

# E-Shape 강재이력댐퍼의 수치모델과 기초격리구조물의 지진응답

## A Study on Base Isolation Performance and Phenomenological Model of E-Shape Steel Hysteretic Damper

황인호\* · 주민관\*\* · 심종성\*\*\* · 이종세\*\*\*\*

Hwang, Inho · Ju, Minkwan · Sim, Jongsung · Lee, Jong Seh

### Abstract

Recently, as large structures become lighter and more flexible, the necessity of structural control for reducing excessive displacement and acceleration due to seismic excitation is increased. As a means to minimize seismic damages, various base isolation systems are adopted or considered for adoption. In this study, a base isolation system using hysteretic damper is shown to effectively protect structures against earthquakes. A mechanical model is determined that can effectively portray the behavior of a typical E-shape device. Comparison with experimental results for a hysteretic damper indicates that the model is accurate over a wide range of operating conditions and adequate for analysis. The seismic performance of hysteretic dampers are studied and compared with the conventional systems as a base isolation system. A five-story building is modeled and the seismic performance of the systems subjected to three different earthquake is compared. The results show that the hysteretic damper system can provide superior protection than the other systems for a wide range of ground motions.

Keywords : e-shape, steel hysteretic damper, bouc-wen model, base isolation system

### 요 지

최근 대규모의 지진피해로 인해 내진설계에 대한 관심이 높아지면서, LRB(Lead Rubber Bearing), FPS(Friction Pendulum System) 등 다양한 지진격리장치에 대한 연구가 진행되고 있다. 본 연구에서 E-Shape 강재이력댐퍼를 이용한 지진격리장치의 성능 평가를 위해 E-Shape 댐퍼의 동적거동 실험을 수행하였으며, 이를 바탕으로 해석적 연구를 위한 수치모델을 제안하였다. 또한, 제안된 E-Shape 강재이력댐퍼의 수치모델을 6자유도를 가진 5층 건물에 적용하여 LRB 시스템과 이력거동을 비교하여 지진격리성능 평가를 수행하였다. 본 연구를 통하여 제안된 수치모델은 실제 E-Shape 강재이력댐퍼의 동적거동을 적절히 묘사할 수 있으며, E-Shape 강재이력댐퍼는 비선형 거동을 통한 에너지를 적절히 소산시킴으로서 기존 시스템과 비교하여 충분히 지진격리성능을 발휘할 수 있을 것으로 사료된다.

핵심용어 : E-Shape, 강재이력댐퍼, Bouc-Wen Model, 지진격리장치

### 1. 서 론

최근 전 세계적으로 대규모의 지진이 연이어 발생하여 엄청난 인명과 경제적 손실을 가져왔다. 이러한 지진의 피해로 인하여 우리나라를 비롯한 많은 나라에서 주요 사회기반구조물과 주거지역의 아파트 및 고층빌딩의 내진설계에 대한 관심이 높아지고 있다. 내진설계는 크게 강도증가와 연성증가의 두 가지 방법으로 분류되는데, 이 중 강도증가에 의한 내진설계의 경우 지나치게 큰 부재가 요구되어 비경제적이며, 구조물의 갑작스런 취성과괴 양상에 의해 큰 인명피해를 유발할 수 있다. 연성증가에 의한 내진설계는 구조부재의 소성변형에 의해 지진에너지를 흡수함으로써 지진하중의 크기를

효과적으로 줄일 수 있도록 하는 방법이지만 지진발생 후 보수보강이 어렵고 비용이 많이 드는 단점이 있다.

이러한 내진설계의 한계를 극복하기 위해 구조물에 유입되는 진동에너지를 부가적인 장치를 이용하여 흡수 또는 차단함으로써 구조물을 보호하고자 하는 지진격리시스템이 관심을 가지게 되었다. 지진격리장치에 대한 연구는 Kelly (1986), Su *et al.* (1989) 등에 의해 시작되어 Rubber Bearing, Laminated Rubber Bearing 등이 개발되었으나, 이러한 지진격리장치로 인해 과도한 변위 발생하자 미국도로교통안전협회(AASHTO)에서는 지진격리장치가 적용된 구조물의 경우 그 장치로 인해 과도한 변위가 발생하지 않도록 어느 정도 이상의 복원력을 가질 수 있도록 제안하였다(AASHTO,

\*정회원 · 교신저자 · 한양대학교 토목공학과 박사후 연구원 (E-mail : hinho@hanyang.ac.kr)

\*\*한양대학교 대학원 토목공학과 박사수료 (E-mail : mkju@hanyang.ac.kr)

\*\*\*정회원 · 한양대학교 공학대학 건설환경시스템공학과 교수 (E-mail : jssim@hanyang.ac.kr)

\*\*\*\*정회원 · 한양대학교 공학대학 건설환경시스템공학과 교수 (E-mail : Jonglee@hanyang.ac.kr)

1991). 이러한 과도 변위발생의 문제를 해결하고자 미국을 중심으로 탄성복원력으로 이력거동을 하는 Lead Rubber Bearing에 관해 Mayes(1994), Soong & Constantinou(1994)에 의해 많은 연구가 진행되었으며, Marioni(1991), Ciampi and Marioni(1991)에 의해 연강의 비선형 거동으로 에너지를 적절히 소산시켜 구조물을 지진으로부터 보호할 수 있는 E-shape 강재댐퍼에 관해 연구되어졌다. Tsopelas and Constantinou (1997)는 교량축소모델을 통한 E-shape 강재이력댐퍼 성능실험과 수치적 해석에 관하여 연구하였다. 국내에서는 윤정방 등(2001)에 의해 E-Shape 강재이력댐퍼의 내진성능에 관한 실험적 연구와 교량의 적용성의 검증을 위해 Bilinear 해석법을 사용한 상용해석프로그램인 SAP을 통한 수치적 연구가 진행되었다. 하지만 기존의 연구는 특정 용량의 E-Shape 강재이력댐퍼의 적용성 및 성능실험 위주로 진행되었으며, 다양한 용량에 따른 수치적 모델에 대한 연구는 부족한 실정이다.

본 연구에서는 E-Shape 강재이력댐퍼를 이용한 기초분리 장치의 지진격리성능 평가를 위해 다양한 용량의 E-Shape 댐퍼의 동적실험을 수행하였으며, 실험결과와 비교를 통해 E-Shape 댐퍼의 동적거동을 하나의 변수(설계 용량)만으로 적절히 모사할 수 있는 수치모델을 제안하였다. 제안된 E-Shape 강재이력댐퍼 수치모델의 지진격리성능 평가를 위해 Kelly *et al.*(1987)이 사용한 6자유도를 가진 5층 건물을 사용하였으며 전체 시스템의 응답은 각기 다른 특성을 갖는 El Centro 지진, Kobe 지진, Gebze 지진을 적용하여 수치 해석을 수행하였다.

## 2. E-Shape 댐퍼의 동적실험

E-Shape 강재이력댐퍼를 이용한 지진격리장치(그림 1)는 지진에너지 소산을 위한 비선형 거동을 하는 알파벳 E 형상의 E-Shape 강재이력 댐퍼를 X축과 Y축 방향으로 설치하

여 2축 방향에 대한 감쇠 효과를 얻고자 고안되었다. X방향의 기동단에 설치된 E-Shape, Y 방향 기동단에 설치된 E-Shape, 그리고 외부 지진력에 대해 X, Y 방향 E-Shape에 하중을 직접 전달할 수 있는 내부구속철물로 구성되어 있다. E-Shape 강재이력댐퍼는 지진 등의 충격하중 발생 시 상부 구조물 관성력에 의한 과도한 하중과 변위에너지를 강재 이력댐퍼의 탄소성 변형에 의한 변형에너지와 열에너지로 소산시켜 그 일부분을 하부구조로 안전하게 전달시킬 수 있다. E-shape 강재이력댐퍼에는 탄성복원력이 요구되므로 자동차의 코일이나 판 스프링의 재료로 많이 쓰이는 ASTM 5160 steel이 주로 사용되며, LRB에 비해 받침높이가 낮아 안정적일 뿐만 아니라 지진 후 외관상으로 변형 유, 무의 확인이 가능하다. 또한 E-shape 강재댐퍼의 경우 LRB보다 더 큰 상재하중이 작용하는 경우에도 적용 가능할 뿐만 아니라, 유지보수가 용이한 장점이 있다.

본 연구에서는 E-Shape 강재이력댐퍼의 지진력에 대한 에너지 소산 성능을 실험적으로 평가하기 위하여 다양한 설계하중의 E-Shape 강재이력댐퍼에 대해 동적하중 실험을 수행하였다. 동적실험은 그림 2의 개요도에서 나타난 바와 같이 E-Shape 강재이력댐퍼의 3개의 지지점 중 양 외측 지지점을 고정시키고 중앙지지점에 수평의 동적하중을 가력 하였으며, 최대  $\pm 100$  mm의 변위에 대하여 먼저 40%( $\pm 40$  mm) 2회, 80%( $\pm 80$  mm) 2회, 100%( $\pm 100$  mm) 2회 순으로 1 mm/sec의 재하속도로 반복 운동을 가하면서 특성분석을 위해 하중-변위 관계를 Visual logger system을 사용하여 연속적으로 측정하였다. 그림 3은 실험전경을 보여주고 있다.

E-Shape 강재이력댐퍼의 실험성능 결과는 표 1에서 보이는 바와 같이 375 kN, 450 kN, 500 kN, 600 kN 4가지 용량의 E-Shape 강재이력댐퍼 모두 극한력이 강재이력댐퍼의 시방규정인 항복력의 110%~120%의 범위를 초과하지 않는 소성변형에도 유효한 안정적인 결과를 나타내었다.

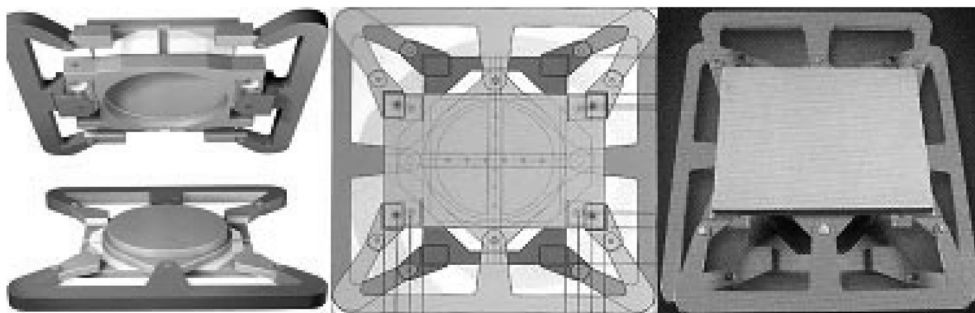


그림 1. E-Shape 강재이력댐퍼 동적실험 개요도

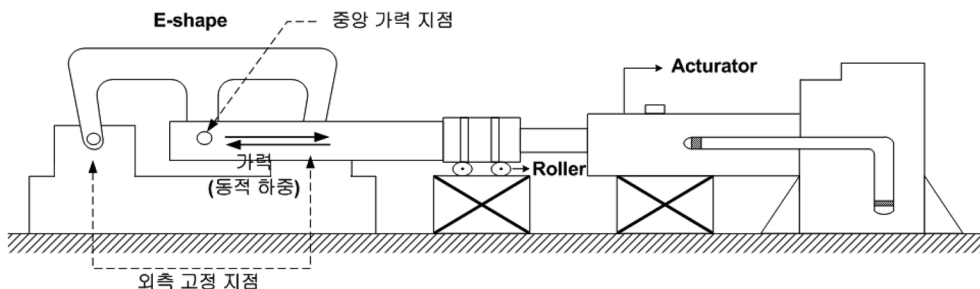
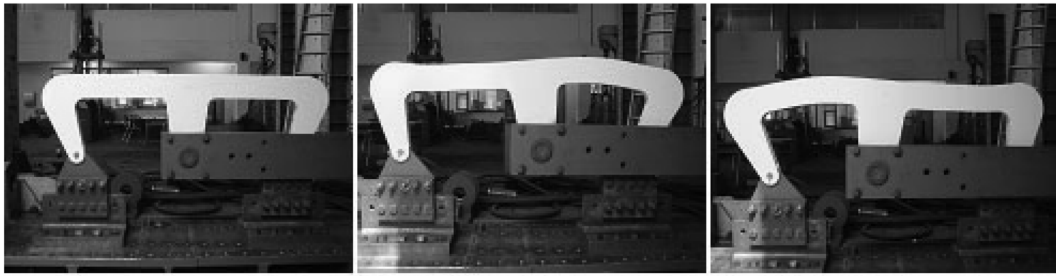


그림 2. E-Shape 강재이력댐퍼 동적실험 개요도



(a) 실험체 세팅

(b) Pull 거동

(c) Push 거동

그림 3. E-Shape 강재이력댐퍼 동적실험 전경

표 1. E-Shape 강재이력댐퍼의 동적실험 결과

항복력 (kN)	2회재하시 항복력(kN)	20회 재하시 항복력(kN)	공칭축력의 120%	극한력 (kN)
375	364.9	276.8	450.0	429.2
450	442.4	446.3	540.0	511.1
500	496.9	497.4	600.0	573.4
600	589.3	589.9	720.0	678.1

표 2. E-Shape 강재이력댐퍼의 변수

변수	값
$Q_{E-shape}$ (N)	E-Shape 강재이력댐퍼의 설계하중
$A$	$0.065 \times 10^3$
$\beta$	$A/2.2$
$\gamma$	$A/1.6$
$n$	1
$c_0$ (N·s/m)	$3.74 \times 10^3$
$k_0$ (N/m)	$2.0 \times Q_{E-shape}$

### 3. E-Shape 강재이력댐퍼의 수치모델

본 연구에서 375 kN, 450 kN, 500 kN, 600 kN 4가지 용량의 E-Shape 강재이력댐퍼의 모델에 대하여 성능실험이 이루어졌으며, 이 실험 데이터를 기반으로 그림 4와 같은 Bouc-Wen Model(Wen 1976)을 사용하여 E-Shape 강재이력 댐퍼의 수치해석 모델 변수를 결정하였다.

수치해석 모델의 이력복원력  $f_{E-shape}$  과 무차원 이력변수는 식(1)과 (2)로부터 구해진다.

$$f_{E-shape} = zQ_{E-shape} + k_0(x-x_0) + c_0\dot{x} \quad (1)$$

$$\dot{z} = -\gamma|\dot{x}|z|z|^{n-1} - \beta\dot{x}|z|^n + A\dot{x} \quad (2)$$

여기서  $Q_{E-shape}$  는 E-Shape 강재이력댐퍼의 설계하중이며, 무차원 매개변수  $A$ , E-Shape 강재의 항복 전/후의 강성비  $\beta$ ,  $\gamma$ , 정수계수  $n=1$ (Spencer 1986) 등의 동적 감쇠 특성을 나타내는 변수는 표 2에 나타난 바와 같이 Bouc-Wen Model과 실험데이터의 비교를 통하여 도출하였다.

그림 5-8는 실험결과와 Bouc-Wen Model을 사용한 수치해석 모델을 비교해 본 결과로 375 kN, 450 kN, 500 kN, 600 kN 4가지 용량 모두 설계하중 값( $Q_{E-shape}$ )만을 변화시킴으로서 수치모델에 의한 결과와 실험결과가 거의 일치함을 확인할 수 있다. 본 연구에서 제안한 변수 중에서 E-Shape 강재이력댐퍼의 설계하중인  $Q_{E-shape}$  과 강성( $k_0$ )은

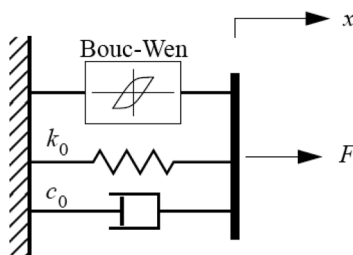


그림 4. Bouc-W

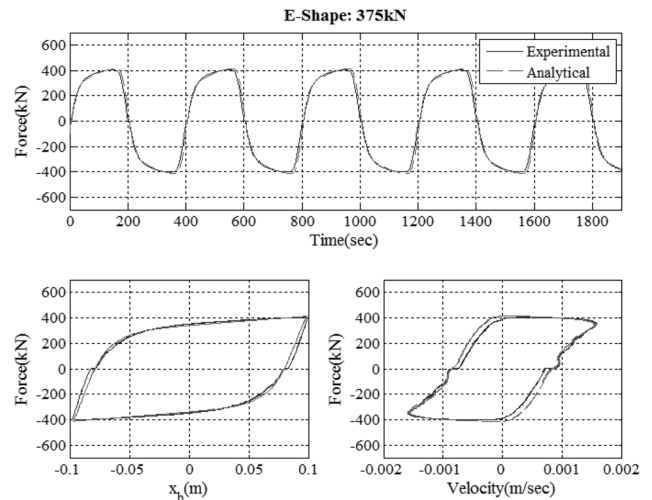


그림 5. E-Shape 강재이력댐퍼의 실험결과와 수치모델에 의한 결과(설계하중 375 kN)

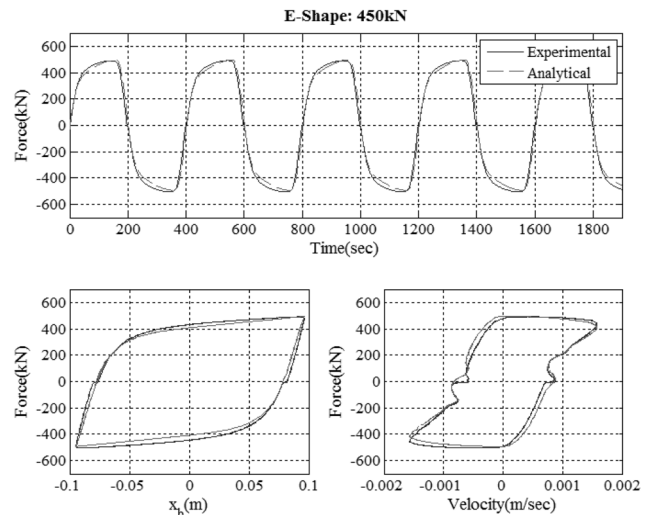


그림 6. E-Shape 강재이력댐퍼의 실험결과와 수치모델에 의한 결과(설계하중 450 kN)

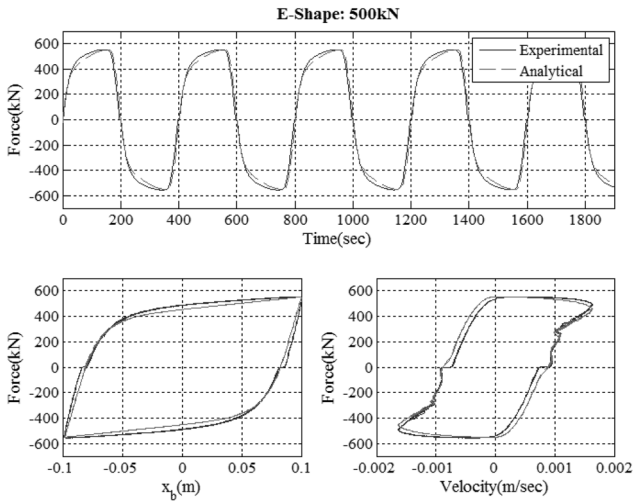


그림 7. E-Shape 강재이력댐퍼의 실험결과와 수치모델에 의한 결과(설계하중 500 kN)

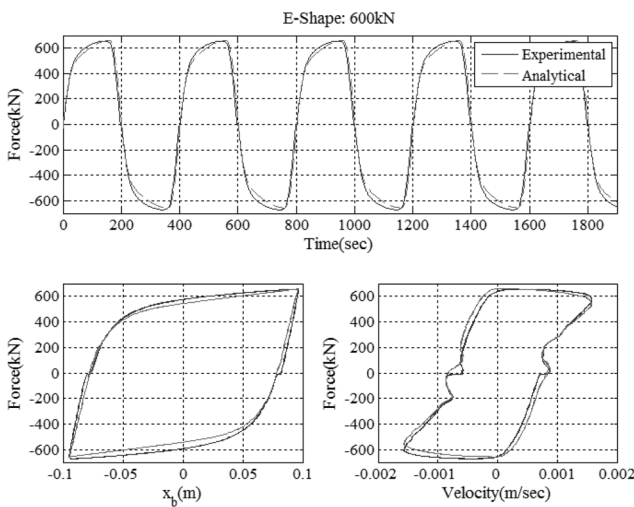


그림 8. E-Shape 강재이력댐퍼의 실험결과와 수치모델에 의한 결과(설계하중 600 kN)

형상 및 크기에 의해서 결정되며, 동적 감쇠 특성을 나타내는 나머지 변수는 본 연구에서 사용된 시험체와 같은 형상을 유지할 경우 동일하게 적용할 수 있을 것이다.

#### 4. 수치해석을 통한 E-Shape 강재이력댐퍼의 지진 격리성능 평가

E-Shape 강재이력댐퍼의 지진격리성능 평가를 위하여 기초지지상태(Fixed Base), LRB와 함께 Kelly *et al.*(1987)가 제안한 6자유도를 가진 5층 건물에 각기 다른 특성을 지닌 El Centro, Mexico, Gebze 지진을 적용하였다(그림 9). 지진격리된 구조물의 물성 값은 Kelly *et al.*(1987)의 수치해석과 같은 값을 사용하였으며(표 3), 지진 격리되지 않은 구조물의 경우 첫 번째 모드에서 2%의 감쇠와 0.3초의 고유주기를 가진다. 구조물의 동적 비선형성을 무시하였지만 과도한 구조적 움직임을 충분히 고려하였다. 기초의 강성  $k_b$ 는 지진격리 구조물의 고유주기 2.5초에 의한 값이며, 지진격리 장치로서 Ramallo *et al.* 2002에서 제안한 감쇠비 2%를 가지는 LRB가 고려되었다(표 4). E-Shape 강재이력댐퍼의 설계하중은 대상구조물의 질량과 강성을 고려하여 14 kN으

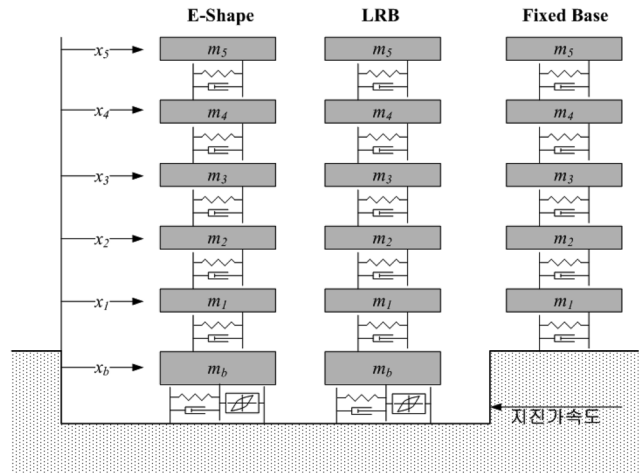


그림 9. 수치해석 적용 대상 구조물

표 3. 5층 구조물의 물성치 (Kelley *et al.* 1987)

구분	층별 질량 (kg)	층별 강성 (kN/m)	층별 감쇠 (kN·s/m)
Base	$m_b=6800$	$k_b=232$	$c_b=3.74$
1층	$m_1=5897$	$k_1=33732$	$c_1=67$
2층	$m_2=5897$	$k_2=29093$	$c_2=58$
3층	$m_3=5897$	$k_3=28621$	$c_3=57$
4층	$m_4=5897$	$k_4=24954$	$c_4=50$
5층	$m_5=5897$	$k_5=19059$	$c_5=38$

표 4. LRB 시스템의 설계변수 (Ramallo *et al.* 2002)

매개변수	값	매개변수	값
$Q_{pb}$	14.83(kN)	$n$	1
$Q_y$	17.80(kN)	$A$	78.21
$k_b$	232(kN/m)	$\gamma$	39.11
$c_b$	3.74(kN·s/m)	$\beta$	39.11

로 선정하였다. E-Shape 강재이력댐퍼를 지진 격리된 5층 구조물에 적용함에 있어 상재하중은 Pot를 통해 지지하게 되며(그림 1), 복원력은 E-Shape 강재이력댐퍼를 통하여 제공하게 된다.

수치해석은 대상구조물의 운동방정식을 상대 공간 방정식으로 변환하여 시간영역 해석을 수행하였으며, 구조물의 운동방정식은 다음 식과 같다.

$$M\ddot{x} + C\dot{x} + kx = \Lambda f - M1\ddot{x}_g \quad (3)$$

여기서,  $\Lambda$ 는  $[1 \ 0]^T$ 로서 지진격리장치의 위치벡터를 나타내고,  $f$ 는 지진격리장치에 의한 감쇠력을 나타낸다. 위의 식을 상태공간방정식으로 정리하면 다음과 같다.

$$\dot{z} = Az + Bf + E\ddot{x}_g \quad (4)$$

여기서,  $A = \begin{bmatrix} 0 & I \\ -M^{-1}K & -M^{-1}C \end{bmatrix}$ 는 시스템 행렬,  $B = \begin{bmatrix} 0 \\ -M_s^{-1}\Lambda \end{bmatrix}$ 는

제어 행렬,  $E = \begin{bmatrix} 0 \\ -1 \end{bmatrix}$ 는 외란행렬을 나타낸다.

입력 지진하중인 El Centro지진, Kobe지진, Gebze지진의 최대지반가속도 강도에 의해 나타나는 지진격리장치의 성능을 지진격리층 최대변위, 1-2층간 최대상대변위, 최상층 최

표 5. 지진하중에 따른 각 시스템의 해석결과

		지진격리층 최대변위 (mm)	1-2층간 최대상대변위 (mm)	최상층 최대가속도 (mm)	지진격리장치의 전단력 (mm)
Fixed Base	El Centro	-	8.2	1196.9	-
	Kobe	-	2.3	418.5	-
	Gebze	-	4.3	708.5	-
LRB	El Centro	84.5	0.9	127.1	34.44
	Kobe	29.7	0.5	62.7	20.46
	Gebze	78.7	0.8	93.8	33.11
E-Shape 강제이력댐퍼 베어링	El Centro	89.7	0.9	160.1	34.24
	Kobe	19.9	0.6	86.3	25.02
	Gebze	65.0	0.8	107.6	32.64

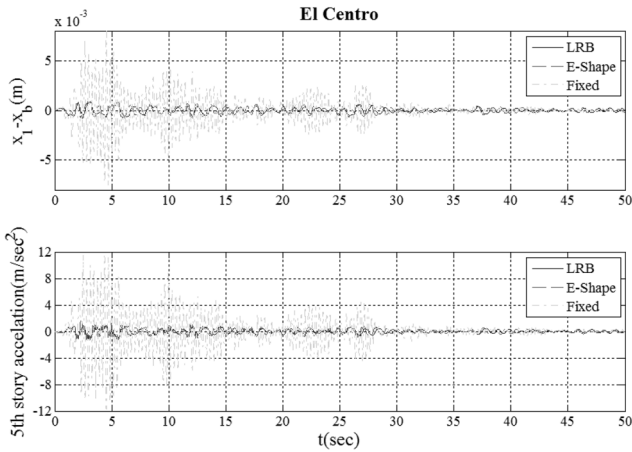


그림 10. El Centro 지진에 의한 각 시스템 별 1-2층간 상대변위와 최상층

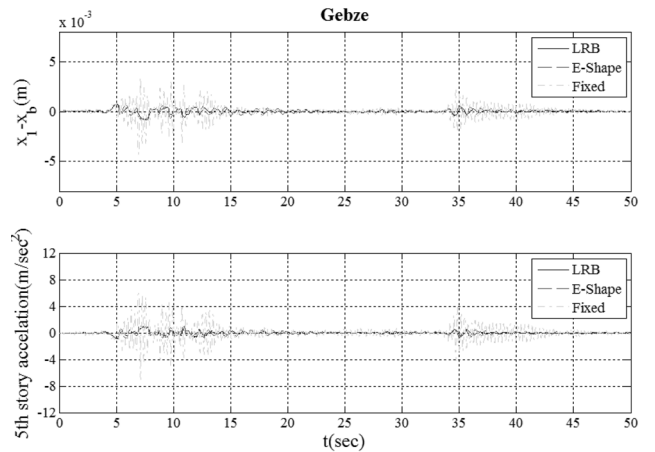


그림 12. Gebze 지진에 의한 각 시스템 별 1-2층간 상대변위와 최상층

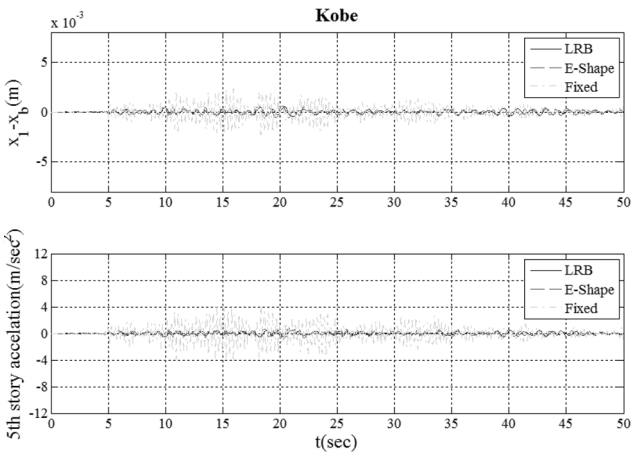


그림 11. Kobe 지진에 의한 각 시스템 별 1-2층간 상대변위와 최상

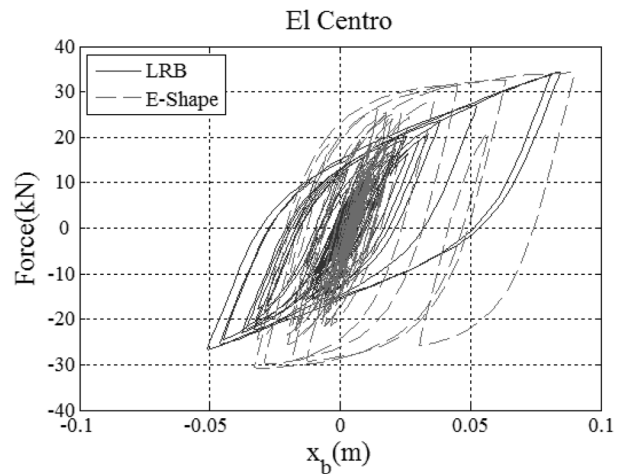


그림 13. El Centro 지진에 의한 E-Shape강제이력댐퍼와 LRB의 변위-감쇠력 이력곡선

대가속도, 지진격리장치의 전단력에 대해 표 5와 같이 비교하였다.

El Centro 지진에 대한 동적거동을 살펴보면, 지진격리층 최대변위에서 LRB는 84.5 mm, E-Shape 강제이력댐퍼는 89.7 mm가 발생하였다. 1-2층간 최대상대변위에 있어서 LRB와 E-Shape 강제이력댐퍼 모두 약 89.2%를 감소시켜 주었으며, 최상층 최대 가속도에서는 기초지지상태에 비해 LRB는 89.4%, E-Shape 강제이력댐퍼는 86.6%를 감소시켜 주었다(그림 10).

그림 11은 Kobe 지진에 대한 동적거동으로 지진격리층

최대변위에서 LRB는 29.7 mm, E-Shape 강제이력댐퍼는 19.9 mm가 발생하였으며. 1-2층간 최대상대변위에서 LRB는 78.6%, E-Shape 강제이력댐퍼는 73.5%를 감소시켜 주었다. 최상층 최대 가속도에서는 기초지지상태에 비해 LRB는 85.0%, E-Shape 강제이력댐퍼는 79.4%를 감소시켜 주었다.

Gebze 지진에서는 LRB의 지진격리층 최대변위가 78.7 mm, E-Shape 강제이력댐퍼는 65.0 mm가 발생하였으며. 1-2층간 최대상대변위에 있어서 LRB의 경우 81.4%, E-Shape 강제이력댐퍼는 81.2%를 감소시켜 주었다. 최상층 최대 가

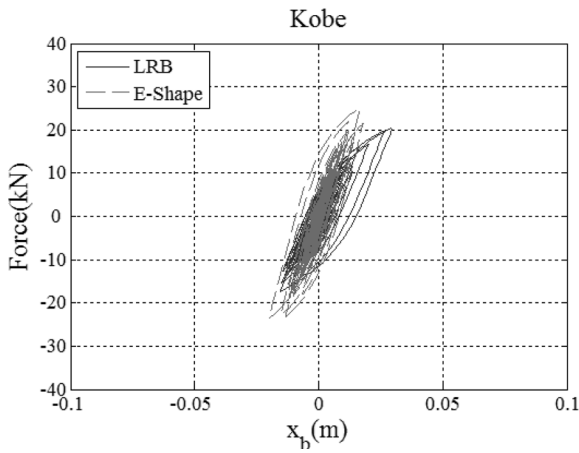


그림 14. Kobe 지진에 의한 E-Shape강재이력댐퍼와 LRB의 변위-감쇠력 이력곡선

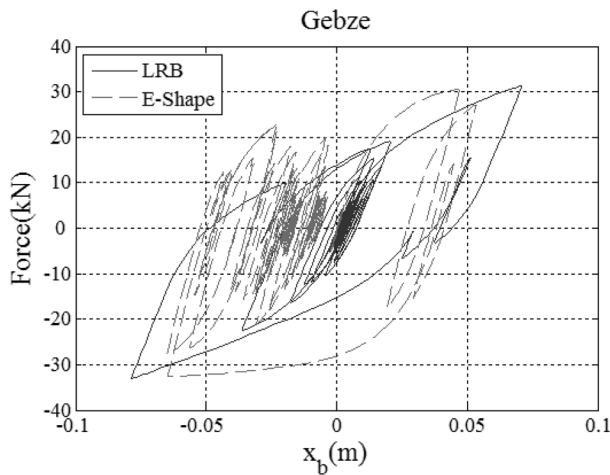


그림 15. Gebze 지진에 의한 E-Shape강재이력댐퍼와 LRB의 변위-감쇠력 이력곡선

속도에서는 기초지지상태에 비해 LRB는 86.8%, E-Shape 강재이력댐퍼는 84.8%를 감소시켜주었다(그림 12).

위의 결과에서 나타난 바와 같이 본 연구에서 제안된 E-Shape 강재이력댐퍼의 수치 모델이 자기 다른 특성을 가진 세 가지 지진에 의한 구조물의 동적거동에 있어서 LRB와 비슷한 감소 효과를 나타내었다. 그림 1-15는 El Centro, Kobe, Gebze 지진에 대한 LRB와 E-Shape 강재이력댐퍼의 응답그래프로서 본 연구에서 제안된 수치모델이 지진격리장치의 이력특성을 효율적으로 나타낼 수 있음을 확인할 수 있다.

수치해석 결과로만 본다면 LRB가 E-Shape 강재이력댐퍼에 비해 조금 더 좋은 결과를 나타내고 있지만 그 차이는 아주 미소하며, 앞의 실험부분에서 언급한 각각의 장단점으로 인해 교량 혹은 건축물 등 다양한 환경에서 선택적으로 적용할 수 있다.

## 5. 결 론

본 연구에서는 E-Shape 강재이력댐퍼의 수치모델을 Bouc-Wen Model을 사용하여 제안하였으며, 제안된 수치모델의 검증에 위하여 실험결과와 비교하였다. 또한, 자기 다른 특

성을 가진 El Centro, Kobe, Gebze 지진데이터를 5층 대 상 구조물에 입력 지진하중으로 사용하여 기초지지상태와 LRB 그리고 E-Shape 강재이력댐퍼를 비교함으로써 제안된 수치모델이 적합한 이력 특성을 나타낼 수 있는가에 대해 확인하였다. 실험결과와의 비교와 수치예제 적용을 통하여 제안된 수치모델이 E-Shape 강재이력 댐퍼의 이력특성을 잘 나타냄을 확인할 수 있었다. 제안된 수치 모델에서 설계하중 값인  $Q_{E-shape}$  만 변화시킴으로서 동적실험 없이도 다양한 용량의 E-Shape 강재이력댐퍼의 성능을 검증할 수 있을 것으로 사료된다.

## 참고문헌

- 윤정방, 박동욱, 이동하, 안창모(2001) 교량용 내진 받침의 동특성 실험 결과를 이용한 교량의 해석, 2001년도 봄 학술발표회 논문집, 한국전산구조공학회, pp. 465-474.
- American Association of State Highway and Transportation Officials(1991) *AASHTO Guide specification for seismic isolation design*, Washington, D.C.
- Ciampi, V. and Marioni, A. (1991) New types of energy dissipating devices for seismic protection of bridges, *3rd World Congress on Joint Sealing and Bearing Systems for Concrete Structures*, Toronto, Canada. Vol. 2, pp. 1225-1245.
- Kelly, J.M. (1986) A seismic base isolation: Review and Bibliography, *Soil dynamics and Earthquake Engineering*, Vol. 5, pp. 202-216.
- Kelly, J.M., Leitmann, G., and Soldatos, A.G. (1987) Robust control of base-isolated structures under earthquake excitation, *Journal of Optimization Theory and Applications*, Vol. 53, No. 2, pp. 159-180.
- Marioni, A. (1991) Antiseismic devices for bridge in Italy, *Proc., 3rd World Congr. on Joint Sealing and Bearing Sys. for Concrete Struct.*, Vol. 2, Nat. Ctr. for Earthquake Engineering. Res., State Univ. of New York at Buffalo, N.Y., pp. 1263-1280.
- Mayes, R.L. (1994) Seismic isolation of bridges in the U.S.A. *Proc., 3rd U.S.-Japan Workshop on Earthquake Protective Sys. of Bridges*, Rep. No. NCEER-94-0009, Nat. Ctr. for Earthquake Engineering. Res., State Univ. of New York at Buffalo, N.Y.
- Ramallo, J.C., Jonhson, E.A., and Spencer, B.F., Jr. (2002) "Smart" base isolation Systems, *Journal of Engineering Mechanics*, Vol. 128, No. 10, pp. 1088-1099.
- Soong, T.T. and Constantinou, M.C., eds. (1994) *Passive and active structural vibration control in civil engineering*, Springer-Verlag New York, Inc., New York.
- Spencer, B.F., Jr. (1986) On the reliability of nonlinear hysteretic structures subjected to broadband random excitation, *Lecture notes in engineering*, Vol. 21, Springer, New York.
- Su, L. and Ahmadi, G. (1989) A comparative study of performances of various base isolation systems, Part 1: Shear beam structures, *Earthquake Engineering and Structural Dynamics*, Vol. 18, pp. 11-32
- Tsopelas, P. and Constantinou, M.C. (1997) Study of Elastoplastic Bridge Seismic Isolation System, *Journal of Structural Engineering*, Vol. 123, No. 4, pp. 489-498.
- Wen, Y.K. (1976) Method of Random Vibration of Hysteretic Systems, *Journal of Engineering Mechanics Division*, Vol. 102, No. 2, pp. 249-263.

(접수일: 2008.3.13/심사일: 2008.5.8/심사완료일: 2008.7.7)