여 단일목적함수로 취환하여 최적설계한 결과로서 SMD_SOGA(SiMultaneous Design based on Single-Objective GA)으로 표기하였다. 그림 7에서 알 수 있듯이, 순차적 최적화방법에 따른 결과는 강성을 먼저 최소화한 후 감쇠를 최소화함으로써 SMD_MOGA로부터 얻어진 Pareto 최적해 중에서 가장 최외측의 최적해로 수렴하는 것을 알 수 있다. 한편, SMD_SOGA에 의한 결과는 강성과 감쇠를

동일한 중요도로 최적화하였으므로 역시 SMD_MOGA로부터 얻어진 Pareto 최적해 중 하나의 최적해인 것을 알 수 있다. 이상의 결과로부터 제시하는 방법이 순차적 설계방법 및 임의 가중치를 이용한 단일 목적함수 기반의 최적결과를 포함하는 다양한 설계안을 제공해 주는 것을 검증하였다. 그러므로 제시하는 방법은 목표신뢰성을 만족하면서도 보강부재 및 감쇠장치의 배치를 다양하게 할 수 있는 여러 설계안을 제공해 줄 수 있는 장점을 가진다.

한편, 세 가지 목표신뢰성지수를 만족하도록 설계된 Pareto 최적해들로부터 목표성능이 높아짐에 따라 사용되는 강성량 및 감쇠량은 증가함을 알 수 있다. 또한, 대상구조물의 목표성능을 신뢰성지수 3.719 이하(또는 파괴확률 10^{-4} 이상)로 유지하기 위해서는 보강부재의 배치만으로도 충분하지만 4.265 이상의 신뢰성지수를 확보하기 위해서는 강성과 감쇠장치를 병용하여야 함을 알 수 있다. 이들은 모두 목표신뢰성지수를 만족하므로 성능의 측면에서는 모두 합리적인 해라 할 수 있으며, 각 강성 및 감쇠장치의 배치에 따른 소요경비를 평가함으로써 가장 경제적인 설계안을 결정할 수 있게 된다. 이는 단순한 재료비용뿐만 아니라 설치비용 및 유지비용 등의 다양한 항목으로 구성될 수 있으며, 때로는 건물주의 기호에 영향을 받을 수도 있다. 이러한 경제성 평가는 이 연구의 범위를 넘어서므로 생략하고, 여기서는 앞서 얻어진 SMD_SOGA, SQD_SOGA 및 감쇠장치를 가장 많이 사용하는 최적해(SMD_MOGA; 그림 7에서 도형 “□”로 표기)를 3개의 대표 설계안으로 선택하였다. 각 설계안들의 층별 강성(구조보강으로 인한 부가적 강성) 및 감쇠기(선형점성감쇠기로 인한 부가적 감쇠)의 배치는 그림 8에 나타내었으며, 이 시스템들의 층별 파괴확률은 그림 9에 도시하였다. 그림 8(a)에서 층별 강성의 분포는 고층부로부터



〈그림 8〉 목표신뢰성지수에 따른 세 가지 설계안의 층별 강성 및 감쇠장치 분포



〈그림 9〉 목표신뢰성지수에 따른 세 가지 설계안의 층별 파괴확률

터 저층부로 갈수록 점점 증가하는 경향을 뚜렷이 보여주고 있다. 이는 대상빌딩의 경우 저층부로 갈수록 최대 층간상대변위가 증가하기 때문에 이를 저감시키기 위해서 강성이 비슷한 형태로 배치되기 때문이다. 또한, 목표신뢰성지수가 높아질수록 강성의 사용량이 점진적으로 증가하는 경향을 확인할 수 있다. 한편, 강성과 달리, 감쇠장치는 층별 분포에 있어서 특별한 경향을 보이지는 않으며, 전 층에서 불규칙하게 분포하는 결과를 그림 8(b)에서 확인할 수 있다. 이는 감쇠력이 속도의 함수이므로 단순히 변위와 비례하지는 않기 때문이다. 그림 9에는 각 시스템의 층별 허용치를 초과할 파괴확률을 도시하였다. 그림에서 알 수 있듯이, 모든 시스템이 목표성능지수를 만족하고 있으며 이는 제안한 최적화방법이 목표성능 제한조건을 효과적으로 만족시키면서 최적해를 검색하고 있음을 보여주고 있다. 여기서 주목할 점은 강성을 사용하는 경우에는 파괴확률이 비록 허용치내

에 분포하고 있으나 1층부터 13층까지 허용치에 근접하는 반면, 감쇠기를 사용하는 경우에는 7층까지만 허용치에 근접하고 그 이상의 고층부에서는 허용치보다 매우 낮은 확률을 보임으로써 안정적인 성능을 보이고 있음을 알 수 있다.

4.3 내진성능평가

다음으로는 지진하중의 탁월주파수 성분 및 밴드폭의 변화에 따른 다양한 지진하중에 대한 각 시스템의 내진성능을 평가하였다. 지진발생동안의 주요 평가응답으로는 이 연구에서 다루고 있는 층간상대변위의 최대값을 고려할 수 있다. Davenport⁽²³⁾는 추계학적 프로세스의 표준편차와 최대응답의 평균값간의 관계를 결정짓는 peak factor를 제안한 바가 있으며, Der Kiureghian⁽²⁴⁾은 이를 더욱 개선시켜 식 (24)를 제시하였다.

$$\mu_{Y_\tau} = p \cdot \sigma_y \tag{24}$$

여기서, Y_τ 는 시간 (0, τ)동안 출력응답 $y(t)$ 의 최대값을 나타내며, μ_{Y_τ} 는 그 평균을 의미한다. 또한, σ_y 는 출력응답 $y(t)$ 의 표준편차로서 식 (19)의 0차 spectral moment λ_0 의 제곱근에 상응한다. 두 응답간 관계를 결정짓는 계수 p 는 peak factor로서 식 (25)로 정의된다.

$$p = \sqrt{2\ln(\nu_e\tau)} + \frac{0.5772}{\sqrt{2\ln(\nu_e\tau)}} \quad \nu_e\tau \geq 2.1 \tag{25a}$$

$$p = 1.253 + 0.209 \times \nu_e\tau \quad \nu_e\tau \leq 2.1 \tag{25b}$$

여기서, τ 는 강진지속시간으로서 20초를 고려하였으며, ν_e

는 식 (26)에 의하여 정해지는 계수이다.

$$\nu_e = 2\delta\nu_y(0) \quad 0 < \delta \leq 0.1 \quad (26a)$$

$$\nu_e = (1.63\delta^{0.45} - 0.38) \times \nu_y(0) \quad 0.1 < \delta \leq 0.69 \quad (26b)$$

$$\nu_e = \nu_y(0) \quad 0.69 < \delta < 1 \quad (26c)$$

여기서, δ 는 식 (18)의 정규화된 bandwidth이며, $\nu_y(\xi)$ 는 특정값(threshold) ξ 를 초과할 양방향 평균초과율(two-sided mean crossing rate)로서 식 (27)로 표현된다.

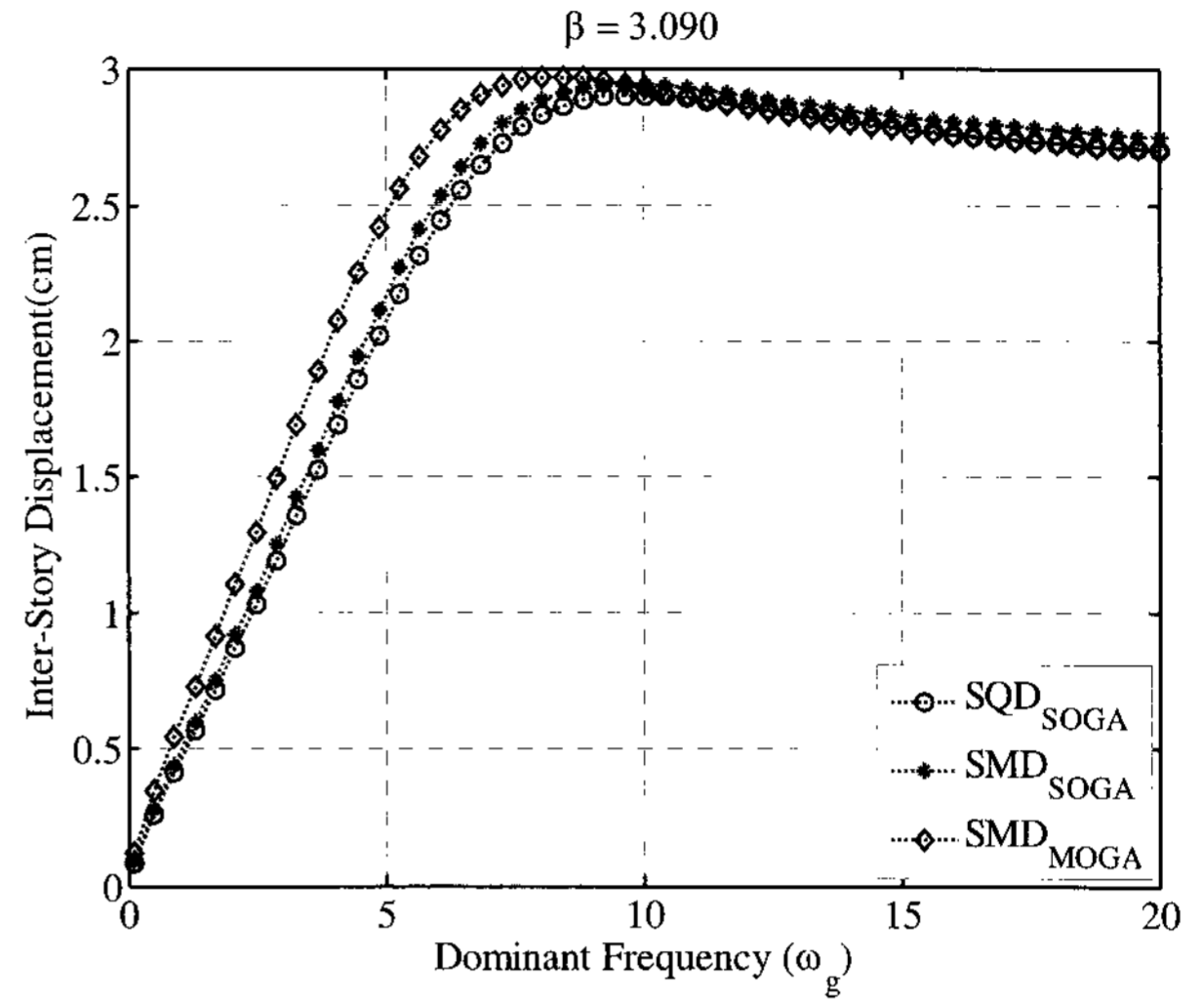
$$\nu_y(\xi) = \frac{1}{\pi} \sqrt{\frac{\lambda_2}{\lambda_0}} \exp\left(-\frac{\xi^2}{2\lambda_0}\right) \quad (27)$$

이상의 층간상대변위 응답의 최대값 산정과정을 정리하면 다음과 같다. 식 (19)를 이용하여 spectral moments λ_0, λ_1 및 λ_2 를 산정한 후 이로부터 양방향 평균초과율 $\nu_y(\xi=0)$ 및 식 (18)의 δ 를 계산한다. δ 및 $\nu_y(0)$ 에 대하여 식 (26)의 ν_e 를 산정할 수 있으며, 이로부터 식 (25)의 peak factor를 얻을 수 있다. $\sigma_y = \sqrt{\lambda_0}$ 이므로 최종적으로 식 (24)에 의하여 층간상대변위의 최대값 μ_{I_r} 을 산정할 수 있다.

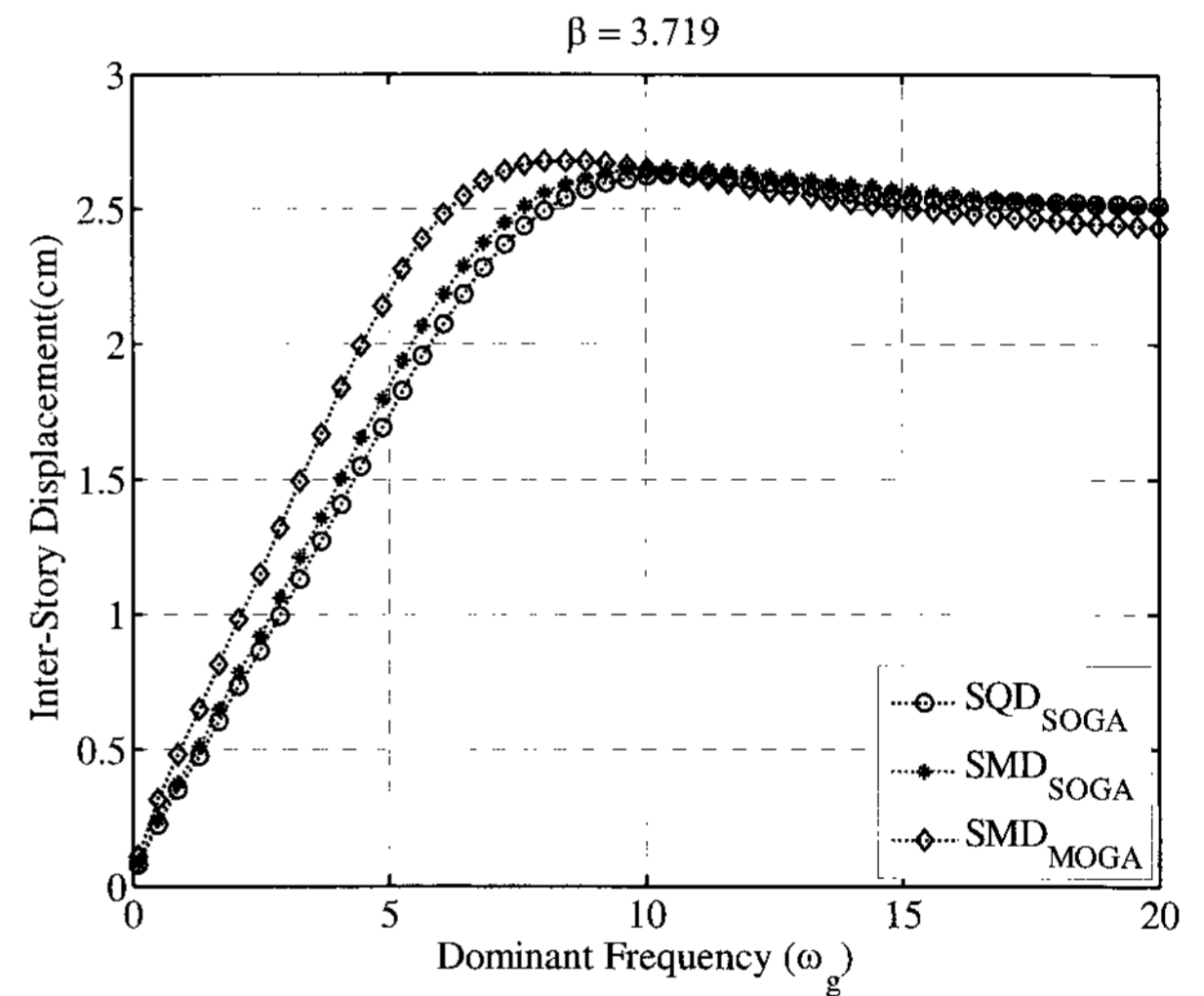
세 가지 설계안 SMD_SOGA, SQD_SOGA, 및 SMD_MOGA의 최대 층간상대변위응답을 입력지진하중의 탁월주파수 성분을 변화시켜가면서 산정한 결과를 그림 10에 나타내었다. 여기서 밴드 폭 및 지진세기는 설계하중과 동일한 값 $\zeta_g = 0.6, \Phi_0 = 0.0433$ 를 사용하였다. 그림 10에서 지진주파수 성분 변화에 따른 최대 응답은 각 시스템의 1차 모드 고유주파수 부근에서 발생하고 있음을 알 수 있다. SMD_MOGA의 최대 응답이 다른 두 시스템(SQD_SOGA, SMD_SOGA)보다 다소 작은 주파수 성분에서 발생하는 것은 두 시스템(SQD_SOGA, SMD_SOGA)보다 강성을 보다 작게 사용하기 때문이다. 한편, 입력지진하중의 탁월주파수 성분이 구조물의 1차 모드 고유주파수보다 작은 경우(대략 10rad/sec 이하)에는 SMD_MOGA의 최대 응답이 가장 크게 발생하고 있으나 입력지진하중의 주파수 성분이 고주파수 대역의 주파수 성분을 많이 포함할수록, 즉 탁월주파수가 점점 증가할수록 SMD_MOGA의 최대 응답은 미소한 양이나마 다른 두 시스템보다 작아지고 있으며 목표신뢰성지수가 증가할수록 그 차이는 커지고 있다.

그림 11은 탁월주파수 및 지진세기는 고정된 값 $\omega_g = 5\pi$ (rad/sec), $\Phi_0 = 0.0433$ 을 사용하고, 밴드폭(ζ_g)을 변화시킬 때의 결과이다. 수평축은 밴드폭(ζ_g)의 변화에 따른 입력하중 프로세스의 밴드폭의 형상계수 δ 이며, 수직축은 최대 층간

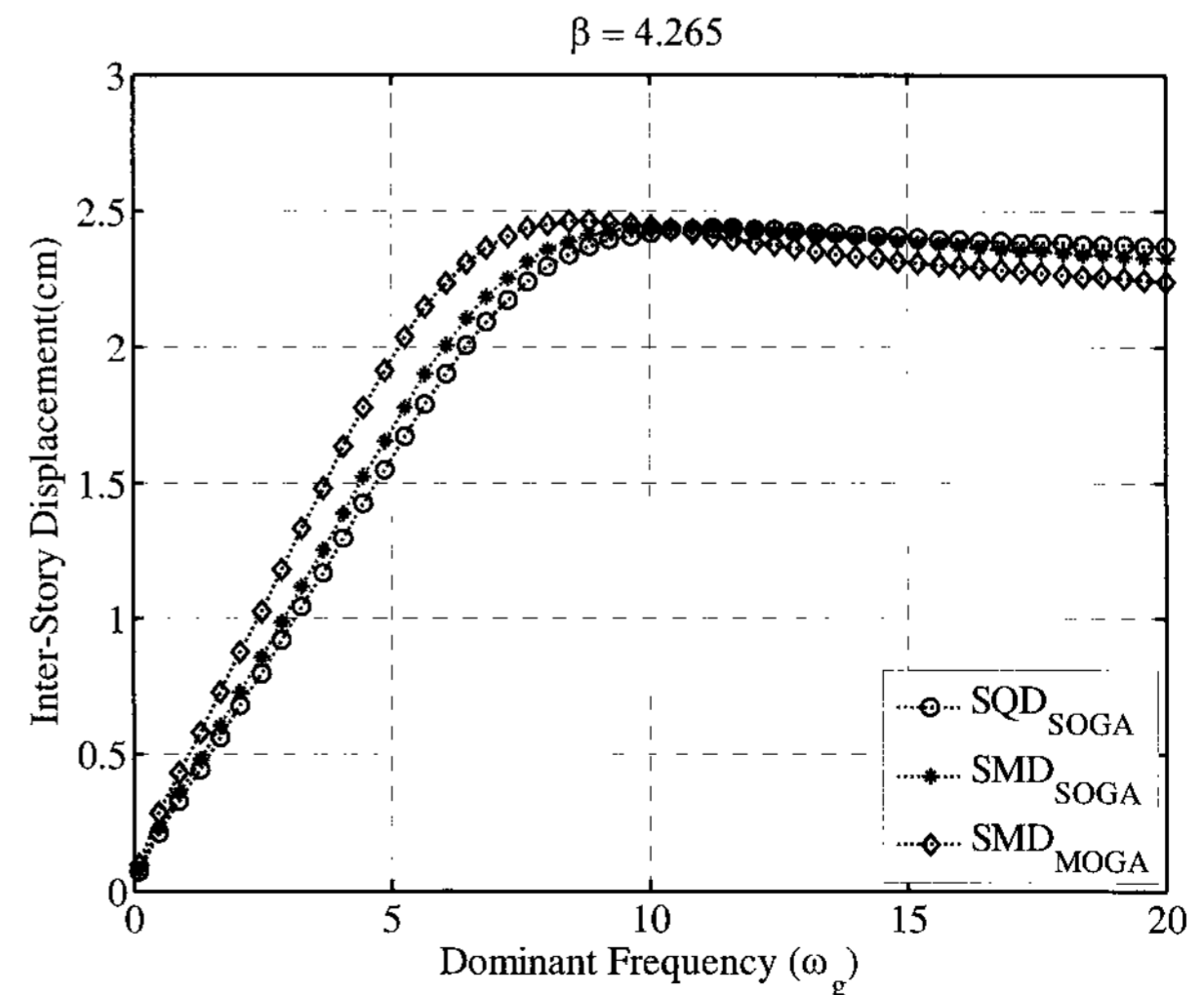
상대변위를 나타낸다. 탁월주파수로 고주파수 대역을 사용하였으므로, 그림 10에서 확인하였듯이, SMD_MOGA가 다른 두



(a) 목표신뢰도 3.090을 만족하는 세 설계안의 최대 층간상대변위

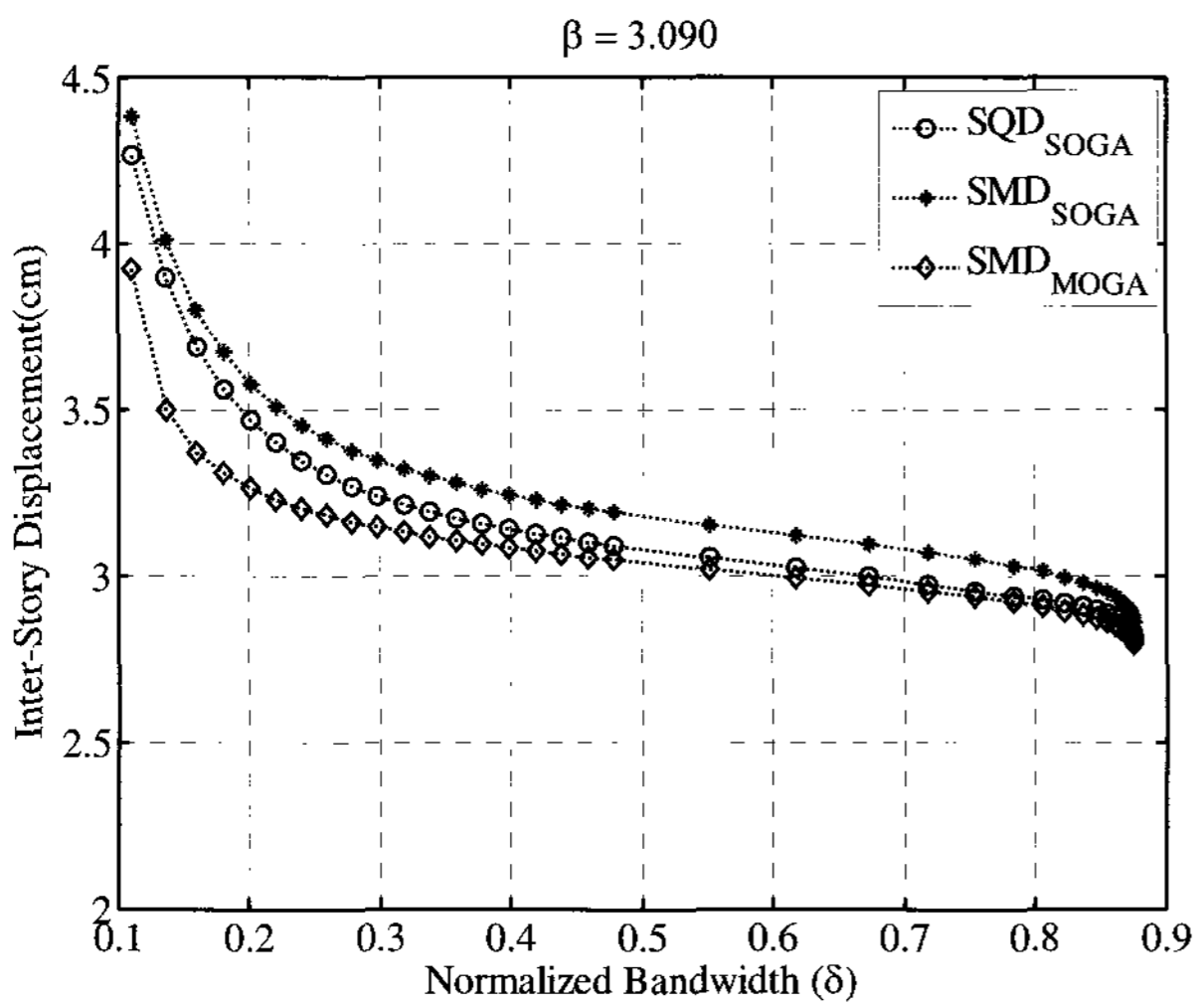


(b) 목표신뢰도 3.719를 만족하는 세 설계안의 최대 층간상대변위

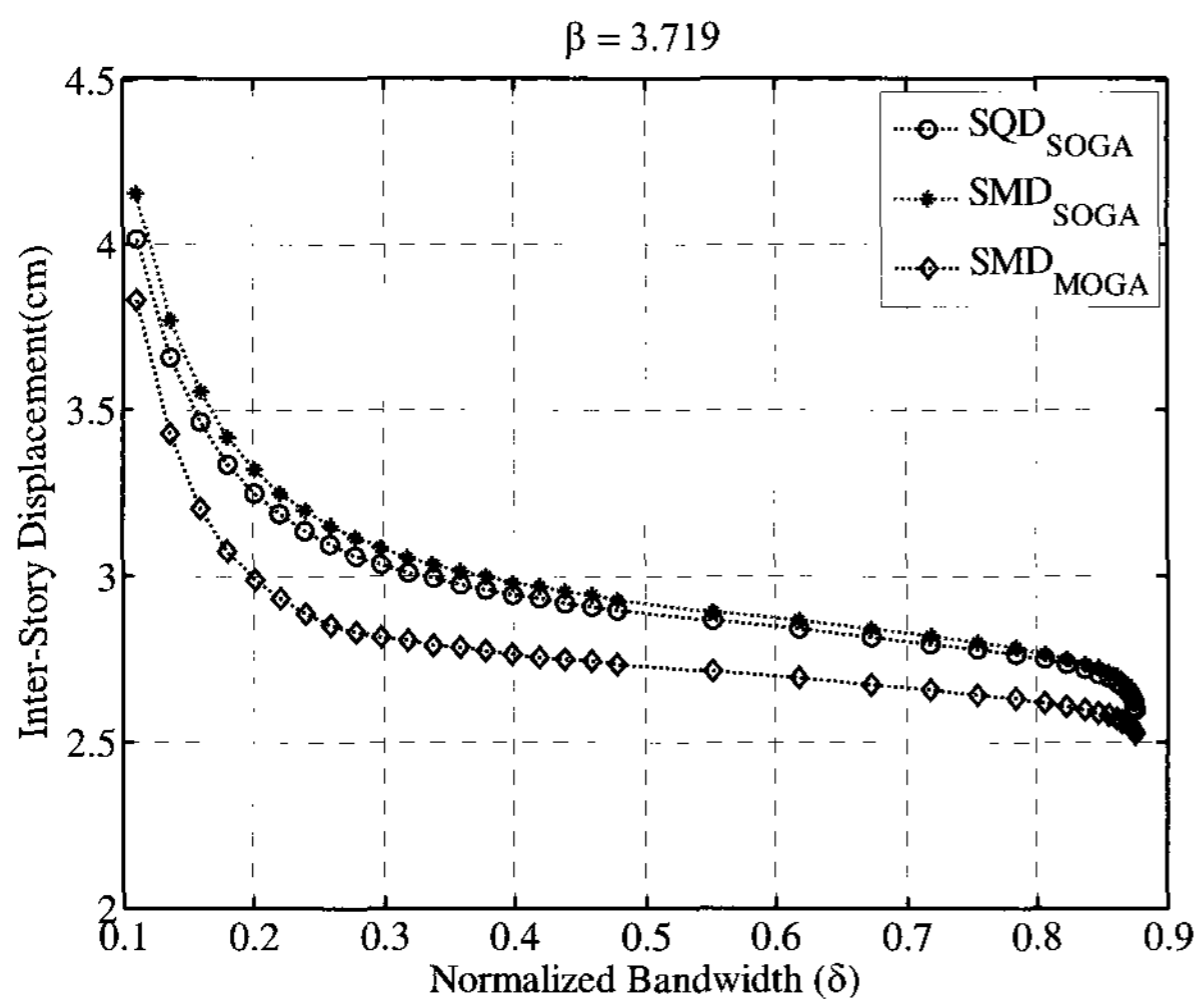


(c) 목표신뢰도 4.265를 만족하는 세 설계안의 최대 층간상대변위

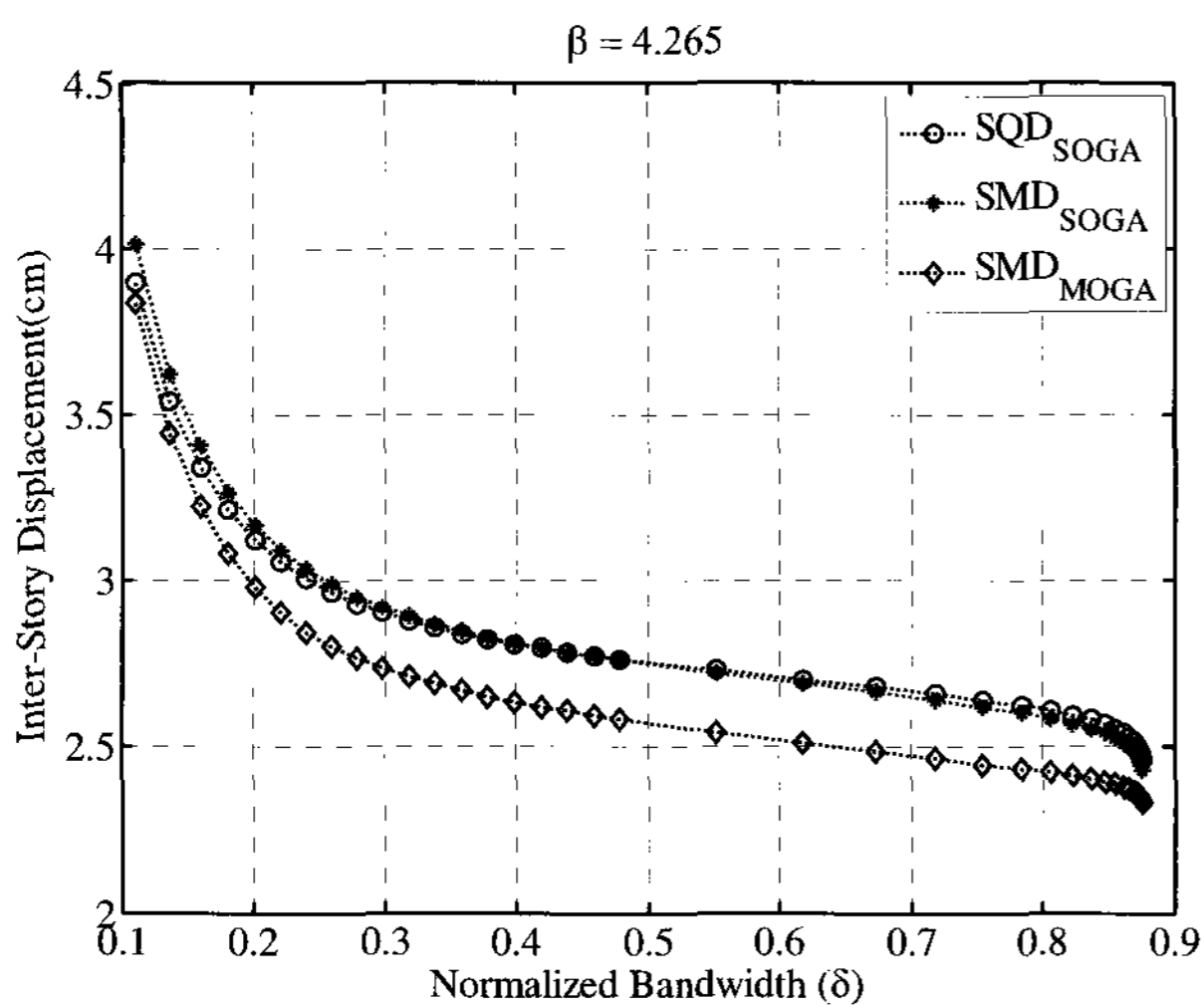
〈그림 10〉 지진가속도의 탁월주파수별 최대 층간상대변위



(a) 목표신뢰도 3.090을 만족하는 세 설계안의 최대 층간상대변위



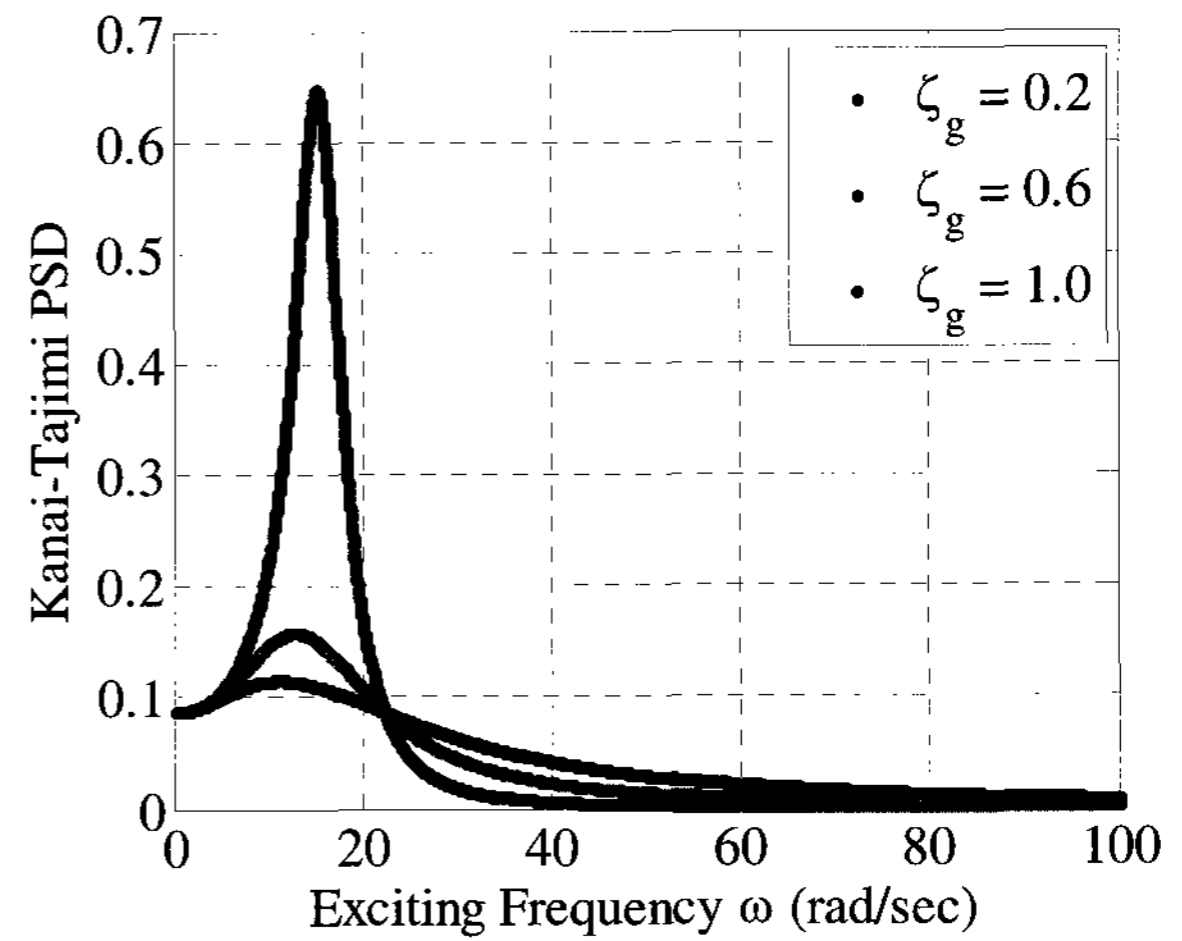
(b) 목표신뢰도 3.719를 만족하는 세 설계안의 최대 층간상대변위



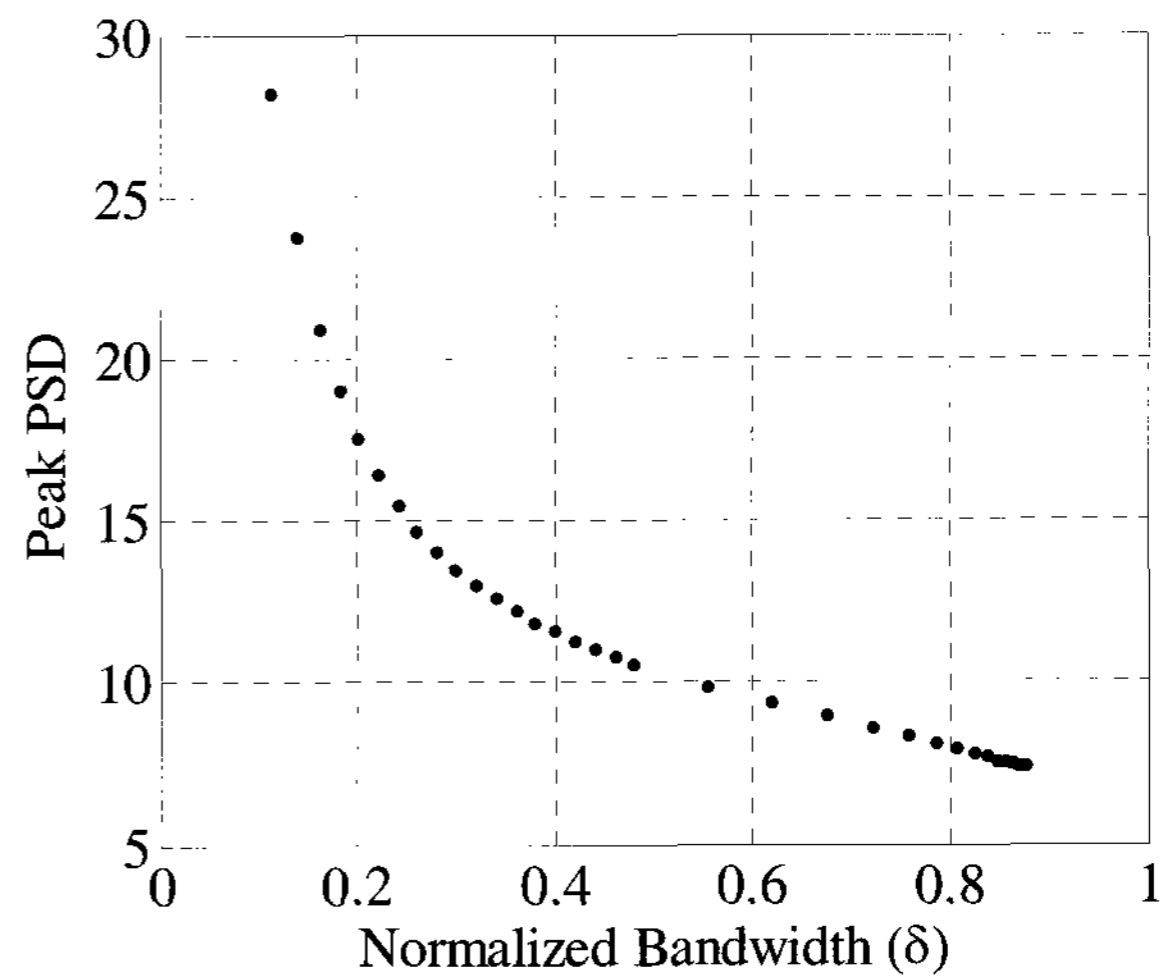
(c) 목표신뢰도 4.265를 만족하는 세 설계안의 최대 층간상대변위

〈그림 11〉 지진가속도의 밴드폭별 최대 층간상대변위

시스템보다 최대 응답의 크기가 다소 작으며, 밴드폭의 변화에 대해서도 일관적으로 우수한 응답저감 효과를 보여주고 있다. 한편, 목표신뢰도지수 $\beta = 3.090$ 인 그림 11(a)에서 밴드



(a) 밴드폭(ζ_g) 및 Kanai-Tajimi PSD



(b) 정규화된 밴드폭(δ) 및 최대 지진세기

〈그림 12〉 밴드폭 및 Kanai-Tajimi PSD

폭이 작은 협대역(narrow-band) 지진입력하중에서 SMD_MOGA가 다른 시스템보다 다소 우수한 응답저감효과를 보이다가 광대역(wide-band) 하중으로 갈수록 세 시스템은 모두 유사한 성능을 보인다. 반면, 목표신뢰도지수가 높아짐에 따라 광대역(wide-band) 입력하중에 대하여 SMD_MOGA가 보다 우수한 성능을 보여주는 결과를 그림 11(c)에서 확인할 수 있다.

그림 11에서 지진파의 밴드폭이 증가함에 따라 시스템의 응답은 전체적으로 감소하지만 일정 수준이상에서는 수렴하는 결과를 확인할 수 있다. 반대로 협대역(narrow-band) 지진하중에 대하여는 구조물의 응답이 매우 증가하는 현상을 확인할 수 있다. 그림 12(a)에서 확인할 수 있듯이, 이는 밴드폭이 작은 지진입력하중의 경우 지진파의 주파수성분이 집중됨으로 인해 그 세기가 매우 증가하기 때문이다. 그림 12(b)는 정규화된 밴드폭에 대한 Kanai-Tajimi PSD의 최대값을 도시한 결과로서 역시 협대역 입력지진하중에서 크기가 매우 증가하는 현상을 확인할 수 있다.

이상의 결과로부터 강성을 많이 사용하는 설계안은 감쇠기를 많이 사용하는 설계안보다 저주파수(장주기) 입력지진에 대해서는 효과적이거나 고주파수 대역을 많이 포함하는 단주기 지진에 대해서는 감쇠기를 많이 사용하는 것이 효과적임을 알 수 있다. 또한 주파수 성분이 다양한 광대역 입력지진에 대해서는 강성을 많이 사용하는 것보다 감쇠기를 많이 사용하는 것이 보다 강인한 성능을 얻을 수 있음을 알 수 있다. 따라서 지진하중의 불확실성을 고려할 때 강성보강 설계안보다는 감쇠기를 이용한 설계보강이 보다 강인한(robust) 성능을 보장할 수 있으며, 이는 목표성능이 높아짐에 따라 더욱 효과적이라 할 수 있다.

5. 결론

이 연구는 구조물의 내진성능 향상을 위하여 보강구조부재 및 수동형 감쇠기를 최적 배치하는 설계문제를 다루었다. 이는 두 시스템을 동시에 최적 설계할 수 있는 통합최적설계기법으로서 기존 순차적 설계를 포괄하는 장점을 갖는다. 이를 위하여 복합시스템의 최적사용량에 대한 목적함수를 별도의 가중치없이 벡터형식으로 동시 최적화할 수 있는 다목적최적화기법을 도입하였다. 또한 구조물의 응답에 대한 목표신뢰도지수를 도입하고 이를 제한조건으로 치환함으로써 여러 개의 목적함수를 갖는 다목적최적화문제를 보다 효율적으로 다루었다.

설계예를 통하여 제시하는 방법의 수렴성을 확인하였으며, 이로부터 다양한 Pareto 최적해를 제시하였다. 비교의 대상으로 기존 설계방법에 상응하는 순차적 설계방법 및 가중합방법에 따른 단일목적함수 최적화방법을 도입하였으며, 이로부터 제시하는 통합최적설계방법에 따라 검색된 Pareto 최적해들이 보다 포괄적이면서 유연한 설계안을 제시할 수 있음을 검증하였다. 또한, 이로부터 강성 및 감쇠장치의 사용량에 따라 3가지 대표설계안을 선택하고, 다양한 지진하중에 대한 매개변수연구를 수행하였다. 3가지 설계안을 비교한 결과, 장주기 성분의 지진하중에 대하여는 강성을 많이 사용하는 것이 유리한 반면, 일반적인 고주파 대역을 많이 포함하는 단주기 지진에 대해서는 감쇠기를 사용하는 것이 보다 강인한 성능을 확보할 수 있음을 확인하였다.

제시하는 방법은 강성보강 및 감쇠장치의 사용량에 따라 다양한 최적설계안을 손쉽게 도출할 수 있으므로, 후처리과정에서의 비용분석을 통하여 보다 합리적인 설계안을 제시하는 데 도움을 줄 수 있다. 그러므로 구조물의 내진성능 향상을 위한 설계방법으로서 효율적으로 적용될 수 있을 것으로 기대된다.

감사의 글

이 논문은 2006년 정부(교육인적자원부)의 재원으로 한국학술진흥재단의 지원을 받아 수행된 연구(KRF-2006-214-D00164)이며, 그 재정적 지원에 감사드립니다.

참고 문헌

1. Fujino, Y., Soong, T. T. and Spencer Jr., B. F., "Structural control: basic concepts and applications," *Proceedings of the ASCE Structures Congress*, XIV, 1996, pp. 1277-1287.
2. Housner, G. W., Bergman, L. A., Caughey, T. K., Chassiakos, A. G., Claus, R. O., Masri, S. F., Skelton, R. E., Soong, T. T., Spencer Jr., B. F. and Yao, J. T. P., "Structural control: past, present, and future," *Journal of Engineering Mechanics*, ASCE, Vol. 123, No. 9, 1997, pp. 897-971.
3. Spencer Jr., B. F. and Nagarajaiah, S., "State of the art of structural control," *Journal of Structural Engineering*, ASCE, Vol. 129, No. 7, 2003, pp. 845-856.
4. Kwan-Soon Park and Hyun-Moo Koh, "Preference-based optimum design of an integrated structural control system using genetic algorithms," *Advances in Engineering Software*, Vol. 35, No. 2, 2004, pp. 85-94.
5. Kwan-Soon Park, Hyun-Moo Koh and Daegi Hahm, "Integrated optimum design of viscoelastically damped structural systems," *Engineering Structures*, Vol. 26, 2004, pp. 581-591.
6. 박관순, 고현무, 옥승용, "다단계 목표계획법을 이용한 복합구조제어시스템의 통합최적설계", 한국지진공학회 논문집, 제 7권, 제 5호, 2003, pp. 93-102.
7. 옥승용, 박관순, 고현무, "인접구조물의 진동제어를 위한 선형 감쇠시스템의 최적설계", 한국지진공학회 논문집, 제 10권, 제 3호, 2006, pp. 85-100.
8. Kanai, K., "Semi-empirical formula for the seismic characteristics of the ground," *Bulletin of the Earthquake Research Institute*, University of Tokyo, Vol. 35, 1957, pp. 309-325.
9. Tajimi, H., "A statistical method of determining the maximum response of a building structure during an earthquake," *Proceedings of 2nd World Conference on Earthquake Engineering*, Tokyo, Japan, Vol. 2, 1960, pp. 781-897.
10. Chen, C. T., *Linear system theory and design*, New York Oxford, Oxford university press, 1999.
11. Lutes, L. D., and Sarkani, S., *Random vibrations analysis of structural and mechanical systems*, Elsevier, New York, 2004.
12. Rice, S. O., "Mathematical analysis of random noise," *Bell System Technical Journal*, Vol. 24, 1945, pp. 46-156.
13. VanMarcke, E. H., "On the distribution of the first-passage time for normal stationary random processes," *Journal of Applied Mechanics*, ASME, Vol. 42, 1975, pp. 215-220.

14. Cramer, H. and Leadbetter, M. R., *Stationary and related stochastic processes*, Wiley, New York, 1967.
15. Horn, J., Nafploitis, N. and Goldberg, D. E., "A niched Pareto genetic algorithm for multi-objective optimization." *Proceedings of the First IEEE Conference on Evolutionary Computation*, Michalewicz, Z.(editor), IEEE Service Center, Piscataway, New Jersey, 1994, pp. 82-87.
16. Fonseca, C. M. and Fleming, P. J., "An overview of evolutionary algorithms in multi-objective optimization," *Evolutionary Computation*, Vol. 3, No. 1, 1995, pp. 1-16.
17. Srinivas, N. and Deb, K., "Multi-objective function optimization using non-dominated sorting genetic algorithms," *Evolutionary Computation*, Vol. 2, No. 3, 1995, pp. 221-248.
18. Zitzler, E. and Thiele, L., "Multiobjective optimization evolutionary algorithms: a comparative case study and the strength pareto approach," *IEEE Transactions on Evolutionary Computation*, Vol. 3, No. 4, 1999, pp. 257-271.
19. Knowles, J. D. and Corne, D. W., "Approximating the nondominated front using the pareto archived evolutionary strategy," *Evolutionary Computation*, Vol. 8, No. 2, 2000, pp. 149-172.
20. Corne, D. W., Knowles, J. D. and Oates, M. J., "The Pareto envelope-based selection algorithm for multiobjective optimization," *Proceedings of the Parallel Problem Solving from Nature VI Conference*, Paris, France, Lecture Notes in Computer Science, No. 1917, 2000, pp. 839-848.
21. Coello, C. A. C. and Pulido, G. T., "A micro-genetic algorithm for multiobjective optimization," *First International Conference on Evolutionary Multi-Criterion Optimization*, Lecture Notes in Computer Science, No. 1993, 2001, pp. 126-140.
22. Deb, K., Agrawal, S., Pratap, A. and Meyarivan, T., "A fast elitist non-dominated sorting genetic algorithm for multi-objective optimization: NSGA-II," *Proceedings of the Parallel Problem Solving from Nature VI Conference*, Paris, France, Sep. 16-20, 2000, pp. 849-858.
23. Davenport, A. G., "Note on the distribution of the largest value of a random function with application to gust loading," *Proceedings on Institution of Civil Engineers*, Vol. 28, 1964, pp. 187-196.
24. Der Kiureghian, A., "Structural response to stationary excitation," *Journal of the Engineering Mechanics Division*, Vol. 106, No. EM6, 1980, pp. 1195-1211.