

면진 테이블 시스템의 동적 특성 및 면진성능

Dynamic Characteristics and Isolation Performance of Isolation Table System

황재승^{*}
Hwang, Jae Seung

주석준^{**}
Joo, Seok Jun

김윤석^{***}
Kim, Yun Seok

倉林浩^{****}
Kurabayashi

국문요약

지진에 대한 구조물의 건전도는 내진설계에 의하여 많이 개선된 반면, 구조물 내부의 설비 및 중요 장비등에 대한 안전성은 최근에 관심을 가지게 되었다. 특히 국보급 문화재나 소장품은 그 가치에 비하여 지진에 대한 안전성이 고려되지 않은 것은 사실이다. 본 연구에서는 지진에 의하여 발생할 수 있는 내부 기기 및 문화재의 진도, 낙하를 방지하기 위한 면진 시스템을 개발하여, 본 장치에 대한 면진성능을 진동대 실험을 통하여 검증하였다. 본 면진 테이블은 전시물의 하부에 설치되어, 바닥 판의 진동이 전시대에 전달되는 것을 차단하는 격리시스템이다. 면진성능시험 결과, 면진성능이 80-90%이며 면진테이블의 최대 스트로크내에서 안정적으로 거동하는 것으로 나타났다.

주요어 : 문화재, 면진 테이블, 면진성능시험

ABSTRACT

Structural engineers lately have an interest in the safety for equipments and facility in buildings subjected to earthquake. The stability of cultural assets was not considered for the earthquake induced vibration, while the integrity of structure has been considered through the resistant earthquake design. The purpose of this study aimed to analyze the behavior of isolation device named as "isolation table system" and to evaluate its isolation performance through the experiment study. Isolation table is one of isolation systems to reduce the vibration which was transferred from slab to exhibition table. Experimental result shows that isolation table can reduce the vibration by 80-90% and its behavior is very stable within its maximal stroke.

Key words : cultural assets, isolation table system, isolation performance

1. 서 론

지진에 의한 발생하는 건축물의 피해는 구조물의 붕괴 및 안전성저하, 건축물 내부의 설비의 파괴 및 손상으로 구분된다. 구조물의 안전성은 최근 내진설계의 적용에 의하여 상당히 개선된 반면, 건물의 내부적인 손상의 경우는 현재 그 대책에 대한 시작단계에 있다. 아직도 발생한 일본의 1995년 1월 19일 새벽에 발생한 兵庫(효고)현 남부지진(코오베지진)에 의한 지진 피해는 건축물이 안전하였음에도 불구하고 내부의 설비기기, 가구등의 진도/파괴는 물론 박물관 소장품이 진도/파괴되는 등, 건축물 내부의 설비/소장품에 대한 피해도 다수 발생하였다.

이를 계기로 지진방재는 건물자체의 안전성 뿐만아니라 내부설비 및 소장품에 대한 안전성까지 종합적으로 검토되어야 하며 이를 위한 대책들이 지진발생국을 중심으로 강구되기 시작하였다.

특히 국보급 문화재나 회화작품, 미술 공예품이 전시되어 있는 박물관이나 미술관, 고가의 첨단장비나 의료기기가 있는 건물의 경우에는 구조물의 안전성 뿐만아니라 고가의 자산이 전

도, 낙하에 의하여 파손되지 않도록 하여야 한다. 이를 위하여 외국의 경우, 다양한 제진대책을 강구하고 있으며, 국내에서는 이에 대한 대책의 하나로 면진 장치를 개발하여 본 장치의 면진성능과 안전성을 확인하기 위한 진동대실험을 수행하였다.

면진테이블시스템은, 예를 들어 박물관의 전시케이스하부에 삽입시켜 지진에 의한 건물의 진동이 전시케이스에 전달되지 않도록 진동을 격리시킴으로써 전시물이나 소장품의 진도/파괴를 방지하는 시스템이다. 성능실험결과, 면진테이블시스템에 의하여 지진에 의한 진동이 80-90% 정도 감소되므로, 진도 8(MMI 기준)정도의 강진이 발생하더라도 전시물 또는 소장품이 진도/파괴되지 않는다. 또한 본 시스템은 전시되는 전시품의 크기, 무게에 따라 다양한 크기로 제작가능하며 이동 및 설치, 전시케이스와의 접합/분해가 용이하도록 설계되어 있어, 기존의 전시품 및 소장품에 쉽게 적용할 수 있다.

본 논문은 진동대 실험을 통하여 검증된 면진 테이블의 동적특성, 면진 성능과 안전성을 다루었다.

2. 면진 테이블

2.1 면진 테이블의 구성

면진 테이블은 전시층의 바닥과 전시케이스 사이에 삽입되는 격리 시스템이다(그림 1(a), (b)). 테이블의 높이는 가능한

* 정회원·현대건설 기술연구소, 선임연구원(대표저자 : jshwang@hdec.co.kr)

** 현대건설 기술연구소, 선임연구원

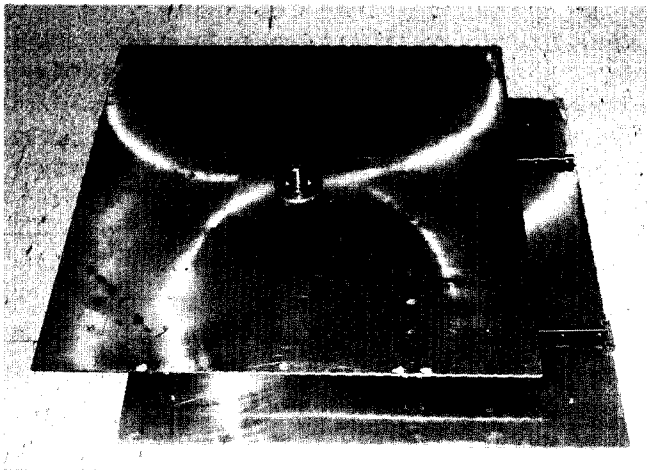
*** 현대건설 기술연구소, 수석연구원

**** 일본 Vibro-System 대표이사

본 논문에 대한 토의를 2001년 10월 31일까지 학회로 보내 주시면 그 결과를 게재하겠습니다. (논문접수일 : 2001. 5. 19 / 심사종료일 : 2001. 6. 7)



(a) 면진테이블 평면



(b) 제작된 면진테이블

그림 1 면진 테이블 시스템

한 작게 설계되며 9cm 정도의 높이를 가진다. 면진테이블은 전시 케이스 하단 넓이와 같은 상판과 하판으로 이루어 졌으며 이 사이에 곡률반경이 4m인 가이드레일과 블록이 한개 세트가 되어 상판에 4개, 하판에 4개가 부착되며, 상판과 하판이 직각으로 배열되고 이 사이에 4개의 유니버설조인트가 설치된다. 유니버설 조인트는 상, 하판에 직각으로 배열되는 가이드레일 사이에 한 개 씩 설치되어 가이드레일의 곡률 때문에 발생하는 높이차를 해소하며 자유롭게 상하로 회전한다. 설계 스트로크는 24cm이며 상, 하판의 크기는 1000×1000mm이다. 면진테이블의 스트로크를 벗어나는 것을 방지하기 위하여 가이드레일의 끝단에 고정단을 설치하며, 면진 테이블의 감쇠는 상판의 중앙에 설치되는 마찰댐퍼의 압축력에 의하여 결정된다.

면진테이블과 전시물과 결합된 면진 시스템이 그림 2에 나타나 있다.

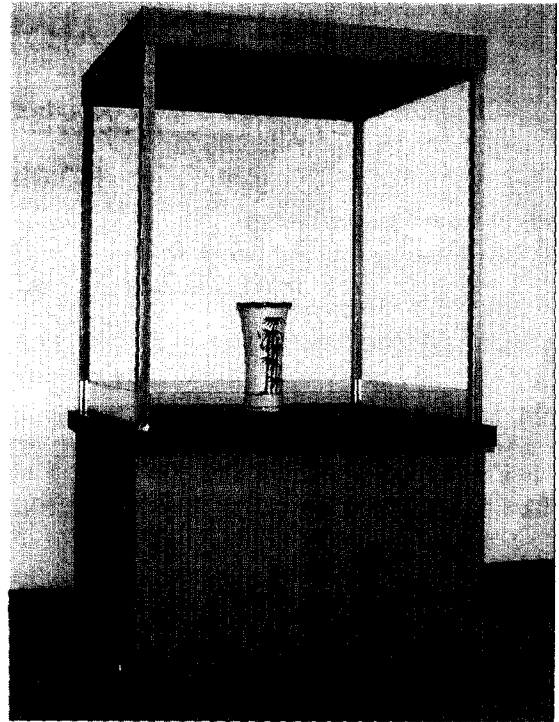


그림 2 전시대와 면진테이블

2.2 면진 테이블의 동적 특성

2.2.1 면진 테이블의 고유진동수

전시실 바닥과 전시물을 격리시키기 위해서 면진 테이블은 가능한한 장주기를 가져야 한다. 엄밀하게 말한다면 전시층이 지진에 의하여 움직이는 주된 진동수와 면진테이블의 고유진동수는 가능한한 멀리 떨어져 있어야 한다.

면진테이블의 고유진동수는 다음과 같이 곡률반경과 중력가속도에 의하여 결정된다.⁽¹⁾

$$f_0 = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{g}{R}} \quad (1)$$

여기서 g는 중력가속도이며 R은 면진테이블의 곡률반경이다. 그러므로 곡률반경이 4m인 면진 테이블은 고유진동수가 약 0.25Hz가 된다. 박물관과 같이 3~5층 내외의 건물의 1차 모드 고유진동수가 2~3Hz라고 가정한다면 본 면진테이블은 상당히 큰 격리 효과를 가진다고 볼 수 있다.

2.2.2 마찰댐퍼의 등가감쇠비

면진 테이블의 감쇠는 마찰댐퍼를 이용하였다. 감쇠장치가 없는 경우에는 지진의 미소진동이나 부주위한 타격에 의하여 면진 테이블위의 전시대에 불필요한 진동이 발생한다. 이러한 진동을 방지하고, 감쇠가 작은 경우 지진발생시 설계 스트로크를 초과할 가능성이 있으므로 적절한 수준의 감쇠가 요구된다.

면진테이블에 사용되는 마찰댐퍼는 이상적인 쿨롱댐퍼의 특성을 가지며 다음과 같이 나타낼 수 있다.⁽²⁾

$$F_c = -C_c \text{sign}(\dot{x}) = -C_c \frac{\dot{x}}{|\dot{x}|} \quad (2)$$

여기서 C_c 는 댐퍼 마찰력의 크기이며 $\text{sign}(\cdot)$ 는 부호를 나타내는 함수, \dot{x} 는 속도를 나타낸다. 마찰댐퍼가 설치된 1자유도 시스템과 운동방정식이 그림 3과 식 (3)에 나타나 있다.

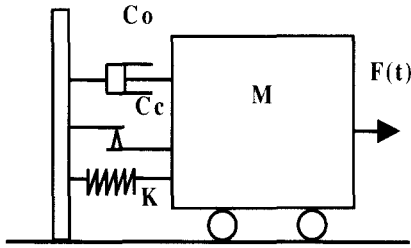


그림 3 1자유도 면진시스템 모델링

$$\ddot{x} + 2\xi_o \omega_o \dot{x} + \omega_o^2 x = -\frac{C_c}{M} \text{sign}(\dot{x}) + \bar{f} \quad (3)$$

여기서, C_o , C_c , K , M , $F(t)$ 는 각각 선형댐퍼의 크기, 쿨롱 댐퍼의 크기, 강성, 질량 및 외란을 나타내며, ξ_o , ω_o , \bar{f} 는 각각, 선형댐퍼에 의한 감쇠비, 고유진동수, 외란을 질량으로 나눈 값이다. 면진테이블에서 선형댐퍼의 크기를 무시한다면 식 (3)의 좌변 두 번째항은 소거되며, 본 시스템은 쿨롱 댐퍼에 의하여 운동이 지배되는 비선형 시스템이 된다. 만약 외란이 정상확률분포를 가지고 확률적으로 일정한 분산의 크기를 가진다면 식 (3)은 다음과 같은 등가의 감쇠비 (ξ_{eq})를 가지는 선형시스템으로 치환할 수 있다.

$$\ddot{x} + 2\xi_{eq} \omega_o \dot{x} + \omega_o^2 x = \bar{f} \quad (4)$$

여기서 등가감쇠비 ξ_{eq} 는 다음과 같은 등가 감쇠비의 정의로부터 구할 수 있다.⁽³⁾

$$\xi_{eq} = \frac{1}{2\omega_o} \frac{2\left(\frac{C_c}{M} E\left[\frac{\dot{x}^2}{|\dot{x}|}\right]\right)}{\omega_o^2 E[x^2] + E[\dot{x}^2]} \quad (5)$$

구조물의 속도와 변위는 서로 독립이고 응답이 협소 진동수 대역 과정(narrow band process)이므로 다음과 같은 식을 만족한다.

$$E[x\dot{x}] = 0, \sigma_{\dot{x}}^2 = E[\dot{x}^2] = \omega_o^2 E[x^2] \quad (6)$$

식 (6)을 식 (5)에 대입하고 정리하면 다음과 같다.

$$\xi_{eq} = \frac{1}{2\omega_o M} \frac{C_c E[|\dot{x}|]}{E[x^2]} \quad (7)$$

만약 속도가 평균이 '0' 이고 표준편차가 $\sigma_{\dot{x}}$ 를 가지는 가우시안 확률분포라면 $E[|\dot{x}|]$ 는 다음과 같이 나타낼 수 있다.⁽⁴⁾

$$\begin{aligned} E[|\dot{x}|] &= 2 \int_0^{\infty} \frac{\dot{x}}{\sqrt{2\pi} \sigma_{\dot{x}}} \exp\left(-\frac{\dot{x}^2}{2\sigma_{\dot{x}}^2}\right) d\dot{x} \\ &= \sqrt{\frac{2}{\pi}} \sigma_{\dot{x}} \end{aligned} \quad (8)$$

식 (8)를 식(7)에 대입하고 정리하면 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$\xi_{eq} \sigma_{\dot{x}} = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \frac{C_c}{\omega_o M} \quad (9)$$

식 (9)으로부터 마찰댐퍼에 의한 등가 감쇠비는 응답에 반비례하는 것을 알 수 있다. 이것은 마찰댐퍼의 특성상 항상 일정한 양만큼 에너지를 소산하기 때문에 응답이 커지는 경우에는 상대적으로 에너지 소산능력이 작게 되며 그 역인 경우에는 매우 큰 감쇠역할을 하는 것을 알 수 있다.

2.2.3 면진테이블의 감쇠 특성

건물에 설치된 면진테이블을 모델링한 것이 그림 4에 나타나 있다.

그림 4와 같은 시스템의 운동방정식은 다음과 같다.

$$\begin{aligned} M\ddot{x} + C_o\dot{x} + K_o x + k(x-y) + c_d \text{sign}(\dot{x}-\dot{y}) &= F(t) \\ m\ddot{y} + c_d \text{sign}(\dot{y}-\dot{x}) + k(y-x) &= 0 \end{aligned} \quad (10)$$

여기서, M , C_o , K_o 는 각각 건물의 질량, 감쇠상수, 강성을 나타내며, m , c_d , k 는 각각, 면진테이블과 전시대의 질량, 마찰댐퍼의 크기, 강성을 나타낸다. y , x 는 각각 면진테이블의 변위, 건물의 변위를 나타낸다.

면진테이블과 전시대의 질량은 건물의 질량에 대하여 무시할 수 있을 정도로 작기 때문에 독립된 두 개의 시스템으로 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$\begin{aligned} M\ddot{x} + C_o\dot{x} + K_o x &= F(t) \\ m\ddot{\Delta} + c_d \text{sign}(\dot{\Delta}) + k\Delta &= -m\ddot{x} \end{aligned} \quad (11)$$

여기서 $\Delta=y-x$ 로 면진테이블의 건물에 대한 상대변위를 나타낸다. 이러한 시스템을 모델링한 것이 다음 그림 5에 나타나 있다.

만약 식(9)와 같이 마찰댐퍼가 등가감쇠비로 등가 치환이 가능하며 그 등가감쇠비를 ξ_2 라 한다면, 식 (11)은 다음과 같이 나타낼 수 있다.

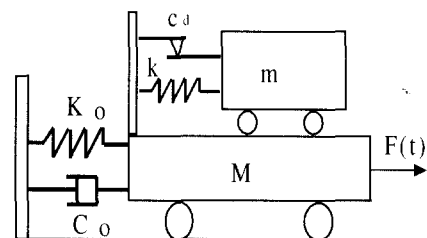


그림 4 건물에 설치된 면진테이블

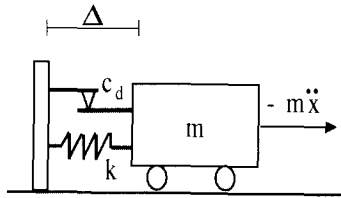


그림 5 단순 치환된 면진테이블

$$M\ddot{x} + C_o\dot{x} + K_o x = F(t)$$

$$m\ddot{\Delta} + 2\xi_2 w_1 m \dot{\Delta} + k \Delta = -m\ddot{x} \quad (12)$$

면진테이블의 상대변위 Δ 의 평균제곱은 다음과 같이 나타낼 수 있다.⁽⁵⁾

$$E[\Delta^2] = \frac{\pi S_o}{2\xi_1 w_1^3} \frac{\xi_1}{\xi_2 \gamma^3} \times \frac{1 + \gamma^3(\xi_2/\xi_1) + 4\gamma[\xi_1\xi_2(1 + \gamma^2) + \gamma(\xi_1^2 + \xi_2^2)]}{(1 - \gamma^2)^2 + 4\gamma[\xi_1\xi_2(1 + \gamma^2) + \gamma(\xi_1^2 + \xi_2^2)]} \quad (13)$$

여기서 w_1 , ξ_1 은 건물의 고유 각속도와 감쇠비이며 $\gamma = w_2/w_1$ 이다. S_o 는 건물에 작용하는 외란이 정상상태라고 가정했을 때, 외란의 평균제곱값($2\pi S_o$)이다.

식 (9)으로부터 등가감쇠비와 건물바닥판과 면진테이블의 상대속도 $\dot{\Delta}$ 의 표준편차와의 곱이 일정하므로 등가감쇠비 ξ_2 를 다음과 같이 구할 수 있다.

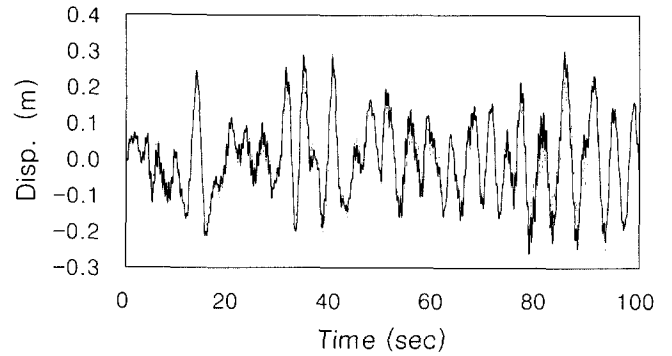
$$\xi_2 \sigma_{\dot{\Delta}} = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \frac{C_d}{w_2 m} \quad (14)$$

마찰댐퍼의 크기에 따른 등가감쇠비를 식 (14)에 대한 수치해석으로 구한 값이 다음 표 1에 나타나 있다. 건물의 진동수는 2Hz, 면진테이블의 진동수는 0.25Hz, 건물의 감쇠비는 0.02로 가정하였으며, $\gamma = 0.25/2$ 이다. 외란으로 사용된 지반가속도는 최대크기가 1m/sec²인 백색잡음을 기본으로 하고, 진폭을 변경하므로써 그 크기를 조정하였다. 본 입력 가속도는 최대크기가 1인 경우 표준편차값은 0.5772m/sec²이며 이에 해당하는 S_o 의 값은 표준편차를 2π 로 나눈 값이 된다. 백색잡음은 MATLAB에서 재생한 것이다.

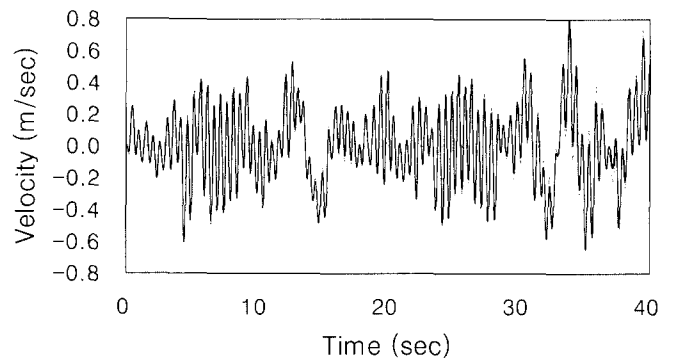
표 1 외란의 크기와 마찰력에 따른 등가감쇠비

외란의 최대값 (m/sec ²)	외란의 표준편차	마찰력 (kgf)	마찰계수	등가감쇠비 (%)
1	0.5772	1kgf	0.5%	27.5
2	1.1544	1kgf	0.5%	7.0
3	1.7317	2kgf	1.0%	12.5
4	2.3088	2kgf	1.0%	7.0
5	2.8860	3kgf	1.5%	10.0
6	3.4632	3kgf	1.5%	7.5
7	4.0404	4kgf	2.0%	9.0
8	4.6176	4kgf	2.0%	7.0

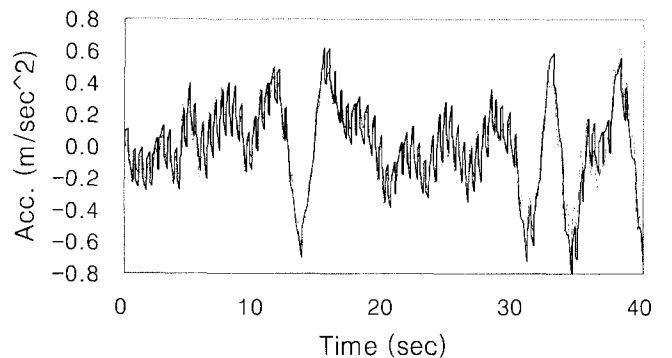
그림 6, 7, 8는 지반가속도 3m/sec²가 작용하고, 마찰력이 2kgf 일 때, 면진테이블의 상대변위와 절대가속도를 마찰댐퍼로 해석한 경우와 등가감쇠비로 치환하여 해석한 결과를 비교한 것이다. 그림에서 보는 바와 같이 외란의 크기가 특정한 값으로 주어진 경우에는 등가감쇠비를 이용하여 해석하여도 큰 차이가 없는 것을 알 수 있다.



Equivalent damping — Friction damping
그림 6 등가감쇠비와 마찰댐퍼에 대한 변위 비교



Equivalent damping — Friction damping
그림 7 등가감쇠비와 마찰댐퍼에 대한 속도 비교



Equivalent damping — Friction damping
그림 8 등가감쇠비와 마찰댐퍼에 대한 가속도 비교

3. 면진테이블의 안전성 및 면진성능

3.1 전시물의 초기모드 판정기준

면진테이블의 상판에 놓이게 되는 전시물 또는 중요 장비들은 다양한 형태의 거동을 나타낼 수 있다. 여기서는 면진

테이블의 서로 직각이 되는 두 방향의 거동이 상호 독립적이라고 가정하여, 그림 9와 같이 전시물을 2차원의 강체블록으로 단순화하여 기술한다. 2차원에서 강체 블록의 거동은 정지(rest), 슬라이드(slide), 전도(rock), 슬라이드-전도(slide-rock), 자유비행(free flight)의 다섯 개 모드로 나타낼 수 있다. 여기에서는 정지, 슬라이드, 전도모드에 대하여 검토한다. 흔히 정지모드에서 처음으로 전이되는 모드가 강체블록의 지배적인 거동을 나타낸다고 가정하기 때문에, 이러한 초기모드의 결정은 강체블록의 동적해석에서 중요한 역할을 하게 된다.⁽⁶⁾ 그리고 면진테이블이 설치되는 전시물 또는 주요장비들의 문화적, 경제적 가치를 고려하면 초기거동 자체를 억제하도록 면진테이블을 설계할 필요가 있다.

3.2 정지 상태(rest state)

그림 9는 면진테이블 상판에 놓인 전시물의 2차원 강체블록 모델을 보여준다. 블록은 질량 m , 질량관성모멘트 I , 폭 $2B$, 높이 $2H$, 높이-폭비 $\gamma = H/B$ 를 가지며, 바닥에서의 수평, 수직 반력은 f_x, f_y 로 나타낸다. ξ 는 블록중심에서 수직반력의 작용점까지의 거리에 해당된다. 블록의 바닥은 평평하며, 수평반력은 정적 마찰계수 μ_s 와 동적마찰계수 μ_k 로 표현되는 쿨롱 마찰력이다. 여기서 $\mu_k < \mu_s$, 블록의 바닥에 대한 상대 변위와 회전은 각각 x, y 와 θ 로 정의한다. 초기모드가 지반 가속도의 크기에만 관계되므로 면진테이블 상판의 가속도를 $\ddot{x}_g = A_x g, \ddot{y}_g = A_y g$ 라고 둔다. 여기서 A_x, A_y 는 최대 가속도, g 는 중력가속도이다. 정지상태에서의 블록의 운동 방정식은 다음과 같다.

$$f_x = m A_x g \tag{15a}$$

$$f_y = m(1 + A_y)g \tag{15b}$$

$$f_x H + f_y \xi = 0 \tag{15c}$$

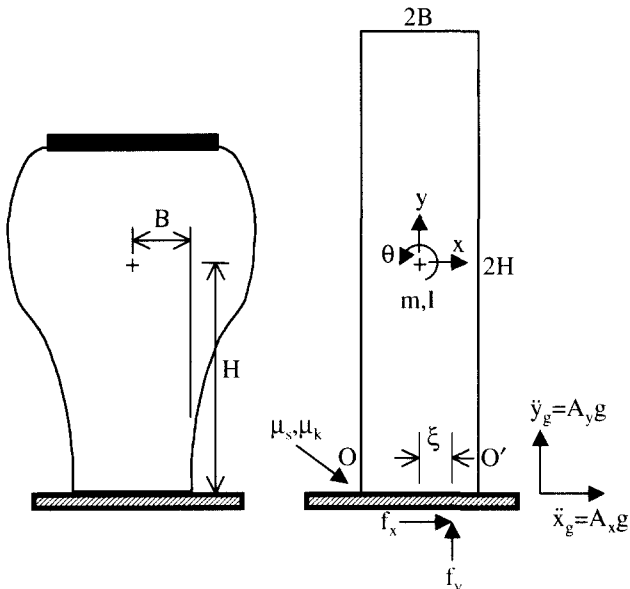


그림 9 2차원 강체블록의 정의

식 (15a), (15b)는 힘의 평형을, 식 (15c)는 블록의 중심에 대한 모멘트의 평형을 나타낸다. 블록의 정지모드가 유지되기 위해서는 세가지 조건이 만족되어야 한다. 즉, 수직반력이 0보다 커야 하고($f_y > 0$), 블록의 수평관성력이 정적마찰력을 초과하지 않아야 하며($|f_x| \leq \mu_s |f_y|$), 수직반력이 블록 하부면 내부에 위치해야 한다($|\xi| < B$). 이로부터 조건식을 유도하면 다음과 같다.

$$1 + A_y > 0 \tag{16a}$$

$$\frac{A_x}{1 + A_y} \leq \mu_s \tag{16b}$$

$$\frac{A_x}{1 + A_y} < B/H \tag{16c}$$

여기서 면진테이블 상판의 수직방향 최대가속도는 $1g$ 를 초과할 확률이 매우 낮으므로 식 (16a)는 항상 만족한다고 가정한다. 이러한 정지모드의 성립조건에 기초하여 다른 모드로 전환되는 경계조건을 설정할 수 있다.

3.3 슬라이드 상태(slide state)

식 (16)의 정지모드의 성립조건으로부터 슬라이드 모드에 대하여 다음을 가정한다.

$$\mu_s < \frac{A_x}{1 + A_y}; \mu_s < B/H \tag{17}$$

슬라이드 모드의 블록은 다음의 운동방정식을 만족해야 한다.

$$- \mu_k S(\dot{x}) f_y = m(\dot{x} + A_x g) \tag{18a}$$

$$f_y = m(1 + A_y)g \tag{18b}$$

$$- \mu_k S(\dot{x}) f_y H + f_y \xi = 0 \tag{18c}$$

여기서 $S(\dot{x}_0)$ sign함수 이다.

블록의 슬라이딩은 수직반력이 0보다 크고($f_y > 0$), 블록하부의 정적마찰력을 초과하여 수평관성력이 발생하고($|f_x| \geq \mu_s |f_y|$), 수직반력이 하부면 내부에 있을 때($|\xi| < B$) 발생한다. 이것은 식 (16a)와 식 (17)의 가정에 의하여 만족된다.

3.5 전도 상태(rock state)

식 (16)의 전도모드의 성립조건으로부터 블록의 전도에 대하여 다음을 가정한다.

$$B/H < \frac{A_x}{1 + A_y}; B/H < \mu_s \tag{19}$$

면진테이블 상판의 양의 가속도에 대하여 반력은 O 지점에

작용한다. O 지점에 대하여 전도모드가 시작되는 순간($\theta \approx 0$)의 운동방정식은 다음과 같다.

$$f_x = m(\ddot{x} + A_x g) \quad (20a)$$

$$f_y - mg = m(\ddot{y} + A_y g) \quad (20b)$$

$$f_x H - f_y B = I \ddot{\theta} \quad (20c)$$

전도가 시작될 때의 수평, 수직방향의 가속도와 회전각속도는 $\ddot{x} = -H\ddot{\theta}$, $\ddot{y} = B\ddot{\theta}$ 의 관계를 가진다.

$I = m(B^2 + H^2)/3$ 와 함께 이를 식 (20)에 대입하고 f_x , f_y , $\ddot{\theta}$ 에 대하여 정리하면 다음과 같다.

$$f_x = \frac{mg[4A_x + 3(1 + A_y)\gamma + A_x \gamma^2]}{4(1 + \gamma^2)} \quad (21a)$$

$$f_y = \frac{mg[3A_x \gamma + (1 + A_y)(1 + 4\gamma^2)]}{4(1 + \gamma^2)} \quad (21b)$$

$$\ddot{\theta} = \frac{3g[A_x \gamma - (1 + A_y)]}{4B(1 + \gamma^2)} \quad (21c)$$

전도모드가 발생하기 위해서는 세가지 조건을 추가로 만족해야 한다. 먼저 면진테이블의 구속조건 때문에 회전각속도는 0보다 커야 한다($\ddot{\theta} > 0$). 그리고 수직반력이 0보다 커야 하며($f_y > 0$), 블록이 회전하기 시작하는 순간의 수평관성력이 정적마찰력을 초과하지 않아야 한다. 가정에 의하여 $B/H = 1/\gamma < A_x / (1 + A_y)$ 이므로 $\ddot{\theta}$ 는 0보다 크고, 따라서 $f_y > 0$ 이 성립한다. 식 (21)의 f_x , f_y 를 이용하여 $|f_x| \leq \mu_s |f_y|$ 이 되기 위한 조건을 구하면 다음과 같다.

$$\left| \frac{f_x}{f_y} \right| = \left| \frac{4A_x + 3(1 + A_y)\gamma + A_x \gamma^2}{3A_x \gamma + (1 + A_y)(1 + 4\gamma^2)} \right| \leq \mu_s \quad (22)$$

식 (22)는 전도모드가 발생하기 위해서 추가로 만족되어야 할 조건이다. 식 (22)의 왼쪽항의 값이 정적마찰계수보다 클 경우 전도와 동시에 슬라이딩이 발생할 수 있다.

4. 진동대 실험

4.1 계측 방법

진동대 가진에 의하여 면진테이블의 거동을 계측하기 위한 시스템이 그림 10에 나타나 있다. 가속도계는 2방향 진동대의 진동을 측정하기 위한 것, 면진테이블 상판의 가속도를 측정하기 위한 것과 전시물이 놓이는 전시대 두방향을 계측하기 위하여 총 6개의 단방향 가속도계를 사용하였으며, 면진테이블의 상대 변위를 측정하기 위하여 3개의 양방향 광학식 변위계를 사용하였다.(표 2)

그림 11은 진동대실험에 사용된 면진테이블과 전시대를 나타낸다. 면진효과를 비교하기 위하여 면진시스템이 설치된 전시대와 일반 전시대를 비교하여 나타낸 것이다.

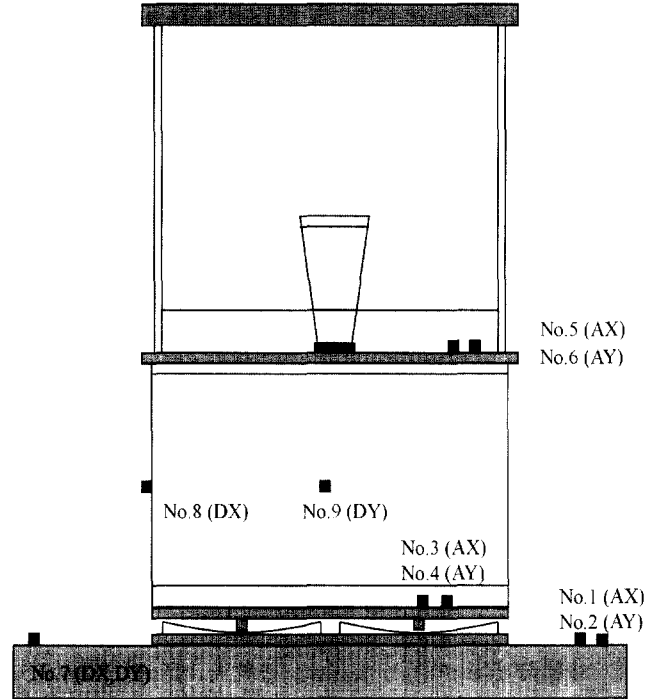


그림 10 면진테이블 계측시스템

표 2 계측 위치

번호	계측기 종류	측정 위치	측정 방향	계측 물리량
No.1 Ax	가속도계 1	진동대 위	x	진동대 가속도
No.2 Ay	가속도계 2	진동대 위	y	진동대 가속도
No.3 Ax	가속도계 3	테이블상판	x	테이블 상판절대가속도
No.4 Ay	가속도계 4	테이블상판	y	테이블 상판절대가속도
No.5 Ax	가속도계 5	전시대	x	전시대 절대가속도
No.6 Ay	가속도계 6	전시대	y	전시대 절대가속도
No.7 Dxy	변위계 1	진동대 위	x, y	진동대 변위
No.8 Dx	변위계 2	면진테이블	x	면진테이블 변위
No.9 Dy	변위계 3	면진테이블	y	면진테이블 변위



그림 11 면진시스템 진동대 실험

4.2 가진 방법

진동대 입력신호로는 건물의 고유진동수 2~3Hz에 해당하는 정현파와 1940년에 발생한 El Centro 지진이력에 대한 건물의 응답을 수치적으로 계산하여 이 응답을 사용하였다. 정현파의 경우 구조물의 진동수를 대표하는 수개의 진동수를 단계적으로 적용하며, 지진파 가진실험의 경우 실제 지진에 의해 발생하는 구조물의 가속도에 scaling하여 적용하였다. 다음 표 3은 실험에 사용된 면진테이블의 동적 특성이다.

표 3 면진테이블의 동적 특성

면진테이블 특성	값	비고
고유주기	4.01sec	진동수 : 0.25Hz
마찰담퍼의 크기	4-6kgf	
테이블의 총질량	200kg	테이블상판과 전시대
마찰계수	2-3%	

4.2.1 정현파 가진

정현파 가진의 진동수는 2~3Hz 사이의 값으로 2.0Hz, 2.5Hz, 3.0Hz를 사용하였으며 그 최대크기는 400gal이 되도록 하였다. X, Y 양방향 가진시 정현파의 위상차는 90도 정하였다. 다음 표 4는 정현파 가진 진동수와 그 크기를 나타낸다.

표 4 정현파 가진 방법

정현파 진동수	최대 가속도	방 향	양방향 위상차
2.0Hz	400gal	단방향 (x, y) 및 양방향	90도
2.5Hz	400gal	단방향 (x, y) 및 양방향	90도
3.0Hz	400gal	단방향 (x, y) 및 양방향	90도

4.2.2 El Centro 지진파 가진

지진에 대한 건물의 응답은 국내의 내진 설계 기준인 지반 최대 가속도 0.12g가 되도록 El Centrol 지진을 스케일 한 다음 해석하였고, 이때의 건물의 응답을 진동대의 입력으로 사용하였다. 다음 표 5는 국내의 내진설계기준이 최대 가속도 0.12G가 2-3Hz의 진동수를 가지는 건물에 작용하였을 때의 수치해석에 의한 최상층의 최대 가속도를 나타낸다. 양방향 가진의 경우에는 x, y방향이 각기 다른 진동수를 가진다고 가정한 후 수치해석에서 구한 응답을 진동대 입력으로 사용하였다. 최대가속도는 점증적으로 증가시켜 최대 500gal이 되는 수준까지 적용하였다.

표 5 지진파 가진방법

건물의 진동수	건물의 감쇠비	최 대 가속도	가진 방향
2.0Hz	2%	451gal	- 단방향(x, y) - 양방향(x : 2.0Hz, y : 2.5Hz)
2.5Hz	2%	352gal	- 단방향(x, y) - 양방향(x : 2.5Hz, y : 3.0Hz)
3.0Hz	2%	410gal	- 단방향(x, y) - 양방향(x : 3.0Hz, y : 3.5Hz)

4.2.3 전시물의 전도 임계값

진동하는 구조체 위에 놓여있는 강체 블럭의 거동에 대한 연구로부터 전시물의 전도 및 슬라이드에 대한 예측이 가능하다.⁽⁷⁾ 진동대실험에 사용되는 전시물을 그림 9와 같이 치환하는 경우 B/H의 값이 1/4가된다. 전시물과 전시대사이의 마찰은 매우 크므로 식 (17)에 의하여 슬라이딩은 발생하지 않는 것으로 가정한다. 전시물의 전도에 대하여는 식 (19)에 의하여 $f_y=0$ 인 경우, 바닥판의 진동 가속도가 0.25g 이상인 경우에 발생한다.

4.3 실험 결과

4.3.1 정현파 가진 결과

그림 12, 13는 정현파를 진동대에 입력했을 때의 전시대의 상대변위와 가속도를 나타내는 결과이다.

표 6은 정현파 가진방법에 따른 실험 결과를 요약한 것이다. 정현파 가진의 경우 면진 테이블의 가속도가 진동대의 최대가속도에 비하여 약 90%의 제어효과를 가지는 것으로 나타났다.

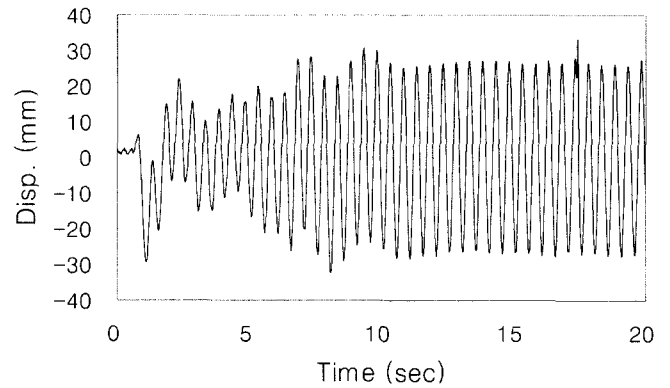
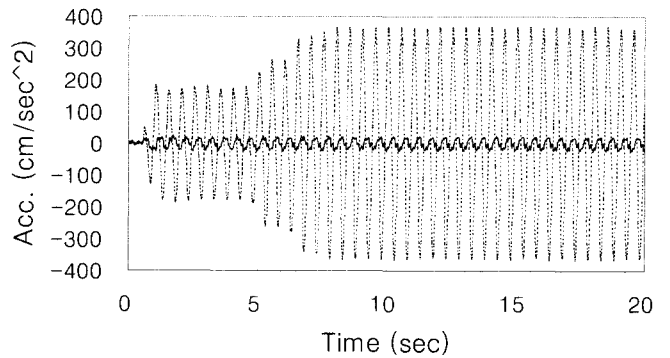


그림 12 X 단방향 면진테이블의 상대변위



..... 진동대가속도 — 면진테이블가속도

그림 13 진동대와 전시대의 절대 가속도 비교

표 6 정현파 가진 실험 결과

가진 방향	진동대 최대 가속도(gal)	전시대 최대 가속도(gal)	상대변위 (mm)	가속도 제어율(%)
x 방향가진	365	27	21.8	94
y 방향가진	242	34.6	33.8	86
양방향 가진	x	24	18.8	93
	y	242	41	43.4

4.3.2 El Centro 지진파 가진 결과

다음 그림 14, 15는 지진에 의한 건물의 응답을 진동대에 입력했을 때, 면진테이블의 상대변위와 가속도를 나타내는 결과이다.

표 7은 지진파 가진방법에 대한 실험결과를 요약한 것이다. 면진 테이블의 가속도는 진동대의 가속도에 비하여 80% 이상의 진동제어효과를 가지는 것으로 나타났다.

정현파가진이나 지진파가진의 경우 y 방향에 대하여 더 작은 입력가속도에 대하여 전시대의 가속도뿐만아니라 상대변위 또한 크게 나타난다. 이것은 x, y 방향의 마찰면의 성질이 서로 달라 y 방향의 마찰력 크기가 작기 때문인 것으로 판단된다.

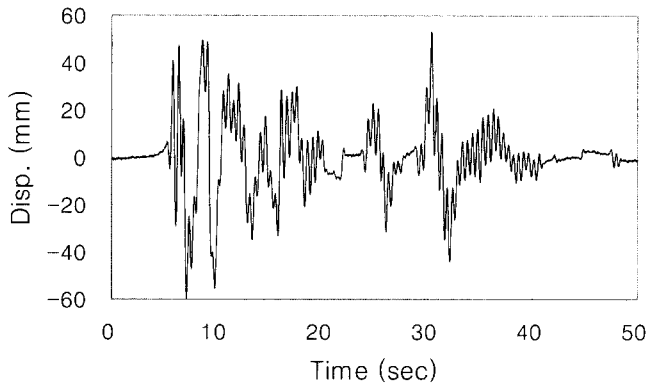
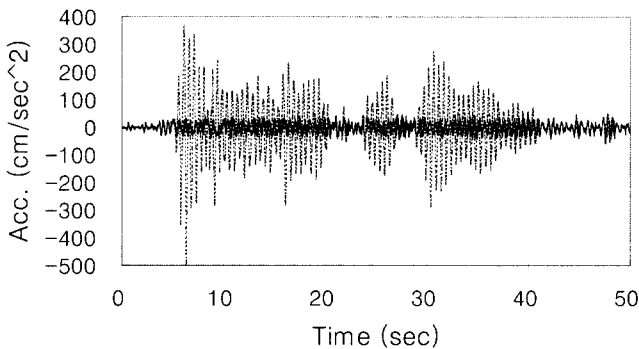


그림 14 X 단방향 면진테이블의 상대변위



..... 진동대가속도 — 면진테이블가속도

그림 15 진동대와 전시대의 절대 가속도 비교

표 7 지진에 의한 건물의 응답 가진 실험 결과

가진 방향	진동대 최대 가속도(gal)	전시대 최대 가속도(gal)	상대변위 (mm)	가속도 제어율(%)	
x 방향 가진	510.62	42.93	61.03	91.6	
y 방향 가진	321.18	55.6	104.5	83	
양방향	x	517.43	32.54	74.46	93
	y	321.18	53.9	131.87	83

5. 결 론

국내 최초로 설계, 제작된 면진테이블에 대한 진동대 실험을 수행하여 본 장치의 안정성과 면진성능을 고찰하였다. 그 결과는 다음과 같다.

- 1) 국내의 내진설계기준인 지반최대 가속도 0.12g인 지진, 또는 그 이상의 지진이 2~3Hz 건물에 작용하였을 때, 면진테이블에 의한 전시대의 최대 가속도는 면진 전의 가속도에 비하여 약 80~90%의 진동 저감효과를 가지는 것으로 나타났으며, 면진 테이블의 설계스트로크 24cm에 대하여 최대 13.2cm의 스트로크가 발생 매우 안정적으로 거동하는 것으로 나타났다.
- 2) 면진테이블에 사용된 마찰댐퍼는 외란의 크기가 정해진 경우, 등가의 감쇠비를 가지는 선형댐퍼로 치환할 수 있다. 선형 댐퍼의 경우 감쇠비가 15% 이상인 경우에 만족할만한 면진성능을 가지는 것으로 나타나, 본 장치는 마찰댐퍼를 사용하는 것이 더 유리한 것으로 나타났다.

참 고 문 헌

1. Clough, R. W. and Renzien, J., *Dynamics of Structure*, Mac Graw Hill, 1993.
2. James, M. L. and Smith, G. M., *Vibration of Mechanical and Structural Systems*, Harper Collins College Publishers, Second Edition, 1994.
3. 황재승, 이상현, 황종국, "제진장치에 의한 구조물의 등가 감쇠비 산정에 관한연구", 대한건축학회 논문집 구조계, 제17권, 제5호(통권 151), 2001. 5, pp. 19-26.
4. Nigam, N. C., *Introduction to Random Vibrations*, The MIT Press, 1983.
5. Stephen, H. and Mark, C. W. D., *Random Vibration in Mechanical Systems*, Academic Press, 1973.
6. Harry, W. and Shenton III, "Criteria for initiation of slide, rock, slide-rock rigid-body modes," *Journal of Engineering Mechanics*, Vol. 122, No. 7, July 1996, pp 690-693.
7. 김재관, 채윤병, "격리받침위에 놓인 slender 강체 블록의 동적거동", 한국지진공학회 춘계학술발표회 논문집, Vol. 4, No. 2, 2000. 9, pp. 448-454.