

섬유보강 면진베어링의 실험적 특성 해석

An Experimental Study on Fiber Reinforced Elastomeric Bearing

문 병 영*
Moon, Byung Young

강 경 주**
Kang, Gyung Ju

강 범 수***
Kang, Beom Soo

김 계 수****
Kim, Kye Soo

국문요약

면진베어링으로 기존에 사용되고 있는 철판보강 면진베어링에서 철판을 섬유로 대체하여 섬유보강 면진베어링을 설계 및 제작하였다. 섬유면진보강베어링의 특성을 파악하기 위해서 철판보강 면진베어링과 섬유보강 면진베어링에 대해 수평실험과 압축실험을 수행하였다. 시험결과 섬유보강 면진베어링의 유효 감쇠는 천연고무 면진베어링에 비해서 높았다. 이 결과는 지진하중하에서 섬유보강 면진베어링은 에너지 분산능력이 뛰어나다는 것을 의미한다. 이 연구결과로 인해 섬유보강 면진베어링이 저가건물에 널리 사용될 수 있을 것으로 기대된다.

주요어 : 섬유보강 면진베어링, 천연고무 면진베어링, 수평강성, 수직강성, 유효강성, 등가감쇠

ABSTRACT

In order to study the characteristics of fiber reinforced bearing, the steel plates of laminated rubber bearing were replaced with fibers which have same effects of steel plates. The comparison of vertical test and horizontal test of laminated rubber bearing and fiber reinforced bearing shows that the effective damping of fiber reinforced bearing is higher than laminated rubber bearing. This result implies the high energy dissipation ability of fiber reinforced bearing under earthquake excitation. These fiber reinforced bearing can be applied to the low-cost building.

Key words : FRB(fiber reinforced bearing), NRB(natural rubber bearing), horizontal stiffness, vertical stiffness, effective stiffness, effective damping

1. 서 론

지진은 자연재해중 인명과 재산에 많은 손실을 가져오므로 이에 대한 관심과 지속적인 연구가 진행되어 왔다. 특히 최근의 인도지진, 티키지진등에서 피해의 80~90%는 저층 건물과 일반건물에서 발생하였다. 이런 건물들은 잘 부서지는 재료를 사용하고 있으며, 무게가 무거운 특성이 있어 지진시 건물의 붕괴와 함께 피해를 동반하게된다. 이러한 지진의 피해를 줄이기 위해서 건물에 진동제어가 사용되고 있다. 진동제어방법으로는 크게 수동제어방법과 능동제어 방법이 있다. 수동제어방법은 에너지 소산형 감쇠기사용방법과 면진베어링의 사용 방법이 있다. 감쇠기를 사용하는 경우에는 점탄성감쇠기, 점성유체감쇠기, 마찰감쇠기들을 사용하여 지진의 에너지가 건물에 전달되는 양을 줄이게 되는 방법이다. 이 방법은 고층건물에 적용되기에 적합하며, 저층건물에는 면진베어링이 사용되고 있으며, 지진에 대한 면진베어링의 성능은 뛰어나며 이에 대한 연구가 많이 수행되고 있다.⁽¹⁾⁻⁽⁴⁾ 그러나, 현재 사용되어지는 면진 베어링은 고가에 고중량이어서 설치시 설치장비를 사용하여야 한다는 단점을 가지고 있음으로 중량을 낮추어 손쉽게 설치하게되면 설치비용을 절감하게 되어 지진시 많은 피해가 발생하는 일반주택에 보

다 용이하게 적용할 수 있다. 그러므로 지진 대비용 면진 베어링의 광범위한 적용을 위해서는 가격과 중량면에서 많은 개선이 선행되어야 한다. 지금 널리 사용되고 있는 철판보강 면진베어링의 높은 가격과 무게는 주로 면진베어링의 수직 강성을 높이기 위해 사용된 철판의 사용과 철판과 고무를 적층하는 여러 단계의 제조공정에 기인한다. 가벼우면서도 수직강성을 유지할 수 있는 재료인 복합재료를 사용하여 베어링 자체의 수직 강성은 유지하면서 가격 및 무게 면에서의 단점을 보완할 수 있다. 이와 같은 섬유보강 면진베어링에 대해서 이론적으로 수직강성을 구할 수 있는 식이 Kelly⁽⁵⁾에 의해 제안되었으며 섬유보강 면진베어링을 제작한 바있다. 그러나, 철판보강 면진베어링과의 비교검토는 수행되지 않았다. 이에 본 논문에서는 섬유보강 면진베어링의 특성을 파악하기 위해서 철판보강 면진베어링과 같은 사이즈의 섬유보강 면진베어링을 설계하고 제작하였으며, 각각의 면진베어링에 대해서 수평실험과 압축실험을 수행하여, 수직강성과 면진베어링의 감쇠성능을 비교 검토하였다.

2. 면진베어링의 해석모델

섬유보강 면진베어링의 특성을 파악하기 위하여 먼저, 기존의 철판보강 면진베어링과 동일한 규모의 섬유보강 면진베어링을 모델링하였고, 제작하였다. 기존의 철판보강 면진베어링과 섬유보강 면진베어링의 성능을 비교하기 위해서, 철판보강 면진베어링의 성능 시험으로 수행되는 수평실험과 압축실험을 섬유보강 면진베어링에 대해서도 수행하여 두 면진베어링의 성능을 비교하였다.

* 정회원 · 부산대학교 항공우주공학과, 연구원
(대표저자 : moon_byung_young@hotmail.com)

** 학생회원 · 부산대학교 항공우주공학과, 박사과정

*** 부산대학교 항공우주공학과, 교수

**** 동일교부벨트(주), 부장

본 논문에 대한 토의를 2002년 4월 30일까지 학회로 보내 주시면 그 결과를 게재하겠습니다.
(논문접수일 : 2001. 9. 29 / 심사종료일 : 2001. 12. 6)

2.1 철판보강 면진베어링모델

철판보강 면진베어링은 고무와 철판의 적층구조로 이루어져 있다. 상부 구조물로부터 하중이 베어링에 가해질 때 철판은 고무가 옆으로 퍼지지 않도록 하여, 수직 강성을 유지시켜준다. 지반이 움직일 때 고무는 지반의 움직임을 상부 구조물에 그대로 전달되지 않도록 해주는 역할을 한다. 면진 베어링에서 수평강성과 수직 강성은 면진베어링의 중요한 성능이 된다. 면진 베어링의 수평강성(K_H)과 수직강성(K_V)은 다음과 같은 식으로 주어진다.

$$K_H = \frac{GA}{t_r} \quad (1)$$

$$K_V = \frac{E_c A}{t_r} \quad (2)$$

여기서, G 는 고무의 탄성계수, A 는 베어링의 단면적, t_r 은 베어링내 고무의 총 두께를 나타낸다. 그리고, E_c 는 철판로 보강된 면진 베어링에 특정한 수직 하중이 가해졌을 때의 순간적인 압축 강성이다. 단순히 고무층만의 E_c 는 아래의 식으로 정의되어진 형상 계수(S)로 제어되어 진다.

$$S = \frac{\text{loaded area}}{\text{forced-free area}} \quad (3)$$

반경이 R 이고, 두께가 t 인 원형 Pad의 형상 계수(S)는, $S=R/2t$ 가 된다. 철판보강 면진 베어링 모델은 그림 1과 같다.

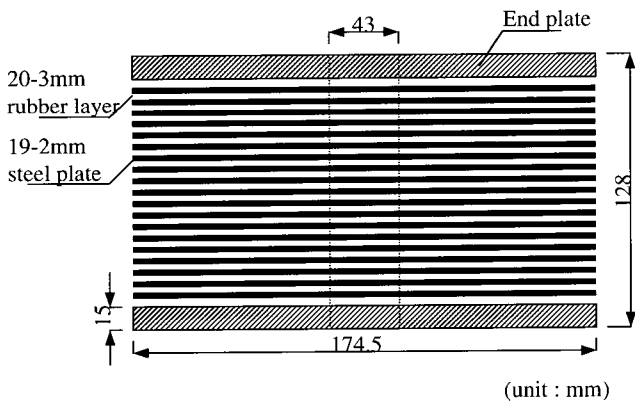


그림 1 NRB(natural rubber bearing)의 실험모델

2.2 섬유보강 면진구조모델

철판보강 면진베어링은 고가이고 무겁기 때문에, 일반주택에 용이하게 설치하기가 어렵다. 이는 주로 철판에 의한

복잡한 공정과 무게에 기인한다. 철판과 같이 수직하중에 대해 강성을 가지면서 가벼운 재료로서 섬유를 철판에 대체해서 면진베어링을 제작할 경우, 무게와 단가면에서 생산비를 절감할 수 있고 따라서 일반주택에 용이하게 설치할 수 있다. 이에 본 논문에서는 철판을 대체한 섬유보강 면진베어링에 대한 해석 모델을 설계하였다. 철판을 대신하여 철판보다 유연한 섬유를 보강판으로 대체하였을때의 수직강성은 식 (2)와 같다. 단 이때, 유효 압축탄성계수는 다음식으로 나타내진다.⁽⁷⁾

$$E_c = 6GS^2 \left(1 - \frac{6+\nu}{24(1+\nu)} \alpha^2 R^2 \right),$$

$$\alpha^2 = \frac{12(1-\nu^2)G}{E_f t_f t} \quad (4)$$

여기서, G 는 고무의 전단탄성계수이며, ν 는 프와송비, t 는 고무층의 두께, E_f 는 보강체의 탄성계수, t_f 는 보강체의 두께, S 는 형상계수이다. 한편 보강체가 강체일 경우에는 $E_c=6GS^2$ 가 된다. 따라서 보강체가 유연할 경우에는 유효 압축강성은 줄어들며, 따라서 수직강성이 줄어들게 됨을 알 수가 있다. 그림 2는 섬유보강 면진 베어링의 모델을 보여준다. 면진을 위해서 기존에 사용하던 철판보강 면진베어링과 나일론 계열의 섬유보강 면진베어링의 성능을 비교하기 위해서 철판을 대체하여 섬유를 사용하였다. 그 제원은 표 1과 같다.

3. 실험 및 고찰

면진장치로서 기존에 사용되어지는 철판보강 면진베어링과 섬유보강 면진 베어링의 성능을 비교하기 위해서 두가지 면진베어링에 대한 실험을 수행하였다.

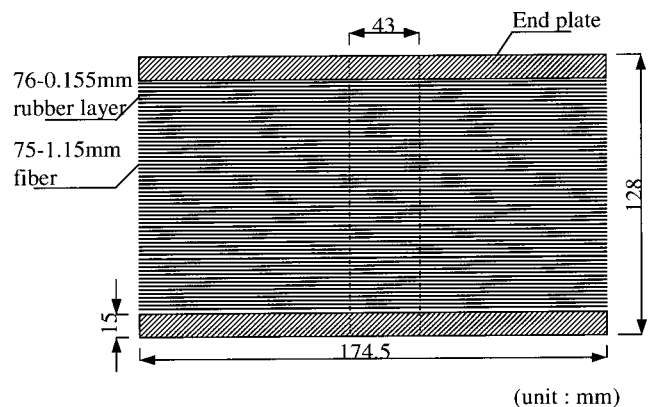


그림 2 FRB(fiber reinforced bearing)의 실험모델

표 1 NRB와 FRB의 치수

	Dimension	Isolator section			
		Reinforcement	End plate	Inner rubber layer	Total thickness of rubber
NRB	174.5 ^φ ×43 ^φ ×128T	2T×19EA	15T×2EA	3T×20EA	60T
FRB	174.5 ^φ ×43 ^φ ×128T	1.15T×75EA	15T×2EA	0.155T×76EA	11.75T

3.1 섬유보강 면진베어링의 제작

기존의 철판보강 면진베어링은 철판과 고무의 적층으로 이루어져 있다. 섬유보강면진고무에 필요한 성능은 지진시 지진주파수를 장주파수로 변환시키기 위해 신장율이 높아야 하며, 높은 응력에서도 견딜 수 있는 높은 인장 강도를 가지도록 설계되어야 한다. 이러한 섬유보강 면진베어링 개발을 위해 천연고무를 원료고무로 한 기초배합을 수 차례 거듭하였으며, 인장강도 실험, 신장율 실험, 경도실험, 인열실험, 오존저항 실험 등을 수행하였다. 노화후의 인장강도 및 신장율, 경도실험을 수행하였다. 이 실험은 60년에 상당하는 기간동안 고무의 내구성을 보증하기 위한 시험으로서 시험편의 노화축진조건은 $70^{\circ}\text{C} \times 168\text{hr}$ 이며, 시험방법은 KS M 6518에 의하여 실시하였으며, 결과는 인장강도 $279\text{kgf}/\text{cm}^2$, 신장율 520%, 경도 61(Shore A)를 얻었다. 이에 의해 노화후의 인장강도, 신장율, 경도에서 타당한 고무로서 선정할 수 있었다. 사용한 섬유직물의 물리적 특성은 표 2와 같다.

이와 같은 고무재료에 의해 섬유보강 면진베어링은 철판보강대신에 섬유를 사용하여 성형하였다. 성형된 면진베어

표 2 보강섬유와 보강철판인 물리적성능 비교

항 목	섬유직물	비 고 (보강철판)
절단시 인장력	$2000\text{kgf}/\text{cm}^2$	$4082\text{kgf}/\text{cm}^2$ 이상
절단시 신율	30~35%	21%이상
특기사항	시험치	문헌상의 값임

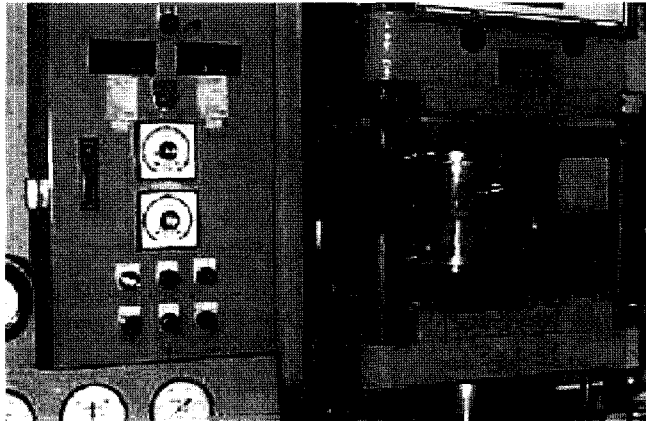


그림 3 면진베어링 몰딩과정

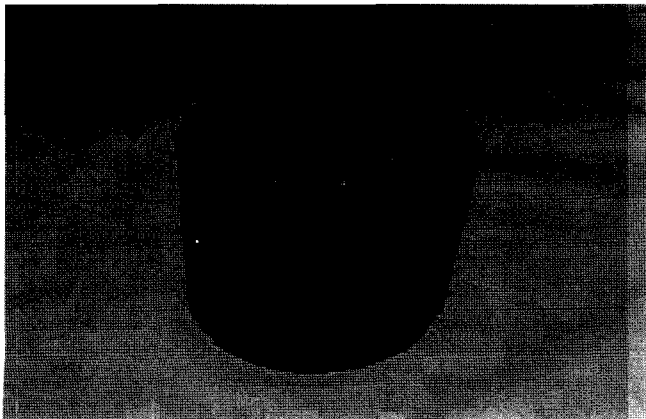


그림 4 FRB 완성품

링은 몰드조립하여 열과 압력을 가하여 가황공정을 거치게 된다. 그림 3은 가황공정을 보여주고 있다. 가황공정에서 고무에 배합된 유황이 고무분자와 화학결합해서 고무 특유의 탄성이 발생한다. 완성된 제품의 형상은 그림 4와 같다.

3.2 시험장치 및 방법

완성된 제품은 시험하기 위해서 지그와 결합하여야 한다. 그림 5에서는 제품과 지그가 결합된 형태를 보여주고 있다. 면진 베어링 시험기는 그림 6과 같이 세 개의 부분으로 이루어져 있다. 수직방향의 구동기를 지탱하는 부분, 수평방향의 구동기를 지탱하는 부분, 하중을 수직 구동으로부터 베어링으로 전달하는 부분으로 이루어져 있다. 이 시험기를 이용하여 섬유보강 면진베어링의 수평실험, 압축실험을 수행하였다.

3.3 수평실험

압축실험과 수평실험은 일반적으로 싸이클 테스트를 통해서 얻어진 각 히스테리 곡선의 유효 탄성계수와 등가 감쇠를 계산하게 된다. 본 시험에 사용한 싸이클은 정현파를 사용하였으며, 진동수는 0.02Hz 이고, 4번의 싸이클로 시험을 수행하였다. 베어링의 유효 수평강성과 등가감쇠는 수평동적 시험에서 가장 중요한 요소이다. 이런 값들은 수평방향의 변위와 수평방향 전단력의 관계로 그래프를 그려봄으로써 구할 수 있다. 이 힘-변형 관계는 이력형태를 보여준다.

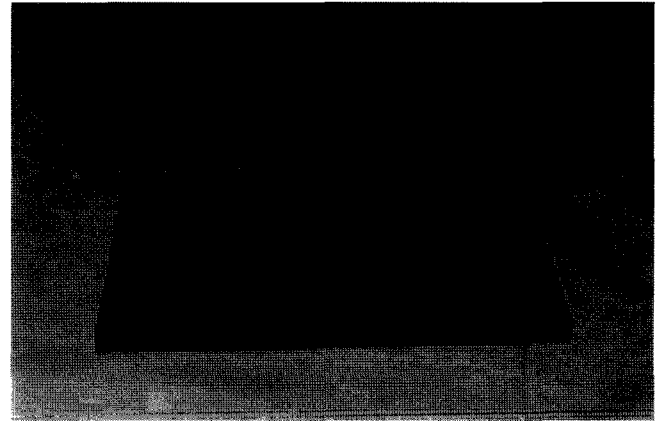


그림 5 실험을 위한 지그와의 결합

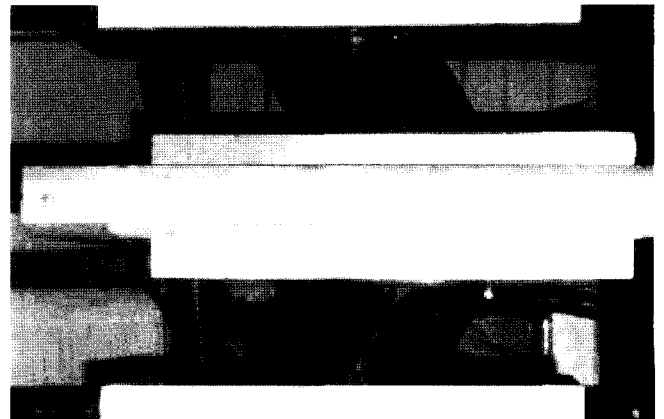


그림 6 면진베어링 시험기

이력곡선에 의해 둘러 쌓인 면적은 베어링에 가해진 변형을 정도에 따라서 달라진다. 각 하중 사이클에 따른 유효 수평강성, K_{eff} 는 각 곡선에 대해서 다음 식 (6)으로 계산되었다.

$$K_{eff} = \frac{F_D^+ - F_D^-}{D^+ - D^-} \quad (5)$$

여기서, F_D^+ , F_D^- 은 각각 양방향과 부방향의 전단력의 최대치이다. D^+ , D^- 은 각각 양방향과 부방향의 전단변형의 최대치이다. 등가감쇠(β)는 각사이클의 에너지 소산(EDC)에 의해 다음과 같은 식으로 계산된다.

$$\beta = \frac{EDC}{2\pi K_{eff} \Delta D^2} \quad (6)$$

여기서, K_{eff} 는 식 (5)에서 구한 유효 수평강성이며, ΔD 는

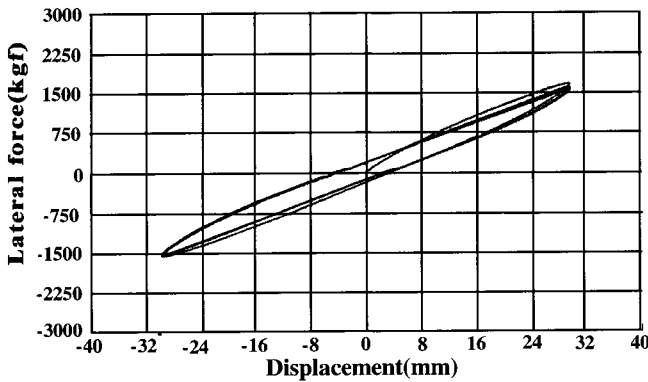
양방향과 부방향의 변위 최대치의 평균치이다.

제품의 고무층의 두께는 60.0mm이며, 수평강성시험은 고무층 두께의 50%, 70%, 100%에 대해서 수행하였다. 시험에 사용된 전단 변형률(γ)의 계산식 (3)은 다음과 같다.

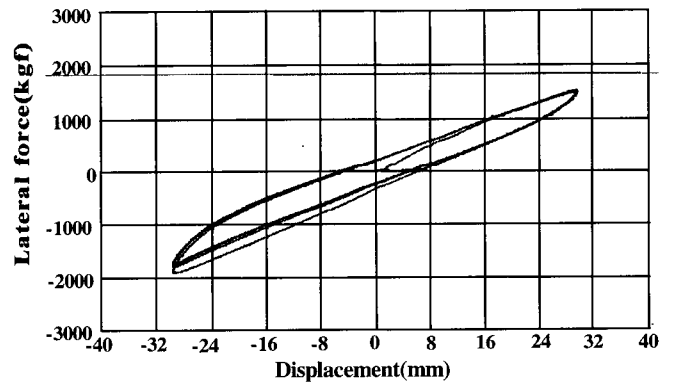
$$\gamma = \frac{D}{t_r} \quad (7)$$

여기서, D 는 최대 수평변위, t_r 은 고무층의 총 두께이다.

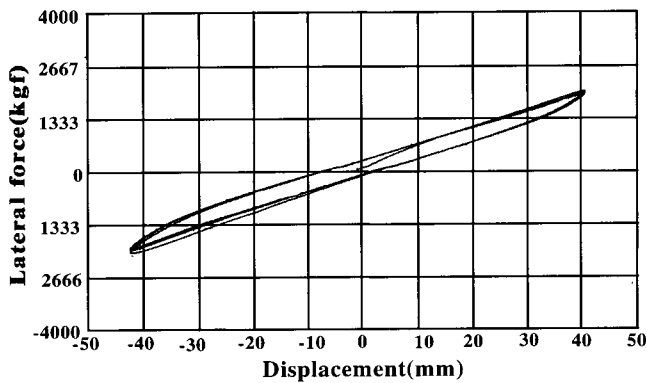
수평강성시험에 사용한 진동수는 0.020Hz이며, 각 시험에 대해서 4번의 사이클로 시험하였다. 이때 사이클은 정현파를 사용하였다. 상하판에 가해진 수직하중은 13,000kgf이다. 베어링의 초기 고무층 총두께는 60.0mm이다. 4사이클의 수평방향 실험이다. NRB, FRB에 대한 전단변형률 50%, 70%, 100%일 때의 이력곡선을 그림 7(a)~(f)에 보였으며, 표 3에 구체적인 수치를 정리하였다. 그림 7(c), (d)의 70% 변형율에



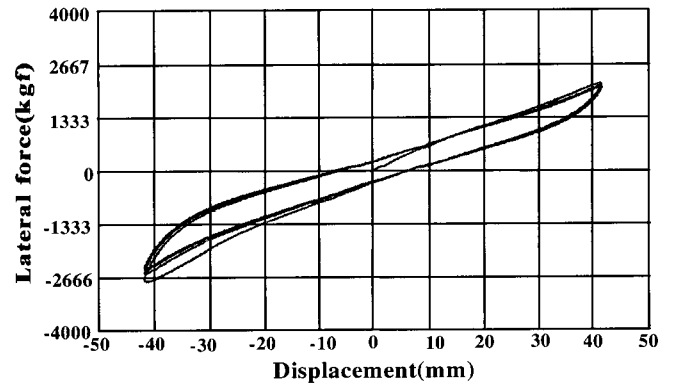
(a) NRB 50% 전단변형율



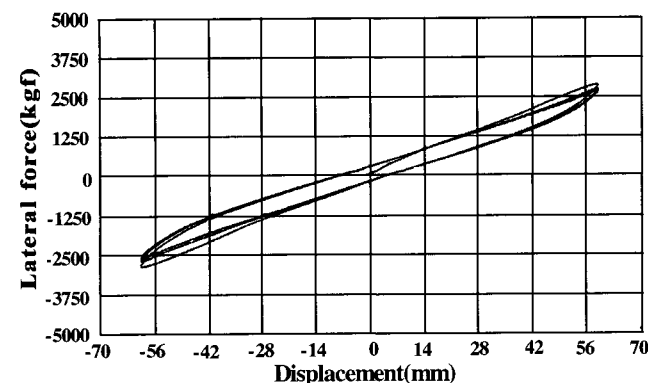
(b) FRB 50% 전단변형율



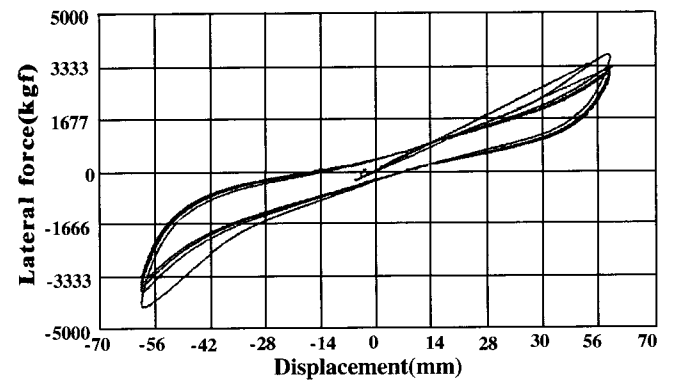
(c) NRB 70% 전단변형율



(d) FRB 70% 전단변형율



(e) NRB 100% 전단변형율



(f) FRB 100% 전단변형율

그림 7 NRB와 FRB의 힘-변형 이력곡선의 비교

표 3 NRB와 FRB의 수평실험 결과비교

Type	Shear strain ratio(%)	Deflection (mm)	Average force(kgf)		Effective stiffness (kgf/mm)	Hysteresys loop Area(kgf · mm)	Effective damping (%)
			F_D^+	F_D^-			
NRB	50	30.0	1602	-1526	26.2	9071	6.19
	70	41.44	2013	-2069	24.5	15068	6.19
	100	59.23	2735	-2791	23.2	28965	5.61
FRB	50	30.0	1457	-1830	28.6	15323	11.16
	70	41.44	2097	-2586	28.1	23983	7.83
	100	59.23	3223	-3861	29.8	55286	8.36

대해서 FRB의 수평방향힘은 NRB에 비해서 4% 더 높으며, 이력곡선에서 볼 수 있듯이 FRB는 NRB에 비해서 힘-변형 곡선으로 둘러싼 면적이 더 넓다. 이것은 감쇠능력이 더 좋다는 것을 의미한다. FRB는 NRB에 비해서 1.64%의 감쇠비가 더 높은 것을 알 수 있다. 이것은 철판보강에 비해서 섬유보강을 할 때 에너지를 소산 시키는 능력이 뛰어난 것으로 해석할 수 있다. 그림 7(e), (f)에서 알 수 있듯이 동일한 변형에 대해서 FRB의 유효강성은 NRB에 비해서 28.4% 더 높다. 전단변형 100%에서도 이력곡선에서 볼 수 있듯이 FRB는 NRB에 비해서 힘-변형 곡선으로 둘러싼 면적이 더 넓다. FRB는 NRB에 비해서 2.75%의 감쇠비가 더 뛰어난 것을 알 수 있다. 그림 8은 그림 7에서 보인 전단변형 50%, 70%, 100%에 대해서 NRB와 FRB의 감쇠능력을 보여주고 있다. 철판보강판에 비해서 섬유 보강판은 더 높은 감쇠 성능을 보여준다.

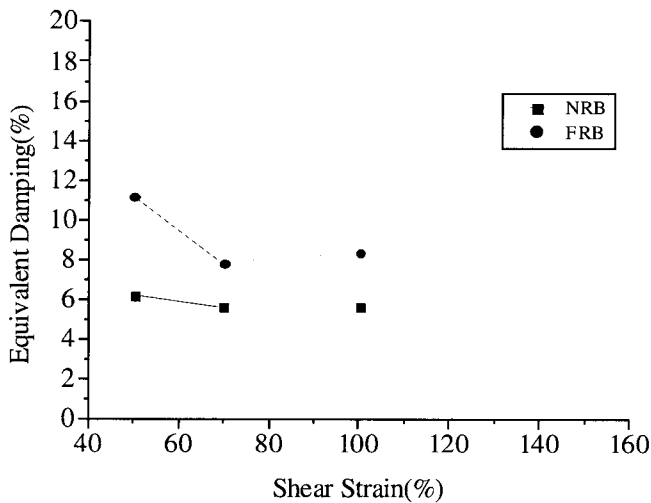
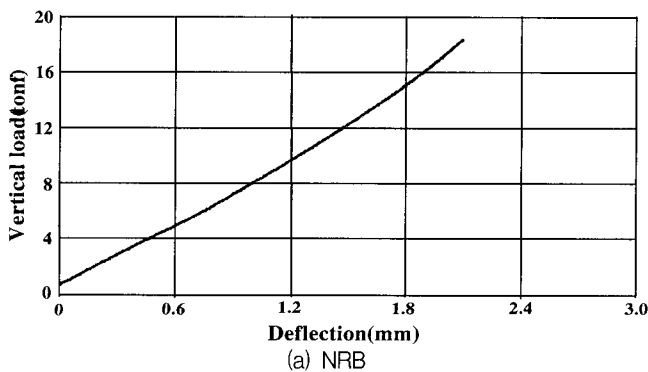
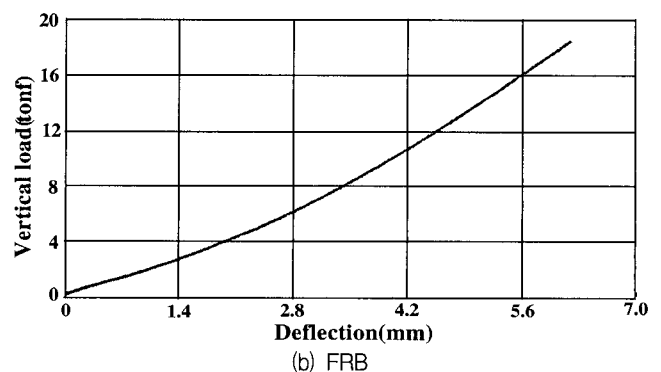


그림 8 NRB와 FRB의 등가감쇠 비교



(a) NRB



(b) FRB

그림 9 수직강성의 비교

이것은 철판에 비해서 섬유가 에너지 소산 능력이 뛰어난 것을 알 수 있다. 지진시 동일한 크기의 면진 베어링에 대해서 섬유 보강 면진 베어링은 지진 에너지를 더 많이 소산시키기 때문에 NRB보다 뛰어난 면진 성능을 가짐을 알 수 있다.

3.4 압축실험

면진베어링에서 가장 중요한 두 요소라고 하면, 수평강성과 수직강성이다. 수평강성에 대한 시험은 앞 절에서 조사하였다. 이 절에서는 NRB와 FRB의 수직 강성을 비교하기로 한다. 시험 속도 51.0kgf/cm²/min, 최대 수직 하중 18.47tonf의 동일한 조건하에서 수행하였다.

각 하중 사이클에 따른 유효 수직강성($K_{eff,y}$)은 다음 식에 의해 계산하였다.

$$K_{eff,y} = \frac{F_D^{+,y} - F_D^{-,y}}{D^{+,y} - D^{-,y}} \quad (7)$$

여기서 $F_D^{+,y}$, $F_D^{-,y}$ 는 각각 100%, 30%의 변형일 때의 수직 하중 값이며, $D^{+,y}$, $D^{-,y}$ 는 각각 100%, 30%에서의 변형량이다. 그림 9는 NRB와 FRB의 압축에 따른 힘-변형 곡선이다. 압축변형량은 NRB는 2.00~2.07(mm), FRB는 5.67~6.16(mm)가 되었다. 이렇게 계산하였을 때 NRB는 9.01tonf/mm, FRB는 3.55tonf/mm의 결과를 얻을 수 있었다.

4. 결 론

본 논문에서는 기존의 면진장치에 가장 많이 사용되는 장치로서 철판과 고무의 적층으로 이루어진 면진베어링과 섬

유보강 면진 베어링을 비교하는 실험을 수행하여 그 특성을 파악하도록 하였다. 철판보강 면진베어링과 섬유보강 베어링에 대해서 가장 중요한 특성이라고 할 수 있는 수평실험과 압축실험을 수행하여 다음과 같은 결론을 얻었다.

- (1) 섬유보강 면진베어링은 철판보강 면진베어링에 비해서 에너지 소산능력이 높다
- (2) 섬유보강 면진베어링의 성능 시험을 통하여 하중이 많이 가해지지 않는 건물에 대해서 기존의 철판보강 면진베어링을 대체하여 면진장치로서 사용될 가능성을 보였다.
- (3) 새로운 제품개발로 인해서 저가로 보급될 경우 많은 저층건물에 사용될 수 있으며 지진피해로부터 인명과 재산 피해를 줄이는 데 기여할 것으로 기대되어진다.
- (4) 압축실험에서 섬유보강 면진베어링의 강성이 철판보강 면진베어링에 비해서 떨어지는 특성에 대해서는 인장강도가 높은 섬유에 의해서 향후 연구가 요망된다.

감사의 글

본 연구는 BK21의 지원으로 수행되었으며, 관계된 분들에게 감사드립니다. 또한 실험을 통해서 연구를 지원해주신 동일고무벨트(주)의 관계자 여러분께 감사드립니다.

1. Othman, A. B., "Profile of a laminated rubber bearing," *Polymer Testing*, Vol. 20, Iss. 2, 2001. 10, pp. 159-166.
2. Tai, H. C. and Hsueh, S. J., "Mechanical properties of isolation bearings identified by a viscoelastic model," *Int. J. of Solids and Structures*, Vol. 38, Iss. 1, 2001. 1, pp. 53-74.
3. Lizuka, M., "A macroscopic model for prediction large-deformation behaviors of laminated rubber bearings," *Engineering Structure*, Vol. 22, Iss. 4, 2000. 4, pp. 323-334.
4. Chung, W. J., Yun, C. B., Kim, N. S., and Seo, J. W., "Shaking table and pseudodynamic tests for the evaluation of the seismic performance of base-isolated structures," *Engineering Structures*, Vol. 21, Iss. 4, 1999. 4, pp. 365-379.
5. Kelly, J. M., "Analysis for fiber-reinforced elastomeric isolators," *Annual Report to Engineering Research Center for Net-Shape and Die Manufacturing Pusan National University Korea*, 2000.
6. Kelly, J. M., *Earthquake-Resistant Design with Rubber*, Springer, 1997, p. 82.
7. Naeim, F. and Kelly, J. M., *Design of Seismic Isolated Structures; From Theory to Practice*, John Wiley & Sons, 1999, p. 94.