

건물용 납면진받침의 의존성 평가 실험

Experimental Study on Dependent Characteristics of Lead Rubber Bearing for Buildings

정길영* · 박건록** · 하동호*** · 김두훈****

Chung, Gil-Young · Park, Kun-Nok · Ha, Dong-Ho · Kim, Doo-Hoon

Abstract

In this paper, the characteristic dependencies of LRB(lead rubber bearing) were studied by various prototype tests on LRB for buildings. The characteristics of LRB were dependent on displacements, repeated cycles, frequencies, vertical pressures and temperatures. The prototype test showed that the displacement was the most governing factor influencing on characteristics of LRB. The effective stiffness and equivalent damping of LRB were decreased with large displacement, and increased with high frequency. After the repeated cyclic test with 50 cycles, the effective stiffness and equivalent damping of LRB were reduced by approximately 20% compared with those of the 1st cycle. The effective stiffness was decreased with high vertical pressure, while the equivalent damping was increased. In which, the equivalent damping was more dependent on the vertical pressure than the effective stiffness.

1. 서 론

지진격리 시스템은 경제성 및 효율성이 비교적 양호하기 때문에 교량, 건물, LNG 저장탱크, 원자력발전소 등의 지진피해를 최소화하기 위하여 국내·외에서 널리 적용되고 있다. 지진격리받침 중에서 널리 사용되고 있는 납면진받침은 지진시에 고무받침의 유연성으로 구조물의 고유주기를 길게 하여 상부구조에 유발되는 지진력의 크기를 줄이고, 내부에 삽입된 원통형 납의 소성거동으로 지진격리 구조물의 감쇠능력을 향상시켜 지진격리받침에 발생되는 과도한 변위를 억제하고 지진력을 감소시킨다. 일본의 경우, 건축물용 고무받침 또는 납면진받침에 저경도 고무를 많이 사용하고 있다. 이러한 이유는 받침의 높이를 줄여 제작단가를 낮출 수 있을 뿐만 아니라, 건축물이 중·고층인 경우에는 구조물 자체의 고유주기가 비교적 크므로 지진격리시 다른 구조물보다 장주기화하여야 하기 때문이다. 건축 구조물과 같은 활하중이 큰 토목구조물의 경우에도 저장성의 받침이 요구되어 저경도 고무가 필요한 경우가 있다.

본 논문에서는 저경도 고무를 사용한 납면진받침 시험체의 다양한 실험을 통하여 건물용 납면진받침의 특성을 파악하였다. 파악하고자 하는 납면진받침의 특성은 변위의존성, 반복재하특성, 진동수의존성, 면압의존성 및 온도의존성 등이다.

* 유니슨기술연구소 선임연구원
** 유니슨기술연구소 주임연구원
*** 유니슨기술연구소 부소장, 정회원
**** 유니슨기술연구소 연구소장, 정회원

2. 시험체의 제원

본 연구에 사용된 건물용 납면진받침 시험체의 제원은 다음과 같다.

2.1 재료

납면진받침의 내구성과 극한전단 성능을 향상시키기 위하여 내부고무와 별도의 피복고무를 사용하여 시험체를 제작하였으며, 납면진받침에 사용된 재료의 물성은 <표 1>에 나타난 바와 같다.

표 1. 재료 물성

특성	단위	값
내부고무의 전단탄성계수	MPa	0.4
피복고무의 전단탄성계수	MPa	0.6
납의 전단항복강도	MPa (kgf/cm ²)	8.34 (85)

2.2 제원

납면진받침 시험체의 단면도와 세부치수는 그림 1 과 표 2에 나타나 있으며, 이력곡선의 형상 및 특성치는 그림 2와 표 3에 나타난 바와 같다.

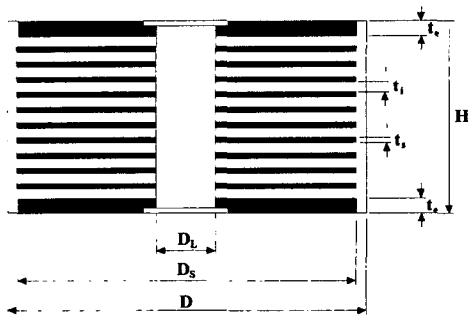


그림 1. 납면진받침의 단면도

표 2. 납면진받침의 치수

항목	표기	단위	값
외경	D	mm	300
내부보강철판의 직경	D_s	mm	280
납봉의 직경	D_L	mm	60
고무층의 총두께	T_r	mm	40
고무층 수	n	-	20
고무 1층의 두께	t_i	mm	2
내부보강철판의 두께	t_s	mm	2
단부철판의 두께	t_e	mm	35
총 높이	H	mm	148

표 3. 납면진받침의 특성치

항목	표기	단위	값
1차 형상계수	S_1^*	-	35
2차 형상계수	S_2^{**}	-	7
유효강성(100%)	K_{eff}	MN/m	1.234
유효강성(175%)	K_{eff}	MN/m	0.940
유효강성(200%)	K_{eff}	MN/m	0.888
최대 수직강성	K_v	GN/m	1.076

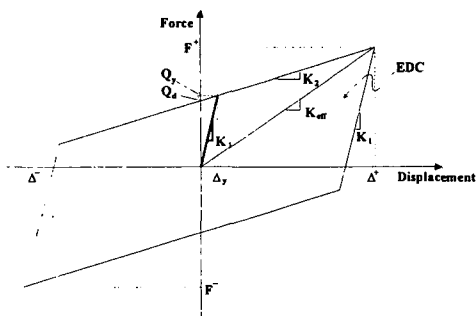


그림 2. 납면진받침의 힘-변위 이력곡선

$$* S_1 = \frac{D_s}{4 \cdot t_i}$$

$$** S_2 = \frac{D_s}{n \cdot t_i}$$

3. 실험개요

2장에 나타난 바와 같은 납면진받침 시험체에 대하여 다양한 특성실험을 수행하였다. 실험장비는 유니스기술연구소 구조시험동 소재의 2,000 kN 압축-전단 시험기를 사용하였다. 실험장비 및 실험방법은 다음과 같다.

3.1 실험장비

납면진받침 시험체의 특성실험에 사용한 2,000 kN 압축-전단 시험기의 최대수직하중은 2,000 kN이며 최대 수평하중은 500 kN이다. 그리고 최대수평속도는 200 mm/sec이며 수평방향 최대변위는 ± 200 mm이다. 수직강성실험과 전단파괴성능시험을 제외한 실험항목에 대해서는 2개의 납면진받침을 시험기에 설치하여 실험을 수행하였으며, 시험기 사진 및 구성도는 그림 3과 그림 4에 나타나 있다.

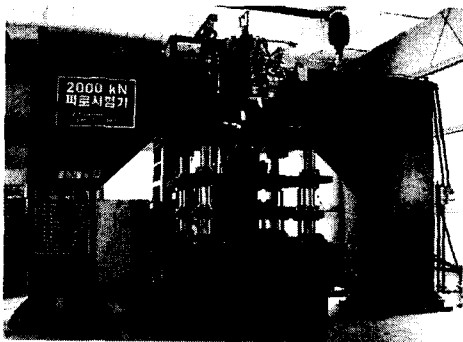


그림 3. 2,000kN 압축-전단 시험기

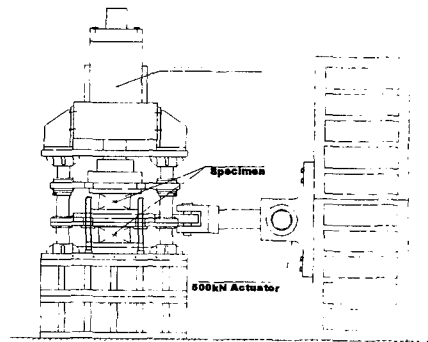


그림 4. 시험기 구성도

3.2 실험내용 및 결과정리

건물용 납면진받침의 특성분석을 위한 실험항목은 다음과 같다.

- 변위 의존성 (전단변형율 : 25, 50, 75, 100, 125, 150, 175, 200 및 250%)
- 반복재하 의존성 (반복재하수 : 50 회)
- 진동수 의존성 (가진진동수 : 0.01, 0.1, 0.2, 0.3, 0.4, 0.5 및 0.6 Hz)
- 면압 의존성 (수직압력 : 0, 5, 10, 15 및 20 MPa)
- 온도 의존성 (시험온도 : -20, +23 및 +40 °C)

i 번째 사이클의 유효강성(K_{eff}^i)은 식 (1)과 같이 구한다. 여기서 Δ_i^+ 와 Δ_i^- 는 각 사이클에서의 최대 및 최소 변위이며, F_i^+ 와 F_i^- 는 최대 및 최소 변위에서의 힘이다.

$$K_{eff}^i = \frac{F_i^+ - F_i^-}{\Delta_i^+ - \Delta_i^-} \quad (1)$$

그리고, 평균유효강성(K_{eff})은 4 회부터 10 회까지 유효강성의 평균으로 계산하였다.

i 번째 사이클의 등가감쇠비(ξ_{eq}^i)는 식 (2)과 같이 구한다. 여기서, EDC_i (Energy Dissipated per Cycle)는 각 사이클에서의 이력곡선 내부의 면적이다.

$$\xi_{eq}^i = \frac{EDC_i}{2\pi K_{eff}^i \left(\frac{\Delta_i^+ - \Delta_i^-}{2} \right)^2} \quad (2)$$

그리고, 평균등가감쇠비(ξ_{eq})는 4 회부터 10 회까지 등가감쇠비의 평균으로 계산하였다.

4. 의존성 분석

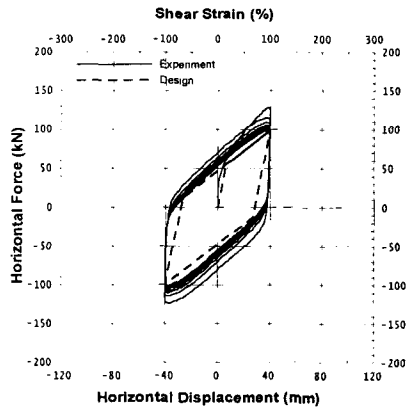
납면진반침의 특성파악을 위하여 3.2 절에 나타난 다양한 실험항목에 대하여 실험을 수행하였다. 고온과 저온실험을 제외한 실험온도는 +23°C이며 각 실험항목에 대한 실험방법 및 결과는 다음과 같다.

4.1 변위 의존성

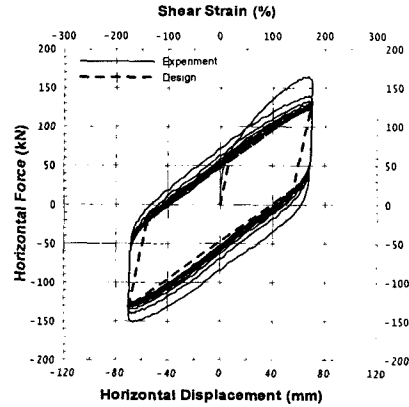
다양한 수평변위에 대하여 압축-전단시험을 수행하여 납면진반침의 변위 의존성을 파악하였다. 2,000kN의 수직가력기로 시험체에 440kN으로 하중제어하여 7.5MPa의 면압을 유지하였으며, 500kN의 수평가력기로 해당 변위로 변위제어하였다. 2개의 시험체를 설치하여 0.2 Hz의 정현파로 수평변위를 각각 10회 재하하였다.

실험한 수평변위는 25, 50, 75, 100, 125, 150, 175, 200 및 250%의 전단변형율에 해당하는 변위를 사용하였으며, 100%와 175%의 전단변형율에 대한 설계치와 실험치의 힘-변위 이력곡선을 그림 5에 비교하였다. 그리고, 납면진반침 시험체의 변위에 따른 유효강성과 EDC의 실험치와 설계치를 그림 6과 그림 7에 나타내었다. 유효강성의 경우, 그림 6에 나타난 바와 같이 실험치가 설계치보다 저변위시에 다소 높은 유효강성을 보이고 있으며 변위가 커짐에 따라 차이가 감소하는 것으로 나타나고 있다. 그림 7에 나타난 EDC의 경우, 변위가 증가함에 따라 거의 선형적으로 증가

하고 있으며 실험치가 설계치에 비하여 모두 크게 나타나고 있다. AASHTO²⁾의 품질관리시험 (Quality control test)에서 제시하고 있는 오차범위와 설계치-실험치간 오차를 표 4에 비교하였으며, 실험치는 AASHTO 규정을 모두 만족하고 있다.



(a) 전단변형을 = 100 %



(b) 전단변형을 = 175 %

그림 5. 납면진받침의 힘-변위 이력곡선 비교 (0.2 Hz)

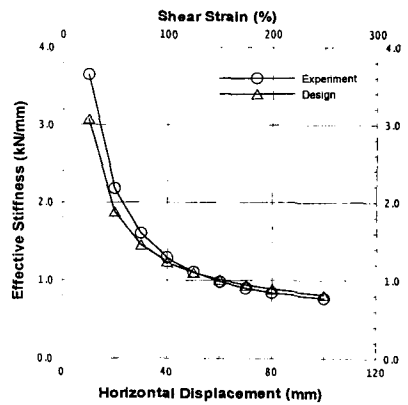


그림 6. 변위에 따른 유효강성 비교

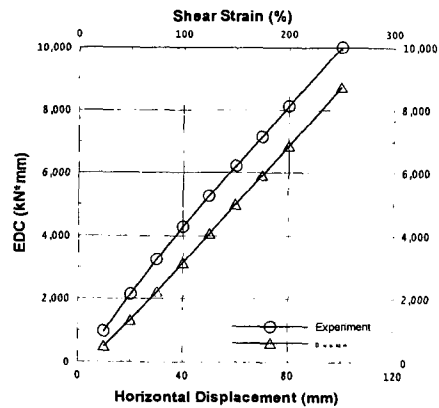


그림 7. 변위에 따른 EDC 비교

표 4. 설계치-실험치간 오차

특성	AASHTO 규정		실험치 오차		
	개별제품	제품전체평균	50% 전단변형	100% 전단변형	175% 전단변형
유효강성	±20% 이내	±10% 이내	+16.0%	+4.6%	-4.1%
EDC	-25% 이상	-15% 이상	+63.2%	+36.3%	20.7%

4.2 반복재하 의존성

납면진받침의 반복재하 특성을 파악하기 위하여 2 개의 시험체를 설치하여 50 회의 반복재하 시험을 수행하였다. 반복재하 시험은 수직압력을 7.5MPa 로 가하고 0.2 Hz 의 정현파로 175%의 전단변형율에 해당하는 $\pm 70\text{mm}$ 의 수평변위를 재하하여 수행하였다.

납면진받침 시험체의 반복재하 시험을 통한 힘-변위 이력곡선을 그림 8 에 나타내었으며, 반복재하수 증가에 따른 각 사이클별 유효강성과 등가감쇠비의 변화율을 초기값 대비 각 사이클별 값의 비율로 그림 9 와 그림 10 에 나타내었다. 유효강성과 등가감쇠비는 반복재하수가 증가함에 따라 모두 감소하는 경향을 보이며, 초기 3~4 회까지는 급격히 감소하다가 반복재하수가 증가함에 따라 감소폭이 축소되어 점차 수렴하는 경향을 보인다. 50 회의 반복재하 실험결과, 50 번째 사이클의 유효강성과 등가감쇠비가 1 번째 사이클에 비하여 약 80%로 감소하였다.

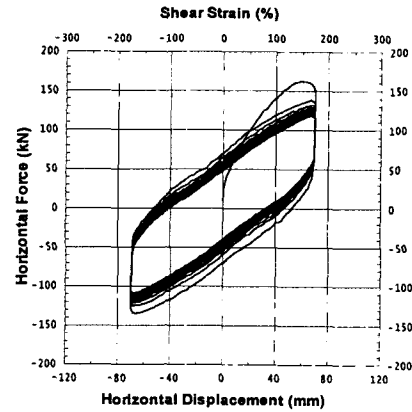


그림 8. 반복재하 시험시 힘-변위 이력곡선
(50 회 반복재하, 0.2 Hz)

반복재하에 따른 유효강성과 등가감쇠비의 저하원인은 반복재하수가 증가함에 따라 납과 고무의 온도가 상승하였기 때문이며, 일정 반복재하수가 지나면서 온도상승율이 둔화되기 때문에 하락폭이 줄어든 것으로 판단된다.

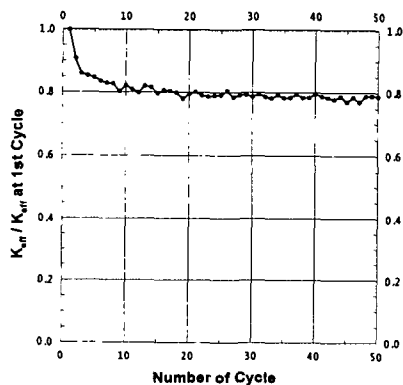


그림 9. 반복재하에 따른 유효강성의 변화

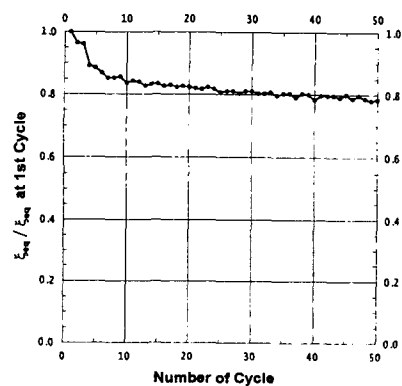


그림 10. 반복재하에 따른 등가감쇠비의 변화

4.3 진동수 의존성

납면진받침의 진동수 의존성을 파악하기 위하여 2 개의 시험체를 설치하고 다양한 진동수에 대하여 압축-전단시험을 수행하였다. 7.5MPa의 수직압력 하에서, 전단변형을 175%에 해당하는 $\pm 70\text{mm}$ 의 전단변위에 대하여 정현파로 0.01, 0.1, 0.2, 0.3, 0.4, 0.5 및 0.6 Hz의 가진진동수로 수평 변위를 10회 반복 재하하였다.

다양한 진동수의 이력곡선에서 2번, 5번 및 10번째 사이클에 대한 유효강성과 등가감쇠비를 산정하여 그림 11과 그림 12에 나타내었다. 2번째 사이클의 산정한 유효강성과 등가감쇠비는 진동수가 증가함에 따라 증가하고 있다. 그러나 5번째 사이클의 경우에는 유효강성과 등가감쇠비가 초기 사이클에 비하여 감소하였기 때문에 유효강성은 진동수 전반에 걸쳐 변화량이 미미하게 나타나고 있으며 등가감쇠비는 진동수가 증가함에 따라 조금 감소하는 경향을 나타내고 있다. 그리고 종반의 10번째 사이클의 경우에 유효강성과 등가감쇠비가 초반에 비하여 더욱 감소하여, 진동수와 등가감쇠비는 진동수가 증가함에 따라 감소하는 것으로 나타나고 있다. 이러한 현상은 가진진동수(가진속도)가 증가함에 따라 유효강성과 등가감쇠비가 증가하나, 반복재하수가 증가하면서 납과 고무의 내부온도가 상승하기 때문에 특성치가 감소한 결과이다.

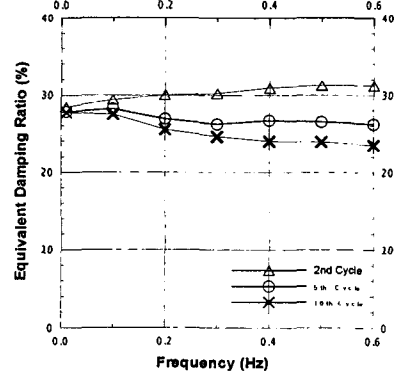
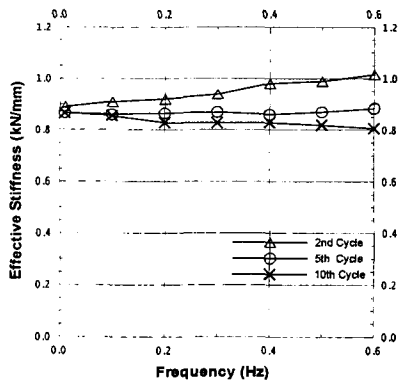


그림 11. 진동수에 따른 사이클별 유효강성 [설계치 : 0.940 kN/m] 그림 12. 진동수에 따른 사이클별 등가감쇠비 [설계치 : 20.5 %]

0.01, 0.2 및 0.5Hz의 가진진동수에서의 반복재하수에 따른 유효강성과 등가감쇠비를 그림 13과 그림 14에 나타내었다. 재하초기에는 진동수가 높을수록 유효강성과 등가감쇠비가 크게 나타나고 있으나, 반복재하수가 후반에는 오히려 작게 나타나고 있다. 이러한 현상은 가진진동수가 높을수록 납과 고무의 내부온도 상승이 증대되기 때문이다.

따라서, 특성치의 저하현상은 4.2절에 나타난 반복재하수 뿐만 아니라 가진진동수(또는 가진속도)에 의존하며, 가진진동수가 클수록 급격히 진행됨을 알 수 있다.

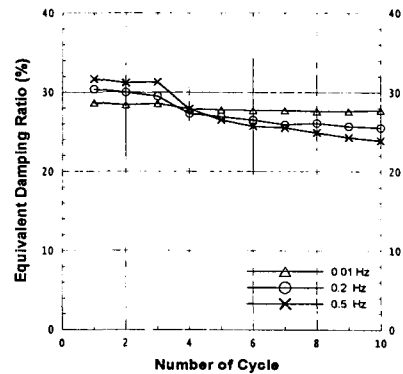
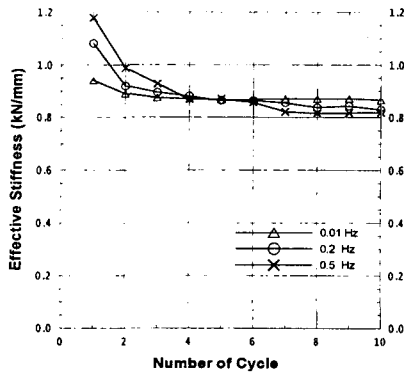


그림 13. 반복재하에 따른 진동수별 유효강성 그림 14. 반복재하에 따른 진동수별 등가감쇠비

4.4 면압 의존성

납면진받침의 면압 의존성을 파악하기 위하여 2 개의 시험체를 설치하고 다양한 면압에 대하여 압축-전단시험을 수행하였다. 면압의존성 시험은 전단변형을 100%와 175%에 해당하는 $\pm 40, \pm 70\text{mm}$ 의 전단변위에 대하여 0.2 Hz의 정현파로 수평변위를 10 회 반복 재하하여 수행하였다. 수직하중을 294, 588, 881 및 1750kN 로 가하여 0, 5, 10, 15 및 20 MPa의 면압에 대하여 실험을 수행하였다.

납면진받침 시험체의 면압에 따른 유효강성과 등가감쇠비를 그림 15와 그림 16에 나타내었으며, 유효강성은 면압 10MPa 이상에서 조금 감소하는 경향을 나타내고 있으며 등가감쇠비는 면압이 커지면서 증가하는 경향을 나타내고 있다. 100%와 175%전단변형을에서 동일한 경향을 나타내고 있다.

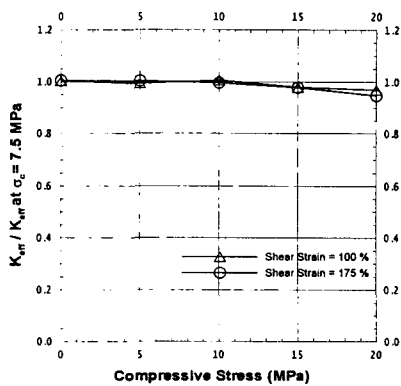


그림 15. 면압에 따른 유효강성의 변화

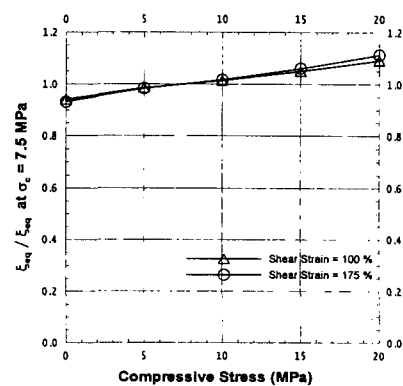


그림 16. 면압에 따른 등가감쇠비의 변화

4.5 온도 의존성

납면진받침의 온도 의존성을 파악하기 위하여 2 개의 시험체를 설치하고 -20°C 의 저온과 $+40^{\circ}\text{C}$ 의 고온에서 압축-전단시험을 수행하였다. 0, 5 및 10 MPa의 면압에서 전단변형을 100%와 175%에 해당하는 $\pm 40, \pm 70\text{mm}$ 의 전단변위에 대하여 0.2 Hz의 정현파로 수평변위를 10회 반복 재하하였다. 시험기에 해당온도의 항온항습기내에 3일간 보관한 시험체를 장착하고 항온챔버를 설치하여, 저온유지시에는 액체질소를 이용하고 고온유지시에는 열풍기를 이용하여 실험온도를 유지시키며 실험을 수행하였다.

납면진받침 시험체의 온도에 따른 유효강성과 등가감쇠비를 그림 17과 그림 18에 나타내었으며, 유효강성과 등가감쇠비 모두 온도가 상승함에 따라서 감소하는 경향을 나타내고 있다. 그리고 해당온도에서 유효강성은 면압의 영향이 거의 없는 반면, 등가감쇠비는 면압이 커짐에 따라 증가하고 있다. 여기서 상온 $+23^{\circ}\text{C}$ 에서의 특성치는 4.1 절의 변위 의존성 실험에서 얻은 결과이다.

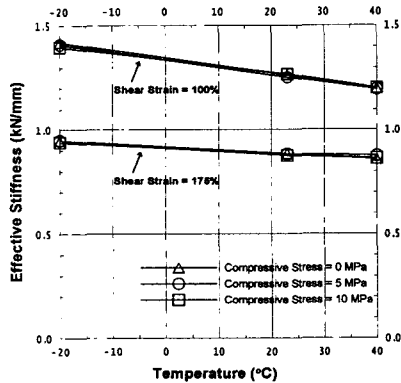


그림 17. 온도에 따른 유효강성의 변화

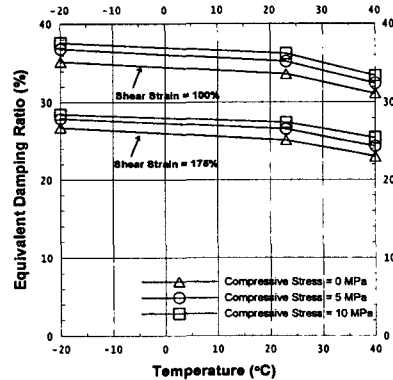


그림 18. 온도에 따른 등가감쇠비의 변화

5. 결론

본 연구에서는 전단탄성계수가 0.4MPa인 저경도 고무로 제작한 직경 300mm의 건물용 납면진받침 시험체의 다양한 특성시험을 통하여 다음과 같은 결론을 얻었다.

- (1) 변위 의존성 시험을 통하여, 변위가 증가하면 유효강성은 감소하고 EDC는 선형에 가깝게 증가한다는 결론을 얻었다.

- (2) 50 회의 반복재하 시험을 통하여, 반복재하수가 증가하면서 납과 고무의 온도상승으로 인하여 유효강성과 등가감쇠비가 감소한다는 결론을 얻었다. 본 시험체의 경우, 50 회 사이클의 유효강성과 등가감쇠비는 1 번째 사이클에 비하여 약 20%가 감소하였다.
- (3) 진동수 의존성 시험을 통하여, 진동수가 증가하면 반복재하 초기에는 유효강성과 등가감쇠비가 증가하나, 반복재하가 증가하면서 납과 고무의 온도상승으로 인하여 그 값들이 감소한다는 결론을 얻었다. 여기서, 진동수가 증가할수록 특성치의 저감폭이 커진다.
- (4) 면압 의존성 시험을 통하여, 면압이 증가하면 유효강성은 감소하고 등가감쇠비는 증가한다는 결론을 얻었다. 본 시험체의 경우, 등가감쇠비가 유효강성에 비하여 면압의 영향을 크게 받았다.
- (5) 온도 의존성 시험을 통하여, 온도가 증가하면 유효강성과 등가감쇠비가 모두 감소한다는 결론을 얻었다.

6. 참고문헌

- [1] “도로교 설계기준”, 건설교통부, 2000
- [2] “Guide Specifications for Seismic Isolation Design, 2nd Edition”, AASHTO, 1999
- [3] “Standard Specifications for Highway Bridges, 16th Edition”, AASHTO, 1996
- [4] “Uniform Building Code, Volume 2”, International Conference of Building Officials, 1997
- [5] Skinner, R. I, William H. Robinson and G. H. McVerry, “An Introduction to Seismic Isolation”, John Wiley & Sons, 1993
- [6] “Prototype Test Results of Natural Rubber Bearing and Lead Rubber Bearing”, Unison R&D Center, 2001
- [7] “ISO Standard Specification – Rubber Products – Laminated rubber bearings for seismic protection of bridges”, Final draft prepared by Japanese party, 2000
- [8] “道路橋の免震構造システムの開発 – 報告書”, (日)建設省, 1992
- [9] “道路橋支承便覽-改訂案”, 日本道路協會, 2001
- [10] “免震積層ゴム入門”, 日本免震構造協會, (株)オーム, 1997
- [11] “免震用積層ゴムハンドブック”, (社)日本ゴム協會, 免震用積層ゴム委員會, 理工圖書(株), 2000