

납-고무베어링을 적용한 제어장비의 동적 특성평가 Dynamic Property Evaluation of Control Equipment using Lead Rubber Bearing

이 경 진* 김 갑 순** 서 용 표***
Lee, Kyung-Jin Kim, Kap-Sun Suh, Yong-Pyo

ABSTRACT

In these days, The base isolation system is often used to improve the seismic capacity of the structures 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 Lead Rubber Bearing.

In this study, a base isolation test of seismic monitoring control cabinet with LRB(lead rubber bearing) was performed. The cabinet will be installed on access floor in MCR(main control room) of nuclear power plant. Details and dynamic characteristics of the access floor were considered in the construction of testing specimen. N-S component of El Centro earthquake was used as seismic input motion.

Acceleration response spectrums in the top of cabinets showed that the first mode frequency of cabinet with LRB(lead rubber bearing) was shifted to 7.5 Hz in compared with 18Hz of cabinet without LRB and the maximum peak acceleration was reduced in a degree of 22 percent from 2.35 g to 1.84 g.

Key words : Lead-rubber bearing, dynamic property, Shear strain

1. 서 론

1995년 일본의 고베 지진과 1997년 터키 이즈미(Izmit) 지진, 연이은 대만의 1999년 지진(Chi-Chi) 지진 이후 우리 나라에서도 지진에 대한 대비를 체계적으로 수립해야 할 필요성이 제기되고 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 지진활동이 최근 증가 추세에 있어 지진재해로부터 안전지대가 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 설치하여 구조물의 고유진동수를 지진에너지가 우세한 진동수 영역 밖으로 이동시켜 상부 구조물에 전달되

* 한국전력공사 전력연구원 선임연구원, 정회원

** 한국전력공사 전력연구원 연구원, 정회원

*** 한국전력공사 전력연구원 책임연구원, 정회원

는 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, 원전구조물에의 적용을 위하여 국내외에서 많은 연구가 이루어지고 있다^{(1) (2)}.

본 연구에서는 소형 납-고무베어링(Lead Rubber Bearing)을 사용하여 국내 원전에 설치될 예정인 지진감시시스템 제어 캐비닛(Control Cabinet)의 지진동 저감성능 평가를 수행하였다. 제어 캐비닛은 원전 주제어실에 설치되며, 액세스 플로어 상부에 놓여진다. 액세스 플로어의 높이는 제어실 바닥에서 60cm 정도이다. 시험체는 이러한 조건을 반영하여 제작하고, 제작된 시험체에 납-고무 베어링을 설치하여 El Centro 남북방향 성분을 지진입력으로 사용하여 지진동 응답특성 평가시험을 수행하였다.

2. 지진동 저감시스템을 적용한 원전기기의 저감성능 평가

지진동 저감시스템의 저감성능을 평가하기 위하여 국내 원전에 설치될 지진감시시스템 제어 캐비닛(Control Cabinet)을 선정하여 지진동 저감성능 평가를 수행하였다.

(가) 제어 캐비닛의 특성

지진동 저감성능평가를 수행하고자 하는 시험설비는 울진원자력 1, 2호기의 주제어실에 설치될 지진감시시스템 제어 캐비닛으로서 그 주요기능은 원전 부지에서 발생한 지진에 대한 경보를 제공하고 지진신호를 측정, 기록, 분석하는 것이다. 제어 캐비닛은 1개의 Rack에 포함된 Uninterruptible Power Supply(UPS), 2개의 DC Power Supply Modules, 4개의 FBA TB modules, 1개의 Trigger TB 모듈, 1개의 Switch TB Module, 두 대의 산업용 컴퓨터, Annunciator 그리고 Indicator로 구성되어 있다.

제어 캐비닛의 주제어실내 설치조건을 반영하기 위하여 주제어실 바닥인 액세스 플로어(Access Floor)를 실규모로 제작하여 상부에 제어 캐비닛을 고정하고 설치하였다.

(a) 제어 캐비닛의 동적특성

제어 캐비닛에 대한 공진탐색시험을 실시하여 확인한 고유진동수는 다음과 같다.

○ 제어캐비닛 전후 방향 고유진동수 : 33.0 Hz

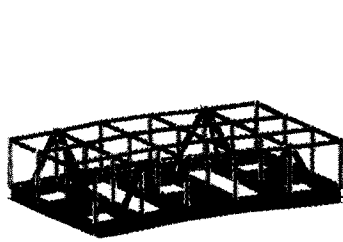
(b) 액세스 플로어(Access Floor)의 동적특성

액세스 플로어의 고유진동수를 검토하기 위하여 구조해석 프로그램인 MIDAS를 이용하여 고유치 해석을 수행하였고, 그 결과를 정리하면 다음과 같다. 그림 1은 액세스 플로어의 고유치 해석을 수행하여 1차~5차 모드의 변형형상을 나타낸 그림이다.

- Frame size (Girder : H 150×150×7/10, Beam : H 125×125×6.5/9)
- Steel lumped mass 고려(Nodal mass→x, y direction)
- Access floor size (Support : D61×6, Stringer : B50×30×3, Brace : L60×5)

표 1. 액세스 플로어 해석결과

Mode	고유진동수(Hz)	모드참여율(%)	비고
1차	22.58	81.95	TR-Y
2차	40.29	15.66	TR-X
3차	54.62		
4차	58.91		
5차	59.0		



```

H2048/G2048
POST-PROCESSOR
VIBRATION MODE

PARAMETER
UTCL1(180)
FX 1.94803

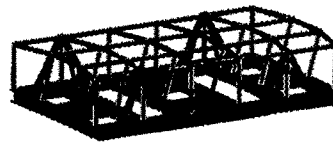
NATURAL FREQ
MODE
0.04254

MODE(1)
DOF 0.00000
DY 0.1846420
FX 0.00000
FY 0.00000
FZ 0.00000
RX 0.00000
RY 0.00000
RZ 0.00000

Mode 1
FILE: F:\C:\MO048.F
UNIT: (kg)
DATE: 03/27/2001
VIEW-DIRECTION
X -> 180
Y -> 0
Z -> 0

```

(a) 1차 모드



```

H2048/G2048
POST-PROCESSOR
VIBRATION MODE

PARAMETER
UTCL1(180)
FX 0.04641

NATURAL FREQ
MODE
0.01982

MODE(1)
DOF 1.046412
DY 0.00000
FX 0.00000
FY 0.00000
FZ 0.00000
RX 0.00000
RY 0.00000
RZ 0.00000

Mode 2
FILE: F:\C:\MO048.F
UNIT: (kg)
DATE: 03/27/2001
VIEW-DIRECTION
X -> 180
Y -> 0
Z -> 0

```

(b) 2차 모드



```

H2048/G2048
POST-PROCESSOR
VIBRATION MODE

PARAMETER
UTCL1(180)
FX 0.02296

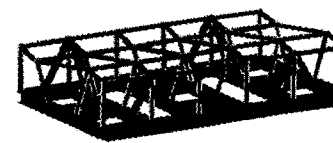
NATURAL FREQ
MODE
0.018507

MODE(1)
DOF 0.00000
DY 0.00000
FX 0.00000
FY 0.00000
FZ 0.00000
RX 0.00000
RY 0.00000
RZ 0.00000

Mode 3
FILE: F:\C:\MO048.F
UNIT: (kg)
DATE: 03/27/2001
VIEW-DIRECTION
X -> 180
Y -> 0
Z -> 0

```

(c) 3차 모드



```

H2048/G2048
POST-PROCESSOR
VIBRATION MODE

PARAMETER
UTCL1(180)
FX 0.00776

NATURAL FREQ
MODE
0.017776

MODE(1)
DOF 0.00000
DY 0.00000
FX 0.00000
FY 0.00000
FZ 0.00000
RX 0.00000
RY 0.00000
RZ 0.00000

Mode 4
FILE: F:\C:\MO048.F
UNIT: (kg)
DATE: 03/27/2001
VIEW-DIRECTION
X -> 180
Y -> 0
Z -> 0

```

(d) 4차 모드



```

H2048/G2048
POST-PROCESSOR
VIBRATION MODE

PARAMETER
UTCL1(180)
FX 0.00776

NATURAL FREQ
MODE
0.017776

MODE(1)
DOF 0.00000
DY 0.00000
FX 0.00000
FY 0.00000
FZ 0.00000
RX 0.00000
RY 0.00000
RZ 0.00000

Mode 5
FILE: F:\C:\MO048.F
UNIT: (kg)
DATE: 03/27/2001
VIEW-DIRECTION
X -> 180
Y -> 0
Z -> 0

```

(e) 5차 모드

그림 1. 액세스 플로어 변형형상

3. 지진동 저감성능 평가 시험

(가) 시험체 설치 방법

지진동 저감성능 평가를 위해서 진동대에 설치한 시험체 개념도는 그림 2에 표시되어 있고, 지진동 저감장치를 삽입하여 설치된 모습은 그림 3에 표시되어 있다. 성능평가에 사용한 진동대는 1축 진동대이고, 변위 센서와 가속도 센서를 설치하였다.

진동대와 센서 및 데이터 계측기의 기술사양은 표 2와 같다.

표 2. 진동대와 계측센서 기술사양

기 기	기술 사양
진동대	<ul style="list-style-type: none"> ○ 자유도 : 1축(Uni-Axial) ○ 크 기 : 가로 5M × 세로 3M ○ 최대적대 중량 : 300 kN ○ Stroke : ± 100 mm ○ 가력 속도 : 500 mm/sec ○ 최대지반 가속도 : 1.0 G
데이터 계측기 (MDT 100)	<ul style="list-style-type: none"> ○ Channel 수 : 32 ch ○ Max. Hz : 5,000 Hz/ch ○ Max. Mem. : 160 sec with 100 Hz
광학식 Position Sensor 가속도 센서	<ul style="list-style-type: none"> ○ 모델 C5949 ○ 제조사 - Bruel Kjar

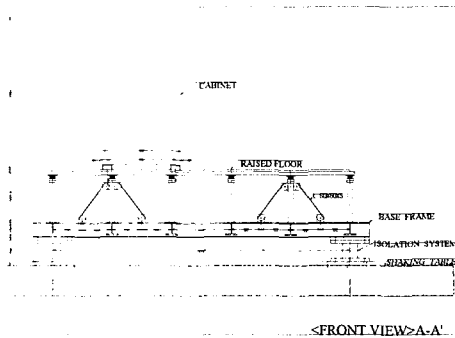


그림 2. 제어 캐비닛 진동대 설치 개념도

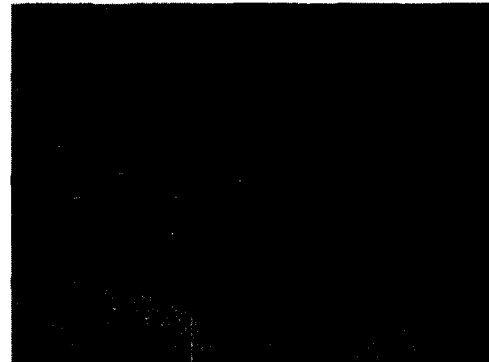


그림 3. 진동대에 설치된 제어 캐비닛
(LRB 설치)

캐비닛의 응답을 계측하기 위하여 그림 4에 표시한 것처럼 가속도 센서를 캐비닛과 액세스 플로어에 8개, 광학식 Position 센서를 8개 설치하였다.

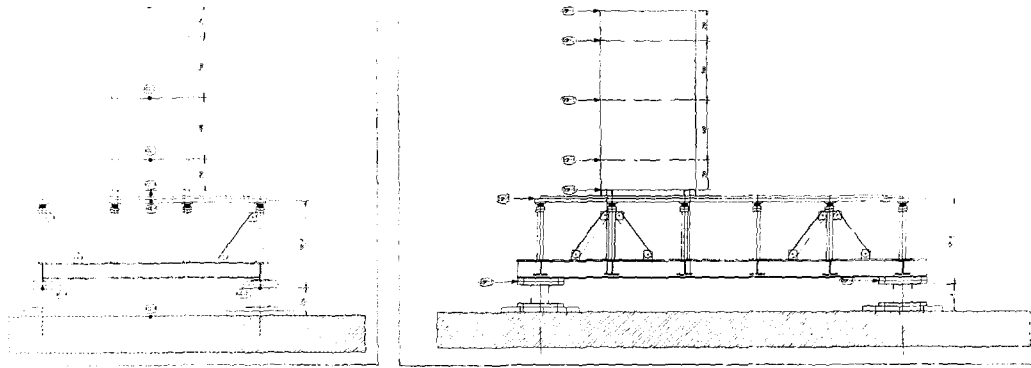


그림 4. 가속도 센서, 광학식 Position 센서 설치 위치

또한 지진동 저감장치는 액세스 플로어의 네 모서리에 모두 4개를 설치하여 진동대 실험을 수행하였다.

(나) 시험방법

지진동 저감성능 평가시험에 사용한 입력지진은 1949년 El Centro 남북방향 성분(그림 5 참조)으로 최대지진가속도를 0.3g로 조절하여 지진동 저감장치 유무에 따른 지진동 응답특성 평가시험을 수행하였다.

진동대 본 시험을 수행하기 전에 진동대의 목표 가속도 재현 정밀도 평가와 지진동 저감장치의 지진동 응답분석을 수행하였다.

(1) 진동대 성능 검증(목표 가속도 재현 오차 검증)

진동대의 목표 가속도 재현오차를 검증하기 위해 El Centro 지진 남북방향 성분 가속도 입력신호와 진동대 바닥면으로부터 측정(그림 4. ACC-8)된 가속도값을 비교하여 재현 정밀도를 평가하였다. 평가한 결과 그림 5에 나타난 바와 같이 입력신호와 재현된 가속도 값이 오차범위 5% 이내에서 비교적 잘 일치함으로써 진동대 목표 가속도 재현성능을 검증하였다.

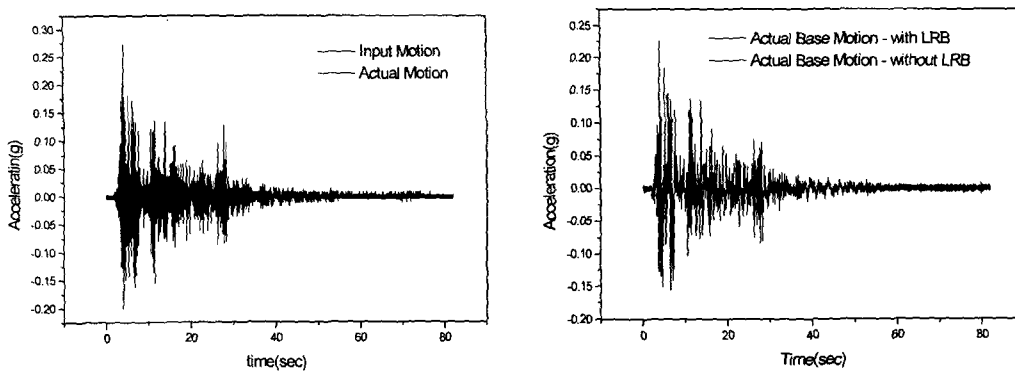


그림 5. 입력 가속도와 재현 가속도 비교(El Centro 지진 N-S 성분)

(다) 시험 결과

(1) 캐비닛 최상부 응답 스펙트럼

캐비닛 최상부(그림 4의 ACC-1)에서의 응답스펙트럼을 그림 6에 정리하였다. 가속도 응답 스펙트럼을 비교해 본 결과 최대응답이 나타나는 진동수가 지진동 저감장치를 설치하지 않은 경우 18 Hz, 설치한 경우 7.3 Hz로 이동하였고, 최대가속도는 2.35 g에서 1.84g로 22% 저감되었다.

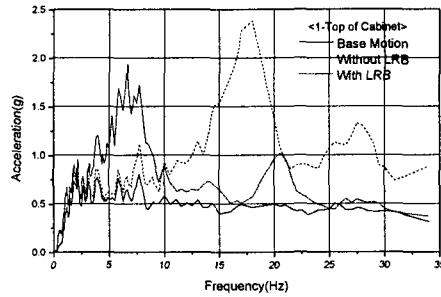


그림 6. 캐비닛 최상부의 응답 스펙트럼 비교

(2) 캐비닛 중앙부 응답 스펙트럼

캐비닛 중앙부(그림 4의 ACC-2)에서의 응답스펙트럼을 그림 7에 정리하였다. 가속도 응답 스펙트럼을 비교해 본 결과 최대응답이 나타나는 진동수가 지진동 저감장치를 설치하지 않은 경우 16.5 Hz, 설치한 경우 7.0 Hz로 이동하였고, 최대가속도는 1.95 g에서 1.73g로 12% 저감되었다.

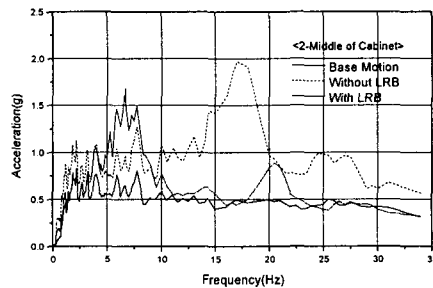


그림 7. 캐비닛 중앙부의 응답 스펙트럼 비교

그림 8은 지진동 저감장치가 설치되지 않은 경우의 캐비닛 최상부와 중앙부의 응답스펙트럼을 나타낸 것이고, 그림 9는 지진동 저감장치가 설치된 경우의 캐비닛 최상부와 중앙부의 응답스펙트럼을 나타낸 것으로 캐비닛 상단부로 갈수록 지진동 응답이 커지는 특성을 나타내고 있다.

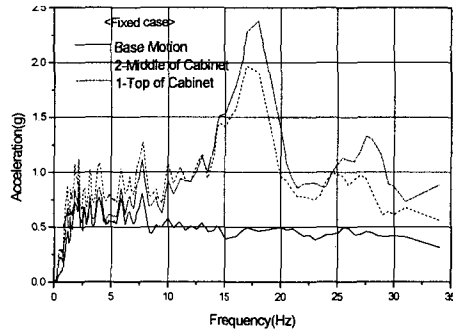


그림 8. 지진동 저감장치가 없을 경우 캐비닛 높이별 응답 스펙트럼

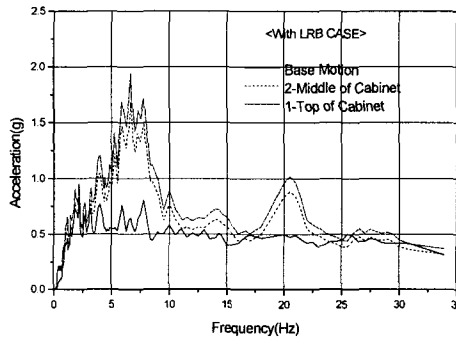


그림 9. 지진동 저감장치가 있을 경우 캐비닛 높이별 응답 스펙트럼

(3) 캐비닛 높이별 최대 응답 변위

캐비닛 높이별(그림 4의 DIS-1 ~ DIS-5) 응답변위를 그림 10에 정리하였고, 그림 10에서 가로축은 그림 4의 광학식 Position 센서 부착위치를 나타낸 것이다.

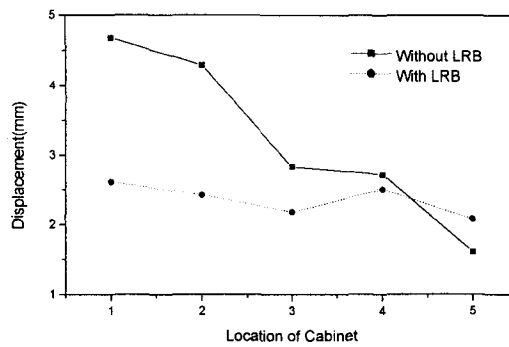


그림 10. 캐비닛 높이별 응답 변위 비교

그림 10에서 지진동 저감장치를 설치하지 않은 경우에는 캐비넷 구조물의 거동이 상부로 갈수록 증폭되어 최상부점의 변위응답이 4.7mm로 가장 크고, 캐비넷 하부(5번)에서는 1.6mm로 가장 작게 나타났다.

지진동 저감장치를 설치한 경우에는 변위 응답이 저감되어 나타났고, 최상부층 변위 2.6mm, 하부 변위 2.2mm로 캐비넷 위치에 따라서 차이가 크지 않았다.

4. 결 론

지진동 저감시스템의 저감성능을 평가하기 위해 수행한 시험결과를 정리하면 다음과 같다.

- (1) 캐비넷 최상부의 가속도 응답 스펙트럼을 비교해 본 결과 최대응답이 나타나는 진동수가 지진동 저감장치를 설치하지 않은 경우 18 Hz, 설치한 경우 7.3 Hz로 이동하였고, 최대가속도는 2.35 g에서 1.84g로 22% 저감되었다.
- (2) 캐비넷 중앙부의 가속도 응답 스펙트럼을 비교해 본 결과 최대응답이 나타나는 진동수가 지진동 저감장치를 설치하지 않은 경우 16.5 Hz, 설치한 경우 7.0 Hz로 이동하였고, 최대가속도는 1.95 g에서 1.73g로 12% 저감되었다.
- (3) 캐비넷 높이별 최대 응답 변위는 지진동 저감장치를 설치하지 않은 경우에는 캐비넷 구조물의 거동이 상부로 갈수록 증폭되어 최상부점의 변위응답이 4.7mm로 가장 크고, 캐비넷 하부(5번)에서는 1.6mm로 가장 작게 나타났다.
지진동 저감장치를 설치한 경우에는 변위 응답이 저감되어 나타났고, 최상부층 변위 2.6mm, 하부변위 2.2mm로 캐비넷 위치에 따라서 차이가 크지 않았다.
- (4) 원전 제어캐비넷에 지진동 저감시스템을 설치한 결과 예상보다는 지진동 저감효과가 크지 않았는데 그 이유는 제어캐비넷과 액세스 플로어의 구조특성에 비해 사용한 지진동 저감장치의 강성이 커서 에너지 흡수효과가 크지 않은데 기인한 것으로 판단된다.
따라서, 보다 효율이 높은 지진동 저감을 위해서는 구조체의 특성에 맞는 적절한 저감장치의 선정 및 마찰진자장치, 댐퍼와의 혼용 등 최적설계가 필요한 것으로 판단된다.

감사의 글

본 논문은 과기부의 연구비 지원에 의해 수행되었으며, 면진장치를 제작해 주신 (주)KR에 감사드립니다.

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. Zayas V., Low, S.S. and Mahin, S.A., "The FPS Earthquake Resisting System, Experimental Report," Report No. UCB/EERC-87/01, Earthquake Engineering Research Center, University of California, Berkeley, CA., June, 1987.