

# 납삽입 적층고무 및 마찰진자형 면진장치 적용 구조물의 지진응답 해석

Seismic response analysis of the structures with lead rubber and friction pendulum isolation bearings

허영철\*  
Huh, Young-Cheol

김병현\*\*  
Kim, Byung-Hyun

김영중\*\*\*  
Kim, Young-Joong

문석준\*\*\*  
Moon, Seok-Jun

## ABSTRACT

In this study, a computer program was developed for the seismic response analysis of the structures with base isolation bearings. On a 6-story steel frame structure isolated by lead rubber bearings and friction pendulum bearings, seismic response analyses using the developed program and commercial program and experiments were carried out. The results were compared one another and discussed.

## 1 서론

일반적으로 면진장치는 구조물의 기본 고유주기를 장주기로 변화시킴과 동시에 자체의 감쇠특성으로 지진파에 의한 상부구조물의 가속도와 변위를 감소하는데 유용한 것으로 잘 알려져 있다. 국내에서도 지진피해에 대한 관심이 증대하면서 면진장치들을 구조물에 적용하려는 시도와 함께, 면진장치를 적용하였을 때 구조물의 지진응답 특성을 파악하기 위한 해석[1,2]에 관한 여러 가지 연구가 이루어지고 있다. 면진장치를 적용한 구조물의 지진응답 해석에서는 면진장치의 비선형현상을 고려할 수 있는 면진장치의 적절한 수학적 모델링 방법과 이를 효율적으로 상부구조물과 연성시킨 해석 방법이 요구된다. 면진장치는 그 종류에 따라 비선형현상이 복잡하고 다양하므로 면진장치의 수학적 모델링의 적절성 및 연성 구조응답해석 방법의 타당성을 검토하기 위해서는 해석 방법과 실험 연구가 병행하여 수행되고 비교 평가할 필요가 있다. 현재까지 면진장치를 적용한 구조물의 지진응답 해석에 관한 국내연구는 효율적 수치해석 방법에 관한 연구[3]가 주로 이루어져왔으며 구조물에 적용한 실험 결과와의 비교평가에 관한 연구는 그리 많지 않다.

본 연구에서는 면진장치 적용 구조물의 지진응답 해석방법 및 실험 평가 연구를 수행하였다. 먼저, 비선형 시간이력 지진응답해석 프로그램인 NL-BISA(Non-Linear Base Isolator System Analysis)를 개발하였으며, 이를 이용하여 6층 프레임 철구조물을 대상으로 납삽입 적층고무 면진장치(Lead Rubber Bearing)와 마찰진자형 면진장치(Friction Pendulum System)를 적용하였을 경우에 대한 지진응답해석을 수행하였다. 그리고, 납삽입 적층고무 면진장치에 대한 특성실험과 함께 진동대를 이용한 납삽입 적층고무 면진장치 적용 구조물의 지진실험을 수행하고 해석 결과와 비교 평가하였다. 또한, 상용프로그램인 SAP2000에 의한 해석도 수행하여 그 결과를 비교평가 하였다. 마찰진자형 면진장치를 적용한 경우에 대해서는 상용프로그램인 SAP2000에 의한 해석 결과와 비교평가 하였다.

\* 한국기계연구원 구조시스템연구부 진동연구그룹, 선임연구원  
\*\* 한국기계연구원 구조시스템연구부 진동연구그룹, 책임연구원, 정회원  
\*\*\* 한국기계연구원 구조시스템연구부 진동연구그룹, 선임연구원, 정회원

## 2. 지진응답 해석 프로그램의 개발

### 2.1 비선형 면진장치의 수학적 모델

Bilinear 특성을 갖는 면진장치의 히스테리시스 특성을 표현하기 위한 수학 모델식은 Wen[4]이 제안한 1축 방향에 대한 모델 이후 지속적인 확장 연구가 이루어져 현재 2축 방향에 대해서는 Park et al.[5]의 모델 및 Nagarajaiah et al.[6]의 모델이 제안되어 있다. 비선형 면진장치가 결합된 구조물의 시간이력해석에 유용한 프로그램인 3D-Basis[7]와 SAP2000[8]등에서도 이러한 수학적 모델을 기본으로 다양한 면진장치들의 비선형 특성을 고려하고 있다.

이러한 수학적 모델식에서는 매개변수(parameter)를 이용하여 다양한 하중-변위의 비선형 거동을 예측할 수 있는데 이 중 대표적으로 납삽입 적층고무 면진장치와 마찰진자형 면진장치의 히스테리시스 특성에 적합한 수학 모델식[6]은 다음과 같다.

$$\begin{bmatrix} z_x Y \\ z_y Y \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} A \dot{u}_x \\ A \dot{u}_y \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} z_x^2 [\gamma \text{sign}(\dot{u}_x z_x) + \beta] & z_x z_y [\gamma \text{sign}(\dot{u}_y z_y) + \beta] \\ z_x z_y [\gamma \text{sign}(\dot{u}_x z_x) + \beta] & z_y^2 [\gamma \text{sign}(\dot{u}_y z_y) + \beta] \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \dot{u}_x \\ \dot{u}_y \end{bmatrix} \quad (1)$$

여기서,  $z_x, z_y$ 는 x,y 방향의 무차원 히스테리 변수 ( $|z| \leq 1$ )

$\dot{u}_x, \dot{u}_y$ 는 면진장치 적용위치에서 구조물의 x,y 방향 속도

$A, \gamma, \beta$ 는 히스테리 곡선의 형상을 결정하는 상수

$Y$ 는 항복변위

(1)식의 해로부터 bilinear 특성을 갖는 납삽입 적층고무 면진장치의 하중-변위 비선형 관계식은

$$\begin{aligned} F_x &= a \frac{F_y}{Y} u_x + (1-a) F_y z_x \\ F_y &= a \frac{F_x}{Y} u_y + (1-a) F_x z_y \end{aligned} \quad (2)$$

여기서,  $a$ 는 납의 항복 전/후의 강성 비

$F_y$ 는 납의 항복하중

로 계산되며 마찰진자형 면진장치의 경우 받침부분의 변위가 미소변위라는 가정 하에

$$\begin{aligned} F_x &= N \frac{u_x}{R} + \mu N z_x \\ F_y &= N \frac{u_y}{R} + \mu N z_y \end{aligned} \quad (3)$$

여기서,  $N$ 은 마찰면에 수직인 힘

$R$ 은 면진장치의 곡률반경

$\mu$ 는 마찰계수

로 계산할 수 있다.

### 2.2 상부구조물의 시간이력해석

상부구조물이 선형시스템이란 가정하에 적용되는 면진장치에 의한 비선형력을 외력으로 간주하면 시간이력해석 시 모드중첩법을 사용할 수 있어 효율적이다. 이 때, 전체 계의 운동방정식은 다음과 같이 쓸 수 있다.

$$M \ddot{u}(t) + C \dot{u}(t) + K u(t) + K_{eq} u(t) + r_N(t) = r(t) + K_{eq} u(t) \quad (4)$$

여기서,  $M, C, K$ 는 구조물의 질량, 감쇠, 강성행렬

$u(t)$ 는 지반에 대한 구조물 절점에서의 상대 변위

$r(t)$ 는 풍 및 지반가속도를 포함하는 외력

$r_N(t)$ 는 면진장치에 의한 비선형 외력

$K_{eq}$ 는 등가 강성행렬

여기서,  $K_{eq}$ 는 면진장치에 의한 비선형력을 외력으로 치환하므로써 전체 계가 semidefinite system 이 되는 것을 방지하기 위하여 사용한 면진장치의 등가 강성행렬이다. 정규화된 고유벡터를 이용하여 모달좌표계로 변환된 전체시스템의 운동방정식은 다음 식과 같다.

$$\ddot{y}(t) + \Lambda \dot{y}(t) + \Omega^2 y(t) = \Phi^T r(t) - \Phi^T r_N(t) + \Phi^T K_{eq} y(t) \quad (5)$$

여기서,  $\Lambda = \Phi^T M \Phi$ ,  $\Omega^2 = \Phi^T [K + K_{eq}] \Phi$

한편, 마찰진자형 면진장치의 경우 마찰계수  $\mu$ 는 그 값이 속도에 따라 달라지게 되며 Constantinou[9]가 제안한 마찰계수에 관한 식은 다음과 같다.

$$\mu = \mu_f - (\mu_f - \mu_s) \exp^{-rate \cdot u} \quad (6)$$

여기서,  $\mu_f$ 는 운동마찰계수,  $\mu_s$ 는 정지 마찰계수,

$rate$ 는 곡선기울기의 상수,  $u$ 는 미끄러짐 속도

상기의 해석방법을 사용한 지진응답 해석용 프로그램인 NL-BISA(Non-Linear Base Isolator System Analysis)를 개발하였다. 모달좌표계에서 n-개의 독립미분 방정식의 시간적분을 위해 Constant-Average-Acceleration Method[10]를 이용하였으며 Runge-Kutta-Fehlberg Method[10]를 사용하여 면진장치의 비선형력을 계산하였다. 일반적으로 지진하중으로 널리 사용하는 지반가속도 데이터의 경우 시간 간격이 비교적 크므로 면진장치의 비선형력을 계산하는 과정에서 수치적 발산문제가 발생할 수 있다. 따라서, 이 경우 시간증분의 크기를 제어하면서 비교적 빠른 수렴성을 갖는 Runge-Kutta-Fehlberg 기법을 사용하여 수치적 발산문제를 방지하였다.

현 단계의 프로그램에서는 구조물의 over-turning 모멘트에 의한 면진장치 지지점에서의 수직하중 변화는 고려하지 않았다.

### 3. 6층 프레임 구조물의 지진응답 해석 및 실험

#### 3.1 6층 프레임 구조물

지진응답 실험 및 해석 대상 구조물은 6층 프레임 구조물로서, 각 층마다 4개의 기둥과 직사각형의 후판으로 구성된 철구조물이다. 각 층간의 높이는 500mm, 전체 높이는 약 3,500mm이며 가로×세로는 2,100mm×1,200mm, 구조물의 총 중량은 8 ton이다. 구조물의 외관을 그림 1에 보였다.

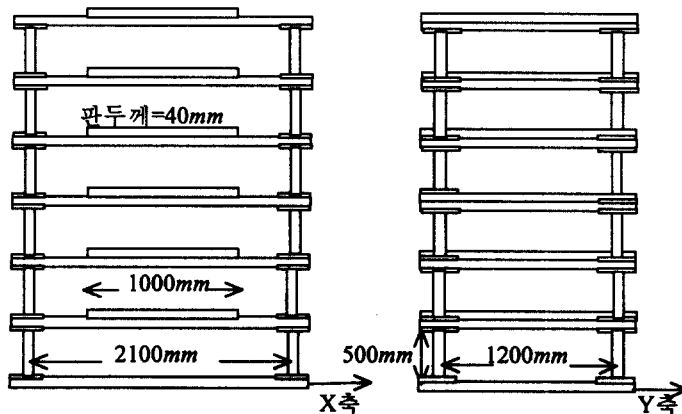


그림 1 6층 프레임 구조물의 외관

### 3.2 해석 모델

개발한 NL-BISA 프로그램을 사용한 해석에서는 그림 2와 같이 6층 프레임 구조물을 7자유도의 집중질량계로 모델링하였다. 비교 목적으로 수행한 SAP2000 프로그램 해석에서는 구조물을 3차원 유한요소로 모델링하였다. 사용된 구조모델의 타당성을 검토하기 위하여 구조물 기초가 고정 지지된 조건에서 고유진동수를 계산하고, 진동대를 이용하여 0.0067g(RMS) 크기의 단일방향의 랜덤하중 실험을 통해 얻은 고유진동수와 비교하였다. 고유진동수의 실험 및 계산결과는 표 1과 같다.

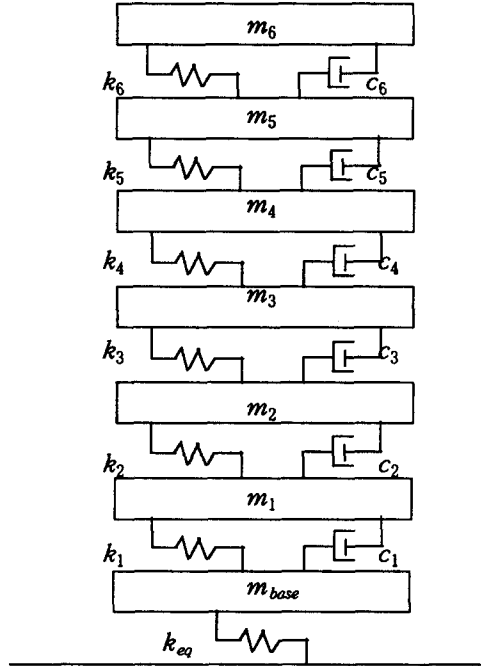


그림 2 NL-BISA 해석에 사용된 대상 구조물 해석모델

표 1 고정지지 조건에서 구조물의 고유주기

모드 차수	고유주기(sec)		
	NL-BISA(6dof)	SAP2000 (3-Dim.)	Experiment
1	0.3937	0.4016	0.4167
2	0.1340	0.1362	0.1389
3	0.0837	0.0845	0.0826
4	0.0636	0.0640	0.0621
5	0.0538	0.0540	-
6	0.0491	0.0492	-

### 3.3 납삽입 적층고무 면진장치의 동특성 실험

납삽입 적층고무 면진장치의 동특성 실험을 위해 수직하중과 수평하중을 동시에 제어할 수 있는 이축 방향 실험을 수행하였다. 일정하게 유지되는 8, 14, 20kN의 수직하중에 대해 수평방향으로 각각  $\pm 38$  mm의 변위를 가하면서 수평방향 전단력을 계측하였다.

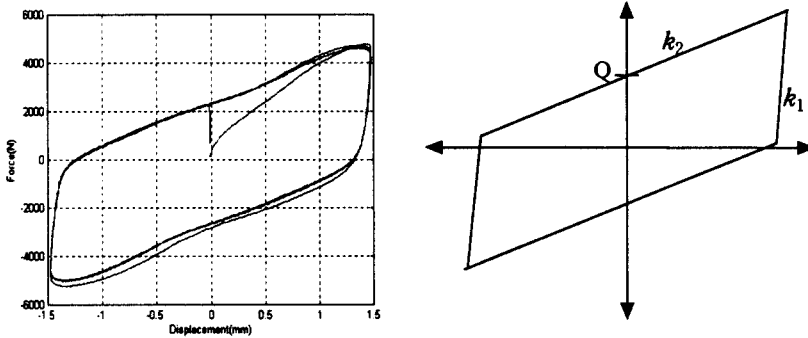


그림 3 납삽입 적층고무 면진장치의 하중-변위 곡선 특성실험 결과

항복 후 강성  $k_2$ 를 결정하기 위해 비교적 선형적 특성을 보이는 수평변위 15.2mm의 실험결과를 사용하였는데, 이 때의 수직하중은 20kN이다. 이에 대한 하중-변위곡선을 그림 3에 보였다. 납삽입 적층고무 면진장치의 특성실험 결과로부터 얻어진 특성치들은 표 2와 같고, 항복 후 강성  $k_2$ 와 실험대상 구조물의 총중량 8ton에 의해 예상할 수 있는 대상 구조물의 대표적인 면진 고유주기는 0.628 sec이다.

표 2 실험용 납삽입 적층고무 면진장치의 특성치

특성 항목	특성치
초기강성 $k_1$	200 N/mm
항복 후 강성 $k_2$	6400 N/mm
강성비 $\alpha$	0.0313
절편하중 Q	2,500 N
항복변위 Y	0.44 mm

### 3.4 납삽입 적층고무 면진장치를 적용한 6층 프레임 구조물의 지진응답 실험 및 해석

실험은 한국기계연구원에서 보유하고 있는 유압식 진동대를 이용하였으며, 각 층의 가속도 응답과 면진장치들의 전단력을 계측하기 위하여 6개의 가속도 센서와 4개의 로드셀을 설치하였다. 한편, 구조물의 응답해석을 위한 지반가속도로 사용하기 위하여 진동대의 수평 양방향으로 2개의 가속도 센서를 설치하였다. 계측되는 시간이력 데이터는 A/D board와 LabView로 취득하였고, 이때 샘플링 주파수는 150 Hz로 정하였다. 납삽입 적층고무 면진장치를 설치한 그림 1의 6층 프레임 구조물에 0.8g(PGA) 크기로 단일방향(X방향)의 taft 지진하중 실험을 수행하고 최상층의 가속도 응답, base의 변위응답 및 면진장치 전단력을 계측하였다. 이 때 가해진 진동대 가속도의 시간이력은 그림 5에 보였다. 지진응답 해석에서는 구조물의 강체거동을 포함한 총 7개의 모드를 사용하였으며, 상부구조물의 감쇠계수는 모든 모드에서 일정하게 5%의 모달감쇠 계수[7]를 적용하였다.

면진장치의 특성치는 동특성 실험결과로부터 얻은 표 2의 값을 사용하였고, 식 (1)의 특성상수 값 으로는  $A=1.0$ ,  $\gamma=\beta=0.5$ 를 사용하였다. 시간이력 계산에서 시간증분은 7번째 모드의 고유주기를 고려하여  $\Delta t=1/150$  sec로 하였고 6.7 sec까지 계산을 수행하였다.

NL-BISA에 의한 최상층 위치의 가속도응답, base 위치의 변위응답 및 면진장치의 하중-변위 곡선의 계산결과를 실험결과 및 SAP2000에 의한 계산결과와 비교하여 그림 5~7에 보였다. 최상층 위치에서 계산된 가속도 응답의 경우 NL-BISA에 의한 결과는 SAP2000에 의한 결과와 잘 일치한다. 실험결과와도 비교적 잘 일치함을 볼 수 있는데 특히 응답주파수 특성의 경향은 매우 유사하다. 반면에 1.5 ~ 3.0 sec의 초기영역과 5.5 sec이후의 후기영역에서 일부 피크값들의 계산결과가 실험결과에 비해 약간 큰데, 이는 구조물 감쇠계수 차이에 의한 영향일 것으로 판단되며 적절한 감쇠계수의 산정은 추후에 논의되어야 할 것으로 본다. 면진장치에서 계산된 변위응답의 경우 NL-BISA의 결과와 SAP2000의 결과는 비교적 일치하며, 다소의 차이는 상부구조물 및 면진장치의 모델링 차이에 의한 것으로 보인다. 한편, 실험결과와 계산결과는 유사한 응답특성을 보여주고 있으나 일부 피크값에서 다소 차이를 볼 수 있다. 그림 8에서 볼수 있듯이 실험에서는 해석의 경우와는 달리 작은 변위와 큰 변위에서의 항복하중이 다르게 나타남을 알 수 있으며, 이 현상에 대한 평가는 향후 좀더 자세한 실험을 통한 재확인 분석이 필요하다.

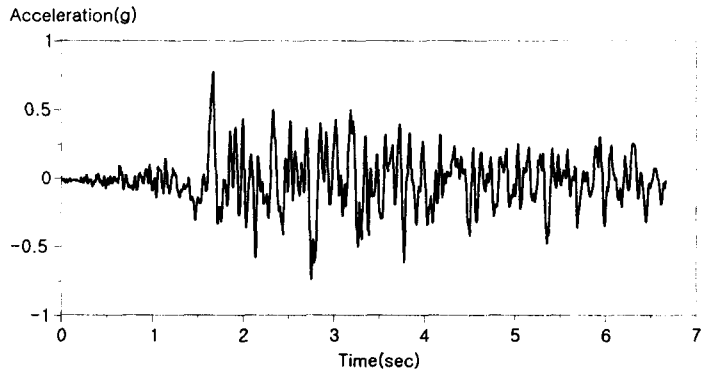


그림 4 대상 구조물에 적용된 0.8g(PGA) 크기의 시간이력곡선

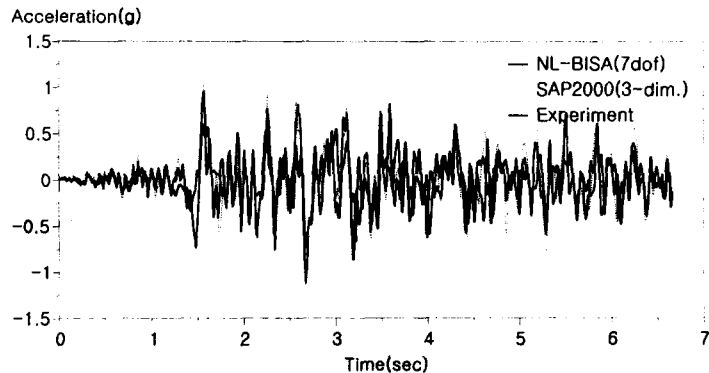


그림 5 납삽입 적층고무 면진장치 적용 시 최상층 위치에서 가속도 응답의 실험 및 해석결과의 비교(단일방향의 taft 지진하중 0.8g)

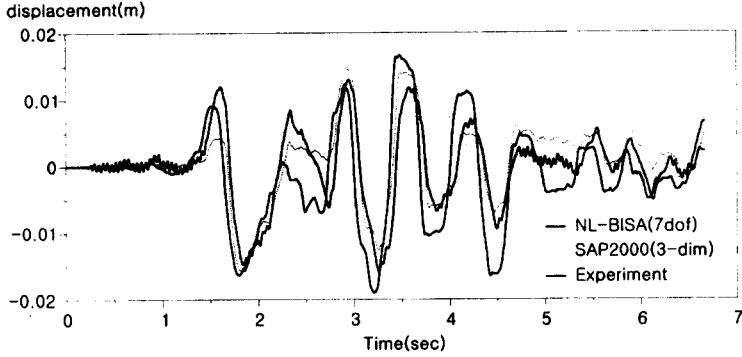


그림 6 납삼입 적층고무 면진장치 적용 시 base 위치에서 변위 응답의 실험 및 해석결과의 비교(단일방향의 taft 지진하중 0.8g)

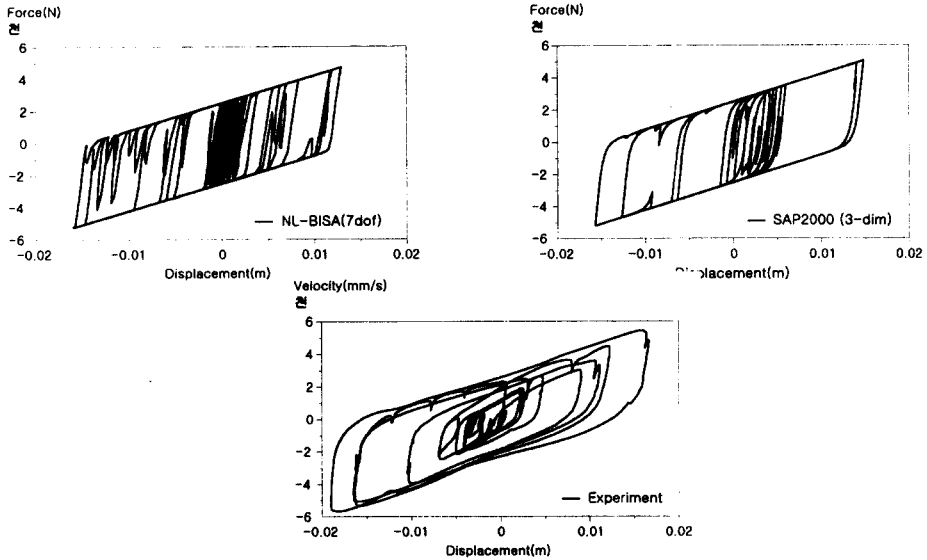


그림 7 납삼입 적층고무 면진장치 하중-변위의 실험 및 해석결과 비교(단일방향 taft 지진하중 0.8g)

### 3.5 마찰진자형 면진장치 적용 6층 프레임 구조물의 지진응답 해석

3.4절의 납삼입 적층고무 면진장치의 경우와 동일한 조건으로 마찰진자형 면진장치를 6층 프레임 구조물에 적용하였을 경우에 대해 NL-BISA에 의한 지진응답해석을 수행하였다. 마찰계수의 값은 0.15로 일정한 것으로 가정하였고, 마찰진자의 곡률반경은 159mm로 정하였다.

최상층 위치의 가속도응답, base 위치의 변위응답 그리고, 면진장치의 하중-변위 곡선의 계산결과를 SAP2000에 의한 계산결과와 비교하여 그림 8~10에 보였다. 그림에서 보듯이 두 계산결과는 정성적으로는 같은 경향이나, 정량적으로는 약간의 차이를 보이고 있다. 이는 두 방법의 수치해법의 차이에서 발생하는 것으로 추정되나, 구체적인 규명을 위해서는 실험을 통한 비교 평가가 추가적으로 필요하다고 판단된다. 현재, 이를 위한 실험연구가 수행 중에 있다.

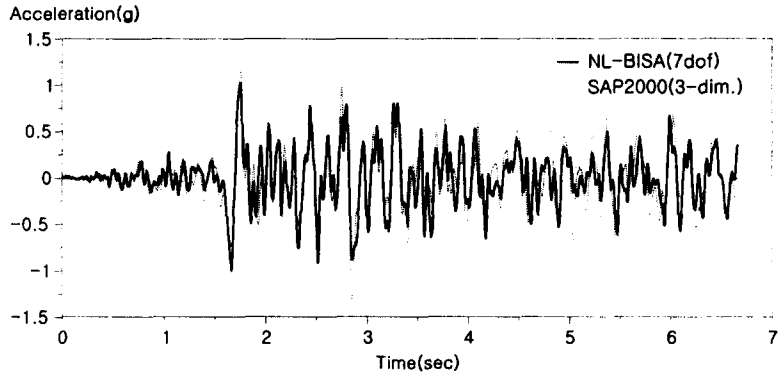


그림 8 마찰진자형 면진장치 적용 시 최상층 위치에서 가속도 응답의 실험 및 해석 결과 비교(단일방향의 taft 지진하중 0.8g)

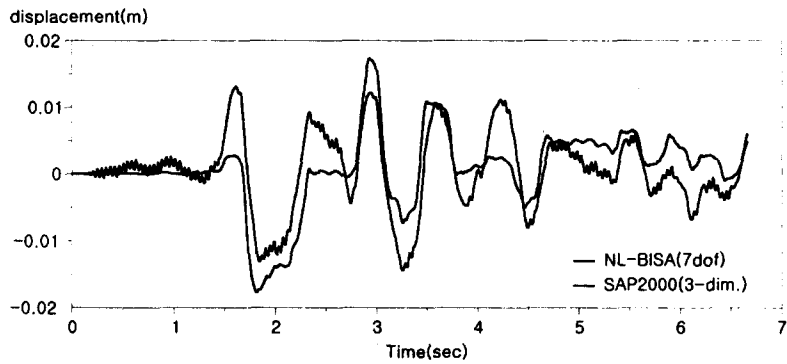


그림 9 마찰진자형 면진장치 적용 시 base위치에서 변위 응답의 실험 및 해석결과 비교(단일방향의 taft 지진하중 0.8g)

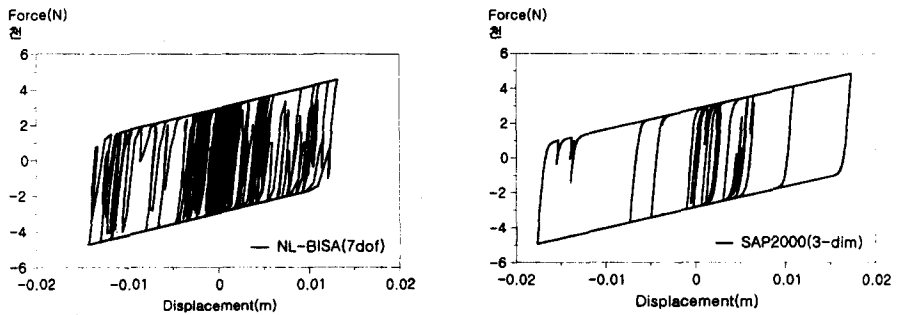


그림 10 마찰형 면진장치 하중-변위 곡선의 실험 및 해석결과 비교(단일방향의 taft 지진하중 0.8g)



#### 4. 결 론

본 연구를 통하여 얻어진 결론은 다음과 같다.

- 실험과 상용 프로그램의 결과와의 비교 평가를 통하여 개발한 NL-BISA 프로그램의 해석정도를 검증하였으며, 면진장치를 적용한 구조물의 지진응답 해석에 유용하게 활용될 수 있음을 확인하였다.
- 식 (1)~(3)을 사용하여 적절하게 면진장치를 수학적으로 모델링할 수 있으며, 유용한 결과를 얻을 수 있다. 그러나, 복잡하고 다양한 면진장치의 특성을 잘 구현할 수 있는 모델링 기법에 대해 좀 더 보완할 여지가 있으며, 이를 위해서 보다 많은 실험적 연구가 필요가 있다고 판단한다.
- 개발 프로그램 NL-BISA는 본 연구에서 검토된 내용과 마찰진자형 면진장치 적용 구조물의 실험 연구와 비교 검토 내용을 반영하여 일부 보완하고, 면진장치의 최적 특성 선정 및 배치 연구에 활용할 수 있도록 확장 연구를 수행할 계획이다.

#### 후기

본 연구는 과학기술부의 지원하에 국가지정연구실 사업으로 수행 중인 “제진장치를 활용한 제진 설계기술 개발”과제의 일환으로 수행되었다.

#### 참고 문헌

1. 김 대곤, 이 상훈, 안 재현, 박 칠립(1998), “면진 장치 적용 전, 후의 철골조의 내진성능 평가”, 한국지진공학회 논문집, 제 2권 제 1호.
2. 이 철희, 구 봉근, 전 규식, 이 병진(1999), “납-면진받침을 이용한 교량의 면진설계”, 한국지진공학회 춘계학술 발표회 논문집, 제 3권 제 1호.
3. 구 경희, 이 형연, 유 봉(1998), “면진용 고감쇠 적응고무베어링의 성능특성 실험 및 비선형 거동해석”, 한국지진공학회 논문집, 제 2권 제 4호.
4. Y.K. Wen(1976), "Method for Random Vibration of Hysteretic Systems", Journal of the Engineering Mechanics Division, Vol.102, No.EM2.
5. Y.J. Park , Y.K. Wen, and A-H-S. Ang(1986), "Random Vibration of Hysteretic Systems Under Bi-Directional Ground Motions", Earthquake Engineering and Structural Dynamics, Vol.14.
6. S. Nagarajaiah, A.M. Reinhorn and M.C. Constantinou(1991), "Non-linear Dynamic Analysis of 3-D-Base-Isolated Structures", Journal of Structural Engineering, Vol.117.
7. A.M. Reinhorn, et al.(1994), "3D-BASIS-TABS:Version 2.0 Computer Program for Nonlinear Dynamic Analysis of Three Dimensional Base Isolated Structures", Technical Report, No. NCEER-94-0018, NCEER, State University of New York at Buffalo.
8. SAP2000 Analysis Reference(1998), Computers and Structures Inc., University of California at Berkeley.
9. M.C. Constantinou, et al.(1993), "Experimental and Analytical Study of a Friction Pendulum System(FPS)", Technical Report, No. NCEER-93-0020, NCEER, State University of New York at Buffalo.
10. J.H. Mathews, K.D. Fink(1999), "Numerical Methods Using MATLAB", Prentice Hall International Inc., U.S.A.