

적층고무베어링을 사용한 면진구조물의 라킹거동 및  
수직고유진동수 영향  
Effects of Rocking Motion and Vertical Natural Frequency on  
Responses of a Seismically Isolated Structure Using LRBs

구 경회\*, 이 재한\*, 유 봉\*\*  
Koo, Gyeong-Hoi Lee, Jae-Han Yoo, Bong

---

ABSTRACT

The objective of this paper is to investigate the effects of the rocking motion and the vertical natural frequency of a seismically isolated structure using LRBs. The governing equations of motion of the rigid body structure, which consider a large rocking motion, are derived. For the mathematical model of LRB, the horizontal stiffness equation based on Haringx's theory is used. From this paper, as decreasing the vertical natural frequency, the rocking responses increase and the horizontal isolation frequency and its earthquake responses are severely affected.

---

1. 서 론

지진하중에 대한 구조물의 안전성과 경제성 향상을 위한 목적으로 적층고무베어링을 사용한 면진설계 기술개발이 세계적으로 활발히 진행되고 있다[1,2]. 이러한 면진설계기술은 일반건물이나 주요시설물에 대해서는 이미 실용화단계에 있으며 원자력발전소에의 적용을 위한 연구가 현재 진행되고 있다[3,4]. 본 연구는 액체금속로(Liquid metal reactor) 면진용으로 개발중인 적층고무베어링을 사용한 면진구조물의 라킹거동 및 수직고유진동수 영향을 살펴보기 위한 것으로 2차원 상부강체모델에 대하여 대변형 라킹운동을 고려한 운동방정식을 유도하였다. 적층고무베어링의 수평강성 모델에는 Haringx 이론에 근거한 적층고무베어링의 수평강성식[5]을 사용

\* 한국원자력연구소 선임연구원

\*\* 한국원자력연구소 책임연구원

하였으며 면진베어링의 *P*-delta 효과를 고려하기 위하여 수직반력응답을 준정적 수직하중으로 가정한 비선형 지진해석을 수행하였다. 적용예로써 1/8 상사성을 갖는 축소모델 적층고무베어링을 사용하였으며 수직고유진동수 변화에 따른 수평면진주파수와 수평지진응답 그리고 라킹응답특성 해석을 수행하였다. 그리고 면진구조물의 폭과 질량중심까지의 높이 비율에 따른 지진응답특성의 변화를 살펴보았다.

## 2. 면진구조물의 해석적 접근

### 2.1 면진구조물의 운동방정식

Fig.1은 적층고무베어링을 사용한 2차원 면진구조물의 모델링 개념도를 나타낸 것으로 본 연구에서는 상부구조물을 강체로 가정한 해석을 수행하였다. 이러한 적층고무베어링을 사용한 면진구조물의 수평 및 수직에 대한 일반적 운동방정식은 다음과 같이 표현할 수 있다.

$$m \ddot{x}_G + \sum_{i=1}^N F_i^H = -m \ddot{x}_g \quad (1)$$

$$m \ddot{y}_G + \sum_{i=1}^N F_i^V = -m \ddot{y}_g \quad (2)$$

위의 식에서 상첨자 *H*와 *V*는 수평과 수직방향을 각각 나타내고 *G*는 상부강체구조물의 질량중심, *g*는 지반입력을 나타내며 하첨자 *i*는 *i*번째 적층고무베어링을 나타낸다.

Fig.1에서와 같이 대변위 라킹거동을 고려한 상부강체구조물의 회전운동방정식은 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$I \ddot{\theta}_G + \sum_{i=1}^{N_L} F_i^H L_i \sin(\alpha_i + \theta_G) + \sum_{i=N_L+1}^{N_L+N_R} F_i^H L_i \sin(\alpha_i - \theta_G) - \sum_{i=1}^{N_L} F_i^V L_i \cos(\alpha_i + \theta_G) + \sum_{i=N_L+1}^{N_L+N_R} F_i^V L_i \cos(\alpha_i - \theta_G) = 0 \quad (3)$$

위의 식에서 *N<sub>L</sub>*과 *N<sub>R</sub>*은 상부구조물의 질량중심에서 왼쪽편에 위치한 적층고무베어링의 갯수와 오른쪽편에 위치한 적층고무베어링의 갯수를 각각 나타낸다. 그리고 *L<sub>i</sub>*는 상부구조물의 질량중심에서부터 *i*번째 적층고무베어링의 상부연결판까지의 거리를 나타낸다. 그리고  $\alpha_i$ 는 *L<sub>i</sub>*와 상부강체구조물의 하부면이 이루는 각을 나타내고  $\theta_G$ 는 상부강체구조물의 라킹각응답을 나타낸다.

적층고무베어링에 작용하는 복원력은 베어링자체의 점성감쇠와 강성만을 고려하면 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$F_i^H = C_i^H \dot{x}_i + K_i^H x_i \quad (4)$$

$$F_i^V = C_i^V \dot{y}_i + K_i^V y_i \quad (5)$$

위의 식에서  $C$ 와  $K$ 는 점성감쇠와 스프링상수를 각각 나타낸다.

상부강체구조물의 임의 위치에서의 변위, 속도 그리고 가속도운동은 질량중심의 운동으로부터 다음과 같은 식을 사용하여 구할 수 있다.

$$x_i = x_G + p_i(\cos\theta_G - 1) - q_i \sin\theta_G \quad (6)$$

$$y_i = y_G + p_i \sin\theta_G + q_i(\cos\theta_G - 1) \quad (7)$$

$$\dot{x}_i = \dot{x}_G - p_i \sin\theta_G \cdot \dot{\theta}_G - q_i \cos\theta_G \cdot \dot{\theta}_G \quad (8)$$

$$\dot{y}_i = \dot{y}_G + p_i \cos\theta_G \cdot \dot{\theta}_G - q_i \sin\theta_G \cdot \dot{\theta}_G \quad (9)$$

$$\ddot{x}_i = \ddot{x}_G - p_i(\cos\theta_G \cdot \dot{\theta}_G^2 + \sin\theta_G \cdot \ddot{\theta}_G) - q_i(\sin\theta_G \cdot \dot{\theta}_G^2 - \cos\theta_G \cdot \ddot{\theta}_G) \quad (10)$$

$$\ddot{y}_i = \ddot{y}_G + p_i(-\sin\theta_G \cdot \dot{\theta}_G^2 + \cos\theta_G \cdot \ddot{\theta}_G) + q_i(\cos\theta_G \cdot \dot{\theta}_G^2 + \sin\theta_G \cdot \ddot{\theta}_G) \quad (11)$$

위의 식에서  $p_i$ 와  $q_i$ 는 정지상태에서 질량중심  $G$ 로 부터 임의 위치의  $x$ 좌표와  $y$ 좌표를 각각 나타낸다.

## 2.2 적층고무베어링의 수평강성

면진을 위하여 모두 동일한 적층고무베어링을 사용할 경우에 수평강성  $K_i^H$ 는 주어진 형상에 따라서  $P$ -delta 효과를 고려한 다음과 같은 평가식으로부터 구할 수 있다.

$$K_i^H = \frac{P_i^2}{2qS_b \tan(ql/2) - P_i l} \quad (12)$$

여기서

$$q = \left[ \frac{P}{S_b} \left( 1 + \frac{P}{S_s} \right) \right]^{1/2}$$

이며  $S_b$ 와  $S_s$ 는 적층고무베어링의 굽힘강성과 전단강성을 나타내는 것으로 고무층의 압축성을 고려할 경우 다음과 같이 구해진다.

$$S_b = \bar{E}_b I(t_R + t_S)/t_R, \quad S_s = GA_s(t_R + t_S)/t_R \quad (13),(14)$$

여기서

$$\begin{aligned} \bar{E}_b &= E_b E_\infty / (E_b + E_\infty) \\ E_b &= E_o \left( 1 + \frac{2}{3} \kappa S_1^2 \right) \approx 3G \left( 1 + \frac{2}{3} \kappa S_1^2 \right) \\ S_1 &= (D_o - D_i) / (4t_R) \end{aligned}$$

위의 식에서  $t_R$ 과  $t_S$ 는 고무층의 두께와 강철판의 두께를 각각 나타내며  $E_b$ 와  $E_\infty$ 는 고무층의 겉보기 탄성계수와 체적탄성계수를 나타내고  $k$ 는 고무의 경화계수를

나타낸다.

위의 수평강성식에서와 같이 적층고무베어링의 수평강성특성은 수직하중에 따라서 달라지며 따라서 지진거동시에 적층고무베어링에 작용하는 수직동하중을 준정적 수직하중으로 가정하면 각 적층고무베어링에 작용하는 수직하중은 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$P_i = \frac{W}{N} + F_i^V \quad (15)$$

위의 식에서  $W$ 는 상부강체구조물의 총무게를 나타내며  $N$ 은 사용된 총 적층고무베어링의 갯수를 나타낸다.

### 3. 적용예

본 연구의 적용예에 사용된 적층고무베어링은 실제 크기의 1/8 축소규모이며 Fig.1의 2차원 상부강체구조물의 하부 양끝단에 2개의 적층고무베어링으로 지지된 경우를 고려하였다. 축소모델의 상사성을 고려한 해석자료는 다음과 같다.

$$D_o = 14.375 \text{ cm}, D_i = 1.875 \text{ cm}$$

$$t_R = 1.172 \text{ mm}, t_S = 1.683 \text{ mm}, n_R = 29$$

$$G = 0.75 \text{ MPa}, E_\infty = 1.49 \text{ GPa}, \kappa = 0.5$$

$$\text{Horizontal isolation frequency} = 1.43 \text{ Hz}$$

$$W = 8.85 \text{ tons}$$

$$\Delta t = 7.071 \text{ ms}$$

해석에 사용된 입력지진은 1940 El-Centro NS, 0.35g 이다. 해석에는 수평/수직의 2차원 가진을 적용하였으며 수직지진은 수평지진과 동일한 것으로 가정하였다. Fig.2는 입력지진에 대하여 라킹응답으로 인하여 적층고무베어링에 작용하는 수직하중의 변화에 따른 수평강성 변화를 나타낸 것이다. Fig.3은 히스테레틱 점성감쇠를 가정한 적층고무베어링의 변위-복원력 특성을 나타낸 것이다. Fig.4는 수직고유진동수에 따른 수평면진주파수의 변화를 나타낸 것으로 수직고유진동수가 낮을 수록 라킹거동의 연성작용으로 인하여 수평면진주파수가 작아 짐을 알 수 있다. Fig.5, Fig.6 그리고 Fig.7은 수직주파수에 따른 최대 수평변위, 첨두가속도 그리고 라킹각 응답을 나타낸 것으로 수직고유진동수가 낮아질 수록 크게 증가함을 알 수 있다. Fig.8은 면진구조물의 질량이 일정할 경우 질량중심의 변화에 따른 수평면진주파수의 변화

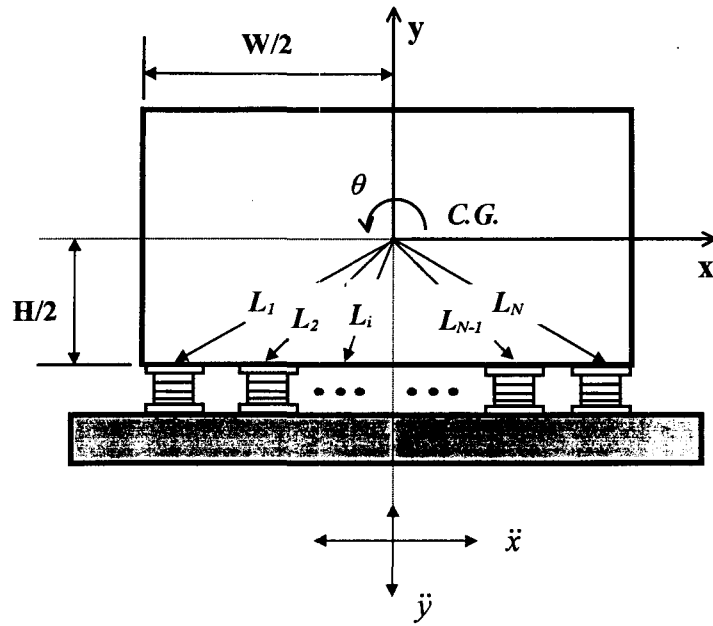
를 나타낸 것으로 수직고유진동수가 낮아질 수록 수평면진주파수가 질량중심의 높이에 매우 큰 영향을 받는다. 따라서 수직면진을 고려한 3차원 면진설계에서는 상부구조물의 질량중심이 폭에 비하여 높을 경우에 수평거동과 라킹거동의 연계로 인한 수평면진주파수의 변화를 고려할 필요가 있다. Fig.9는 최대 라킹가속도 응답을 나타낸 것으로 수직고유진동수가 높을수록 라킹가속도 응답이 작고 변화도 적다. Fig.10은 수직고유진동수가 60 Hz로 높은 경우와 5 Hz로 낮은 경우에 대한 최대첨두수평가속도 응답을 나타낸 것이다. 수직고유진동수가 높으면 라킹응답이 줄어들기 때문에 질량중심의 변화에 크게 영향을 받지 않으나 낮은 경우에는 크게 영향을 받으며 질량중심에 대한 라킹거동으로 인하여 질량중심에 비하여 상부구조물의 위, 아래위치에서의 응답이 크게 나타난다.

#### 4. 결 론

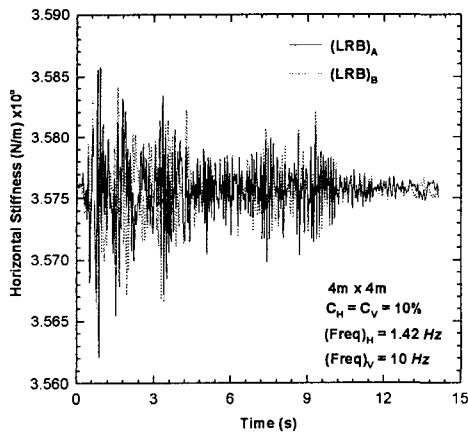
적층고무베어링을 사용한 면진구조물의 라킹거동 및 수직고유진동수의 영향이 면진특성에 미치는 영향을 검토한 결과 수직고유진동수가 낮을 수록 라킹거동이 크게 발생하며 수평거동과의 연계로 인하여 수평면진주파수가 낮추어 진다. 수직고유진동수가 낮을 경우에 상부구조물의 질량중심이 높아질수록 이러한 현상은 크게 나타나며 따라서 수직면진을 고려한 3차원면진시에는 라킹거동과 연계된 면진특성의 변화를 고려해야 한다.

#### 참 고 문 헌

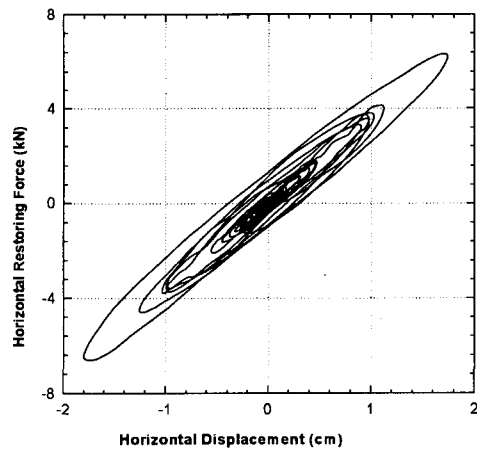
- [1] 면진구조설계지침, *일본건축학회*, 1993.
- [2] T. Fujita, T. Yoshizawa, et. al., “적층고무에 의한 중량기기의 면진지지,” *일본기계학회논문집(C편)*, 제 51권 461호, pp. 17-24, 1985.
- [3] Proposal for design guidelines for seismically isolated nuclear plants-Final report, *ENEA*, 1994.
- [4] 구경희, 이재한 등, “내진벽 강성이 면진시스템의 지진응답에 미치는 영향,” *한국원자력학회, 추계학술발표회 논문집*, pp. 989-994, 1995.
- [5] J.A. Haringx, “On highly compressive helical springs and rubber rods and their applications to free mountings-part I, II and III,” *Philips Research Reports*, 1948-1949.



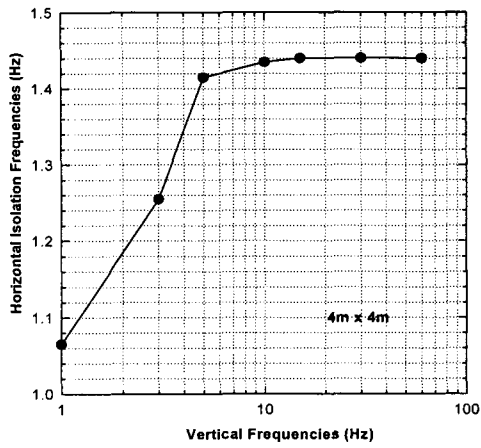
**Fig. 1 Seismically Isolated Rigid Structure**



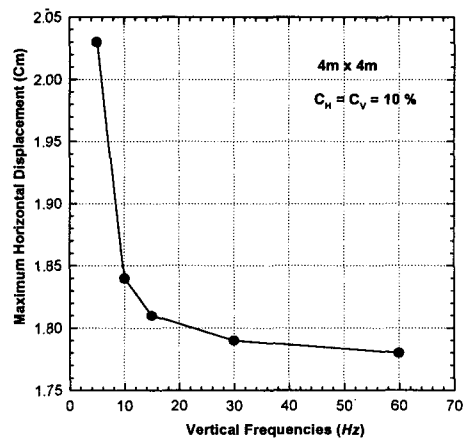
**Fig. 2 Response of LRB Stiffness  
(1940 El-Centro NS, 0.35g)**



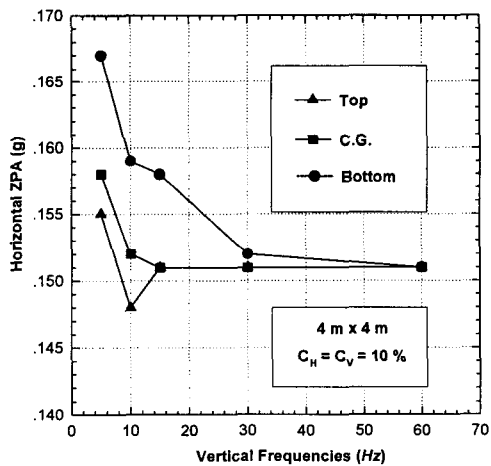
**Fig. 3 Hysteretic Response of LRB  
(1940 El-Centro Ns, 0.35g)**



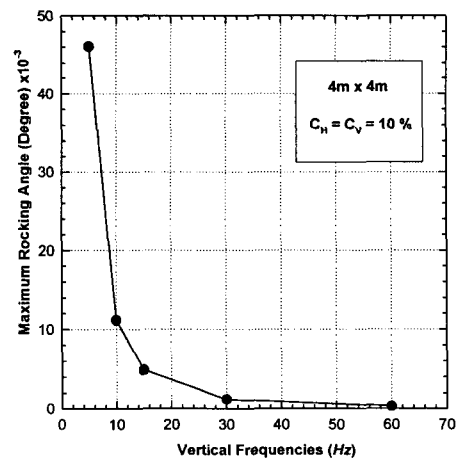
**Fig. 4 Effects of Vertical Frequency on Horizontal Isolation Frequency**



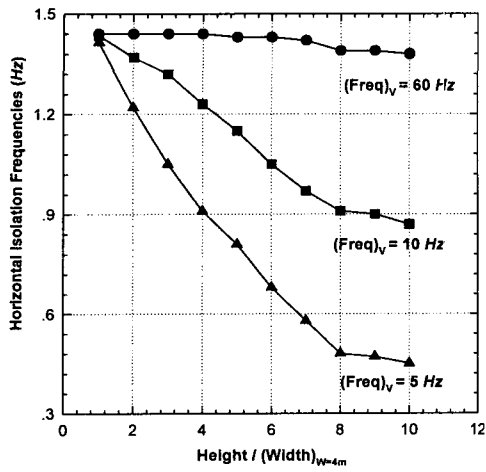
**Fig. 5 Effects of Vertical Frequency on Horizontal Displacement (1940 EL-Centro NS, 0.35g)**



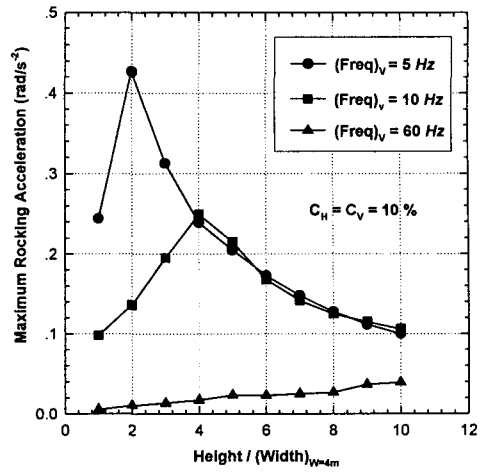
**Fig. 6 Effects of Vertical Frequency on Horizontal ZPA Responses (1940 El-Centro NS, 0.35g)**



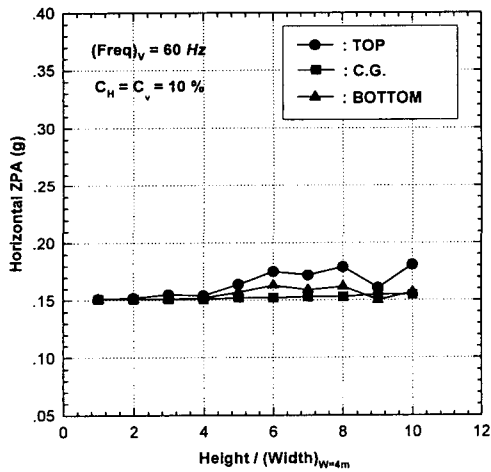
**Fig. 7 Effects of Vertical Frequency on Rocking Responses (1940 El-Centro NS, 0.35g)**



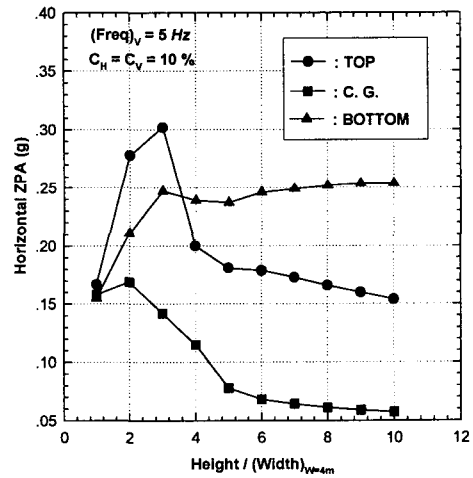
**Fig. 8 Effects of C.G. Height on Horizontal Isolation Frequency**



**Fig. 9 Effects of C.G. Height on Rocking Responses (1940 El-Centro NS, 0.35g)**



**(a) for vertical 60 Hz**



**(b) for vertical 5 Hz**

**Fig. 10 Effects of C.G. Height on Horizontal ZPA Responses (1940 El-Centro NS, 0.35g)**