

## 스트립형의 섬유 면진 베어링의 실험적 해석

### An Experimental Study on Fiber Reinforced Strip Form Isolator

문 병 영\* Moon, Byung Young      강 경 주\*\* Kang, Gyung Ju      강 범 수\*\*\* Kang, Beom Soo

#### 국문요약

기존의 면진 기술을 일반건물에 적용하기 위해서는 낮은 가격과 낮은 무게로 면진 베어링이 제작 및 공급되어야 한다. 이에 본 논문에서는 일반건물에 면진 기술을 적용하기 위한 방법으로 기존의 적층고무 면진 베어링에 철판을 대체하여 섬유로 보강하고, 고무와 섬유의 층으로 구성된 벨트 타입의 면진 베어링을 제안하였다. 또한 제안한 섬유보강 면진 베어링을 설계 및 제작하여 수직실험과 수평실험을 수행하여 그 성능을 검증하였다. 따라서, 스트립형의 면진 베어링이 제작가능하며 일반건물의 필요한 크기로 절단 가능함을 보였다. 또한 수평 실험 수직 실험을 통해서 기존의 적층고무 면진 베어링을 대체하여 사용할 수 있는 결과를 보였다. 이와 같은 결과를 통해서 일반건물에 낮은 무게와 낮은 가격의 면진 베어링을 공급할 수 있음을 보였다. 이 연구결과로 인해 스트립형의 섬유보강 면진 베어링이 자가건물에 널리 사용될 수 있을 것으로 기대된다.

주요어 : 섬유보강 면진베어링, 스트립형 면진베어링 설계, 수평강성, 수직강성, 실험적 해석

#### ABSTRACT

In order to apply seismic isolators to the low-cost buildings, seismic isolators have to be low-cost and light. In this paper fiber reinforced strip form isolator in which the steel plates of conventional rubber bearing was replaced by fiber was proposed. The proposed fiber reinforced strip form isolator was designed, fabricated, cut and subjected to vertical test and horizontal test. Therefore fiber reinforced strip form isolator was to be shown valid in the view point of fabrication and application to desired size. The horizontal test and vertical test have shown that fiber reinforced strip form isolator could be replace the rubber isolator. By these results, low-cost and light seismic isolator can be applied to the low-cost building. These fiber reinforced strip form isolator can be applied to the low-cost building.

Key words : FREI(Fiber Reinforced Elastomeric Isolator), design of strip form isolator, horizontal stiffness, vertical stiffness, experimental analysis

## 1. 서 론

최근의 인도, 터키 지진 등에서 알 수 있듯이 개발 도상국가에서 많은 인명과 재산피해가 발생하고 있다. 이런 곳의 일반주택은 무너지기 쉬운 재료를 사용하고 있기 때문에 지진이 발생하게 되면 건물의 잔해에 의해서 많은 인명피해가 발생한다. 현재 사용되어지는 면진 베어링은 고가에 고중량이어서 일반주택에 적용되기 어렵다. 기존의 면진베어링이 철판을 보강재료로 사용하여 공정이 복잡하고 이에 따른 인건비의 증가로 인해 가격이 높아진다. 또한 철판의 무게로 인해 면진베어링의 무게가 무거워지고 설치시 장비를 사용하여야 한다는 단점을 가지고 있다. 그러므로 지진 대비용 면진 베어링의 광범위한 적용을 위해서는 가격과 중량 면에서 많은 개선이 선행되어야 한다. 가벼우면서도 수직강성을 유지할 수 있는 보강재료인 섬유를 사용하여 베어링 자체의 수직 강성은 유지하면서 가격 및 무게 면에서의 단점을 보완할 수 있다. 이에 대한 이론으로는 고무의 강체로 이루어진 패드의 압축강성식<sup>(1-2)</sup>을 발전시켜 섬유보강 패드 대해서 수직강성을 구할 수 있는 식이<sup>(3-4)</sup> 제안되었으며 섬유보강 면진베어링을 제작한 바 있다. 또한 기존의 적층고무 면진베어링의 철판을 섬유로 대체하여 섬유보강 면진 베어링을 제작하여 실험을 수행하기도 하였다.<sup>(5)</sup> 이런 연구에 의해서 철판을 대체하여 섬유를 사용할 수 있다는 것은 보였지만 여전히 가격문제를 해결하지 못했다. 이에 본 논문에서는 섬유로 보강하고 고무와 적층한 스트립(strip)형의 섬유면진베어링을 제안하

\* 정회원 · 부산대학교 항공우주공학과, 연구원  
(대표전자 : moon\_byung\_young@hotmail.com)

\*\* 학생회원 · 부산대학교 항공우주공학과, 박사과정

\*\*\* 부산대학교 항공우주공학과, 교수

였다. 스트립형의 섬유면진베어링은 섬유의 사용으로 인해서 무게를 낮출 수가 있고, 길게 만들어서 필요한 크기로 잘라서 사용할 수 있기 때문에 가격을 낮출 수가 있다. 또한 제작과정에서 공정의 단순화로 인해서 인건비를 줄일 수가 있다. 본 논문에서는 이러한 아이디어를 통해서 실제 스트립형의 면진베어링을 설계 제작하였으며 실험을 수행하여 일반주축에 낮은 가격으로 사용되어질 수 있음을 보였다.

## 2장. 스트립형의 섬유보강 면진베어링의 해석모델

기존의 적층고무 면진베어링은 그림1과 같이 고무와 철판의 적층구조로 이루어져 있다. 철판은 상부 구조물로부터 하중이 베어링에 가해질 때 고무가 옆으로 퍼지지 않도록 하여 수직 강성을 유지시켜주는 역할을 한다. 고무는 지반이 움직일 때 지반의 움직임을 상부구조물에 그대로 전달되지 않도록 해주는 역할을 한다. 기존에 사용하여온 적층고무 면진베어링은 고가이고 중량이어서 널리 사용되기 어려운 점이 있었다. 따라서, 수직강성을 유지하는 철판의 역할을 하면서도 가벼운 보강재료로서 제안된 것이 섬유이다. 그림2는 섬유보강재료를 사용한 섬유보강 면진베어링의 모델이다. 섬유는 철판과 같이 고무에 별장이 생기지 않도록 하여 수직강성을 유지시켜주기 때문에 철판의 역할을 한다. 또한 철판에 비해서 단위 부피당 무게가 가볍기 때문에 면진베어링의 전체 무게를 줄일 수 있다. 면진베어링의 가격을 낮추기 위해서는 긴 스트립형의 섬유면진베어링을 제작하여 필요한 크기로 잘라서 사용하는 방법을 사용할 수 있다. 이를 위해서 섬유와 고무의 적층으로 스트립형의 섬유면진베어링을 설계할 수 있다. 스트립형의 섬유보강 면진베어링의 단면에 대한 고무 한 층과 섬유적층의 모델을 그림3에 보였다. 보강판이 강체이고, 폭이  $2b$ 이고 두께가  $t$ 인 탄성판의 압축계수는 다음 식과 같다.

$$E_c = \frac{P}{A\epsilon_c} \quad (1)$$

여기서  $P$ 는 하중,  $\epsilon_c = \Delta/t$ 는 압축변형률,  $\Delta$ 는 패드의 두께 변화이다. 무한히 길고 폭이  $2b$ 인 스트립형의 패드의 형상계수는  $S = b/t$ , 단위길이의 면적은  $A = 2b$ 이므로, 압축계수는 다음 식으로 나타낼 수 있다.

$$E_c = 4GS^2 \quad (2)$$

그림3과 같이 동일한 모델에 대해서 보강판이 섬유로 대체되면, 길이가 무한대이고, 폭은  $2b$ , 고무 한 층의 두께는  $t$ 이고 보강섬유의 두께는  $t_f$ 인 섬유면진베어링 모델이 된다. 압력  $P$ 에 의해서 하중을 받으면 점선으로 표시된 것같이 고무가 옆으로 퍼지는 벌징현상이 일어난다. 고무의 위와 아래는 보강섬유가 고무와 완벽하게 접촉되어있다고 가정한다. 이때의 유효 압축계수는 다음 식으로 나타낼 수 있다.

$$E_c = GS^2 \frac{12}{(ab)^2} \left( 1 - \frac{\tanh ab}{ab} \right) \quad (3)$$

$$, a^2 = \frac{12(1-\nu^2)G}{E_f t_f t}$$

여기서,  $G$ 는 고무의 전단탄성계수이며,  $\nu$ 는 프와송비,  $E_f$ 는 보강체의 탄성계수,  $S$ 는 형상계수이다. 한편 보강체가 강체일 경우 압축계수는  $E_c = 4GS^2$ 이므로, 보강체가 유연한 섬유보강일 경우의 예는 유효 압축강성은 강체에 비해서 줄어들며, 따라서 수직강성이 줄어들게 됨을 알 수가 있다. 그림4는 무한히 긴 스트립형의 패드에서  $ab$ 에 따른 유효 압축강성의 변화이다.  $ab$ 가 0일 때는 보강체가 강체인 경우를 의미한다.  $ab$  값이 커질 때 보강체의 유연성은 커지고, 강체에 비해서 압축강성이 낮아지는 정도를 그림4를 통해서 알 수 있다.

형상계수가 큰 값일 경우에는 재료의 압축성을 무시할 수 없다. 따라서 패드에서 비압축성식은 다음과 같은 식으로 들 수 있다.

$$\epsilon_{xx} + \epsilon_{zz} = -\frac{P}{K} \quad (4)$$

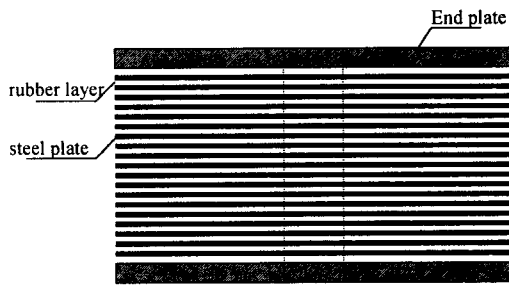


그림 1 적층고무 면진베어링의 모델

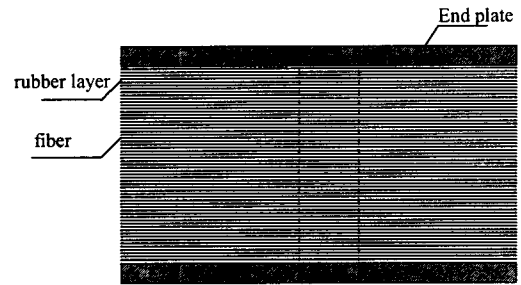


그림 2 섬유보강 면진베어링의 모델

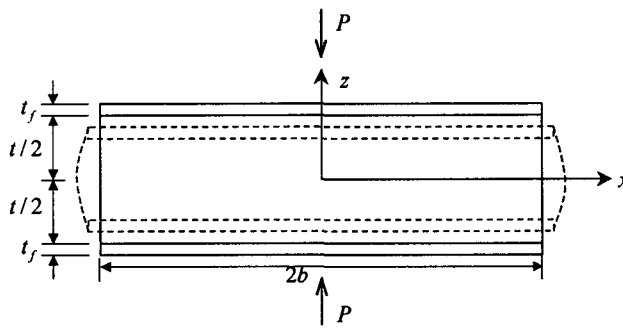


그림 3 스트립형의 섬유보강 면진베어링 해석모델

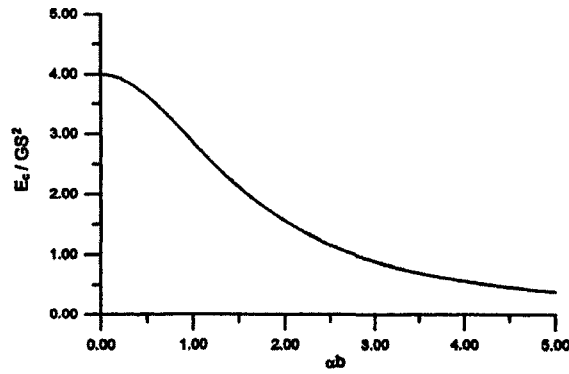


그림 4 무한히 긴 스트립형의 패드에서  $\alpha b$ 에 따른 유효 압축강성의 변화

여기서  $K$ 는 체적비이고,  $\epsilon_{xx}, \epsilon_{zz}$ 는 그림3에서  $x$ 방향과  $z$ 방향으로 줄어든 변형률이다. 유효 압축강성계수는 다음식과 같이 된다.

$$E_c = K \frac{\lambda}{\lambda + \mu} \left( 1 - \frac{\tanh(\lambda + \mu)^{1/2}}{(\lambda + \mu)^{1/2}} \right) \quad (5)$$

여기서,  $\lambda = \frac{12Gb^2}{Kt^2}$ ,  $\mu = \frac{12Gb^2}{Eft^2}$  이다.

이로써, 스트립형의 면진베어링의 아이디어에 대한 이론적으로 접근하는 것을 보였다.

### 3장. 스트립형 면진베어링의 실험

#### 3.1 시험편 제작 및 규격

기존의 적층고무 면진베어링의 철판보강 부분을 섬유로 보강하였고, 섬유와 고무의 여러 층을 만들고 스트립형으로 길게 설계 및 제작하였다. 표1에서는 시험에 사용한 시험편의 규격을 보였다. 각 베어링에서 고무의 총두께는 99mm이다. 0.27m 두께의 탄소섬유판 30장으로 보강하였다. 철판보강의 강성이 나오도록 강성이 충분한 강성의 섬유를 사용하고, 길게 잘라 용하기 위해서 길게 제작한다. 그림5는 스트립형의 면진베어링을 제작한 것과 톱으로 절단하는 장면이다. 이와 같이 스트립의 면진베어링의 제작과 절단이 가능하였다.

표 1 시험편의 규격

Name	Length [mm]	Width [mm]	Height [mm]	Area [mm <sup>2</sup> ]	Comments	Presence of rubber cover			
						East	west	North	South
DRB1	735	183	105	135505		Yes	No	No	No
DRB2	750	190	105	142500		Yes	No	Yes	No
DRB3	740	190	105	140600		No	Yes	Yes	No
DRB4	365	190	105	69350	Cut from 190x755x105	No	No	Yes	No
DRB5	390	190	105	74100	Cut from 190x755x105	Yes	No	Yes	No
DRB6	377	183	105	68991	Cut from 183x755x105	No	Yes	No	No
DRB7	377	183	105	68991	Cut from 183x755x105	No	No	No	No
DRB8	730	183	105	135050	Kept as sample				

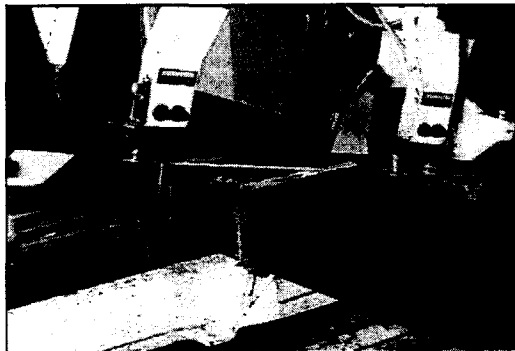


그림 5 스트립형의 면진베어링 제작 및 절단

#### 3.2 시험장치 및 방법

테스트용 시험기는 수평과 수직의 반복하중시험이 가능하도록 설계되었다. 수직하중은 570kN이고 유압에 의해 구동되며 수평하중은 450kN이고 유압에 의해 구동된다. 시험기는 수평방향으로  $\pm 254\text{mm}$ 의 범위에서 시험이 가능하며, 수직방향으로  $\pm 1,140\text{kN}$ 의 하중을 가할 수 있다.

시험에 따라 하중을 주는 방법은 다르게 하였다. 시험 DRB1은 1.73MPa로 단조롭게 하중을 가하였다. 여기에  $\pm 0.35\text{Mpa}$  진폭으로 세 싸이클의 압력을 가하였다. 그때의 수직반복하중 시험을 위한 입력신호를 그림 6에 나타내었다. 수평실험에서 고무의 총두께 99mm를 기준으로 고무층 두께의 25%, 50%, 75%, 100%의 네 가지 변형률로 삼 회씩 반복하중을 가하였다. 그림7은 수평 반복하중 시험을 위한 입력신호를 나타낸다. 1.73Mpa의 수직하중 하에서 수행되었으며, 3.45Mpa의 수직하중으로 다시 동일한 시험이 수행되었다. 시험방향과 스트립형의 면진베어링 사이의 각은  $0^\circ$ ,  $90^\circ$ ,  $45^\circ$  의 세 가지 각도에 대해 수평시험하였다.

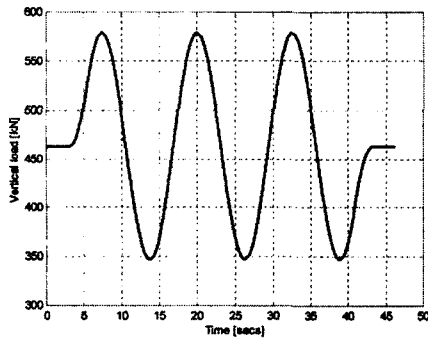


그림 6 수직 반복하중 시험을 위한 입력신호

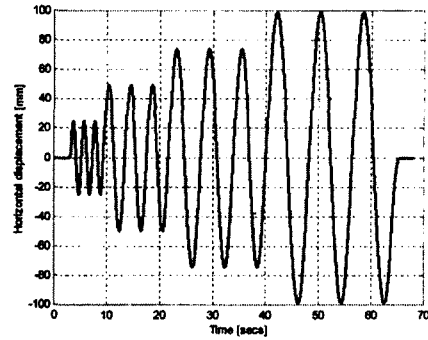
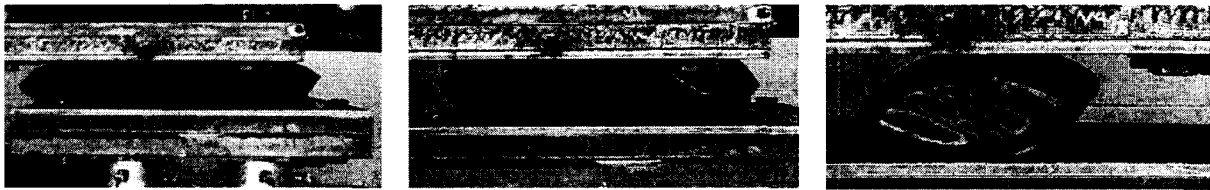


그림 7 수평 반복하중 시험을 위한 입력신호

시편 DRB2, DRB3는 동일한 조건 하에 수행되었다. 시험각도의 순서는 DRB2에 대해서는  $45^\circ$ ,  $0^\circ$ ,  $90^\circ$  로 DRB1과는 다르며, DRB3에서는  $90^\circ$ ,  $45^\circ$ ,  $0^\circ$  순서이다. 전체적인 형태를 보이기 위한 예로서 DRB1의 변형양상을 그림으로 보였다. 그림은 DRB1시편에서 전단변형률 100%, 각도  $0^\circ$ ,  $45^\circ$ ,  $90^\circ$  일 때의 변형형태를 보였다.  $0^\circ$  일 때는 스트립형의 길이 방향과 횡하중이 가해지는 방향이 일치하고 100%전단변형에 대해서도 시험기의 상부면과 하부면에 잘 밀착되어 있는 것을 알 수 있다. 이것은  $0^\circ$  의 각도에서 안정적인 변형형태를 보임을 알 수 있다. 반면에  $90^\circ$  에서는 시험기의 상부면과 하부면과 시편 접하는 면적이 적고, 변형방향으로 면진베어링의 길이가 길지 못하여 면진베어링 부분적인 하중이 많이 가해 짐을 알 수 있다. 따라서  $90^\circ$  방향에 대한 성능은 감소될 것을 예상할 수 있다.  $45^\circ$  각도에 대해서는  $0^\circ$  와  $90^\circ$  의 변형에 대한 균으로 볼 수 있다.



(a)  $0^\circ$

(b)  $45^\circ$

(c)  $90^\circ$

그림 8 시편DRB1의 전단변형률 100%일 때의 변형형태

## 장. 실험결과

앞장에서 수평시험과 수직시험을 수행하였고, 스트립형의 면진베어링에 대한 수직강성과 수평강성을 기존의 면진베어링 비교하였다.

### 1 수평 시험결과

시험을 통해서 기존의 면진베어링과 스트립형의 면진베어링을 비교하였다. 시편에서 사용된 고무의 탄성계수는  $0.690\text{Mpa}$ 이다. 표1에서 보인 바와 같이 절단하지 않은 시편의 평균 면적은  $0.140\text{m}^2$ 이다. 고무 층의 총두께는  $0.099\text{m}$ 이다. 기존 면진베어링의 수평강성  $K_H$ 는 다음 식<sup>(6)</sup>으로 주어지며,

$$K_H = GA/t_r \quad (6)$$

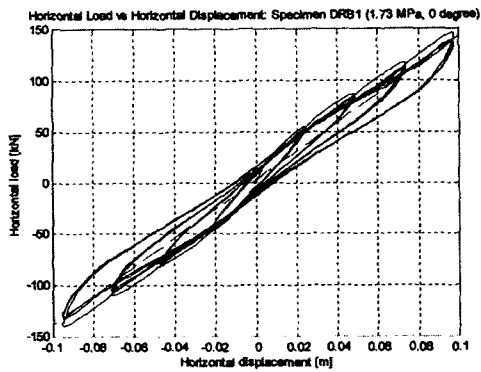
값을 대입하면 기존 면진베어링에 대한 수평강성값은 다음과 같이 된다.

$$K_H = 970\text{kN/m} \quad (7)$$

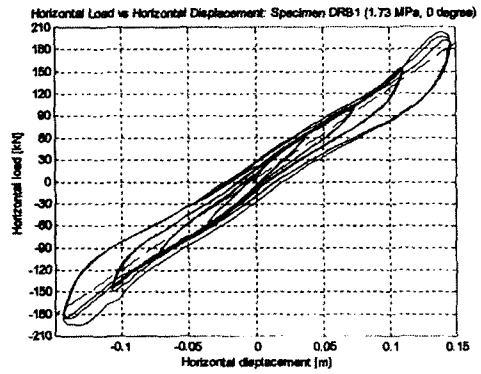
이에 반해서 스트립형의 면진베어링은 100% 전단변형률,  $1.73\text{MPa}$ 의 압력일 때, 수평방향으로 평균 수평강성이  $1280\text{kN/m}$

이며, 90° 방향으로 863kN/m, 그리고 45° 방향으로는 1120kN/m이 된다.

그림9에서 보는 바와 같이 0° 수평방향 실험에서 전단변형률이 100%에서 150%로 증가할 때, 수평방향 하중 이력곡선은 가파른 형태를 보인다. 반면에 그림 10에서 보는 바와 같이 90° 수평실험에서 이력곡선은 수평에 가깝게되고 따라서 높은 변형률에서는 순간적인 기울기는 음의 값이 된다. 그림11에서보는 바와 같이 45° 하중에서는 가파르거나 부드럽게 되지 않고 1° 와 90° 의 사이 값을 가지게 된다.

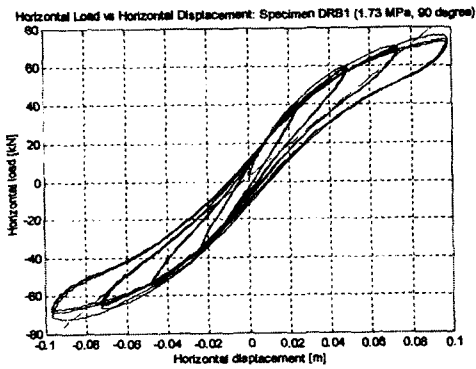


(a) 변형률100%

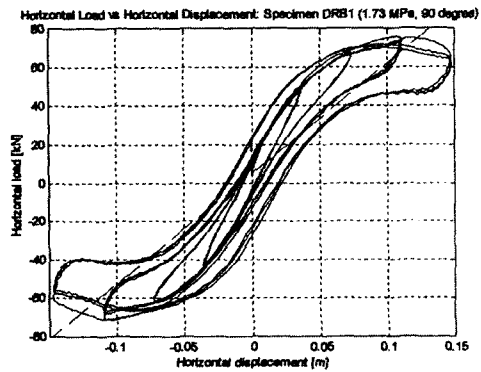


(b) 변형률150%

그림 9 DRB1 수평하중 시험결과 (0° )

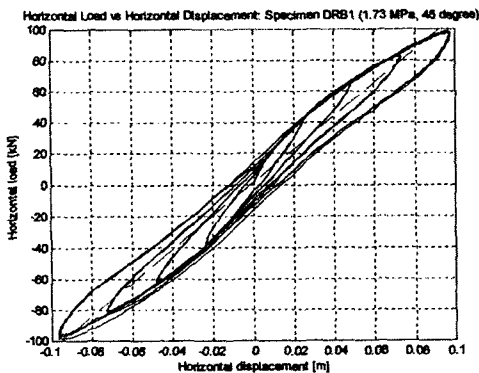


(a) 변형률100%

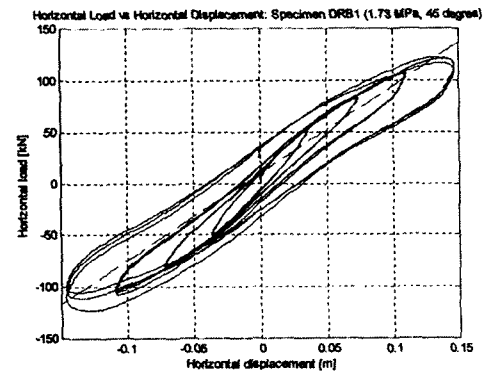


(b) 변형률150%

그림 10 DRB1 수평하중 시험결과 (90° )



(a) 변형률100%



(b) 변형률150%

그림 11 DRB1 수평하중 시험결과 (45° )

압력과 전단계수를 이용해서 대략적인 주기를 계산할 수 있다. 주기 T는 다음과 같은 식으로 나타내진다.

$$T = 2\pi \sqrt{\frac{\rho L_r}{Gg}} \quad (8)$$

시험에 사용한 평균 압력이 3.45MPa, 전단계수가 0.690Mpa, 고무층의 총 두께가 99mm이므로 이때의 주기는 1.4(sec)가 된다. 주기를 더 길게 할 필요가 있을 때는 고무층의 총 두께를 더하면 되기 때문에 한 장의 면진베어링 위에 다른 면진베어링을 겹침을 통해서 원하는 만큼의 주기를 길게 할 수가 있다. 또한 3.45MPa보다 낮은 값의 압력을 사용할 경우에는 전단계수가 낮은 재료를 사용하면 낮은 평균압력으로도 원하는 주기를 유지할 수 있다.

## 2 수직 시험결과

1.73MPa의 수직하중과 3.45MPa의 수직하중에서 시험한 결과를 표2에 정리하였다. 식(1)을 따라서 압축하중  $E_c$ 의 값을 표를 통해서 서로 비교하였다. 표2에서 알 수 있듯이 압축하중에는 시편에 따라 각각 차이가 있다. 절단하지 않은 시편 DRB1/2/3의 압축계수는 414MN/m<sup>2</sup>근처의 서로 비슷한 값을 가진다. 절반 길이로 절단한 두 세트의 베어링은 동일한 수직하중에 대해서도 값의 차이를 보이고 있다. 동일한 수직하중에 대해서도 길이에 따라서 압축강성이 다른 것을 통해서 압축강성에 작용하는 길이의 효과를 볼 수 있다. 수직하중이 증가함에 따라 압축하중  $E_c$ 의 값이 선형적으로 증가하지는 않지만 55%에서 적어도 15%의 증가를 보였다. 이것은 보강제로 사용한 탄소섬유의 특성과 관련이 많이 있다. 수직하중이 가해질 때 면진베어링의 탄소섬유는 팽팽해지고 이로 인해 압축강성이 높아지게 된다.

표 2 수직강성시험결과

Test Specimen	1.73 Mpa vertical pressure			3.45 Mpa vertical pressure		
	Average Pressure [Mpa]	Average Stiffness $K_{av}$ [kN/m]	Compression Modulus $E_c$ [Mpa]	Average Pressure [Mpa]	Average Stiffness $K_{av}$ [kN/m]	Compression Modulus $E_c$ [Mpa]
DRB1	1.73	550853.9	404	3.46	791048.8	580
DRB2	1.63	602975.0	417	3.27	849319.3	588
DRB3	1.66	597053.3	419	3.31	752785.8	529
DRB4	N/A	N/A	N/A	3.68	349938.19	502
DRB5	N/A	N/A	N/A	3.43	352040.6	471
DRB6	1.74	251687.8	361	3.48	328721.9	472
DRB7	1.74	278983.5	400	3.48	351392.3	504

## 5장. 결론

면진 기술은 지진에 대해서 효과적이지만 가격이 높기 때문에 저가형 건물에 널리 이용하지 못했다. 가볍고 낮은 가격으로 제작해서 저가형 건물에도 적용하기 위해서 기존의 면진베어링의 철판보강을 단위 무게가 낮은 섬유보강으로 대체하여, 스트립형의 섬유면진베어링을 제작하고 수평실험과 수직실험을 통해서 다음과 같은 결론을 얻었다.

- (1) 가격을 낮추기 위해서는 길이가 긴 스트립형의 섬유면진베어링을 만들고 필요한 크기로 잘라서 사용하면 된다는 아이디어는 스트립형의 섬유면진베어링을 제작하고 절단함을 통해서 실현 가능한 것임을 보였다.
- (2) 동일한 규격의 적층고무 면진베어링과 비교하였을 때 스트립형의 섬유면진베어링은 높은 강성을 가졌다.
- (3) 섬유 면진베어링을 적층함을 통해서 원하는 주기를 얻을 수 있었다.

면진베어링에서 기존의 철판을 대체하여 섬유로 보강하여 길게 제작함을 통해서, 무게와 가격을 낮출 수 있었고 이것은 저가형 건물에 널리 적용 및 보급될 것으로 기대된다.

## 감사의 글

본 연구는 BK21의 지원으로 수행되었으며, 관계된 분들에게 감사 드립니다. 시편제작에 동일고무벨트(주)의 관계자 여러분께 감사 드립니다.

## 참고 문헌

- 1. Tsai, H. C. and Lee, C. C., "Compressive stiffness of elastic layers bonded between rigid plates," *International Journal of Solids and Structures*, Vol. 35, 1998, pp. 3053-3069
- 2. Tsai, H. C. and Lee, C. C., "Tilting stiffness of elastic layers bonded between rigid plates," *International Journal of Solids and Structures*, Vol. 36, 1999, pp. 2485-2505
- 3. 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.
- 4. Kelly, J. M., "Analysis of Fiber-Reinforced Elastomeric Isolators", *JSEE*, Vol. 2, No. 1, 1999, pp.19-34
- 5. 문병영, 강경주, 강범수, 김계수, "섬유보강 먼진베어링의 실험적 특성 해석," *한국지진공학회 논문집*, Vol. 6, Iss. 1, 2002, pp. 1-6
- 6. Naeim, F. and Kelly, J. M., "Design of Seismic Isolated Structures- From Theory to Practice-," John Wiley & Sons. 1999, p. 94.