

섬유보강 탄성받침의 실험적 특성 해석

The Experimental Study for Fiber Reinforced Bearing

문병영*

강경주**

강범수***

김계수****

박진삼****

Moon, Byung-Young

Kang, Gyung-Ju

Kang, Beom-Soo

Kim, Kye-Soo

Park, Jin-Sam

Abstract

In this paper, the experimental study was carried out in order to compare the mechanical characteristics of multi-layer elastomeric isolation bearings where the reinforcing elements steel plates case and fiber-reinforcement case. Fiber-reinforced isolater which has the same dimension as the steel reinforced isolator had shown better efficiency in effective damping than NRB. The compression test has shown the corresponding results with the theoretical vertical stiffness in the case of flexible reinforcement. The fiber-reinforced isolator will be significantly lighter and could lead to a much less labor intensive manufacturing process.

Keyword : 섬유보강탄성받침, 천연고무받침, 수평강성, 수직강성

1. 서론

지진의 피해로부터 생명과 재산을 보호하기 위해서 교량과 중요시설물에 면진시설이 사용되고 있다. 그러나, 현재 사용되어 지는 면진 베어링은 고가에 무게면에서 상당한 단점을 가지고 있다. 지진 대비용 면진 베어링의 광범위한 적용을 위해서는 가격과 무게 측면에서 많은 개선이 선행되어야 한다. 철판 적층 방식 면진 베어링의 무게는 주로 면진 베어링의 수직 강성을 높이기 위해 사용된 철판 에 기인한다. 전형적인 철판 적층 방식 면진 베어링은 두께 1인치의 두 개의 강판과 고무 사이에 존재하는 두께 1/8 인치의 20개의 강판, 그리고 고무 재질로 구성되어 있다. 또한, 철판 적층 방식 면진 베어링의 가격은 주로 철판의 준비 과정과 철판과 고무를 접착시키기 위한 가황 공정에 필요한 노동력에 기인한다. 본 연구의 궁극적인 목적은 면진 베어링내의 철판을 섬유를 이용한 복합재질로 구성된 보강판으로 교체하여 베어링 자체의 수직 강성은 유지하면서 가격 및 무게 면에서의 단점을 제거하는데 있다. 면진 베어링의 무게 측면의 단점은 Steel과 동일한 탄성 강성을 가진 복합재질로 구성된 보강판을 사용함으로써 극복되어 질 수 있다. 여기서, 면진 베어링의 수직 강성 보강은 철판과 동일한 체적의 복합재질 보강판에서 동일한 강성이 유지 되어야 한다. 섬유 재질의 복합재가 노동 집약적인 제조 공정을 가지지 않는다면, 가격 측면에서도 잇점을 가질 수 있을 것이다. 또한, 고온 고압의 가황 공정도 고압 가마(Autoclave)의 극초단파에 의한 공정으로 대체될 수도 있을 것이다.

섬유 강화 면진 베어링의 또 다른 장점은 최초 가공 시 길이 방향으로 길게 가공하여 각종 적용 요소에 알맞게 개별적으로 잘라서 사용이 가능하다는 것이다. 특히 길이 방향으로 긴 형상의 면진 베어링은 돌로 만들어진 건축물이나 콘크리트 및 벽돌로 만들어진 주거 시설에 분명한 장점을 가지고 있다. 따라서, 이러한 섬유 보강 면진베어링의 특성을 입증하기 위하여 철판 보강 면진베어링과의 비교 실험을 수행하였다.

* 부산대학교 항공우주공학과 대학원, 정회원

** 부산대학교 항공우주공학과 대학원, 학생회원

*** 부산대학교 항공우주공학과 교수

****동일고무벨트(주)

2. 면진베어링의 해석모델

2.1 철판보강 면진구조모델

철판 보강 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 상부구조물에 그대로 전달되지 않도록 해주는 역할을 한다. 면진베어링에서 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 철판으로 보강된 면진 베어링에 특정한 수직 하중이 가해졌을 때의 순간적인 압축 강성이다. 단순히 고무층만의 E_c 는 아래의 식으로 정의되어진 형상 계수(S)로 제어되어진다.

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

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

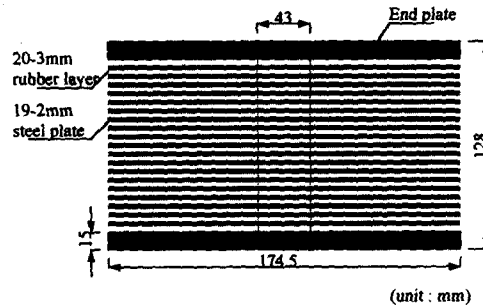


Fig. 1 Experimental model of NRB and FRB

2.2 섬유보강 면진구조모델

철판보강에 의한 면진베어링은 고가이고 무겁기 때문에, 일반주택에 용이하게 설치하기가 어렵다. 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 설정하였다. 철판을 대신하여 철판보다 유연한 섬유를 보강판으로 대체하였을때의 수직강성은 식(2)와 같다.

단 이때, 유효 압축강성은 다음식으로 나타내진다.¹⁾

$$E_c = 6GS^2 \left(1 - \frac{6+\nu}{24(1+\nu)} a^2 R^2 \right) \quad (4)$$

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

여기서, G는 고무의 전단강성이며, ν 는 프와송비, t는 고무의 두께, E_f 는 보강체의 탄성계수, t_f 는 보강체의 두께, S는 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. Figure 2는 섬유보강 면진 베어링의 모델을 보여준다. 면진을 위해서 기존에 사용하던 철판보강 면진베어링과 섬유보강 면진베어링의 성능을 비교하기 위해서 철판을 대체하여 섬유를 사용하였다. 그 제원은 Table 1과 같다.

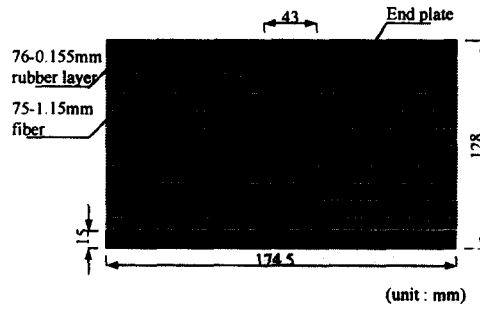


Fig. 2 Fiber reinforced bearing model

Table 1 Dimensions of NRB and FRB bearings

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

3. 실험 및 고찰

면진장치로서 기존에 사용되어지는 철판 보강 면진베어링과 섬유보강 면진 베어링을 비교하기 위해서 두가지 면진베어링에 대한 실험을 수행하였다.

3.1 섬유보강 면진베어링의 제작

기존의 철판보강 면진베어링은 철판과 고무의 적층으로 성형을 하였다. 섬유보강 면진베어링은 철판 보강대신에 섬유를 사용하여 성형한다.

성형된 면진베어링은 몰드조립하여 열과 압력을 가하여 가황공정을 거치게 된다. Figure 3은 가황공정을 보여주고 있다. 가황공정에서 고무에 배합된 유황이 고무분자와 화학결합해서 고무 특유의 탄성이 발생한다. 제품의

가황은 155℃로 90분간 수행하였다. 완성된 제품의 형상은 Fig. 4와 같다.

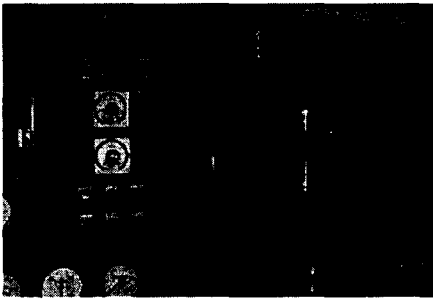


Fig. 3 Isolator molding process

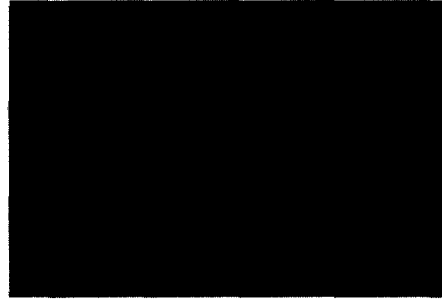


Fig. 4 Fiber reinforced rubber bearing

3.2 시험장치 및 방법

완성된 제품은 시험하기 위해서 지그와 결합하여야 한다. Figure 5에서는 제품과 지그가 결합된 형태를 보여주고 있다. 면진 베어링 시험기는 Fig. 6와 같이 세 개의 부분으로 이루어져 있다. 수직방향의 구동기를 지탱하는 부분, 수평방향의 구동기를 지탱하는 부분, 하중을 수직 구동으로부터 베어링으로 전달하는 부분으로 이루어져 있다. 시험기로부터 생성된 데이터는 윈도우즈 환경의 개인 컴퓨터를 이용한 프로그램으로 획득된다.

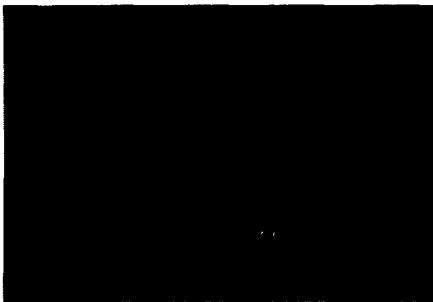


Fig. 5 Connection with zig for test

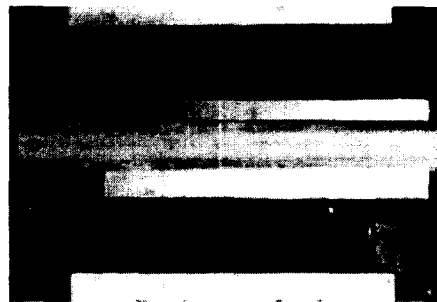


Fig. 6 Elastomeric bearing test machine

3.3 수평시험

압축시험과 전단시험은 일반적으로 싸이클 테스트를 통해서 얻어진 각 히스테리 곡선의 유효 탄성계수와 등가 등가 감쇠를 계산하게 된다. 본 시험에 사용한 싸이클은 정현파를 사용하였으며, 주기는 0.02Hz이고, 4번의 싸이클로 시험을 수행하였다. 베어링의 유효 수평강성과 등가감쇠는 수평 동적 시험에서 가장 중요한 요소이다. 이런 값들은 수평방향의 변위와 수평방향 전단력의 관계로 그래프를 그려봄으로써 구할 수 있다. 이 힘-변형 관계는 이력형태를 보여준다. 이력곡선에 의해 둘러 쌓인 면적은 베어링에 가해진 변형을 정도에 따라서 달라진다. 각 하중 싸이클에 따른 유효 수평강성, K_{eff} 는 각 곡선에 대해서 다음식⁽²⁾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.

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

여기서, K_{eff} 는 식 (4)에서 구한 유효 수평강성이며, D^+ 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.

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

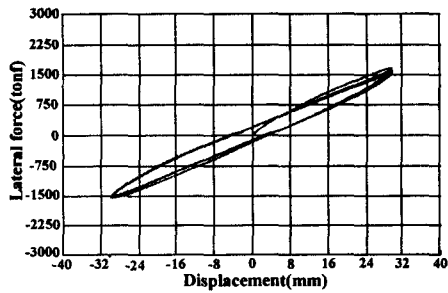
여기서, D 는 최대 수평변위, t_r 은 고무층의 총 두께이다.

수평강성시험에 사용한 주기는 0.020Hz이며, 각 시편에 대해서 4번의 사이클로 시험하였다. 이때 사이클은 정현파를 사용하였다. 상하판에 가해진 수직하중은 13000kgf이다. 베어링의 초기 고무층 총두께는 60.0mm이다. Figure 7(a)는 NRB 50% 전단변형으로 최대 변형 30.0mm일 때의 힘-변형 관계를 나타내고 있다. Figure 7(b) FRB에 대해 30.0mm의 최대 변형일 때의 힘-변형 관계를 보이고 있다. NRB 50% shear strain에 대해서는 $D^+=30.0$ mm의 변형에 대해서 $F_D^+=1602$ kgf, $K_{eff}=26.2$ kgf/mm, $\beta=6.19\%$ 이다. FRB 50% shear strain에 대해서는 $D^+=30.0$ mm의 변형에 대해서 $F_D^+=1457$ kgf, $K_{eff}=28.6$ kgf/mm, $\beta=11.16\%$ 이다.

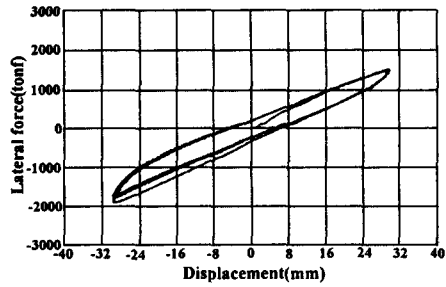
Figure 7(c)는 NRB shear strain 70%일 때의 힘-변형률이며, Fig. 7(d)는 FRB shear strain 70%일 때의 힘-변형 관계를 나타낸 이력곡선이다. NRB 70% shear strain에 대해서는 $D^+=41.44$ mm의 변형, 4사이클의 수평방향 평균 힘은 $F_D^+=2013$ kgf, $K_{eff}=24.5$ kgf/mm, 이력곡선의 면적은 15068(kgf/mm), $\beta=6.19\%$ 이다. FRB 70% shear strain에 대해서는 $D^+=41.44$ mm의 변형, 4사이클의 수평방향 평균 힘은 $F_D^+=2097$ kgf, $K_{eff}=28.1$ kgf/mm, 이력곡선의 면적은 23983(kgf/mm), $\beta=7.83\%$ 이다. 동일한 변형에 대해서 FRB의 수평방향힘은 NRB에 비해서 4% 더 강하며, 이력곡선에서 볼 수 있듯이 FRB는 NRB에 비해서 힘-변형 곡선으로 둘러싼 면적이 더 넓다. 이것은 감쇠성능이 더 좋다는 것을 의미한다. FRB는 NRB에 비해서 1.64%의 감쇠성능이 더 뛰어난 것을 알 수 있다. 이것은 철판보강에 비해서 섬유보강을 할 때 에너지를 소산 시키는 능력이 뛰어난 것으로 해석할 수 있다.

Figure 7(e)는 NRB shear strain 100%일 때의 힘-변형률이며, Fig. 7(f)는 FRB shear strain 100%일 때의 힘-변형 관계를 나타낸 이력곡선이다. NRB 100% shear strain에 대해서는 $D^+=59.23$ mm의 변형, 4사이클의 수평방향 평균 힘은 $F_D^+=2735$ kgf, $K_{eff}=23.2$ kgf/mm, 이력곡선의 면적은 28965(kgf·mm), $\beta=5.61\%$ 이다. FRB 100% shear strain에 대해서는 $D^+=59.23$ mm의 변형, 4사이클의 수평방향 평균 힘은 $F_D^+=3223$ kgf, $K_{eff}=29.8$ kgf/mm, 이력곡선의 면적은 55286(kgf·mm), $\beta=8.36\%$ 이다. 동일한 변형에 대

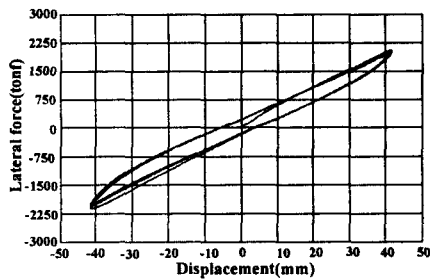
해서 FRB의 유효강성은 NRB에 비해서 28.4% 더 강하다. shear strain 100%에서도 이력곡선에서 볼 수 있듯이 FRB는 NRB에 비해서 힘-변형 곡선으로 둘러싸인 면적이 더 넓다. FRB는 NRB에 비해서 2.75%의 감쇠 성능이 더 뛰어난 것을 알 수 있다.



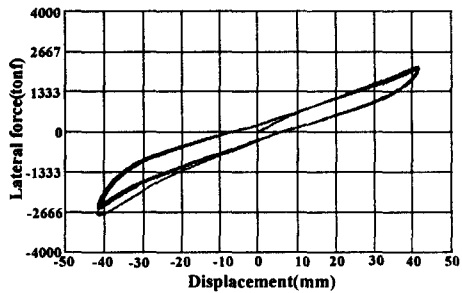
(a) NRB 50% shear strain



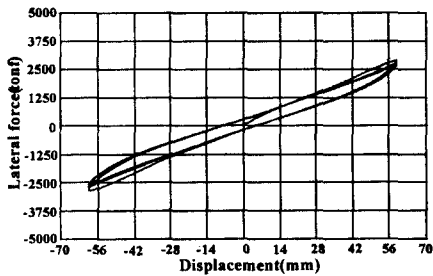
(b) FRB 50% shear strain



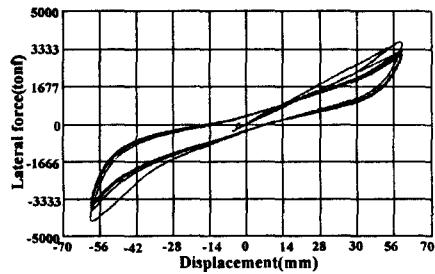
(c) NRB 70% shear strain



(d) FRB 70% shear strain



(e) NRB 100% shear strain



(f) FRB 100% shear strain

Fig. 7 The comparison of force-displacement hysteresis loops of NRB and FRB

shear strain 50%, 70%, 100%에 대해서 NRB와 FRB의 감쇠 성능을 Fig. 8에 보였다. 철보강판에 비해서 섬유 보강판은 더 높은 감쇠 성능을 보여준다. 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 소산 시키기 때문에 NRB보다 뛰어난 면진 성능을 가짐을 알 수 있다.

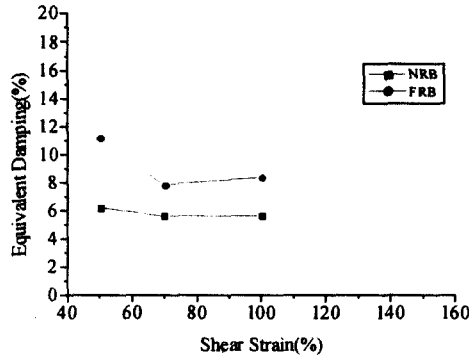


Fig. 8 The comparison of equivalent damping of LRB and FRB

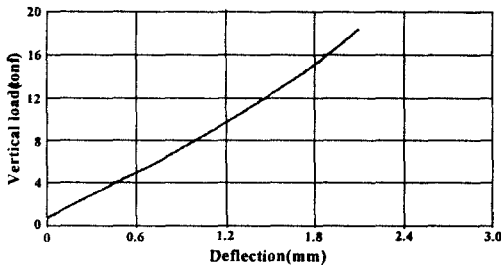
3.4 압축시험

면진베어링에서 가장 중요한 두 요소라고 하면, 수평강성과 수직강성이다. 수평강성에 대한 시험은 앞절에서 조사하였다. 이 절에서는 NRB와 FRB의 수직 강성을 비교하기로 한다. 시험 속도 $51.0\text{kg/cm}^2/\text{min}$, 최대 수직 하중 18.47tonf 의 동일한 조건하에서 수행하였다.

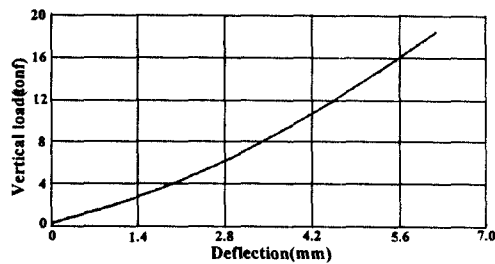
각 하중 사이클에 따른 유효 수직강성 $K_{eff,y}$ 는 다음식에 의해 계산하였다.

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

여기서 $F_D^{+,y}$, $F_D^{-,y}$ 는 각각 100%, 30%의 변형일때의 수직하중값이며, $D^{+,y}$, $D^{-,y}$ 는 각각 100%, 30%에서의 변형량이다. Figure 8은 NRB와 FRB의 압축에 따른 힘-변형 곡선이다. 압축변형량은 NRB는 $2.0 \sim 2.07(\text{mm})$, FRB는 $5.67 \sim 6.16(\text{mm})$ 가 되었다. 이렇게 계산하였을 때 NRB는 9.01tonf/mm , FRB는 3.55tonf/mm 의 결과를 얻을 수 있었다. 이것은 철판에 비해서 섬유가 잘 압축 되는 것에 기인하는 것으로 해석할 수 있다.



(a) NRB



(b) FRB

Fig. 9 The comparison of the vertical stiffness

4. 결론

본 논문에서는 기존의 면진장치에 가장 많이 사용되는 장치로서 철판과 고무의 적층으로 이루어진 면진베어링의 과 섬유보강 면진 베어링을 비교하는 실험을 수행하여 그 특성을 파악하도록 하였다. 철판적층면진베어링과 섬유보강 베어링에 대해서 가장 중요한 특성이라고 할 수 있는 수평실험과 압축실험을 수행하였다. 수평강성 실험에서는 힘-변형 이력곡선을 통해서 FRB는 NRB에 비해서 힘-변형 곡선으로 둘러싼 면적이 더 넓으며, 감쇠능력이 더 뛰어난 것을 알 수 있었다. 이것은 철판보강에 비해서 섬유보강을 할 때 에너지를 소산 시키는 능력이 뛰어난 것으로 해석할 수 있다. 지진시 동일한 크기의 면진 베어링에 대해서 섬유 보강 면진 베어링은 지진 에너지를 더 많이 소산 시키기 때문에 NRB보다 뛰어난 면진 성능을 가짐을 알 수 있었다. 섬유보강 면진 베어링에 대해서는 섬유의 유연한 특성으로 인해서 수직 강성이 줄어들어 이론적으로 보였으며, 압축실험 결과에 FRB는 NRB에 비해서 수직방향의 변형이 많이 발생하며 수직 강성은 떨어지는 것을 볼 수 있었으며 수직강성이 줄어드는 특성이 입증 되었다. 이것은 철판 보강에 비해서 섬유보강이 수직변형에 대한 강성이 약한 것에 원인이 있다는 것을 알 수 있었다.

감사의 글

본 연구는 BK21의 지원하에 수행되었으며, 관계된 분들에게 감사드립니다.

참고문헌

1. J. M. Kelly, "Analysis fo Fiber-Reinforced Elastomeric Isolators", Annual Reprot to Engineering Research Center for Net-Shape and Die Manufacturing Pusan National University Korea, 2000
2. J. M. Kelly, "Earthquake-Resistant Design with Rubber", Springer, 1997, pp.82
3. F. Naeim and J. M. Kelly, "Design of Seismic Isolated Structures- From Teory to Practice-." John Wiley & Sons. 1999, pp. 94