

〈論 文〉

## 수정히스테리틱 Bi-Linear 면진베어링 모델을 사용한 지진응답감소

구경회\* · 이재한\* · 김증범\* · 이형연\* · 유 봉\*

(1995년 5월 19일 접수)

### Reduction of the Seismic Responses by Using the Modified Hysteretic Bi-Linear Model of the Seismic Isolator

G. H. Koo, J. H. Lee, J. B. Kim, H. Y. Lee and B. Yoo

**Key Words :** Seismic Isolator(면진베어링), Hardening Effects(경화효과), Seismic Isolated System(면진시스템)

#### Abstract

In general, seismic isolators which are made of laminated rubber and shim plate have characteristics of complex hysteretic behavior. When shear deformation of the seismic isolator is small, the isolator has simple hysteretic almost bi-linear behavior. But on large shear deformation hardening effects may occur. This paper proposes a modeling method of the seismic isolator with modified hysteretic bi-linear model which can consider the hardening effects. From the results of the seismic analyses of the isolated system it is shown that the responses are significantly reduced compared with those of the non-isolated system. The modified hysteretic bi-linear model of the isolator gives larger ZPA(zero period acceleration) than those of the simple hysteretic bi-linear model and the equivalent spring-damper model.

#### 기 호 설 명

<p><math>[C]</math> : 감쇠행렬</p> <p><math>C_{eq}</math> : 면진베어링 등가점성 감쇠값</p> <p><math>D, D_n</math> : 상수</p> <p><math>\{D\}_{iso}</math> : 면진베어링 절점의 상수벡터</p> <p><math>F_{iso}, F_n</math> : 면진베어링 복원력</p> <p><math>[K]</math> : 질량행렬</p> <p><math>K_{eq}</math> : 면진베어링 등가스프링강성</p> <p><math>K_1</math> : 히스테리틱 Bi-linear 면진베어링 모델의     펼쳐곡선 스프링강성</p> <p><math>K_0</math> : 히스테리틱 Bi-linear 면진베어링 모델의     이력곡선 스프링강성</p>	<p><math>[M]</math> : 질량행렬</p> <p><math>M_{con}</math> : 응축된 질량행렬</p> <p><math>S, S_m</math> : 면진베어링 변형량</p> <p><math>U_a</math> : Master 자유도</p> <p><math>U_c</math> : Slave 자유도</p> <p><math>W_D</math> : 면진베어링 히스테리틱 모델의 내부면적</p> <p><math>x_{abs}, \dot{x}_{abs}, \ddot{x}_r</math> : 절대변위, 속도, 가속도응답</p> <p><math>\dot{x}_b</math> : 입력 지진가속도</p> <p><math>x_r, \dot{x}_r, \ddot{x}_r</math> : 상대변위, 속도, 가속도응답</p> <p><math>X_{shift}</math> : 복원력-변위 원점좌표의 변위축 이동량</p> <p><math>y_r, \dot{y}_r</math> : 치환된 상대변위, 속도벡터</p> <p><math>\xi_{eq}</math> : 면진베어링 등가점성 감쇠비</p> <p><math>\gamma</math> : 면진베어링의 변형률</p>
--	--

\*회원, 한국원자력연구소

## 1. 서 론

원자력발전소에 대한 주요기기 및 계통설계시에 지진하중은 매우 중요한 설계하중으로 작용하며 대부분의 설계여유도를 좌우하게 된다. 본 논문에서는 지진하중에 대한 주요기기 및 계통설계하중을 원천적으로 줄일 수 있는 고감쇠 면진베어링을 사용한 지진응답 감소방안을 연구하고자 한다. 이러한 면진베어링을 사용한 지진응답 감소연구는 최근까지 활발하게 진행되고 있다.<sup>(1-4)</sup>

고감쇠 면진베어링은 복원력과 변위의 관계가 복잡한 히스테리틱 특성을 나타내며 이러한 면진베어링의 특성을 수학적으로 모델링하는 방법에는 여러 가지가 있다.<sup>(5,6)</sup>

본 연구에서는 단순히스테리틱 Bi-linear 모델을 수정하여 대변형에서의 경화특성을 모델링할 수 있는 수정히스테리틱 Bi-linear 모델을 제시하였다. 실제로 적층고무를 사용한 면진베어링은 변형량이 작은 경우에는 단순히스테리틱 거동을 나타내지만 변형량이 증가함에 따라서 경화특성이 크게 나타날 수 있다. 이러한 경우 면진베어링에 대한 강성평가는 변형구간마다 달리 평가되어야 한다.

지진응답을 구하기 위한 수치해석 알고리즘은 비교적 해의 정확성을 보장할 수 있는 Runge-Kutta 방법을 사용하였으며 해석시간의 단축을 위하여 이산시스템에 대한 응축기법(condensation technique)을 적용하였다.

본 연구에서는 면진베어링의 경화특성이 지진응답에 미치는 영향을 분석하고 면진시스템의 지진감소 정도를 비면진 시스템의 경우와 비교함으로써 면진효율을 분석하고자 한다. 또한 본 연구에서는 단순히스테리틱 Bi-linear 모델을 사용한 면진베어링의 응답해석결과로부터 등가선형 모델을 구하여 각각의 모델을 이용한 해석결과로부터 지진응답 특성을 비교분석함으로써 면진베어링의 등가선형 모델에 대한 가능성을 검토하고자 한다.

## 2. 본 론

### 2.1 Runge-Kutta 방법을 이용한 지진해석 공식화

지진하중에 대한 일반적인 운동방정식은 질량, 감쇠 그리고 강성행렬을 이용한 이산화된 형태로

다음과 같은 수식으로 나타낼 수 있다.

$$[M]\{\ddot{x}_r\} + [C]\{\dot{x}_r\} + [K]\{x_r\} = -[M]\{\ddot{x}_b\} \quad (1)$$

여기서,  $x_r$ 은 지진에 대한 상대응답 변위벡터를 나타낸 것이며,  $\ddot{x}_b$  = 입력지진가속도를 나타낸다. Runge-Kutta 방법을 적용하기 위하여 위의 2차 미분방정식 (1)을 1차 미분방정식의 형태로 변환하는 것이 필요한데, 이를 위해 변위 및 속도벡터를 다음과 같이 치환하고,

$$y_r = \begin{Bmatrix} x_r \\ \dot{x}_r \end{Bmatrix} \quad (2)$$

$$\dot{y}_r = \begin{Bmatrix} \dot{x}_r \\ \ddot{x}_r \end{Bmatrix} \quad (3)$$

가속도벡터  $\ddot{x}_r$ 를 식 (1)로부터 다음과 같이 표현하면,

$$\begin{aligned} \{\ddot{x}_r\} &= -[M]^{-1}[K]\{x_r\} - [M]^{-1}[C]\{\dot{x}_r\} \\ &\quad - [M]^{-1}[M]\{\ddot{x}_b\} \end{aligned} \quad (4)$$

식 (1)의 2차 미분방정식이  $n \times n$  행렬일 경우 치환된 1차 미분방정식은  $2n \times 2n$  행렬의 형태로 다음과 같이 표현될 수 있다.

$$\{\dot{y}_r\} = \begin{bmatrix} 0 & I \\ -[M]^{-1}[K] & -[M]^{-1}[C] \end{bmatrix} \{y_r\} + \begin{Bmatrix} 0 \\ -\{\ddot{x}_b\} \end{Bmatrix} \quad (5)$$

식 (5)로부터 구한 응답은 지진에 대한 상대적인 값이며, 절대응답은

$$x_{abs} = x_r + x_b \quad (6)$$

$$\dot{x}_{abs} = \dot{x}_r + \dot{x}_b \quad (7)$$

$$\ddot{x}_{abs} = \ddot{x}_r + \ddot{x}_b \quad (8)$$

로부터 구할 수 있다.

Runge-Kutta 방법은 전반적으로 다른 직접적분법에 비하여 비교적 정확한 해를 구할 수 있으나 상태방정식이 높은 고유진동수를 포함할 경우에는 매우 많은 해석시간이 요구되는 단점을 가지고 있다. 따라서 이러한 단점을 해결하기 위해서는 불필요한 자유도는 제거하여 전체 상태방정식의 고유진동수를 적절한 수준으로 유지할 필요가 있다. 이를 위하여 강성 및 질량행렬에 대한 응축기법(condensation technique)을 이용할 수가 있다. 먼저 강성행렬에 대한 응축은 고려하고자 하는 강성행렬과 요소의 변위와 힘벡터를 다음과 같이 분리한다.

$$\begin{bmatrix} K_{aa} & K_{ac} \\ K_{ca} & K_{cc} \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} U_a \\ U_c \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} R_a \\ R_c \end{Bmatrix} \quad (9)$$

여기서,  $U_a$ 와  $U_c$ 는 고려하고자 하는 변위벡터와 제거하고자 하는 변위벡터를 각각 나타낸다. 식 (9)에서 제거하고자 하는 변위벡터는

$$U_c = K_{cc}^{-1}(R_c - K_{ca}U_a) \quad (10)$$

이다. 따라서 식 (10)을 식 (9)에 대입하면 다음과 같이 응축된 방정식을 얻을 수 있다.

$$(K_{aa} - K_{ac}K_{cc}^{-1}K_{ca})U_a = R_a - K_{ac}K_{cc}^{-1}R_c \quad (11)$$

다음으로 질량행렬을 응축하기 위해서는 에너지균형을 이용할 수 있다. 식 (11)에서 제거하고자 하는 자유도  $U_c$ 방향으로는 지진하중이 작용하지 않는다고 가정하고 집중질량 모델을 사용할 경우에는 대각선방향의 질량요소만 존재하므로 다음 식과 같이 간단히 응축된 질량행렬을 구할 수 있다.

$$M_{con} = M_{aa} + K_{ca}^T K_{cc}^{-1} M_{cc} K_{cc}^{-1} K_{ca} \quad (12)$$

## 2.2 면진베어링의 수정히스테리틱 Bi-linear 모델링

면진베어링에 대한 단순히스테리틱 Bi-linear 모델은 Fig. 1과 같이 면진베어링의 관성을 무시할 경우에 면진베어링에 작용하는 힘의 평형방정식으로 간단히 표현할 수가 있다. 면진베어링의 거동이 Fig. 1에서  $K_1$  곡선을 따라갈 경우에 면진베어링에 작용하는 복원력은

$$F_{iso} = K_1 x_r + D \quad (13)$$

과 같이 표현할 수 있으며  $K_0$  곡선을 따라갈 경우에는 복원력-변위 좌표의 원점 이동량  $X_{shift}$ 를 고

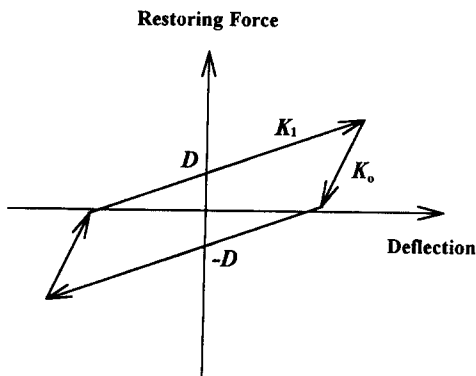


Fig. 1 Simple hysteretic bi-linear model of the seismic isolator

려하여 다음과 같이 표현할 수 있다.

$$F_{iso} = K_0(x_r - X_{shift}) \quad (14)$$

식 (13), (4)에서 면진베어링의 스프링계수는 골격곡선에 대한  $K_1$  또는 이력곡선에 대한  $K_0$ 의 값을 가지면  $D$ 는 상수로서  $\pm$ 값을 가진다. 이러한 면진베어링의 스프링계수 및 상수  $D$ 는 모두 실험으로부터 결정될 수 있다. 면진베어링의 감쇠성능은 먼저 골격곡선인  $K_1$ 과  $D$ 과 결정되면 이력곡선  $K_0$ 의 크기에 좌우되며 또한  $K_1$ 이 결정되면 상수  $D$ 값에 좌우된다. 그러나 면진베어링의 감쇠성능면에서 등가감쇠 성능이 동일하도록 면진베어링의 스프링계수와  $D$ 를 다양하게 결정할 수 있으나 이들 변수가 달라지면 구조물의 응답가속도가 크게 영향을 받을 수 있다. Fig. 2는 실제 직경 15 cm를 갖는 면진베어링에 대한 특성 시험결과를 나타낸 것으로 전체 적층고무두께 (3.48 cm)의 100, 200, 300% 변형량에 대하여 반복변위를 주었을 때 나타난 복원력-변위 특성곡선을 나타낸 것이다. 그림에서와 같이 변형량이 증가함에 따라서 경화현상이 크게 발생함을 알 수가 있다. 따라서 식 (13)과 같은 단순히스테리틱 Bi-linear 모델에서의 골격곡선인 Fig. 1의  $K_1$  값만으로는 면진베어링의 경화특성을 나타내기가 곤란하다. 본 연구에서는 대변형시의 경화특성을 고려하기 위하여 Fig. 3과 같은 수정히스테리틱 Bi-linear 모델을 사용하고자 한다. Fig. 3에서 각 변형구간에서의 복원력 식은 다음과 같이 나타낼

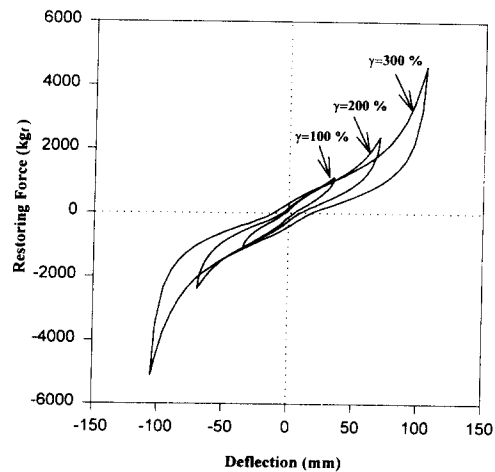


Fig. 2 Test results of the force-deflection characteristics of the seismic isolator ( $D_0=15$  cm, total rubber thickness=3.48 cm)

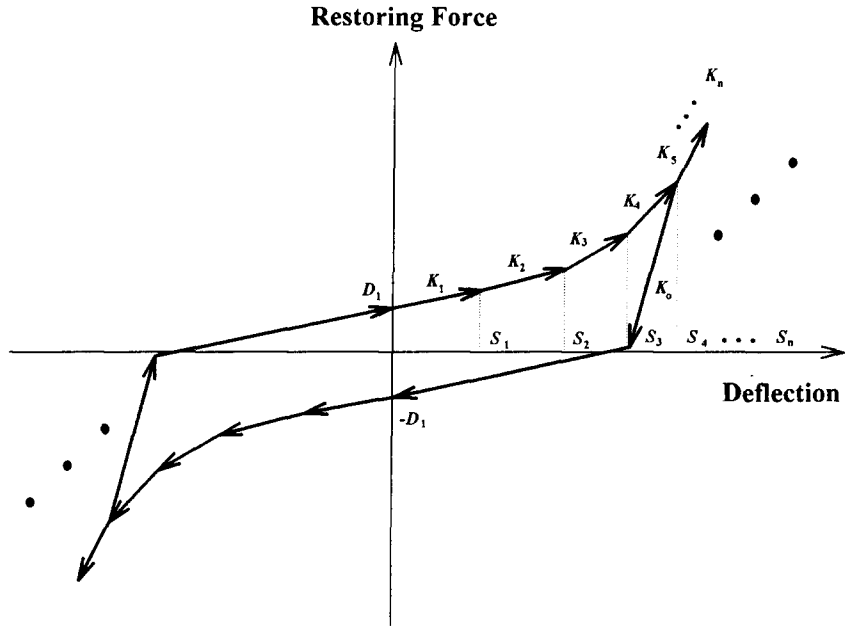


Fig. 3 Modified hysteretic bi-linear model of the seismic isolator

수가 있다.

$$F_n = K_n x_r + D_n \quad (15)$$

여기서, 각 구간에서의 상수  $D_n$ 은 다음과 같이 구할 수가 있다.

$$D_n = \sum_{m=1}^{n-1} S_m (K_m - K_{m+1}) + D_1 \quad (16)$$

식 (16)에서  $S_m$ 은 면진베어링 모델에서  $m$ 번째 경화현상이 발생하는 곳의 변형량을 나타낸다.

식 (15)를 식 (1)에 적용한 다음, 상수  $D_n$ 을 우변으로 이항하여 Runge-Kutta 수치해석 알고리즘을 적용하기 위한 1차 미분방정식 형태로 나타내면 다음과 같다.

$$\begin{aligned} \{\dot{y}_r\} = & \begin{bmatrix} 0 & I \\ -[M]^{-1}[K] & -[M]^{-1}[C] \end{bmatrix} \{y_r\} \\ & + \left\{ \begin{array}{c} 0 \\ -[M]^{-1}[M] - \{\ddot{x}_b\} - \{P\}_{iso} \end{array} \right\} \quad (17) \end{aligned}$$

식 (17)에서 벡터  $\{P\}_{iso}$ 는 면진베어링이 위치하는 절점의 자유도에서  $D$  또는  $K_0 X_{shift}$  값을 가지며 이러한 면진베어링의 특성치는 이전 시간 면진베어링의 상대변위와 현재의 상대변위에 의하여 결정된다.

### 2.3 적용 예

면진베어링을 이용한 지진응답 감소의 예로서 Fig. 4와 같은 집중질량-스프링모델을 선정하였다. Fig. 4는 전형적인 경우로 원자력발전소의 해석모델을 나타낸 것으로 절점 1에서 절점 10까지는 원

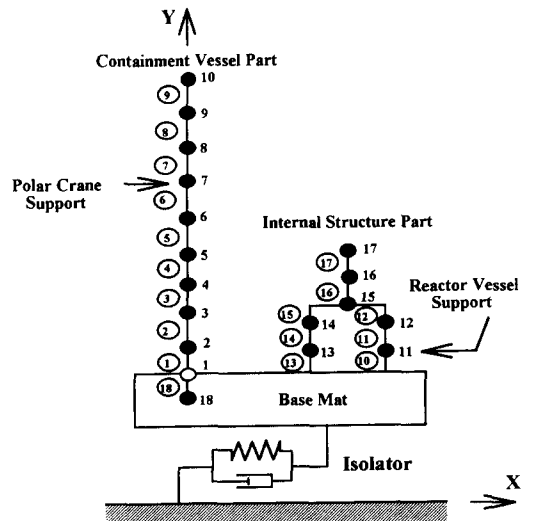


Fig. 4 Analysis model of the isolated system

자로 격납용기를 모델화한 것이며 절점 11에서 17까지는 원자로 내부 구조물을 모델화한 것이다. 절점 18은 원자로 격납용기의 하부 base mat을 나타낸 것이다. 상부구조물 감쇠모델과 관련하여서는 모든 모드에 대하여 5% 점성감쇠를 갖는 것으로 가정하였다. 해석에 사용된 지진가속도 시간이력은 1940 El Centrol(NS)를 사용하였으며 해석에 사용된 시간은 40초이다.

면진시스템은 0.6 Hz의 면진주파수를 갖는 것으로 설계하였으며 면진베어링에 대한 모델로서 면진

베어링은 2번의 경화단계계를 갖는 것으로 가정하였다. 따라서 상부구조물의 전체무게, 68330.0톤을 고려하여 0.6 Hz의 면진주파수를 갖는 면진시스템을 설계하기 위해 사용된 수정히스테리틱 Bi-linear 모델의 변수들을 다음과 같다.

$$D_1 = 29.76 \times 10^3 \text{ kgf},$$

$$K_1 = 0.99 \times 10^6 \text{ kgf/cm} : 0.0 \text{ cm} \leq S \leq 4.57 \text{ cm}$$

$$K_2 = 1.19 \times 10^6 \text{ kgf/cm} : 4.57 \text{ cm} \leq S \leq 7.62 \text{ cm}$$

$$K_3 = 1.49 \times 10^6 \text{ kgf/cm} : 7.62 \text{ cm} \leq S$$

$$K_0 = 2.97 \times 10^6 \text{ kgf/cm (이력곡선)}$$

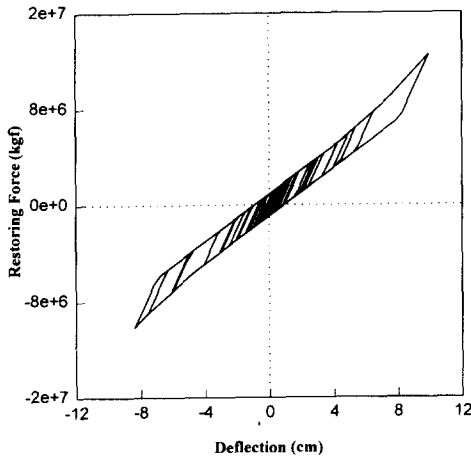


Fig. 5 Force-deflection responses of the seismic isolator using the modified hysteretic bi-linear model

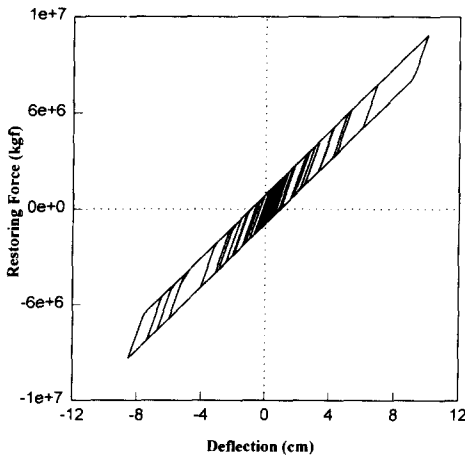


Fig. 6 Force-deflection responses of the seismic isolator using the simple hysteretic bi-linear model

Fig. 5는 El Centro 지반가속도 입력에 대한 면진베어링 복원력-변형량 응답특성을 나타낸 것으로 면진베어링은 경화변형량 영역까지 거동을 하며 작은 변위의 히스테리틱 거동이 많이 나타나는 것을 알 수 있다. Fig. 6은 경화현상을 무시한 단순히스테리틱 Bi-linear 모델을 사용한 해석결과로써 Fig. 5에 비하여 최대 변위응답은 유사하나 최대 복원력이 작게 나타남을 알 수가 있다. Fig. 7과 8은 각 모델에 대한 절점 7에서의 절대가속도 시간이력응답을 나타낸 것이며 Fig. 9와 10은 면진베어링의 상대변위 시간이력응답을 나타낸 것이다. 그림에서와 같이 수정히스테리틱 Bi-linear 모델은 단순히스테리틱 Bi-linear 모델에 비하여 변위응답은 유사하나 최대 침두가속도가 크게 나타남을 알 수가 있다. 이러한 이유는 지진가속도가 가지고 있는 주파수성분때문인 것으로 판단되며 1940 El Centro 지진가속도는 Fig. 11에서와 같이 약 1 Hz~10 Hz

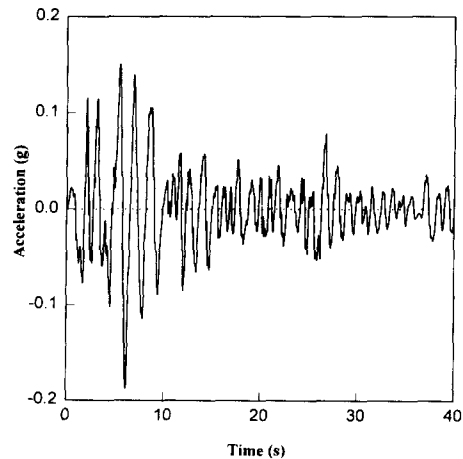


Fig. 7 Acceleration responses of the node 7 using the modified hysteretic bi-linear model

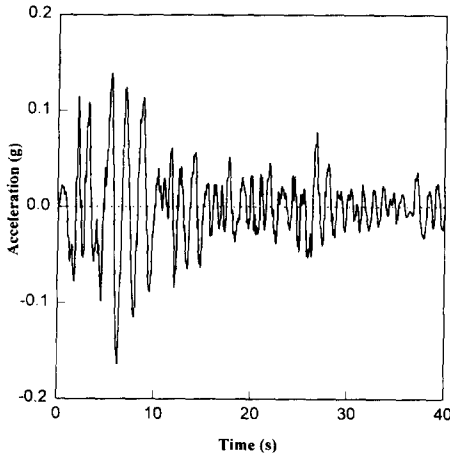


Fig. 8 Acceleration responses of the node 7 using the simple hysteretic bi-linear model

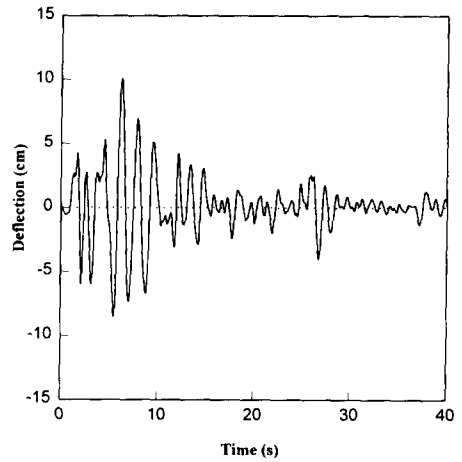


Fig. 10 Deflection responses of the seismic isolator using the simple hysteretic bi-linear model

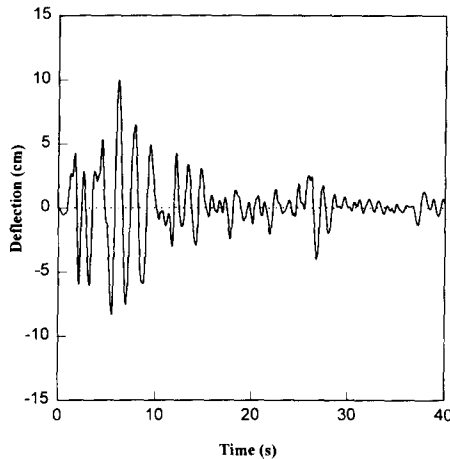


Fig. 9 Deflection responses of the seismic isolator using the modified hysteretic bi-linear model

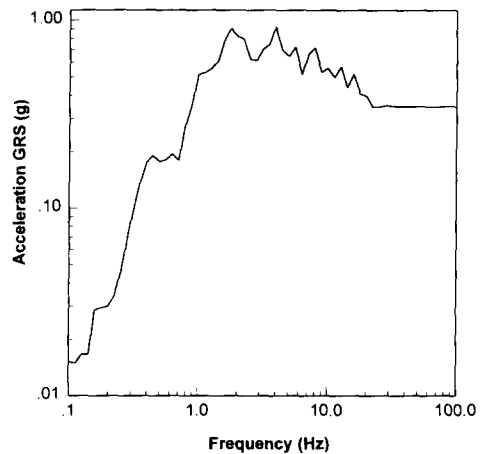


Fig. 11 Acceleration spectrum of 1940 El Centro(NS) earthquake

사이에 강운동성분이 존재하기 때문에 면진베어링의 경화현상은 지진응답을 증폭시키는 것으로 판단된다.

또한 본 논문에서는 Fig. 6의 단순히스테리틱 Bi-linear 모델을 사용한 응답특성으로부터 단자유도계로 가정한 등가선형 모델을 구하여 응답특성을 비교하였다. Fig. 6에서 면진베어링의 히스테리틱 곡선으로부터 변형량 10.06 cm의 절반의 변형량을 기준으로 0.6 Hz의 단자유도를 갖는 등가선형모델을 구해보면 다음과 같다.

$$K_{eq} = 1.08 \times 10^6 \text{ kgf/cm}$$

$$\xi_{eq} = \frac{W_D}{2\pi K_{eq} S_{max}^2} = 0.1073$$

$$C_{eq} = \frac{W_D}{\pi\omega S_{max}^2} = 56.38 \times 10^3 \text{ kgf}\cdot\text{sec/cm}$$

여기서, 해석에 사용된 단순히스테리틱 모델을 등가감쇠치가 약 11% 정도로 고감쇠를 나타내고 있음을 알 수가 있다. Fig. 12는 절점 7에서의 가속도 시간이력응답 해석결과를 나타낸 것이며 Fig. 13은 각 면진베어링 모델에 대한 절점 7에서의 가속도응답스펙트럼 해석결과를 나타낸 것이다. 그림에서와 같이 면진구조물은 비면진구조물에 비하여 가속도응답이 현저하게 줄어들며 면진베어링의

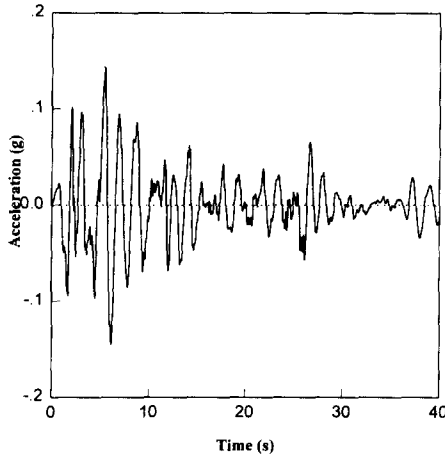


Fig. 12 Acceleration responses of the node 7 using the equivalent spring-damper model

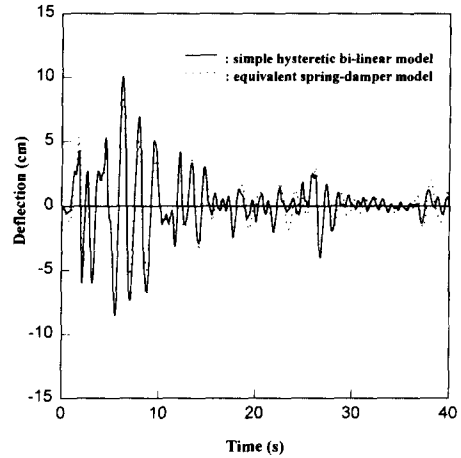


Fig. 14 Deflection responses of the seismic isolator

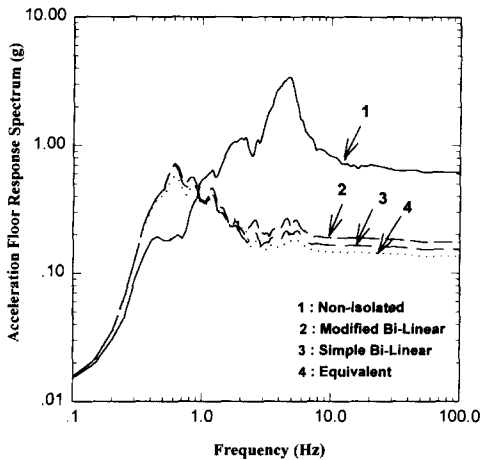


Fig. 13 Comparison of acceleration floor response spectrum between the non-isolated system and isolated systems calculated at node 7

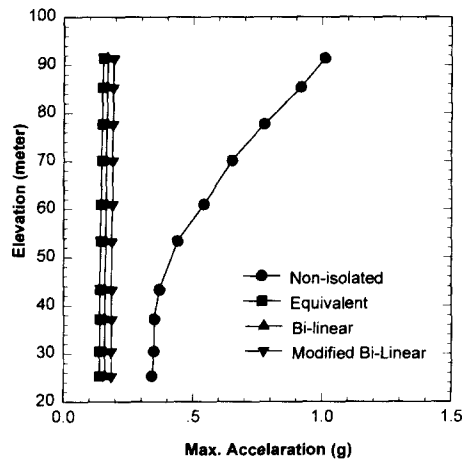


Fig. 15 Maximum acceleration distributions of containment vessel part

히스테리틱 Bi-linear 모델은 등가선 형모델에 비하여 최대 첨두가속도 응답이 약간 크게 나타났다. 이는 단순히스테리틱 Bi-linear 모델을 이용한 면진베어링의 복원력-변위 해석결과로부터 최대 변형량의 절반위치에서 구한 등가강성 및 감쇠특성치가 단순히스테리틱 Bi-linear 모델에 적용된 감쇠특성치보다 약간 크게 설정되었기 때문인 것으로 판단된다. Fig. 14는 단순히스테리틱 Bi-linear 모델과 등가선형모델에 대한 면진베어링의 상대변위 시간이력응답 해석결과를 나타낸 것으로 최대 변위응답을 유사하게 나타낼 수 있다.

Fig. 15는 비면진 시스템과 각 면진베어링 모델을 사용한 면진 시스템에 대한 지진해석결과로서 원자로 격납용기부분의 각 높이 따른 최대 첨두가속도 분포를 나타낸 것이다. 그림에서와 같이 면진 시스템은 비면진 시스템에 비하여 높이에 따른 가속도응답의 증폭이 현저히 줄어들음을 알 수가 있다.

### 3. 결 론

면진베어링을 사용한 지진응답 해석결과 면진구조물은 비면진구조물에 비하여 지진응답이 현저하

계 줄어 들며 면진베어링의 경화현상을 고려한 수정히스테리틱 Bi-linear 모델은 단순히스테리틱 Bi-linear 모델에 비하여 최대 첨두가속도 응답이 크게 나타난다. 이는 경화현상으로 면진베어링의 강성이 증가하면 입력 지반가속도 주파수성분의 영향을 받기 때문인 것으로 판단된다. 또한 단순히스테리틱 Bi-linear 모델을 이용한 해석결과로부터 구한 등가선형 모델은 최대 변위 및 가속도응답이 유사한 결과를 나타낸다. 앞으로 면진구조물의 보다 정확한 해석을 위해서는 복잡한 히스테리틱 복원력-변형률 특성을 갖는 면진베어링에 대한 보다 정확한 해석모델 개발이 필요하다.

### 참고문헌

- (1) Tsai, H. C. and Kelly, J. M., 1993, "Seismic Response of Heavily Damped Base Isolation System," *Earthquake Engineering and Structural Dynamics*, Vol. 22, pp. 633~645.
- (2) Inaudi, J. A. and Kelly, J. M., 1993. "Optimum Damping in Linear Isolator System," *Earthquake Engineering and Structural Dynamics*, Vol. 22, pp. 583~598.
- (3) 구경회 등, 1995, "고감쇠 면진베어링을 사용한 지진응답감소," '95년 춘계 한국원자력학회 학술대회 논문집, pp. 987~992.
- (4) 전영선 등, 1993, "사용후핵연료 저장시설의 정기적 건전성 연구," 제2권 사용후핵연료 저장조의 면진구조해석, 한국원자력연구소.
- (5) Fujita, K. ect., 1989, *Dynamic Characteristics of Elastomer with Lead Plug*, Seismic, Shock and Vibration Isolation-1989. pp. 17~22.
- (6) Koshida, H. and Yasaka, A. 1989, *Vibration Tests and Earthquake Observation Results of Baseisolated Buliding*, Seismic Shock and Vibration Isolation-1989. pp. 135~140.