

# 강도저항형 코어와 프레임 구조의 진동주기차를 이용한 듀얼프레임 제진시스템의 응답특성

## Response Characteristic of the Dual-frame Passive Control System with the Natural Period Difference between the Strength Resistant Core and Frame Structure

김태경<sup>1)</sup> · 최광용<sup>1)</sup> · 오상훈<sup>1)\*</sup> · 유홍식<sup>2)</sup>

Kim, Tae Kyung<sup>1)</sup> · Choi, Kwang Yong<sup>1)</sup> · Oh, Sang Hoon<sup>1)\*</sup> · Ryu, Hong Sik<sup>2)</sup>

<sup>1)</sup>부산대학교 건축공학과, <sup>2)</sup>포스코 철강솔루션센터

<sup>1)</sup>Department of Architectural Engineering, Pusan National University, <sup>2)</sup>Building Structure and Materials Research Center, POSCO

### / A B S T R A C T /

In this study, shaking table test has been carried out for the dual frame passive control system for seismic performance verification of the proposed system. The proposed system was separated into two independent frameworks that are strength resistant core and frame structure by connecting to the damper. Moreover, the seismic performance improvement of the proposed system has been verified by comparing and analyzing the experimental results of the proposed system with an existing core system. As a result of the shaking table test, acceleration and displacement responses of dual-frame vibration control system are decreased than those of the existing strength resistant type core system. In the case of the core system, while the damage was concentrated on the column of first floor, the damage of the dual system was dispersed in each layer. The damage also was concentrated on the damper, almost no damage occurs to the structural members. It has been emphasized that installed dampers in the proposed dual system reduce the input energy of whole structure by absorbing seismic input energy, which leads overall system damage to be reduced.

**Key words:** Strength Resistive Core System, Dual-Frame Passive Control System, Shaking Table Test

## 1. 서론

최근 도시의 과밀화에 의해 고층건물이 증가하고 있으며, 초고층 구조설계에서 강도저항형 코어시스템은 효과적인 수평변위 제어를 위하여 가장 많이 채택되는 시스템 중의 하나이다. 강도저항형 코어시스템은 횡력에 저항하는 강도저항형 코어와 연직하중을 지지하는 프레임으로 구성되어 효율적인 내진설계가 가능하나, 횡력에 대하여 상대적으로 횡강성이 작은 프레임보다 횡강성이 큰 강도저항형 코어에 응력이 집중될 수 있다. 특히 강도저항형 코어와 프레임이 이종재료로 구성될 경우 접합부에 응력이 집중될 가능성이 크고, 복잡한 접합상세에 따라 시공성 및 경제성이 저하될 수 있다. 하지만 강도저항형 코어와 프레임이 연결되지 않고 독립되어 있는 경

우, 두 시스템의 진동주기차에 의해 상대변위가 발생한다. 두 골조 사이의 상대변위를 이용하여 연결부에 에너지 흡수를 위한 댐퍼를 설치하면, 댐퍼의 소성변형에 의해 에너지가 흡수되고, 과대한 변위 발생이 억제되어 시스템의 내진성능을 향상시킬 수 있다.

서로 다른 두 골조를 감쇠장치로 연결하는 방법에 대한 기존 연구[1-6]를 살펴보면 박지훈과 김기면[1]은 진동수의 차이가 큰 모멘트골조와 전단벽이라는 두 구조형식을 점성감쇠기로 상호 연결하는 방식에 관해 수치해석 연구를 수행하였으며, 김진구와 류진국[2]은 최상층에 설치된 연결교량과 두 건물의 연결부에 점탄성감쇠기를 설치하여 연결된 건물의 지진응답을 저감하는 방법에 대해서 연구하였다. 또한 Zhang and Xu[3]는 중앙진에 대하여 인접건물을 점탄성댐퍼로 연결하여 응답을 제어하는 방법에 대하여 연구하였다. 기존 연구에 따르면 서로 다른 두 골조 간 감쇠장치를 설치함에 따라 횡변위의 저감효과가 있음이 보고되고 있으나, 주로 점탄성 댐퍼를 사용하여 연결된 구조물의 응답저감에 대한 해석적 연구가 대부분인 실정이다.

\*Corresponding author: Oh, Sang Hoon

E-mail: osh@pusan.ac.kr

(Received July 27, 2015; Revised August 26, 2015; Accepted August 27, 2015)

본 연구에서는 강제 이력댐퍼를 사용한 듀얼프레임 제진시스템을 대상으로 하여, 제안 시스템의 내진성능 검증을 위한 진동대 실험을 수행하였다. 또한 기존 강도저항형 코어시스템과 제안 시스템에 대한 실험결과를 비교·분석하여 제안 시스템의 내진성능 향상 효과를 검증하였다.

## 2. 듀얼프레임 제진시스템의 개요

강도저항형 코어시스템의 강도저항형 코어는 수평하중에 저항할 뿐만 아니라 프레임의 가새 역할을 한다. 프레임이 횡구속이 되면 수평력에 대해 프레임의 변위가 줄어든다. 하지만 수평력 작용 시 같은 변위에서 상대적으로 강성이 작은 프레임보다 강성이 큰 강도저항형 코어의 소성화가 선행되므로 지진에 의한 손상이 소성변형능력이 보증되지 않는 코어에 집중되어, 내진성능이 저하될 우려가 있다. 또한 강도저항형 코어와 프레임이 이종재료로 구성될 경우 응력전달이 원활하지 않아 접합부에 손상이 집중되어 파단발생의 확률이 높아질 수 있다. 하지만 강도저항형 코어와 프레임을 서로 다른 두 독립된 구조체로 고려하여 댐퍼로 연결하면, 진동주기 차이로 인해 발생한 상대변위에 의해 댐퍼가 소성거동 함으로써 에너지를 소산시켜 상당한 횡변위 저감을 기대할 수 있다. 따라서 본 연구에서는 강도저항형 코어와 프레임의 연결부에 댐퍼가 설치된 듀얼프레임 제진시스템을 제안하였다.

제안된 시스템의 개념을 Fig. 1에, 각 구성요소의 복원력 특성을 Fig. 2에 나타내었다. 강도저항형 코어는 주로 수평하중에 저항하도록 설계하기 때문에 상대적으로 횡하중에 대한 전단강성이 크고 질량이 작다. 프레임은 수직하중을 지지하는 역할이 대부분이기 때문에 코어보다 상대적으로 전단강성이 작고, 질량이 크다. 지진에 의해 상대적으로 고유주기가 짧은 코어는 작은 진폭으로 빠르게 진동하게 되고, 고유주기가 긴 프레임은 천천히 큰 진폭으로 진동하게 된다. 따라서 코어와 프레임의 상대변위가 발생되어, 두 구조체 사이에 설치된 제진댐퍼가 선행 항복함으로써 상대변위에 의해

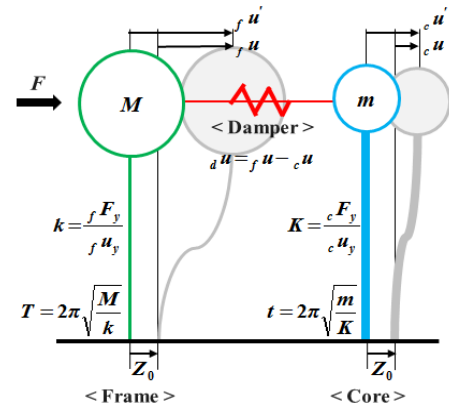


Fig. 1. Concept of the dual-frame vibration control system

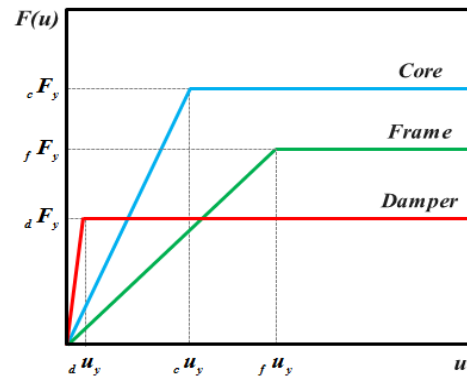


Fig. 2. Restoring force characteristics of the dual-frame vibration control system

발생된 진동에너지를 흡수하여 전체 시스템은 탄성상태로 손상을 최소화시킬 수 있다.

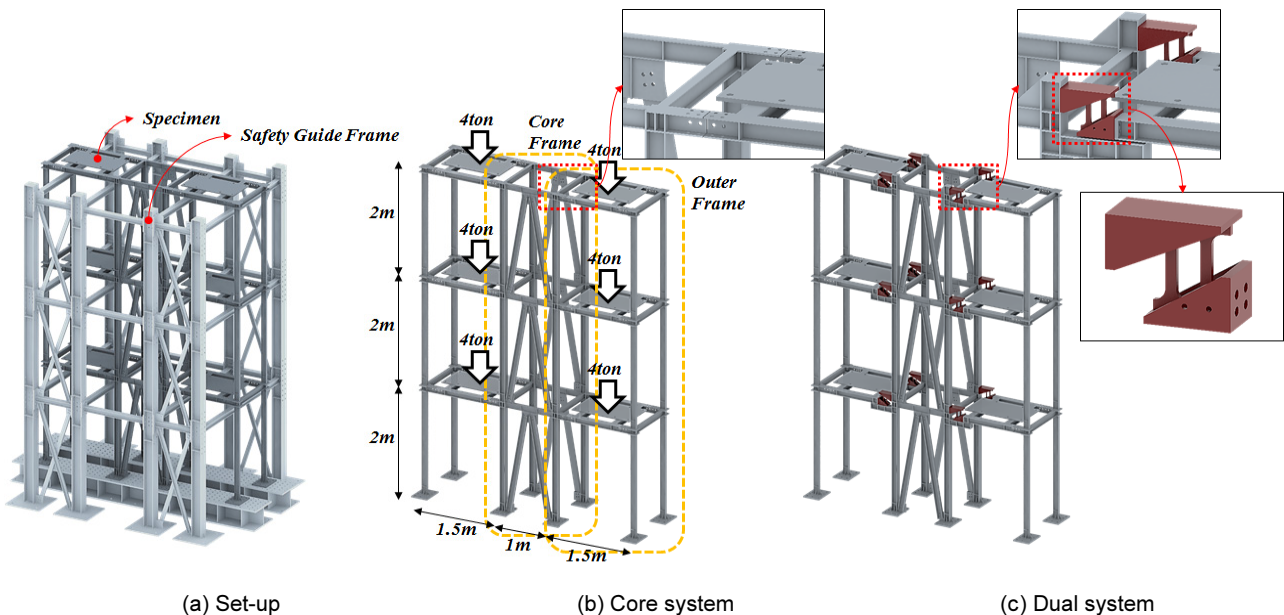


Fig. 3. Global view of specimens

### 3. 진동대 실험

#### 3.1 실험체 개요

본 연구에서는 진동대 실험을 통해 듀얼프레임 제진시스템의 동적응답 특성을 분석하였다. 실험체는 종래의 구조시스템과 본 연구에서 제안하는 듀얼프레임 제진시스템의 내진성능을 비교평가하기 위하여 Fig. 3 (b)와 같이 기존 강도저항형 코어시스템(이하 코어시스템)과 Fig. 3 (c)와 같이 듀얼프레임 제진시스템(이하 듀얼시스템) 2가지로 구성하였다.

실험체는 Fig. 4에 나타낸 바와 같이 각 층에 댐퍼가 설치된 고층건물로 설계하여야 하나, 실험환경을 고려하여 고층건물에 3층 간격으로 댐퍼가 설치된 축소된 구조물로 가정하여 설계하였다. 또한 코어프레임과 외부프레임으로 구성된 구조물로 설계하였으며, 코어프레임의 기둥은 상대적으로 큰 강성을 가지기 위해 외부프레임 기둥보다 강하게 설계하였다. 또한 선행연구[7]에서 실험체의 충분한 손상가동을 유도하기 위하여 산정된 연직하중을 이용하여, 실험체 각 층의 하중은 80kN으로 설계하였다. Fig. 5에서 보는바와 같이 횡력에 대하여 콘크리트 전단벽은 균열에 의한 강도저항형 복원력 특성을 가진다[8]. 가새골조의 경우에도 횡력에 대하여 가새의

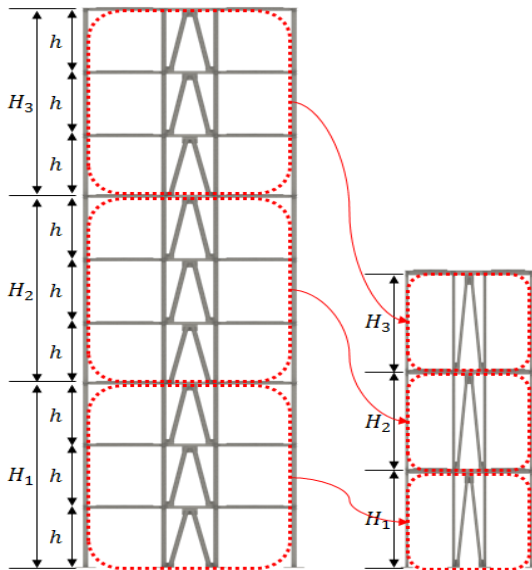


Fig. 4. Scaling of the specimen

좌굴에 의해 콘크리트 전단벽과 유사한 복원력 특성을 가지므로[9], 본 연구에서는 강도저항형 코어 부분을 실험체 제작의 용이성을 고려하여 철골 역V형 가새골조로 제작하였다. 듀얼시스템의 경우 부재 크기 및 단면은 코어시스템과 동일하며, 코어프레임 기둥과 외부프레임 보 단부 사이에 댐퍼를 설치하였다. 또한 듀얼시스템은 코어프레임과 외부프레임이 댐퍼에 의해 연결되어 있는 형태이기 때문에 댐퍼 파단 후 외부프레임 상부에 설치된 무게에 의해 중력에 저항하지 못하고 붕괴될 우려가 있다. 따라서 Fig. 6에 표시된 부분과 같이 연직하중에 대하여 저항할 수 있도록 코어 기둥에 짧은 캔틸레버 보를 설계하여 댐퍼는 수평력에만 저항할 수 있도록 고려하였다. 최종적으로 설계된 부재를 Table 1에 정리하여 나타내었다.

#### 3.2 듀얼시스템 댐퍼설계

듀얼시스템은 코어시스템과 달리 강도저항형 코어와 프레임이 댐퍼로 연결되어있다. 본 연구에서는 고에너지 흡수능력 및 시공성 등을 고려하여, 듀얼시스템 실험체 설계 시 강재 이력댐퍼를 사용하였다. 강재 이력요소는

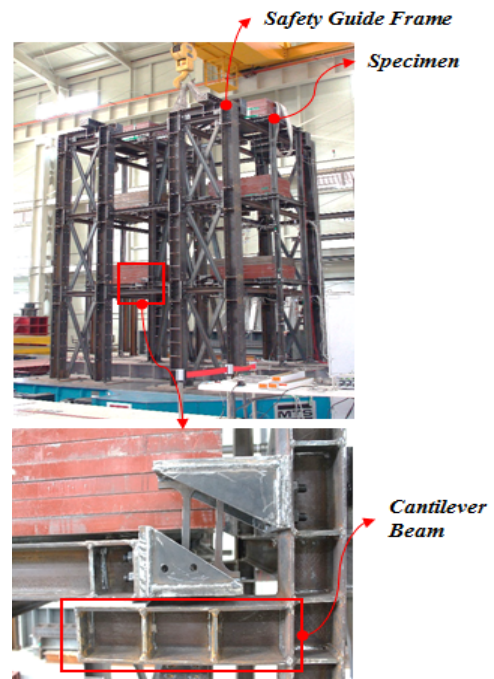


Fig. 6. Setting up the specimen

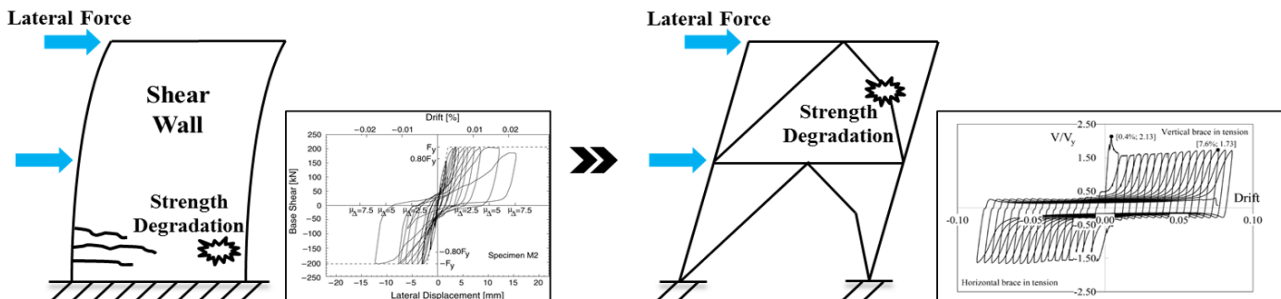


Fig. 5. Lateral behavior of concrete shear walls and steel braced frames

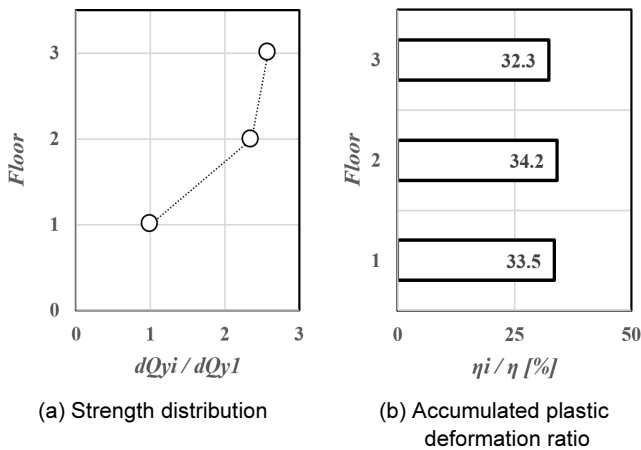
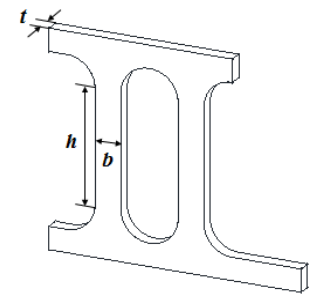
**Table 1.** Properties of members

members		Section(mm)	Length(mm)	Steel Grade
Core Frame	Column	H-100X100X6X8	2000	SS400
	Beam	H-100X50X4X6	1000	
	Out-of-plane beam	H-100X50X4X6	1000	
	Brace	C-100X50X5X7.5	1840	
Outer Frame	Column	H-100X50X4X6	2000	
	Beam	H-100X100X6X8	1500	
	Out-of-plane beam	H-100X50X4X6	1000	

**Table 2.** Damper characteristics of each floor

Floor	$t$ (mm)	$b$ (mm)	$h$ (mm)	${}_dQ_y$ (kN)	${}_d k$ (kN/mm)	${}_d \delta_y$ (mm)	$\eta$	$\eta_i / \eta$ (%)
1	12	14.0	100	5.10	7.37	0.69	363	33.48
2	12	21.5	100	12.03	24.08	0.50	371	34.17
3	12	22.5	100	13.18	27.81	0.47	351	32.35

\*  ${}_d Q_y$  : Yield shear strength,  ${}_d k$  : Initial stiffness,  ${}_d \delta_y$  : Yield displacement,  $\eta$  : Accumulated plastic deformation ratio



**Fig. 7.** Dampers distribution factor

강재의 항복변위에 의해서 에너지를 흡수하는 형식으로 주골조보다 상대적으로 큰 수평강성을 가지면서 낮은 항복강도를 갖도록 설계하여 주변 부재보다 먼저 소성변형을 일으켜 에너지를 흡수한다. 그 중에서도 강재 슬릿 플레이트 댐퍼는 유지보수 및 교체 용이하고, 설계가 자유롭다는 장점이 있다.

실험적 각 층 댐퍼의 내력 및 강성을 산정하기 위하여 먼저 1층 외부프레임의 내력 및 강성을 산정하였다. 골조에 대한 댐퍼의 내력비, 강성비에 따른 댐퍼의 에너지 흡수효율에 대한 선행 연구결과[10]를 바탕으로 1층 외부프레임에 대한 1층 댐퍼의 내력은 0.6배, 강성은 4배 이상이 되도록 충분히 크게 설계하였다. 상부층 댐퍼의 내력 및 강성을 산정하기 위해 비선형 동적 지진응답해석 프로그램인 CANNY(Ver. C2012)[11]를 사용하여

반복해석을 수행하였다. 입력파는 실험에서 사용될 El-Centro NS파를 사용하였고, 충분히 소성화 된 결과를 확인하기 위해 입력파 스케일(Scale)을 200%로 조정하여 응답해석을 실시하였다.

Fig. 7 (a)에 설계된 각 층 댐퍼의 내력분포를 나타내었다. x축은 i층 댐퍼의 내력을 1층 댐퍼의 내력으로 나누어 정규화시켜 나타내었고, y축은 층으로 나타내었다. 댐퍼의 내력은 1층에서 가장 작고, 3층에서 가장 크게 산정하였으며, 이는 지상에 고정된 두 구조물간 진동주기차에 의한 상대변위는 최상층에서 가장 크게 나타나기 때문에 전 층 댐퍼의 손상이 동일하도록 최상층에서 댐퍼의 내력을 가장 크게 설계하였다.

누적소성변형 배율은 지진으로 인해 발생하는 구조물의 소성변형 에너지를 항복개시까지의 탄성변형 에너지에 대한 무차원량으로 나타낸 값이다. 각 부재의 누적소성변형배율에 대한 정의는 식 (1)과 같이 표현된다. Fig. 7 (b)의 누적소성배율분포를 위한 각 층의 내력 분포는 Fig. 7 (a)와 같고, Fig. 7 (a)의 내력으로 설계한 댐퍼의 사양은 Table 2와 같다.

$$\eta = \frac{W_p}{Q_y \delta_y} \tag{1}$$

여기서,  $W_p$  : 소성변형에너지,  $Q_y$  : 항복전단력,  $\delta_y$  : 항복변위

### 3.3 실험방법

본 실험에서는 각 층의 절대가속도, 상대변위, 부재의 변형을 계측하기 위하여 Fig. 8에 나타난 위치에 가속도계, 동적 변위계, 스트레인 게이지를 설치하였다. 실험에 사용된 지진파는 El-Centro NS파(PGA 341cm/s<sup>2</sup>,



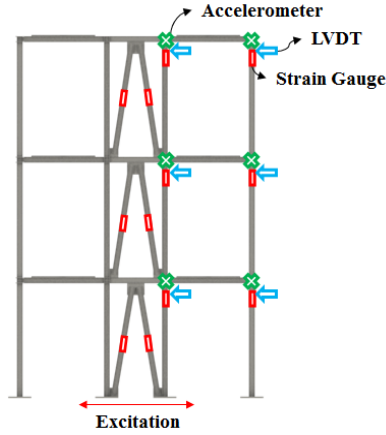


Fig. 8. Measurement location

Table 3. Excitation protocol

Step	Scale(%)	PGA(cm/s <sup>2</sup> )	V <sub>E</sub> *(cm/s)
1	10	34.1	7.0
2	30	102.3	20.9
3	50	170.5	34.8
4	70	238.7	49.7
5	100	341.0	69.7
6	130	443.3	90.6
7	160	545.6	111.5
8	190	647.9	132.4
9	220	750.2	153.2

\* V<sub>E</sub> : Energy Equivalent Velocity

1940년)이며, 실험진행은 최대지반가속도(Peak Ground Acceleration, 이하 PGA)를 기준으로 스케일을 조정하여 총 9단계(10, 30, 50, 70, 100, 130, 160, 190, 220%)의 크기로 나누어 단계적으로 진행하였다. 실험 단계별 지진파의 크기를 Table 3에 나타내었다. 통상적으로 지진파의 크기를 대표하는 최대가속도는 특정시간에서의 응답이므로 총 지동시간 동안의 지진파의 크기를 규명하기에는 대표성이 다소 부족하여, 본 실험에서는 총 입력에너지를 속도로 환산한 에너지등가속도(V<sub>E</sub>)를 설계용 에너지스펙트럼과 비교하여 가진 스케일에 따른 입력에너지를 평가하였다. 에너지 등가속도(V<sub>E</sub>)를 알기 위해서는 먼저 외력에 의한 입력에너지를 산정할 필요가 있다. 외력에 의해 구조물에 입력되는 에너지를 평가하기 위해서는 일반적으로 알려져 있는 진동방정식을 이용하여 에너지 평형식을 유도할 수 있다. 외력을 받는 단자유도계의 진동방정식은 식(2)와 같다.

$$M\ddot{u} + C\dot{u} + F(u) = -M\ddot{z}_0 \quad (2)$$

여기서, M: 질점의 질량, C: 감쇠 계수, F(u): 계의 복원력,

$\ddot{z}_0$ : 지동 가속도, u,  $\dot{u}$ ,  $\ddot{u}$ : 상대변위, 속도, 가속도

식(2)는 특정시간에서의 계의 힘의 평형상태를 나타내며 그 시간에서의 구조물의 응답을 얻을 수 있지만, 구조물의 손상정도 및 파괴양상을 예측하

기에는 어려움이 있다. 이에, 위의 식(2)의 양변에 변위증분(du =  $\dot{u}dt$ )을 곱하고 총 지동시간(t<sub>0</sub>)으로 적분하여 얻은 에너지 평형식을 이용하여 구조물의 거동을 분석할 수 있다. 에너지 평형식은 다음의 식(3) 또는(4)의 형태로써 나타낼 수 있다[12].

$$\int_0^{t_0} M\ddot{u}\dot{u}dt + \int_0^{t_0} C\dot{u}^2dt + \int_{u(0)}^{u(t_0)} F(u)\dot{u}dt = -\int_0^{t_0} M\ddot{z}_0\dot{u}dt \quad (3)$$

여기서, t<sub>0</sub>: 지동 계속시간

$$W_e(t) + W_p(t) + W_h(t) = E(t) \quad (4)$$

$$E(t) = -\int_0^t M\ddot{z}_0\dot{u}dt \text{ (입력되는 총 에너지)}$$

$$W_e(t) + W_p(t) = M\int_0^t \dot{u}\ddot{u}dt + \int_0^t F(u)\dot{u}dt$$

$$W_h = C\int_0^t \dot{u}^2dt \text{ (감쇠에 의해 소비된 에너지)}$$

여기서, W<sub>e</sub>: 탄성진동에너지, W<sub>p</sub>: 누적소성변형에너지

식(4)의 우변은 계에 입력되는 총 에너지로서 식(5)에 의하여 구할 수도 있다.

$$E = \frac{MV_E^2}{2} \left( V_E = \sqrt{\frac{2E}{M}} \right) \quad (5)$$

여기서 V<sub>E</sub>는 에너지 등가속도로 지반 가속도에 의해 입력되는 에너지를 등가의 속도로 환산한 값이며, 에너지(E)를 질량(M)에 대하여 무차원화한 값이다. 이는 건축물의 중량에 관계없이 입력되는 에너지로 설계 지진하중을 평가할 수 있는 장점이 있다.

### 3.4 실험결과 및 분석

#### 3.4.1 소재 시험

강재의 기계적 성질을 파악하기 위하여 각 부재로부터 인장시험편을 채취하여 KS B 0801의 금속재료인장시험편 규준에 따라 판형 시험편을 제작하여 소재인장시험을 수행하였으며, Table 4에 소재시험결과를 나타내었다.

Table 4. Material test results

No.	t(mm)	σ <sub>y</sub> (MPa)	σ <sub>t</sub> (MPa)	E(MPa)	Elongation(%)	Yield ratio
1	4	294.19	375.98	180770.8	25.5	0.78
2	6	277.89	418.45	201472.2	27	0.66
3	12	276.09	424.45	199222.2	30.83	0.65

\* t: Thickness, σ<sub>y</sub>: Yield stress, σ<sub>t</sub>: Tensile stress, E: Young's modulus

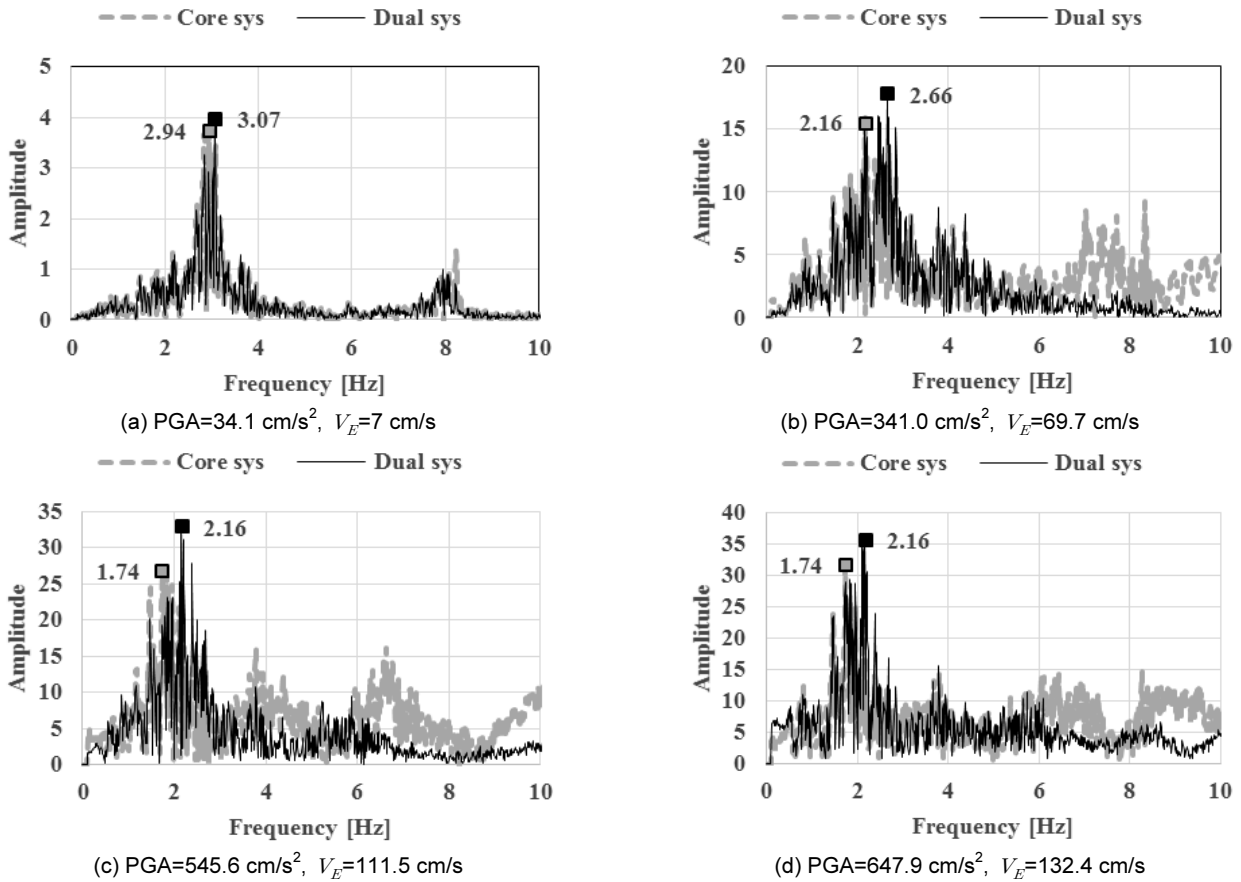


Fig. 9. Frequency spectrum

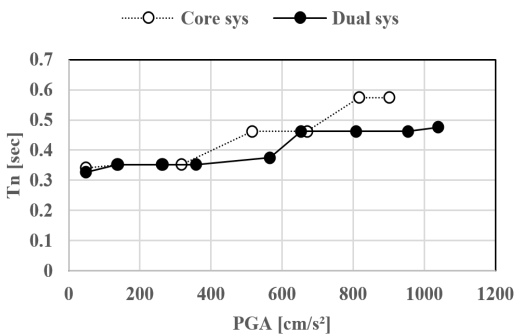


Fig. 10. Natural period of both systems

### 3.4.2 고유치

Fig. 9에 주파수 스펙트럼 분석결과를, Fig. 10에 출력과 PGA(Peak Ground Acceleration)에 따른 두 시스템의 고유주기 변화를 나타내었다. 주파수 분석을 위하여 최상층에서 측정된 가속도 응답에 대하여 FFT(Fast Fourier Transform) 분석을 실시하였다. 실험체가 거의 탄성을 유지하고 있는 가진단계에서는 코어시스템과 듀얼시스템의 고유주기는 모두 0.35초로 동일하게 분석되었다. 가진 4단계 이후 코어시스템은 구조체의 손상에 의해 고유주기가 증가하여 최종 가진단계에서 약 1.6배 증가한 0.57초로 분석되었다. 듀얼시스템의 경우 가진 6단계에서 댐퍼의 거동에 의해 고유주

기가 증가하였고, 이후 가진단계에서는 댐퍼에 의해 지진입력에너지가 흡수되어 구조체의 손상을 저감시킴으로써 시스템의 고유주기는 더 이상 증가하지 않고 거의 일정한 값을 가지는 것으로 확인되었다. 최종 가진단계에서 약 1.3배 증가한 0.46초로 분석되었다.

### 3.4.3 가속도 응답

Fig. 11에 출력과 PGA에 따른 최상층의 최대 응답가속도를 나타내었다. 전체적으로 가진단계가 증가함에 따라 가속도 응답이 증가하는 경향을 나타내었다. 가속도 응답의 경우 실험 시 볼트접합 슬립 등과 같은 여러 가지 간섭에 의해 다소 편차가 발생하고 있으나, 전체적인 경향성을 파악하는데 무리가 없다고 판단되어, 가진 1~6단계의 결과에 대하여 층별 최대 응답가속도를 Fig. 12에 나타내었다. 구조물이 탄성상태인 가진 4단계까지 코어시스템과 듀얼시스템이 각 층에서 거의 비슷한 최대 응답치를 나타내었으나, 가진 5단계 이후에는 코어시스템에 비해 듀얼시스템에서는 댐퍼의 소성화에 의해 응답가속도가 작아지는 경향을 나타내었다. 특히, 가진 6단계에서 듀얼시스템의 최상층의 최대 응답가속도는 코어시스템에 비하여 약 82.5% 저감되는 것으로 나타났다. 이는 듀얼시스템에 설치된 댐퍼가 지진입력에너지를 흡수하여 구조물에 입력되는 가속도를 저감시켜 전체적으로 시스템의 가속도 응답이 저감된 것으로 판단된다.

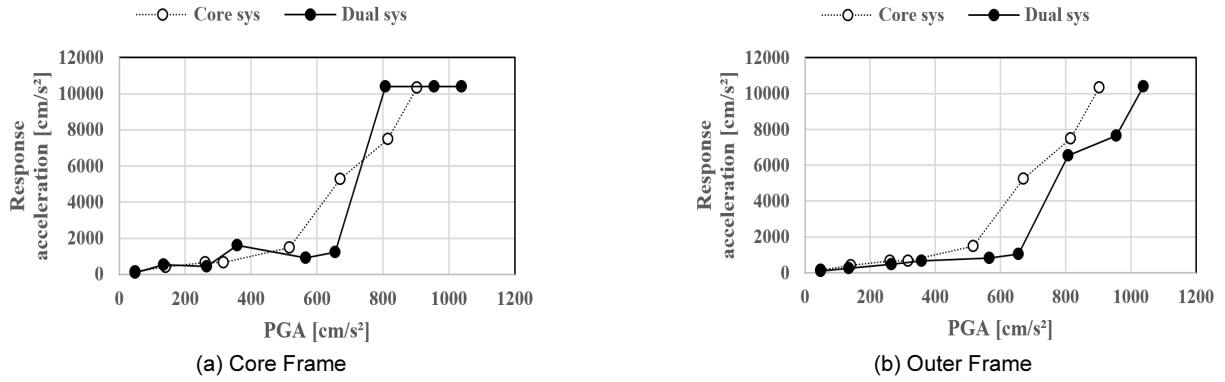


Fig. 11. Maximum response acceleration of both systems

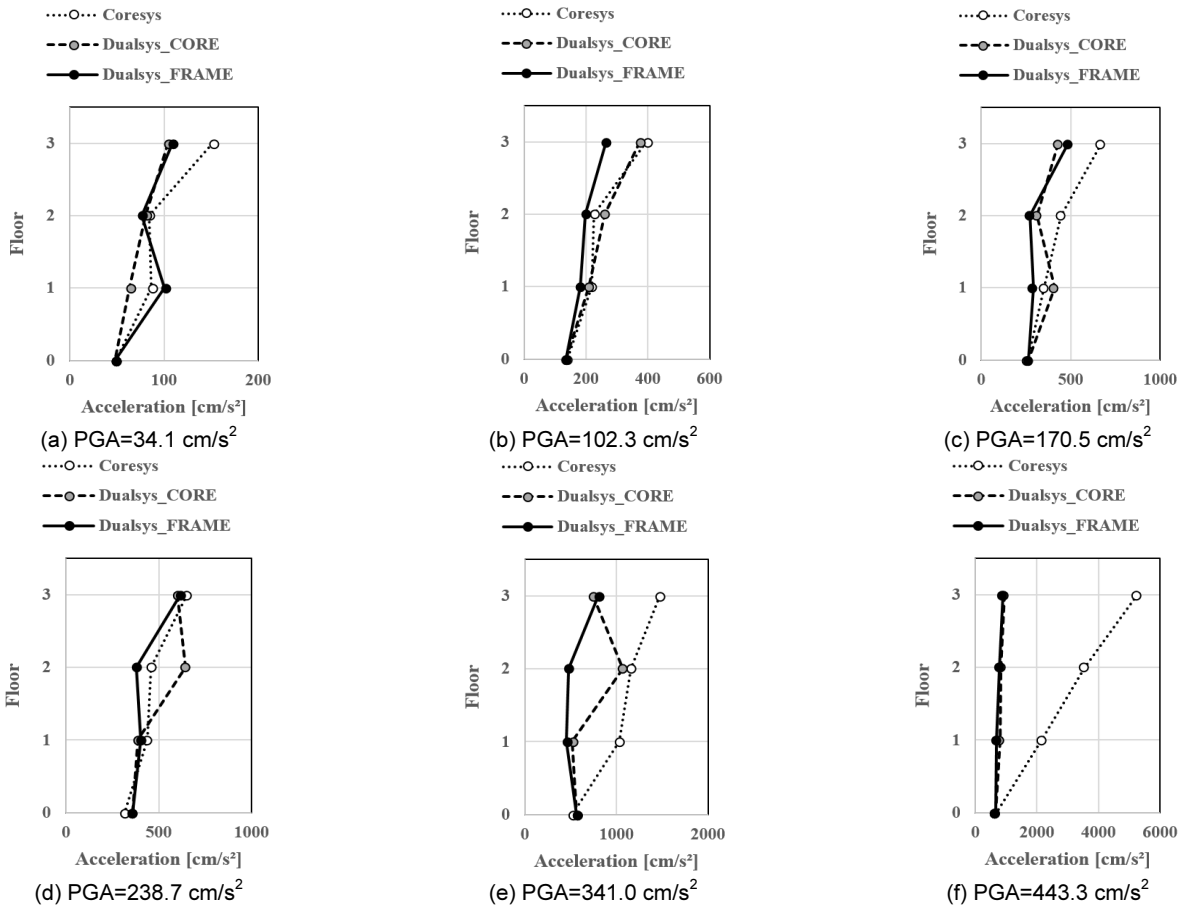


Fig. 12. Maximum response acceleration of each floor

### 3.4.4 변위 응답

Fig. 13에 코어시스템과 듀얼시스템의 코어프레임과 외부프레임에 대하여 출력과PGA에 따른 최상층의 최대 응답변위를 나타내었다. 코어시스템과 듀얼시스템 모두 가진단계가 진행됨에 따라 최대응답변위는 증가하는 경향을 나타내고 있으나, PGA가 커질수록 듀얼시스템의 응답변위의 저감효과가크게 나타났다. Fig. 14에 가진 2, 3, 6, 7단계에 대하여 층별 최대 응답변위를 나타내었다. 구조물이 탄성상태인 가진 2, 3단계에서 코어시스템과 듀얼시스템이 거의 비슷한 응답을 보였으나, 댐퍼의 소성화가 진행된

이후 가진 6, 7단계에서는 코어시스템에 비해 듀얼시스템의 최대응답변위는 저감되어, 가진 7단계에서 듀얼시스템의 최상층의 최대 응답변위는 코어시스템에 비하여 약 56.4% 저감되는 것으로 확인되었다. 또한 듀얼시스템의 코어프레임과 외부프레임 간 변위차가 발생하는 것을 확인하였고, 발생한 변위차 만큼 댐퍼가 소성거동하여 대부분의 입력에너지를 소산함으로써 전체 골조의 응답변위를 저감시킨 것으로 판단된다.

층별 손상을 확인하기 위해 가진 2, 3, 6, 7단계에서 층별 최대 응답층간 변형각을 Fig. 15에 나타내었다. 가진단계가 진행됨에 따라 듀얼시스템의 최대 응답층간변형각은 코어시스템에 비해 저감률이 증가되었으며, 가진 7

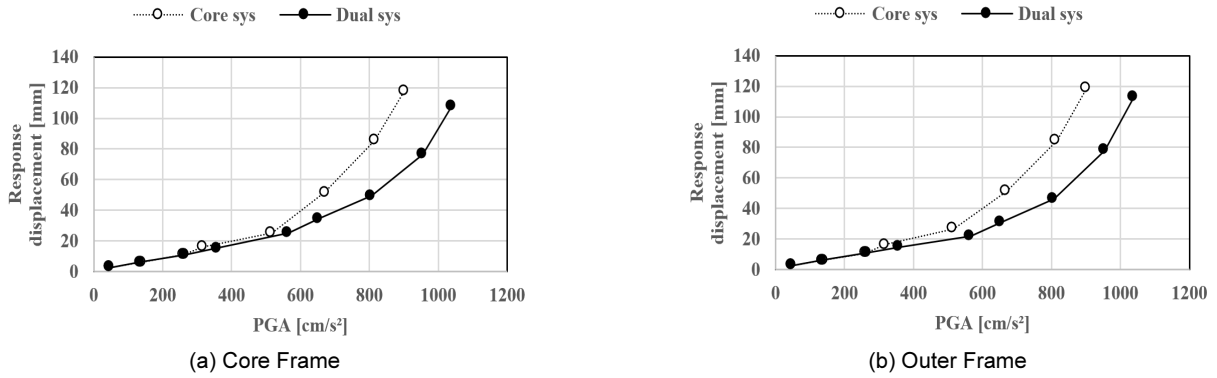


Fig. 13. Maximum response displacement of both systems

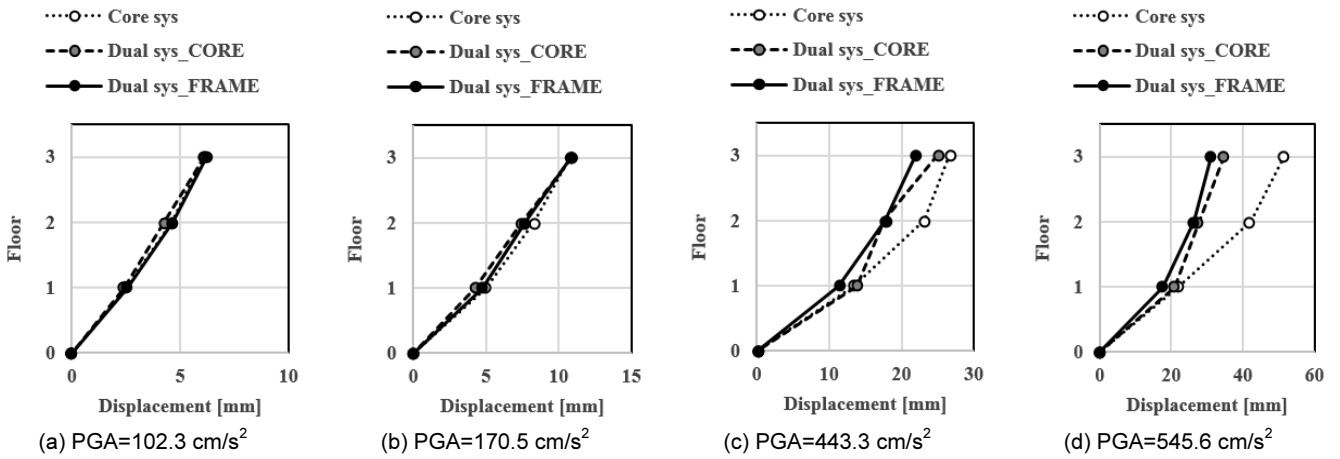


Fig. 14. Maximum response displacement of both systems

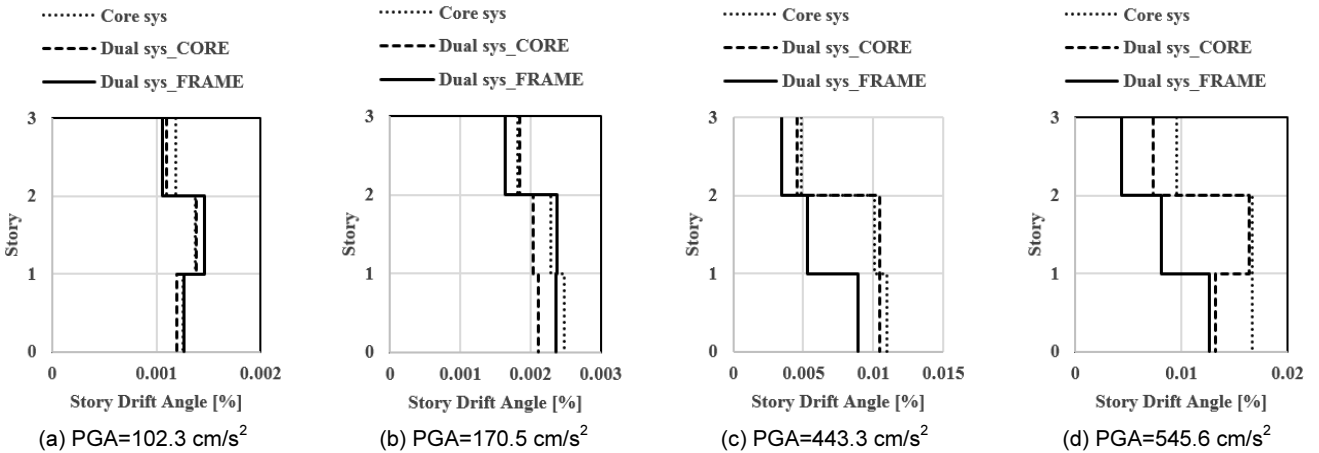


Fig. 15. Maximum response story drift angle of both systems

단계에서 듀얼시스템의 코어프레임과 외부프레임의 층간변형각은 코어시스템에 비하여 각각 22.9, 54.1% 저감되어, 외부프레임의 층간변형각이 코어프레임에 비하여 더 크게 줄어드는 것으로 확인되었다.

### 3.4.5 부재의 변형률

부재가 항복하기 시작하는 가진 4단계 이후에 항복점 분포를 비교하기

위하여 코어시스템에 대하여 Fig. 16에, 듀얼시스템에 대하여 Fig. 17에 나타내었다. 계속 계획에 따른 스트레인 게이지 부착위치에 대하여 재료실험 결과에 따라 항복변형률 0.0015를 기준으로 항복여부를 판단하였으며, 손상분포를 소성화 정도에 따라 다른 원형 표식으로 구분하였다. 코어시스템의 경우 1층 기둥에 손상이 집중된 반면, 듀얼시스템은 각 층에 손상이 분산되었다. 또한 댐퍼에 손상이 집중되어 보, 기둥 등의 주요 구조부재에 손상이 거의 발생하지 않았으며, 최종 가진단계에서 각 층의 댐퍼에 손상이 고



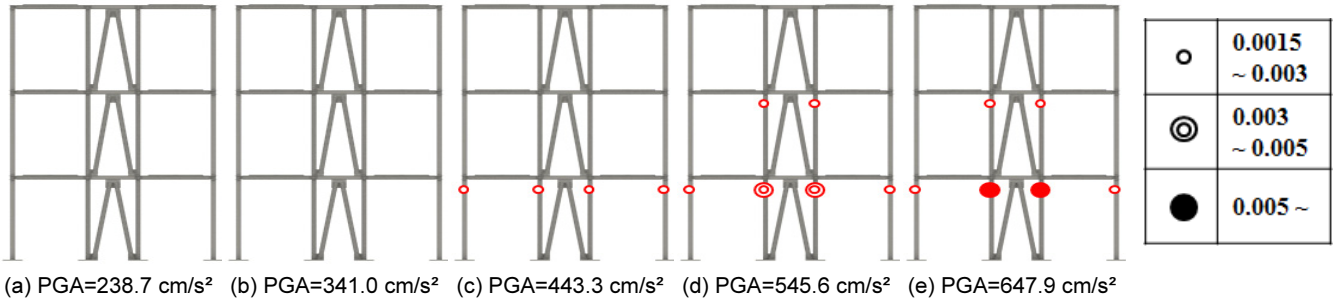


Fig. 16. Damage distribution of the core system

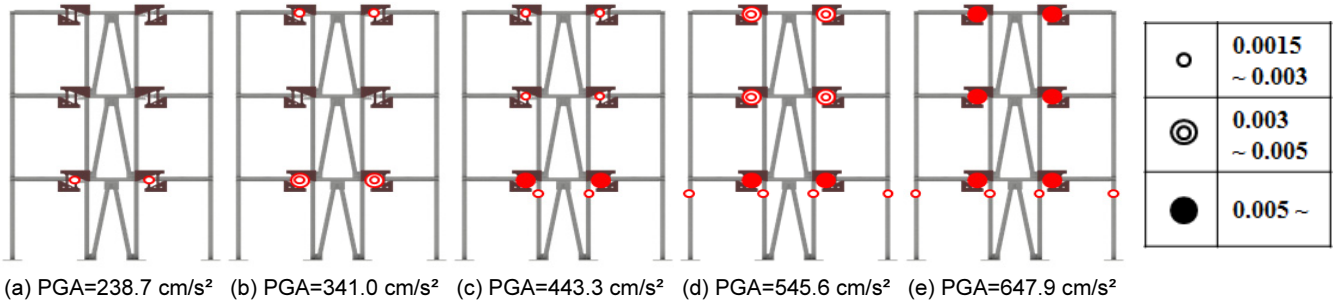


Fig. 17. Damage distribution of the dual system

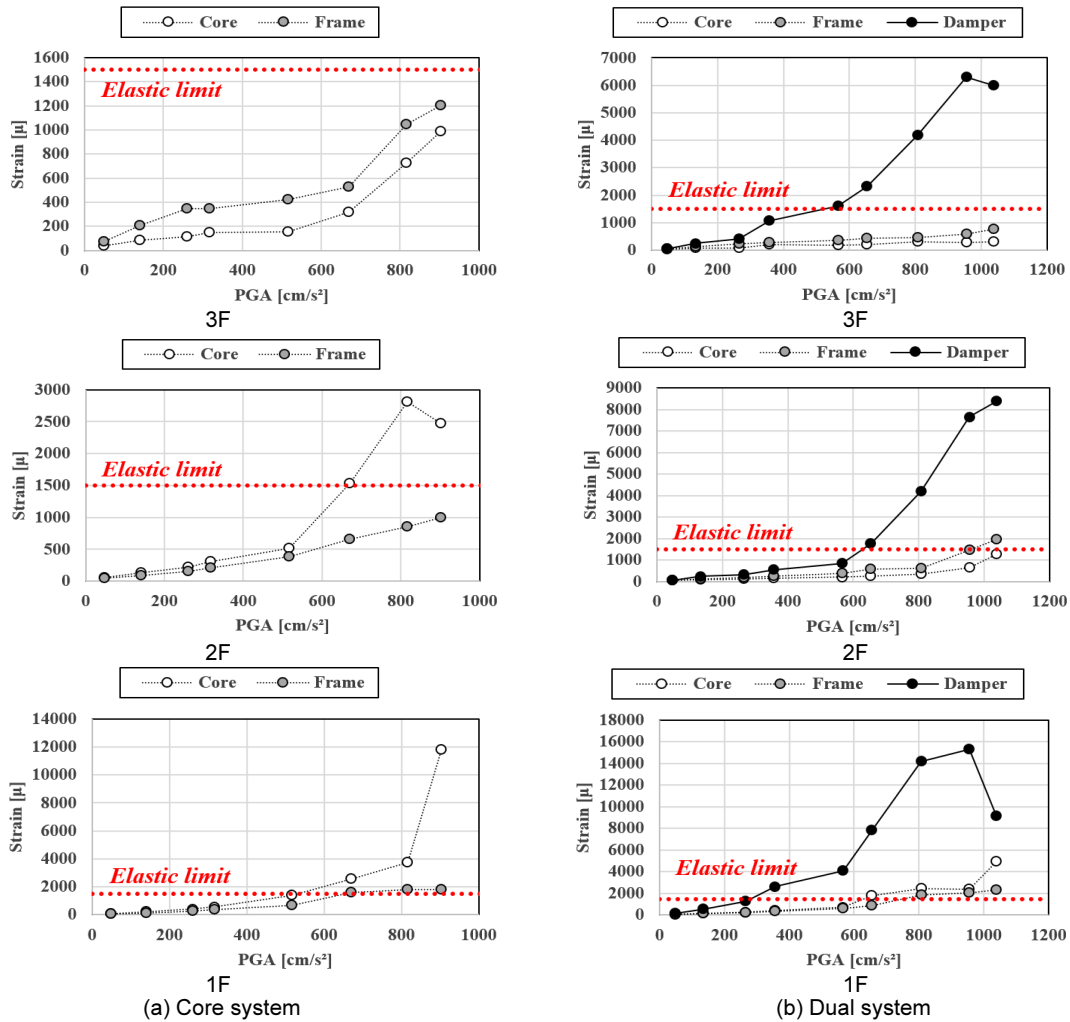


Fig. 18 Strain of the both systems

르게 분산되고 있음을 알 수 있다.

Fig. 18에 출력과 PGA에 따른 코어시스템과 듀얼시스템의 변형률을 나타내었다. 코어시스템의 코어에서 대부분 소성화되는 반면, 듀얼시스템의 경우 1층 코어에서 다소 소성화되나 거의 탄성에 머물고 있는 것으로 나타났다. 이는 코어시스템에 비해 듀얼시스템의 내진성능이 향상되고 있음을 나타내고 있다.

#### 4. 결론

본 연구에서는 강도저항형 코어와 프레임 간 강재이력댐퍼를 설치한 시스템을 대상으로 하여 진동대 실험을 통하여 대상 시스템의 횡변위 저감효과를 검증하였다. 본 연구의 결과를 정리하면 다음과 같다.

- 1) 실험체가 탄성을 유지하고 있는 가진단계에서 코어시스템과 듀얼시스템의 고유주기는 모두 0.35초로 동일하였다. 소성화가 진행된 이후 최종 가진단계에서 코어시스템의 고유주기는 주요부재의 손상에 의하여 약 1.6배 증가한 0.57초였으나, 듀얼시스템의 경우 주로 손상은 댐퍼에 집중되어 고유주기가 1.3배 증가한 0.46초로 나타나 주요부재의 손상이 저감되고 있음을 알 수 있다.
- 2) 최대 응답가속도는 구조물이 탄성상태인 가진단계까지 코어시스템과 듀얼시스템이 각 층에서 거의 비슷한 최대 응답치를 나타내었으나, 가진 6단계에서 듀얼시스템의 최대 응답가속도는 코어시스템에 비해 약 82.5% 저감된 것으로 나타났다.
- 3) 코어시스템의 최종 가진단계에서 듀얼시스템의 최대 응답변위는 댐퍼가 에너지를 흡수함으로써 코어시스템에 비해 코어프레임과 외부프레임에서 각각 35, 34% 저감되는 것으로 나타났다. 또한 실험체의 손상상태를 주요부재의 변형률 변화를 이용하여 분석하였다. 코어시스템의 경우 1층 기둥에 손상이 집중되는 경향으로 나타난 반면, 듀얼시스템은 주요 구조부재에 손상이 거의 발생하지 않았으며, 댐퍼에 손상이 집중되어 최종 가진단계에서 각 층의 댐퍼에 손상이 고르게 분산되는 것으로 나타났다.
- 4) 본 연구에서는 진동대 실험을 통하여 제안된 듀얼프레임 제진시스템의 내진성능을 검증하였다. 결과적으로 지진동에 의한 입력에너지를 댐퍼에 의도적으로 집중시킴으로써 주요 구조부재의 손상은 최소화하고, 더불어 전체 골조의 횡변위 저감효과도 탁월한 것으로 나타났다. 향후 연구에서 다변수 지진응답해석을 수행하여 실제 적용을 위한 설계프로세스를 정립할 필요가 있다고 사료된다.

#### / 감사의 글 /

본 논문은 POSCO의 연구지원으로 수행되었음.

#### / REFERENCES /

1. Park JH, Kim GM, Vibration Control Utilizing Interactions between a Moment Frame and a Shear Wall, Journal of the Architectural Institute of Korea Structure and Construction, 2010 Sept;26(9):31-38.
2. Kim JK, Ryu JG, Chung L, Seismic Performance of Structures Connected by Viscoelastic Dampers, Engineering Structures, 2006; 28:183-195.
3. Zhang WS, Xu YL, Dynamic Characteristics and Seismic Response of Adjacent Buildings Linked by Discrete Dampers, Earthquake Engineering and Structural Dynamics, 1999;28:1163-1185.
4. Li H, Wang SY, Song G, Liu G, Reduction of Seismic Forces on Existing Buildings with Newly Constructed Additional Stories Including Friction Layer and Dampers, Journal of Sound and Vibration, 2004;269:653-667.
5. Zhang WS, Xu YL, Vibration Analysis of Two Buildings Linked by Maxwell Model-defined Fluid Dampers, Journal of Sound and Vibration, 2000;233(5):775-796.
6. Ying ZG, Ni YQ, Ko JM, Stochastic Optimal Coupling-control of Adjacent Building Structures, Computers and Structures, 2003;81: 2775-2787.
7. Kim TK, Oh SH, The Study of the Response Characteristics Analysis according to the Lateral Displacement Control System of a Central Core Structure, Journal of the Architectural Institute of Korea Structure and Construction, 2014 Nov;10(1):35-36.
8. Christian G, Pierino L, Static cyclic tests on lightly reinforced concrete shear walls, Engineering Structures, 2005 Apr;27:1703-1712.
9. Giovanni M, Theoretical and experimental study on the cyclic behaviour of X braced steel frames, Engineering Structures, 2012 Feb;46:763-773.
10. OH SH, The Performance and Design of Passive Control System using Hysteretic Dampers, SIVIC 2nd International Symposium, 2006.
11. Kang Ninig Li, CANNY manual, c2012.
12. Akiyama H, Earthquake-Resistant Design Method for Buildings Based on Energy Balance, c2002.
13. OH SH, Seismic design of energy dissipating multi-story frame with flexible-stiff mixed type connection, Ph.D. thesis, Tokyo University; c1998.
14. Park J, Reinhorn AM, Kunnath SK, IDARC : Inelastic Damage Analysis of Reinforced Concrete Frame - Shear-Wall Structures, YTechnical Report NCEER-87-0008, c1987.
15. Kim TW, Douglas A, James M, James W, PERFORMANCE ASSESSMENT OF REINFORCED CONCRETE STRUCTURAL WALLS FOR SEISMIC LOADS, c2004.
16. Nathan BC, Matthew R, David A, Tuğ e A, Self-Centering Seismic Lateral Force Resisting Systems: High Performance Structures for the City of Tomorrow, buildings, 2014;4:520-548.
17. OH SH, Seismic Performance of Vibration Control Structural System with Hysteretic Damper, Earthquake Eng, 2011 Sept;733-754 .