

교량의 기존 받침을 활용하는 내진보강시스템의 유사동적 실험

The Pseudo-Dynamic Test for the Seismic Retrofit System Utilizing Existing Bridge Bearings

곽임종¹⁾ · 조창백²⁾ · 김영진³⁾ · 곽종원⁴⁾

Kwahk, Im-Jong · Cho, Chang-Beck · Kim, Young-Jin · Kwark, Jong-Won

국문 요약 >> 본 연구에서는 교량의 내진보강을 위하여 기존 교량에 지진격리장치를 추가하는 접근법을 제안하였다. 기존 받침을 지진격리받침으로 완전히 대체하는 접근법도 이미 제안되어 있지만 본 연구에서는 경제성과 안전성을 고려하여 기존 받침을 제거하지 않고 활용하도록 하였다. 이는 지진격리받침이 상부 수직하중을 분담하지 않고, 수평방향의 지진운동에 대한 주기 이동과 감쇠 역할만 한다. 이 접근법의 실험적 검증을 위해 실제 교량을 대상으로 납-적층고무받침(LRB)을 설계하고 실물크기로 기존 받침과 LRB를 제작하였다. 이 지진격리시스템의 가상 지진입력에 대한 응답은 유사동적실험으로 구하였다. 아울러 범용해석프로그램을 통한 지진응답해석과 비교하여 실험결과와 신뢰성을 확인하였다. 실험결과 제안된 지진격리시스템은 지진시 안정적인 거동을 보였다.

주요어 지진격리, 내진보강, 납-적층고무받침, 유사동적 실험, 기존 받침

ABSTRACT >> In this study, an approach that installs seismic isolation bearings was proposed for the seismic retrofit of the existing bridges. The method that replaces all existing bearings with seismic isolators was proposed already. However, in this study, we recommend to utilize the existing bearings for the benefit of safety and cost. According to our proposal, the seismic isolators do not support vertical loads but they just function as the period shifter and the horizontal damper. To verify this approach experimentally, the real scale bearings and lead rubber bearings for the real highway bridges were designed and fabricated. And the responses of this isolated bridges to the assumed earthquakes were determined by the pseudo dynamic test scheme. The test results were also compared to the responses computed by the well known structural analysis software to check the reliability of the test. From the test results, we found that the retrofitted bridges using the proposed method showed stable performances under earthquakes.

Key words seismic isolation, seismic retrofit, lead rubber bearings, pseudo dynamic test, existing bearings

1. 서론

내진설계 규정이 도입된 이래로 신설 교량의 내진설계 기술과 더불어 기존 교량의 내진보강 기술도 계속 발전하고 있다. 그리고 최근 교량 구조물의 건설에 있어서 대형화 및 장대화의 추세가 계속되고 있으므로 보다 큰 상시변위와 지진시 가동변위를 효과적으로 수용할 수 있는 교량 내진 장

치의 중요성이 증대되고 있다. 교량이 충분한 내진성능을 보유하기 위해서는 내진장치의 성능 향상과 신뢰성 확보가 필수적이며 이를 바탕으로 경제성과 합리성을 갖춘 지진격리시스템의 설계기술이 필요하다. 지진격리시스템을 적용하여 기존의 비내진 교량의 내진성능을 향상시키는 접근법은 여러 내진보강 방법 중 하나로서 기존 교량의 내진성능 평가결과에 따라 적절하게 선택될 수 있어야 한다.

지진격리시스템이 선택된 경우에는 구체적인 적용방법으로서 교량의 기존 받침을 지진격리받침으로 완전히 대체하는 접근법도 이미 제안되어 있다.^(5,6) 이 접근법에 따른 내진보강시공이 일부 실시된 사례가 있지만 기존 받침의 철거와 지진격리받침의 설치과정에서 교량 구조물에 무리를 줄 수 있다는 우려가 제기되고 있다. 따라서 본 연구에서는 지진격리받침의 적용 시에 안전성과 경제성을 고려하여 기존 받

¹⁾ 정회원·한국건설기술연구원 선임연구원
(대표저자: kwakim@kict.re.kr)

²⁾ 정회원·한국건설기술연구원 연구원

³⁾ 정회원·한국건설기술연구원 수석연구원

⁴⁾ 정회원·한국건설기술연구원 수석연구원

본 논문에 대한 도의를 2007년 4월 30일까지 학회로 보내 주시면 그 결과를 게재하겠습니다.

(논문접수일 : 2006. 9. 18 / 심사종료일 : 2006. 10. 18)

침을 제거하지 않고 활용할 수 있는 접근법을 제안하였다. 이 접근법에서는 그림 1과 같이 기존 받침을 제거하지 않고 그대로 활용하여 상부하중을 그대로 지지하도록 하였다. 이는 기존 받침으로 이루어진 교량 지지 시스템에 지진격리받침을 추가로 장착하여 수평방향의 지진하중에 대처하도록 하는 것이다. 이 경우 상부수직하중은 기존 받침시스템이 그대로 지지하고 있으므로 추가 설치된 지진격리받침은 상부 수직하중을 분담하지 않고, 수평방향의 지진운동에 대한 주기 이동과 감쇠 역할만 담당하게 하는 역학적 시스템을 구성한다. 또한 이러한 시스템에서는 지진격리받침이 수직하중을 받지 않으므로 일반적인 지진격리받침의 설계에 적용되는 내부 고무층과 강판의 두께보다 좀 더 두껍게 설계할 수 있다. 이러한 이득은 지진격리받침 제작공정의 축소와 원가절감에 도움이 된다.

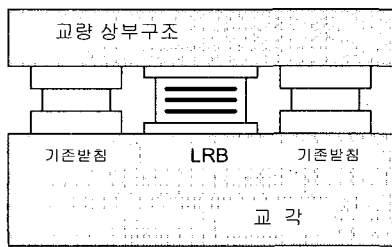
제안된 방법의 안전성을 확인하기 위해서는 기존 받침과 함께 지진격리받침이 설치된 지진격리시스템에 대한 실험적 검증이 필요하다. 이를 통해 가상 지진입력에 대한 제안된 지진격리시스템의 응답을 실험을 통해 확인하는 것이다. 따라서 본 실험연구에서는 기존 비내진 교량에 지진격리받침으로서 납-적층고무받침(Lead Rubber Bearing, LRB)이 추가된 지진격리시스템에 대하여 실험을 실시하고 그 지진

응답을 구하였다. 실제 교량을 대상으로 LRB를 설계하고 실험목기로 기존 받침과 LRB를 제작하였다. 이 지진격리시스템의 가상 지진입력에 대한 응답은 유사동적 실험기법으로 구하였다. LRB가 장착된 구조물의 거동을 유사동적 실험으로 파악하기위한 접근법의 유용성은 이미 10여년 전부터 김남식, 이동근 등에 의해 확인된 바 있다.^(6,8) 아울러 본 연구의 실험결과는 범용해석프로그램을 통한 지진응답해석과 비교하여 신뢰성을 확인하였다.

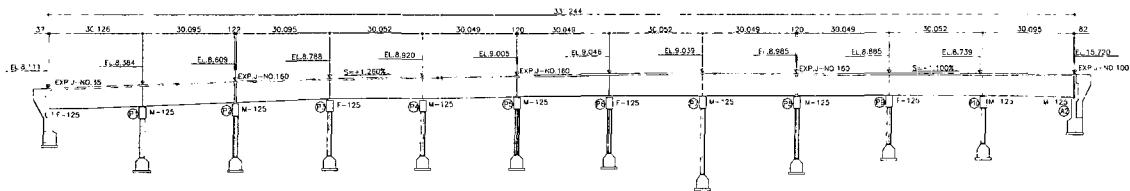
2. 실험개요

2.1 대상교량

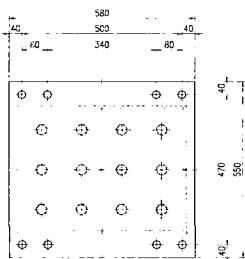
내진성능 향상을 위하여 지진격리받침이 추가로 적용된 가상의 예제 교량은 그림 2와 같다. 가상의 지진입력에 대한 응답은 유사동적 실험기법을 통해 구하게 되는데 Pier6을 실험 대상 교각으로 하여 모형이 제작되며 그 이외의 부분은 수치적으로 모델링된다. 실험을 위해 Pier 6에 설치되는 LRB와 기존 받침은 실제 설계도면과 같은 크기와 용량으로 설계, 제작하였다. 그리고 실험 대상 교각인 pier6은 철근콘크리트 구조물로 직접 제작하지 않고 탄성범위 내에서 비슷한 값의 강성을 갖는 탄성받침을 제작하여 실험에 사용하였다. 교량이 지진격리설계 되었을 경우 교각은 탄성한계 내에서 거동하도록 설계되는 것이 일반적이므로 선형적 특성을 가진 탄성받침으로써 철근콘크리트 교각을 대신하도록 하는 것이다. 따라서 대상 교각 pier6에 대해 섬유요소를 이용하여 수평 변위에 대한 철근콘크리트 교각의 비선형 해석을 실시하고 그 결과⁽¹⁾를 바탕으로 적절한 규격을 갖는 탄성받침을 설계, 제작하였다. 그림 3은 철근콘크리트 교각의 역할



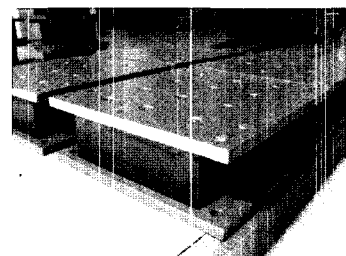
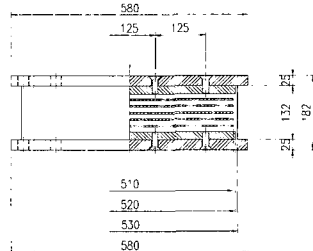
<그림 1> 제안된 지진격리받침 설치 개념도



<그림 2> 대상 교량 단면도



(a) 탄성받침의 설계도



(b) 제작 완료된 탄성받침

<그림 3> Pier6을 모형화한 탄성받침의 설계 및 제작

을 대신하도록 설계, 제작된 탄성받침의 모습이다.

2.2 기존 받침과 지진격리받침의 배치

앞서 기술한 바와 같이 본 실험연구는 기존의 받침을 그대로 활용한 상태에서 교량을 지진격리화 시키는 것이 특징이며, 상부구조의 수직하중은 기존 받침이 지지한다.

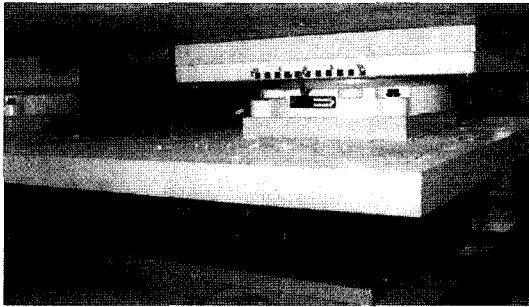
지진격리를 위해서 기존 받침 중 고정단은 고정장치를 모두 제거하여 가동단으로 바꾸고, 추가된 지진격리받침인 LRB는 그림 4와 같이 기존 받침과 병렬로 설치된다. 기존 받침으로는 대상 예제교량의 원 설계와 동일하게 그림 5와 같은 고력 황동판 받침을 사용하였다.

유사동적 실험에 사용될 LRB는 그림 2의 예제교량을 대상으로 일반적인 지진격리설계 절차에 따라 제작되었다. 이

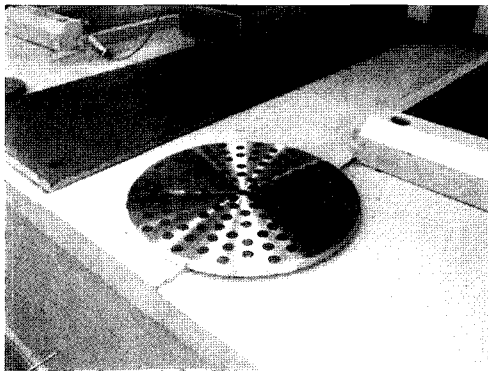
LRB는 일반적인 경우와 달리 수직하중을 분담하지 않으므로 지진격리장치의 설계 및 제작에 있어서 수직방향 압축응력에 의한 제한이 적다. 따라서 LRB 내부의 강판과 고무층의 두께를 일반적인 경우보다 두껍게 할 수 있을 것으로 판단되었으며, 이는 LRB의 제작단가 인하효과를 가져올 수 있다. 본 실험에서는 그림 6과 같이 강판 두께 3mm로 설계된 일반적인 LRB와 강판층을 7mm로 보다 두껍게 설계한 LRB를 각각 제작하여 실험 후 그 결과를 비교하였다. 제작된 두 가지 LRB의 외형은 서로 차이가 없다.

2.3 LRB의 수직하중 의존성 검토

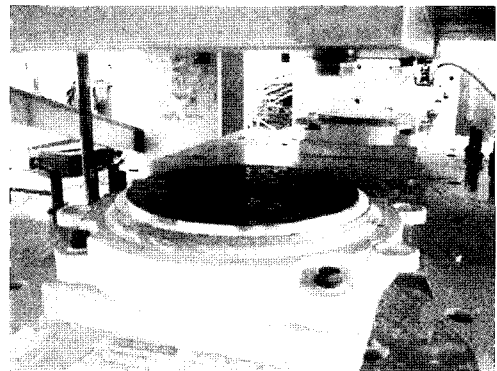
실제 LRB를 제작하여 교량에 적용하고자 할 경우에는 성능평가시험을 거쳐 일정한 수준 이상의 품질 확보 여부를 확인해야 한다. 이러한 성능평가시험에서는 지진격리받침의 기본적 성능인 유효전단강성, 등가감쇠비의 측정 이외에도 수직하중, 전단변형률 크기, 가진 주파수, 온도 등의 변화에 따른 기본 성능의 변화도 평가한다. 현재 국내 도로교설계 기준의 지진격리설계편에는 상세한 성능평가기준이 규정되어 있지 않고 다만 유효전단강성과 등가감쇠비에 대한 품질 기준만 규정되어 있다.⁽⁴⁾ 따라서 그 동안에는 관례적으로 미국 HITEC 기준이나 AASHTO 등 외국 규정을 인용하여 성능검사를 하는 경우가 많았다.^(2,3) 최근 2005년 제정된



〈그림 4〉 기존 받침과 지진격리받침의 배치

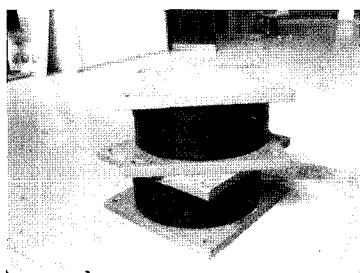


(a) 제작된 고력 황동판 모습

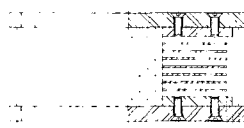


(b) 기존 받침으로 장착된 고력 황동판

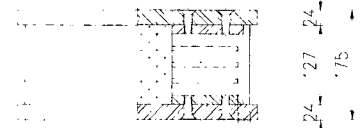
〈그림 5〉 기존 받침으로 사용된 고력 황동판 받침



(a) 제작된 LRB 시험체



(b) 강판 두께 3mm 설계시험체



(c) 강판 두께 7mm설계 시험체

〈그림 6〉 LRB 시험체(강판 두께 3mm, 7mm)

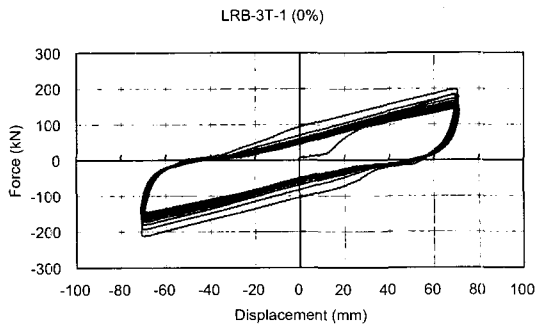
ISO 기준에는 특히 수직하중에 대한 의존성 실험을 설계수직하중의 0%에서 150%사이의 범위에서 실시하도록 하고 있다. 본 연구 제안된 방법에서는 지진격리받침이 수직하중을 전혀 받지 않아서 설계수직하중의 0%에 해당하므로 이 실험에서는 ISO 기준을 인용하여 수직하중 의존성 실험을 실시하였다. 수직하중이 없는 상태에서 수평방향으로 설계 변위만큼 반복 재하한 실험 결과는 그림 7에 나타내었다.

내부 강판 두께가 3mm, 7mm인 LRB에 대해 상부 수직하중의 150%범위까지 수직하중 의존성실험을 실시한 결과는 표 1에 정리하였다. 수직하중 변화에 따른 유효전단강성과 등가감쇠비의 증감을 측정하여 수직하중이 없는 경우를 기준으로 표시하였다. 실험결과를 보면 수직하중이 없는 상태에서 수직하중이 증가할수록 유효전단강성은 조금씩 감소하고 등가감쇠비는 증가하는 경향을 보인다. 본 연구에서 제안된 공법은 기존 받침이 이미 수직하중을 전적으로 받고

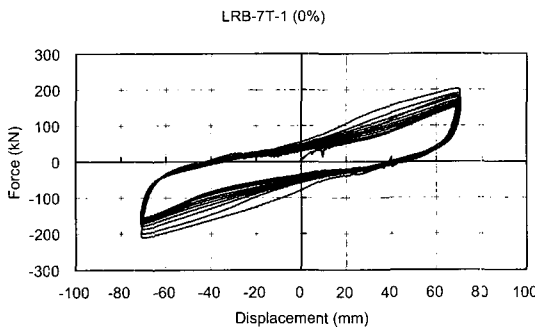
있는 상태에서 지진격리받침을 끼워 넣은 것이므로 수직하중 없이 수직방향 변위만 구속된 상태에 가깝다. 따라서 설계변위 이내에서 지진격리받침에 수평변위가 발생하더라도 수직하중의 변화는 크지 않을 것으로 예측된다. 이러한 사실들을 감안할 때, 제안된 공법에서 지진격리받침에 수직하중이 가해지지 않는 점이 지진격리시스템의 거동에 불리한 영향을 주지 않을 것으로 판단된다.

2.4 유사동적 실험 세팅

유사동적 실험을 위하여 그림 8과 같이 교량 상부 수직하중을 가하는 유압잭을 실험장치 상단에 설치하였으며 수평하중을 가하는 100ton 용량의 Dynamic Actuator를 횡방향으로 설치하였다. 2개의 탄성받침으로 대신한 pier6 교각 모형 위에 기존 받침인 2개의 고력 황동판 받침을 설치하고 그 사이에 LRB를 각각 설치하였다. 실제 시공 상황을 모사하기 위해 교각 모형위에 기존 받침인 고력 황동판 받침만 설치한 상태에서 상부 수직 하중을 먼저 재하하여 기존 받침이 수직하중을 모두 받도록 한 후에 2개의 고력 황동판 받침 사이로 LRB를 밀어 넣고 고정하였다. 그림 9는 유사동적 실험을 위한 실험 장치에 교각모형인 탄성받침 2개와 그 위에 기

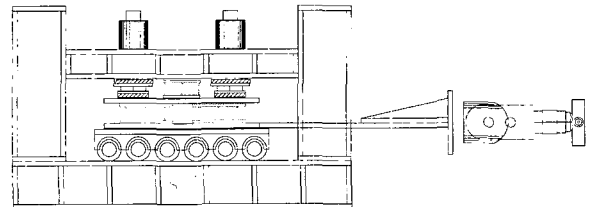


(a) 강판 두께 3mm 시험체 변위-하중 곡선

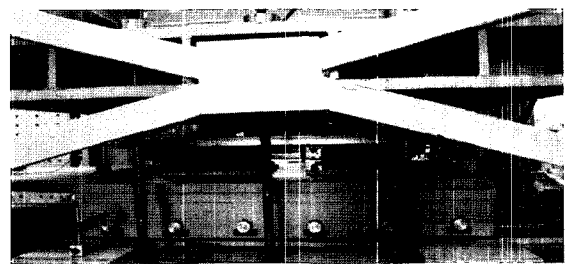


(b) 강판 두께 7mm 시험체 변위-하중 곡선

<그림 7> 수직하중이 없는 상태의 LRB 성능실험 결과(강판 두께 3mm, 7mm)



<그림 8> 유사동적 실험 개요도



<그림 9> 유사동적 실험을 위한 세팅 완료 후의 모습

<표 1> 수직하중 변화에 따른 유효 전단강성 및 등가감쇠비의 변화

시험체 별 수직하중	유효전단강성(kN/mm)	증감률(%)	등가감쇠비(%)	증감률(%)
LRB 1 (강판두께 3mm)	0%	2.47	0	21.93
	50%	2.27	-8.10	31.44
	100%	2.21	-10.53	35.65
	150%	2.19	-11.34	33.60
LRB 2 (강판두께 7mm)	0%	2.33	0	20.02
	50%	2.37	1.72	25.97
	100%	2.20	-5.60	35.43
	150%	2.07	-11.16	35.55

존 받침, LRB 등이 순서에 따라 세팅 완료된 모습이다.

2.5 입력지진시간이력

그림 10과 같이 현행 도로교설계기준에 따라 실제 지진 운동을 수정한 4개의 인공지진운동을 입력지진시간이력으로 사용하여 실험을 실시하였다.

3. 실험결과

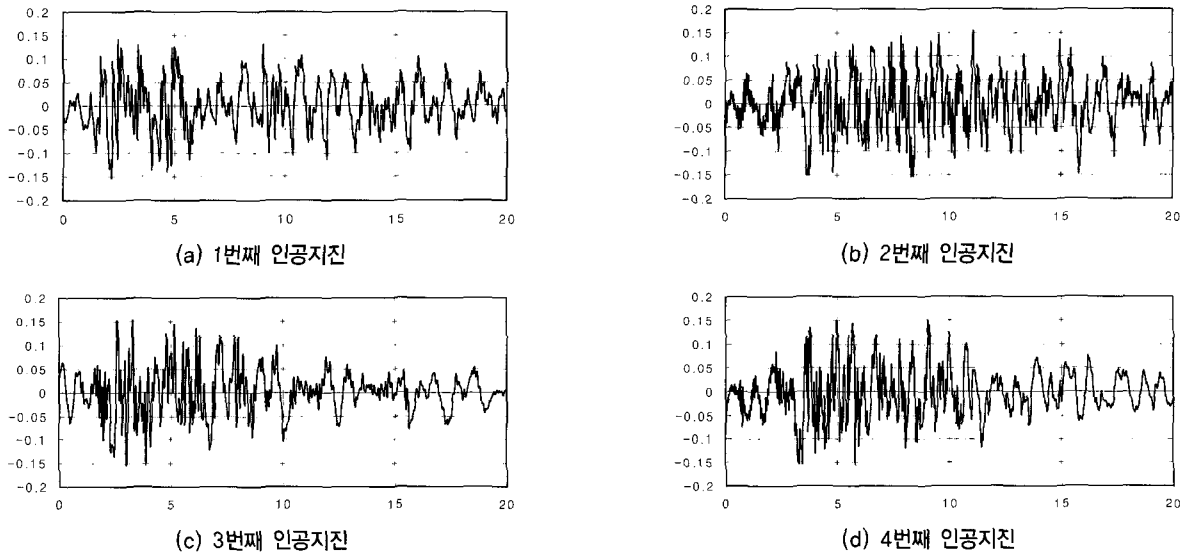
유사동적 실험 기법으로 4개의 인공지진입력에 대한 pier6의 지진시 응답을 구하였다. 내부 강판 두께가 각각 3mm,

7mm인 LRB시험체를 적용한 경우의 상부구조 변위응답을 비교하여 그림 11에 같이 나타내었다.

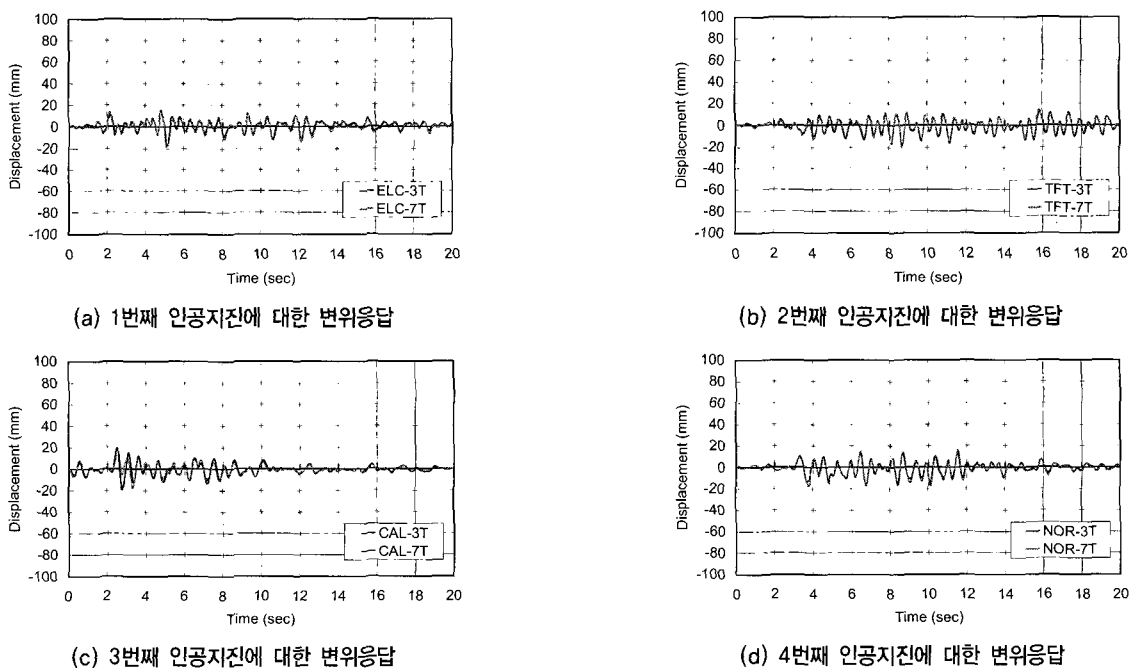
아울러 변위응답에 대응하는 pier6의 바닥 전단력을 구하여 그림 12에 나타내었다. 이들 실험결과를 살펴보면 강판의 두께가 다르더라도 4개의 인공지진에 대한 응답시간이력 모두 동적거동이 서로 거의 일치하게 나타남을 볼 수 있다.

4. 수치해석과의 비교 분석

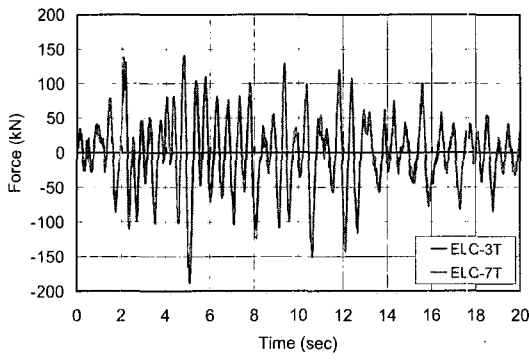
앞의 3절에서는 유사동적 실험에 의한 예제교량의 지진 응답을 구하였다. 수행된 유사동적 실험의 타당성을 검증하



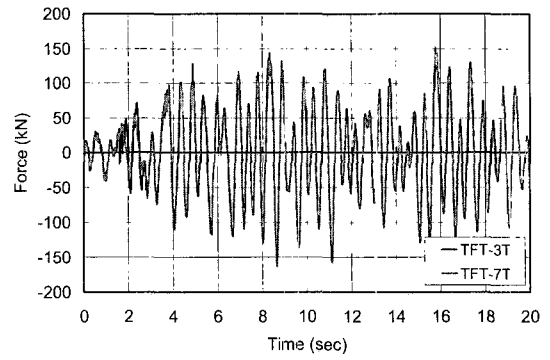
〈그림 10〉 인공지진 시간이력



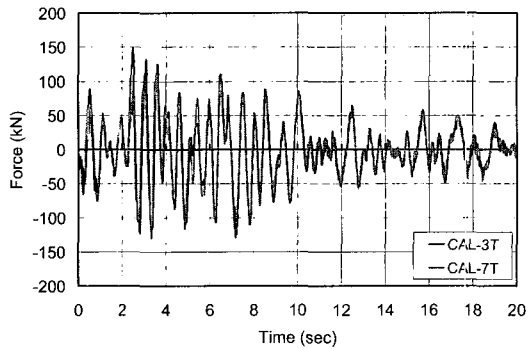
〈그림 11〉 Pier6 상부구조물 변위 시간이력



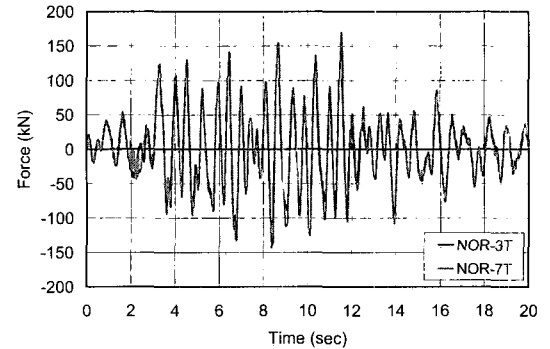
(a) 1번째 인공지진에 대한 바닥 전단력



(b) 2번째 인공지진에 대한 바닥 전단력

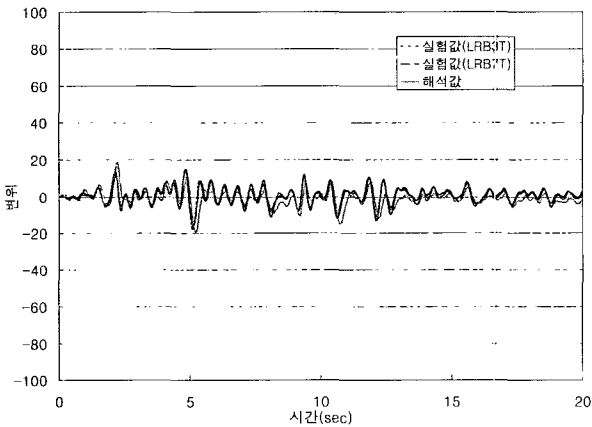


(c) 3번째 인공지진에 대한 바닥 전단력

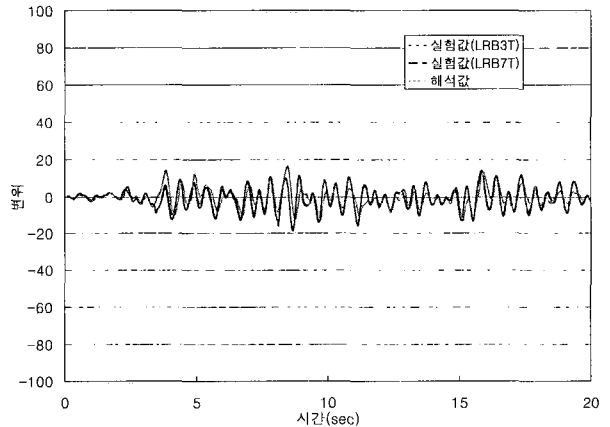


(d) 4번째 인공지진에 대한 바닥 전단력

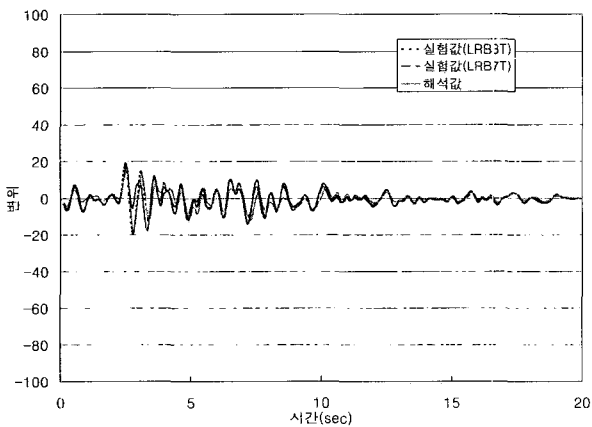
<그림 12> Pier6 바닥 전단력 시간이력



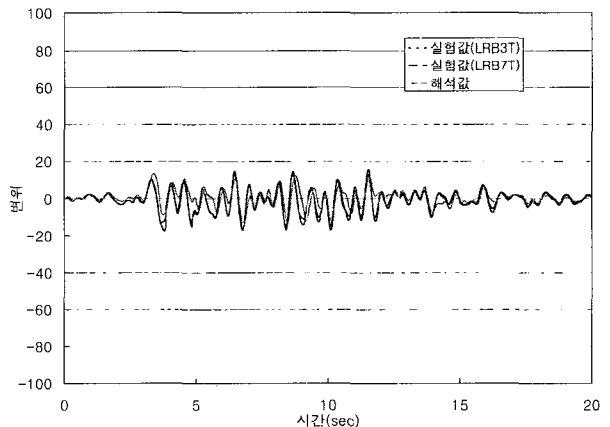
(a) 1번째 인공지진에 대한 응답 비교



(b) 2번째 인공지진에 대한 응답 비교



(c) 3번째 인공지진에 대한 응답 비교



(d) 4번째 인공지진에 대한 응답 비교

<그림 13> 실험결과와 수치해석 결과의 비교 검증

기 위해 이들 응답을 범용 해석프로그램인 SAP2000을 이용하여 수치해석한 응답과 비교하였다. 가상의 예제교량에서 유사동적 실험의 대상이 되었던 Pier6의 상단 변위 응답을 실험과 수치해석으로 각각 구하고 그 결과를 그림 13에 나타내었다. 4가지 인공지진입력에 대하여 내부 강판 두께가 각각 3mm, 7mm인 LRB를 장착한 유사동적 실험결과와 수치해석 결과를 동시에 비교하였다. 비교 결과를 살펴보면 실험으로 관측된 응답이 수치해석으로 예측된 응답과 잘 맞음을 볼 수 있다. 이로부터 본 연구의 유사동적 실험이 적절하게 수행되었다고 판단된다.

5. 결론

본 연구에서는 기존 교량에 지진격리받침을 적용하여 내진보강을 실시하는 경우 안전성과 경제성을 고려하여 기존 받침을 제거하지 않고 활용할 수 있는 접근법을 제안하였다. 그리고 제안된 방법의 적절성을 검증하기 위해서 기존 받침과 함께 지진격리받침이 설치된 지진격리시스템에 대한 유사동적 실험을 실시하였다. 실제 교량을 대상으로 가상의 지진격리설계를 실시하고 기존 받침과 지진격리받침을 실물 크기로 제작하여 실험함으로써 실험의 사실성을 제고하였다. 또한 범용 해석프로그램을 통한 지진응답 해석결과와 유사동적 실험결과를 비교하여 실험결과와 신뢰성을 확인하였다.

제안된 방법에서는 지진격리받침이 수직하중을 받지 않는다는 것을 감안하여 지진격리받침 내부의 강판층을 보다 두껍게 제작하여 제작 원가를 절감할 여지가 있는지도 함께 확인하였다. 실험결과 강판 두께가 각각 3mm와 7mm의 LRB를 적용한 경우 모두 안정적인 거동을 보였다. 이러한 사실로부터 제안된 방법에서는 강판 두께를 두껍게 하여 받침 내부 충수를 줄일 수 있어 LRB의 제작원가를 절감할 수 있을 것으로 판단되었다.

기존 받침을 제거하고 지진격리받침으로 완전히 대체하는 기존의 접근 방법은 그간의 몇몇 적용 사례에서 받침교체 시공 중의 안전성 문제, 모든 받침을 교체하는데 따른 경제성 문제 등이 제기되고 있으므로 제안된 접근 방법이 이

러한 문제를 개선하는데 기여할 수 있을 것으로 기대된다.

적층고무계열의 받침은 수직하중이 작용하지 않을 경우 파단이 발생할 때까지 견딜 수 있는 전단변형률이 줄어드는 것으로 알려져 있다. 따라서 제안된 방법을 적용할 경우에는 극한의 경우를 포함하여 전단변형률의 발생 범위를 도로교설계기준에서 규정한 지진시 최대 전단변형률을 넘지 않도록 설계하는 것이 바람직하다. 만약 공용 중에 이보다 더 큰 수준의 전단변형률이 발생 가능한 경우라면 그 수준의 전단변형률에 대하여 수직하중 의존성 실험을 실시하여 별도로 적용 타당성을 확인하여야 할 것으로 사료된다.

감사의 글

본 연구는 건설교통부 교량설계핵심기술연구단 연구과제 “교량 부속시설의 성능 및 신뢰성 향상기술 개발” (과제번호 : 03산C02-01)와 유니슨(주)의 지원으로 수행되었기에 관계자 여러분께 감사드립니다.

참고 문헌

1. 한국건설기술연구원, “교각 내진성능 평가 및 교량 비선형 내진해석프로그램 개발”, 기본연구사업 연구보고서, 건기연 2001-078, 2001.
2. AASHTO, *Guide Specifications for Seismic Isolation Design*, AASHTO, 1999.
3. Highway Innovative Technology Evaluation Center (HITEC) *Guidelines for the Testing of Seismic Isolation and Energy Dissipating Devices*, HITEC 96-02, 1996.
4. 건설교통부, “도로교설계기준”, 2005, pp. 510
5. 한국건설교통기술평가원/건설교통부, “비내진 교량의 노후 교좌장치 교체시 지진격리장치를 이용한 내진성능향상기술 개발”, 건설핵심기술연구개발사업 최종보고서, R&D/목적F-03, 2004.
6. 광임중, 조창백 외, “적층고무받침으로 내진보강된 교량의 유사동적실험”, 한국지진공학회 논문집, 제9권 제1호(통권 제 41호), 2005년 2월, pp. 43-50.
7. ISO, *Elastomeric seismic-protection isolators- Part 1: Test methods*, ISO 22762-1 First edition, 2005.
8. 김남식, 이동근, “기초분리된 액체저장탱크의 유사 동적실험”, 대한토목학회 논문집, Vol. 13, No. 4, 1993년, pp. 51-63.