

# StLRB 지진격리장치를 적용한 교량의 거동특성과 비교분석

## Response Characters of Bridge Adopting StLRB

최 승 호\*

한 경 봉\*\*

박 선 규\*\*\*

Choi, Seung-Ho

Han, Kyoung-Bong

Park, Sun-Kyu

### Abstract

In this paper, the seismic analysis and the modeling techniques have been introduced for seismic performances assessment, when seismic isolation bearings are applied to a real bridge. Nonlinear time-history analysis is carried out using finite element analysis program. El Centro earthquake(1940, N00W) used as earthquake ground excitations. The seismic response of seismically isolated bridge is compared with that of a bridge using conventional Pot Bearings, after obtaining the displacements of the deck, the deformations of the piers, shear forces and moments of the bottoms of the piers. The analytical analysis results show that seismic isolation bearing, especially seismic isolation bearings with sliding mechanism, could reduce earthquake forces.

### 요 지

본 논문에서는 실제 교량에 지진격리장치를 적용하였을 때, 교량의 내진성능을 평가하기 위한 지진해석과 모델링 방법에 대하여 논하였다. 상용유한요소 해석 프로그램을 이용하여 비선형 시간이력 해석을 수행하였으며, 지진해석을 위하여 El Centro 지진 이력을 (1940, N00W) 사용하였다. 기존 받침을 적용한 경우와 여러 가지 지진격리장치를 적용한 경우로 나누어 해석하였으며, 교량의 변위와 교각의 변형 및 교각 하단부의 전단력과 모멘트를 상대 비교하였다. 해석 결과 지진격리 장치를 사용한 경우 기존 받침을 적용한 교량 보다 지진시 거동이 훨씬 안정적으로 나타났으며, 특히 StLRB를 적용한 경우 받침의 마찰과 STU의 강철 거동 효과로 인하여 보다 높은 지진력 감소효과가 있음을 알 수 있었다.

**Keywords :** Seismic Isolation Bearings, Nonlinear Time-history Analysis, Sliding Mechanism

**핵심 용어 :** 진격리장치, 비선형 시간이력해석, 마찰작용

\* 경동엔지니어링 (주)

\*\* 학생회원, 성균관대학교 토목공학과 박사과정

\*\*\* 정회원, 성균관대학교 토목공학과 부교수

E-mail : pcster@dreamwiz.com 019-269-9890

• 본 논문에 대한 토의를 2003년 12월 31일까지 학회로 보내 주시면 2004년 4월호에 토론결과를 게재하겠습니다.

## 1. 서 론

1985년 Mexico 지진이 발생한 것을 비롯하여 1988년 Armenia 지진, 1989년 Loma Prieta 지진, 1994년 Northridge 지진, 그리고 1995년 일본 Kobe 지진과 최근 1999년 터키, 대만 지진 등 전 세계적으로 지진 활동이 다시 활발해지고 있으며 그에 따른 피해 또한 크게 발생하고 있다. 이런 지진에 대한 대책으로 내진설계 방법이 가장 신뢰성이 높고 항구적인 방법으로 쓰이고 있다. 근래에 들어서는 미국이나 일본, 유럽을 비롯한 여러 선진국을 중심으로 지진격리장치를 사용한 내진설계를 도입하여 실용화하고 있으며, 새로운 지진격리장치의 연구와 개발에 노력을 기울이고 있다.

현재 사용되고 있는 지진격리장치는 감쇠방법에 따라 PETE의 마찰을 이용하는 방법과 납의 이력감쇠를 이용하는 방법이 있으며 국내에서는 이 두 가지의 형태 중 납을 이용하는 LRB를 이용하는 지진격리장치가 많이 사용되고 있다. 지진시의 변형은 지진의 특성상 비 주기적이면서 시간적으로 급격한 거동이며, 상시 변형은 일별, 월별, 계절별 주기적인 특성을 갖고 있으며 비교적 단위시간당 미소거동이라고 할 수 있다.

다 경간 연속교인 경우 받침에 발생하는 온도변화 및 건조수축, Creep, 활하중에 의한 상시 신축량이 지진시 변형량에 비해 상당히 크고, LRB 설계시 신축량에 지배되는 인자는 유효고무 높이이므로 지진시 변형량과 상시 변형량을 동시에 수용할 수 있도록 LRB를 설계한다면 유효고무 높이가 상당히 커질 수 있다. 즉, 다경간 연속교에 지진격리설계를 위해 LRB를 설치하고자 한다면 지진격리의 목적으로 적용되어야 할 장치가 비지진시의 상시변형량 때문에 비대해질 수 있다는 문제가 있다. 이러한 문제점을 해결하기 위해서 서로 다른 특성을 갖는 각 변형에 맞는 제어방식을 모두 갖춘 마찰판과 STU를 사용한 지진격리장치 중의 하나인 StLRB(STU+LRB+PETE)시스템에 관해서 연구하였다. 본 논문에서는 내진 성능을 위하여 설계서해안에 놓인 동진교를 대상으로 여러 지진격리장치들을 적용시켰을 때의 지진 응답 해석과 모델링 기법

을 소개하고자 한다. 여기에 사용될 지진격리장치로는 StLRB를 비롯하여 P-F, RB, LRB, EDF 시스템 등이며, 기존에 사용되었던 Pot Bearing의 거동과 비교하였다. 이를 위해서 범용 유한요소해석 프로그램인 SAP2000을 사용하여 비선형 시간이력해석을 수행하였다. 아직 우리나라에서는 이를 이용한 지진격리장치의 모델링이나 설계가 미흡하므로, 이에 본 논문에서는 유한요소해석 프로그램을 사용한 여러 지진격리장치의 효과적인 모델링 기법을 소개하여 실무에서도 쉽게 지진격리장치의 동적 거동 연구를 수행할 수 있게 하였다.

## 2. 지진격리장치의 종류 및 해석모델

지진격리장치의 주목적은 구조물에 전달되는 지진의 파괴적인 에너지를 감소시키는 것으로 이를 위해 많은 방법이 제안되었다. 이들 방법은 모두 유연한 횡강성과 에너지 소산능력을 공통적으로 가지고 있다. 여기서는 현재 널리 사용되고 연구되어지고 있는 몇 가지 지진격리장치의 종류와 해석모델을 소개한다.

### 2.1 P-F(Pure-Friction) Base Isolation System

P-F 시스템은 구조물의 바닥과 지반의 마찰을 이용하여 구조물을 지진으로부터 보호하는 장치로서 모든 지진격리장치 중에서 가장 간단한 시스템으로 볼 수 있으며, Fig. 1(a)가 이를 설명해 주고 있다. 이 시스템의 특징은 약한 지진시에는 미끌림이 발생하지 않고, 일정 임계값을 넘는 큰 지반가속도를 받는 경우에만 시스템에 미끌림이 일어나고 지진격리효과가 발생한다.

P-F 시스템의 해석모델은 Fig. 1(b)와 같이 나타낼 수 있으며, 마찰판이 미끌림 상태인 경우의 운동방정식은 식(1)과 같다.

$$M\ddot{x}(t) + \mu Mg \operatorname{sign}(\dot{x}) = -M\ddot{x}_g \quad (1)$$

여기에서,  $M$ 은 지진격리장치 상부의 총질량이며,  $g$ 는 중력가속도,  $\mu$ 는 마찰판의 마찰계수,  $\operatorname{sign}(\dot{x})$ 는 지진격리장치 속도의 부호, 그리고,  $\ddot{x}_g$ 는 지반가속도이다.

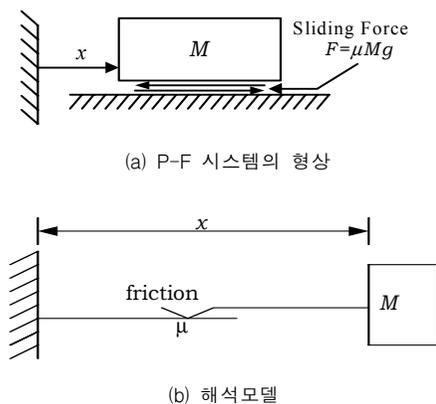


Fig. 1 P-F 시스템

## 2.2 RB(Rubber Bearing) System

국내에서 탄성받침, 적층고무받침이라 불리는 RB는 가장 널리 연구되고, 사용되는 지진격리장치로 유연한 휨 강성을 가지도록 방진고무를 주된 재료로 하고 있으며, 수직강성을 보강하기 위해 강판을 삽입한 것을 기본형식으로 하고 있다. 이 장치의 주요 작용은 스프링과 감쇠기의 병렬작용을 통해 진동주기를 길게 하는 것이다. RB 시스템의 형상과 역학적 해석모델은 Fig. 2(a)와 Fig. 2(b)에 나타나 있으며, 운동방정식은 식 (2)와 같다.

$$M\ddot{x}(t) + C\dot{x}(t) + Kx(t) = -M\ddot{x}_g \quad (2)$$

여기에서, C와 K는 지진격리장치의 감쇠계수 및 강성을 나타낸다.

## 2.3 LRB(Lead Rubber Bearing) System

LRB System은 Lead Rubber Bearing이라고도 불리며, RB 시스템을 개선하여 만든 장치이다. RB의 중앙에 원통형의 납을 넣어 추가적인 에너지 분산장치로 사용한다. LRB 시스템의 형상도와 역학적 해석모델은 Fig. 3(a)와 Fig. 3(b)처럼 나타낼 수 있으며, 운동방정식은 식(3)과 같다.

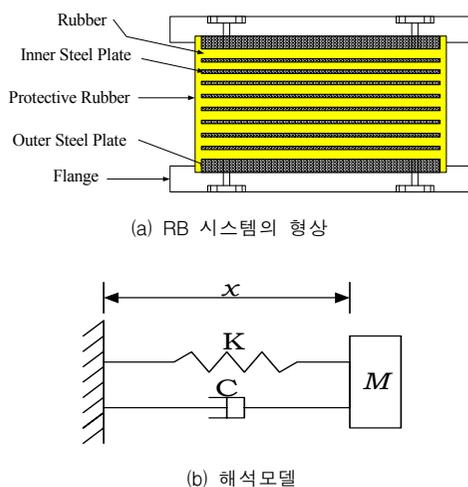
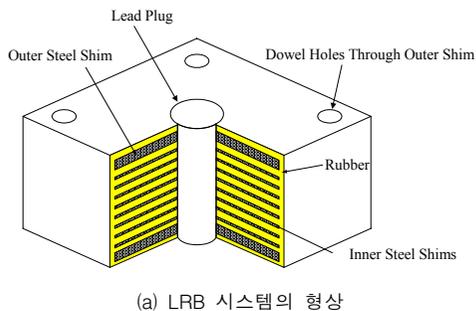


Fig. 2 RB 시스템

$$M\ddot{x}(t) + C\dot{x}(t) + Kx(t) + NQ = -M\ddot{x}_g \quad (3)$$

여기에서, N은 사용된 지진격리장치의 개수이고, Q는 Lead Core에서 발생한 Hysteretic 복원력을 말한다.



(a) LRB 시스템의 형상

(b) 해석모델

Fig. 3 LRB 시스템

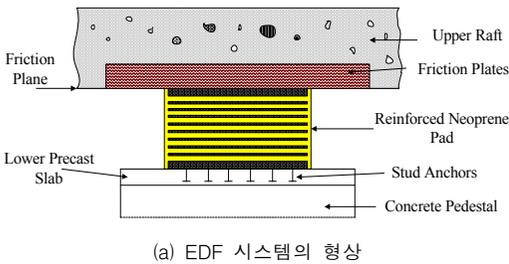
## 2.4 EDF(Electricité De France) System

EDF 시스템은 강판으로 보강된 네오프렌 적층판과 적층판 상부의 납-청동 합금판으로 구성된다. 납-청동 합금판은 구조물 바닥에 있는 강판과 마찰면을 이룬다. 이 시스템은 LRB의 시스템과 P-F 시스템을 직렬로 연결한 형태를 이룬다. Fig. 4(a)는 EDF 시스템의 형상도를 나타낸다. EDF 시스템의 역학적 해석모델은 Fig. 4(b)와 같이 나타낼 수 있으며, 변위는 상부 마찰판의 변위  $x_2$ 와 하부변위  $x_1$ 으로 구분된다.

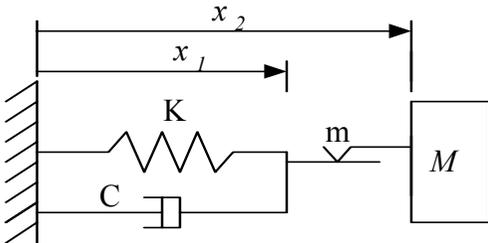
상부마찰판이 미끄러짐 상태인 경우의 받침부분의 운동방정식과 마찰판 부분의 운동방정식은 식(4) 및 식(5)와 같이 쓸 수 있다.

$$C\dot{x}_1(t) + Kx_1(t) = \mu Mg \operatorname{sign}(\dot{x}_2 - \dot{x}_1) \quad (4)$$

$$M\ddot{x}_2(t) + \mu Mg \operatorname{sign}(\dot{x}_2 - \dot{x}_1) = -M\ddot{x}_g \quad (5)$$



(a) EDF 시스템의 형상

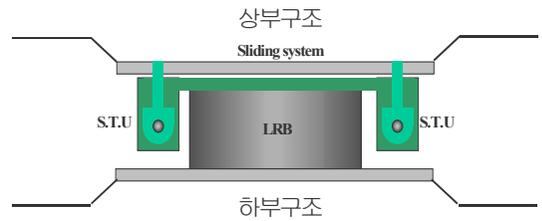


(b) 해석모델

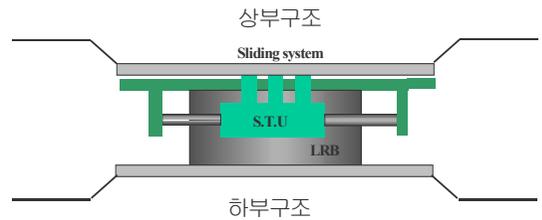
Fig. 4 EDF 시스템

## 2.5 StLRB(STU+LRB+PETE) System

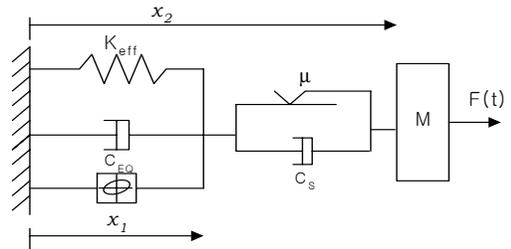
Fig. 5(a)와 Fig. 5(b)와 같이 StLRB 시스템은 LRB와 STU와 Sliding System이 조합된 지진격리 장치이며, 지진시 수평변위는 LRB에서 제어하고, 상시 수평변위는 Sliding System에서 제어하며 두 제어장치의 연결장치로 STU가 들어가게 된다. 운동방정식은 상시하중과 지진시 하중상태에 따라서 달라진다. 지진시 하중상태에서는  $\ddot{x}_2 = \ddot{x}_1$ ,  $\dot{x}_2 = \dot{x}_1$ 이고 LRB 시스템의 운동상태와 같이 이력거동을 하게 되므로 운동방정식은 식(6)과 같이 나타낼 수 있다. 또한 상시하중 상태일 때는 STU와 마찰판만이 거동하고 운동방정식은 식(7)과 같다.



(a) StLRB 시스템의 정면도



(b) StLRB 시스템의 측면도



(c) StLRB의 해석모델

Fig. 5 StLRB 시스템

$$m\ddot{x}_1(t) + c_{eq}\dot{x}_1(t) + k_{eff}x_1(t) = f(t) \quad (6)$$

$$c_{eq}\dot{x}_1(t) + k_{eff}x_1(t) = \mu mg \operatorname{sign}(\dot{x}_2 - \dot{x}_1) + c_s\dot{x}_1(t) \quad (7)$$

### 3. 해석 모델 및 사용 지진

본 연구에서는 실제 지진격리장치를 적용할 대상 모델로서 동진교를 선택하였다. 성능비교를 위한 지진격리장치 모델로는 P-F, RB, LRB, EDF, StLRB 시스템으로서 Pot Bearing을 사용하여 모델링한 경우와 비교하였으며, 비선형 시간이력해석을 통해서 지진격리장치의 성능을 분석하였다. Table 1은 본 논문에서 사용한 지진격리장치들의 물성치들이다.

#### 3.1 해석 대상 교량의 선정

본 연구의 해석을 위해 선정된 교량은 서해안 고속도로 당진~서천간 제 6공구(청소~내항)에 건설된 동진교이다. 교량 형식은 PC박스 거더교이고, ILM 공법에 의한 15경간 연속교이다. 교폭은 12.145m이며 교량의 전체 길이는 725m이다. Fig. 6(a)은 동진교의 횡단면도이며, Fig. 6(b)는 전체적인 모델링을 나타낸다.

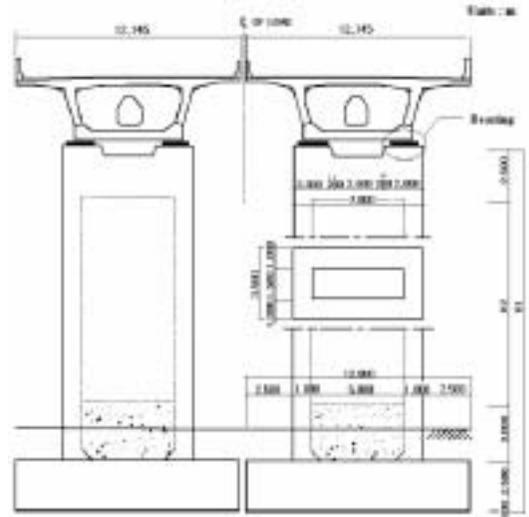
#### 3.2 입력 지진

입력 지진으로는 1940년에 발생한 El Centro 지진의 N00W성분을 국내 내진 1등급에 맞게 사용하였다. El Centro 지진(0.348g)은 표준적인 강진이라

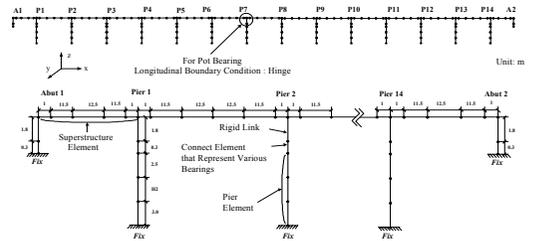
Table 1 지진격리장치들의 물성치

종 류	수직강성	수평강성	감쇠계수
	(N/m)	(N/m)	(N · sec/m)
RB	$1.076 \times 10^{10}$	$1.068 \times 10^7$	$6.657 \times 10^5$
P-F	-	-	-
LRB	$1.076 \times 10^{10}$	$1.068 \times 10^7$	$6.805 \times 10^5$
EDF	$1.076 \times 10^{10}$	$4.081 \times 10^7$	$1.33 \times 10^6$
StLRB	$1.076 \times 10^{10}$	$6.204 \times 10^7$	$5.405 \times 10^6$

볼릴 수 있다. 지진에너지는 1~4 Hz에 집중되며 그 최대값이 1.5Hz 정도에 위치한다. 이것은 대부분 강진의 에너지 분포와 일치한다.



(a) 동진교의 횡단면도



(b) 동진교의 유한요소모델

Fig. 6 동진교

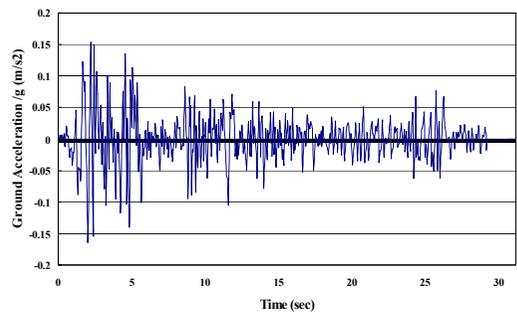


Fig. 7 El centro 지진의 가속도시간이력

우리나라는 대부분 지역의 지반이 양호하므로 El Centro 지진과 같이 고주파에 에너지가 집중되는 지진이 예상된다. 국내 도로교시방서에서 규정하고 있는 지진의 최대 가속도는 1등급 지역에서 0.154g이므로 그에 맞게 Scale Down 시킨 El Centro 지진을 사용하였다.

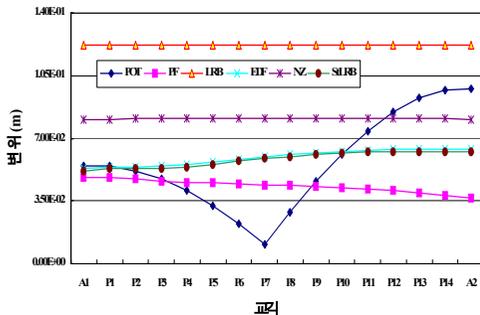
## 4. 해석결과

### 4.1 교축방향으로 가진할 때의 거동

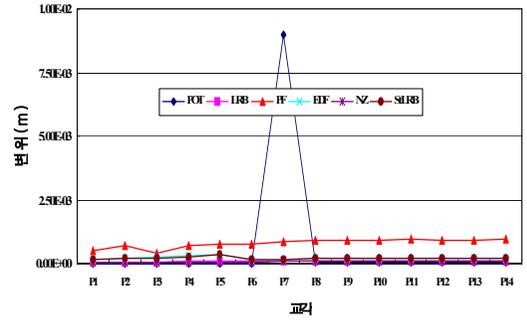
Fig. 8(a)는 El Centro 지진을 교축방향(종방향)으로 가진시킬 때 Pot Bearing, RB, P-F, LRB, EDF, StLRB 시스템을 사용한 교량 상판의 최대변위를 각 교대, 교각위치에서 서로 비교한 것이다. 그리고, Fig. 8(b)~(d)은 각각 교각 상단 부분의 최대변위, 교각 하단부분의 최대 전단력, 교각 하단 부분의 최대 모멘트를 비교한 그래프이다.

LRB를 비롯한 지진격리장치들은 교각에 따른 응답 값들이 비교적 고르게 분포함을 알 수 있다. 이것은 지진격리장치가 지진하중을 고르게 분산시키고 있기 때문이다. 하지만 기존의 Pot Bearing을 사용한 경우는 고정단인 7번 교각에 응답이 집중됨을 알 수 있다.

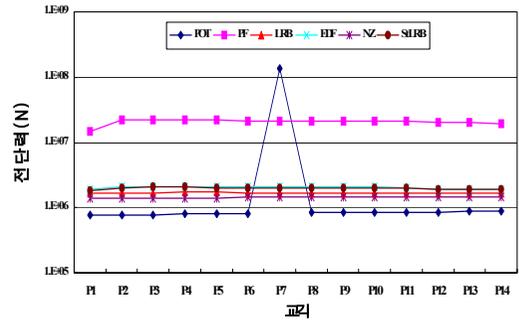
지진격리된 교량의 상판의 변위는 Pot Bearing에 비해 상당히 크다. 그러나 이것은 지진격리장치 내의 변형이며 교각 자체의 변형은 매우 작음을 Fig. 8(a)에서 알 수 있다.



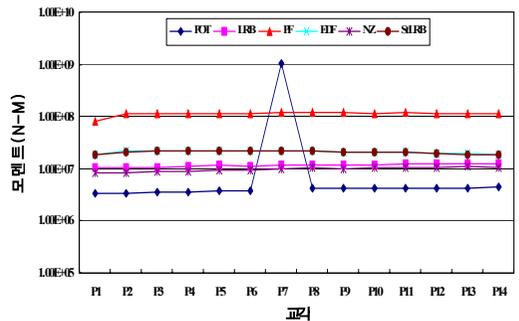
(a) El Centro 지진을 교축방향으로 가진할 때 상판의 최대 변위 비교



(b) El Centro 지진을 교축방향으로 가진할 때 교각 상단의 최대변위 비교



(c) El Centro 지진을 교축방향으로 가진할 때 교각하단의 최대전단력 비교



(d) El Centro 지진을 교축방향으로 가진할 때 교각하단의 최대모멘트 비교

Fig. 8 El Centro 지진을 교축방향으로 가진할 때의 지진 격리시스템의 응답비교

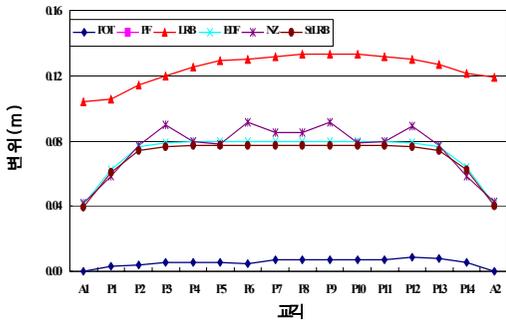
또, 지진격리된 교량의 교각 하단의 전단력과 모멘트 등은 Pot Bearing을 사용한 교량의 고정단 지점에서의 값에 비해 현저하게 줄어들을 볼 수 있다. 지진격리장치들을 비교해 볼 때 RB, LRB 시스템의 경우가 변위가 EDF, P-F 시스템의 경우보다 상당히 크게 발생하였다. 전단력이나 모멘트의 경우는 근소한 차이를 보이고는 있지만 P-F 시스템의 경우 상당히 큰 값을 보이고 있다. StLRB의 경우 마찰판 상하부의 상대적인 미끄러짐으로 인해서 전단력이나 모멘트의 값을 효과적으로 감소시켰다.

#### 4.2 교축직각방향으로 가진할 때의 거동

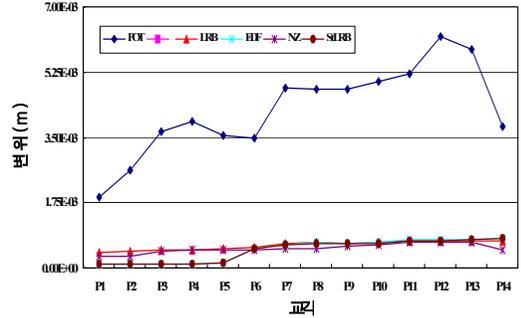
Fig. 9(a)~(d)는 El Centro 지진을 교축직각방향(횡방향)으로 가진하였을 때의 응답을 비교한 것이다.

Pot Bearing을 사용한 경우 교축방향에서의 응답과는 달리 교축직각 방향으로의 응답이 비교적 고르게 나타나고 있음을 볼 수 있다. 이것은 교축방향으로 가진할 경우는 고정단이 7번 교각에 응답이 집중되지만 교축 직각 방향으로 가진할 경우는 모든 받침이 고정단으로 작용하여 고르게 분포되기 때문이다.

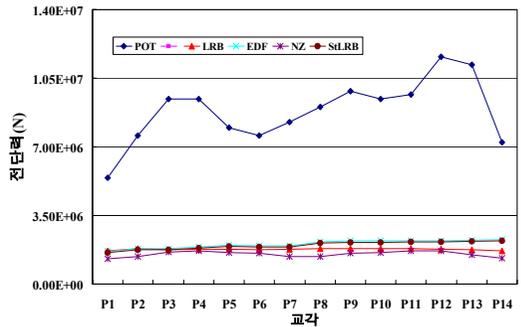
LRB와 EDF를 사용한 교량의 경우 교축방향으로 가진할 때와 마찬가지로 변위가 크게 발생하였지만 상대적으로 교각하단에서의 전단력과 모멘트는 상당히 줄어들을 볼 수 있다. 그리고 변위량 자체도 지진격리 장치의 허용 변형량 범위 내에 있기 때문에 추락의 위험은 없다고 본다.



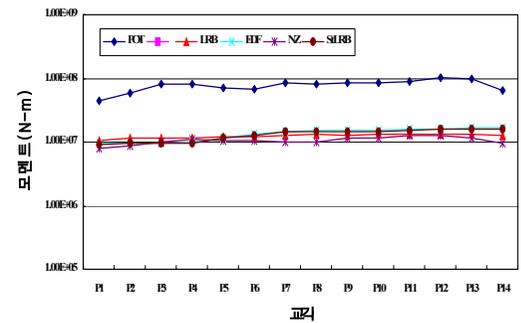
(a) El Centro 지진을 교축직각방향으로 가진할 때 교각상판의 최대변위 비교



(b) El Centro 지진을 교축직각방향으로 가진할 때 교각상판의 최대변위 비교



(c) El Centro 지진을 교축직각방향으로 가진할 때 교각하단의 최대전단력 비교



(d) El Centro 지진을 교축직각방향으로 가진할 때 교각하단의 최대모멘트 비교

Fig. 9 El Centro 지진을 교축직각방향으로 가진할 때의 지진격리시스템의 응답비교

LRB와 EDF의 거동을 비교해 볼 때, EDF의 경우 LRB보다 훨씬 작은 강성을 가지고 있지만 내부의 마찰효과로 인하여 변위나 전단력, 모멘트 값은 오히려 더 작게 나타나고 있다.

StLRB를 사용한 교량의 경우 상판의 변위는 LRB나 EDF에 비해 상대적으로 적게 발생했다. 전단력이나 모멘트의 경우도 LRB나 EDF에 비해 약간의 차이를 보이고는 있지만 전체적으로는 비슷한 범주 내에 있다고 할 수 있다.

## 5. 결 론

본 연구에서는 StLRB 시스템을 사용하여 지진격리된 교량을 비롯한 P-F, RB, LRB, EDF를 사용하여 지진격리된 교량을 지진 응답을 통해서 거동을 파악하였고, 기존의 Pot Bearing을 사용한 교량의 지진 응답에 대하여 비교하였다. 범용 유한요소해석 프로그램인 SAP2000을 통해 이들을 해석한 결과 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다.

- 1) 범용유한요소프로그램을 사용하여 여러 가지 지진 격리장치의 모델링 기법을 소개하였고, 제시된 해석모델을 이용하여 지진격리장치가 적용된 실제 교량의 지진응답을 해석하였다. 해석 결과 기존의 Pot Bearing을 사용한 교량의 지진응답에 비하여 지진격리장치를 사용한 경우 내진성능이 크게 향상됨을 알 수 있었다.
- 2) StLRB의 경우 변위는 EDF와 LRB를 사용하였을 때보다 10~40% 적은 값을 보였고, 전단력과 모멘트는 StLRB가 RB와 LRB를 사용할 때보다 10~30% 큰 값을 보였다.
- 3) StLRB 시스템은 RB와 LRB등에 비해 상시하중에 대한 변위를 STU를 통한 Sliding System에서 제어함으로써 설계변위를 줄여 적층고무의 두께를 약 40~50% 정도 효과적으로 줄일 수 있음을 알 수 있었다.

## 참고문헌

1. 건설교통부개정, (1999), 도로교표준시방서.
2. 구경희, 이재한, 유봉 (1998), "면진용 고감쇠 적층고무베어링의 성능특성 실험 및 비선형 거동해석", 한국지진공학회 논문집, 제 2권 제 4호, pp.73-86.
3. 김대곤, 이상훈, 김대영, 박철림, (1998), "적층고무베어링과 납-고무베어링의 내진 성능에 관한 실험", 한국지진공학회 논문집, 제 2권 제 4호, pp.53-62.
4. 박규식, 오주원, 이인원, (1999), "여러 가지 기초분리 장치의 내진성능 연구", 대한토목학회 학술 발표회, 구조/원자력, pp. 581-584.
5. 한규승, (1999), 면진용 교좌장치의 거동특성과 비교 분석, 성균관대학교, 석사논문.
6. 한규승, 박선규, 이인원 (2001), "EDF 시스템의 동적 특성연구를 위한 모델링개발", 한국구조물진단학회, 제 5권 제 1호, pp218-227.
7. American Association of State Highway and Transportation Officials-AASHTO(2001). "Guide Specifications for Seismic Isolation Design", Washington, D.C.
8. Anil K. Chopra. (1995), Dynamics of Structure: Theory and Applications to Earthquake Engineering, Prentice Hall, pp. 53-57.
9. B. P. Pritchard. (1996), "The Use of shock transmission units in bridging", Proceedings of the Institution of Civil Engineers, Structures and Buildings, 116 Feb, pp. 82-95.
10. Farzad Naeim and James M. Kelly. (1999), Design of Seismic Isolated Structures : From Theory to Practice, John Wiley & Son, pp.
11. T.T. Soong and G.F. Dargush. (1997), Passive Energy Dissipation Systems in Structural Engineering, John Wiley & Sons.

(접수일자 : 2003년 7월 25일)