

면진 장치 적용 전, 후의 철골조의 내진 성능 평가

Evaluation of Seismic Performance of Steel Frame before and after Application of Seismic Isolators

김 대 곤* 이 상 훈** 안 재 현*** 박 칠 립****
Kim, Dae Kon Lee, Sang Hoon Ahn, Jae Hyen Park, Chil Lim

국문요약

내진 설계되지 않은 일경간-이층 철골조의 면진에 사용될 적층 고무베어링과 납-고무 베어링을 설계하여 철골조와 기초 사이에 이면진장치들을 적용하여 지진파들에 대한 내진 성능 평가를 행하였다. 이들 면진장치들을 사용하면 철골조의 내진 성능이 향상된다. 특히 적층 고무베어링의 중앙에 원통형 납을 삽입함으로써 초기강성을 증가시켜, 빈번한 사용하중 하에서 구조물에 발생하는 비교적 과도한 횡변위를 구속할 수 있으며, 강한 지진파에 대해서는 이 납이 항복함으로써 에너지 소산능력을 향상시킨다.

주요어 : 기초분리, 납-고무 베어링, 내진 성능 평가, 적층 고무베어링

ABSTRACT

The laminated elastomeric bearing and the lead-rubber bearing were designed to isolate one bay-two story steel frame which is designed for only gravity load. The seismic performance is evaluated for the designed steel frame before and after application of these seismic isolators between the superstructure and the foundation. These isolators can improve the seismic capacity of the steel frame. Especially, by inserting the lead plug into the center of the laminated elastomeric bearing, the initial stiffness of the bearing can be increased, thus rather large lateral displacement can be prevented under the frequent service lateral load. During the strong earthquake, yielding of the lead can increase the capacity of the energy dissipation.

Key words : seismic isolation, lead-rubber bearing, evaluation of seismic performance, laminated elastomeric bearing

1. 서 론

건물의 사용동안 발생할 가능성이 적은 대규모 지진에 대하여 모든 구조물에 피해가 생기지 않도록 건물을 설계하는 것은 비경제적이다. 따라서 대규모 지진이 발생할 경우 인명피해와 경제적 손실을 최소한으로 막고자 하는 것이 내진 설계의 개념이다. 이전에는 지진에 안전하게 하기 위하여 구조물을 뿔수록 튼튼하게 설계해 왔다.

그러나 대형구조물 일수록 부재의 단면이 커져서 이 방법에는 한계가 있다. 건물을 강하게 하여 지진에 대항하는 강구조 보다는 유연하게 하여 지진에 순응하는 유구조가 더 합리적이다. 구조물의 거동이 유연하기 위해서는 일반적으로 내진 상세⁽¹⁾ (seismic detailing)를 통한 구조물의 소성 변형능력을 이용하거나 면진 시스템을 사용한다.

강진시 구조물에 소성흔지가 발생되어 구조물의 주기가 길어져서 구조물에 발생하는 관성력이 작아지며 또한 구조물에 전달된 지진 에너지가 이 소성흔지에 의해 소산되기 때문에 구조물의 붕괴를 막을 수 있다. 그러나 심

* 정회원 · (주)대우 건설기술연구소 선임연구원

** (주)대우 건설기술연구소 연구원

*** (주)대우 건설기술연구소 책임연구원

**** (주)대우 건설기술연구소 소장, 공학박사

하게 손상된 소성힌지나 접근하기 힘든 곳에 생긴 소성힌지는 보수 보강하기가 매우 힘들다.

기초로부터의 지진 진동의 건물로의 전달을 최소화하기 위해서 여러 가지 면진 구조 방식이 연구되어오고 있다. 지진력이 건물에 미치는 충격을 효과적으로 완화하는 면진 방법으로 흔히 적층 고무베어링(laminated elastomeric bearing), 납-고무베어링(lead-rubber bearing)과 같은 면진장치들을 이용하여 건물을 지진파의 구조물에 해로운 수평성분 들을 분리해 낸다.

본 논문을 위해서 일경간-이층 철골조를 AISC 허용 응력도 설계법에 의하여 중력방향 하중만을 고려하여 설계하였으며, 이 내진 설계 되지 않은 철골조의 내진 성능 향상을 위해 사용될 적층 고무베어링과 납-고무베어링을 설계하였다. 본 논문의 목적은 첫째로 내진 설계 되지 않은 일경간-이층 철골조의 면진에 사용될 면진장치들을 설계하고, 설계된 면진장치들을 일경간-이층 철골조에 적용했을 때 구조물의 진동특성이 어떻게 변하는지를 살펴보고, 둘째로 면진장치들의 설계시 고려한 최대 횡하중인 El Centro NS 지진파의 50% 크기의 지진파(PGA=0.175g)에 대한 면진 장치로 기초 분리된 구조물의 내진 성능 향상을 살펴보았다. 또한 이보다 훨씬 큰 크기의 지진파에서의 면진장치 적용 전, 후의 확실한 내진 성능의 차이점을 조사하기 위해서, 크기를 감소시키지 않은 El Centro 지진파(PGA=0.35g)와 고배 지진파(PGA=0.83g)도 채택하였다.

2. 철골조, 면진장치 설계 및 해석모델

2.1 철골조 설계

일경간 이층 철골조를 AISC 허용응력도 설계법에 의하여 설계하였다.⁽²⁾ 설계를 위하여 사용한 설계하중은 표 1에 정리하였으며 설계된 철골조의 형상 및 치수는 그림 1에 나타내었다. 이 철골조를 설계할 때 지진하중을 고려하지 않았기 때문에 설계된 철골조의 내진 성

능이 좋지 않다고 가정한다.

표 1 설계하중

고 정 하 중	마감 :	60 kgf/m ²
	deck plate :	290 kgf/m ²
	partition :	100 kgf/m ²
	ceiling :	20 kgf/m ²
	보 (H194×150×6×9) :	30.6 kgf/m
	기둥 (H250×250×9×14) :	72.4 kgf/m
적재 하중	250 kgf/m ²	

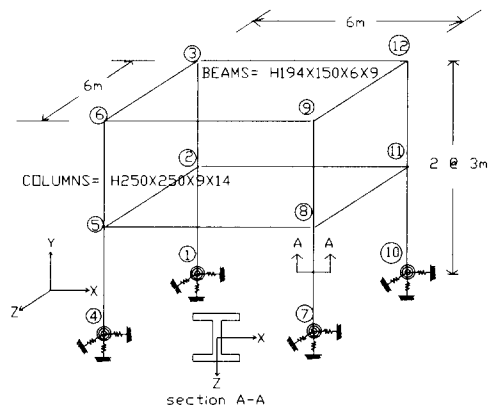


그림 1 일경간-이층 철골조의 형태 및 치수

2.2 면진장치 설계

세계적으로 교량용 적층 고무베어링(교각과 상판사이에 위치) 설계를 위한 표준집중에서 그 대표적인 것들은 BE 1/76, UIC 772R, BS 5400 그리고 AASHTO 이다.⁽³⁾ 현재까지는 특별히 건물 기초분리용 적층 고무베어링이나 납-고무 베어링의 설계 표준집이 따로 독립되어 있지 않다. 따라서 본 논문에서 사용된 면진장치들의 설계를 위해서 BE 1/76의 상당부분과 BS 5400의 일부분, 그리고 면진 베어링 설계자의 경험에 주로 바탕을 두었다.⁽⁴⁾ 흔히 사용하는 고무 硬度的 범위는 50~70 인데,⁽⁵⁾ 硬도 60 짜리 고무를 사용한다고 가정하였다.

면진 베어링은 수직하중 하에서 수직변위가 과도하면 안된다. 보통 설계 표준집들에서는 허용 수직변위를 총 고무층 두께의 7%~15%

로 제한한다. 고무 한층의 두께는 최저 0.25 inch (6.35 mm) 이상의 알맞은 두께를 선택하여야한다. 특히 납-고무 베어링의 경우, 최대 0.5 inch (12.7 mm)를 넘지 않아야 원통형 납에 효과적인 구속력(confinement)을 제공할 수 있다. 고무층의 갯수는 총 고무층의 두께와 연관이 있고, 면진 베어링은 지진과 같은 강한 횡하중에 대한 장치이므로 허용 전단 변위량은 반응 스펙트럼 해석등과 같은 간단한 동하중 해석법을 이용하여 설계 대상구조물이 위치한 지역의 발생가능 지진파들에 대한 해석으로부터 구할 수 있다. 설계스펙트럼을 사용하기 위해서는 기초 분리된 구조물의 고유주기를 선택하여야한다.

면진 베어링을 사용하는 주된 목적은, 건물의 주기를 길게 만들어 이 주기가 대부분의 지진파들의 탁월주기 범위 밖으로 보내어, 건물에 전달되는 지진파의 밀면 전단력(base shear force)의 크기를 작게 하는데 있다. 본 논문을 위해서는 설계된 철골조가 El Centro 지진파 최대 지반 가속도(PGA)의 50%의 크기의 지진 발생 지역에 위치해 있다고 가정하였고, 이 지진파에 대한 반응 스펙트럼은 그림 2에 나타내었다. 이 그림 2(a)에서 알 수 있듯이, 건물의 주기가 길어지면 가속도는 현저히 감소함으로, 본 논문에서는 면진 베어링 사용 후 철골조에 전달되는 밀면 전단력이 $0.1g$ 이하가 되고 면진장치의 최대 허용 전단 변위량이 5cm 가 되도록 하기 위해서 기초 분리후 건물의 주기가 1.5초가 되도록 면진장치를 설계하였다.

면진장치의 설계가 완성되기 위해서는 면진 장치에 가해지는 총 수직하중(고정하중, seismic live load, 그리고 전도 모멘트에 의한 수직하중)과 수평하중을 동시에 고려하여 베어링의 안전성을 살펴보아야 한다.

즉 베어링의 직경과 높이의 비율이 적절하여 중력하중과 지진하중을 동시에 고려할 때 베어링에 생기는 전단 변형률이 과도하지 않는지를 검토해야만 한다. 또한 설계된 면진베어링이 최대 수직하중에 대해서 좌굴이 발생치 말아야 한다.⁽⁶⁾⁽⁷⁾

납-고무베어링의 단면은 원형이거나 정방형이어야지 장방형은 피해야 하며, 설계한 납의 직경 d 에 대하여 원통형 납의 높이는 최소한 $1.5d$ 이어야하며 납-고무베어링의 단면의 크기는 최소 $3d$ 최대 $6d$ 이어야 한다. 그림 3(a)와 3(b)는 설계된 적층 고무베어링과 납-고무베어링을 각각 보여준다.

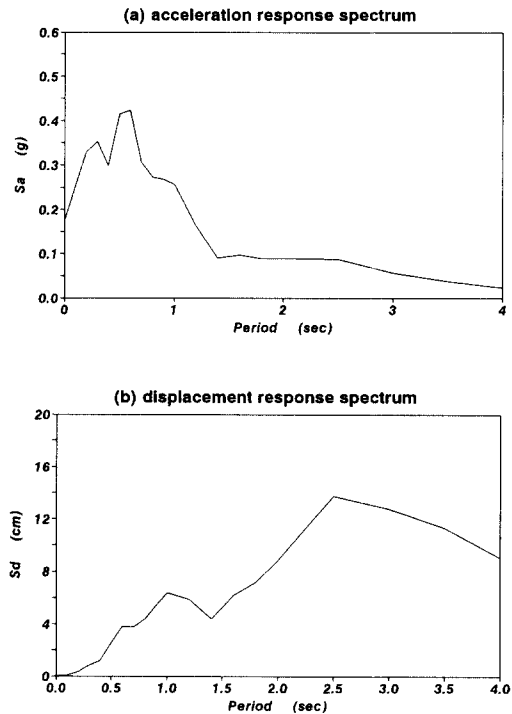
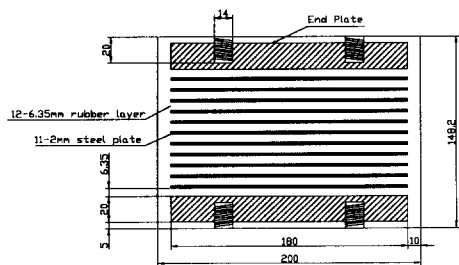
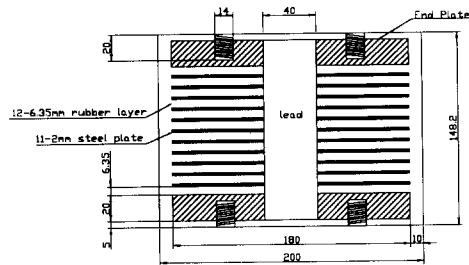


그림 2 반응 스펙트럼 (El Centro 1940 지진파의 50%, $\xi=5\%$)



(a) 적층 고무베어링 상세도 (단위 : mm)



(b) 납-고무베어링 상세도

그림 3 설계된 면진장치

2.3 해석모델

그림 1은 해석을 위해서 좌표축, 절점 번호 등을 포함한 설계된 철골조의 3차원 해석모델을 나타낸다. 본 논문을 위해서 그림 1과 같은 철골조가 하나는 기초에 일체로 연결되어 있고, 다른 하나는 적층 고무베어링에 의해서 기초 분리되어 있으며, 나머지 하나는 납-고무베어링에 의해서 기초분리 되어있는 세 가지 경우를 선택하여 표 2에서 정리하였다.

표 2 해석 모델

모델명	특징
건물-기초 고정	건물이 기초에 일체로 연결
건물-기초 분리 I	건물이 적층 고무베어링에 의해 기초와 분리
건물-기초 분리 II	건물이 납-고무 베어링에 의해 기초와 분리

3. 3차원 모델 주파수 해석

3.1 snap-back 자유진동 실험 모사

실험체의 주기와 점탄성 계수를 실험적으로 구하기 위해서는 흔히 대상 실험체를 잡아 당겨서 순간적으로 힘을 제거하여 실험체를 자유 진동케 하는 snap-back 자유진동 실험이 흔히 사용된다.⁽⁸⁾⁽⁹⁾ 이 실험적 방법을 해석적으로 모사하기 위해서(실제 실험은 본 연구의 향후 연구과제로 계획중임) 상용 3차원-비탄성 구조해석 프로그램인 DRAIN-3DX⁽¹⁰⁾를 채택하였다. 그림 1의 절점⑨와 절점⑫를 동시에 서서히 잡아당겨(해석적으로) 그 힘을 잠시 유지했다가 갑자기 풀어주어 철골조에 자유진동이 일어나게 하였다. 자유진동 동안 철골조가 탄성 거동만을 하기 위해, 두 절점에 가해진 하중을 각각 1 tonf 씩으로 제한하였다. 복잡한 공학적 거동을 해석적으로 단순화하기 위하여 다음과 같은 가정 위에 DRAIN-3DX를 이용한 자유진동 실험 모사의 해석적 모델이 만들어졌다.

- 1) 건물과 기초의 접합 부분에 위치한 면진장치의 수직 강성 k_c 는 기본 재료역학 이론인 식(1)로부터 구할 수 있다.

$$k_c = \sum_{i=1}^n \frac{E_c A}{t_i} = \frac{E_c A}{T} \quad (1)$$

여기서 t 는 고무 한 개 층의 두께, n 은 총 고무 층의 갯수, A 는 수직하중이 가해진 면적, T 는 총 고무 층의 두께, 그리고 E_c 는 압축상태의 apparent Young's modulus인데 베어링의 형상에 관계가 있다. 고무는 프와송비가 약 0.5로써 변형 전과 후의 체적변화가 거의 없고 bulging 현상 등 거동이 매우 비선형적임에도 불구하고 많은 연구가들이 매우 작은 변형상태와 선형-탄성 거동 등의 가정

하에 E_c 값을 결정하였으며 영국 'BE 1/76 설계 기준집'에서는 적층 고무베어링 실험치에 근거한 보정치를 도입하여 식(2)를 제시하였다.⁽³⁾

$$E_c = E (1 + 2\alpha S^2) \quad (2)$$

여기서 E 는 탄성계수, G 는 전단계수, α 는 실험에 근거한 고무의 硬度에 따른 보정 계수, 그리고 S 는 베어링의 형상계수이다. 베어링의 전단강성 k_v 는 기본 재료역학 이론인 식(3)으로 부터 구할 수 있다.

$$k_v = \sum_{i=1}^4 \frac{GA}{t_i} = \frac{GA}{T} \quad (3)$$

이들 수직, 수평 강성은 DRAIN-3DX의 inelastic truss bar element (type 01)를 이용하여 모델링 하였다. '건물-기초 고정' 모델을 위해서는 단순히 매우 큰 강성 값을 입력하였다.

2) 면진 베어링의 회전강성 k_r 은 밀면 고정-윗면 자유단의 외팔기둥 상사(cantilever column analogy) 로부터 다음 식(4)와 같이 구할 수 있다.⁽³⁾

$$k_r = \frac{E_r I}{T} \quad (4)$$

여기서 E_r 은 회전에 대한 탄성계수이며 정방형 베어링과 원형 베어링의 경우 식(5a)와 식(5b)로 각각 구할 수 있다.

$$E_r = E (1 + 0.742 S^2) \approx 2.3 G S^2 \quad (5a)$$

$$E_r = E (1 + \frac{2}{3} S^2) \approx 2 G S^2 \quad (5b)$$

이들은 DRAIN-3DX의 simple connection element (type 04)를 이용하여 모델링 하였다. '건물-기초 고정' 모델을 위해서는 역시 매우 큰 회전 강성값을 입력하였다.

3) 보와 기둥은 자유진동 동안 탄성 거동만 하

기 때문에 DRAIN-3DX의 elastic beam-column element (type 17)를 이용하여 모델링 하였다.

- 4) 동일한 집중질량 5.867 kgf-sec²/cm를 각 절점에 분포시켰다. 특히 '건물-기초분리 I, II' 모델들의 경우에는 철골조가 횡방향으로 유연한(flexible) 면진장치들 위에 놓여있기 때문에 각층뿐만 아니라 바닥 층의 집중질량도(즉 그림 1의 절점①, ④, ⑦ 그리고 ⑩ 에서의 집중질량) 역시 해석 모델에 포함시켜야 한다.
- 5) 질량과 강성에 비례하는 감쇠를 가정하였는데, 철골조의 점성 감쇠비 ξ 는 3%를 사용하였으며, 면진장치들의 점성감쇠비는 실험적 연구결과로부터 5%를 채택하였다.⁽¹¹⁾
- 6) 각층 바닥의 평면방향 강성은 무한히 강하다고 가정하였다 (rigid diaphragm).
- 7) 모든 해석을 위해 수치적분은 최소 매 0.0001초 그리고 최대 매 0.005초의 variable time step을 이용하였다.

3.1.1 '건물-기초고정' 모델 해석 결과

그림 1의 절점⑨와 절점⑫를 동시에 서서히 잡아당겨서 6초 후 각 절점에 힘이 각각 1 tonf씩 도달케 한 후 그 힘을 또 다른 6초 동안 유지했다가 시간이 12초 일 때 이 힘을 갑자기 풀어주어 철골조에 자유진동이 일어나게 하였다. 그림 4는 '건물-기초 고정' 모델의 해석 결과를 보여준다. 그림 4(a)와 4(b)는 1층과 2층의 절대 변위를 각각 보여주며, 그림 4(c)와 4(d)는 각층의 가속도를 각각 보여준다. 가속도는 변위를 두 번 미분하여 구하였다. 그림 4(e)와 4(f)는 각층의 가속도로부터 구한 스펙트럼을 보여주는데, 각층의 기본 주파수 값은 동일한 값인 1.33 Hz를 얻었으며 고차 주파수로 약 5 Hz 를 얻었다. 이러한 주파수의 진동 특성(모드)은 본 논문의 3.2절에서 분석하였다.

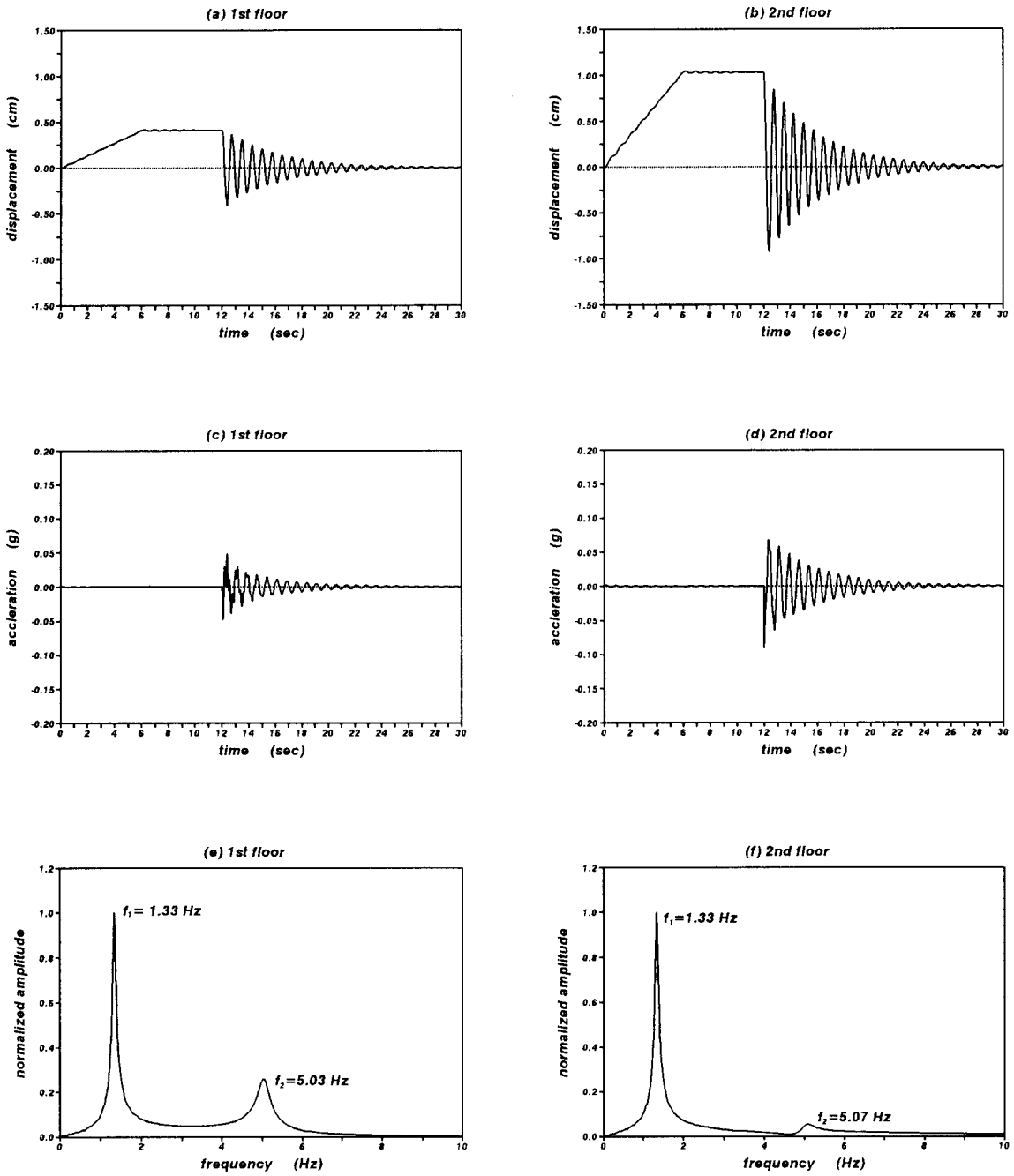


그림 4 건물-기초 고정모델의 자유진동 모사결과

3.1.2 '건물-기초분리 I' 모델 해석 결과

그림 5는 '건물-기초분리 I' 모델의 해석결과를 보여준다. 적층 고무베어링의 횡방향 유연성 때문에 '건물-기초 고정' 모델의 해석 결과와 비교할 때, 각층의 절대변위는 상당히 증가하였지만 그림 5(a)와 5(b)에서 알 수 있듯이 층간 변위(그림 5(a)와 5(b)간의 차이)는 '건물-기초 고정'의 경우보다 작음을 알 수 있다.

각층의 가속도는 그림 5(c)와 5(d)에서 관찰할 수 있듯이, 힘을 갑자기 풀어준 순간에는 다소 큰 값을 보였지만 전체적으로는 대체로 '건물-기초 고정'의 경우보다 약간 큰 값을 보였다. 각 층의 기본 주파수는 동일한 값인 0.53 Hz를 얻었으며, 그 외의 고차 주파수들도 그림 5(e)와 5(f)에서 관찰할 수 있다.

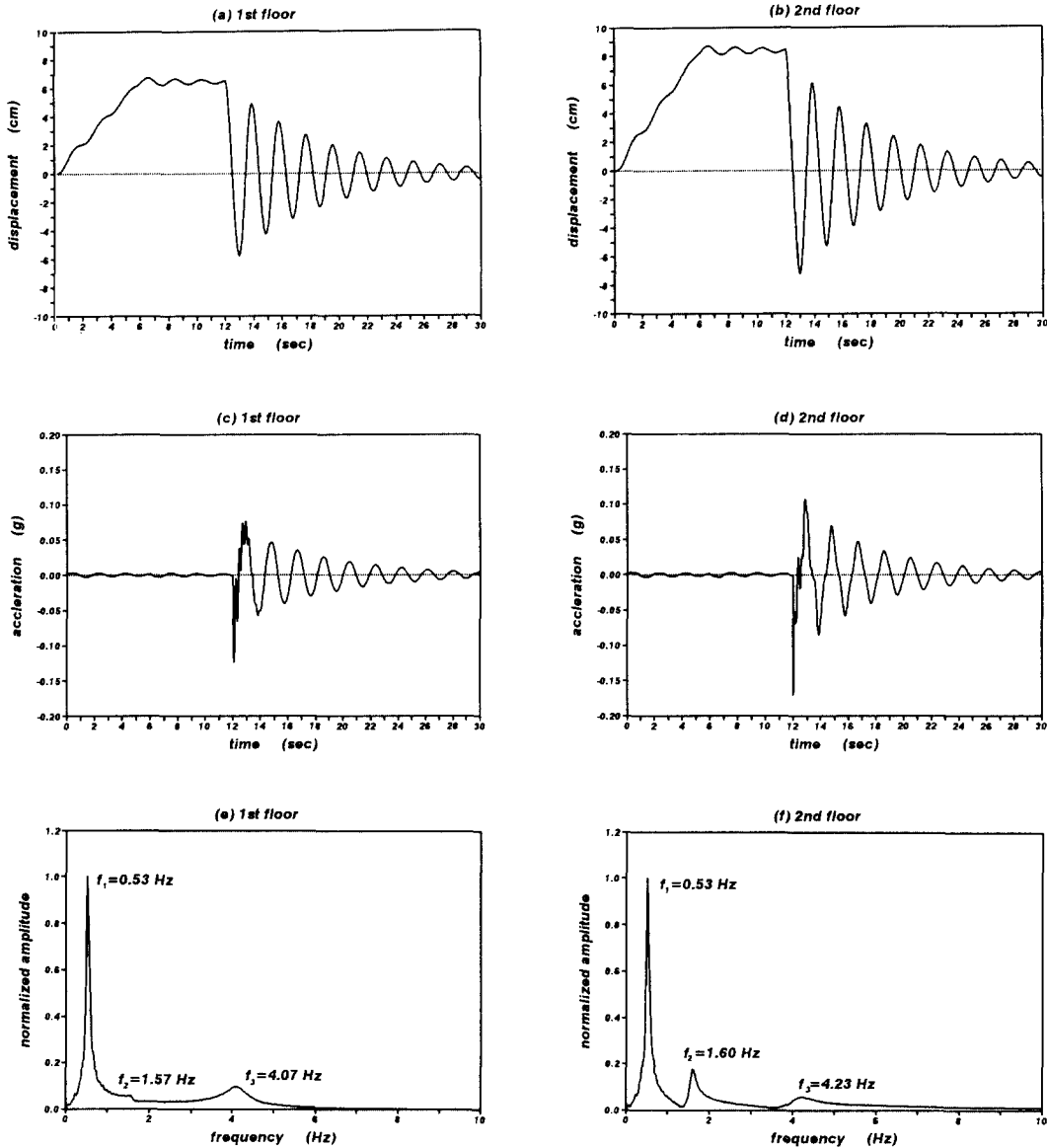


그림 5 건물-기초 분리 I 모델의 자유진동 모사결과

3.1.3 '건물-기초분리 II' 모델 해석 결과

그림 6은 '건물-기초분리 II' 모델의 해석결과를 보여준다. 적층 고무베어링의 중앙에 위치한 납의 전단 강성 때문에 납이 없는 경우인 그림 5(a) 그리고 5(b)와 비교할 때 각 층의 절대 변위는 약 반으로 줄었지만 층간 변

위는 약간 증가하였다. 각층의 가속도는 그림 6(c)와 6(d)에서 관찰할 수 있듯이, 적층고무베어링의 경우와 거의 같은 값을 얻었다. 각 층의 기본 주파수는 동일한 값인 0.73 Hz를 얻었으며 그외의 고차 주파수들도 그림 6(e)와 6(f)에서 관찰할 수 있다.

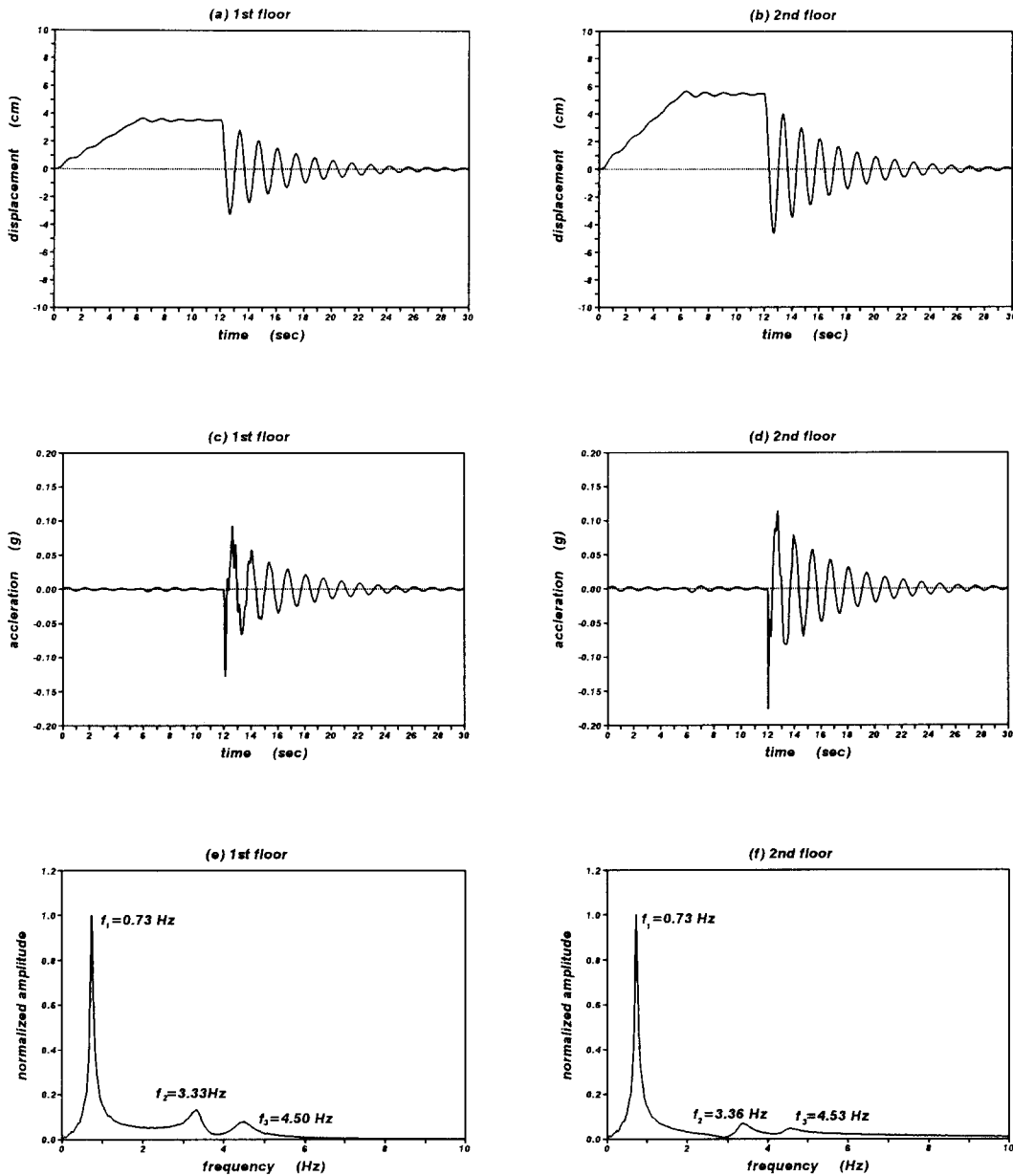


그림 6 건물-기초 분리 II 모델의 자유진동 모사결과

3.2 SAP90 주파수 해석

지금까지 snap-back 자유진동 실험모사를 이용하여 구한 주파수들의 타당성을 검증하고 각 해석 모델들의 주파수 특성들을 파악하기 위해서 상용 3차원-탄성 해석 프로그램인 SAP90⁽¹²⁾를 채택하여 표 2의 3가지 해석 모델에 대하여 그림 1의 3차원 모델 주파수 해석(modal analysis)을 실시하였다.

표 3은 각 모델의 해석 결과를 보여준다. SAP90의 주파수 해석 결과와 DRAIN-3DX의 자유진동 실험모사 결과는 잘 일치함을 알 수

주로 1차 모드이며, 각층 이동방향이 반대인 X축 방향 층간 수평이동 모드인 5차 모드가 약간 섞여 있는 것이다.

그림 7에서 각 해석 모델들의 최저 고유주기들의 위치를 El Centro 지진파 지반 가속도의 50%의 지진파(PGA=0.175g)에 대한 가속도 반응 스펙트럼에 표시하였다.

이 그림에서 관찰할 수 있듯이 면진장치들을 사용한 후 건물의 주기들이 길어져서 지반으로부터 건물로 전달되는 전단력이 현저히 감소함을 알 수 있다.

표 3 SAP90 를 이용한 3차원 주파수 해석결과

	'건물-기초 고정'		'건물-기초 분리 I'		'건물-기초 분리 II' (납 항복 이전)	
	주기(초)	특 성	주기(초)	특 성	주기(초)	특 성
mode 1	0.749	X축방향 이동 (각층 이동방향 동일)	1.880	X축방향 이동(각층 이동방향 동일)	1.341	X축방향 이동(각층 이동방향 동일)
2	0.709	Y축중심 비틀림	1.819	Y축중심 비틀림	1.251	Y축중심 비틀림
3	0.579	Z축방향 이동(각층 이동방향 동일)	1.775	Z축방향 이동(각층 이동방향 동일)	1.165	Z축방향 이동(각층 이동방향 동일)
4	0.551	Z축방향 이동 Y축중심 비틀림	1.176	Y축방향 이동	0.927	Y축방향 이동
5	0.198	X축방향 이동 (각층 이동방향 반대)	0.621	Z축중심 rocking	0.298	Z축중심 rocking

있다. DRAIN-3DX 자유진동 실험모사에서 얻은 두 번째 주파수는 SAP90 주파수 해석 결과의 5번째 주파수임을 알 수 있다. 즉 본 논문에서 사용한 자유진동 실험 방법으로는 SAP90의 2번째 모드부터 4번째 모드는 얻을 수 없다. 그 이유는 2층 철골조의 최상부를 잡아 당겼다가 갑자기 놓았기 때문에 이 철골조의 1차 모드(역삼각형)에 가깝게 자유진동을 유발시킨 경우이다. 그러므로 모의 실험결과와 스펙트럼 해석으로부터 얻을 수 있는 모드는

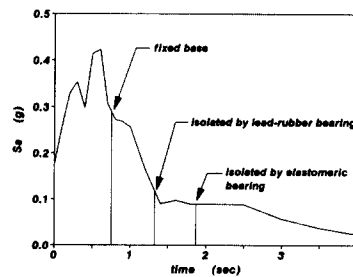


그림 7 가속도 반응 스펙트럼 (50% El Centro, $\xi=5\%$)

4. 2차원 모델 지진파 해석

4.1 사용 지진파 및 해석 모델

지반과 건물사이의 각각 다른 경계조건이 실제 지진파에 대하여 건물에 미치는 영향을 살펴보기 위하여 50% El Centro NS 지진파 (PGA=0.175g), 크기를 감소시키지 않은 100% El Centro NS 지진파(PGA=0.35g) 그리고 고베 지진파(PGA=0.83g)를 채택하였으며, 그림 8(a), 8(b) 그리고 8(c)에서 이들 지진파들을 각각 보여준다.

지진파 해석을 위하여 그림 1의 3차원 모델을 그림 9와 같이 2차원 모델화하여 해석하였다. 이 2차원 모델이 3차원 모델과 동적 특성이 동일함을 조사하기 위하여 상용 2차원-비탄성 구조해석 프로그램인 DRAIN-2DX⁽¹³⁾를 이용하여 주파수 해석을 실시하였으며, 표 4에서 2차원 해석결과와 3차원 해석결과들의 X축 횡방향의 첫 두 주기들을 비교하였는데, 동일한 결과들을 관찰할 수 있다.

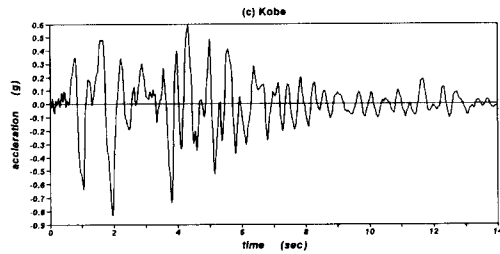


그림 8 해석에 사용된 지진파

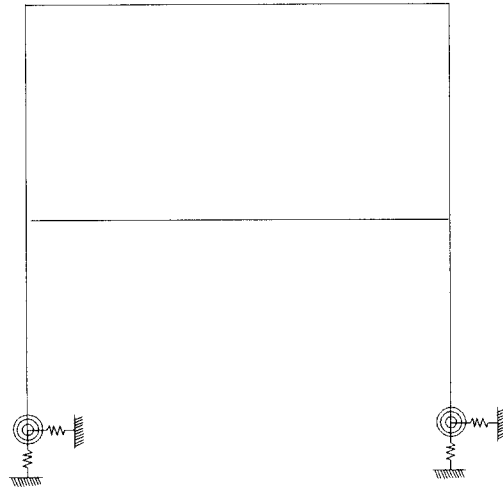
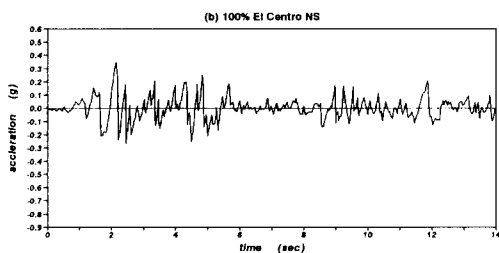
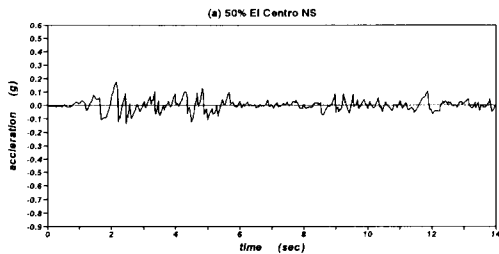


그림 9 지진파 해석을 위한 2차원 해석 모델

표 4 2차원 모델과 3차원 모델간의 주파수 해석결과 비교



모델명 \ 주기	T ₁ (초)		
	DRAIN-3DX	SAP90*	DRAIN-2DX
건물-기초 고정	0.75	0.75	0.75
건물-기초분리 I	1.89	1.88	1.89
건물-기초분리 II**	1.37	1.34	1.35

모델명 \ 주기	T ₂ (초)		
	DRAIN-3DX	SAP90*	DRAIN-3DX
건물-기초 고정	0.20	0.20	0.20
건물-기초분리 I	0.63	0.62	0.62
건물-기초분리 II**	0.30	0.30	0.30

* SAP90 해석결과에서 T₂는 다섯 번째 모드인 T₅ 값임.

** 날이 항복하기 전의 주기들임.

2차원 지진파 해석을 위해서 DRAIN-2DX를 채택하였는데, 복잡한 공학적 거동을 해석적으로 단순화하기 위하여 본 논문의 3.1절에서 사용한 가정들 이외에 다음과 같은 가정들을 사용하여 해석 모델이 만들어 졌다.

- 1) 보와 기둥은 plastic beam-column element (type 2)를 이용하여 모델링 하였으며 보와 기둥의 소성흔지는 부재의 양 끝단에서만 발생한다고 가정하였다.
- 2) 보와 기둥의 소성흔지는 항복강성이 초기 탄성강성의 2%인 bilinear 모델을 사용하였다.
- 3) 감쇠비는 본 논문의 3.1절의 가정 5)를 사용하였는데, 면진 장치중 특히 납-고무 베어링의 경우, 납이 항복한 후 점성감쇠비 5% 이외에 많은 양의 에너지가 hysteresis 에너지로써 소산된다.

4.2 해석 결과

4.2.1 면진장치의 전단력-전단변위 관계

그림 10은 각 지진파에 대한 적층 고무베어링과 납-고무베어링의 전단력-전단변위 관계를 보여준다. 50% El Centro 지진파의 경우 그림 10(a)에서 적층 고무베어링의 최대 전단변위는 약 5 cm 로써 동반 논문에서 이 베어링을 설계할 때의 최대 허용 변위량 5 cm 와 잘 일치함을 알 수 있다. 그림 10(b)와 10(c)는 100% El Centro 지진파와 고베 지진파에 대한 적층 고무베어링의 최대 전단 변위량으로써 약 9.5 cm와 13.5 cm를 얻었는데 적층 고무베어링의 총 고무 두께가 7.62 cm 임으로 전단 변형률은 각각 125%와 177%로써, 특히 고베 지진파의 경우 과도한 전단 변형률을 보이지만 안전성에는 문제가 없는 것으로 간주될 수 있다.⁽³⁾

그림 10(d), 10(e) 그리고 10(f)는 각 지진파에 대한 납-고무베어링의 전단력-전단변위 관계를 보여준다. 적층 고무베어링의 경우와 각각 비교해 볼 때, 납의 효과를 잘 관찰할 수 있다. 즉, 그림 10(d)는 50% El Centro 지진파의 경우의 해석 결과를 보여 주는데, 납이 항복에 도달하기 직전의 경우이며, 납이 항복할 때까지의 전단강성은 적층 고무베어링의 강성보다 약 10배 크기 때문에, 전단 변위량이 그림 10(a)의 적층 고무베어링의 변위량보다 현저히 작음을 알 수 있다. 100% El Centro 지진파의 경우도 그림 10(e)에서 관찰할 수 있듯이, 전단 변위량이 적층 고무베어링에 비해 현저히 감소하였다. 그림 10(f)의 고베 지진파의 경우는 납이 항복하고 과도한 소성 변형을 보였지만, 지진파로부터 전달된 에너지는 hysteresis 에너지로 변환되어 소산되었고 전단 변위량도 적층 고무베어링에 비해 작다.

4.2.2 골조의 층간 변위

그림 11은 50% El Centro 지진파와 고베 지진파에 대한 1층과 2층간의 상대 변위를 보여준다. 그림 8(a)에서 50% El Centro 지진파는 1초와 5초 사이에서 지진활동이 특히 활발한데, 이 구간에서 면진 장치가 설치된 골조들(그림 11(b)와 11(c))의 층간 변위가 '건물-기초 고정' (그림 11(a))의 경우보다 층간 변위가 작음을 알 수 있다. 마찬가지로 그림 8(c)에서 고베 지진파는 1초와 6초 사이에서 지진활동이 활발한데, 이 구간에서 면진 장치가 설치된 골조들(그림 11(e)와 11(f))의 층간 변위가 '건물-기초 고정' (그림 11(d))의 경우보다 작음을 알 수 있다. 즉 면진장치로 구조물이 기초 분리되면 대부분의 변위는 면진장치에서 발생하며 상부구조물 자체의 변위는 크지 않다. 따라서 기둥에 가해지는 부재력들도 감소된다.

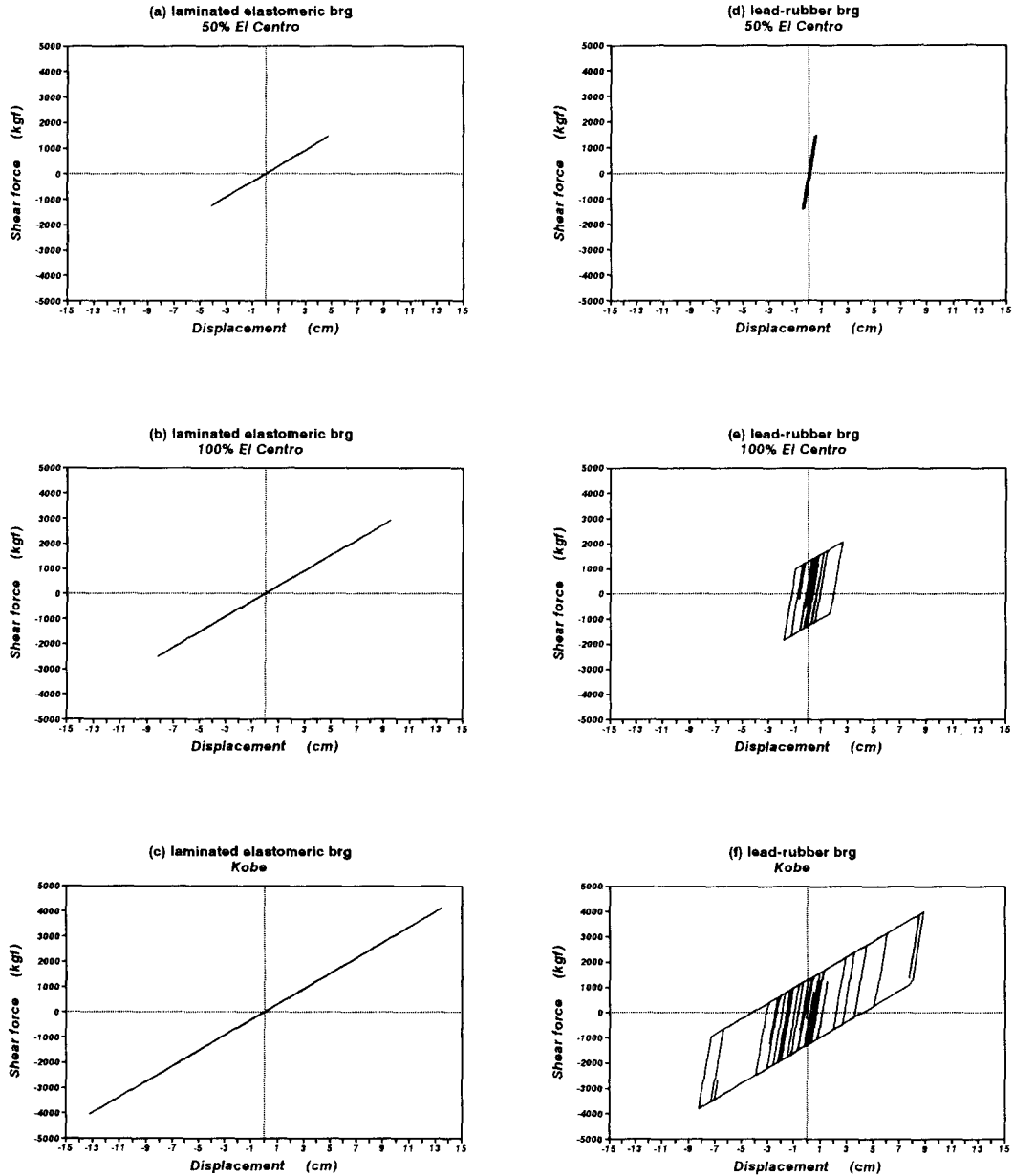


그림 10 면진장치의 전단력-전단변위 관계

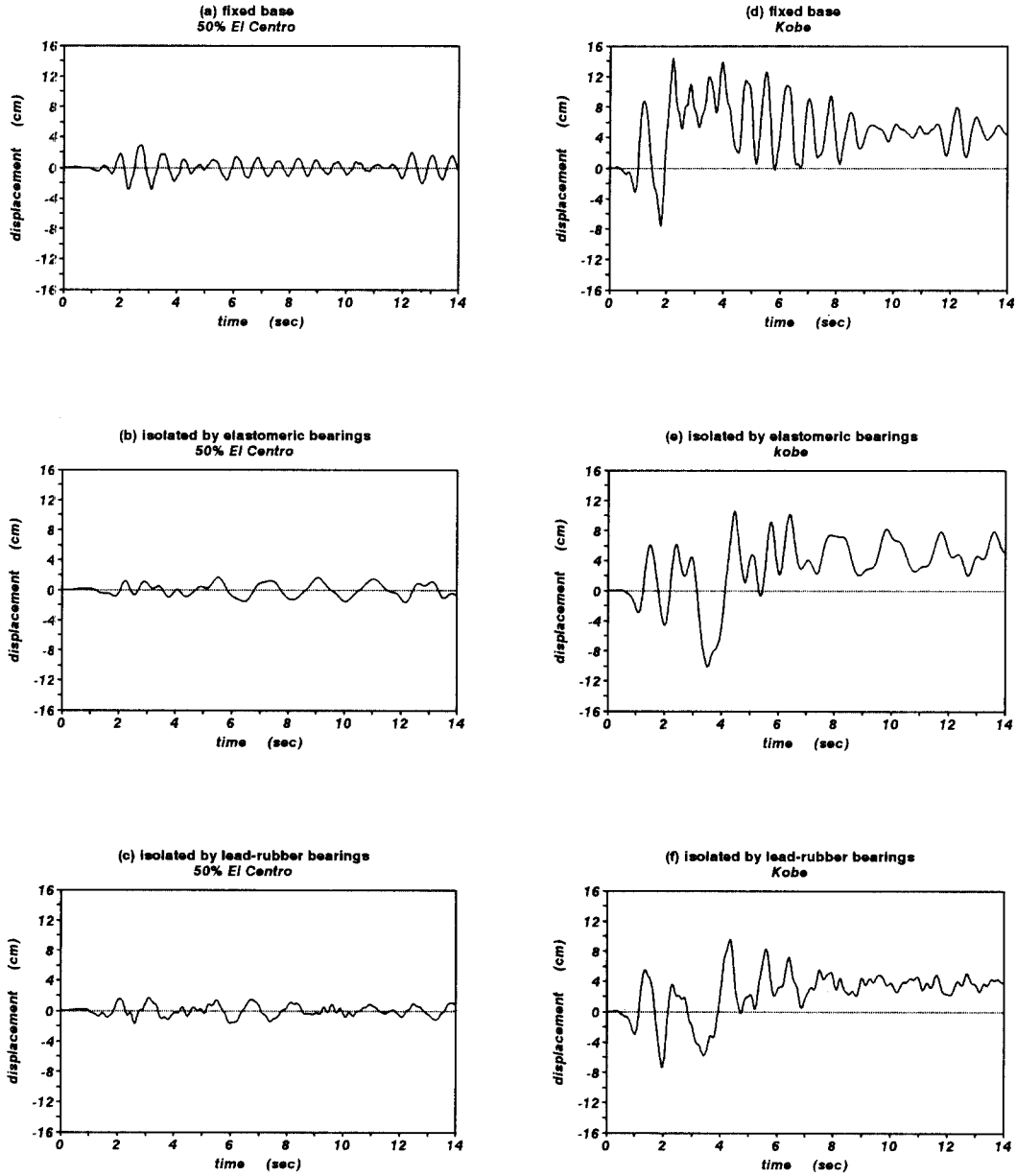


그림 11 50% El Centro 와 고베 지진파에 대한 골구조의 층간변위

4.2.3 골조의 부재력

지진하중 동안 골조에 발생하는 부재력은 면진장치가 설치된 후 현저히 감소하였다. 50% El Centro 지진파의 경우 면진장치가 설치되기 전이나 설치된 후 모든 경우, 수 골조에서 소성힌지는 발생되지 않았지만, 적층고무베어링이나 납-고무베어링으로 기초 분리된 경우, 각 골조의 모멘트는 약 50% 감소하였다. 100% El Centro 지진파의 경우도 비슷한 양상을 보였다.

그림 12(a)는 '건물-기초 고정'의 경우 일층 보들의 모멘트-회전각 관계를 보여준다. 지진파의 크기가 증가되었기 때문에 일층 보들의 양 끝단에서 소성힌지가 발생하였다. 면진장치가 설치된 골조에서는 소성힌지가 발생치 않았으며, 그림 12(b)는 납-고무베어링으로 기초 분리된 골조의 경우 일층 보들의 모멘트-회전각 관계를 보여준다. 그림 12(a)와 비교할 때 적은 부재력을 관찰할 수 있다. 적층 고무베어링과 납-고무베어링으로 기초 분리된 경우도 해석결과로부터 살펴보았다. 납의 초기 강성 증가 효과로 적층 고무베어링으로 기초 분리된 경우보다 횡변위가 작기 때문에, 납-고무베어링으로 기초 분리된 경우 휨모멘트가 적층 고무베어링으로 기초 분리된 경우보다 모멘트가 약 20% 감소됨을 알 수 있었다.

고베 지진파의 경우 엄청난 충격 때문에 '건물-기초 고정'의 경우뿐만 아니라 면진장치가 설치된 경우에도 모든 보의 양끝 단에서 소성힌지가 발생했지만, '건물-기초 고정'의 경우에 비해 납-고무베어링으로 기초 분리된 경우 소성힌지 회전량이 약 2.2배, 적층 고무베어링으로 기초 분리된 경우 약 1.8배 각각 감소하였다. 즉 면진장치로 기초를 분리하면 골조에 소성힌지가 발생한다 하더라도 작은 소성힌지 회전량을 요구하기 때문에, '건물-기초 고정'의 경우보다 적은 연성능력(ductility demand)만을 골조에 부여해도 된다.

면진장치가 설치된 경우, 모든 기둥은 탄성

적으로 거동했지만, 건물-기초 고정의 경우 일층 기둥 밑단에 심한 소성힌지 발생하였다. 그림 12(c)는 이 현상을 보여준다.

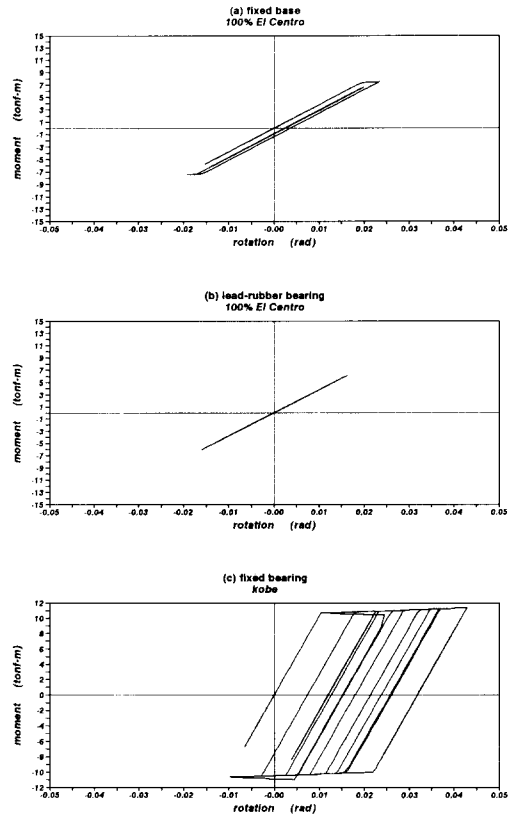


그림 12 100% El Centro 와 고베 지진파에 대한 골조의 모멘트-회전각 관계

5. 결론 및 향후 연구과제

본 논문에서는 설계된 면진 장치들로 기초 분리되기 전과 분리된 후의 2층 철골조의 진동 특성변화를 자유진동 실험 모사와 3차원 주파수 해석을 통해 살펴보았으며, 면진 장치 사용에 의한 이 철골조의 내진 성능 향상을 해석적으로 살펴보았다. 면진 장치들을 사용하면 건물의 주기가 길어져서 지반으로부터 건물로 전달되는 전단력이 감소하여 골조에 생기는 부재력들이 감소한다. 특히 적층 고무베어링의 중앙에 납을 삽입하면 약한 전단력에는 납이 항복할 때까지는 높은 초기 전단 강

성을 가지고 탄성적으로 거동하기 때문에, 건물의 과도한 횡변위를 제어할 수 있다. 강한 지진 하중 동안 납이 항복한 이후 베어링의 전단 강성은 감소되어 지진 하중에 의한 에너지를 발산한다.

해석시 면진 장치들의 역학적 특성들, 즉 강성, 강도 그리고 변형특성 등은 본 논문에서 제시한 식들에 근거하여 산정 하였지만, 향후 실제 면진장치들의 실험을 통해 얻어진 값들과, 제시한 식들에 근거하여 산정된 값들과의 비교를 통해 실제시 사용한 가정들이 수용할 만하다는 것을 검증하여야만 한다. 또한 설계한 실제 크기의 철골조와 면진장치들을 건조, 제작하여 실험실에서 자유진동 실험과 지진파 실험을 실시하여, 해석적으로 구한 결과들을 검증할 필요가 있다. 지진파 실험을 위해서는 진동대 실험이 가장 바람직하겠지만, 철골조가 실제 크기이고 또한 납-고무베어링과 특히 적층 고무베어링의 강성이나 감쇠비와 같은 동적 특성들이 외력의 가력 속도 효과, 즉 변형도 효과(strain rate effect)에 영향을 적게 받는다고 알려져 있기 때문에⁽¹⁴⁾⁽¹⁵⁾ 경제적으로 매력적인 유사동적 실험법⁽⁹⁾을 적용할 수 있다.

참 고 문 헌

1. ACI 318-95, *Building Code Requirements for Reinforced Concrete*, American Concrete Institute, Detroit, Michigan, 1995.
2. AISC, *Specification for the Design, Fabrication and Erection of Structural Steel for Buildings*, 1969.
3. NCHRP, "Bridge bearing," *National Cooperative Highway Research Program*, Transportation Research Board, National Research Council, Washington, D.C., 1977.
4. M. C. Constantinou, "A seismic base isolation," *Lecture Note*, Dept. of Civil Eng., State University of New York at Buffalo, 1990.
5. AASHTO, *Standard Specifications for Transportation Materials and Methods of Sampling and Testing*, 16th Edition, Part I Specifications, 1993.
6. 구경희, 이재한, 유봉, "면진용 적층고무 베어링의 기계적 역학 특성", 한국지진공학회 논문집, 제1권 제2호, 1997, pp. 79-89.
7. Haringx, J. A., "On highly compressive helical springs and rubber rods, and their application for vibration-free mountings, Parts I to III," *Philips Research Report*, 1948-1949.
8. Chopra, A. K., *Dynamics of Structures*, Prentice Hall, 1995, pp. 729.
9. 김대곤, 김대영, 안재현, 박철립, "유사동적 실험법을 이용한 구조물의 내진 성능 평가", 한국지진공학회 논문집, 제1권, 제2호, pp. 49-57, 1997.
10. Prakash, V., Powell, G.H., and Campbell, S., *DRAIN-3DX Base Program Description and User Guide*, Version 1.10, Department of Civil Engineering, University of California, Berkeley, California, August, 1994.
11. Kin, D.-K., "Experimental and Theoretical Studies on the Seismic Performance of Structural Bearing Systems," Ph. D. Dissertation, State University of New York at Buffalo, August 1996.
12. Wilson, E.L., and Habibullah, A., *SAP90 Users Manual*, Computers & Structures, Inc., 1989.
13. Prakash, V., Powell, G.H., Campbell, S.D., and Filippor, F.C., *DRAIN-2DX User Guide*, Department of Civil Engineering, University of California at Berkeley, California, 1992.
14. Kim, D.-K., Mander, J.B., and Chen, S.S.,

"Temperature and strain rate effects on the seismic performance of elastomeric and lead-rubber bearings," *Fourth World Congress on Joints and Bearing Systems for Concrete Structures*, Vol. 1, ACI SP-164, Farmington Hills, Michigan, 1996, pp. 309-322.

15. Aiken, I.D., Kelly, J.M., and Tajirian, F.F., "Mechanics of low shape factor elastomeric seismic isolation bearings," *Report No. UCB/EERC-89/13*, Earthquake Engineering Research Center, College of Engineering, University of California, Berkeley, November, 1989, pp. 179.