

'98 춘계학술발표회 논문집  
한국원자력학회

## 면진용 적층고무베어링의 히스테레틱 거동에 대한 수학적 해석 모델

구경희, 이재한, 유봉, 권혁선  
한국원자력연구소  
대전광역시 유성구 덕진동 150

### 요 약

본 연구에서는 현재 국내에서 개발중인 액체금속로 KALIMER(Korea LIquid METal Reactor)의 면진설계에 적용하기 위한 적층고무베어링의 수학적 해석모델을 개발하고자 한다. 이를 위하여 수정 비선형 Rate 모델과 특성실험 결과로부터 구한 파라미터 특성식을 이용한 적층고무베어링의 해석모델 수립하고 이를 1자유도계 지진 모델에 적용하여 히스테레틱 거동에 대한 해석적 결과와 적층고무베어링의 특성 실험결과와 비교분석하여 해석모델의 정확성을 검토하였다.

### 1. 서 론

오늘날 미국, 일본 등을 포함하여 크고 작은 지진들이 자주 발생하는 나라에서는 원자력 발전소를 비롯한 주요 산업시설 및 건물에 대하여 지진으로부터 구조적 건전성을 확보하기 위하여 면진설계(Seismic isolation design)를 도입하기 위한 연구를 활발히 하고 있다. 이러한 면진설계를 위해서는 구조물로 전달되는 지진에너지를 충분히 차단시킬 수 있는 면진장치 개발이 필수적이다.

본 연구에서는 현재 국내에서 개발중인 액체금속로의 면진설계에 적용하기 위한 것으로서 얇은 고무판과 강판을 차례로 적층하여 만든 적층고무베어링의 수학적 해석모델을 개발하고자 한다. 일반적으로 고감쇠 특성을 갖는 적층고무베어링은 전단 변형량에 따라서 복잡한 히스테레틱 거동을 나타낸다. 이러한 적층고무베어링은 아주 작은 전단변형 범위( $\gamma < 20\%$ )에서는 수평강성이 매우 크서 바람이나 구조물진동에 저항하는 힘이 크고(풍하중 제어강성), 중간 범위( $20\% \leq \gamma \leq 120\%$ )에서는 복원력의 변화가 선형성을 나타냄으로서 수평강성이 일정하며(지진하중 제어강성), 매우 큰 전단변형 범위( $120\% < \gamma$ )에서는 경화현상이 발생하여 베어링의 극단적인 전단변형을 억제하는 강성특성(극한하중 제어강성)을 나타낸다[1]. 면진설계를 위해서는 이러한 복잡한 강성특성을 갖는 적층고무베어링의 수학적 해석모델 개발이 매우 중요하다.

적층고무베어링에 대한 해석적모델은 여러가지가 있을 수 있으나[2,3] 본 연구에서는 적층고무베어링의 비선형 히스테레틱 거동을 잘 표현할 수 있는 수정 Rate 모델[4]과 실제 특성실험 결과에서 구한 파라미터 특성식으로 부터 해석모델을 개발하고 이를 1자유도계 지진해석에 적용하여 해석적으로 구한 히스테레틱 거동결과와 실험결과를 비교분석함으로써 개발된 수학적 해석모델의 정확성을 살펴보고자 한다.

## 2. 적층고무베어링의 수학적모델

본 연구에 사용된 적층고무베어링은 실제 규모의 1/8 수준으로서 제원은 그림 1 과 같다 이러한 적층고무베어링은 사용된 얇은 고무판의 재료성질에 따라서 수평 전단변형에 대하여 복잡한 히스테레틱 거동을 나타낸다. 그림 2는 수직하중 4.5 톤이 가해진 상태에서 최대 25%, 50%, 100% 그리고 150%의 반복 전단변형률을 적용한 실험결과에서 3 번째 사이클 이력곡선들을 나타낸 것이다. 그림에서와 같이 적층고무베어링은 반복 전단변형률의 크기가 커질수록 항복력이 커지나 이력곡선이 완만해 짐으로서 전단강성이 줄어들음을 알 수 있다. 그러나 일반적으로 전단변형률 120% (42 mm) 이상에서는 경화현상이 발생함으로써 이력곡선이 다시 상승하는 복잡한 거동특성을 나타낸다.

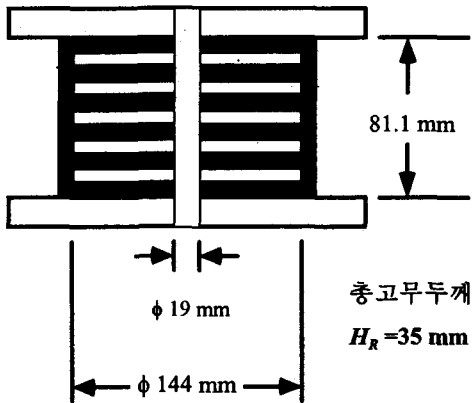


그림 1. 면진용 적층고무베어링 제원

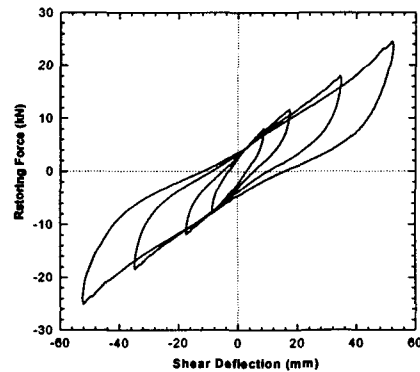


그림 2. 히스테레틱 특성시험 결과

본 연구에서는 이러한 적층고무베어링의 히스테레틱 거동특성에 대한 수학적 모델로서 수정 비선형 Rate 모델을 사용하였다.

적층고무베어링의 한쪽 끝단을 고정하고 다른 한쪽 끝단을 가진할 경우에 베어링에 작용하는 복원력  $F$ 는 다음과 같이 나타낼 수 있다[4].

$$F = F_1 + F_2 \quad (1)$$

$$F_1 = K_2 \cdot x_r \cdot \left\{ R + (1-R) \left( \frac{x_r}{X_m} \right)^6 \right\} \quad (2)$$

$$\dot{F}_2 = (K_1 - K_2) \cdot \dot{x}_r \cdot \left\{ 1.0 - \text{sgn}(\dot{x}_r) \left( \frac{F_2}{F_u} \right)^n \right\} \quad (3)$$

여기서 변수위에 표시된 상점(·)은 변수에 대한 시간미분을 나타내며 sgn은  $|\dot{x}_r|/\dot{x}_r$ 으로 표현되는 부호변화 변수 그리고  $F_u$ 는 그림 3에서와 같이 히스테레틱 이력곡선에서 나타나는 항복력이다. 식 (3)의  $n$ 은 히스테레틱 거동 동안에 탄성영역에서 비탄성영역으로 전환되는 천이부분의 거동을 결정하는 재료변수이다. 식 (2)에서 변수  $R$ 은 전단변형의

크기에 따라서 결정되는 경화특성 파라미터이다.

위의 식에서  $K_1$ 과  $K_2$ 는 최대 전단변형률  $\gamma$ 의 함수로써 다음 식과 같이 결정된다

$$K_1 = [1.0 - U(\gamma) + U(\gamma)/S] \cdot K_0(\gamma) \quad (4)$$

$$K_2 = [1.0 - U(\gamma)] \cdot K_0(\gamma) \quad (5)$$

여기서  $U$ 는 그림 3에서 나타나 있는  $F_u$ 와  $F_m$ 의 비를 나타내며  $K_0$ 는 등가 수평강성을 나타낸다.

식 (4)에서  $S$ 는 다음과 같은 수식을 만족하는 변수이다.

$$S \cdot \frac{e^{2/S} - 1}{e^{2/S} + 1} = \frac{U(\gamma) - Q(\gamma)}{U(\gamma)} \quad (6)$$

$$Q(\gamma) = \pi \cdot H_{eq}(\gamma) / 2 \quad (7)$$

식 (6)에서  $e$ 는 지수함수를 나타내며  $H_{eq}$ 는 다음의 식으로 계산된 등가 점성감쇠를 나타낸다.

$$H_{eq}(\gamma) = \frac{1}{2\pi} \frac{\Delta W}{F_m X_m} \quad (8)$$

여기서  $\Delta W$ 는 그림 3에서와 같이 최대 전단변위  $X_m$ 을 갖는 루프내의 총면적이다.

위의 식(4)~(8)에 나타나는 변수  $\gamma$ 는 다음과 같이 결정된다.

$$\gamma = X_m / H_R \quad (9)$$

수정 Rate 모델을 적용하기 위하여 위의 식 (1)~(9)에 나타나는 적층고무베어링에 대한 특성식  $K_0(\gamma)$ ,  $U(\gamma)$ ,  $Q(\gamma)$  그리고  $R(\gamma)$ 가 결정되어야 한다. 본 연구에서는 적층고무베어링의 특성실험으로부터 구한 그림 2의 히스테레틱 결과로부터 다음과 같은 파라미터 특성식을 결정하였다.

$$K_0(\gamma) = 1.285 - 2.001 \gamma + 1.736 \gamma^2 - 0.5115 \gamma^3 \quad (10)$$

$$U(\gamma) = 0.427 - 0.5503 \gamma + 0.4628 \gamma^2 - 0.1468 \gamma^3 \quad (11)$$

$$Q(\gamma) = 0.2838 - 0.1633 \gamma + 0.1355 \gamma^2 - 0.04557 \gamma^3 \quad (12)$$

$$R(\gamma) = \begin{cases} 1.0 & : \gamma \leq 1.2 \\ \exp\{-0.357(\gamma - 1)^{0.86}\} & : \gamma > 1.2 \end{cases} \quad (13)$$

식 (10)~(13)에서  $K_0(\gamma)$ 의 단위는  $MN/m$ 이며  $U(\gamma)$ ,  $Q(\gamma)$ 과  $R(\gamma)$ 는 무차원 함수이다.

### 3. 1 자유도계 지진응답해석

그림 4와 같이 적층고무베어링을 사용한 1자유도계의 지진에 대한 운동방정식은 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$M \ddot{x}_r + F(x_r, \dot{x}_r)_{iso} = -M \ddot{x}_g \quad (14)$$

위의 식에서  $x_r$ 은 입력지진에 대한 상부 관성질량의 상대변위이며  $\ddot{x}_g$ 는 입력 지진가속도 시간이력이고  $F(x_r, \dot{x}_r)_{iso}$ 는 적층고무베어링에 작용하는 복원력으로서 전단변위와 속도응답 의존함수이다.

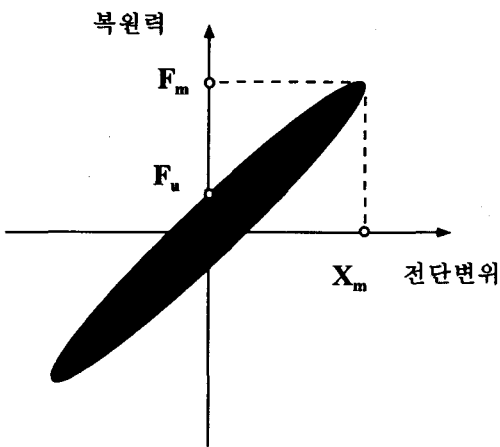


그림 3. 비선형 Rate 모델 개념도

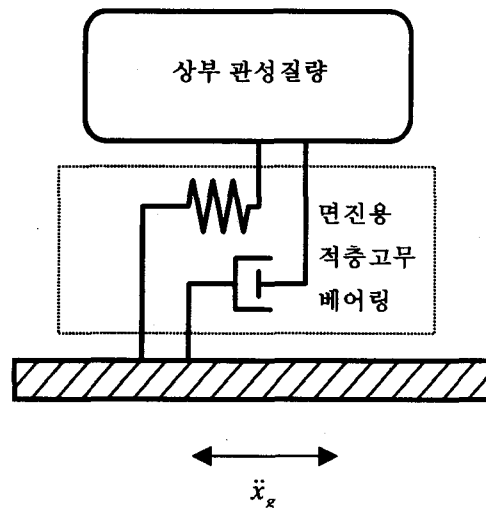


그림 4.1 자유도계 지진해석모델

### 4. 적용예

지진해석에 사용된 입력 지진가속도 시간이력 곡선은 그림 5와 같이 Sin 함수를 이용한 조화가진력이다. 가진 가속도의 크기는 적층고무베어링의 전단변형률 25%, 50%, 100% 그리고 150%를 발생시킬 수 있는 0.165g, 0.255g, 0.387g 그리고 0.538g을 각각 사용하였다. 그리고 적층고무베어링은 120% 이상의 전단변형률부터 경화가 발생하는 것으로 가정하였다.

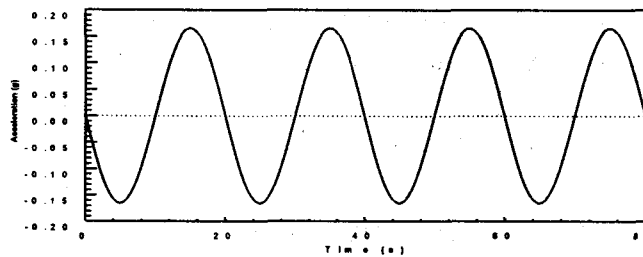


그림 5. 지진해석에 사용된 입력 가속도 시간이력

적층고무베어링의 특성시험시에 사용한 가진주파수 0.05 Hz(20 초)를 고려하여 80 초 동안에 총 4 사이클을 가진하는 것으로 해석하였다. 상부 관성질량은 특성시험시에 사용한 수직하중 4.5 톤을 적용하였다.

그림 6에서 그림 9까지는 적층고무베어링의 히스테레틱 거동에 대한 특성실험 결과와 해석결과를 나타낸 것으로 해석으로 추정된 전반적인 히스테레틱 응답거동이 실험결과와 매우 잘 일치함을 알 수 있다. 그리고 최대 전단변형에 대한 복원력의 크기와 항복력도 잘 일치함을 알 수 있다. 이는 본 연구에서 제안한 적층고무베어링의 수학적 해석모델을 면진설계해석에 적용할 경우 적층고무베어링의 복잡한 히스테레틱 거동에 따른 강성과 감쇠변화를 입력 지진과의 가진크기에 따라서 보다 정확히 고려할 수 있음을 의미한다..

## 5. 결론

본 연구에서는 개발한 적층고무베어링 수학적 해석모델은 앞의 적용예에서 보인 것과 같이 전형적인 면진용 적층고무베어링의 히스테레틱 특성을 잘 표현할 수 있다. 따라서 실제 면진설계해석에 적용할 경우 적층고무베어링의 복잡한 히스테레틱 거동에 따른 강성과 감쇠변화를 입력 지진과의 가진크기에 따라서 보다 정확히 고려할 수 있을 것으로 판단된다.

## 참고문헌

- [1] M. Forni, A. Martelli, and et.al, "Proposal for Design Guidelines for Seismically Isolated Nuclear Plants-Final Report," European Atomic Energy Community and ENEA., 1994.
- [2] 구경희, 이재한 등, "수정히스테레틱 Bi-Linear 면진베어링 모델을 사용한 지진응답감소," 대한기계학회 논문집(A), 제 20 권 제 1 호, pp.127-134, 1996.
- [3] 구경희, 이재한, 유봉, "면진용 적층고무베어링의 기계적 역학특성," 한국지진공학회 논문집, 제 1 권 제 2 호 (통권 제 2 호), pp.79-89, 1997.
- [4] G.H. Koo and Y. Ohtori, "Loading Rate Effects of High Damping Seismic Isolation Rubber Bearing on Earthquake Responses," KSME International Journal, Vol.12, No.1, pp.58-66, 1998.

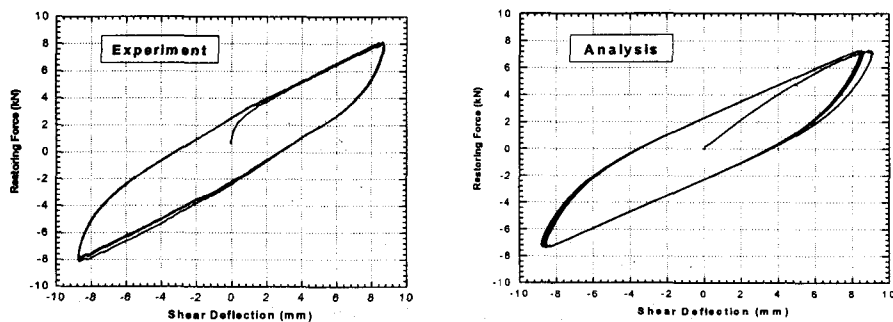


그림 6. 히스테레틱 응답특성 ( $\gamma=25\%$ )

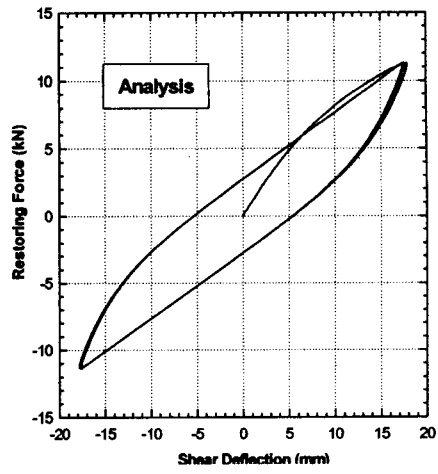
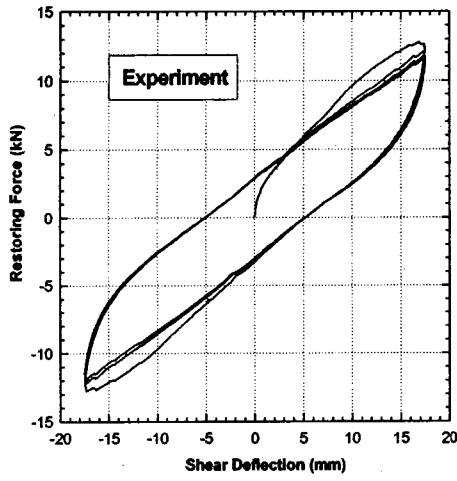


그림 7. 히스테레틱 응답특성 ( $\gamma=50\%$ )

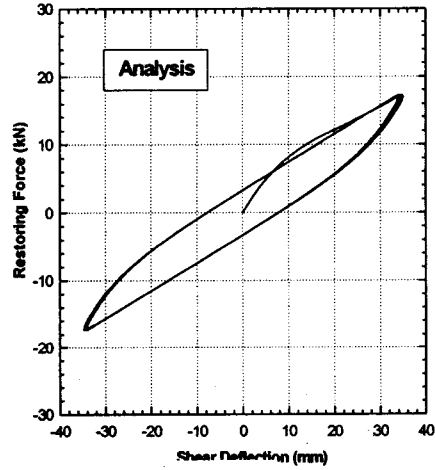
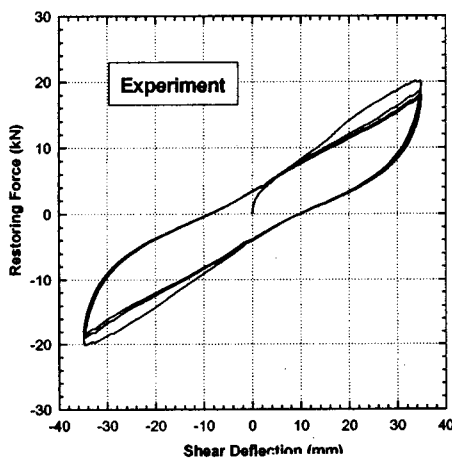


그림 8. 히스테레틱 응답특성 ( $\gamma=100\%$ )

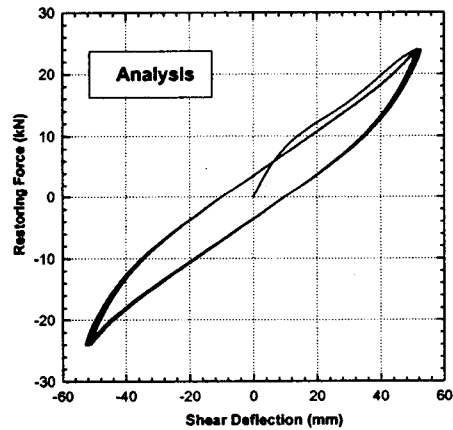
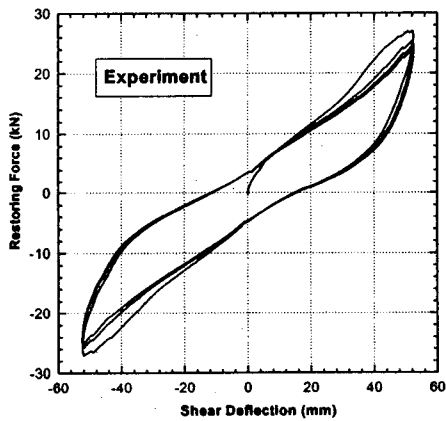


그림 9. 히스테레틱 응답특성 ( $\gamma=150\%$ )