

스트립형 섬유 보강 탄성받침의 실험에 의한 기계적 특성해석

Mechanical Characteristic Analysis of Fiber Reinforced Strip Form Elastomeric Bearing by Experiment

강 경 주
Kang, Gyung Ju

문 병 영^{**}
Moon, Byung Young

강 범 수^{***}
Kang, Beom Soo

김 계 수^{****}
Kim, Kye Soo

박 진 삼^{****}
Park, Jin Sam

국문요약

기존의 면진 기술을 일반건물에 적용하기 위해서는 낮은 가격과 낮은 무게로 면진 탄성받침이 제작 및 공급되어야 할 필요가 있다. 이에 본 논문에서는 일반건물에 면진 기술을 적용하기 위한 방법으로 기존의 적층고무 면진 탄성받침에 철판을 대체하여 섬유로 보강하고, 고무와 섬유의 층으로 구성된 스트립형의 면진 탄성받침을 제안하였다. 또한 제안한 섬유보강 면진 탄성받침을 설계 및 제작하여 수직실험과 수평실험을 수행하여 그 성능을 검증하였다. 따라서, 스트립형의 면진 탄성받침이 제작가능하며, 필요한 크기로 절단이 가능함을 보였다. 또한 수평 실험 수직 실험을 통하여 기존의 적층고무 면진 탄성받침을 대체하여 사용할 수 있음을 보였다. 이 연구결과로 인해 스트립형의 섬유보강 면진 탄성받침이 저가건물에 널리 사용될 수 있을 것으로 기대된다.

주요어 : 섬유보강 탄성받침, 스트립형 탄성받침 설계, 수평강성, 수직강성, 실험적 해석, 기계적 특성해석

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 were 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 replaced the rubber isolator. By these results, low-cost and light seismic 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, mechanical characteristic analysis

1. 서 론

최근의 인도, 터키 지진 등에서 알 수 있듯이 개발 도상국에서 많은 인명과 재산피해가 발생하고 있다. 이런 곳의 일반주택은 무너지기 쉬운 재료를 사용하고 있기 때문에 지진이 발생하게 되면 건물의 잔해에 의해서 많은 인명피해가 발생한다. 지진대비용으로 사용되어지는 면진 탄성받침은 철판을 보강재료로 사용하여 공정이 복잡하고 이에 따른 인건비의 증가로 인해 가격이 높아진다. 또한 철판의 무게로 인해 면진탄성받침의 무게가 무거워지고 설치시 장비를 사용하여야 한다는 단점을 가지고 있다. 그러므로 면진 탄성받침의 광범위한 적용을 위해서는 가격과 중량 면에서 많은 개선이 선행되어야 한다. 보강재료로서 복합섬유를 사용하여 탄성받침 자체의 수직 강성은 유지하면서 가벼운 탄성받침을 만들 수 있다. 이에 대한 이론으로는 고무와 강체로 이루어진 패드의 압축강성식^{(1),(2)}을 발전시켜 섬유보강 패드 대해서 수직강성을 구할 수 있는 식이^{(3),(4)} 제안되었으며 섬유

보강 면진탄성받침을 제작한 바 있다. 또한 기존의 적층고무 면진탄성받침의 철판을 섬유로 대체하여 섬유보강 면진 탄성받침을 제작하여 실험을 수행하기도 하였다.⁽⁵⁾ 이런 연구에 의해서 철판을 대체하여 섬유를 사용할 수 있다는 것은 보였다. 이에 본 논문에서는 섬유로 보강하고 고무와 적층한 스트립(strip)형의 섬유면진탄성받침을 제안하였다. 스트립형의 섬유면진탄성받침은 섬유의 사용으로 인해서 무게를 낮출 수가 있고, 길게 만들어서 필요한 크기로 잘라서 사용할 수 있도록 하였다. 기존의 적층고무 면진탄성받침은 한번의 공정에 하나의 탄성받침을 만들었다. 본 논문에서 제안하는 스트립형의 탄성받침은 길게 제작하여 절단함을 통해서 제작비용을 낮출 수 있다. 본 논문에서는 이러한 아이디어를 통해서 실제 스트립형의 면진탄성받침을 설계 제작하였으며 실험을 수행하여 일반주택에 사용되어질 수 있음을 보였다.

2. 스트립형의 섬유보강 면진탄성받침의 해석모델

기존의 적층고무 면진탄성받침은 그림 1과 같이 고무와 철판의 적층구조로 이루어져 있다. 철판은 상부 구조물로부터 하중이 탄성받침에 가해질 때 고무가 옆으로 볼록해지지 않도록 하여 수직 강성을 유지시켜주는 역할을 한다. 고무는 지반이 움직일 때 지반의 움직임을 상부구조물에 그대로 전달되지 않도록 해주는 역할을 한다. 그림 2는 섬유보강재료

* 학생회원 · 부산대학교 항공우주공학과, 박사과정

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

*** 부산대학교 항공우주공학과, 교수

**** 동일고무벨트(주), 부장

본 논문에 대한 토의를 2002년 2월 28일까지 학회로 보내 주시면 그 결과를 게재하겠습니다.
(논문접수일 : 2002. 7. 29 / 심사종료일 : 2002. 10. 25)

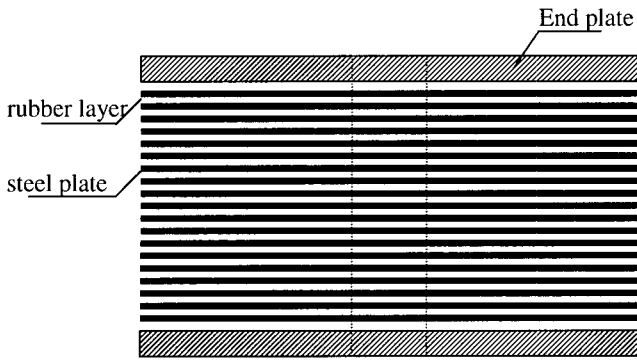


그림 1 적층고무 면진탄성받침의 모델

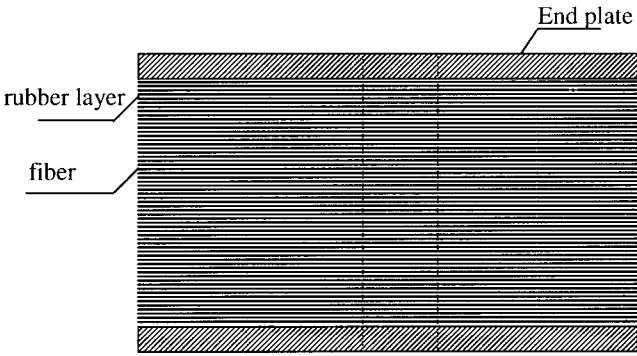


그림 2 섬유보강 면진탄성받침의 모델

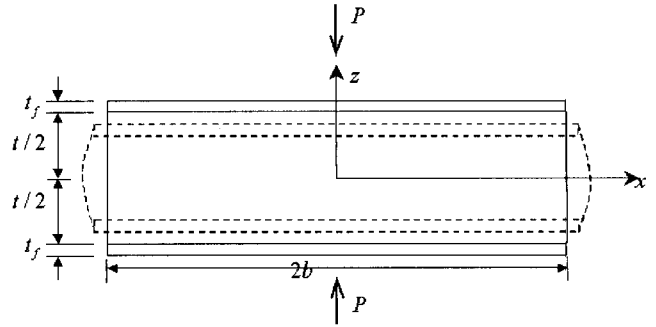


그림 3 스트립형의 섬유보강 면진탄성받침 해석모델

를 사용한 섬유보강 면진탄성받침의 모델이다. 섬유는 고무의 벌징발생을 억제하여 수직강성을 유지시켜주기 때문에 철판과 같은 역할을 할 수 있다. 스트립형의 섬유보강 면진탄성받침의 단면에 대한 고무 한 층과 섬유적층의 모델을 그림 3에 보였다. 보강판이 강체이고, 폭이 2b이고 두께가 t 인 탄성판의 유효압축계수는 다음 식과 같다.

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

여기서 P는 하중, $\epsilon_c = \Delta/t$ 는 압축변형률, Δ 는 패드의 두께 변화이다. 무한히 길고 폭이 2b인 스트립형의 패드의 형상계수(S)는 $S = b/t$, 단위길이의 면적(A)은 $A = 2b$ 이므로, 유효압축계수는 다음 식으로 나타낼 수 있다.

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

여기서, G는 고무의 전단탄성계수이다. 그림 3과 같이 동일한 모델에 대해서 보강판이 섬유로 대체되면, 길이가 무한대이고, 폭은 2b, 고무 한 층의 두께는 t이며 보강섬유의 두께는 t_f 인 섬유면진탄성받침 모델이 된다. 압력 P에 의해서 하중을 받으면 점선으로 표시된 것같이 고무가 옆으로 볼록해지는 벌징현상이 일어난다. 고무의 위아래는 보강섬유가 고무와 완벽하게 접착되어있다고 가정한다. 이때의 유효 압축계수는 다음 식으로 나타낼 수 있다.⁽⁴⁾

$$E_c = GS^2 \frac{12}{(ab)^2} \left(1 - \frac{\tanh ab}{ab}\right), \quad a^2 = \frac{12(1-\nu^2)G}{E_f t_f t} \quad (3)$$

여기서, ν 는 프와송비, E_f 는 보강체의 탄성계수, S는 형상계수이다. 한편 보강체가 강체일 경우 유효압축계수는 $E_c = 4GS^2$ 이므로, 보강체가 강체가 아닌 경우 식 (3)에서 알 수 있듯이 유효 압축계수는 강체에 비해서 줄어들며, 따라서 수직강성이 줄어들게 됨을 알 수가 있다. 철판과 섬유와 같이 둘 다 강체가 아닌 경우, 보강체의 탄성계수 값의 상대적인 크기에 따라 압축계수 값이 달라진다. 그림 4는 무한히 긴 스트립형의 패드에서 ab에 따른 유효 압축강성 ($K_v = E_c A/t$, t_f 은 고무층 전체의 두께)의 변화이다. ab가 0일 때는 보강체가 강체인 경우를 의미한다. ab값이 커질 때 보강체의 유연성은 커진다. 그림 4에서는 강체에 대비하여 섬유보강판에 대한 압축강성의 변화를 볼 수 있다.

형상계수(S)가 큰 값일 경우에는 재료의 압축성을 무시할 수 없다. 따라서 패드에서 비압축성식은 다음과 같은 식으로 들 수 있다.

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

여기서 p는 내부압력, K는 체적비이고, $\epsilon_{xx}, \epsilon_{zz}$ 는 그림 3에서 x방향과 z방향으로 줄어드는 변형률이다.

유효 압축강성계수는 다음 식과 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, $\lambda = \frac{12Gb^2}{Kt^2}$, $\mu = \frac{12Gb^2}{E_f t_f t}$ 이다.

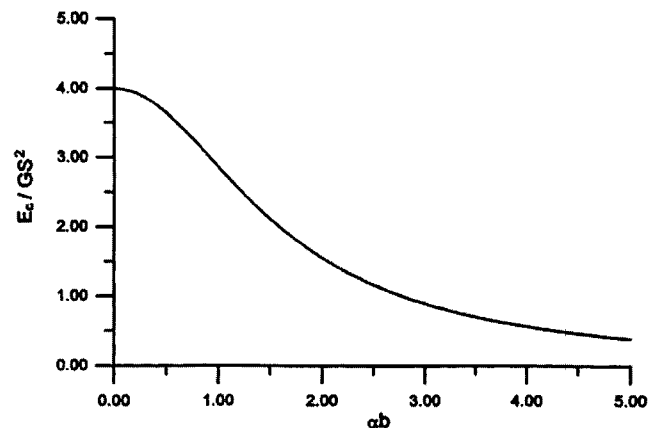


그림 4 무한히 긴 스트립형의 패드에서 ab(a = $(\lambda)^{1/2}$)의 변화

표 1 시험편의 규격

Name	Length [mm]	Width [mm]	Height [mm]	Area [mm ²]	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 190×755×105	No	No	Yes	No
DRB5	390	190	105	74100	Cut from 190×755×105	Yes	No	Yes	No
DRB6	377	183	105	68991	Cut from 183×755×105	No	Yes	No	No
DRB7	377	183	105	68991	Cut from 183×755×105	No	No	No	No

3. 스트립형 면진탄성받침의 실험

3.1 시험편 제작 및 규격

시험편은 섬유와 고무의 여러 층을 만들고 스트립형으로 길게 설계 및 제작하였다. 표 1에서는 시험에 사용한 시험편의 규격을 보였다. 각 탄성받침에서 고무의 총두께는 99mm이다. 0.27mm두께의 탄소섬유판 30장으로 보강하였다. 철판 보강의 강성이 나오도록 강성이 충분한 섬유를 사용하고, 잘라 사용하기 위해서 길게 제작하였다. 시편의 길이를 다르게 하여 길이에 따른 면진효과를 연구할 수 있도록 하였다. 그림 5는 스트립형의 면진탄성받침을 제작한 것과 톱으로 절단하는 장면이다. 이와 같이 스트립형의 면진탄성받침의 제작과 절단이 가능하였다.

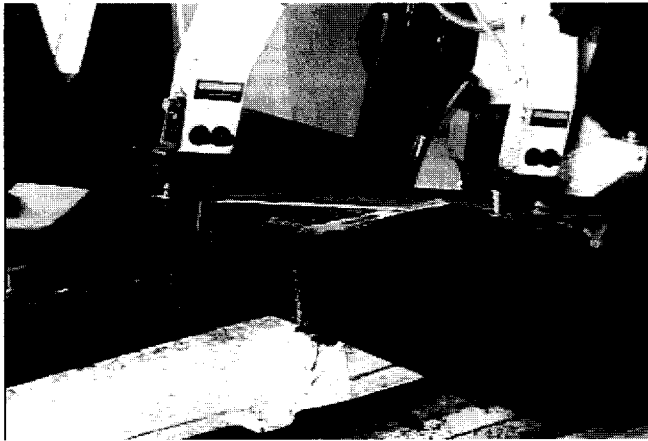


그림 5 스트립형의 면진탄성받침 제작 및 절단

3.2 시험장치 및 방법

테스트용 시험기는 수평과 수직의 반복하중시험이 가능하도록 설계되었다. 수직하중은 570kN이고 유압에 의해 구동되며, 수평하중은 450kN이고 유압에 의해 구동된다. 시험기는 수평방향으로 ±254mm의 범위에서 시험이 가능하며, 수직방향으로 ±1,140kN의 하중을 가할 수 있다.

하중을 주는 방법은 시편에 따라 다르게 하였다. 시편 DRB1은 1.73MPa로 단조롭게 하중을 가하였다. 여기에 ±0.35MPa의 진폭으로 세 싸이클의 압력을 가하였다. 수직반복하중 시험을 위한 입력신호를 그림 6에 나타내었다. 수평

실험에서는 고무의 총두께 99mm를 기준으로 고무 총두께의 25%, 50%, 75%, 100% 네 가지 변형률로 삼 회씩 반복하중을 가하였다. 그림 7은 수평 반복하중 시험을 위한 입력신호를 나타낸다. 1.73Mpa의 수직하중 하에서 수행되었으며, 3.45Mpa의 수직하중으로 다시 동일한 시험이 수행되었다. 시험방향과 스트립형의 면진탄성받침 사이의 각은 0°, 90°, 45°의 세 가지 각도에 대해서 수평시험하였다.

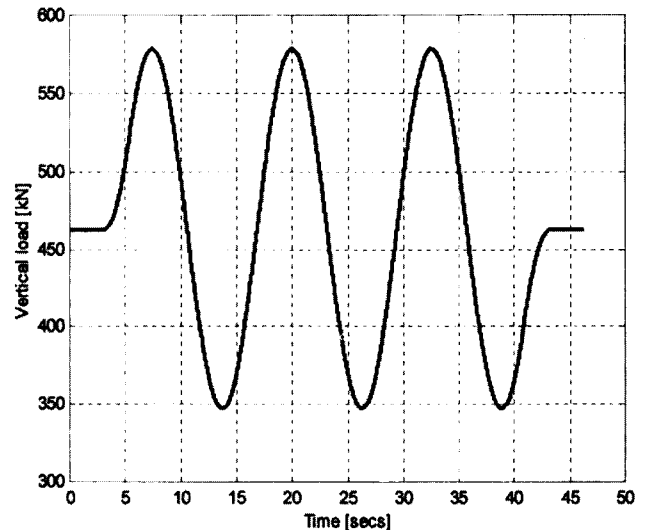


그림 6 수직 반복하중 시험을 위한 입력신호

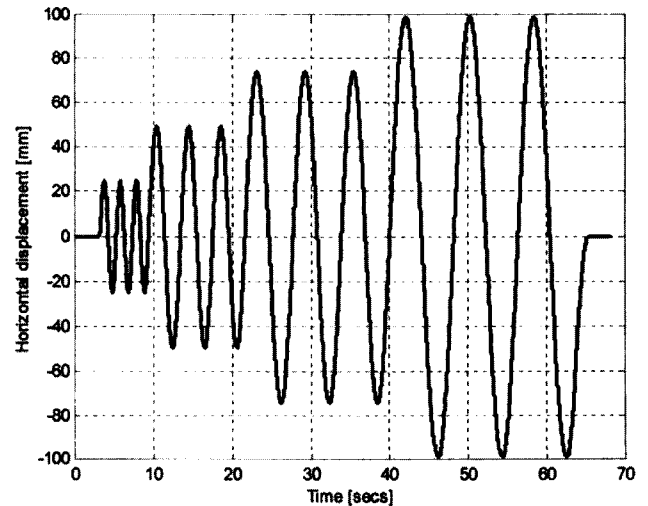


그림 7 수평 반복하중 시험을 위한 입력신호

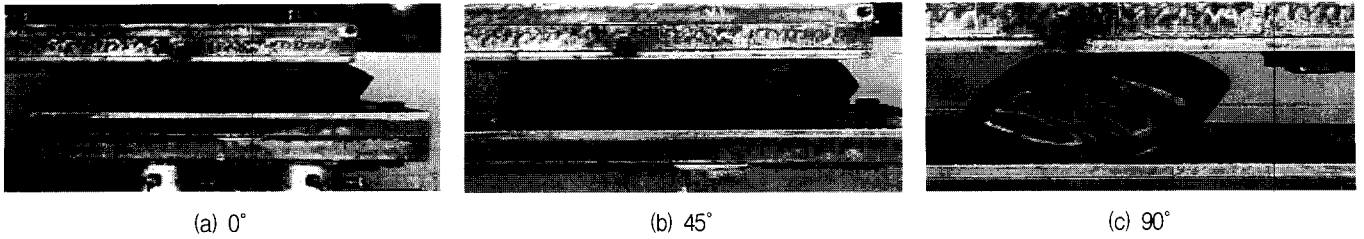


그림 8 시편DRB1의 전단변형률 100%일 때의 변형형태

시편 DRB2, DRB3은 동일한 조건하에 수행되었다. 시험 각도의 순서는 DRB2에 대해서는 45°, 0°, 90° DRB1과는 다르며, DRB3에서는 90°, 45°, 0° 순서이다. 전체적인 형태를 보이기 위한 예로서 DRB1의 변형양상을 그림 8에 보였다. 그림 8은 DRB1시편에서 전단변형률 100%, 각도 0°, 45°, 90° 일 때의 변형형태이다. 0° 일 때는 스트립형의 길이 방향과 변형하중이 가해지는 방향이 일치하고 100% 전단변형에 대해서도 시험기의 상부면과 하부면에 잘 밀착되어 있는 것을 알 수 있다. 이것은 0°의 각도에서 안정적인 변형형태를 보임을 알 수 있다. 반면에 90°에서는 시험기의 상부면과 하부면과 시편이 접하는 면적이 적고, 변형방향으로 면진탄성받침의 길이가 길지 못하여 면진탄성받침 부분적인 하중이 많이 가해 짐을 알 수 있다. 따라서 90° 방향에 대한 성능은 감소될 것을 예상할 수 있다. 45° 각도에 대해서는 0°와 90°의 변형에 대한 평균으로 볼 수 있다.

4. 실험결과

4.1 수평 시험결과

시험을 통해서 기존의 면진탄성받침과 스트립형의 면진탄성받침을 비교하였다. 시편에서 사용된 고무의 전단탄성계수(G)는 0.690Mpa이다. 표 1에서 보인 바와 같이 절단하지 않은 시편의 평균 면적(A)은 0.140m²이다. 고무 층의 총 두께(t)는 0.099m이다. 기존 면진탄성받침의 수평강성 K_H는 다음 식 (6)으로 주어지며,⁽⁶⁾

$$K_H = GA/t_r \tag{6}$$

값을 대입하면 기존 면진탄성받침에 대한 수평강성값은 다음과 같이 된다.

$$K_H = 970kN/m \tag{7}$$

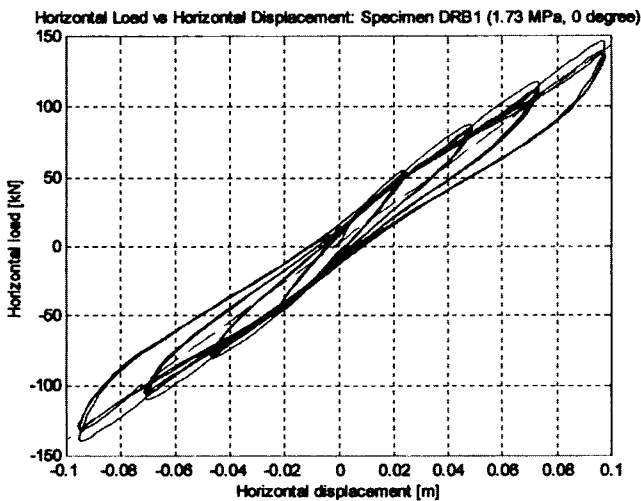
이에 반해서 스트립형의 면진탄성받침은 100% 전단변형률, 1.73MPa의 압력일 때, 수평방향으로 평균 수평강성이 1280kN/m이며, 90° 방향으로 863kN/m, 그리고 45° 방향으로로는 1120kN/m이다.

그림 9에서 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. 90° 방향으로 면진탄성받침을 설치하게 되면, 100%넘는 전단변형에 대해서는 안정적인지 않다는 것을 알 수 있다. 그림 11에서보는 바와 같이 45° 하중에서는 가파르거나 부드럽게 되지 않고 0°와 90°의 사이 값을 가지게 된다.

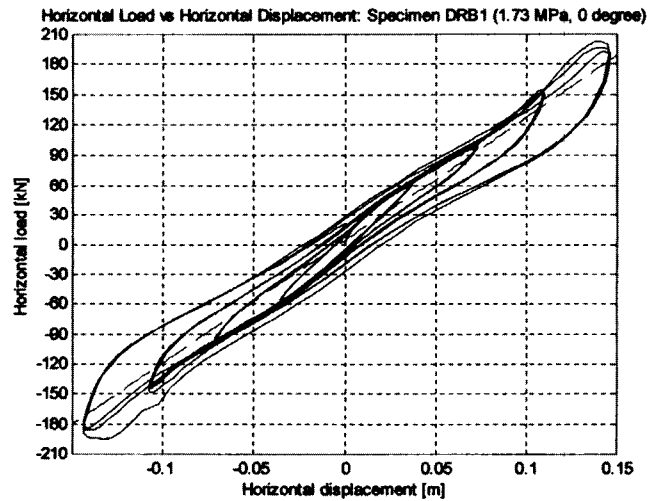
압력과 전단탄성계수를 이용해서 대략적인 주기를 계산할 수 있다. 주기 T는 다음과 같은 식으로 나타내진다.

$$T = 2\pi \sqrt{\frac{bt_r}{Gg}} \tag{8}$$

여기서 g는 중력상수이다. 시험에 사용한 평균 압력(p)이

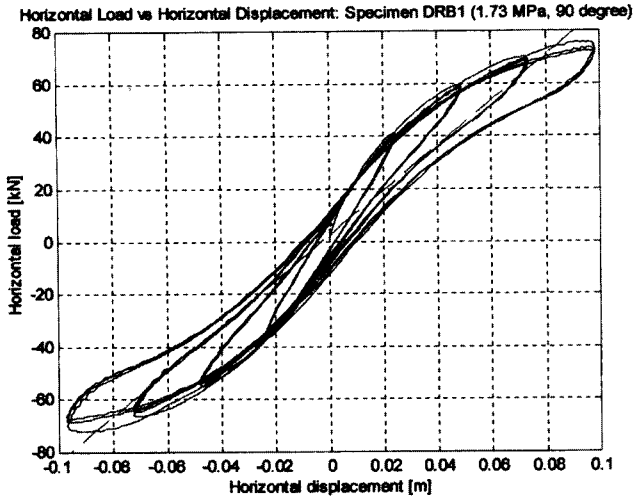


(a) 변형률100%

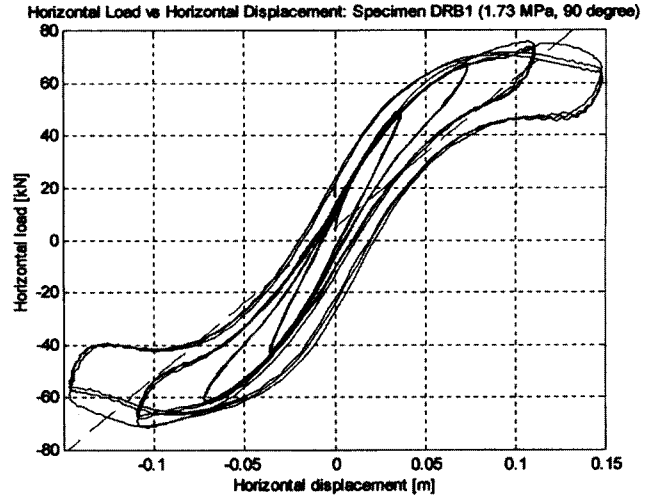


(b) 변형률150%

그림 9 DRB1 수평하중 시험결과(0°).

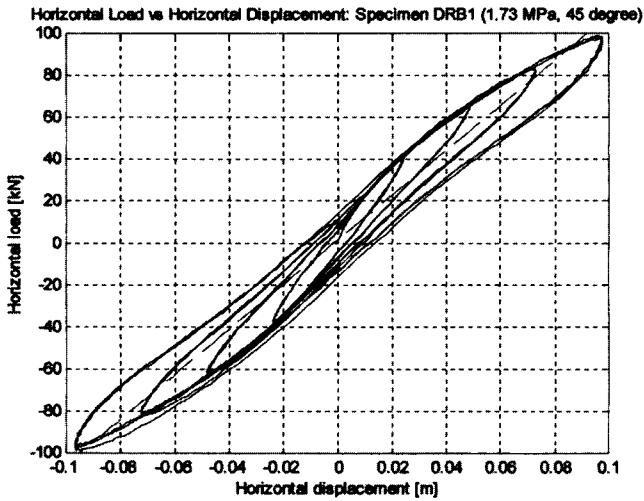


(a) 변형률100%

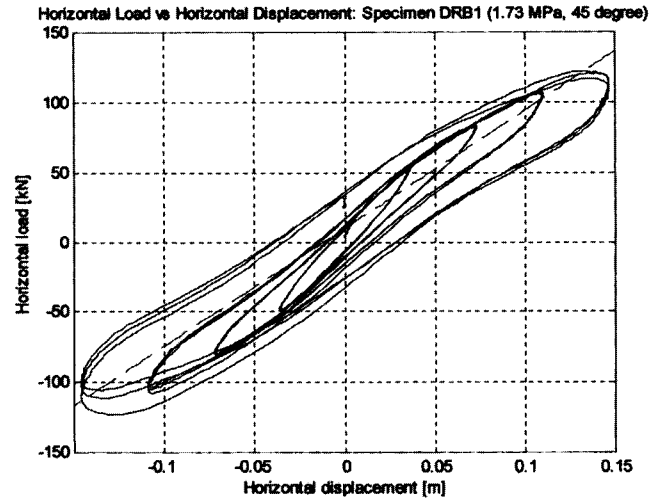


(b) 변형률150%

그림 10 DRB1 수평하중 시험결과(90°)



(a) 변형률100%



(b) 변형률150%

그림 11 DRB1 수평하중 시험결과(45°)

3.45MPa, 전단탄성계수 (G)가 0.690Mpa, 고무층의 총 두께 (t_r)가 99mm이므로 이때의 주기는 1.4(sec)가 된다. 주기를 더 길게 할 필요가 있을 때는 고무층의 총 두께를 더하면 되기 때문에 한 장의 면진탄성받침 위에 다른 면진탄성받침을 겹침을 통해서 원하는 만큼의 주기를 길게 할 수가 있다. 또한 3.45MPa보다 낮은 값의 압력을 사용할 경우에는 전단계수가 낮은 재료를 사용하면 낮은 평균압력으로도 원하는 주

기를 유지할 수 있다.

4.2 수직 시험결과

1.73MPa의 수직하중과 3.45MPa의 수직하중에서 시험한 결과를 표 2에 정리하였다. 식 (1)을 따라서 압축하중 E_c 의 값을 표를 통해서 서로 비교하였다. 표 2에서 알 수 있듯이

표 2 수직강성시험결과

Test	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

압축하중에는 시편에 따라 각각 차이가 있다. 절단하지 않은 시편 DRB1/2/3의 압축계수는 414MN/m^2 근처의 서로 비슷한 값을 가진다. 절반 길이로 절단한 두 세트의 탄성받침은 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 압축계수 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 면진탄성받침의 탄소섬유는 팽팽해지고 이로 인해 압축강성이 높아지게 된다.

5. 결 론

기존의 면진탄성받침의 철판보강을 단위 무게가 낮은 섬유보강으로 대체하여, 스트립형의 섬유면진탄성받침을 제작하고 수평실험과 수직실험을 통해서 다음과 같은 결론을 얻었다.

- (1) 동일한 규격의 적층고무 면진탄성받침의 이론값과 비교하였을 때 스트립형의 섬유면진탄성받침은 높은 수평강성을 가졌다.
- (2) 섬유 면진탄성받침을 적층함을 통해서 원하는 주기를 얻을 수 있었다.
- (3) 스트립형의 섬유면진탄성받침을 제작하고 절단하였다. 이를 통해서 가격을 낮추기 위해서는 길이가 긴 스트립형의 섬유면진탄성받침을 만들고 필요한 크기로 잘라서 사용하면 된다는 아이디어가 실현 가능함을 보였다.

면진탄성받침에서 기존의 철판을 대체하여 섬유로 보강하여 길게 제작함을 통해서, 무게와 가격을 낮출 수 있었

고 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.

참 고 문 헌

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 면진 베어링의 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.