

# 쌍둥이 인접구조물의 진동 제어를 위한 비대칭 지진격리 연결 제어시스템의 매개변수연구

김다위\* · 박원석\*\* · 옥승용\*\*\*†

## Parametric Study of Asymmetric Base-Isolation Coupling Control System for Vibration Control of Adjacent Twin Buildings

David Kim\* · Wonsuk Park\*\* · Seung-Yong Ok\*\*\*†

### †Corresponding Author

Seung-Yong Ok

Tel : +82-31-670-5282

E-mail : syok@hknu.ac.kr

Received : May 25, 2022

Revised : May 29, 2022

Accepted : May 30, 2022

**Abstract** : This paper focuses on a recently proposed asymmetric base-isolation coupling control system (ABiCS) for the vibration control of adjacent twin buildings. The ABiCS consists of inter-story diagonal dampers, a connecting damper between the two buildings, and a seismic isolation device at the base floor of one building. To investigate the control characteristics of ABiCS, a parametric study was performed by numerically simulating the 20-story twin buildings. In the parametric study, the control capacities of the inter-story diagonal dampers, connecting damper, and seismic isolation device were considered as varying parameters. The parametric study results indicate that the connecting damper between the two buildings reduces the responses of both buildings only at optimal or near-optimal capacity. In addition, adjusting the stiffness of the base isolation is found to be the most effective method for improving seismic performance and achieving cost-effectiveness. Accordingly, we presented a scenario-based performance improvement approach in which reducing the stiffness of the base isolation device could be an effective technique to improve the seismic performance of both buildings. However, note that checking the maximum allowable displacement of the base isolation device is essential.

Copyright©2022 by The Korean Society of Safety All right reserved.

**Key Words** : adjacent twin buildings, vibration control, asymmetric base-isolation coupling control system, seismic isolation

## 1. 서론

두 인접 구조물의 내진성능 보강 방법은 각 구조물을 독립적으로 제어하는 방식보다 두 구조물을 진동 제어장치로 연결하여 제어장치의 제어력을 두 구조물에 양방향으로 동시 작용시켜 제어하는 방법이 효율적이고 경제적이라고 알려져 있다<sup>1)</sup>. 하지만 동적 특성이 같은 쌍둥이 인접 구조물의 경우에는 두 구조물 간 상대응답의 차이가 거의 발생하지 않기 때문에 두 구조물 사이에 연결된 제어장치가 제어성능을 발휘할 수 없는 문제가 발생한다. 이는 두 구조물 사이를 연결하

는 제어장치가 두 구조물 간 상대응답 차이에 비례하는 제어력을 두 구조물에 작용하기 때문이다<sup>2,3)</sup>.

이러한 문제의 해결방안으로 두 구조물의 서로 다른 층에 제어장치를 연결하여 양단의 응답 차이를 증폭하는 방법<sup>4,5)</sup>과 제어시스템의 비대칭을 이용하여 구조물의 응답 차이를 증폭하는 방법<sup>2,3,6-8)</sup>이 제안되어 꾸준히 연구되고 있다. 특히 비대칭 연결 제어시스템(asymmetric coupling control system; ACCS)에 대한 연구는 동조질량감쇠기(tuned mass damper; TMD)를 비대칭으로 설치하거나 층별 감쇠 장치를 불균등하게 배치하여 두 구조물의 응답 차를 증폭시키는 방법이

\*한경대학교 사회안전시스템공학부 강사 (School of Social Safety Engineering, Hankyong National University)

\*\*목포대학교 토목공학과 부교수 (Department of Civil Engineering, Mokpo National University)

\*\*\*한경대학교 사회안전시스템공학부 교수 (School of Social Safety Engineering & Research Center for Safety and Health, Hankyong National University)

적용되었고, 최근에는 지진격리장치(seismic isolation device)를 활용한 방법이 제안된 바 있다<sup>3)</sup>. 이와 같은 제어장치들이 적용되는 이유는 구조물의 응답은 주파수 특성에 영향을 받게 되는데 구조물의 주파수 특성을 변화시키는 대표적 제어시스템이 동조질량감쇠기와 지진격리장치이기 때문이다. 지진격리장치에 관한 최근 연구<sup>3)</sup>는 비대칭 연결 제어시스템의 최적 설계를 위하여 여러 최적화 기법을 선택적으로 사용할 수 있는 복합 최적화 기법을 새롭게 제안하고 이를 구현한 알고리즘의 효율성을 검증한 연구이다. 여기에서 제안하는 시스템은 인접한 쌍둥이 구조물의 주파수 특성을 서로 다르게 만들기 위하여 지진격리장치를 한쪽 구조물에만 사용하고 두 구조물은 기존 감쇠기 연결 방법을 사용하여 하나의 시스템으로 통합한 뒤, 전체 시스템의 감쇠 성능을 높이기 위하여 각 구조물 내부에 층간 감쇠기를 사용하는 복합 제어 방법이다.

선행연구에서는 제안된 시스템의 최적 설계 문제를 다루었으나 지진격리장치, 구조물 간 연결 감쇠기, 그리고 구조물 내 층간 감쇠기의 조합이 전체 제어시스템의 성능에 미치는 영향, 즉 제어 특성에 관한 연구는 아직까지 다루어지지 않았다. 따라서 이 연구에서는 쌍둥이 인접 구조물에 비대칭 지진격리시스템 및 구조물 연계 수동 감쇠기가 설치된 복합제어시스템, 즉 비대칭 지진격리 연결 제어시스템(asymmetric base-isolation coupling control system; ABiCS)의 제어 특성에 관한 연구를 수행하고자 한다. 일반적으로 제어 특성 연구에서 고려하는 주요 사항은 제어 용량과 제어장치의 설치 위치에 따른 성능의 변화이다. 비대칭 지진격리 연결제어 시스템에서 지진격리장치와 구조물 간 연결 감쇠기는 특정 위치에 설치되기 때문에 설치 위치에 대하여 고려할 필요가 없으나 두 구조물 내 설치되는 층간 감쇠기는 층별 용량 분포에 따라 제어성능이 달라질 수 있으므로 이에 대한 영향을 고려해야 한다. 하지만 고층 구조물에서 감쇠기의 층별 용량을 분포시키는 방법은 무수히 많고 이를 일반화하는 것은 한계가 있으므로 본 연구에서는 두 구조물 내 설치되는 층간 감쇠기는 모든 층에 균등 배치되는 것으로 가정하였다. 결국 이 연구에서 살펴보고자 하는 제어 특성 연구는 비대칭 연결 제어시스템의 각 제어장치별 감쇠 용량에 따른 제어성능의 변화를 살펴보는 매개변수 연구(parametric study)가 된다.

한편, 제어시스템의 적용은 인천국제공항 관제탑<sup>9)</sup>, 대만의 타이베이 금융센터<sup>10)</sup>와 같이 설계 단계에서 신규 설치하는 것이 일반적이다. 그러나 실제 적용의 관점에서 살펴보면, 사용 중인 구조물의 노후화 및 설계

기준 개정으로 인한 요구 성능 강화 등으로 인하여 제어성능 개선의 필요성이 많이 요구되며, 그에 대한 해결방안으로 제어시스템이 많이 고려되고 있다. 따라서 이 연구에서는 성능 개선 시나리오를 가정하고, 목표 성능을 만족하는 ABiCS의 설계 방안을 적용 사례로 제안하고자 한다.

## 2. 수치해석 모델링

### 2.1 제어시스템의 구성과 운동방정식

본 연구에서 다루는 제어시스템은 Fig. 1과 같이  $n$ 층 쌍둥이 구조물 중 하나의 구조물에만 지진격리시스템( $k_b, c_b$ )을 설치하고 구조물 사이를 연결하는 점성 감쇠기( $c_c$ )를 최상층에 배치하여 비대칭 연결 제어시스템을 구성하였다. 그리고 두 구조물의 감쇠 성능을 보강하기 위하여 동일한 용량의 층간 점성 감쇠기( $c_1 = c_2 = \dots = c_n$ )를 브레이싱(bracing) 형태로 전 층에 배치하는 균등 감쇠 분포시스템(uniform damper distribution system)을 추가하였다.

두 구조물의 동적 특성이 동일하므로 제어시스템이 적용된 전체구조물의 운동방정식은 식 (1)~(4)로 표현될 수 있다. 참고로, 이 연구는 지진 하중에 대하여 가장 지배적인 응답인 수평 응답에 대한 제어 성능을 검증하고자 하므로 구조물의 모델링은 제어시스템 연구에서 많이 사용하는 전단 빌딩 모형을 적용하고자 한다. 다만, 이 모델은 실제 구조물의 회전 변형 등은 모사하지 못하는 한계를 가진다. 그에 따른 식 (1)~(4)의 각 행렬 구성에 대한 세부적인 내용은 지면 관계상 생략하며, Park & Ok<sup>3)</sup>연구에서 확인할 수 있다.

$$M \ddot{\mathbf{x}} + C \dot{\mathbf{x}} + K \mathbf{x} = -M \mathbf{1} \ddot{x}_g \tag{1}$$

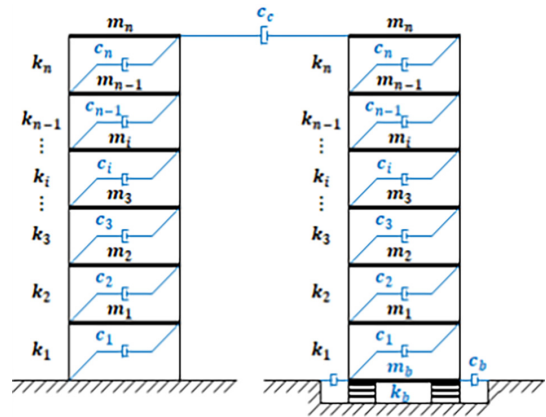


Fig. 1. Conceptual configuration of adjacent twin structures with asymmetric coupling control system.

$$M = M_s + M_b = \begin{bmatrix} M_1 & 0 & 0 \\ 0 & M_2 & 0 \\ 0 & 0 & m_b \end{bmatrix} \quad (2)$$

$$K = K_s + K_c + K_b = \begin{bmatrix} K_1 & 0 & 0 \\ 0 & K_2 + k_c^{11} & k_c^{12} \\ 0 & k_c^{21} & k_c^{22} + k_b \end{bmatrix} \quad (3)$$

$$C = C_s + C_d + C_c + C_b \quad (4)$$

$$= \begin{bmatrix} C_1 + C_{d1} + c_c^{11} & c_{cc}^{12} & 0 \\ c_{cc}^{21} & C_2 + C_{d2} + c_c^{22} + c_b^{11} & c_b^{12} \\ 0 & c_b^{21} & c_b^{22} \end{bmatrix}$$

여기서,  $M$ ,  $K$ ,  $C$ 는 질량, 강성, 감쇠 행렬을 나타내며, 아래첨자  $s$ 는 구조물(structure),  $b$ 는 지진격리시스템(base isolation system),  $c$ 는 연결(coupling) 시스템을 의미한다. 또한, 좌측 구조물과 우측 구조물은 아래첨자 1과 2로 표기하였다.  $\ddot{x}$ ,  $\dot{x}$ ,  $x$ 는 각각  $n \times 1$  크기의 가속도, 속도 및 변위 응답 벡터이며,  $\ddot{x}_g$ 는 지반가속도로서 응답 벡터  $\mathbf{1}$ 을 통하여 수평 방향 자유도로 질량행렬  $M$ 에 곱해져서 지반 운동에 대한 관성력으로 작용하게 된다. 각 행렬의 세부 항목은 Park & Ok<sup>3)</sup>를 참조할 수 있으며, 여기서는 지면 관계상 생략한다.

## 2.2 추계학적 응답 해석

SVM(Support Vector Machine)은 Vapnik에 불확실한 지반운동은 식 (5)의 Kanai-Tajimi 파워스펙트럼밀도(power spectrum density, PSD) 함수를 이용하여 확률적으로 정의하고 이는 식 (6)의 단자유도 운동방정식으로 나타낼 수 있다. 이때 지반가속도는  $\ddot{x}_g = \ddot{x}_g^r + w$ 으로 묘사할 수 있다.

$$S(\omega) = \frac{\omega_g^4 + 4\xi_g^2 \omega_g^2 \omega^2}{(\omega_g^2 - \omega^2)^2 + 4\xi_g^2 \omega_g^2 \omega^2} S_0 \quad (5)$$

$$\ddot{x}_g^r(t) + 2\xi_g \omega_g \dot{x}_g^r(t) + \omega_g^2 x_g^r(t) = -w(t) \quad (6)$$

여기서,  $\omega_g$ ,  $\xi_g$ 는 지반의 탁월 주파수(dominant frequency)와 밴드 폭(bandwidth)으로 지반의 동적 특성을 반영하고,  $S_0$ 는 지반운동의 세기(seismic intensity)를 나타내는 계수로서 최대 지반가속도(peak ground acceleration; PGA)에 상응하여 크기가 달라진다.  $w(t)$ 는 기저암에서 발생하는 백색잡음(white noise)으로서  $S_0$ 에 따른 PGA에 상응하는 크기의 불규칙 진동이다.

전체 시스템의 운동방정식은 식 (1)과 식 (6)로부터 식 (7)의 상태공간방정식(state-space equation)으로 표현할 수 있다.

$$\dot{z} = A_z z + B_w w \quad (7)$$

여기서,  $z$ 는  $(2n+2) \times 1$  크기의 상태벡터로서 구조물과 지반 변위 및 속도로 구성되며,  $A_z$ 와  $B_w$ 는 각각 시스템 행렬과 하중의 위치벡터로서 식 (8)과 같이 정의된다.

$$z = \begin{bmatrix} x \\ \dot{x} \\ \ddot{x} \\ \dot{x}_g \\ x_g \end{bmatrix}, B_w = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 1 \end{bmatrix}, A_z = \begin{bmatrix} 0 & 0 & I & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 0 \\ -M^{-1}K & \omega_g^2 \mathbf{1} & -M^{-1}C & 2\xi_g \omega_g \mathbf{1} & 0 \\ 0 & -\omega_g^2 & 0 & -2\xi_g \omega_g & 0 \end{bmatrix} \quad (8)$$

식 (8)의 상태공간 방정식에서 상태벡터  $z$ 에 대한 공분산행렬  $S$ 를  $S = E[z \cdot z^T]$ 라 할 때, 식 (9)의 Lyapunov 방정식을 얻을 수 있으며, 정상상태 응답에 대하여 공분산 행렬은 상수가 되므로 이는 다시 식 (10)의 Algebraic Lyapunov 방정식이 된다<sup>11)</sup>. 최종적으로, 해  $S$ 는 기존 연구<sup>12)</sup>에서 제시된 방법으로 얻을 수 있다.

$$\dot{S} = A_z S + S A_z^T + B \quad (9)$$

$$0 = A_z S + S A_z^T + B \quad (10)$$

여기서, 행렬  $B$ 는  $(2n+2) \times (2n+2)$  크기의 행렬로서 지반운동에 상응하는 마지막 대각요소  $B_{ii} = 2\pi \cdot S_0$ , ( $i = 2n+2$ )를 제외하고는 모두 0이다.

한편, 해  $S$ 의 대각 요소는 상태벡터  $z$ 의 2차 모멘트로서 이로부터 각 응답의 RMS(root mean square) 값을 얻을 수 있다.

## 3. 수치 예제

### 3.1 예제 구조시스템

제어시스템의 성능을 검증하기 위한 예제 구조시스템은 Fig. 1의 20층 전단 빌딩을 고려하였으며, 제반 물성치는 Table 1과 같다.

입력 지진에 대한 지반 물성치는 단단한 경질 지반(stiff ground)에 상응하는 수치로서 Table 2에 나타내었으며,  $S_0$ 는 PGA 0.4 g에 상응하는 지진세기 계수값을 고려하였다.

Table 1. Dynamic properties of twin buildings

Properties	Building 1	Building 2
Mass( $10^3$ kg)	1~3	665.1
	4~20	630.4
Stiffness( $10^9$ N/m)	$m_b$	-
	$k_b$	330
Damping ratio	1~20	4.86
	-	1.0
Damping ratio		0.02

Table 2. Parameters of Kanai-Tajimi model

Parameters	$\omega_g$	$\xi_g$	PGA(g)	$S_0$
Values	$5\pi$	0.6	0.4	0.0106

이 연구에서는 제안하는 제어시스템의 제어 특성을 살펴보기 위하여 제어 용량에 따른 성능 변화를 살펴보고자 한다. 따라서 이를 위해서는 기준 설계가 사전 수행되어야 하므로, 지진격리장치( $c_b$ ), 연결 점성 감쇠기( $c_c$ ), 구조물 내 층간 점성 감쇠기( $c_{d1}$ ,  $c_{d2}$ )의 감쇠 용량을 매개변수로 설정하고 사전 해석을 수행하여 최대 응답을 비교하였으며, 그 결과 Table 3과 같이 제어 용량의 기준값을 선정하였다. 여기서, 빌딩 2에는 층간 감쇠기의 제어 효과가 미비하여 설치하지 않는 것으로 결정하였으며, 빌딩 1에는 각 층에 10,000 kNs/m 용량의 감쇠기를 균등 설치하는 것으로 결정하였다. 따라서 전체 시스템의 감쇠용량은 총 225,000 kNs/m이 설치되었다.

진동 제어장치를 설치하지 않은 기본 구조물(No Control)과 Table 3의 설계안을 적용하여 ABiCS를 설치한 구조물의 층별 RMS 응답 분포를 Fig. 2에 도시하였다. 기본 구조물의 경우, 주어진 지진하중에 의하여 최대 발생하는 최대 층간 변위의 RMS 응답이 6.04 mm 이지만 Table 3의 제어시스템 설계변수를 적용할 경우 Building 1에서는 3.70 mm, Building 2에서는 3.10 mm 가 발생함으로써 큰 폭의 진동 저감 효과를 확인할 수 있다. 지진격리장치에서 발생하는 최대 RMS 변위는 15.14 mm로 산정되었으며, Fig. 2의 우측 0층에 나타내었다. 이처럼 지진격리장치는 유연한 강성으로 지진력

Table 3. Design parameters of control system

Reference parameters	Values( $10^3$ kNs/m)
Base isolation damping	$c_b = 20$
Connection damping	$c_c = 5$
Inter-story damping per floor of building 1	$c_{d1} = 10$
Inter-story damping per floor of building 2	$c_{d2} = 0$

\*  $i$  and  $j = 1, \dots, 20$

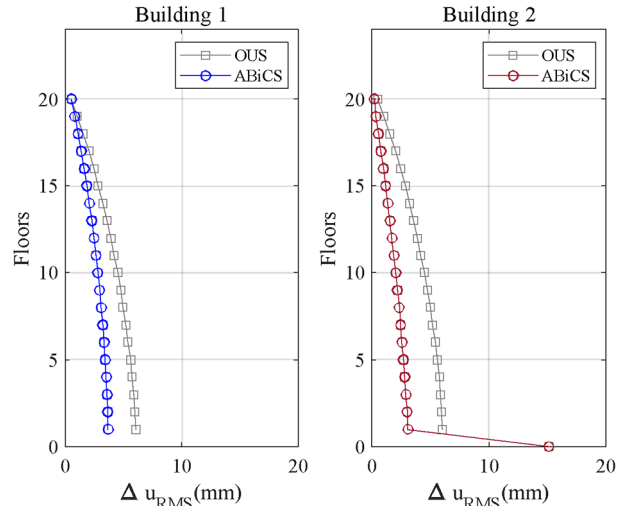


Fig. 2. Comparative results of RMS story drift( $\Delta u_s$ ) between non-control system and ABiCS.

에 의한 지반 진동을 지진격리장치의 변위로 발현함으로써 구조물 상부의 층간 변위 발생을 억제하게 된다. 이는 결국 건물 기둥의 변형을 감소시킴으로써 내진 안전성을 확보하는 방식이다.

균등 감쇠 분포시스템과 연결 감쇠기의 영향을 받는 빌딩 1은 10,000 kNs/m의 감쇠기가 20층에 균등하게 설치되기 때문에 구조시스템 전체를 고려하면 총 200,000 kNs/m의 감쇠 용량이 소요된다. 반면 빌딩 2는 층간 점성 감쇠기가 설치되지 않기 때문에 지진격리장치와 연결 감쇠기의 영향만 받게 되며, 시뮬레이션 결과 연결 감쇠기에 의하여 전달되는 두 구조물 간 진동 영향이 지진격리장치만으로도 충분히 저감되는 효과를 확인할 수 있었다. 이 때, 연결 감쇠용량은 5,000 kNs/m, 지진격리장치의 감쇠용량은 20,000 kNs/m만 적용되었으며, 이는 빌딩 1에 소요된 층간 감쇠용량의 1/40, 1/10 수준밖에 되지 않으므로 제안하는 제어방식의 경제성 및 효율성을 확인할 수 있다.

#### 4. 성능 개선을 위한 매개변수 해석

##### 4.1 제어 용량에 따른 제어성능 특성 고찰

이 연구에서는 지진격리장치를 이용하여 새롭게 제안된 비대칭 연결 제어시스템<sup>3)</sup>의 제어 특성을 살펴보기 위하여 제어시스템을 구성하는 각 감쇠기의 용량을 매개변수로 설정하고 이에 대한 매개변수연구를 수행하였다. 고려하는 매개변수는 지진격리장치의 질량( $m_b$ ), 감쇠계수( $c_b$ ), 강성( $k_b$ ), 빌딩 1 내 층간 감쇠기의 감쇠계수( $c_{d1}$ ), 그리고 구조물 연결 감쇠기의 감쇠계수( $c_c$ )이다. 참고로 빌딩 2 내 층간 감쇠기의 감쇠계수는

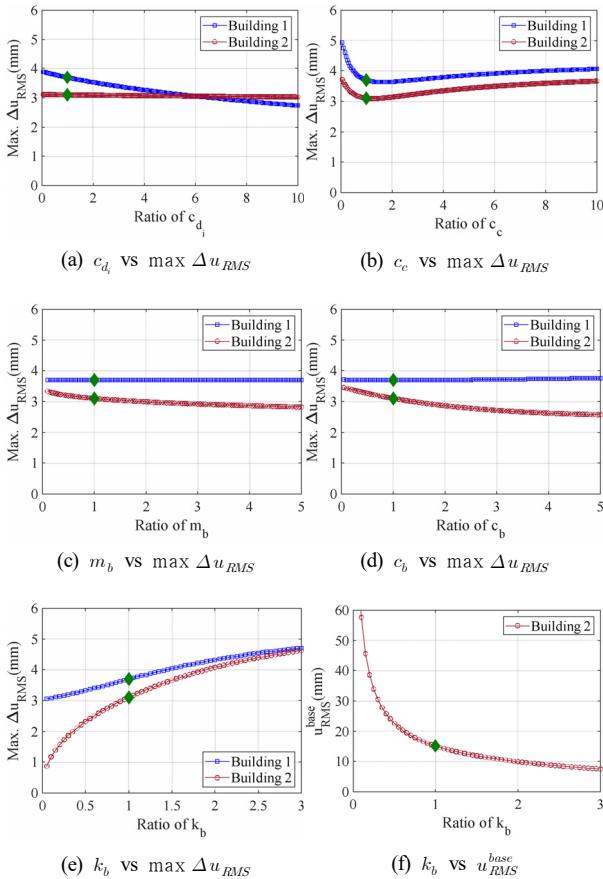


Fig. 3. Parametric results of design parameters of ABiCS on peak RMS responses of two buildings.

기준 설계에서 효과가 미비한 것으로 판단되어 0의 값을 적용하였기에 매개변수연구에서도 고려하지 않았다. 각 매개변수의 변화에 따른 해석 결과는 Fig. 3에 도시하였다. 여기서 수평축은 Table 3에 제시한 기준 설계값에 대한 비(ratio)이며, 수직축은 층별 RMS 응답 중 최대값을 나타내었다. 각 그림에서 마크 ‘◇’는 Table 3의 기준 설계를 적용했을 때의 응답값에 해당한다. 따라서, Fig. 3은 기준 설계 물성치를 0~10배 증감했을 때의 제어성능 변화를 나타낸다.

Fig. 3(a)에서 빌딩 1 내 층간 감쇠기의 감쇠 용량( $c_d$ )을 증가시키는 것이 빌딩 1의 층간 변위 응답은 감소시키지만, 빌딩 2의 응답에는 감소 효과가 거의 없음을 확인할 수 있다. 한편 3.2절에서도 전술한 바와 같이, 층간 감쇠 용량은 연결 감쇠기 및 지진격리장치의 감쇠 용량과 비교할 때 10배, 40배 수준이므로, Fig. 3(a)에 나타난 빌딩 1에 대한 감소 효과를 고려할 때, 이를 더 증가하는 것은 경제적인 측면에서 바람직하지는 않다고 판단된다. 따라서 Fig. 3(a)로부터 층간 감쇠 용량의 증가가 빌딩 1에는 응답 감소 효과가 있으나

경제성의 측면에서는 효율성이 다소 떨어지는 방안임을 확인할 수 있다.

Fig. 3(b) 결과로부터 연결 감쇠기의 기준 설계 값이 두 구조물의 응답 감소가 가장 크게 발생하는 용량임을 알 수 있다. 그리고 기준 용량보다 더 작은 용량을 사용하든지 또는 더 큰 용량을 사용하는 것이 모두 두 구조물의 응답을 증가시키고 있음을 확인할 수 있는데, 이러한 결과는 기존 연구들에서 널리 알려진 결과이다<sup>3)</sup>. 다만, 감쇠 용량( $c_c$ )을 감소시켰을 때는 응답이 매우 큰 폭으로 증가하는 반면, 감쇠 용량( $c_c$ )을 증가시켰을 때는 상대적으로 응답이 완만하게 증가하는 결과를 보인다. 따라서 ABiCS를 적용할 때, 연결 감쇠기의 용량( $c_c$ )은 기준값보다 크게 적용하는 것은 허용될 수 있으나 기준값보다 적은 용량을 적용하는 것은 가급적 지양할 필요가 있다.

Fig. 3(c)~(d)에서는 지진격리장치의 질량( $m_b$ )과 감쇠 용량( $c_b$ ) 증가가 빌딩 2에는 저감 효과가 있으나 빌딩 1에는 반대로 거의 효과가 없음을 확인할 수 있다. 이는 앞서 층간 감쇠기 용량( $c_d$ )과는 정반대의 결과이다.

Fig. 3(e)에서는 지진격리장치의 강성 증감( $k_b$ )이 두 구조물의 응답 증감에 비례하는 경향을 확인할 수 있다. 특히, 강성( $k_b$ ) 변화에 따른 응답 증감율이 다른 제어장치의 용량( $c_d$ ,  $c_c$ ,  $m_b$ ,  $c_b$ ) 변화에 따른 응답 증감을 보다 더욱 크게 발생하고 있음을 확인할 수 있다. 따라서 두 구조물의 응답 증감을 고려할 때, 지진격리장치의 강성을 감소하는 것이 가장 효과적인 응답제어 방안임을 확인할 수 있다. 그러나, Fig. 3(f)에 도시한 바와 같이, 지진격리장치의 강성이 감소할수록 반대급부로 빌딩 2의 바닥 변위(Fig. 1의 0층 변위)가 매우 큰 폭으로 증가하게 된다. 이는 결국 지진격리장치의 파괴를 유발할 수 있으므로 지진격리장치의 강성을 조절할 때는 반드시 지진격리장치의 허용 변위 폭을 고려해야 할 것이다.

이상의 결과를 정리하면 다음과 같다. 첫 번째, 빌딩 내 층간 감쇠( $c_d$ )와 지진격리장치의 질량( $m_b$ ) 및 감쇠( $c_b$ )는 설치되지 않는 구조물에는 응답 저감 효과가 현저히 낮다. 두 번째, 구조물 간 감쇠( $c_c$ )는 두 구조물에 동시에 효과적인 응답 저감 효과를 발휘하는 최적 감쇠용량이 존재한다. 이 때 최적 용량값은 두 구조물에 동일한 단일값으로 존재하지는 않을 수 있으나 비교적 동시에 응답을 저감시키는 구간(영역)으로는 존재할 수 있다. 따라서 해당 구간 내의 하나의 용량을 최적값으로 결정할 수 있다. 세 번째, 지진격리장치의 강성을

감소하는 것이 두 구조물의 응답을 줄이는 데 있어서 매우 효율적인 방안이 될 수 있으나 반대급부로 지진 격리장치의 변위가 커지게 되므로 반드시 지진격리장치의 변위 허용치에 대한 초과 여부를 검토해야 한다.

### 4.2 성능 개선 시나리오

안전기준 강화 또는 목표 성능 향상 등의 이유로 구조물의 제진 성능을 보강해야 하는 경우 제어시스템의 보강 설계가 필요하다. 일반적인 독립 구조물에서의 감쇠기 용량 증가는 구조물의 응답 저감 효과, 즉 제진 성능의 향상에 비례하는 경향이 있으므로 단순히 비용 범위 내에서 감쇠 용량을 많이 사용하는 것이 가능한 방안이라 할 수 있다. 그러나 비대칭 연결 제어시스템은 두 구조물의 응답이 상호 작용하기 때문에 반드시 감쇠 용량 증가가 제어성능 향상에 비례하지 않으며 오히려 제어성능을 저하시킬 수도 있다<sup>3)</sup>. 따라서 여기서는 목표 성능의 향상을 위한 보강 시 고려할 수 있는 매개변수와 성능 개선 시나리오를 제안하고자 한다.

Table 3의 설계안을 적용한 예제 구조물의 경우, 빌딩 1과 2의 최대 층간 변위는 각각 3.70 mm 및 3.10 mm가 발생하며 지진격리장치의 최대 변위는 15.14 mm가 발생한다. 이 때 목표 성능이 최대 층간 변위 3.50 mm 이하가 되도록 성능 개선을 하고자 하며, 적용 가능한 지진격리장치의 최대 허용 변위는 20 mm라고 가정하자. 이 경우, 빌딩 2는 목표 성능을 만족하지만 빌딩 1은 목표 성능을 만족하지 못하므로 진동 제어장치를 재설계하여야 할 것이다. 제어시스템의 매개변수 중 Fig. 3의 결과를 반영하여 살펴보면, 지진격리장치의 질량( $m_b$ ) 또는 감쇠 용량( $c_b$ )의 증가는 빌딩 1의 응답 감소 효과가 거의 없고, 구조물 연결 감쇠기의 감쇠계수( $c_c$ )의 용량 증가는 오히려 응답을 증가시키기 때문에 성능 개선 시 고려할 변수에서 제외된다. 따라서 빌딩 1의 최대 층간 변위를 목표 성능 이하로 줄이기 위한 매개변수는 층간 감쇠기의 감쇠 용량( $c_d$ ) 증가 또는 지진격리장치의 강성( $k_b$ ) 감소가 검토 가능한 방법이다.

Table 4. Damping capacity and response for the target performance

New design parameters & Response		Values
Inter-story damping of building 1		$2.25 \times c_d$
Max. story drift(mm)	Building 1	3.49
	Building 2	3.09
Total damping capacity( $10^3$ kNs/m)		475

\*  $i$  and  $j = 1, \dots, 20$

Table 5. Stiffness capacity and response for the target performance

New design parameters & Response		Values
Stiffness of base isolation		$0.65 \times k_b$
Max. story drift(mm)	Building 1	3.44
	Building 2	2.59
Max. displacement of base isolation(mm)		19.57

\*  $i$  and  $j = 1, \dots, 20$

층간 감쇠기의 감쇠 용량을 증가하여 Table 4와 같이 설계안의 용량보다 2.25배 증가시키면 빌딩 1과 2의 최대 층간 변위는 각각 3.49 mm, 3.09 mm로 목표 성능을 만족한다. 하지만 제어시스템 전체에 사용되는 총 감쇠 용량은 475,000 kNs/m으로 기존 225,000 kNs/m 대비 약 211% 증가하게 되어 앞서 언급한 바와 같이 경제성의 측면에서 효율성이 낮고, 감쇠기의 크기 또는 수량 증가로 인해 공간 활용성도 낮은 방법이다.

두 번째로 지진격리장치의 강성( $k_b$ )을 조정하는 방안은 Table 5와 같이 기존 용량의 0.65배만 사용할 때, Fig. 3(e)에 제시한 바와 같이, 빌딩 1과 2의 최대 층간 변위는 각각 3.44 mm와 2.59 mm로 감소함으로써 시나리오에서 가정한 목표 성능을 만족하게 된다. 이 때, 지진격리장치의 변위는 19.57 mm로 증가하게 되나 최대 허용 범위 내이므로 적용 가능한 방안이라 할 수 있다. 따라서 이 방법은 오히려 지진격리장치의 강성을 감소하므로 경제적인 측면에서도 효율적이며 공간 활용성 측면에서도 효과적이라 할 수 있다. 다만, 이 방법은 지나친 강성 감소는 과도한 지진격리장치의 변위를 유발할 수 있으므로 이에 대한 검토가 반드시 수반되어야 할 것이다.

## 5. 결론

이 연구에서는 쌍둥이 인접 구조물에 지진격리시스템을 적용하고 수동감쇠기로 연결하는 비대칭 지진격리 연결 제어시스템의 제어 용량에 따른 제어 특성을 살펴보았으며, 시나리오 기반 제어시스템의 성능 개선 방안에 대하여 방법론을 제안하였다. 이를 위한 사전 단계로서 제안하는 시스템의 기준 설계안을 도출하였으며, 그 과정에서 연결 감쇠기와 지진격리장치만으로 제어하는 구조물이 층간 감쇠기가 전체에 균등하게 배치되는 구조물에 비해 상대적으로 적은 용량으로 성능을 발휘하는 것을 확인할 수 있었다.

제어 특성을 검토하기 위하여 시스템을 구성하는 각 감쇠기의 용량을 매개변수로 설정하여 기준값의 응답과 비교한 결과, 구조물 간 연결 감쇠는 최적 용량 또

는 일부 구간에서만 응답 저감 효과를 보였고, 층간 감쇠와 지진격리장치의 질량 및 감쇠의 경우 용량을 증가시키면 각 제어장치가 설치된 구조물의 응답은 감소하지만 효과가 미비하여 경제성의 측면에서 효용성이 낮은 것으로 나타났다. 반면, 지진격리장치의 강성을 감소시킬 경우 두 구조물의 응답이 효과적으로 감소하는 특성을 확인하였으나 이 경우에는 지진격리장치의 변위가 반대로 증가하는 결과를 보였다. 이러한 제어 특성을 활용하여 시나리오 기반 성능 개선 방안을 제안하였으며 이로부터 지진격리장치의 강성을 감소하는 방법이 경제성 및 공간 활용성 측면에서 가장 효과적임을 확인하였으나, 이 경우에는 반드시 지진격리장치의 최대 허용 변위에 대한 검토가 수반되어야 할 것이다.

마지막으로 구조물의 지진응답제어는 제어력을 발휘하여 선형 범위 내에서 구조물의 응답을 유지시킨다는 전제 하에서 이루어진다. 그러나 지진은 불확실성이 매우 크므로 예측하지 못한 큰 지진에 의해서 선형 범위를 초과하는 비선형 및 비탄성 거동이 발생할 수도 있다. 따라서 구조물의 응답제어에서도 구조물 지진응답의 비선형 및 비탄성을 고려할 필요도 있다. 그러나 현 단계에서는 이러한 비선형 및 비탄성 응답은 연산 시간이 많이 소요되므로 제어 목적으로는 적용이 쉽지 않은 상황이다. 따라서 제어시스템의 적용에서는 구조물의 비선형 및 비탄성 거동을 모사하는 수치 효율적 응답 예측 기법이 요구되며 이런 측면에서 최근 주목받고 있는 Reinforced Learning 등과 같은 인공지능(Artificial Intelligence; AI)기법을 고려할 수 있을 것이다. 향후 구조물의 비선형 및 비탄성 응답을 고려한 제어시스템 적용 문제를 해결하기 위해서는 인공지능기법의 적용 연구가 대안이 될 수 있을 것으로 판단된다.

**Acknowledgement:** This research was supported by Basic Science Research Program through the National Research Foundation of Korea(NRF) funded by the Ministry of Education[grant number 2017R1D1A1B04031418].

## References

- 1) S. -Y. Ok, K. -S. Park and H. -M. Koh, "Optimal Design of Linear Viscous Damping System for Vibration Control of Adjacent Building Structures", Journal of the Earthquake Engineering Society of Korea, Vol. 10, No. 3, pp. 85-100, 2006.
- 2) S. -Y. Ok, "Tuned Mass Damper Asymmetric Coupling

- System for Control of Adjacent Twin Buildings, Advances in Structural Engineering", Advances in Structural Engineering, Vol. 23, No. 5, pp. 954-968, 2020.
- 3) W. Park and S. -Y. Ok, "Hybrid Optimization Design Approach of Asymmetric Base-isolation Coupling System for Twin Buildings", Journal of Low Frequency Noise, Vibration and Active Control, Vol. 4, No. 4, pp. 1993-2013, 2021.
- 4) K. Yoshida. M. Saigo and K. Seto, "Vibration Control of Parallel Flexible Structures with Identical Vibration Property Using Interactive Force", The 6th International Conference on Motion and Vibration Control, pp. 967-972, 2002.
- 5) C. C. Patel and R. S. Jangid, "Seismic Response of Dynamically Similar Adjacent Structures Connected with Viscous Dampers", The IES Journal Part A: Civil & Structural Engineering, Vol. 3, No. 1, pp. 1-13, 2010.
- 6) S. -Y. Ok, "Efficient Vibration Control Approach of Two Identical Adjacent Structures", J. Korean Soc. Saf., Vol. 29, No. 3, pp. 56-63, 2014.
- 7) S. -Y. Ok and S. -M. Kim, "New Vibration Control Approach of Adjacent Twin Structures using Connecting Tuned Mass Damper", J. Korean Soc. Saf., Vol. 32, No. 2, pp. 92-97, 2017.
- 8) S. Ryu, S. -Y. Ok, "Multi-Objective Optimal Distributions of Viscous Dampers for vibration Control of Adjacent Twin Structures", J. Korean Soc. Saf., Vol. 33, No. 2, pp. 61, 67, 2018.
- 9) H.-M. Koh, K.-S. Park and W. Park, "Air Traffic Control Tower at Incheon International Airport in Korea", IABSE Congress Report, International Association for Bridge and Structural Engineering, Vol. 16, No. 13, pp. 946-953, 2000.
- 10) A. Y. Tuan and G. Q. Shang, "Vibration Control in a 101-Storey Building Using a Tuned Mass Damper", Journal of Applied Science and Engineering, Vol. 17, No. 2, pp. 141-156, 2014.
- 11) S. -Y. Ok, . J. Song, K. -S. Park and H. -M. Koh, "Optimal Design of Nonlinear Damping System for Seismically-excited Adjacent Structures using Multi-objective Genetic Algorithm Integrated with Stochastic Linearization Method", Journal of the Earthquake Engineering Society of Korea, Vol. 11, No. 6, pp. 1-14, 2007.
- 12) R. H. Bartels and G. W. Stewart, "Solution of the matrix  $AX+XB=C$ ", Communications of the ACM, Vol. 15, No. 9, pp. 820-826, 1972.