

진동대 실험 및 해석을 통한 고감쇠 고무받침의 면진성능 연구

김후승¹, 오주^{2*}

¹서울시립대학교 토목공학과, ²특허청

A Study on Isolation Performance of High Damping Rubber Bearing Through Shaking Table Test and Analysis

Hu-Seung Kim¹, Ju Oh^{2*}

¹Department of Civil Engineering, University of Seoul

²Korean Intellectual Property Office

요약 최근 빈번하게 발생하는 크고 작은 지진에 대비하여 구조물의 지진에 대한 안전성을 확보하기 위한 방안으로 지진격리시스템을 이용한 연구개발과 사용이 점차 증가하고 있다. 지진격리시스템의 하나인 고감쇠 고무받침(HDRB)는 특수한 고감쇠 고무(HDR)를 이용한 적층형 고무받침으로서 유사 지진격리장치인 납 고무받침에 비해 감쇠기능이 다소 떨어지는 단점이 있어 활용도가 높지 않았다. 그러나, 고감쇠 고무받침은 재료와 형상이 유사한 천연고무받침의 비해 우수한 감쇠력을 가지고 있으며 기존 납 고무받침의 경우 납의 유해성이 문제되어 납을 사용하지 않은 고감쇠 고무받침에 대한 연구가 증가하고 있다. 본 연구에서는 고감쇠 고무받침을 대상으로 압축응력 의존성 및 주파수 의존성, 반복하중 의존성 등 다양한 특성에 대하여 실험을 실시하였다. 그리고 여러 계기지진파 상태에서 고감쇠 고무받침의 내진성능을 평가하기 위해 진동대 실험과 분석을 수행하였다. 축소교량에 고감쇠 고무받침을 적용한 모델을 사용했고, 지진격리와 비 지진격리로 구분하여 진행하였다. 그 결과 고감쇠 고무받침을 적용할 경우 비 지진격리의 경우에 비해 높은 감쇠효과를 보였으나 Mexico City와 같은 연약 지반의 구조물에 지진격리를 적용할 경우 오히려 구조물의 응답이 증가하는 양상을 나타내 지진격리장치 적용성에 주의해야 할 것으로 판단된다.

Abstract The research, development and use of seismic isolation systems have been increasing with the gradual development of structure safety assurance methods for earthquakes. The High Damping Rubber Bearing (HDRB), one type of seismic isolation system, is a Laminated Rubber Bearing using special High Damping Rubber. However, as its damping function is slightly lower than that of the Lead Rubber Bearing, a similar seismic isolation system, its utilization has not been high. However, the HDRB has a superior damping force to the Natural Rubber Bearing, which has similar materials and shapes, and the existing Lead Rubber Bearing has a maleficence problem in that it contains lead. Thus, studies on HDRBs that do not use lead have increased. In this study, a test targeting the HDRB was done to examine its various dependence properties, such as its compressive stress, frequency and repeated loading. To evaluate the HDRB's seismic performance in response to several earthquake waves, the shaking table test was performed and the results analyzed. The test used the downscaled bridge model and the HDRB was divided into seismic and non-seismic isolation. Consequently, when the HDRB was applied, the damping effect was higher in the non-seismic case. However, its responses on weak foundations, such as in Mexico City, represented increased shapes. Thus, its seismic isolator.

Keywords : High Damping Rubber Bearing, Seismic Isolation, Seismic Analysis, Shaking Table Test

*Corresponding Author : Ju Oh(Korean Intellectual Property Office)

Tel: +82-42-481-3382 email: oju1030@korea.kr

Received March 11, 2016

Revised (1st March 31, 2016, 2nd April 8, 2016)

Accepted May 12, 2016

Published May 31, 2016

1. 서론

최근 빈번하게 발생하는 크고 작은 지진에 대비하기 위하여 많은 연구가 진행되고 있는 미국, 일본 등을 비롯한 해외 국가들과 달리 우리나라는 지진활동이 활발한 판 경계로부터 떨어져 있어 지진에 대해서 안전하다고 생각해왔다. 그러나 1978년 규모 5.0의 홍성지진을 비롯하여 근래에 발생한 규모 3.0 이상의 지진이 빈번하게 발생되어 구조물의 내진성능에 대한 관심이 증가하고 있다(Koo et al., 1998). 국외의 경우 주로 건축물, 교량, 원자력 발전소 등 대형구조물이 지진과 같은 동적하중에 대한 피해를 최소화하기 위해 구조물의 진동을 감소시키기 위한 수동제어(Passive Control)기법 중의 하나인 지진격리시스템(Seismic Isolation System)이 널리 사용되고 있으며, 미국, 일본, 이탈리아 등을 중심으로 연구 및 응용이 활발하게 진행되고 있다(Kelly, 1986). 현재 국내에서도 지진격리장치에 대한 연구개발과 사용이 점차 증가하고 있으나, 지진격리장치를 이용한 지진격리설계(Seismic Isolation Design)기준 및 설계절차, 실험평가 기준 등이 충분히 마련되어 있지 않은 실정이다.

이와 같은 지진격리장치의 지진시 성능을 검증하기 위해 Kim et al.(1997)은 PTFE 활동판과 고무링으로 형성된 지진격리받침의 마찰계수의 동적 특성을 실험을 통하여 규명하고, 지진격리받침이 설치된 모형교량의 진동대 실험을 수행하여 응답의 저감효과를 규명하였다. Tsai et al.(2007)는 교량을 1/7.5 규모로 축소하고 롤링형 지진격리받침을 적용하여 진동대 실험한 결과 롤링형 지진격리받침의 내진성능을 확인하였다. 또한, Chung et al.(1997)과 Yi et al.(2002)은 각각 지진 격리된 3층, 5층 구조물의 내진성능을 평가하기 위해 다양한 지진파를 입력하여 유사동적 실험 및 진동대 실험하였다. 이를 통해 고무받침을 이용한 지진격리 구조가 지진동에 효과적인 방법임을 확인하였다.

Jeon et al.(2011)은 가변적인 고유 진동수를 가짐으로 인하여 특정 주파수에 응답특성을 집중시키지 않는 내진 장치인 원추형 마찰진자받침(CFPS)을 개발하고 실시간 전산장비를 대상으로 진동대실험을 통해 내진성능을 검증하였다. Kim et al.(2004)은 진동대 실험을 통해 원전기기의 내진안전성을 평가하였다.

고감쇠 고무받침(High Damping Rubber Bearing, HDRB)은 지진과 같은 외부에너지에 의해 변형하면서

에너지를 흡수하는 능력을 갖는 특수한 고감쇠 고무(HDR)를 이용한 적층형 고무받침으로서 감쇠 기능을 가진 지진격리장치이다. 이는 고무배합을 변화시킴에 따라 여러 가지 이력특성을 변화시킬 수 있는 장점이 있으나 유사 지진격리장치인 납 고무받침에 비하여 에너지 소산 능력인 감쇠기능이 다소 떨어지는 단점이 있다(Takayama, 1997). 그러나 재료와 형상이 가장 유사한 천연고무받침에 비하여 우수한 감쇠력을 가지고 있다(J.S.S.I, 2002).

본 연구에서는 고감쇠 고무받침(HDRB)을 적용한 교량에 대한 지진격리 성능에 대하여 연구하였다. 진동대 실험에 앞서 축소 시험체에 대한 특성실험 통하여 고감쇠 고무받침의 기초특성을 검증하였다. 이와 같이 받침 시험체의 특성실험 후, 1/5 축소모형 교량에 대한 진동대 실험을 통하여 지진응답을 분석함으로써 지진격리 교량의 실제 지진응답 특성을 검토하고, 지진응답 저감 효과를 분석하였다. 또한 동일 실험체에 대한 지진해석을 통해 진동대 실험과 비교 분석하였다. 진동대 실험에 사용되는 입력지진파는 실제 외국에서 발생되었던 계기 지진 기록을 이용하여 수행하였다.

2. 고감쇠 고무받침의 특성

2.1 실험체 설계 및 제작

특성실험은 시험체의 기초 특성을 파악하기 위해 실시하였다. 지진격리장치 설계시 가장 기본이 되는 압축강성(Compression Stiffness), 전단강성(Shear Stiffness) 그리고 감쇠비(Damping Ratio) 등의 특성을 파악하고자 압축특성실험과 전단특성실험을 수행하였다. 고감쇠 고무받침(HDRB)은 지진격리장치의 일종으로써 받침의 특성 및 내진성능을 평가하기 위해 설계 및 제작하였다. 실험체의 설계는 지진격리장치의 강성(Stiffness)을 산정하고, 고무의 두께와 강제 보강판의 두께를 산정한 후 유효강성 및 수직강성을 계산하였다(ISO 22762, 2010). Table 1은 진동대 실험을 위하여 제작된 고감쇠 고무받침의 설계조건이고, Fig. 1은 실험체의 단면제원 및 실물형상이다.

Table 1. Specimens of Design Condition

Division	Dimension
Shear Modulus of Rubber (G)	0.7MPa
Yield Strength of Steel Plate (f_y)	240MPa
Design Displacement (Δ)	19.3mm
Effective Period (T_{eff})	0.69sec
1st Shape Factor (S_1)	15.3
2nd Shape Factor (S_2)	1.9

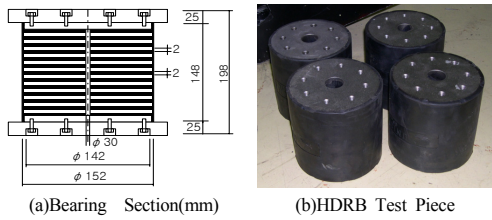


Fig. 1. Test Condition and Test Piece

2.2 압축특성실험

고감쇠 고무받침 시험체의 수직강성을 얻고자 상온에서 고감도 변위계를 설치하여 실험을 수행하였다. 압축 특성실험결과 압축강성은 Table 2와 같이 912kN/mm로 나타났으며, 설계값에 비해 약 5%의 오차가 발생하여 평가기준인 $\pm 30\%$ (ISO 22792, 2010)를 만족하였다.

Table 2. Experimental Results of Compression Properties

Compression Stiffness (kN/mm)			
Design	Test	Standard	Error
965	912	$\pm 30\%$	-5%

2.3 전단특성실험

2.3.1 전단변형률 의존성

고감쇠 고무받침의 전단변형률에 따른 전단강성과 등가감쇠비의 변화를 파악하기 위하여 다양한 전단 변위에

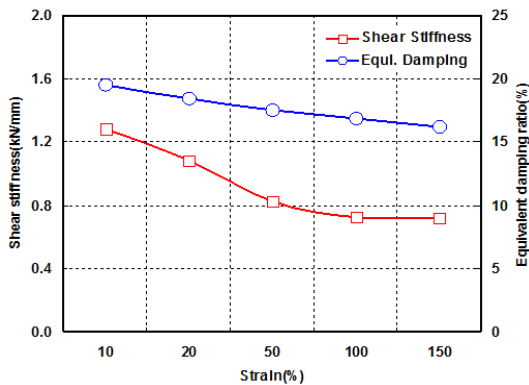


Fig. 2. Dependence of Shear Strain

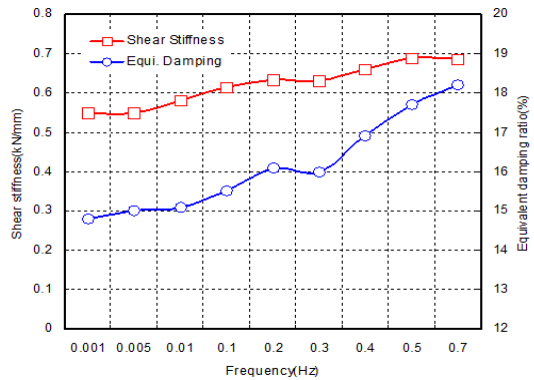


Fig. 3. Dependence of Frequency

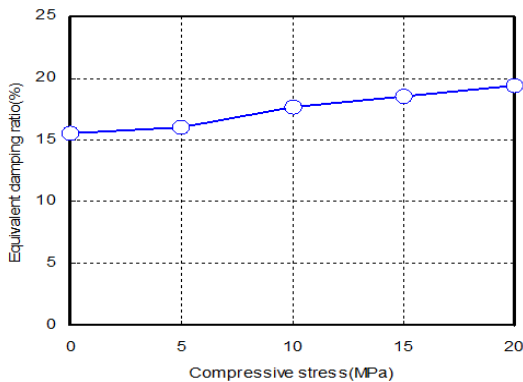


Fig. 4. Dependence of Compressive Stress

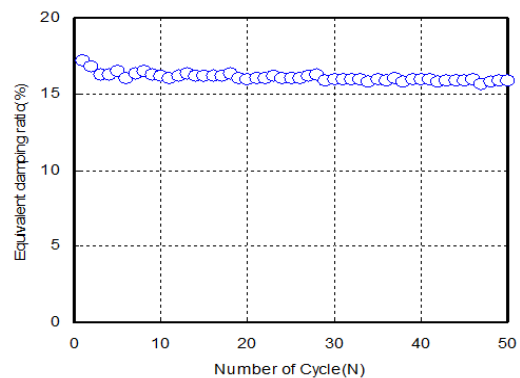


Fig. 5. Dependence of Cyclic Loading

대하여 압축-전단실험을 수행하였다. 가력변위는 10%, 20%, 50%, 100%, 150% 등 5가지의 전단변형률에 해당 되는 전단 변위에서 실험을 수행하였다. 실험결과를 Fig. 2와 같으며, 전단변형률이 증가함에 따라 전단강성 (Shear Stiffness)은 56% 가량 감소하였다. 또한, 등가 감쇠비(Equivalent Damping Ratio)는 가력 변위가 증가 함에 따라 감소하여 약 16%정도 감소하였다.

2.3.2 주파수 의존성

주파수 변화에 따른 고감쇠 고무받침의 전단강성과 등가감쇠의 변화를 파악하기 위하여 주파수를 변화시켜 압축-전단실험을 실시하였다. 실험은 상온에서 설계 면 압이 일정하게 유지되도록 수직하중을 재하하고 0.001Hz, 0.005Hz, 0.01Hz, 0.1Hz, 0.2Hz, 0.3Hz, 0.4Hz, 0.5Hz, 0.7Hz 등 총 9가지 주파수에서 수행하였다. 실험결과 주 파수가 증가함에 따라 전단강성 및 등가감쇠비는 각각 23%가량 증가하는 경향을 나타내었다. Fig. 3은 주파수 변화에 따른 전단강성과 등가감쇠비의 변화를 나타낸 것이다.

2.3.3 압축응력 의존성 실험

실험체의 압축응력에 따른 의존특성을 검토하기 위하여 압축응력을 변화시켜 압축-전단실험을 실시하였다. 실험은 상온상태에서 설계면압이 유지되도록 수직하중 을 가력하고 설계전단변위가 발생하도록 0.5Hz의 정현 파를 11회 반복재하 하였다. 실험은 설계면압의 0%, 50%, 100%, 150%, 200%에 해당하는 면압에서 수행하였다. 실험결과 면압이 증가함에 따라 등가감쇠비는 증 가하는 경향을 나타냈다. 이와 같이 면압의존성이 크게 나타난 것은 면압이 증가하면서 고무 분자간 점성 및 마찰감응 요소가 증가했기 때문이라고 판단된다. Fig. 4는 면압에 따른 등가감쇠비의 변화를 보인 것이다.

2.3.4 반복하중 의존성 실험

고감쇠 고무받침 시험체에 반복하중을 가력하여 이에 따른 전단강성과 등가감쇠비의 변화를 파악하였다. 실험 은 상온에서 설계면압이 일정하게 유지되도록 수직하중 을 일정하게 재하한 상태에서 해당 설계전단변위가 발생 하도록 50회 반복재하 하였다. 실험결과 Fig. 5와 같이 초기 3회까지는 전단강성이 비교적 변화가 크게 나타났지만, 그 이후 반복회수에는 변화폭이 조금씩 감소하는

경향을 나타냈다. 초기 1회와 50회에서의 전단특성을 비 교하면 전단강성과 등가감쇠비는 각각 12%, 5% 감소하 였다. 또한, 동일 시험체를 반복시험 후 초기온도 상태로 식힌 후 전단특성실험을 실시한 결과 전단강성과 등가 감쇠비는 반복실험 초기값에 비하여 각각 4%, 2% 감소 하여 온도의 변화에 따른 영향이 있음을 알 수 있었다.

3. 진동대 실험

3.1 진동대 실험 모델

진동대 실험용 축소모형은 3경간 연속 Steel Plate Girder 교량을 상사율에 따라 1/5로 축소하여 재구성한 교량으로 철골로 제작되었다. 또한, 교량 상부구조물의 총중량은 약 12.74MN으로 축소모형 교량은 101.9KN이다. 교량 시험체에 적용된 상사율은 교량모형의 교각은 두 개의 박스형 철골기둥으로 이루어져 있으며, 상판의 자중을 상사율에 맞추기 위해 추가 자중은 납 블록을 이 용하였다.

축소시 사용된 기준은 실제 교량과 교량모형의 동특 성 이었으며, 유사한 동특성을 위하여 결정된 상사율은 Table 3과 같다. Fig. 6은 진동대 모형의 형상 및 제원, 진동대 설치 모습을 나타낸 것이다. 진동대 축소교량의 상세 단면제원은 Table 4와 같이 진동대 평면크기는 5m×3m이고, 시험체의 최대 중량은 100kN, 최대 입력속 도는 500mm/sec이다. 또한, 최대 입력 가속도는 1.0g이 며, 최대 가동 변위는 ±100mm이다.

Table 3. Similitude Law for Pseudodynamic Test

Parameter	Law of Similitude	Model/Prototype
Length	L	1/5
Time	\sqrt{L}	$1/\sqrt{5}$
Mass	L^3	1/125
Displacement	L	1/5
Acceleration	1	1/1
Stress	L	1/5
Strain	1	1/1
Force	L^3	1/125
Horizontal stiffness	L^2	1/25

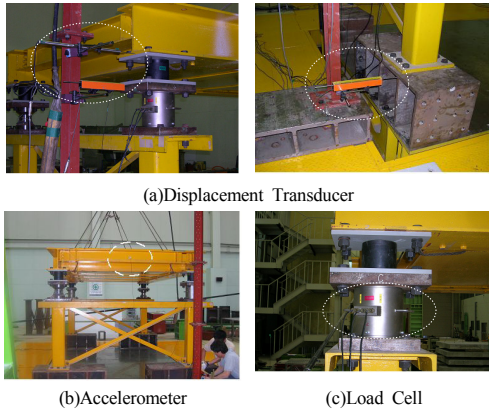


Fig. 6. Setup of Measurement Equipments

Table 4. Similitude Law for Pseudodynamic Test

Division	Dimension
Plane Size	5m×3m
Shaking Table Weight	100 kN
Vibration Direction	1axis (Horizontal Direction)
Max. Displacement	±100mm
Max. Input Speed	500mm/sec
Max. Input Acceleration	1.0g
Max. Moment	500 kN·m
Frequency	DC-30Hz

3.2 실험방법

진동대 실험을 통한 데이터 측정대상은 힘, 변위 및 가속도이며, 이를 위하여 Table 5, Fig. 7과 같이 교각의 지진격리장치 설치위치에 하중계를 2개소 설치하고, 기초부와 지진격리장치하부, 하중계 상부에 각각 변위계를 설치하였다. 또한, 가속도계는 기초부와 지진격리장치 하부, 상부판 중앙에 각각 1개씩 부착하였다.

Table 5. Location and Number of Measurement Equipments

Measurement Equipment	Location	No.
Load Cell	Pier Top, HDRB Bottom	2
Displacement Transducer	Base, Load Cell Bottom & Top Base, Load Cell Top, HDRB Top	3
Accelerometer	Base, Load Cell Top, Deck Center	3

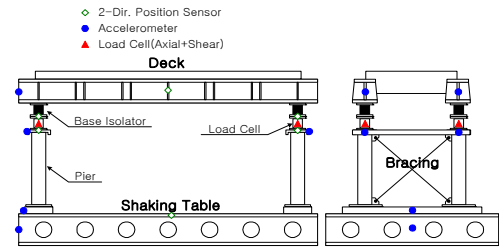


Fig. 7. Test Structure on Shaking Table

3.3 입력지진하중

본 연구에서 사용된 지진파는 미국에서 발생한 실제 지진기록인 El Centro, Taf을 비롯하여 일본에서 발생한 Hachinohe와 Akita과 Mexico City지진 등 총 6개의 계기 지진파를 입력 지진파로 사용하였다. 실험에 사용된 입력 지진의 개요는 Table 6과 같다.

Table 6. Input earthquake wavest

Earthquake	Record	PGA(g)
Akita N-S	Nihonkai Chubu, May 23, 1983 Component N-S, M7.7	0.19
El Centro S00E	Imperial Valley, May 18, 1940 Component S00E, M7.1	0.34
Hachinohe N-S	Tokachi, May 16, 1968 Component N-S, M7.9	0.23
Mexico City	Mexico City, September 19, 1985, M8.1	0.17
Northridge	Sylmar, January 27, 1994, M6.8	0.34
Taft N21E (H+V)	Kern County, July 21, 1952 Component N21E, M7.5	0.16

3.4 실험결과 및 분석

3.4.1 교량 상판의 거동

상판의 응답가속도는 고감쇠 고무받침을 이용한 지진 격리(Isolation)인 경우와 핀 받침(Pin Bearing)을 적용한 비 지진격리(Non-Isolation)인 경우를 비교하였다. 상판의 응답가속도는 Mexico City 지진의 경우를 제외하고 대부분의 경우 고감쇠 고무받침을 사용했을 때 비 지진 격리의 경우에 비하여 상판의 가속도 감소량이 훨씬 크게 나타났다. 특히 El Centro 지진은 61.4% 감소하였고, Hachinohe 지진은 53.5%, Taft 지진은 56.3% 감소하여, PGA가 높을수록 지진격리에 따른 감소율이 증가하였다. 그러나 Mexico City 지진에서는 고감쇠 고무받침을 적용할 경우 상판의 응답이 오히려 4% 증가함을 알 수 있었다. Table 7, Fig. 8은 상판의 응답가속도를 비교하여 나타낸 것이다.

Table 7. Max. response acceleration of deck (g)

Earthquake	Non-Isolated	HDRB	Reduction(%)
Akita	0.338	0.246	27.3
El Centro	0.658	0.254	61.4
Hachinohe	0.557	0.259	53.5
Mexico City	0.233	0.243	-0.04
Northridge	0.685	0.358	47.7
Taft	0.293	0.128	56.3

3.4.2 교각의 거동

지진에 대한 교각의 밀면 전단력은 Table 8과 같이 입력 지진과 중에서 Mexico City 지진을 제외하고 지진 격리와 비 지진격리 경우를 비교하면 평균적으로 60% 이상의 감소를 나타낸 것을 볼 수 있다. 그리고 비교적 작은 지진인 Akita 지진에 대해서는 밀면 전단력의 감소량이 다른 지진에 비해 적게 나타났다. 그러나 El Centro, Hachinohe와 Northridge 지진과 같은 큰 지진에 대해서는 밀면 전단력이 큰 폭으로 감소함을 알 수 있었다. 반면에 Mexico City 지진의 경우에는 상판의 거동과 마찬가지로 오히려 증가함을 알 수 있었다. 이는 Lee at al(1987)의 과거 지진에 대한 연구에 따르면 Mexico City 지진이 발생한 곳은 연약지반이어서 지반이 교란되어 지반환경이 불안정하다. 이에 따라 지진과 구조물의 고유주기가 유사하여 공진이 발생한 것으로 판단된다. Fig. 9는 진동대 실험결과 교각의 밀면 전단력을 나타낸 것이다.

Table 8. Max. shear force of pier (kN)

Earthquake	Non-Isolated	HDRB	Reduction(%)
Akita	9.98	4.12	58.7
El Centro	18.15	4.37	75.9
Hachinohe	16.17	4.29	73.4
Mexico City	6.18	4.20	32.0
Northridge	19.55	5.77	70.4
Taft	8.41	2.06	75.5

3.4.3 상대변위

지진에 따른 고감쇠 고무받침의 힘-변위 이력곡선은 Fig.10과 같다. 또한 실험에 사용한 모든 지진에 대한 비 지진격리와 고감쇠 고무받침의 상대응답변위 (Relative Displacement)를 비교하여 Table 9에 나타내었다. 고감쇠 고무받침을 이용한 지진격리 방법이 비 지진격리 방법에 비해 2.9~7.1배 상대변위가 증가하였다.

Table 9. Maximum Displacements of Isolation Relative to the Ground Subjected(mm)

Earthquake	Non-Isolated	HDRB	Reduction(%)
Akita	3.78	12.86	3.4
El Centro	2.89	13.15	4.6
Hachinohe	3.68	10.79	2.9
Mexico City	2.63	14.43	5.5
Northridge	2.75	19.39	7.1
Taft	1.65	4.73	2.9

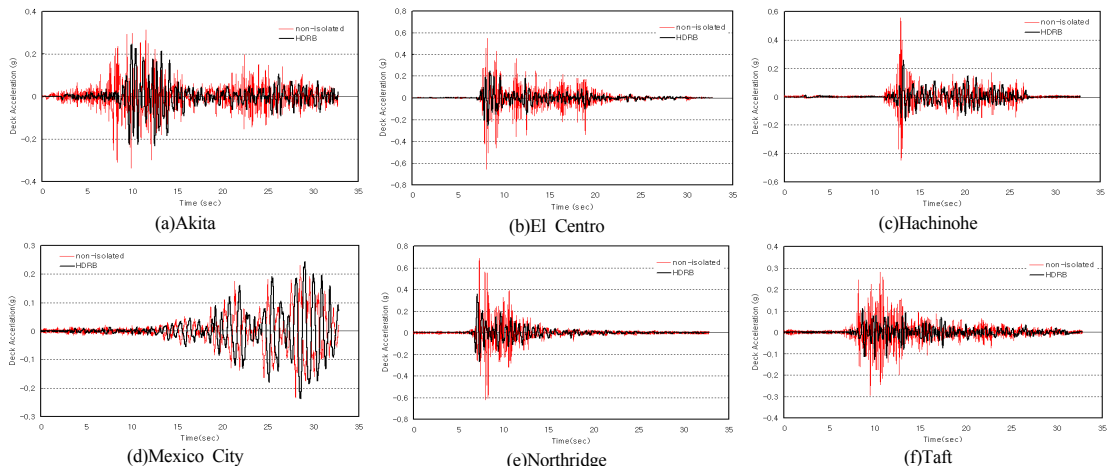


Fig. 8. Deck Acceleration Response under Earthquake

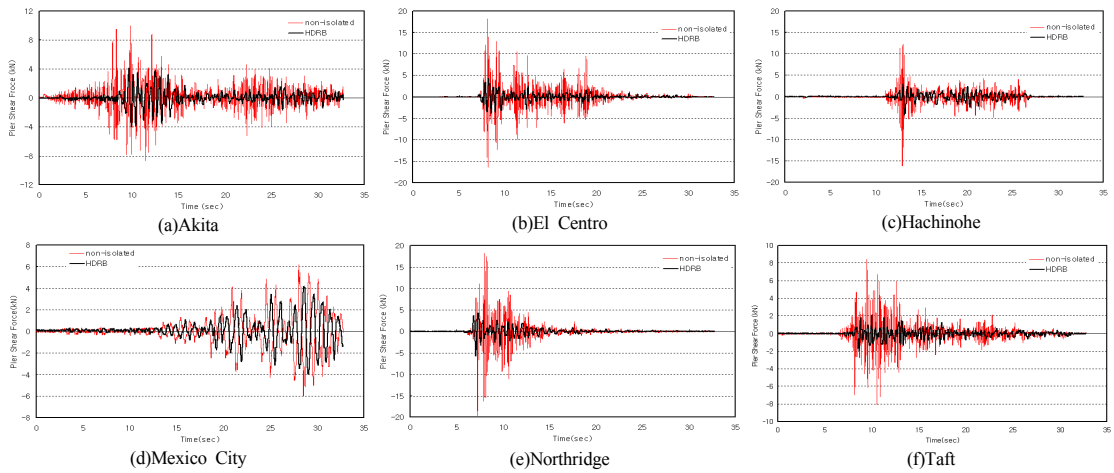


Fig. 9. Pier Acceleration Response under Earthquake

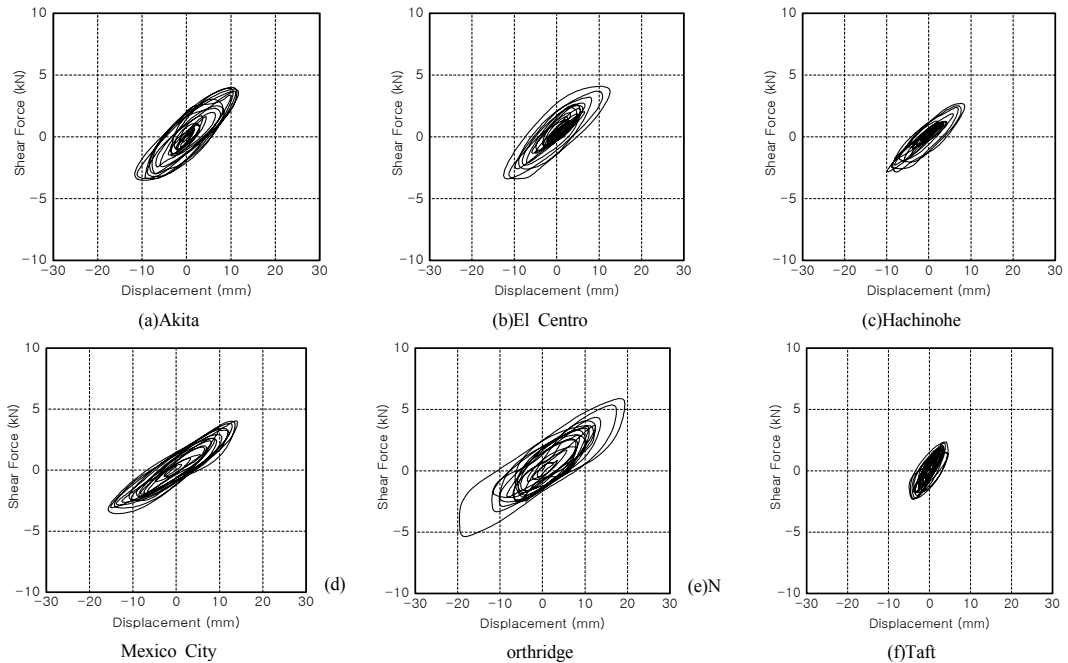


Fig. 10. Force-Displacement Relationship of a Base Isolator

3.4.4 실험결과 분석

본 연구에서는 고감쇠 고무받침이 적용된 축소교량을 이용하여 진동대 실험을 실시하여 지진격리 설계에 따른 교량의 거동특성을 분석하고 상판의 응답 가속도, 교각의 밀면 전단력 및 받침의 변형을 비교 분석하였다. 상판의 응답가속도와 교각 밀면 전단력의 경우 고감쇠 고무받침은 비교적 안정적으로 강한 지진뿐만 아니라 약한 지진에 대해서도 비교적 높은 에너지 감소율을 나타내었

다. 반면에 Mexico City 지진은 다른 역사지진에 비하여 탁월 주기가 상당히 긴 지진파로서 실험결과 교량에 고감쇠 고무받침이 적용될 경우 상판의 가속도와 교각의 전단력이 오히려 증폭되는 결과를 가져왔다. 특히 상판의 최대응답가속도의 경우 Mexico City 지진과 PGA가 유사한 Taft 지진에 비하여 5배 정도 응답이 증폭하였다. 이와 같은 현상은 몇 가지 원인이 복합적으로 발생한 것으로서 대표적으로 지반환경과 고유주기(natural period)

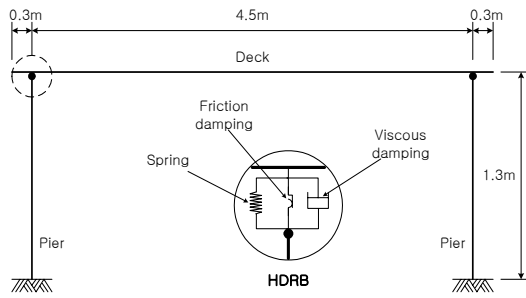


Fig. 11. Geometrical Shape of Structural Modeling

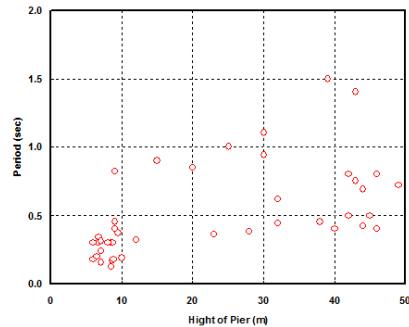


Fig. 12. Existing Bridge of Longitudinal Natural Period through Survey

Table 10. Maximum Displacements of Isolation Elative to the Ground Subjected(mm)

Earthquake	PGA(g)	Max. Response Acceleration of Deck (g)		Max. Shear Force of Pier (kN)	
		Test	Analysis	Test	Analysis
Akita	0.34	0.246	0.260	4.12	4.30
El Centro	0.23	0.254	0.268	4.37	4.50
Hachinohe	0.17	0.259	0.276	4.29	4.38
Mexico City	0.34	0.243	0.264	4.20	4.41
Northridge	0.16	0.358	0.360	5.77	5.89
Taft	1.65	0.128	0.171	2.06	2.20

Table 11. Comparison of non-isolated and HDRB

Earthquake	PGA(g)	Max. Response Acceleration of Deck (g)			Max. Shear Force of Pier (kN)		
		Non-Isolated	HDRB	Reduction	Non-Isolated	HDRB	Reduction
Akita	0.34	0.346	0.260	24.9%	9.996	4.30	56.9%
El Centro	0.23	0.604	0.268	55.6%	18.26	4.50	75.4%
Hachinohe	0.17	0.551	0.276	49.9%	16.59	4.38	73.6%
Mexico City	0.34	0.240	0.264	-10.0%	6.24	4.41	29.3%
Northridge	0.16	0.690	0.360	47.8%	19.58	5.89	69.9%
Taft	1.65	0.310	0.171	44.8%	8.48	2.20	74.0%

의 영향을 고려할 수 있다. 우선 Mexico City의 지반은 연약지반으로서 지반이 교란되어 지반환경이 불안정하다. 이와 같이 지반이 교란된 연약지반에 지진격리장치를 적용한 구조물의 경우 연약 지반에 의하여 저 진동수 영역의 지진운동이 증폭되는 경우가 있다(Lee, 1987). 이 경우 유효 진동수가 증폭된 지진격리구조는 그 역할을 하지 못하고 구조물의 응답이 오히려 증가할 우려가 있으므로 지진격리장치를 적용하는데 있어 주의해야 할 것으로 판단된다. 그리고 Mexico City 지진파의 고유진동수와 시험체 구조물의 고유진동수가 거의 일치하여 발생하는 공진(Resonance) 현상에 의해 지진응답이 크게 증폭될 가능성이 있는 것으로 판단된다. 도로교설계기준

(2012)의 내진설계편에 의하면 연약지반이나 교각의 높이가 높아 고유주기가 길어지는 경우 오히려 응답이 증폭될 수 있으므로 지진격리설계를 하지 않도록 하고 있다. 이와 같은 환경에서 지진격리장치를 사용할 경우 더 많은 고려가 요구된다.

4. 내진해석 및 실험결과

본 연구에서는 지진격리장치의 진동대 실험 결과를 이용하여 내진해석을 수행하여 진동대 실험결과와 비교하여 실험의 타당성을 검증하였다.

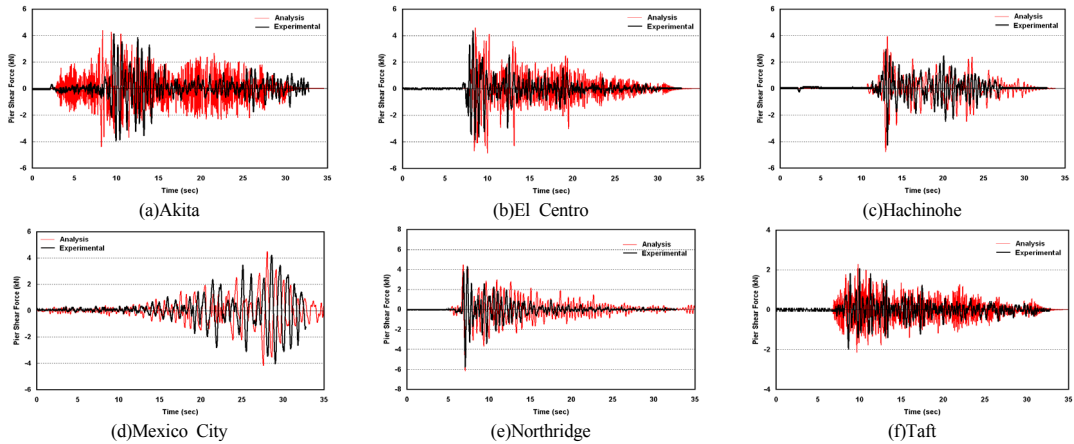


Fig. 13. Deck Acceleration Response under Earthquake

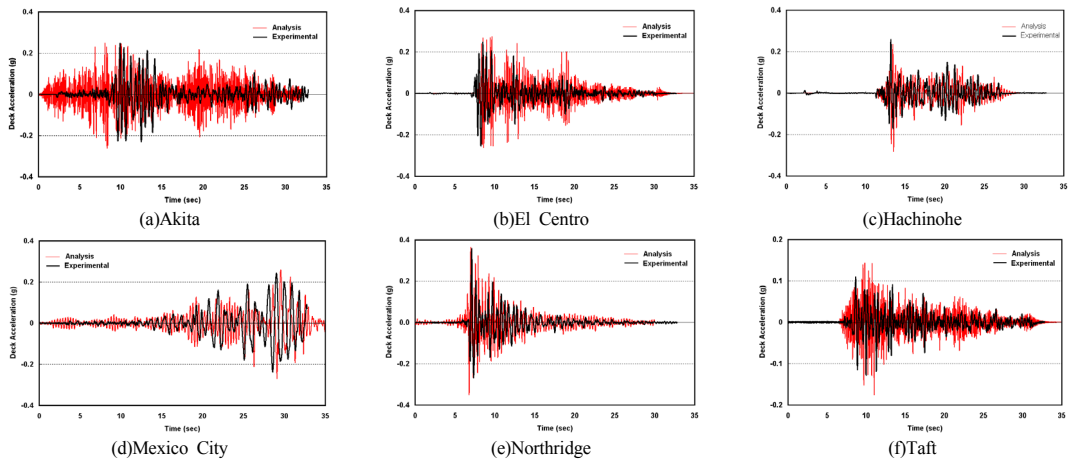


Fig. 14. Pier Acceleration Response under Earthquake

4.1 해석모델

실제 3차원적인 거동이 예상되는 실험용 교량을 2차원적 모델링하면 Fig. 11와 같다. 교축방향으로 두 개씩의 교각을 가지는 실험 교량은 2차원적인 평면거동에서 크게 벗어나지 않을 것으로 예상되나 본 연구에서는 실제 실험용 교량을 단순화시켜 해석을 수행하였다. 각 교각과 상판은 빔 요소(Beam Element)를 사용하여 모델링하였다. 지진격리장치의 특성을 구현하기 위하여 고감쇠 고무받침은 점성감쇠요소, 마찰감쇠요소, 스프링요소를 사용하였다. 대상 실험용 교량을 SAP 2000을 이용하여 모델링하고 자유진동해석을 수행하였다. 해석결과 대상 교량의 고유주기는 0.23sec로 나타났다. 이는 국내 고속국도 및 지방 국도 기준교량의 교각 높이와 교축방향의 고유주기에 대한 실태조사를 수행한 결과인 Fig. 12에

부합된다. 즉 실험 대상 교량인 마포대교의 교각 높이가 7.6~9.0m로 Fig.12에서 보면 0.5sec 이하의 고유주기에 넓게 분포되어 있다.

4.2 해석결과

고감쇠 고무받침(HDRB)이 적용된 축소교량을 대상으로 유한요소해석 프로그램을 이용하여 교축 지진해석을 수행하고 그 결과를 비교 분석하였다. 지진해석에 사용된 입력지진으로는 진동대 실험에 사용되었던 Akita, El Centro, Hachinohe, Mexico City, Northridge 및 Taft의 6개의 계기 지진파를 사용하였다. 지진격리 교량에 대한 지진해석을 통해 교량 상판의 수평방향 응답가속도와 교각의 밑면 전단력은 Table 10와 같다. 전반적으로 진동대 실험의 결과와 유사한 경향을 보이고 있었다.

4.2.1 교량 상판과 교각의 거동

고감쇠 고무받침(HDRB)을 적용하여 진동대 실험과 지진해석을 통하여 교량상판의 수평방향 응답가속도는 Fig. 13과 같고, 지진하중별 교각에 발생하는 전단력은 Fig. 14와 같다. Table 11은 진동대 실험과 Fig. 13, Fig. 14과 같이 해석값이 실험값보다 다소 크게 나타났다. 이는 해석시 고무재료의 비선형 거동에 따른 특성을 정확히 고려하지 못한 것이 가장 큰 원인으로 판단된다. 또한 실험값과 해석값의 차이가 발생하는 또 다른 원인으로서는 적층고무받침장치의 상사축소모형 제작의 부정확성 및 실험 준비 중에 발생하는 실험오차 등을 고려할 수 있다. 이와 같이 시간에 따른 교량의 거동 양상은 해석과 실험에 있어서 거의 유사하며 최대값에 있어서도 큰 차이는 나타나지 않고 있다. 따라서 본 해석방법은 지진하중 작용시 교량의 거동을 효율적으로 예측할 수 있고, 주요 재료인 고무의 비선형 거동특성에 대한 실험적 데이터를 구축하고 해석시 고려한다면 보다 정확한 해석결과를 얻을 수 있을 것으로 판단된다.

5. 결론

교량 축소모형에 대한 진동대 실험은 과거 지진파나 인공지진파를 생성하여 실제 구조물에 미칠 수 있는 영향을 모사함으로써 구조물의 응답을 평가하고 내진성능을 평가함으로써 신뢰성을 확보하는데 중요한 판단기준이 된다. 본 연구에서는 고감쇠 고무받침을 대상으로 기초 특성시험을 실시하고, 축소교량에 고감쇠 고무받침을 적용한 지진격리와 비 지진격리의 경우로 구분하여 진동대 실험 및 지진해석을 실시하였다. 그 결과를 정리하면 다음과 같다.

- (1) 고감쇠 고무받침의 등가 감쇠비는 주파수 및 면압에 대하여 비교적 큰 의존성을 나타내었으나, 전단변형률에 대해서는 의존성이 낮은 것으로 나타났다. 이와 같이 등가 감쇠비의 주파수 및 면압의 의존성이 큰 것은 고감쇠 고무 분자 사이의 점성 및 마찰 감쇠 요소의 영향 때문이라 판단된다. 전단강성은 전단변형률에 대하여 큰 의존성을 나타내는 반면에 면압에 대해서는 작은 의존성을 나타냈다. 따라서 고감쇠 고무받침의 전단강성 설계시 전단변형률에 대한 고려가 필요하다.

- (2) 진동대 실험을 통한 상판의 최대응답 가속도의 경우 비 지진격리장치에 대비하여 최대 61.4% 감소율을 보였다. 또한 교각 밀면의 최대 전단력은 비 지진격리의 경우에 비해 최대 75.9% 응답이 감소하여 지진시 에너지 저감효과가 우수함을 알 수 있었다. 이처럼 여러 종류의 계기지진파를 이용한 진동대 실험결과를 비교 분석한 결과 고감쇠 고무받침과 같은 지진격리장치를 설치한 교량의 교각 상부에서 상판으로 전달되는 최대응답가속도의 우수한 지진에너지 소산 능력과 교각의 전단력 감소효과를 확인할 수 있었다.
- (3) 진동대 실험결과 각 실험에 따른 교각과 지진격리장치에 대한 상대변위 변화는 평균적으로 4배 가량 변위가 증가하였다. 이는 지진격리장치의 사용에 의해 고유주기가 증가하여 상부구조물의 변위를 증가시킨 것이다.
- (4) 고감쇠고무받침은 강진이나 중약진에 상관없이 안정적인 거동을 보였으며, 응답가속도나 교각의 밀면 전단력을 저감시키는 데에도 우수한 것으로 평가되었다. 이러한 실험결과를 바탕으로 지진격리장치를 사용함으로써 내진성능을 향상시킬 수 있을 것으로 판단된다.
- (5) Mexico City와 같이 지반이 교란된 연약지반에 지진격리설계를 할 경우 연약지반에 의하여 저진동수 영역의 지진운동이 증폭되어 지진격리구조는 그 역할을 하지 못하고 구조물의 응답이 오히려 증가할 우려가 있으므로 지진격리장치를 적용하는데 있어 주의해야 할 것으로 판단된다.

References

- [1] Koo GH, Lee JH, Yoo B, "Performance Experiments and Analysis of Nonlinear Behavior for HDRB Using in Seismic Isolation, J. of EESK, EESK, Vol. 2, No. 4, pp.1-113, 1998.
- [2] Jung GY, Ha DH, Park KN, Kim DH, "Experimental study on characteristics of low hardness rubber bearing", J. of KSCE, KSCE, Vol. 22, No. 6A, pp.1295-1307, 2002.
- [3] Oh J, Jung HY, "An Experimental Study for the Shear Property Dependency of High Damping Rubber Bearings", J. of KSCE, KSCE, Vol. 30, No. 2A, pp.121-129, 2010.
- [4] Takayama Mineo, "Isolation to 4 seconds-Sesimic

Isolation Design”, Engineering Books, 1997.

- [5] J.S.S.I, “Introduction to Seismic Isolation Structure”, Japan Society of Seismic Isolation, Ohmsa, 2002.
- [6] Kelly JM, “A Seismic Base Isolation : Review and Bibliography”, Soil Dynamics and Earthquake Engineering, Vol. 5, pp.202-216, 1986.
DOI: [http://dx.doi.org/10.1016/0267-7261\(86\)90006-0](http://dx.doi.org/10.1016/0267-7261(86)90006-0)
- [7] Lee IM, Earthquake and Soil, Korea Society Civil Engineering, Vol.35, No.5, pp.40-42, 1987.
- [8] Kim YS, Im JS, Yun CB, Kim NS, “Shaking Table Tests and Simplified Analysis of Bridge with Base Isolators Consisting of PTFE Plates and Rubber Rings”, J. of KSCE, KSCE, Vol. 19, No. 1-6, pp.899-906, 1999.
- [9] Chung WJ, Yun CB, Kim NS, Seo JW, “Shaking table and psedodynamic tests for the evaluation of the seismic performance of base-isolated structures”, Engineering Structures, Vol. 21, pp.365-379, 1999.
DOI: [http://dx.doi.org/10.1016/S0141-0296\(97\)00211-3](http://dx.doi.org/10.1016/S0141-0296(97)00211-3)
- [10] Yi MW, Bijan S, “Shaking table testing of a base isolated model”, Engineering Structures, Vol. 24, pp.1203-1215, 2002.
DOI: [http://dx.doi.org/10.1016/S0141-0296\(02\)00054-8](http://dx.doi.org/10.1016/S0141-0296(02)00054-8)
- [11] Tsai MH, Wu SY, Chang KC, Lee GC, “Shaking table tests of a scaled bridge model with rolling-type seismic isolation bearings”, Engineering Structures, Vol. 29, pp.694-702, 2007.
DOI: <http://dx.doi.org/10.1016/j.engstruct.2006.05.025>
- [12] Jeon BG, Chang SJ, Kim NS, “Seismic Performance Evaluation of Con-type Friction Pendulum Bearing System Using Shaking Table Test” J. of KSNVE, Vol. 21, No. 7, pp.599-608, 2011.
- [13] Kim MK, Choun YS, Choi IK, “A Shaking Table Test for Equipment Isolation in the NPP(I):Rubber Beaing, J. of EESK, EESK, Vol. 8, No. 5, pp.65-77, 2004.
- [14] ISO 22762, Elastomeric Seismic Protection Isolators Part-1 : Test Methods, 2010.
- [15] ISO 22762, Elastomeric Seismic Protection Isolators Part-2 : Applications for bridge- specifications, 2010.
- [16] Korea Road and Transportation Association, Limit-State based Bridge Design Specification, Ministry of Load Infrastructure and Transport, 2012.

김 후 승(Hu-Seung Kim)

[정회원]



- 2006년 2월 : 전남대학교 토목공학과 (공학석사)
- 2008년 1월 ~ 2011년 2월 : 동명기술공단 구조부 근무
- 2011년 2월 ~ 2013년 1월 : 유니슨이앤씨 설계부 근무
- 2012년 3월 ~ 현재 : 서울시립대학교 토목공학과 박사과정

<관심분야>
내진 및 면진, 토목구조

오 주 (Ju Oh)

[정회원]



- 2001년 2월 : 전남대학교 토목공학과(공학석사)
- 2011년 8월 : 서울시립대학교 토목공학과(공학박사)
- 2000년 11월 ~ 2005년 10월 : 한국건설품질연구원 전임연구원
- 2005년 10월 ~ 2011년 8월 : 유니슨기술연구소 선임연구원
- 2011년 8월 ~ 현재 : 특허청 심사관

<관심분야>
내진 및 면진, 토목구조