

다목적 시스템식별을 이용한 모우드 불확실성이 있는 구조물의 강인 최적 감쇠기 설계

정성운 · 옥승용^{†*} · 박원석^{**} · 고현무^{***}

(주)유신 건설기술연구소 · *한경대학교 안전공학과

^{**} 서울대학교 교량설계핵심기술연구단 · ^{***} 서울대학교 건설환경공학부

(2011. 11. 1. 접수 / 2012. 2. 14. 채택)

Robust Optimal Damper Design of Structures with Modal Uncertainty Using Multi-Objective System Identification

Seongwoon Jeong · Seung-Yong Ok^{†*} · Wonsuk Park^{**} · Hyun-Moo Koh^{***}

Yooshin Engineering Corporation, Institute of Engineering Technology

^{*}Department of Safety Engineering, Hankyong National University

^{**}Korea Bridge Design and Engineering Research Center, Seoul National University

^{***}Department of Civil and Environmental Engineering, Seoul National University

(Received November 1, 2011 / Accepted February 14, 2012)

Abstract : This paper proposes a robust damper design technique for adjacent structures against model uncertainty. This approach introduces multi-objective optimization based system identification using measurement information which enables reasonable selection of the perturbation range in the robust design. Moreover, in order to improve the numerical efficiency in sampling the structural models required for the robust design of large structures, we define new objective functions which enable us to minimize the number of candidate models suitable to the purpose of the robust design. In addition, the performance index is newly employed to evaluate the robust performance of the sampled structural models, and the robust design has been performed according to the performance index. As a numerical example to demonstrate the efficiency of the proposed method, 5-story and 10-story two adjacent buildings are taken into account, and the existing and newly proposed robust design approaches are compared with each other. The results demonstrate that the proposed approach can guarantee more robust damper system only using small number of samples of the structural models because of using the measurement information which leads to improvement in the numerical efficiency, compared with the existing robust design methods.

Key Words : adjacent structures, robust design, damper, system identification, multi-objective optimization, modal uncertainty

1. 서론

지진시 인접한 구조물간 충돌(pounding)은 구조물의 안전성에 지대한 영향을 준다. 상대적 거동의 제어를 위하여 인접한 구조물 사이에 에너지 소산장치를 연결함으로써(coupling) 제어 목적을 달성하는 방법이 1972년 Klein et al.¹⁾에 의하여 처음으로 제시되었으며, 이후 인접구조물간 감쇠기에 대한 다양한 연구가 진행되어 오고 있다.

인접구조물간 감쇠기는 충돌 제어효과 뿐만 아니라, 단일 구조물에 설치하는 감쇠기에 비하여 적은 감쇠용량으로도 큰 제어효과를 얻을 수 있는 장점이 있다²⁾. 일반적으로 단일 구조물에 대한 감쇠기의 경우 큰 감쇠용량을 많이 사용할수록 더 큰 진동제어 효과가 있지만, 인접 구조물간 감쇠기의 경우에는 특정 감쇠용량에서 최대의 진동제어효과가 나타난다³⁾. 즉, 최적의 감쇠용량이 존재한다. 따라서 여러 불확실성에 대하여 감쇠 성능의 강인성을 보장하기 위해 감쇠계수를 증가시키는 것은 인접 구조물간 진동제어문제에서는 부적절하며, 별도의 강인 감쇠기

[†] To whom correspondence should be addressed.
syok@hknu.ac.kr

설계기법이 필요하다.

인접구조물간 감쇠기의 강인설계를 위해 이 연구에서는 모델 파라미터의 변동범위(perturbed range) 가정을 기반으로 하는 강인설계방법을 다룬다. 이 방법에서는 첫 단계에서 모우드 불확실성을 표현하는 파라미터의 변동범위 내에서 적절한 표본을 추출하는 후보모델을 선정하고, 두 번째 단계에서 다양한 감쇠기를 후보모델들에 적용 및 평가하여 감쇠기의 최적 감쇠계수를 결정한다.

모델 파라미터 변동범위 가정기반의 강인설계를 위해서는 변동범위의 합리적인 선정이 중요하다. 너무 좁은 변동범위를 고려한다면 발생 가능한 불확실성의 범위를 충분히 포함하지 못하게 되며, 변동범위를 너무 넓게 고려한다면 불확실성에 대한 안전성은 보장할 수 있으나, 필요이상의 자원을 소비하여 비용효율성 측면에서 단점을 갖게 된다.

따라서 이 연구에서는 합리적인 변동 범위 설정 방법으로서 계측정보와 계측오차를 이용하는 방법을 제시하고, 강인설계의 목적에 맞는 모델을 식별하는 시스템식별(system identification)법을 사용하여 불확실성 파라미터의 증가에 따른 표본 수 및 수치연산 시간 증가 문제를 개선하는 강인설계기법을 제시한다. 또한, 층간변위 제어 및 가속도 제어와 같이 서로 상충하는 설계목적에 대한 강인설계를 위하여 다목적 최적화 기반의 시스템식별 기법을 도입하였다. 수치예제를 통하여 제안하는 방법의 타당성 및 효율성을 검증하였다.

2. 강인설계를 위한 다목적 최적화 기반 시스템 식별

2.1. 계측정보를 이용한 모델 변동범위 설정

일반적으로 계측정보는 계측정보와의 오차가 가장 작은 하나의 모델(fittest model)을 검색하는 최적화에 기반한 시스템식별을 수행하는 것으로 활용되며⁴⁾, 계측 정보에 가장 잘 맞는 하나의 모델을 결과로 얻게 된다. 하지만 계측정보 역시 오차가 존재하며, 더구나 구조물의 물성치는 온도변화 등 다양한 이유로 인하여 시간에 따라 변화할 수밖에 없다⁵⁾. 이는 곧 아무리 정확한 구조물 모델을 정의하고자 하더라도 모델불확실성은 항상 존재함을 의미한다. 따라서 본 연구의 목적 하에서 계측정보를 가장 잘 반영하는 하나의 모델을 구하는 시스템식별 기법은 적절치 않다. 대신 강인설계에 필요한 것은 Fig. 1과 같이 계측정보에 잘 맞는 동시에 모델의 변동까지

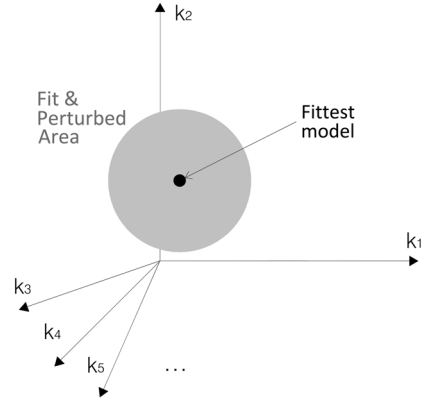


Fig. 1. Fit and Perturbed area from measured data.

고려한 변동범위(fit and perturbed area)이다.

이를 위하여 이 연구에서는 다음 식 (1)-(2)와 같은 제한조건의 형태로 계측정보를 이용한 최적화 문제를 구성한다.

$$PF_{freq} = 10^9 \times \max \left(0, \sum_k \left(\frac{\omega_k^e(\mathbf{x}) - \omega_k^m}{\omega_k^m} \right)^2 - \epsilon \right) \quad (1)$$

$$PF_{mode} = 10^9 \times \max \left(0, \sum_k \left\| \frac{\phi_k^e(\mathbf{x}) - \phi_k^m}{\phi_k^m} \right\| - \epsilon \right) \quad (2)$$

여기서 ϵ 은 계측오차, 계측정보의 제한, 모델링 에러 등 모든 불확실성 요인들을 고려한 허용오차이다. ω^e 와 ω^m 은 각각 고유진동수의 예측값과 계측값이며, ϕ^e 와 ϕ^m 은 각각 모우드형상의 예측값과 계측값이다. k 는 모우드의 차수를 의미한다. 즉, PF_{freq} 와 PF_{mode} 는 각각 고유진동수와 모우드형상 대하여 허용오차 ϵ 미만의 오차에 대해서는 0을, 허용오차 ϵ 이상의 오차에 대해서는 10^9 를 반환하도록 하는 Penalty Function이다. 따라서 식 (1), (2)는 뒤에서 정의될 최적화 문제에서 제한조건으로 정의되며, 이는 계측정보와의 오차가 허용오차 ϵ 미만인 변동범위 내의 모델 영역(fit and perturbed area)을 추출할 수 있도록 한다. 허용오차 ϵ 는 계측장비 특성, 구조물 물성치의 변화 경향 등 각 불확실성 요인들로부터 정해지는 값이며, 설계의도에 따라 일정범위를 가정하게 된다.

2.2. 다목적최적화 기반 시스템식별의 정식화

정의된 모델 변동범위에서 Latin Hypercube Sampling(LHS)이나 Corner Value Sampling(CVS)과 같은

표본추출 방법을 사용하면 모델 파라미터의 개수가 많은 경우 과도한 표본 수와 그에 따른 과도한 계산량을 야기한다. 이를 해결하기 위해서는 변동범위 내에서의 표본추출과 성능평가 과정을 통합함으로써 성능저하가 가장 큰 모델(worst case model)만을 검색할 수 있는 방법이 필요하다. 이때 성능평가를 위해서는 안전성(safety)을 나타내는 층간변위(inter-story drift) 응답과 사용성(serviceability)을 나타내는 가속도(acceleration) 응답을 고려할 수 있다. 이들 두 응답은 모델 파라미터의 변동에 대해서 상충하는 경향을 보인다. 예를 들어, 층간변위 응답의 경우 구조물의 강성이 증가함에 따라 감소하는 경향이 있지만, 가속도 응답은 반대로 증가하는 경향이 있다. 이렇게 서로 상충하는 응답을 동시에 고려하기 위해서 구조물의 성능을 다음 다목적 최적화 문제로 구성하였다.

$$\min \begin{cases} F_1 = \frac{1}{\max \sum_j (\Delta u_j(\mathbf{x}))} + PF_{freq} + PF_{mode} \\ F_2 = \frac{1}{\max \sum_j (\ddot{u}_j(\mathbf{x}))} + PF_{freq} + PF_{mode} \end{cases} \quad (3)$$

여기서, $\max \sum_j (\Delta u_j(\mathbf{x}))$ 와 $\max \sum_j (\ddot{u}_j(\mathbf{x}))$ 는 모든 자유도 j 에 대한 층간변위 주파수응답함수의 합의 최댓값과 가속도 주파수응답함수의 합의 최댓값이다. PF_{freq} 및 PF_{mode} 는 식 (1), (2)와 같다. 식 (3)의 시스템식별과정을 통하여 계측정보와의 허용오차 ϵ 을 넘지 않는 모델집합(fit and perturbed area) 중에서 가장 큰 층간변위와 가속도 응답을 주는 worst case model을 추출할 수 있다.

2.3. 다목적 최적화기법

식 (3)과 같이 서로 상충하는 목적함수에 대한 다목적 최적화 문제의 해는 하나의 값으로 결정되지 않고, 파레토 최적해집합(Pareto-optimal solution set)으로 알려진 다수 해들의 집합으로 주어진다⁶⁾. 해집합을 얻는 방법으로 이 연구에서는 가장 널리 사용되고 있는 방법 중의 하나인 NSGA-II 알고리즘⁷⁾을 차용하였으며, 이를 포함한 강인설계를 위한 다목적 최적화 기반 시스템식별의 순서도를 Fig. 2에 제시하였다. 먼저 구조물로부터 고유진동수 ω^m 와 모우드형상 ϕ^m 을 계측하고, 구조물 모델의 초기값들로 구성된 초기 개체 집합 X_1 을 생성한다. 각각의

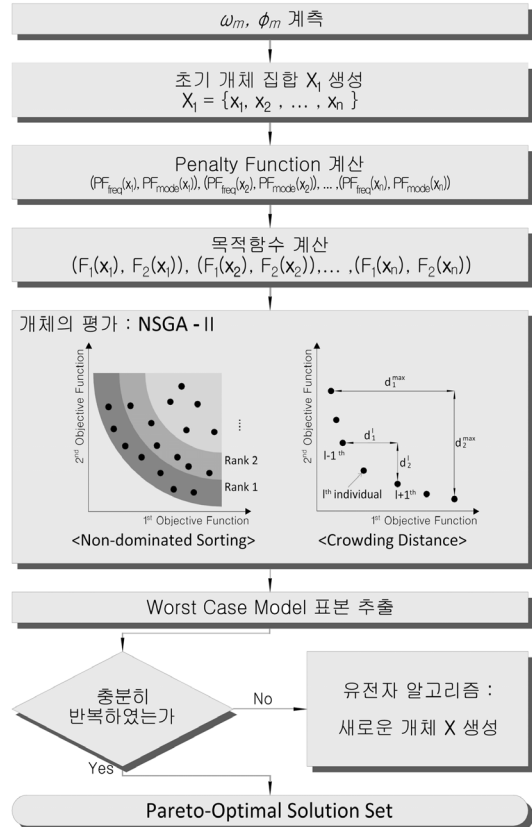


Fig. 2. Multi-Objective Optimization based System identification for robust design.

개체들로부터 예측된 고유진동수 ω^e 와 모우드형상 ϕ^e 를 이용하여 식 (3)의 목적함수를 계산함으로써 계측정보와의 오차가 ϵ 미만인 개체들 중에서 성능이 가장 좋지 않은 모델을 추출하게 된다. 위 과정을 통하여 한 세대내의 worst case model을 추출하고, 유전자 알고리즘을 사용하여 새로운 개체 집합 X 를 생성한다. 이 과정을 개체들이 수렴할 때까지 반복하면 최종적으로 파레토 최적해 집합을 얻는다. 이렇게 도출되는 해집합은 현재 구조물의 상태를 나타내는 응답의 계측정보에 부합하는 모델들 중에서 불확실성에 따른 변동범위(ϵ) 내에 존재하며, 변위 및 가속도응답이 가장 큰, 즉 성능저하가 가장 큰 구조물모델들이 된다.

3. 감쇠기로 연결된 인접구조물의 응답해석

3.1. 감쇠기 연결된 인접구조물의 운동방정식

Fig. 3과 같은 전단건물 형식의 인접구조물에 대하여 감쇠기 설치 전 왼쪽 구조물의 운동방정식은

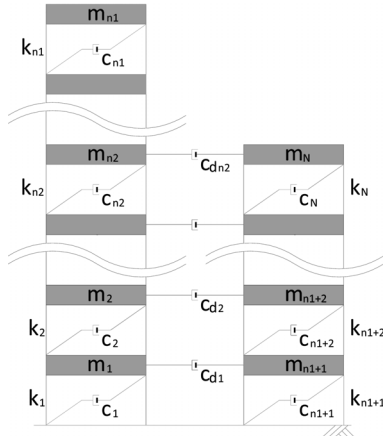


Fig. 3. Robust damper between adjacent structures.

식 (4)로, 오른쪽 구조물의 운동방정식은 식 (5)로 표현된다.

$$\mathbf{M}_1 \ddot{u}_1 + \mathbf{C}_1 \dot{u}_1 + \mathbf{K}_1 u_1 = -\mathbf{M}_1 \mathbf{E}_1 \ddot{u}_g \quad (4)$$

$$\mathbf{M}_2 \ddot{u}_2 + \mathbf{C}_2 \dot{u}_2 + \mathbf{K}_2 u_2 = -\mathbf{M}_2 \mathbf{E}_2 \ddot{u}_g \quad (5)$$

Fig. 3에서 왼쪽 구조물의 자유도는 n_1 , 오른쪽 구조물의 자유도는 n_2 , 총 자유도는 $N (= n_1 + n_2)$ 이며, m_i, k_i, c_i 는 각 자유도에서의 질량, 층간감쇠계수, 층간강성이다. 식 (4), (5)에서 $\ddot{u}_1, \dot{u}_1, u_1$ 및 $\ddot{u}_2, \dot{u}_2, u_2$ 는 각 구조물의 가속도, 속도, 변위 벡터이며, $\mathbf{M}_1, \mathbf{M}_2$ 및 $\mathbf{K}_1, \mathbf{K}_2$ 는 각 구조물의 질량 및 강성행렬이다. $\mathbf{E}_1, \mathbf{E}_2$ 는 지진 하중에 대한 위치벡터로 각각 $[n_1 \times 1], [n_2 \times 1]$ 크기의 1로만 이루어진 벡터이며, \ddot{u}_g 는 입력지반가속도이다. 감쇠행렬 \mathbf{C}_1 은 다음 식 (6), (7)과 같이 모우드값으로부터 얻을 수 있으며, 오른쪽 구조물에 대해서도 동일한 과정을 통하여 \mathbf{C}_2 를 얻을 수 있다⁸⁾.

$$(\mathbf{K}_1 - \omega_k^2 \mathbf{M}_1) \phi_k = 0 \quad (6)$$

$$\mathbf{C}_1 = \mathbf{M}_1 \left(\sum_{k=1}^{n_1} \frac{2\xi_k \omega_k}{\phi_k^T \mathbf{M}_1 \phi_k} \phi_k \phi_k^T \right) \mathbf{M}_1 \quad (7)$$

각 구조물을 보강 감쇠기로 연결한 시스템의 운동방정식은 식 (8)과 같이 표현된다.

$$\mathbf{M} \ddot{u} + (\mathbf{C} + \mathbf{C}_d) \dot{u} + \mathbf{K} u = -\mathbf{M} \mathbf{E} \ddot{u}_g \quad (8)$$

여기서, \ddot{u}, \dot{u}, u 는 전체 구조물의 가속도, 속도, 변위 벡터이며, \mathbf{E} 는 $[N \times 1]$ 크기의 1로만 이루어진 벡터이다. $\mathbf{M}, \mathbf{C}, \mathbf{K}$ 는 각각 전체 구조물의 질량, 감쇠, 강성행렬이며, \mathbf{C}_d 는 보강 감쇠기에 의한 감쇠행렬이다. 각 행렬들은 식 (9)-(12)로 정의된다.

$$\mathbf{M} = \begin{bmatrix} \mathbf{M}_1 & [\mathbf{0}]_{n_1 \times n_2} \\ [\mathbf{0}]_{n_2 \times n_1} & \mathbf{M}_2 \end{bmatrix} \quad (9)$$

$$\mathbf{C} = \begin{bmatrix} \mathbf{C}_1 & [\mathbf{0}]_{n_1 \times n_2} \\ [\mathbf{0}]_{n_2 \times n_1} & \mathbf{C}_2 \end{bmatrix} \quad (10)$$

$$\mathbf{K} = \begin{bmatrix} \mathbf{K}_1 & [\mathbf{0}]_{n_1 \times n_2} \\ [\mathbf{0}]_{n_2 \times n_1} & \mathbf{K}_2 \end{bmatrix} \quad (11)$$

$$\mathbf{C}_d = \begin{bmatrix} [\mathbf{c}_d]_{n_2, n_2} & [\mathbf{0}]_{n_2 \times (n_1 - n_2)} & -[\mathbf{c}_d]_{n_2, n_2} \\ [\mathbf{0}]_{(n_1 - n_2) \times n_2} & [\mathbf{0}]_{(n_1 - n_2) \times (n_1 - n_2)} & [\mathbf{0}]_{(n_1 - n_2) \times n_2} \\ -[\mathbf{c}_d]_{n_2, n_2} & [\mathbf{0}]_{n_2 \times (n_1 - n_2)} & [\mathbf{c}_d]_{n_2, n_2} \end{bmatrix} \quad (12)$$

식 (12)에서 $[\mathbf{c}_d]_{n_2, n_2}$ 는 각 자유도에 연결된 감쇠기의 감쇠계수로 구성되는 대각행렬이다. 이 연구에서는 설치된 감쇠기의 층별 감쇠계수가 모두 동일한 시스템만을 다루도록 한다.

3.2. 주파수응답함수의 계산

이 연구에서는 감쇠기 최적설계를 위한 성능지수로서 주파수응답을 고려하였다. 감쇠기로 연결된 인접구조물의 주파수응답함수를 구하기 위하여 식 (8)로 표현되는 운동방정식을 상태공간방정식으로 변환한다. 우선 구조물의 변위와 속도 벡터를 식 (13)과 같은 하나의 상태벡터 z 로 표현할 수 있다.

$$z = \begin{bmatrix} u \\ \dot{u} \end{bmatrix} \quad (13)$$

상태벡터 z 를 이용하여 식 (8)의 운동방정식을 상태공간방정식으로 변환하면 식 (14), (15)와 같다.

$$\dot{z} = \mathbf{A}_s z + \mathbf{B}_w \ddot{u}_g \quad (14)$$

$$y = \mathbf{C}_y z + \mathbf{D}_w \ddot{u}_g \quad (15)$$

여기서 \mathbf{A}_s 와 \mathbf{B}_w 는 각각 시스템행렬과 하중위치행렬이며, \mathbf{C}_y 와 \mathbf{D}_w 는 출력행렬을 의미하고, y 는 정의

된 출력행렬로부터 얻어지는 출력벡터로서 계산하고자 하는 구조물의 응답에 상응한다. 지반운동에 대한 감쇠기로 연결된 두 구조물의 층간변위 응답 및 가속도 응답을 구하기 위한 상태공간방정식의 각 행렬은 식 (16)~(19)로 정의된다.

$$A_s = \begin{bmatrix} [0]_{N \times N} & I \\ -M^{-1}K & -M^{-1}C \end{bmatrix} \quad (16)$$

$$B_w = \begin{bmatrix} [0]_{N \times 1} \\ -E \end{bmatrix} \quad (17)$$

$$C_y = \begin{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 & & \\ -1 & 1 & \\ & \ddots & \end{bmatrix} [0]_{n_1 \times n_2} & [0]_{N \times N} \\ [0]_{n_2 \times n_1} \begin{bmatrix} 1 & & \\ -1 & 1 & \\ & \ddots & \end{bmatrix} & \\ -M^{-1}K & -M^{-1}C \end{bmatrix} \quad (18)$$

$$D_w = [0]_{2N \times 1} \quad (19)$$

한편, 계산된 A_s , B_w , C_y , D_w 로부터 주파수응답함수(frequency response function) $F(\omega)$ 는 식 (20)과 같이 결정되며, 이로부터 주파수 영역에서의 두 인접 구조물의 층간변위 응답과 가속도 응답을 얻을 수 있다³⁾.

$$F(\omega) = C_y(i\omega I - A_s)^{-1} B_w + D_w \quad (20)$$

3.3. 성능지수의 정의 및 감쇠기 최적설계

강인 감쇠기 설계를 위해서는 2장에서 제시한 방법을 통하여 추출한 다양한 모델 표본에 대하여 식 (20)의 주파수 응답의 최댓값을 평가할 필요가 있으며, 다양한 표본 모델에 대하여 변동의 폭이 가장 작으면서 응답 자체의 크기도 더욱 작게 반환하는 감쇠계수가 가장 강인한 감쇠기의 설계값이 될 것이다.

한편, 각각의 응답별로 우선순위를 두어 설계자가 원하는 성능에 좀 더 초점을 맞출 수 있도록 식 (21)~(25)와 같은 성능지수(performance index)를 도입한다.

$$J(c_d) = \sum_{i=1}^4 \lambda_i J_i(c_d) \quad (21)$$

$$J_1(c_d) = \sum_j \frac{\max \Delta u_1(c_d)}{\text{mean } \Delta u_1(0)} \quad (22)$$

$$J_2(c_d) = \sum_j \frac{\max \ddot{u}_1(c_d)}{\text{mean } \ddot{u}_1(0)} \quad (23)$$

$$J_3(c_d) = \sum_j \frac{\max \Delta u_2(c_d)}{\text{mean } \Delta u_2(0)} \quad (24)$$

$$J_4(c_d) = \sum_j \frac{\max \ddot{u}_2(c_d)}{\text{mean } \ddot{u}_2(0)} \quad (25)$$

식 (21)의 $J(c_d)$ 는 감쇠계수 c_d 의 감쇠기 적용시 모든 성능지수의 가중 합을 의미하며, 식 (22)~(25)는 각각 구조물 1의 층간변위, 가속도, 구조물 2의 층간변위, 가속도에 대한 성능지수이다. j 는 구조물의 자유도를 나타낸다. 성능지수는 Fig. 2의 과정을 통해 구한 후보모델들을 조합하여 만든 모델쌍에 감쇠계수 c_d 를 적용하고, 모델쌍-감쇠계수 조합에 발생하는 최대응답(max $\Delta u_1(c_d)$ 등)을 감쇠기 미적용시의 평균응답(mean $\Delta u_1(0)$ 등)으로 나누어 정규화한 값으로 정의하였다. 따라서 다양한 모델쌍의 적용에도 성능지수 $J(c_d)$ 의 변동폭과 변동의 최댓값이 작을수록 더욱 강인한 감쇠기라 판단할 수 있다. 식 (21)의 λ_i 는 각 성능지수에 대한 가중치로 특정 성능에 대한 가중치를 증가시킴으로써 그 성능에 더 민감한 성능지수 계산 결과를 얻을 수 있게 하며, 1개의 모델쌍-감쇠계수 조합을 1개의 성능지수로 평가할 수 있게 해준다.

강인 감쇠기 설계 과정을 정리하면 다음과 같다. 우선, 시스템식별을 통하여 각 구조물의 후보모델집합을 구한 뒤 이를 조합하여 후보 모델 쌍들을 생성한다. 다음으로 하나의 감쇠용량 c_d 를 가정한 뒤 이를 모든 모델 쌍들에 적용하고 성능지수 $J(c_d)$ 를 모두 계산한다. 주어진 c_d 에 대하여 계산된 성능지수집합의 변동폭과 최댓값이 작게 유지되는 감쇠계수 c_d 가 강인한 감쇠기의 조건이 된다. 이 과정을 다양한 감쇠계수에 동일하게 적용하여 비교하고, 그 중 가장 강인한 감쇠계수 c_d 를 강인 감쇠기로 결정함으로써 설계가 완료된다.

4. 수치예제

수치예제에서는 본 연구에서 제안한 강인 감쇠

기 설계방법과 기존 표본추출방법인 LHS 및 CVS 에 기반한 강인설계기법의 비교를 통하여 제안하는 방법의 타당성을 검증하였다. 우선, 충분한 양의 표본을 추출할 수 있어 기존 표본추출방법으로도 강인 설계가 가능할 만큼 작은 자유도의 구조물에 대한 수치예제를 수행하였으며, 이를 통하여 기존 기법과의 강인성 보장능력을 비교하였다. 다음으로 충분한 양의 표본추출이 어려워 기존 방법에서의 강인설계가 어려운 많은 자유도의 구조물에 대한 수치예제를 통하여, 자유도가 많은 대형 구조물에서도 제시하는 방법이 적은 수의 모델(worst case model) 표본만을 가지고도 강인한 설계 결과를 제공함을 확인하였다.

두 예제 모두 수치예제를 위한 가정으로 불확실성을 지닌 파라미터로는 층간강성 k 만을 고려하였으며, 계측정보 허용오차 ϵ 은 $\pm 10\%$ 로 하였다. 한편 기존 표본추출 방법에서도 제안하는 방법과 동일한 변동범위에서 표본을 추출할 수 있도록, 정해의 층간강성으로부터 $-19\% \sim +21\%$ 의 범위를 층간강성의 변동범위로 정하여 ϵ 의 허용오차와 증가화 하였다. 계측정보는 각 구조물의 1차 모우드 고유진동수 및 모우드형상으로 정의하였다. 구조물의 층간변위 제어에 더 중점을 둔 설계를 목적으로 하여, 식 (30)의 성능지수 가중치는 각각 $\lambda_1=0.4, \lambda_2=0.1, \lambda_3=0.4, \lambda_4=0.1$ 로 설정하였다.

4.1. 5층 전단빌딩이 인접한 경우

첫 번째로 다룰 수치예제는 2개의 5층 전단건물을 연결하는 감쇠기 설계 예제이다. 구조물의 정해모델은 Table 1과 같다.

이때 주의할 점은 실제 과정에서는 Table 1의 정해모델은 알 수 없다는 점이다. 설계자가 알 수 있는 정보는 계측정보로서, 고유진동수 및 모우드형상과 구조물의 자유도 구성 정보뿐이다.

주어진 모우드정보와 자유도 정보를 이용, 계측 정보와의 허용오차 ϵ 을 만족하면서도 층간변위 및 가속도가 가장 크게 발생하는 worst case model들을 식 (3)의 목적함수를 이용하여 검색할 수 있으며, 본

Table 1. Properties of 5 DOF - 5 DOF structures

	구조물 1	구조물 2
층질량(kg)	12×10^5	12×10^5
층간강성(N/m)	5×10^8	12×10^8
층간감쇠비	0.02	0.02
1차 모우드의 고유진동수(Hz)	0.924	1.432

예제에 적용한 목적함수를 식 (26)에 구체적으로 나타내었다.

$$\min \begin{cases} F_1(\mathbf{x}) = \left[\max_{\omega} \left\{ \sum_{j=1}^5 \Delta U_j(\mathbf{x}, \omega) \right\} \right]^{-1} + PF_{\omega} + PF_{\phi} \\ F_2(\mathbf{x}) = \left[\max_{\omega} \left\{ \sum_{j=1}^5 \ddot{U}_j(\mathbf{x}, \omega) \right\} \right]^{-1} + PF_{\omega} + PF_{\phi} \end{cases} \quad (26)$$

여기서, \mathbf{x} 는 표본의 물성치, ω 는 주파수를 의미한다. j 는 1층부터 5층까지의 자유도를, ΔU_j 와 \ddot{U}_j 는 각각 층간변위와 가속도의 주파수응답함수를 의미한다.

$$\left\{ \sum_{j=1}^5 \Delta U_j(\mathbf{x}, \omega) \right\} \text{와} \left\{ \sum_{j=1}^5 \ddot{U}_j(\mathbf{x}, \omega) \right\}$$

각각 주파수 ω 에서 모든 자유도 $j(j=1, 2, \dots, 5)$ 에 대한 층간변위 주파수응답값들의 합과 가속도 주파수응답값들의 합을 나타낸다. 식 (26)에서의 PF(Penalty Function)는 식 (27), (28)과 같이 1, 2차 모우드 정보를 이용하도록 정의하였다.

$$PF_{\omega} = \sum_{k=1}^2 \left\{ 10^9 \times \max \left(0, \left(\frac{\omega_k^{\epsilon}(\mathbf{x}) - \omega_k^m}{\omega_k^m} \right)^2 - \epsilon \right) \right\} \quad (27)$$

$$PF_{\phi} = \sum_{k=1}^2 \left\{ 10^9 \times \max \left(0, \left\| \frac{\overline{\phi_k^{\epsilon}(\mathbf{x})} - \overline{\phi_k^m}}{\overline{\phi_k^m}} \right\| - \epsilon \right) \right\} \quad (28)$$

여기서, k 는 1, 2차의 모우드를 나타내며, ω_k^{ϵ} 와 ω_k^m 은 고유진동수의 예측값과 계측값을, ϕ_k^{ϵ} 와 ϕ_k^m 은 각각 모우드형상벡터의 예측값과 계측값을 나타낸다. $\overline{\phi_k^{\epsilon}} = \phi_k^{\epsilon} / (\phi_k^{\epsilon} M \phi_k^{\epsilon})$, $\overline{\phi_k^m} = \phi_k^m / (\phi_k^m M \phi_k^m)$ 는 정규화된 모우드형상이다.

유전자 연산과정에 있어서 개체(Population)는 50개, 파레토 해집합으로 얻어지는 모델은 총 20개가 되도록 하였다. 총 1000세대(Generation)의 반복연산 시 해가 충분히 수렴하였음을 확인하였다. 결과로서 빌딩 1에 대한 Pareto 최적해를 Fig. 4에 나타내었다. 얻어진 해는 정해로 구한 목적함수와는 차이가 있으나, 가정된 허용오차 범위 내에서 변위 및 가속도 응답성능이 가장 좋지 않은 모델(worst case model)들을 검색하고 있다.

각 구조물에 대해 얻어진 20개씩의 해(빌딩 1과 빌딩 2)들을 조합하여 총 400개의 모델쌍을 만들고, 모델쌍들에 대하여 다양한 감쇠계수 c_d 를 적용, 식 (21)의 성능지수를 계산한다. 각 감쇠계수에 대하여

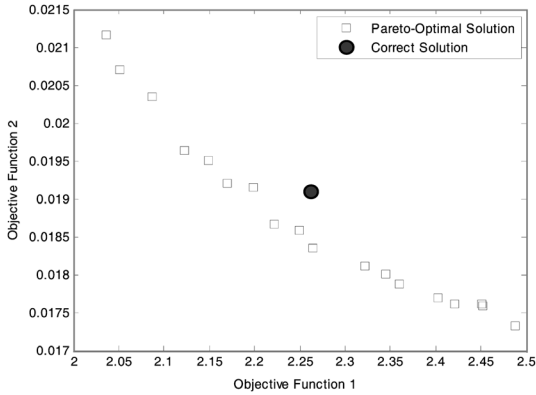


Fig. 4. Pareto-Optimal Solution of Structure 1.

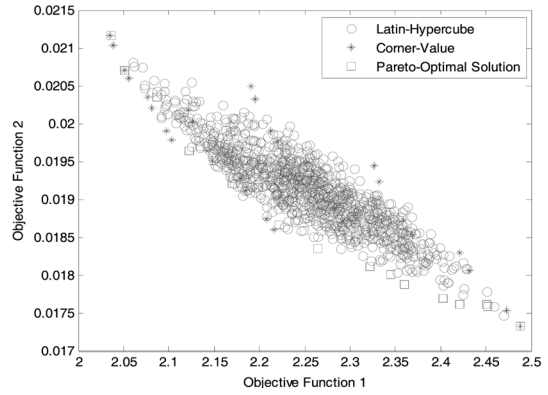


Fig. 6. Comparison of 5 DOF structure 1's samples selected by each method.

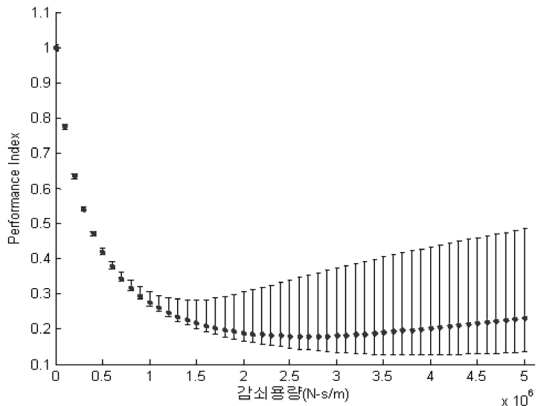


Fig. 5. Performance index.

계산한 성능지수의 산정결과를 Fig. 5에 나타내었다. 성능지수($J(c_d)$)는 400개 모델쌍에 대한 변동범위 및 평균값으로 도시하였다. 결과로부터 변동범위의 최댓값이 최소가 되는 감쇠계수 1.5×10^6 (N-s/m)를 최적으로 결정하였다.

제시한 강인설계방법을 표본추출방법을 사용한 설계방법과 비교하였다. 추출방법으로서 Corner Value Sampling(CVS)법과 Latin Hypercube Sampling을 고려하였다. CVS기법은 각 구조물당 5개의 불확실 파라미터에 대하여 32개의 표본을 추출하였다. LHS으로는 충분한 검색을 위하여 1,000개의 표본을 추출하였다. 각 방법에 따른 모델(worst case model) 검색능력의 비교를 위하여 추출한 표본들로 목적함수를 계산하여 목적함수 공간상에 도시한 결과를 Fig. 6에 나타내었다.

Fig. 6에서 LHS를 통하여 검색한 1,000개의 표본의 경우 파레토 최적해와 비교해보았을 때, 많은 수의 표본에도 불구하고 worst case를 잘 검색하지 못하였다. CVS로 얻은 표본들의 경우 비교적 적은 수

Table 2. Designed damper of each method for 5 DOF-5 DOF structures

	제안 방법	CVS	LHS400	LHS2500
모델쌍개수	400	1024	400	2500
감쇠계수(N-s/m)	1.5×10^6	1.5×10^6	2.4×10^6	1.9×10^6

의 표본으로도 worst case들을 잘 검색하기는 하지만, 목적함수가 상충하는 일부구간 (x축 2.25~2.45 구간)에서는 worst case model을 잘 검색하지 못하였다. 이에 반해 제안하는 다목적 최적화 기반 시스템 식별 기법을 통한 모델추출이 성능저하가 큰 모델들을 보다 효율적으로 검색하는 결과를 확인하였다.

설계방법의 강인성 비교를 위하여 각 설계결과를 CVS, LHS 등으로 추출한 모델쌍들에 적용해 보도록 한다. Table 2에 각 방법별 모델쌍의 개수와 최적 감쇠계수를 나타내었다.

모델 변화에 따른 제안하는 방법과 LHS400에 의한 구조물 1, 2의 중간변위, 가속도 최댓값의 변동범위가 Fig. 7~10에 비교되어 있다. 또, LHS2500에 대한 비교는 Fig. 11, 12에 나타내었다. Fig. 7~10에서 최댓값의 변동범위가 작을수록 강인한 설계결과를 의미하며, 변동범위 사이의 원형 표식은 변동의 평균값을 의미한다.

Fig. 7, 8에서 중간변위 변동의 평균값은 제안하는 방법으로 설계 시 LHS400의 설계결과보다 다소 크게 발생하나, 변동범위는 대부분의 응답들에서 더 작은 강인한 설계 결과를 제공함을 확인할 수 있다. 작은 가중치를 부여한 가속도의 변동범위 비교는 Fig. 9, 10과 같으며, 이 경우에도 제안하는 방법이 LHS 400에 비하여 강인한 제어능력을 보임을 확인할 수 있다. 이는 비록 좀 더 낮은 가중치를 적용하긴 하였

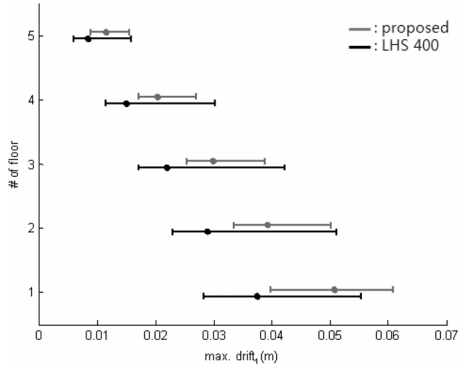


Fig. 7. 5 DOF structure 1's perturbation range of maximum drift by LHS 400.

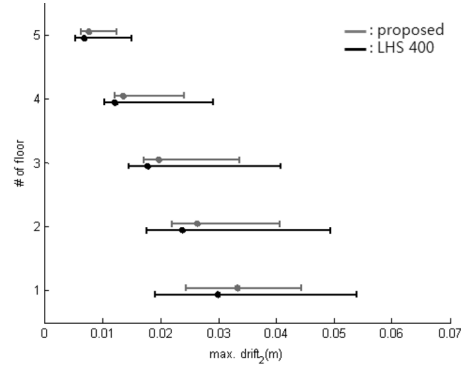


Fig. 8. 5 DOF structure 2's perturbation range of maximum drift by LHS 400.

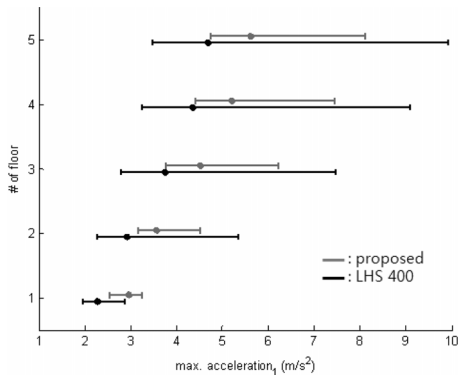


Fig. 9. 5 DOF structure 1's perturbation range of maximum acceleration by LHS 400.

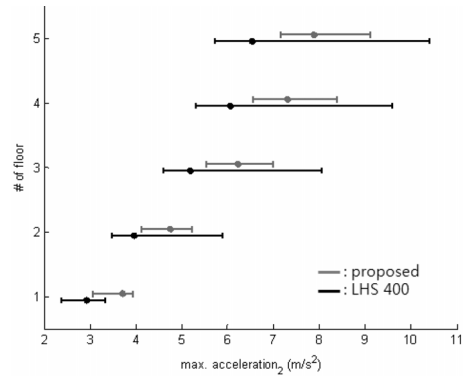


Fig. 10. 5 DOF structure 2's perturbation range of maximum acceleration by LHS 400.

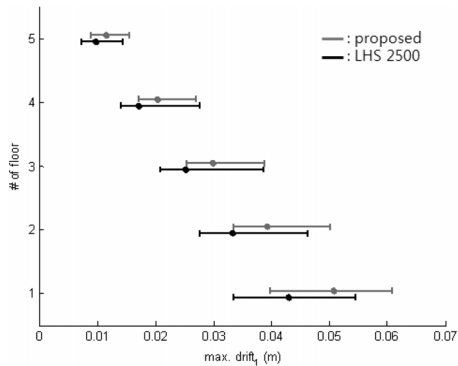


Fig. 11. 5 DOF structure 1's perturbation range of maximum drift by LHS 2500.

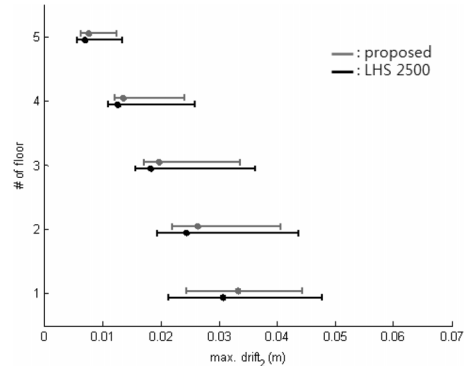


Fig. 12. 5 DOF structure 2's perturbation range of maximum drift by LHS 2500.

으나, 식 (5)의 다목적 최적화 기반 시스템식별 과정에서 가속도에 대해서도 동시에 고려하였기 때문이다.

Fig. 11, 12는 제안하는 방법과 LHS2500으로 설계한 감쇠기의 중간변위 변동범위를 비교한 결과이다.

구조물 1에서는 저층(1, 2층)에서 LHS2500에 의한 설계결과가 응답의 변동폭도 비슷하면서도 최대 응답에서는 더 작은 응답결과를 보임으로써 좋은 성능을 발휘하고 있으나, 구조물 2에서는 다소 성능 변동이 크게 나타남으로써 저하된 강인성능을 보임

을 Fig. 12에서 확인할 수 있다. 따라서 제안하는 방법이 보다 적은 수(400개)의 표본만을 사용하면서도 2500개의 표본을 사용하는 설계와 상응하는 결과를 얻을 수 있음을 확인할 수 있다.

한편, CVS를 이용한 강인설계로부터는 제안하는 방법과 동일한 감쇠설계안을 얻었다. 이는 worst case model이 주로 변동범위의 경계에서 나타나기 때문에 경계값들의 조합을 추출하는 CVS가 worst case model을 잘 검색함을 의미하며, Fig. 6에서 이를 확인할 수 있다. 하지만 CVS는 불확실 파라미터가 증가할수록 추출하여야 할 표본들이 기하급수적으로 늘어나므로, 많은 수의 파라미터가 존재하는 두 번째 예제 구조물과 같은 경우에는 적용이 사실상 어려워진다.

4.2. 10층 전단빌딩이 인접한 경우

두 번째 수치예제는 2개의 10 DOF 전단건물을 연결하는 감쇠기 설계 예제이다. 따라서 설계를 위한 목적함수는 앞서의 식 (26)-(28)과 동일하게 정의되며, 다만 자유도 j 가 1~10까지 정의된다. 본 예제는 총 20개의 자유도를 가지기 때문에 CVS 방법은 $2^{10} = 1024$ 개의 상대적으로 많은 수의 표본을 필요로 하며, 감쇠기 설계 시 필요한 모델쌍은 총 2^{20} 개로 사실상 적용이 불가능하다. 따라서 본 예제에서는 제안하는 방법과 400개 표본을 이용한 LHS400, 2500개 표본을 이용한 LHS2500만을 비교토록 한다. 구조물의 정해모델은 Table 3과 같으며, 4.1절의 예제와 동일한 과정을 거쳐 Table 4와 같은 감쇠기 설계 결과를 얻을 수 있다.

제안하는 방법으로 설계한 감쇠기와 LHS2500으로 설계한 감쇠기의 층간변위 제어능력이 Fig. 13, 14에 비교되어 있다. LHS에 근거한 설계안은 역시 worst case model 검색에 효과적이지 못해 제안하는

Table 3. Properties of 10 DOF – 10 DOF structures

	구조물 1	구조물 2
층질량(kg)	12×10^5	12×10^5
층간강성(N/m)	10×10^8	30×10^8
층간감쇠비	0.02	0.02
1차 모우드의 고유진동수(Hz)	0.687	1.189

Table 4. Designed damper of each method for 10 DOF – 10 DOF structures

	제안 방법	CVS	LHS400	LHS2500
모델쌍 개수	400	2^{20}	400	2500
감쇠계수(N-s/m)	1.7×10^6	-	2.4×10^6	2.0×10^6

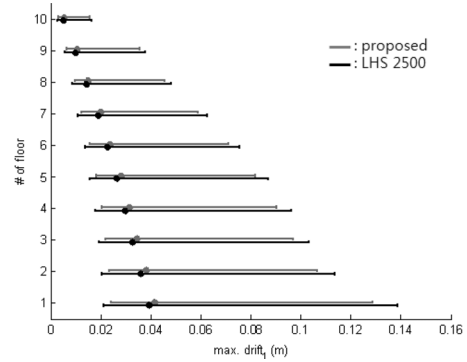


Fig. 13. 10 DOF structure 1's perturbation range of maximum drift by LHS 2500.

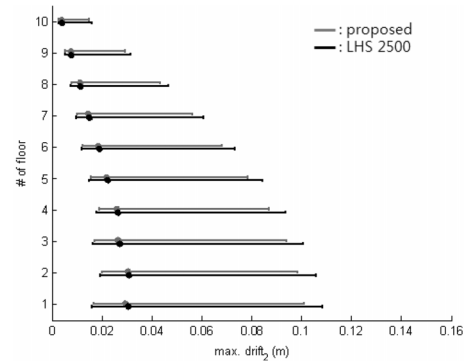


Fig. 14. 10 DOF structure 2's perturbation range of maximum drift by LHS 2500.

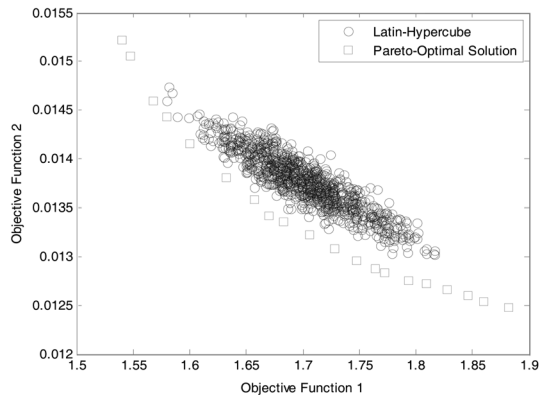


Fig. 15. Comparison of 10 DOF structure 1's samples selected by each method.

방법에 비하여 모우드 불확실성에 따른 성능 변동이 크게 나타남으로써 민감한 시스템임을 확인할 수 있다.

주목할 점은 4.1절의 5 DOF-5 DOF 예제와는 달리, 본 예제에서는 제안하는 방법이 모든 자유도에서 강인한 설계 결과를 나타낸다는 점이다. 이는 LHS방

법이 변동범위 전역에서 고르게 표본을 추출하기는 하지만 worst case model을 제대로 추출하지 못하기 때문이다. 특히 파라미터의 수가 늘어날 경우 worst case model을 추출할 확률은 더욱 낮아지기 때문이다. Fig. 15에서 추출된 표본들을 비교해보면 LHS기법이 worst case model을 충분히 검색하지 못하고 있음을 확인할 수 있다.

이러한 결과로부터 제안하는 방법이 모델의 변동범위 내에서 worst case model들을 효과적으로 검색하고 이를 이용하여 강인설계안을 계산해냄으로써, 기존의 변동범위 설정 및 표본추출 기반 강인설계 기법과 비교하였을 때 적은 수의 표본들로도 강인한 결과를 얻을 수 있음을 확인하였다. 특히, 불확실 파라미터의 개수가 커 기존 방법으로는 충분한 표본 추출이 어려운 경우에도, 제안하는 방법은 제한된 수의 worst case model 표본을 이용하여 더 효율적으로 강인설계안을 계산할 수 있는 수치 효율성이 개선된 강인설계 기법이라 할 수 있다.

5. 결론

이 논문에서는 인접구조물간 감쇠기의 모우드 불확실성에 대한 성능저하를 최소화하기 위한 새로운 강인설계기법을 제시하였다. 이는 구조물의 응답정보를 활용함으로써 강인설계를 위한 합리적인 변동범위를 산정할 수 있도록 한다. 또한, 기존 샘플링 방법들에서는 변동범위와 설계인자의 개수에 따라 구조모델에 대한 샘플링 개수가 기하급수적으로 증가하는 수치적 문제를 가졌으나, 제시하는 방법에서는 다목적 최적화 기반 시스템 식별을 이용하여 성능저하가 가장 큰 구조모델(worst case model)을 검색함으로써, 일정한 개수의 변동 구조모델로도 효과적으로 모우드 불확실성을 고려할 수 있는 수치효율성을 갖도록 하였다. 그리고 검색한 구조모델들로 감쇠기 설계를 수행하기 위하여 성능지수 개념을 도입하였다. 5층 및 10층 인접 구조물에 대한 수치예제에 대하여 기존 방법과 제시하는 방법을 비교하였으며, 비교결과 제안하는 방법이 강인성 보장 측면과 수치 효율성 측면 모두에서 기존 샘플링 기반의 강인설계 기법에 비하여 우수한 결과를 제공함을 확인하였다. 제시하는 방법은 인접한 구조물의 안전성을 향상시키는 보강방안이므로, 인접하는 형식의 다양한 구조물 또는 시설물에도 진동성능 개선방안으로 활용가능하다는 장점을 가진다.

감사의 글 : 이 논문의 두 번째 저자는 경기도의 경기도지역협력연구센터(GRRC)사업[(GRRC한경 2011-A02), 에너지 저감에 따른 물류시설 및 설비의 안정성 및 신뢰성 연구]의 일환으로 지원을 받았기에 이에 감사드립니다.

참고문헌

- 1) Klein, R. E., Cusano, C. and Stukel, J., "Investigatin of a method to stabilize wind induced oscillations in large structures", Paper No. 72-WA/AUT-H Presented at 1972 ASME Winter Annual Meeting, New York, November, 1972.
- 2) Luco, J. E. and De Barros, F. C. P., "Optimal damping between two adjacent elastic structures", Earthquake Engineering and Structural Dynamics, Vol. 27, No. 7, pp. 649~659, 1998.
- 3) 옥승용, 박관순, 고현무, "인접구조물의 진동제어를 위한 선형감쇠시스템의 최적설계", 한국지진공학회논문집, Vol. 10, No. 3, pp. 85~100, 2006.
- 4) Sungmoon Jung, Seung-Yong Ok, and Junho Song, "Robust structural damage identification based on multi-objective optimization", International Journal for Numerical Methods in Engineering, Vol. 81, pp. 786~804, 2010.
- 5) 박종철, 박찬민, 김병화, 이일근, 조병완, "장기계측에 의한 서해대교 사장교의 동특성 평가", 한국지진공학회논문집, Vol. 10, No. 6, pp. 115~123, 2006.
- 6) 옥승용, 박관순, 송준호, 고현무, "목표신뢰성을 만족하는 구조물-감쇠기 복합시스템의 다목적통합최적설계", 한국지진공학회논문집, Vol. 12, No. 2, pp. 9~22, 2008.
- 7) Deb K., Pratap A., Agarwal S. and Meyarivan T., "A fast and elitist multi-objective genetic algorithm: NSGA-II", IEEE Transactions on Evolutionary Computation, Vol. 6, No. 2, pp. 181~197, 2002.
- 8) Chopra, A. K., Dynamics of structures: theory and applications to earthquake engineering, Prentice Hall, Upper Saddle River, New Jersey, 1995.