

섬유보강 탄성받침의 설계 및 실험적 해석

문병영[†] · 강경주^{*} · 강범수^{**} · 김계수^{***}
(2002년 1월 8일 접수, 2002년 8월 5일 심사완료)

Design and Experimental Analysis of Fiber Reinforced Elastomeric Isolator

Byung-Young Moon, Gyung-Ju Kang, Beom-Soo Kang and Kye-Soo Kim

Key Words: Fiber Reinforced Elastomeric Isolator(FREI, 섬유보강 탄성받침), Steel Reinforced Elastomeric Isolator(SREI, 철판보강 탄성받침), Seismic Isolation(변진), Experimental Analysis(실험적 해석), Design of FREI(섬유보강 탄성받침 설계)

Abstract

The purpose of this study is to investigate the effect of mechanical properties of the FREI using horizontal stiffness and vertical stiffness by experiments. Two kinds of FREI are designed and fabricated. The steel plates of SREI are replaced with fibers in order to reduce the cost of fabrication and installation. At first, the Nylon fiber is adopted as feasibility study of FREI. The experimental results of Nylon FREI and SREI show that the vertical stiffness of Nylon FREI is lower than SREI, and effective damping is two times higher than SREI. Carbon is adopted, by these results, as strong reinforcement than Nylon and full scale of carbon FREI was designed and fabricated. By the experimental test results, it is shown that the vertical stiffness of carbon FREI is three times higher than SREI, and two times higher in effective damping. As a result, the proposed FREI can replace the SREI as a seismic isolator.

1. 서론

1990년대 이후 고베지진, 터키지진, 대만지진 등 전 세계적으로 강지진의 발생빈도가 증가하고 있고, 1999년 발생한 터키, 그리스, 대만 등의 지진에서 2~3층의 일반건물에 대한 피해가 막대하였으며, 90% 이상의 사상자가 이와 같은 일반주택에서

발생하였다. 지진에 대한 대비로 건물과 지반을 분리하는 방식인, 철판보강 탄성받침이 세계적으로 널리 사용되고 있으며 그 효과에 대해서는 일본의 고베지진 등을 통해서 그 우수성이 입증되었다. 그리고, 연구도 활발하게 수행되고 있다. 적층 탄성받침의 프로파일에 대한 연구,⁽¹⁾ 점탄성 모델에 의한 탄성받침의 기계적 특성에 대한 연구,⁽²⁾ 철판보강 탄성받침의 대변형에 대한 모델⁽³⁾ 등과 같이 철판보강 탄성받침에 대한 연구와, 지진에 대한 고감쇠 탄성받침의 비선형 진동해석이 수행되기도 하였다.⁽⁴⁾ 또한 수정히스테리틱 바이리니어(bilinear) 탄성받침 모델을 사용한 지진응답 감소에 대한 연구가 수행되기도 하였다.⁽⁵⁾ 지진시 저층건물 면진구조의 비선형 동적 거동이 해석되기도 하였다.⁽⁶⁾ 그러나, 현재 사용되어지는 철판보강 탄성받침은 고가에 고중량으로서 원자력

[†] 책임저자, 회원, 부산대학교 항공우주공학과

E-mail : moon_byung_young@hotmail.com

TEL : (051)510-1531 FAX : (051)513-3760

^{*} 회원, 부산대학교 대학원 항공우주공학과

^{**} 회원, 부산대학교 항공우주공학과

^{***} 동일고무벨트(주)

발전소, 컴퓨터 센터, 병원 등에 사용되고 있으며, 일반주택에는 거의 적용되지 못하고 있는 실정이다. 이와 같은 기술이 일반건물에 사용되어지기 위해서는 낮은 가격과 낮은 중량으로 공급되어 제작과 설치에서 경제적이어야 한다. 기존의 철판을 대체하여 섬유로 보강하여 탄성받침을 만들게 될 때, 규격을 조절할 수 있고, 용도에 따라 용이하게 절단하여 건물에 적용할 수 있다. 섬유보강 탄성받침에 대한 연구로는 원형과 스트립타입의 수직강성에 대한 수학적 해석이 수행되었다.^(7,8) 또한, 실험적으로는 나일론으로 보강한 축소모델의 섬유보강 탄성받침에 대한 특성이 해석되기도 하였다.^(9,10) 그러나, 실제로 사용되어질 수 있는 크기의 모델에 대한 해석은 수행되지 않았으며, 보강재로 섬유를 채용했을 때, 따라서 본 논문에서는 실제크기의 탄성받침에 대한 역학적 특성이 규명되지 않았다. 실제크기의 섬유 보강 탄성받침의 실험적 평가를 통하여 섬유보강 탄성받침의 효과를 SREI와 비교하여 입증하고자 한다.

2. 탄성받침의 모델링

2.1 철판보강 탄성받침모델

철판보강 탄성받침은 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 상부구조물에 그대로 전달되지 않도록 해주는 역할을 한다. 탄성받침에서 수평강성과 수직강성은 탄성받침의 중요 성능이 된다. 탄성받침의 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 전단탄성계수, A 는 베어링

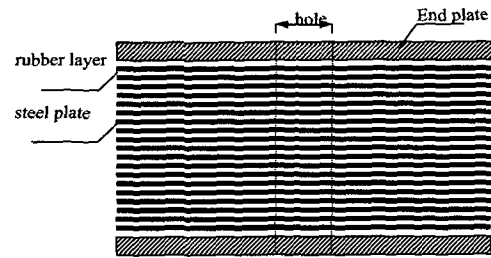


Fig. 1 Model of SREI

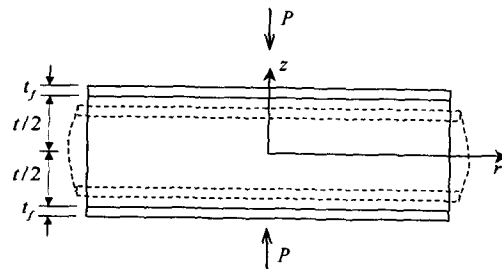


Fig. 2 Model of elastomeric isolator with rubber and fiber layer

의 단면적, t_r 은 베어링내 고무의 총 두께를 나타낸다. 그리고, E_c 는 철판으로 보강된 탄성받침에 특정한 수직 하중이 가해졌을 때의 순간적인 압축강성이다. 단순히 고무 층만의 E_c 는 아래의 식으로 정의되어진 형상계수(S)⁽¹¹⁾로 제어되어진다.

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

반경이 R 이고, 두께가 t 인 원형 Pad의 형상계수(S)는, $S=R/2t$ 가 된다. 철판보강 탄성받침 모델은 Fig. 1과 같다.

2.2 섬유보강 탄성받침모델

섬유보강을 하는 경우에 가장 간단한 모델로는 Fig. 2와 같이 고무 한 층과 아래 위 섬유 두 층으로 모델링하는 것이다. 탄성받침 위에 놓이는 상부 구조물의 하중(P)에 의해서 탄성받침이 균일하게 압축된다고 가정할 때 Fig. 2의 점선으로 표시한 것과 같이 고무의 벌징현상이 발생한다. 섬유는 잘 휘어지는 특성이 있기 때문에, 압축에 대한 식은 복잡하다. 간단하게 하기 위해서, 고무는 비압축성

이라고 가정하자. 보강재는 두께가 t_f 인 보강판으로 대체되었다. 섬유보강의 압축강성식은 식 (2)와 동일하며, 이때의 압축계수 E_c 는 다음 식으로 표현된다.⁽⁸⁾

$$E_c = \frac{E_f t_f}{(1-\nu)t} \cdot \frac{\frac{1}{2} a R I_0(aR) - I_1(aR)}{a R I_0(aR) - (1-\nu) I_1(aR)} \quad (4)$$

여기서, E_f 는 보강재의 탄성계수, t_f 는 두께, ν 푸아송비, R 은 원형패드 반지름, 그리고, I_0, I_1 은 변형된 베셀함수이다. $a^2 = \frac{12(1-\nu^2)G}{E_f t_f t}$ 를 이용하여 식 (4)는 다음과 같이 간단한 식으로 표현할 수 있다.

$$E_c = 6GS^2 \left(1 - \frac{6+\nu}{24(1+\nu)} a^2 R^2 \right) \quad (5)$$

여기서, G 는 고무의 전단탄성계수이며, t 는 고무층의 두께, S 는 형상계수이다. 강재 보강의 경우에는 $E_c = 6GS^2$ 가 된다. 강재 보강일 때와 섬유보강일 때의 압축계수를 비교하기 위하여 Fig. 3에 압축계수의 비를 비교하였다. 두 가지 푸아송비에 대해서 aR 값과 압축 강성비의 관계를 보였다. 여기서 $aR = 12GR^2 \frac{(1-\nu^2)}{E_f t_f t}$ 이다. 이 그림에서 보강재가 강재일 때는 압축계수의 값은 1이 되며 보강재가 강재가 아닐 경우에 aR 값이 증가함에 따라 압축강성의 비가 감소하는 것을 알 수 있다. 보강재의 탄성계수 (E_f), 보강재의 두께 (t_f), 고무의 두께 (t)가 증가함에 따라 aR 값은 증가하게 된다.

3. 섬유보강 탄성받침의 제작, 실험 및 실험결과

기존의 철판보강 탄성받침의 보강재인 철판을 섬유로 대체할 때, 기존의 철판보강 탄성받침과 같은 기계적 성능을 가지는 여부를 연구하기 위하여, 철판을 대체하여 나일론 섬유로 보강한 나일론

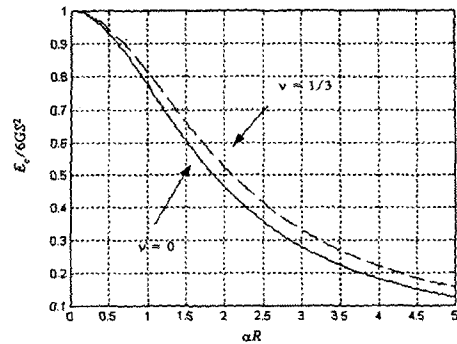


Fig. 3 Normalized Compression modulus $E_c/6GS^2$, vs aR

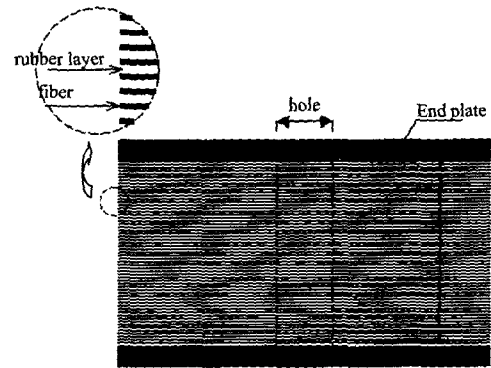


Fig. 4 Model of FREI

보강 탄성받침을 설계 제작하였다. 간단한 시험을 위하여 1/4모델로 설계 제작하여 시험을 수행하였으며, 실험을 통하여 기계적 특성을 검토하였다. 이 결과를 바탕으로 인장강도가 나일론보다 높은 탄소보강 탄성받침을 보강재로 사용하였으며 실제 크기로 설계 제작 및 실험을 수행하였다. 설계한 섬유보강 탄성받침의 모델은 Fig. 4와 같다.

3.1 고무의 개발과정

섬유보강 탄성받침 개발을 위해 천연고무를 원료고무로 한 기초배합을 수 차례 거듭하였으며, 인장강도 실험, 신장률 실험, 경도실험, 인열실험, 오존저항 실험 등을 수행하였다. 노화후의 인장강도 및 신장률, 경도실험을 수행하였다. 이 실험은

Table 1 Dimensions of SREI and Nylon FREI bearings(unit: T(mm), EA(장))

	SREI	FREI
Dimension (mm)	174.5 ^φ ×43 ^φ ×128T	174.5 ^φ ×43 ^φ ×128T
Reinforcement	2T×19EA	1.15T×75EA
End plate	15T×2EA	15T×2EA
Inner rubber layer	3T×20EA	0.155T×76EA
Total thickness of rubber	60T	11.75T

Table 2 Comparison of physical characteristics of Nylon fiber and steel

Item	Nylon fiber	Steel reinforcement
Cutting tension	2000kgf/cm ²	4082kgf/cm ² above
Cutting ratio	30~35%	21% above
Comments	Experimental data	Data from reference

60년에 상당하는 기간동안 고무의 내구성을 보증하기 위한 실험으로서 시험편의 노화축진조건은 70℃×168hr이며, 실험방법은 KS M 6518에 의하여 실시하였으며, 결과는 인장강도 279kgf/cm², 신장률 520%, 경도 61(Shore A)을 얻었다. 이에 의해 노화 후의 인장강도, 신장률, 경도에서 타당한 고무로서 선정할 수 있었다.

3.2 Nylon FREI와 SREI의 설계

나일론으로 보강한 나일론 섬유보강 탄성받침의 재원은 Table 1과 같다. 이때 사용한 나일론 섬유와 철판의 물리적 특성은 Table 2에 비교하였다. 나일론섬유는 철판에 비해서 절반정도의 파단강도(cutting tension)를 가지며, 파단될 때 철판보다 1.5배정도 더 늘어남을 알 수 있다.

3.3 Nylon FREI의 실험장치

탄성받침은 실험기를 통하여 수평실험과 수직실험을 수행한다. 나일론 섬유보강 탄성받침을 시험한 실험기(이하 실험기 1) 작은 크기의 모델에 대한 실험을 수행할 때 사용한다. 이것은 1000톤까지 수행이 가능하다.

3.4 수직실험

각 하중 사이클에 따른 유효 수직강성⁽¹¹⁾($K_{eff,y}$)은 다음 식에 의해 계산하였다.

$$K_{eff,y} = \frac{F_D^{+,y} - F_D^{-,y}}{D^{+,y} - D^{-,y}} \tag{6}$$

여기서, $F_D^{+,y}$, $F_D^{-,y}$ 는 각각 수직방향에 대한 양방향과 부방향의 전단력의 최대치이다. $D^{+,y}$, $D^{-,y}$ 는 각각 수직방향에 대한 양방향과 부방향의 전단변형의 최대치이다.

3.5 수평실험

압축실험과 수평실험은 일반적으로 사이클 테스트를 통해서 얻어진 각 이력곡선의 유효 탄성계수와 등가 감쇠를 계산하게 된다. 베어링의 유효 수평강성과 등가감쇠는 수평 동적 실험에서 가장 중요한 요소이다. 이런 값들은 수평방향의 변위와 수평방향 전단력의 관계로 그래프를 그려봄으로써 구할 수 있다. 이력곡선에 의해 둘러 쌓인 면적은 베어링에 가해진 변형을 정도에 따라서 달라진다. 각 하중 사이클에 따른 유효 수평강성, K_{eff} 는 각 곡선에 대해서 다음 식으로 계산한다.

$$K_{eff} = \frac{F_{max} - F_{min}}{D_{max} - D_{min}} \tag{7}$$

여기서, F_{max} , F_{min} 은 각각 수평방향에 대한 양방향과 부방향의 전단력의 최대치이다. D_{max} , D_{min} 은 각각 수평방향에 대한 양방향과 부방향의 전단변형의 최대치이다. 등가감쇠(β)는 각 사이클의 에너지 소산(EDC)에 의해 다음과 같은 식 (11)으로 계산된다.

$$\beta = \frac{EDC}{2\pi K_{eff} \Delta_D^2} \quad (8)$$

여기서, K_{eff} 는 식 (7)에서 구한 유효 수평강성이며, Δ_D 는 양방향과 부방향의 변위 최대치의 평균값이다.

3.6 Nylon FREI와 SREI의 실험결과비교

SREI의 고무층 총두께는 60.0mm이며, 수평강성 실험은 SREI고무층 두께를 기준으로 50% 전단변형률에 대해서 수행하였다. 실험에 사용된 전단 변형률(γ)의 계산식은 다음과 같다.

$$\gamma = \frac{D}{t_r} \quad (9)$$

여기서, D는 최대 수평변위, t_r 은 고무층의 총 두

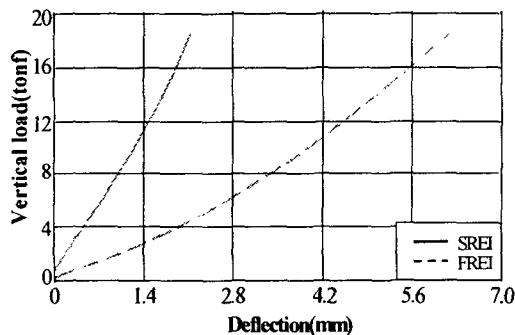
Table 3 Comparisons of test results of Nylon reinforcement and steel reinforcement

Reinforcement	Vertical test	Horizontal test		
	Vertical stiffness (kgf/mm)	$\tan(\gamma)$	Effective stiffness (kgf/mm)	Equivalent Damping(β) (%)
Nylon fiber	3,550	0.5	26.2	11.16
Steel	9,600	0.5	28.6	6.19
$\frac{(FREI)Nylon}{SREI}$	0.37		0.91	1.8

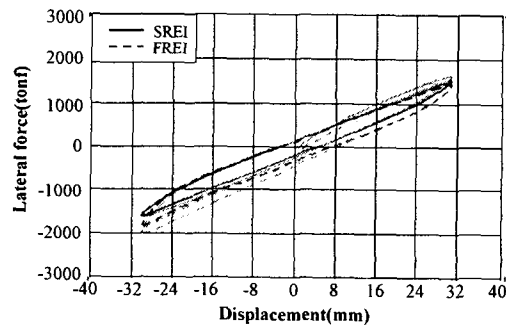
께이다. 전단변형률 50%일 때의 FREI와 SREI의 수직실험에 의한 하중-변형 곡선을 Fig. 5(a)에 보였다. 그림에서 Nylon은 철판에 비해서 잘 늘어나며, 수직하중에 대해서 약한 것을 알 수 있다. 수평강성실험에 사용한 주기는 0.020Hz이며, 각 시편에 대해서 4번의 사이클로 실험하였다. 이때 하중 곡선은 정현파를 사용하였다. 상하판에 가해진 수직하중은 13000kgf이다. 베어링의 초기 고무층 총두께는 60.0mm이다. Fig. 5(b)는 수평실험에 대한 SREI와 FREI의 50% 전단변형률로 최대변형 30.0mm일 때의 힘-변형 관계를 나타내고 있다. Nylon FREI 50% 전단변형률에 대해서는 $K_{eff}=26.2\text{kgf/mm}$, $\beta=11.16\%$ 이다. SREI 50% 전단변형률에 대해서는 $K_{eff}=28.6\text{kgf/mm}$, $\beta=6.19\%$ 이다. Nylon 섬유보강 탄성받침은 철판보강 탄성받침에 비해서 수직강성에 대해서 약하며, 감쇠는 두 배로 뛰어난 것을 알 수 있다. 수평실험과 수직실험에 대한 구체적인 수치는 Table 3에 나타내었다.

Table 4 Dimensions of Carbon FREI bearing(mm)

Item	Dimensions
Carbon fiber	688 ϕ ×174 ϕ ×0.27T×88EA
End plate	688 ϕ ×174 ϕ ×30T×2EA
Rubber layer	688 ϕ ×174 ϕ ×3T×89EA



(a) Comparison of vertical tests



(b) Comparison of horizontal tests

Fig. 5 Comparisons of vertical test and horizontal test results of Nylon FREI and SREI

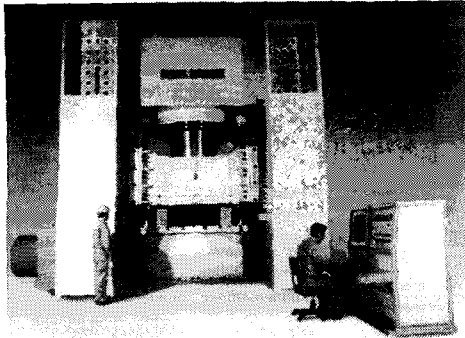


Fig. 6 Elastomer Bearing tester 2

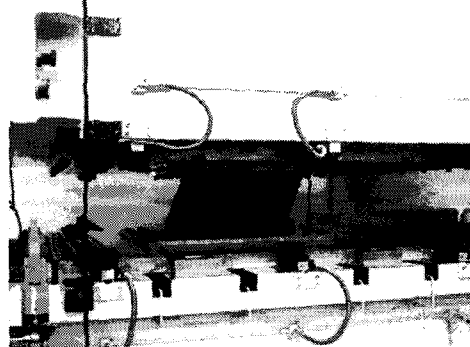
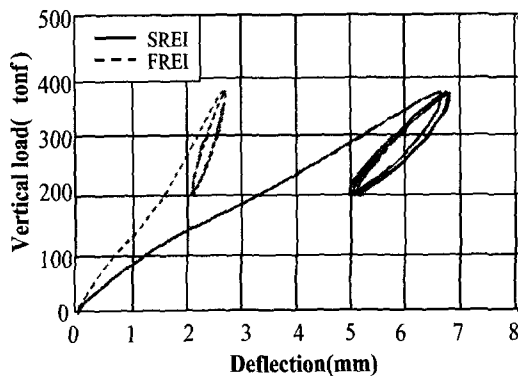
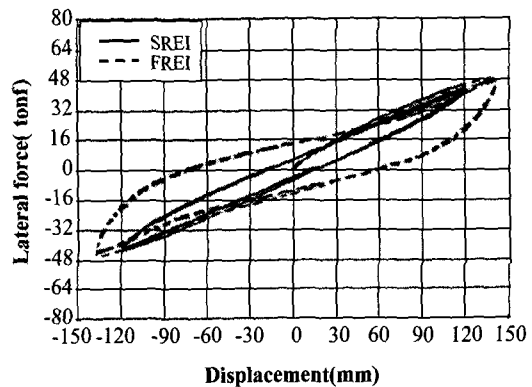


Fig. 7 Tester 2 in operation



(a) Comparison of vertical tests



(b) Comparison of horizontal tests

Fig. 8 Comparison of vertical and horizontal test results of carbon FREI and SREI

3.7 Nylon FREI 실험결과 평가 및 Carbon FREI와 SREI의 설계

나일론 섬유보강 탄성받침의 설계제작 및 실험 결과를 통해서 압축강성은 SREI에 비해서 낮으며, 감쇠는 높은 것을 알 수 있었다. 여기서 보강재인 섬유는 늘어나는 특성이 있기 때문에 수직강성이 약하며, 감쇠에는 더 효과적인 것을 알 수 있다. 따라서, 인장강도가 나일론 보다 강한 섬유를 사용할 때 압축강성의 문제를 해결할 수 있으며, 섬유의 특성상 높은 감쇠를 얻을 수 있다고 할 수 있다. 이에 따라, 탄소섬유를 이용하여 탄소섬유 탄성받침을 설계 제작하였다. 제품규격은 $698^{\phi} \times 172^{\phi} \times 335T$ 이고 항목별 성형규격은 Table 4에 명시하였다. 이와 비교하는 SREI의 제품규격은 탄소섬유 보강 탄성받침과 동일한 $698^{\phi} \times 172^{\phi} \times 335T$ 로 하였다.

Table 5 Explanation of elastomeric bearing tester 2

	Main vertical actuator	Main horizontal actuator
Maximum load	3,000ton _f	1,000ton _f
Stroke variation	± 800mm	± 800mm

3.8 Carbon FREI 실험장치

탄소섬유 탄성받침은 실제 크기로 설계 제작하여 큰 규모의 실험이 가능한 실험기(이하 실험기 2)를 사용하였다. 작동범위는 Table 5에 명시하였으며, 그 형상은 Fig. 6와 같으며 크기는 $W12,000mm \times D3,500mm \times H8,000mm$ 이다. 시험중인 실험기 2를 Fig. 7에 보였다.

Table 6 Test result of the comparison of carbon reinforcement and steel reinforcement

Reinforcement	Vertical test	Horizontal test		
	Vertical stiffness (kgf/mm)	$\tan(\gamma)$	Effective stiffness (kgf/mm)	Equivalent Damping (β) (%)
Carbon fiber	320,857	0.5	330	15.85
Steel	107,322	0.5	350	6.20
(FREI)Carbon SREI	3		0.94	2.5

3.9 Carbon FREI와 SREI의 비교

탄소섬유보강 탄성받침과 철판보강 탄성받침의 강성과 감쇠를 비교하기 위하여 탄소섬유보강 탄성받침과 기존의 철판보강 탄성받침의 두 가지 탄성받침에 대해서 실험을 수행하였다. Fig. 8(a)에서는 190(ton_f)에서 370(ton_f)까지의 수직하중을 가하면서, 철판보강탄성받침과 섬유보강 탄성받침의 수직강성을 비교하였다. 철판보강 탄성받침과 섬유보강 탄성받침의 수직 강성은 각각, 107,322(kg/mm), 320,857(kg/mm)을 얻었다. 이 결과로부터 섬유보강 탄성받침의 수직하중이 철판보강 탄성받침보다 3배 높은 것을 알 수 있다. Fig. 8(b)에서는 섬유보강 탄성받침과 철판보강 탄성받침의 수평실험의 이력곡선을 비교하였다. FREI는 330(kg/mm)의 유효강성과 15.85%의 감쇠를 나타낸다. SREI의 실험결과로부터 350(kg/mm)의 유효강성과 6.20%의 감쇠를 나타낸다. 섬유보강 탄성받침은 철판보강 탄성받침보다 두 배의 유효감쇠로서 지진시 두 배의 에너지를 흡수함을 알 수 있다. Table 6에서 보인 바와 같이 섬유보강 탄성받침이 철판보강 탄성받침보다 3배정도 높은 수직강성을 보이고 있다. 이것은 고무층과 섬유 사이의 고무층이 얇기 때문에 건물의 수직하중에 대해서 고무의 벌징 현상이 적게 발생하는 것과 탄소섬유가 철판보다 인장강도가 높는데 원인이 있다. 섬유탄성받침의 등가 감쇠는 철판보강 탄성받침에 비해서 2.5배 높은 감쇠능을 가짐을 알 수 있다.

4. 결론

기존의 철판보강 탄성받침의 보강재로 사용되던 철판을 섬유로 대체하여 섬유보강 탄성받침을 설계 및 제작하였다. 이때의 보강섬유로는 나일론으로 보강하여 작은 크기의 탄성받침을 설계 제작하였고, 이 결과를 토대로 철판보다 높은 강성의 탄소섬유를 보강하여 탄성받침을 설계 제작하였다. 수평실험과 수직실험을 통해서 수평강성과 수직강성, 감쇠를 구하였고 다음과 같은 결론을 얻었다.

(1) 섬유보강 탄성받침은 철판보강 탄성받침에 비해서 에너지 소산능력이 높다

(2) 나일론섬유로 보강할 때보다 탄소섬유로 보강할 때 높은 수직강성을 얻을 수 있다.

따라서, 본 연구에서 제안한 FREI는 SREI로 대체할 수 있는 탄성받침임을 확인할 수 있었다.

후 기

본 연구는 Brain Korea 21 Program의 지원으로 행해졌으며, 실험은 동일고무벨트(주)의 협조로 수행되었습니다.

참고문헌

- (1) Alias, B. O., 2001, "Profile of a Laminated Rubber Bearing," *Polymer Testing*, Vol. 20, Iss. 2, pp. 159~166.
- (2) Hsiang-Chuan, T., and Shaw-Jiun, H., 2001, "Mechanical Properties of Isolation Bearings Identified by a Viscoelastic Model," *Int. J. of Solids and Structures*, Vol. 38, Iss. 1, pp. 53~74.
- (3) Masao, L., 2000, "A Macroscopic Model for Prediction Large-Deformation Behaviors of Laminated Rubber Bearings," *Engineering Structure*, Vol. 22, Iss. 4, pp. 323~334.
- (4) Koo, G. H., Ohtori, Y., 1998, "Loading Rate Effects of High Damping Seismic Isolation Rubber Bearing on Earthquake Responses," *KSME Int. J.*, Vol. 12, No. 1, pp. 58~66.
- (5) Koo, G.H., Lee, J.H., Lee, H.Y., Kim, J.B. and

- Yoo, B., 1996, "Reduction of the Seismic Responses by Using the Modified Hysteretic Bi-Linear Model of the Seismic Isolator," *Transactions of the KSME, A.*, Vol. 20, No. 1, pp. 127~134.
- (6) Moon, B.Y., Kang, G.J., Kang, B.S. and Kim, K.S., 2001, "Dynamic Stability Analysis of Base-Isolated Low-level Nonlinear Structure Under Earthquake Excitation," *Transactions of the KSME, A.*, Vol. 25, No. 11, pp. 1743~1750.
- (7) Kelly, J. M., 1999, "Analysis of Fiber-Reinforced Elastomeric Isolators," *JSEE*, Vol. 2, No. 1, pp. 19~34.
- (8) Kelly, J. M., 2000, "Analysis for Fiber-Reinforced Elastomeric Isolators," *Annual Report to Engineering Research Center for Net-Shape and Die Manufacturing Pusan National University Korea.*
- (9) Moon, B.Y., Kang, G.J., Kang, B.S., Kim, K.S. and Park, J.S., 2001, "The Experimental Study for Fiber Reinforced Bearing," *Proc. of EESK Conference-Fall*, Vol. 5, No. 2, pp. 415~422.
- (10) Moon, B.Y., Kang, G.J., Kang, B.S. and Kim, K.S., 2002, "An Experimental Study on Fiber Reinforced Elastomeric Bearing," *Earthquake Engineering Society of Korea*, Vol. 6, No. 1, pp. 1~6.
- (11) Farzad, N., Kelly, J. M., 1999, *Design of Seismic Isolated Structures from Theory to Practice*, John wiley & sons, INC, pp. 71~94.