

납-고무베어링을 적용한 제어장치의 동적평가를  
위한 해석적 연구  
Analytical Study to Determine the Dynamic Property  
of Control Equipment Room using LRB

김우범\*  
Kim, Woo-Bum

김대곤\*\*  
Kim, Dea-Gon

이경진\*\*\*  
Lee, Kyung-Jin

박병구\*\*\*\*  
Park, Byung-Gu

ABSTRACT

In these days, The base isolation system is often used improve the seismic capacity of the structure instead of conventional techniques of strengthening the structural members.

The purpose of this study is to evaluate dynamic property evaluation of control equipment using Lead Rubber Bearing.

In this study, analysis numerical was performed to determine the optimal dynamic property of lead rubber bearing and damper which minimize the response of base from in main control room.

Also the analytical results was composed with the test results performed in previous study.

1. 서 론

1995년 일본의 고베 지진과 1997년 터키 이즈미(Izmit) 지진, 연이은 대만의 1999년지진(Chi-Chi) 지진 이후 우리 나라에서도 지진에 대비를 체계적으로 수립해야 할 필요성이 제기 되고 있다. 우리 나라에서는 홍성 지진(1978. 10. 7), 백령도 지진(1995. 7. 24), 영월 지진(1996. 12. 13), 경주 지진(1997. 6.26)과 같은 중소규모의 지진활동의 최근 증가 추세에 있어 지진재해로부터 안전시대가 아님을 인식하게 되는 계기가 되고 있다.

지진동이 구조물의 기초에서 상부로 전달되는 것을 최소화하기 위해 구조물에 면진장치를 도입하고 있다. 면진장치의 원리는 구조물의 기초와 지반사이에 수평방향으로 유연한 재료를 설치하

\* 정회원 · 공주대학교 건축공학과, 부교수  
\*\* 정회원 · 서울산업대학교 구조공학과, 조교수  
\*\*\* 한전 전력연구원, 선임연구원  
\*\*\*\*공주대학교 건축공학부 석사과정

여 구조물의 고유진동수를 지진에너지가 우세한 진동수 영역 밖으로 이동시켜 상부 구조물에 전달되는 지진하중을 감소시키고, 감쇠능력의 증가를 통해 지진에너지를 흡수, 분산시키는 개념이다.

면진장치의 한 종류인 납-고무베어링(Lead Rubber Bearing)은 기기나 구조물의 바닥과 기초 사이에 수평운동 및 비틀림에 대하여 저항력이 크고 수직방향 강성(Stiffness)이 매우 큰 베어링(Bearing)을 설치하여 기기나 구조물에 전달되는 지진력을 감소시키는 장치로서 원전기기, 원전구조물에서의 적용을 위하여 국내외에서 많은 연구가 이루어지고 있다.<sup>(1)(2)</sup>

본 연구에서는 납-고무베어링(Lead Rubber Bearing)을 사용하여 국내 원전에 설치될 예정인 지진감시시스템 제어 캐비닛(Control Cabinet)의 지진동 저감성능 평가를 바탕으로 최적의 층면진 시스템을 구현하기 위한 해석적 연구를 수행하였다. 제어 캐비닛은 원전 주제어실에 설치되며, 액세스 플로어 상부에 놓여진다. 액세스의 높이는 제어실 바닥에서 60cm 이고 해석시 납-고무 베어링은 수학적 모델을 적용하여 El Centro 남북방향 성분과 원전 보조건물의 층응답스펙트럼을 지진입력으로 사용하여 지진동 응답특성 해석을 수행하였다.

## 2. 층면진장치의 전산모델링

### (가) LRB의 수학적 모형

LRB의 전단시험을 근거로 제작된 LRB의 물성치를 바탕으로 면진장치의 수학적 모형을 만들었다.

○ 전단시험은 가진 진동수 0.5Hz, 1.0Hz, 1.5Hz, 2.0Hz, 3.0Hz로 하여 이루어짐.

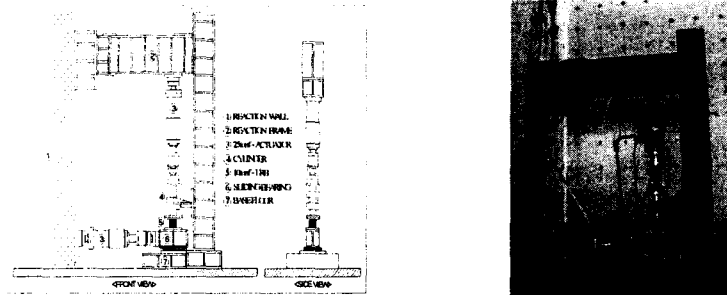
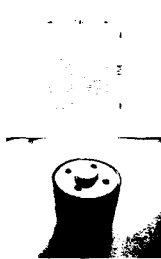
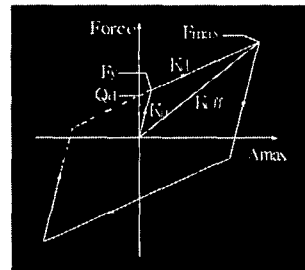


그림1. 성능시험장치의 개념도 및 설치모습



항목	세원
설계 전단하중	10 Tonn
외경/내경	150/30mm
전체높이(상하부 Plate 제외)	154mm
고무층	4mmX14층=56mm
강판층	3mmX13층=39mm
납봉의 크기(단면적)	Φ30X135mm
1차 형상계수	9.375
2차 형상계수	2.679

(a) 시험된 면진장치 LRB의 물성치



(b) LRB의 수학적 모형

그림2. LRB의 수학적 모형

(나) 진동대의 전산모델

울진원자력 1, 2호기의 주제어실의 설치될 층 면진시스템의 진동대 시험 결과를 토대로 SAP2000를 이용하여 전산 모델링 하였다.

(a) 시험에 사용되었던 캐비닛 및 Access Floor의 제원

- 제어 캐비닛 전후 방향 고유진동수 : 33.0 Hz
- Access Floor 밑 Base Frame 만의 동특성 해석
  - Frame size (Girder : H 150×150×7/10, Beam : H 125×125×6.5/9)
- Access Floor 만의 동특성 해석
  - Access floor size (Support : D61×6, Stringer : B50×30×3, Brace : L60×5)

그림3은 진동대 설치 개념도를 나타내고 있고 그림4는 LRB를 삽입하여 설치된 진동대 모습을 나타낸 그림이다.

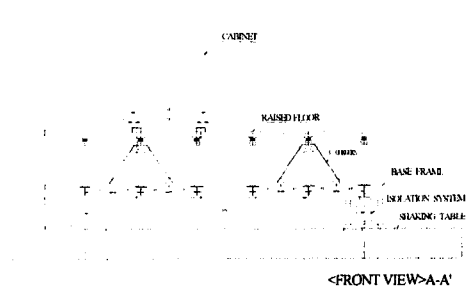


그림3. 진동대 설치 개념도

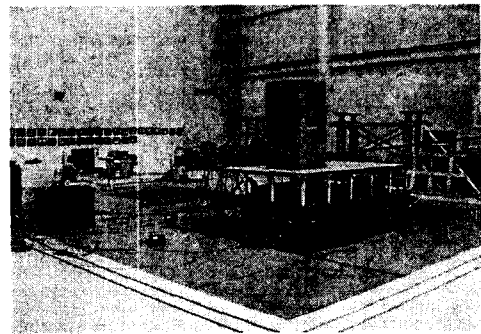


그림4. 진동대에 LRB 설치

(b) SAP2000을 사용하여 진동대 시험 결과를 바탕으로 그림 5와 같이 전산 모델링을 하여 그 값을 비교하였다. 진동대 시험은 El Centro 남북방향 성분을 지진 입력으로 사용하였으며 이 때 LRB를 사용하지 않은 상태에서 진동대위에 있는 캐비닛 최상부의 응답은 그림 6에서와 같이 시험 결과와 매우 유사하게 나왔다.

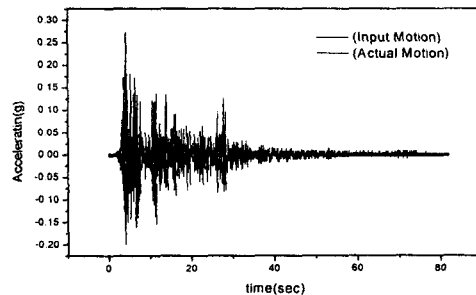
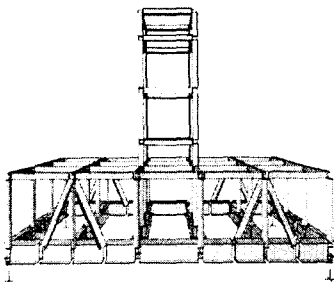


그림 5. SAP2000을 사용한 진동대의 전산 모델링과 사용된 입력 데이터( El Centro)

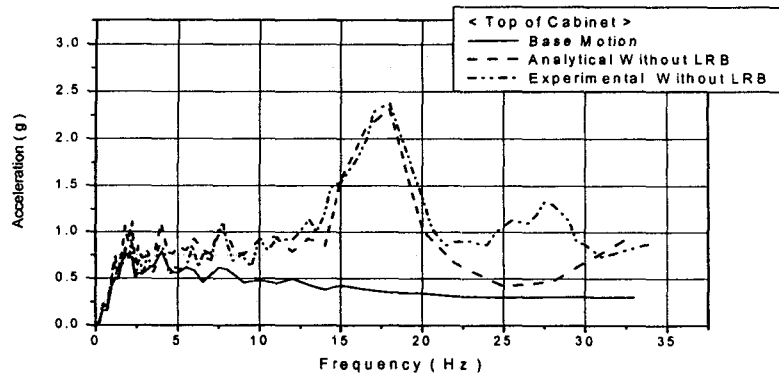


그림 6. 캐비닛 최상부의 응답 스펙트럼 비교

### 3. LRB를 사용한 층면진 시스템 해석

진동대 시험결과 캐비닛의 최상부의 응답은 LRB를 사용했을때 그림.7과 같이 Peak Acceration이 2.35 g에서 1.84 g로 저감되는 감쇠 효과를 나타냈으나 예상보다는 층면진시스템의 저감효과가 크지 않았다. 본 연구는 원전 주 제어실에 실제 사용되는 설계 응답 스펙트럼을 사용하여 진동대 위에 일정한 고유주파수를 갖는 캐비닛이 아니라 다양한 고유 주파수를 캐비닛이 진동대 위에 설치되었을 때 최적의 감쇠 효과를 갖기 위한 대안으로 진동대의 응답을 저감시키기 위한 LRB의 물성치를 해석하는데 방향을 두었다.

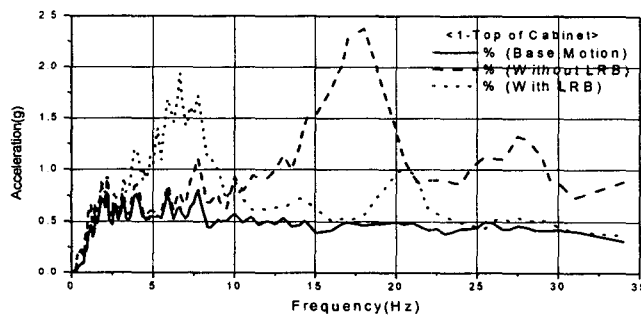


그림 7. 캐비닛 최상부의 응답스펙트럼 비교

#### (가) 원전 설계 응답 스펙트럼

원전 설계 응답 스펙트럼을 입력으로 사용하기 위해 설계 응답 스펙트럼을 Simq라는 프로그램을 사용하여 Time History 데이터로 변화하여 사용하였다. 그 결과는 그림 8과 같이 Damping Ratio 5%일 때 Peak Acceleration이 2.66 g로 설계 스펙트럼과 거의 유사한 응답 결과를 얻었다.

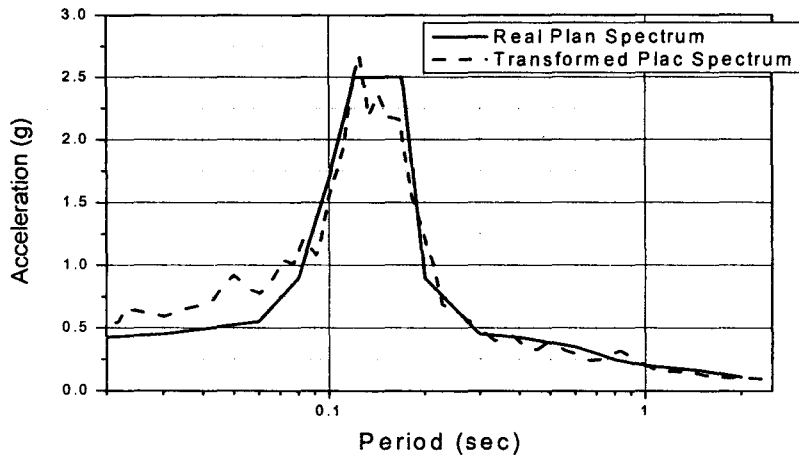


그림 8. Damping Ratio 5%일 때 원전 설계 스펙트럼 비교

(나) LRB의 물성치 변화를 통한 층면진 시스템 해석

LRB의 물성치를 표 1과 같이 변화하여 진동대에서의 응답 변화를 비교했다. 이 때 LRB의 물성치는 초기강성과 항복강도는 변화시키고 항복 후 강성은 전단시험의 결과를 바탕으로 초기강성의 10%로 결정하여 해석하였다.

	항복강도 0.7 (ton)	항복강도 0.6 (ton)	항복강도 0.5 (ton)	항복강도 0.4 (ton)	항복강도 0.3 (ton)	항복강도 0.2 (ton)	항복강도 0.1 (ton)
강성500 (ton/m)	Case 1	Case 2	Case 3	Case 4	Case 5	Case 6	Case 7
강성400 (ton/m)	Case 8	Case 9	Case 10	Case 11	Case 12	Case 13	Case 14
강성300 (ton/m)	Case 15	Case 16	Case 17	Case 18	Case 19	Case 20	Case 21
강성200 (ton/m)	Case 22	Case 23	Case 24	Case 25	Case 26	Case 27	Case 28
강성100 (ton/m)	Case 29	Case 30	Case 31	Case 32	Case 33	Case 34	Case 35
강성50 (ton/m)	Case 36	Case 37	Case 38	Case 39	Case 40	Case 41	Case 42

표 1. LRB 물성치 변화한 Parametric Study

표.1에 따라서 해석한 결과 약 33Hz 정도의 캐비넷이 진동대 위에 올라갈 것이라고 가정하고 진동대의 응답이 33Hz에서 Case에 따라 Peak Acceleration을 비교한 결과 그림 8과 같이 LRB의 강성이 낮을수록, LRB의 항복강도가 작을수록 응답 스펙트럼의 최대 가속도는 낮아지는 결과를 얻었다.

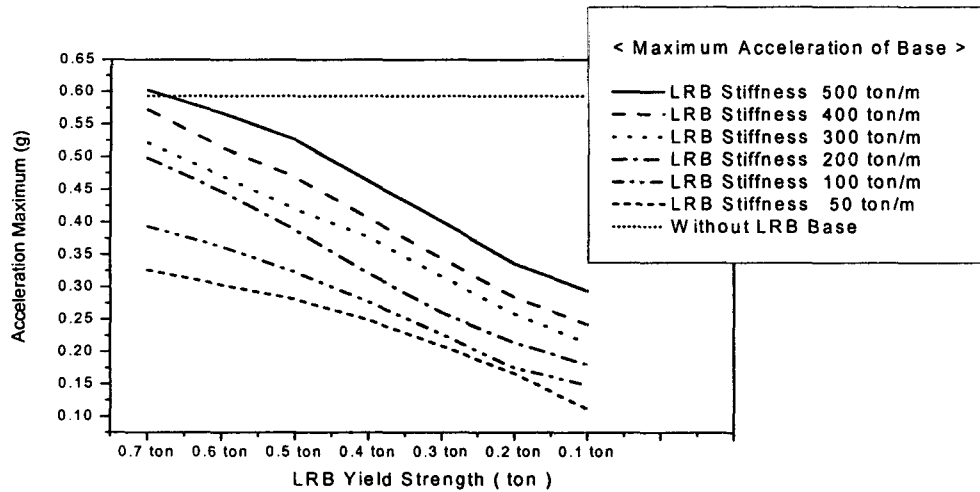


그림 8. 진동대의 응답스펙트럼 중 주기 33Hz에서의 Peak Acceleration 비교

LRB의 물성치 중에서 가장 낮은 Peak Acceleration을 갖는 강성 100 ton/m - 항복강도 0.1 ton의 LRB와 강성 50 ton/m - 항복강도 0.1 ton의 물성치를 갖는 LRB를 그림 9와 같이 비교하였다.

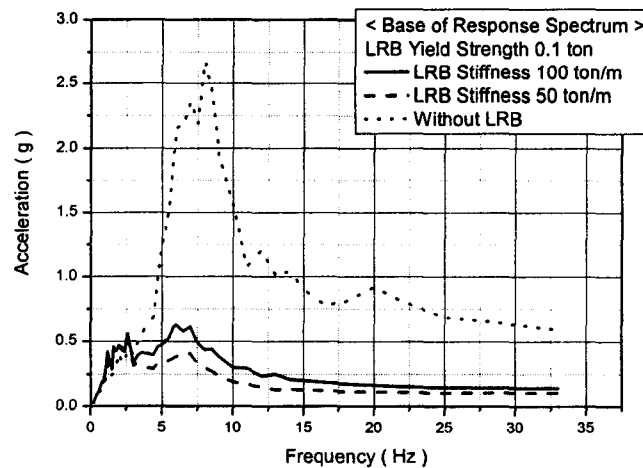


그림 9. 강성에 따른 진동대의 응답 스펙트럼 비교

가속도 응답스펙트럼을 비교해 본 결과 최대응답이 나타나는 진동수가 LRB를 설치하지 않은 경우 8 Hz이고 LRB의 항복강도가 0.1 ton이고 강성이 100 ton/m 일 때 2.6 Hz와 6 Hz, LRB 항복강도 0.1 ton이고 강성이 50 ton/m 일 때 2.6 Hz와 7 Hz로 이동하였다. LRB를 설치한 경우 두 곳에서 진동수를 갖는 이유는 LRB의 응답 저감 효과에 의해 진동수가 이동하였지만 사용되어진 원전 스펙트럼의 효과가 크기 때문으로 해석된다. 최대가속도는 2.66 g에서 LRB 강성 100 ton/m

일 때 0.626 g, LRB 강성 50 ton/m 일 때 0.515g 로 저감되었다.

진동수가 33 Hz에서 가속도 응답 스펙트럼을 비교해 보면 가속도는 0.593 g에서 LRB 강성 100 ton/m 일 때 0.148 g, LRB 강성 50 ton/m 일 때 0.111 g로 저감되었다.

(다) LRB의 좌굴내력

해석 결과를 볼 때 초기강성 50 ton/m, 항복강도 0.1 ton일 때 가속도 응답스펙트럼에서 33Hz의 응답이 가장 작게 나왔지만 LRB의 좌굴내력식 (1)을 사용하여 해석한 결과 LRB의 좌굴내력이 1 ton 미만으로 상부하중을 받기 위해서는 그림 10에서와 같이 LRB 좌굴하중을 고려하여 초기강성 100 ton/m 항복강도 0.1 ton 의 물성치를 선택하였다.

$$P_{cr} = \frac{P_s}{2} \left( \sqrt{1 + \frac{4P_E}{P_s}} - 1 \right), P_s = GA_{eff} \frac{H}{t_r}, P_E = \frac{\pi^2 E_c I}{3H_r} \quad (1)$$

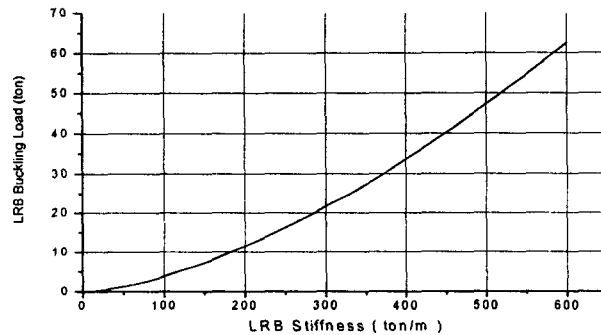


그림 10. LRB 강성에 따른 좌굴하중

(라) 점탄성 감쇠기의 영향

점탄성 감쇠기를 진동대에 설치한 경우 응답을 그림 11과 같이 나타내었다. 감쇠기는 7 Ns/mm, 14Ns/mm, 28Ns/mm 로 하여 응답스펙트럼을 비교해 보았다.

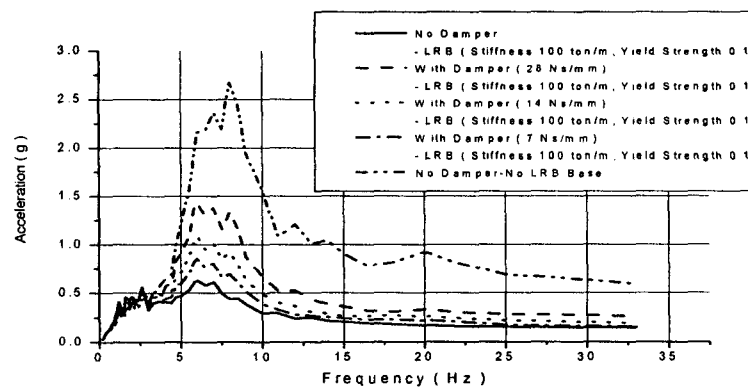


그림 11. 점탄성 감쇠기를 설치했을 때 진동대에서의 응답 비교

해석 결과 점탄성 감쇠기를 설치했을 때 LRB만을 설치했을 때와 비교해서 진동수의 이동은 없으나 최대가속도는 감쇠기가 28 Ns/mm 일 때 1.43 g , 14 Ns/mm 일 때 1.08 g , 7 Ns/mm 일 때 0.853 g로 LRB만을 설치했을 때 보다 높게 나왔다.

진동수 33Hz에서 가속도 응답스펙트럼을 비교해 보면 감쇠기가 28 Ns/mm 일 때 0.26 g , 14 Ns/mm 일 때 0.191 g , 7 Ns/mm 일 때 0.156 g 로 LRB만을 설치했을 때 보다 높게 나왔다.

#### 4. 결론

충면진 시스템의 저감성능을 최적화하기 위해 수행한 해석결과를 정리하면 다음과 같다.

- (1) 원전에 사용되는 설계 응답 스펙트럼을 입력으로 사용하고 진동대에 설치되는 LRB의 강성은 좌굴하중을 고려할 때 LRB 1개가 2 ton이상을 견디기 위한 LRB의 강성은 68 ton/m 이상이 되어야 한다.
- (2) 진동대의 가속도 응답 스펙트럼을 비교해 본 결과 LRB의 강성이 낮을수록 진동대의 최대 응답이 나타나는 진동수는 저주파수 영역으로 이동한다.
- (3) 진동대의 가속도 응답 스펙트럼을 비교해 본 결과 같은 강성의 LRB에 대해 항복강도가 낮을수록 최대 가속도는 줄어드는 현상을 보였다.
- (4) 진동대의 가속도 응답 스펙트럼을 비교해 본 결과 최대응답이 나타나는 진동수가 LRB를 설치하지 않은 경우 8 Hz, 설치한 경우 6 Hz로 이동하였고, 최대 가속도는 2.66 g에서 0.626 g로 76.5% 저감되었다.
- (5) 진동대에 LRB와 점탄성 감쇠기를 같이 설치할 경우 가속도 응답 스펙트럼을 비교해 본 결과 오히려 최대 가속도가 높게 나왔는데 그 이유는 LRB의 에너지 흡수효과가 너무 크기 때문에 점탄성 감쇠기의 감쇠 효과가 나타나지 않은 것으로 보인다.

#### 감사의 글

본 연구는 2003년 전력산업기반기금 지원에 의해 수행되었으며 이에 감사를 표합니다.

#### 참 고 문 헌

1. K. Ebisawa, K. Ando, K. Shibata, "Progress of a research program on seismic base isolation of nuclear components," *Nuclear Engineering and Design* 198, pp.61~74, 2000.
2. 전영선, 최인길, 유문식, "수평 전단시험에 의한 납 삽입 적층고무베어링의 기계적 특성 평가", 한국지진공학회 논문집, 제5권 제6호(통권 제22호), pp.1~10, 2001. 12.
3. 김대곤, 이상훈, 김대영, 박철립, "적층고무베어링과 납-고무베어링의 내진성능에 관한 실험적 평가", 한국지진공학회 논문집, 제2권 제4호(통권 제8호), pp.53~62, 1998. 12.
4. 이경진, 김갑순, 강태경, 서용표, 이종립, "적층고무베어링의 동적 특성평가", 한국지진공학회 논문집, 제6권 제1호, pp367~372, 2002.
5. 이경진, 김갑순, 서용표, "납-고무베어링을 적용한 제어장비의 동적 특성평가", 한국지진공학회 논문집, 제6권 제2호, pp341~348, 2002.
6. 김두훈, 권형오, 박해동, 정민기, 이동근, "납 면진받치를 적용한 건축물의 내진설계", 한국지진공학회 논문집, 제 2권 제4호, pp258~264. 1998.