COSEIK J. Comput. Struct. Eng., 25(6)
pp.533~540, December, 2012
http://dx.doi.org/10.7734/COSEIK.2012.25.6.533

pISSN 1229-3059 eISSN 2287-2302
Computational Structural
Engineering Institute of Korea

Full-scale 저경도 납면진받침의 온도의존성에 대한 실험적 연구

박 진 영[1†] · 장 광 석[1] · 이 홍 표[2] · 이 영 학[3] · 김 희 철[3]

[1]유니슨이테크(주) 기술연구소, [2]한국수력원자력 중앙연구원, [3]경희대학교 건축공학과

Experimental Study on the Temperature Dependency of Full Scale Low Hardness Lead Rubber Bearing

Jin Young Park[1†], Kwang-Seok Jang[1], Hong-Pyo Lee[2], Young Hak Lee[3] and Heecheul Kim[3]

[1]*R&D Center, UNISON eTech Co. Ltd., Cheonan, 330-882, Republic of Korea*
[2]*Plant Const. & Eng. Lab., KHNP Central Research Institute, Daejeon, 305-343, Republic of Korea*
[3]*Department of Architecture Engineering, Kyung-Hee University, Yongin, 446-701, Republic of Korea*

Abstract

Rubber laminated bearings with lead core are highly affected by changes in temperature because key materials which are rubber and lead have temperature dependencies. In this study, two full scale LRB(D800, S=5) are manufactured and temperature dependency tests on shear properties are accomplished. The shear properties at the 3rd cycle are used at -10℃, 0℃, 10℃,20℃, 30℃, 40℃ respectively. The double shear configuration, simultaneously testing two pieces, is applied for compression shear test in order to minimize the friction effects due to the test machine, described in ISO 22762-1:2010. Characteristic strength, post-yield stiffness, effective stiffness, equivalent damping ratio are estimated and presented coefficient due to the temperature changes.

Keywords : *lead rubber bearing, temperature dependency, low hardness rubber, nuclear power plants*

1. 서 론

면진시스템은 기원전 600년 미끄럼 구조 등을 사용하여 지진격리를 위하여 적용된 기록이 있으나 20세기 중반 탄성받침이 개발되면서 활성화되기 시작하였다. 면진장치에 대한 다양한 기술개발과 개선이 이루어지면서 강진지역에서는 건축물, 교량 구조물뿐만 아니라 높은 안정성이 요구되는 원전 구조물에도 다수 적용되고 있다.

국내 건설분야에서는 면진시스템 설계에 대한 체계적인 기준이 마련되어 있지 않지만 구조물의 안전성뿐만 아니라 사용성에 대한 관심이 증대됨에 따라 관련 연구와 적용사례가 증가하고 있다.

교량분야에서는 2005년부터 도로교설계기준 내진설계 편에서 지진격리교량 설계규정이 신설되어 상당수의 교량에 지진격리장치가 널리 사용되고 있다. 그리고 건축분야에서는 유니슨기술연구소, 유니슨 신사옥, 부산 LG CNS 데이터 센터, 김포아파트 등 업무용뿐만 아니라 주거용 건축물 등에서 지진격리장치가 적용된 바 있다. 대부분의 면진장치는 안정성이 확인된 적층고무계열 받침이 적용되고 있으며 관련 연구도 지속적으로 이루어지고 있다.

최근에는 적용 대상 구조물의 범위가 확대되고 있으며 높은 안전성이 요구되는 원자력 구조물에 적용하고자 하는 연구가 활발하게 진행되고 있다. 원자력 구조물의 내진성능을 향상하기 위하여 다양한 면진장치의 원자력 구조물에 대한 적용성 검토가 이루어지고 있다.

지진격리장치는 구조물의 기초 부위와 상부구조 사이에 설치되며 지진 시에 면진층의 유연성을 제공함으로써 전체구조물을 장주기화 한다. 입력지진동은 면진층의 변위수용으로 상부구조에 유발되는 지진력의 크기를 줄일 수 있다. 면진장치는 기본적으로 변위수용이 가능하여야 하며 지진 경험 후

† Corresponding author:
Tel: +82-41-620-3431; E-mail: parkjy@uet.co.kr
Received November 9 2012; Revised November 28 2012;
Accepted November 28 2012
©2012 by Computational Structural Engineering Institute of Korea

This is an Open-Access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution Non-Commercial License(http://creativecommons.org/licenses/by-nc/3.0) which permits unrestricted non-commercial use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.

원위치로 복원이 되어야 한다. 또한 충분한 감쇠능력을 보유하고 있어야 한다.

다양한 면진장치가 개발되고 적용되고 있지만 전술한 세가지 면진장치의 기본조건을 모두 만족하는 장치이며 가장 많은 적용실적을 보이고 있는 장치는 납면진받침(LRB:Lead Rubber Bearing)이다. 적층고무에 의한 복원력, 납코어의 높은 감쇠율 및 재결정화 능력, 높은 항복 전·후 강성의 차이에 따른 높은 면진효과 뿐만 아니라 여진에 대한 안정성도 보유하고 있다. 그러나 면진장치의 거동이 소재변형에 기반을 두고 있기 때문에 주요 구성소재인 탄성체와 납코어의 온도변화와 경년에 따른 특성 변화에 따른 연구가 계속되고 있으며 관련 규제도 개선되고 있다. 우리나라와 같이 계절변화에 따라 분명한 온도 차이를 보이는 지역에서는 온도 변화에 따른 강성과 감쇠율의 변화를 고려한 면진시스템의 설계기법이 요구된다.

고무의 경도는 일반적으로 교량 구조물과 같은 경우 50(IRHD)을 적용하고 있으며 건축물에 적용되는 면진용 적층고무받침은 장주기화와 감쇠효과를 최대한 확보하기 위하여 경도 50이하의 연질 고무를 적용한다. 일본의 경우에 면진부재인증 리스트에 포함되어 있는 고무의 전단탄성계수는 G4등급으로 나타내고 있으며 전단탄성계수($G_{\gamma=100\%}$) 0.392 MPa에 상응하는 수치이며 관련 제품이 90%이상이다.

본 논문에서는 대표적인 면진장치인 납면진받침에 대하여 저경도 고무를 적용한 실규모 장치를 제작하고 온도변화에 따른 강성 및 감쇠 특성변화에 대하여 실험을 통하여 분석하고 평가하고자 한다.

2. 시험개요

적층고무면진장치의 온도의존성은 고무 등의 고분자재료와 감쇠요소인 납의 특성에 영향을 받는다. 고무와 같은 고분자재료의 경우에 온도가 낮아지면 어느 온도영역에서 급격하게 전단탄성계수가 상승하게 된다. 특정온도에 이르게 되면 고무분자가 고무상태에서 유리상태로 변화하여 손실계수(감쇠)가 최대가 된다. 이러한 점을 유리화 전이점이라 하고 이 온도이하에서는 고무의 성질을 상실하게 된다. 일반적으로 천연고무의 경우 -60℃ 정도로 알려져 있다. 고무는 사용온도가 낮아짐에 따라 경화되고 고온에서는 유연하게 되므로 사용 환경과 온도에 따라서 강성과 감쇠비가 변화된다.

납면진받침의 경우에는 천연고무적층고무 본체의 온도의존성과 더불어 납의 온도의존성에 대한 영향을 받는다. 납봉이 99.99% 이상의 순도를 보유한 경우에는 항복 후 천연고무계 적층고무와 거의 동등한 의존성을 나타내지만 항복하중은 보다 큰 의존성을 나타내게 된다. 즉, 납면진받침에서 온도에 대한 의존성을 평가하는 경우 납의 기여도에 대하여 동시에 평가되어야 한다.

납면진받침의 온도의존성은 설계상 면진층 상부 구조물의 건설 장소에 따른 연간 기온변화에 대하여 응답특성이 어떻게 변화하고 건축물의 안전성에 영향을 미치는지 검증하기 위하여 적용되고 있다.

납과 고무의 온도 의존성을 평가하기 위한 기준온도는 일반적으로 20℃를 사용하고 있다. 기준온도에 대하여 등가강성, 등가점성감쇠정수에 대한 온도의 변화율로 표현하는 것이 일반적이다. 온도의존성시험은 고무소재 전단시험편을 이용하여 실시할 수도 있고 실물 시험체를 실시할 수도 있다. 본 연구에선는 실물 크기의 납면진받침을 사용하여 -10℃, 0℃, 20℃, 30℃, 40℃에 대한 강성변화를 실험을 통하여 분석하였다.

2.1 시험기 제원

고감쇠 고무받침 시험체의 특성실험에 사용된 시험기는 Table 1에 나타난 바와 같이 30,000kN 압축-전단시험기를 사용하였다.

ISO 22762-1에서 제시하고 있는 압축-전단 시험방법에서 이중전단 시험방법을 채택하였으며, 단일 전단 시험에서 발생하는 시험기의 마찰력의 영향을 제거할 수 있는 장점이 있다.

Fig. 1 30MN LRB Test machine

Table 1 30MN Comp.-Shear test machine capacity

	최대하중	최대변위	최대속도
수직용량	±30,000kN	±100mm	400kN/sec
수평용량	±5,000kN	±1000mm	20mm/sec
모멘트	±500kN	±100mm	20mm/sec
시험가능 크기		2000×2000×800(mm)	

2.2 항온챔버 제원

시험체의 목표설정온도 도달 여부는 시험체 제작시에 내부 고무층 중앙부와 외부표면에 설치한 온도센서를 삽입하여 시험체를 제작하였다.

시험온도는 -10℃, 0℃, 10℃, 20℃, 30℃, 40℃에 대하여 실시하였으며, 항온챔버에 시험체를 목표온도에 도달할 때까지 존치하여 목표설정온도에 도달한 것을 확인한 후 특성시험을 수행하였다.

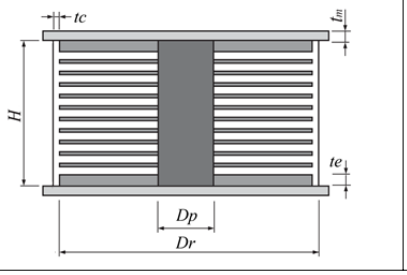
항온계측 장비는 HBM사의 MGC-plus를 사용하였으며 써모커플은 T-type을 사용하였다.

Table 2 Thermal chamber capacity

Maximum Capacity	
Control Range	-30°C ~ +70°C
Size	$5 \times 4 \times 3.7 m^3$

Table 3 Test specimen dimension

	표기	단위	값
외경	D	mm	820
내부보강철판 직경	D_s	mm	800
납봉 직경	D_h	mm	180
고무층 수	n	-	26
고무 1층의 두께	t_i	mm	6
고무층 총 두께	T_r	mm	156
내부보강철판 두께	t_s	mm	4.5
고무 단면적	A	mm^2	478,602
1차 형상계수	S_1*	-	33.3
2차 형상계수	S_2**	-	5.1



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

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

3. 시험체 설계

3.1 시험체 제원

온도의존성을 위한 시험체는 항온챔버의 크기와 시험기기 설치 시간 등을 고려하여 외경 800mm, 내경 180mm의 시험체를 제작하여 평가하였다.

전단변형률 100%, 면압 13MPa인 상태에서 전단탄성계수 G값이 0.4MPa인 고무를 사용하였으며, 납코어의 지름은 180mm가 적용된 납면진 고무받침을 Table 3의 제원표와 같이 제작하였다. 형상계수는 일반적인 건축용 적층고무계받침에서 사용되고 있는 수치와 유사하게 설계가 이루어졌다.

3.2 시험체 설계 결과

시험체의 설계는 다음의 산정식에 따라 특성값을 산출하였다. 납과 고무의 특성은 20℃를 기준으로 하였으며 설계결과는 Table 4와 같다.

연직강성은 식 (1)과 같이 산정되며 체적탄성계수(E_b)는 1960MPa을 사용하였으며, 종탄성계수(E_0)는 1.44MPa으로 반영하였다.

수평특성에 대한 설계는 식 (2)~(5)으로 산정되었으며 전단변형율 100%에 대하여 강성과 등가감쇠정수를 구하였다. ISO22762에서 제시하고 있는 수평특성시험 결과비교시 3회차 사이클의 값 또는 2~11회차 사이클의 평균값을 기준으로 작성되었다.

$$K_v = \alpha_v \cdot \frac{a}{Tr} \cdot \frac{E_0(1+2kS_1^2)E_b}{E_0(1+2kS_1^2)+E_b} \quad (1)$$

Table 4 Design results

설계특성(20℃, γ=100%)			
항 목		설계값	
수직강성	Kv	3,671,306	N/mm
1차강성	K1	16,609	N/mm
2차강성	K2	1,278	N/mm
절편하중	Qd	202,858	N
등가강성	Keq	2,578	N/mm
등가감쇠정수	Heq	0.294	

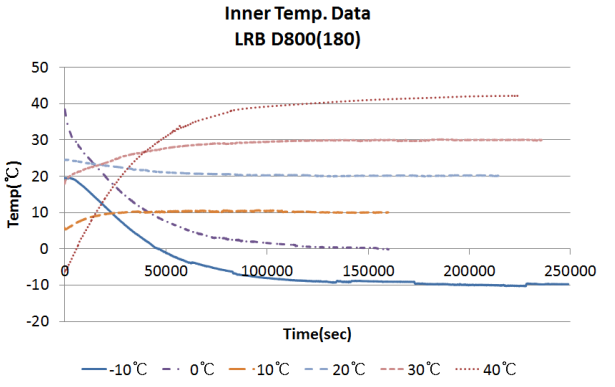


Fig. 2 Inner temperature measured data

납의 전단항복이후에 나타나는 면진장치의 2차강성은 식 (2)와 같으며 고무의 전단강성(K_r)과 납코어의 항복 후 강성증가분(K_p)이 반영되어 있다.

$$K_d = CKd(K_r + K_p) \quad (2)$$

$$(K_r = G_r \frac{A_r}{T_r},\ K_p = \alpha \frac{A_p}{T_r})$$

등가강성은 식 (5)와 같이 표현된다. 식 (2)에서 산정된 2차 강성과 특성강도로부터 전단변형량($\gamma \cdot T_r$)을 적용하여 산출한다.

$$K_{eq} = \frac{Q_d}{\gamma \cdot T_r} + K_d \quad (3)$$

식 (6)은 특성강도 산출식이며 납코어의 항복하중에 대한 전단변형율 의존성 보정계수(CQd)가 적용되어 있다. 등가감쇠정수는 식 (7)과 같으며 납코어의 항복 전과 후의 강성을 이용하여 식이 구성된다.

$$Q_d = CQd \cdot \sigma_{pb} \cdot A \cdot Q_d \quad (4)$$

$$H_{eq} = \frac{2}{\pi} \cdot \frac{Q_d \cdot (\gamma \cdot t_r - \frac{Q_d}{(\beta - 1)K_d})}{Keq \cdot (\gamma \cdot t_r)^2} \quad (5)$$

4. 특성시험

4.1 시험체 온도조건

각 시험조건별 온도계측 결과 확인 후 각 온도조건 별로 면진장치 내부와 표면 및 챔버의 온도를 실시간으로 계측하여 목표온도에 도달한 후 특성시험을 수행하였다.

각 설정온도에 대하여 받침 내부 온도변화는 Fig. 2와 같으며 설정된 내부온도로 접근하기 위해서는 40시간 이상의 챔버 내부 존치가 필요하였다.

4.2 압축특성 시험

시험체의 압축 및 압축-전단 특성을 계측하기 위하여 ISO 22762에서 제시하고 있는 시험방법을 적용하였다.

압축특성을 파악하기 위하여 ISO22762-1의 method 2를 적용하였으며 가력패턴은 Fig. 2와 같다. 설계 압축응력에 상응하는 압축력 P_0의 ±30% 하중을 P_1, P_2으로 설정하

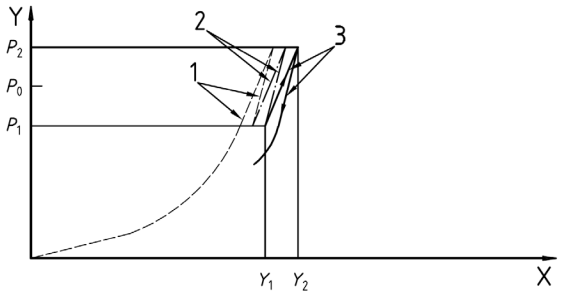


Fig. 3 Vertical property

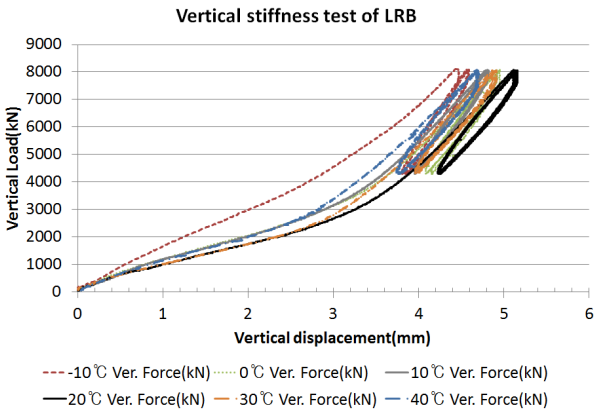


Fig. 4 Temperature dependence test result of vertical stiffness

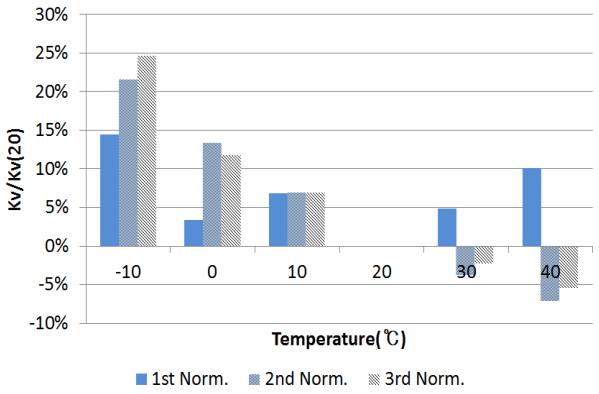


Fig. 5 Deviance of vertical stiffness

고 압축하중 재하를 3주기 반복한다. 수직강성은 식 (6)과 같이 그래프의 기울기로부터 계산할 수 있다.

$$K_v = \frac{P_2 - P_1}{Y_{2-} Y_1} \quad (6)$$

각 온도 조건에 따라 압축특성 시험을 수행하였으며 시험결과는 Fig. 4와 같다. 가력차수에 따라 변화하는 강성은 3번째 가력 시 강성의 변화는 Fig. 5에 도식화되어 있다. 2번째와 3번째 가력 시 강성 변화 경향은 유사한 결과를 나타내

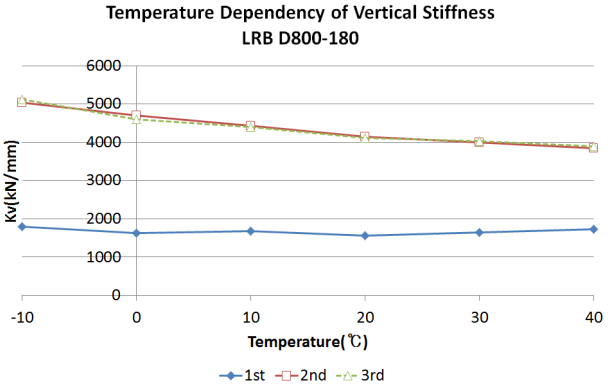


Fig. 6 Temperature dependency of vertical properties

었다.

Fig. 6은 온도 변수에 대하여 각 사이클의 강성 변화비율을 나타낸 그래프이다. 세번째 사이클에서 온도 변화에 대한 영향이 명확하게 나타나는 것을 알 수 있다. -10℃에서 24.6%의 강성증가를 보였으며, 고온에서 강성 저하 비율 대비 저온에서 강성 증가율이 2.19배 높게 나타났다. 이러한 현상은 수직강성 설계 시 납코어의 강성은 배제하고 있으며 적층고무의 형상과 소재경도의 의하여 결정되므로 수직강성의 온도의존성은 적층고무의 특성에 의하여 지배되는 것으로 설명될 수 있다.

4.3 수평특성 시험

LRB의 전단 특성은 설계전단변형률 $\gamma_0=100\%$을 가력하여 세 번째 사이클의 이력곡선을 분석한다. 전단 강성 K_h, 등가감쇠비 h_{eq}, 항복 후 강성 K_d, 특성 강도 Q_d는 다음의 식에 의해서 산정한다.

특성강도 Q_{d1}, Q_{d2}는 각각 양과 음 방향에 대해서 곡선과 전단력 축의 교차점이며, ΔW는 이력곡선에 의해 둘러싸인 에너지소산면적이다.

$$K_h=\frac{Q_1-Q_2}{X_1-X_2} \tag{7}$$

$$Q_d=\frac{1}{2}(Q_{d1}-Q_{d2}) \tag{8}$$

$$h_{eq}=\frac{2\Delta W}{\pi K_h(X_1-X_2)^2} \tag{9}$$

$$K_d=\frac{1}{2}\left(\frac{Q_1-Q_{d1}}{X_1}+\frac{Q_2-Q_{d2}}{X_2}\right) \tag{10}$$

특성시험은 수평변위 ±100%의 변위에 대하여 수평강성특성을 평가하였으며, 기준온도인 20℃에서의 시험결과와 비교

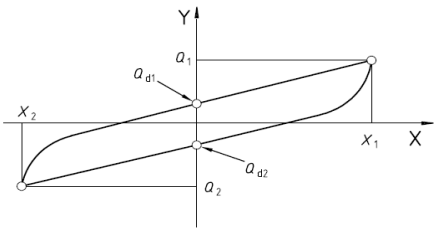


Fig. 7 Determination of shear properties of isolator

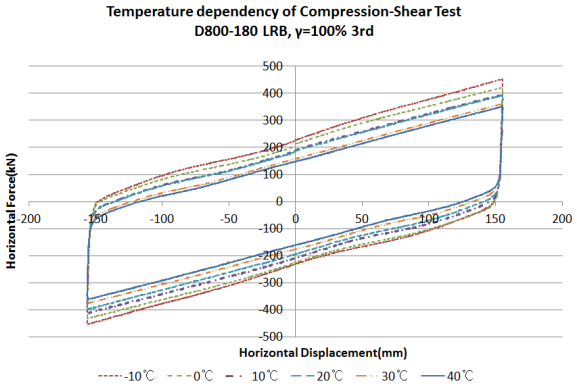


Fig. 8 Hysterisis loop of compression-shear test

Table 5 Test result of temperature dependency

구분	특성값	-10℃	0℃	10℃	20℃	30℃	40℃
시험결과	K_v (kN/mm)	5.125	4.599	4.397	4.113	4.021	3.889
	K_{eq} (kN/mm)	2.92	2.74	2.60	2.55	2.38	2.30
	K_2 (kN/mm)	1.45	1.33	1.32	1.32	1.30	1.30
	Q_d (kN)	228.76	218.75	199.46	191.04	167.72	154.79
	h_{eq}	0.294	0.298	0.289	0.283	0.269	0.259
의존성평가	$\frac{K_v(t)}{K_v(t_{20})}$	1.246	1.118	1.069	-	0.978	0.946
	$\frac{K_{eq}(t)}{K_{eq}(t_{20})}$	1.145	1.075	1.020	-	0.933	0.902
	$\frac{K_2(t)}{K_2(t_{20})}$	1.098	1.008	1.000	-	0.985	0.985
	$\frac{Q_d(t)}{Q_d(t_{20})}$	1.197	1.145	1.044	-	0.878	0.810
	$\frac{h_{eq}(t)}{h_{eq}(t_{20})}$	1.039	1.053	1.021	-	0.951	0.915

하여 특성변화량을 분석하였다. 온도가 -10℃, 0℃, 10℃, 20℃, 30℃, 40℃의 설정온도에 도달한 것을 확인한 후 특성평가 시험을 실시하였다.

각 온도별 수평특성에 대한 이력그래프는 Fig. 8과 같으며 온도 상승에 따라 에너지소산면적이 감소하는 경향을 뚜렷하게 볼 수 있으며, 납코어의 강성변화에 따라 특성강도의 변화도 그래프를 통해 명확하게 확인할 수 있다.

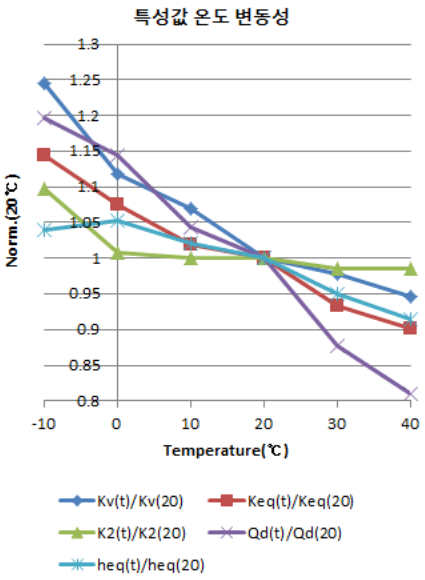


Fig. 9 Temperature dependencies of shear properties

상기 시험체가 온도조건에 충분하게 도달한 후 수평특성시험평가를 실시한 결과는 다음과 같다.

20℃와 -10℃일 때의 2차 강성은 약 9.8%가 증가하였으며 40℃에서 변화율은 -1.5%로 나타났다. 2차 강성의 경우 납코어의 항복 후 적층고무의 영향을 받으므로 저온 상태일수록 강성증가가 뚜렷하게 나타난 것으로 판단된다.

항온챔버에서 -10℃로 69시간 존치하고 내부온도가 목표값에 도달한 것을 확인하였으며 20분 이내에 시험을 착수하였으며 2차 강성은 1.45kN/mm가 계측되었다. 기존온도인 20℃의 경우보다 특성강도가 19.74% 증가하였으며 등가감쇠정수는 3.71% 증가하였다.

0℃로 45시간 존치하였으며 2차강성은 1.33kN/mm가 계측되어 14.50% 증가하였으며 등가감쇠정수는 5.23% 증가하였다. 10℃에서 특성강도는 4.41%, 등가감쇠정수는 2.1%가 증가하였다. 30℃ 조건에서는 2차 강성이 1.5%, 특성강도는 12.2%가 감소하였으며 등가감쇠정수는 4.9% 감소하였다.

40℃에서는 2차 강성이 30℃와 동일한 강성이 계측되었으나 특성강도가 19% 감소하였으며 등가감쇠정수는 8.5% 감소하였다.

Fig. 9는 온도에 따른 특성값을 20℃의 계측값에 대한 비율을 나타낸 그래프이다. 특성강도의 값이 가장 큰 변화를 보였고 유효강성은 선형적인 기울기를 나타내고 있다. 2차 강성은 -10℃에서 가시적인 변화가 나타났으나 온도 상승에 따라서 미소한 변화를 보였음을 알 수 있다.

5. 온도의존성 분석

5.1 수평강성 온도 보정식 검토

납면진받침을 생산하고 있는 업체에서 제시하고 있는 온도에 따른 보정식은 제품 검수 시에 사용하기 위하여 작성이 되었다. 특성시험 시 온도조건이 설계조건과 동일하지 않을 경우 시험결과를 보정하기 위하여 온도 보정값을 제시하고 있다.

제조사의 온도의존성 관계식을 정리하면 다음과 같다. JSSI에서 발간한 2009 면진부재표준품 리스트에 등록된 제품에 적용되는 수식이며, 항복 후 강성과 특성강도에 대하여 제공하고 있다. 고무의 전단탄성 계수는 0.392MPa로 저경도 납면진고무받침에 대하여 의존성식을 정리하였으며 적용온도 범위는 $-20℃ \leq t \leq 40℃$로 동일하다.

$$K_2(t_{20}) = K_2(t) \cdot \exp(-0.00271(t_{20}-t)) \quad (11)$$

$$Q_d(t_{20}) = Q_d(t) \cdot \exp(-0.00879(t_{20}-t)) \quad (12)$$

$$K_2(t_{20}) = \frac{K_2(t)}{1.052 - 2.955\times10^{-3}\cdot t + 1.895\times10^{-5}\cdot t^2} \quad (13)$$

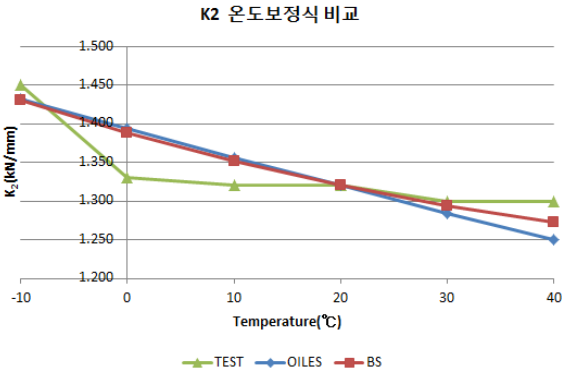


Fig. 10 Comparison of equations(K_2)

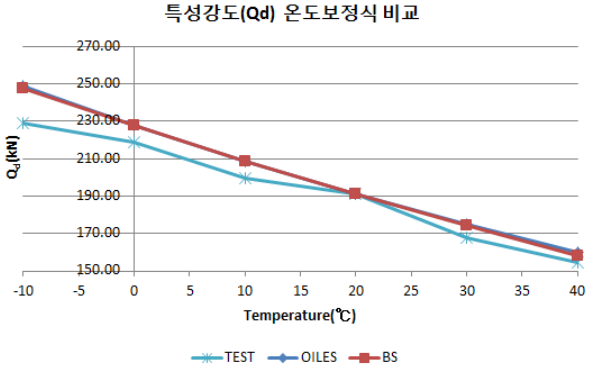


Fig. 11 Comparison of equations(Q_d)

$$Q_d(t_{20}) = \frac{Q_d(t)}{1.192 - 1.017\times10^{-2}\cdot t + 2.722\times10^{-5}\cdot t^2} \quad (14)$$

(t=임의 온도, t_{20}=표준 온도(20℃))

OILES사와 동일한 온도 보정식을 사용하는 제작사는 NITTA, Vibro-tech, FUYO사가 있으며 브리지스톤사에서는 상이한 보정식을 사용하고 있다. OILES사의 보정식은 식 (11), (12)이며 브리지스톤은 식 (13), (14)를 사용하고 있다.

각 제조사에서 제시하고 있는 보정식에 대하여 Fig. 10과 11에서 실험결과와 비교하였다. 2차 강성의 온도에 대한 의존성은 보정식에서 안전측으로 예측하는 것을 알 수 있다. 브리지 스톤의 보정식보다 OILES의 식이 보수적인 예측을 하고 있음을 알 수 있다. 실험결과는 온도변화에 대하여 강성변화가 적은 것으로 나타났으나 제조사에서 제시하고 있는 보정식에서는 상당한 의존성을 고려하고 있다.

5.2 수직강성 온도 보정식 검토

수직강성에 대한 온도보정은 제조사에서 제공하고 있지 않다. 적층고무받침의 경우 수직강성의 제조오차범위를 ±30%로 ISO22762에서 규정하고 있다. 탄성체 적층구조인 경우 각 적층면의 두께 차이에 의하여 강성의 변화가 크게 나타날 수 있다. 일반적인 건축용 받침의 설계는 1차 형상계수가 30 이상인 경우가 대부분이며 받침 전체 규격에 비하여 한 층의 두께가 현저히 작은 값을 가진다. 각 고무층의 성형압력에 따라 특성이 부분적으로 상이할 수 있으며 두께의 일관성을 유지하는 것에 한계가 있기 때문에 오차범위를 상대적으로 높게 제안할 수밖에 없다.

건축구조물의 경우 면진층의 거동은 수평방향 특성이 중요하게 작용한다. 면진장치의 수직강성은 개별 오차를 협소하게 제한하는 것보다 전체 면진층의 평균값으로부터 각 개체의 오차범위를 규정하는 것이 적합하다고 판단된다.

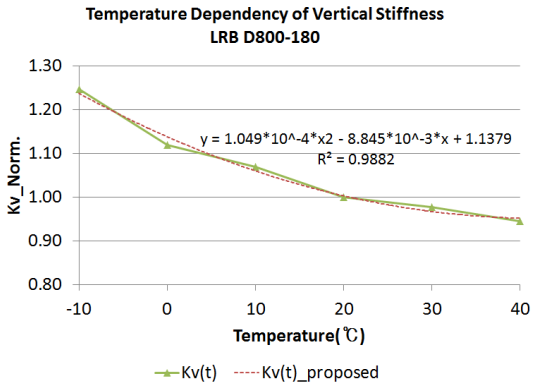


Fig. 12 Proposed temperature dependency of vertical stiffness

본 논문에서는 실험결과에 대하여 추세를 파악하기 위하여 표준온도 20℃를 기준으로 수직강성의 온도의존성에 대하여 R^2=98.8% 수준으로 회귀 방정식을 구성하였다. 회귀 모형의 일반화를 위해서 다양한 설계조건에 대하여 추가적인 데이터 축적이 필요하지만 실규모 납면진받침에 대한 수직강성의 온도의존 경향을 제시할 수 있다고 판단된다. 온도의존성 추세에 대한 방정식은 다음의 식 (15)와 같다.

$$K_v(t_{20}) = \frac{K_v(t)}{1.1379 - 8.845\times10^{-3}\cdot t + 1.049\times10^{-4}\cdot t^2} \quad (15)$$

6. 결 론

본 연구에서는 적층고무의 전단탄성계수($G_{\gamma=100\%}$)가 0.392 MPa인 저경도 실규모 납면진받침의 온도조건에 따른 수직 및 수평특성 변화를 실험을 통하여 분석하였으며, 장치 제조사에서 제공하고 있지 않은 수직강성의 온도의존성에 대한 경향을 제시하였다.

① 수직강성의 온도의존성 시험에서 세번째 사이클에서 온도 변화에 대한 영향이 명확하게 나타났다. -10℃에서 24.6%의 강성증가를 보였으며 기준온도 대비 고온 강성 저하 비율에 비하여 저온 강성 증가율이 2.19배 높게 나타났다.

② 온도별 수평특성에 대한 이력그래프를 작성하였으며 온도 상승에 따라 특성강도가 감소하였으며 에너지소산면적이 감소하였다. 특성강도에 대한 보정식은 브리지스톤사의 다항식이 적절하게 온도의존성을 반영하는 것으로 나타났다.

③ 수평특성에 대한 2차 강성의 온도의존성은 제조사에서 제시하고 있는 보정식이 안전측으로 예측하는 것을 알 수 있다. 브리지스톤보다 OILES의 보정식이 보수적인 수치를 제시하고 있음을 알 수 있다. 실험결과는 온도변화에 대하여 강성변화가 적은 것으로 나타났으나 제조사에서 제시하고 있는 보정식에서는 상당한 의존성을 고려하고 있다.

④ 수직강성의 온도의존성을 파악하고자 -10℃~40℃의 시험결과를 토대로 회귀방정식을 구성하였다. 회귀 모형의 일반화를 위해서 다양한 설계조건에 대하여 추가적인 데이터 축적이 필요하다.

감사의 글

본 연구는 2011년도 지식경제부의 재원으로 한국에너지기술평가원(KETEP)의 지원을 받아 수행한 연구과제(2011T100200081)입니다.

참 고 문 헌

Cho, C.B., Kwahk, I.J., Kim, Y.J. (2008) An Experimental Study for the Shear Property and the Temperature Dependency of Seismic Isolation Bearings, *Journal of the Earthquake Engineering Society of Korea*, 12(1), pp. 67~77.

Lee, D.H., Hwang, I.S. (2011) Analysis on the Dynamic Characteristics of a Rubber Mount Considering Temperature and Material Uncertainties, *Computational Structural Engineering*, 24(4), pp.383~389.

Chung, G.Y., Ha, D.H., Park, K.N., Kwon, H.O. (2002) Experimental Study on Characteristics of Low Hardness Rubber Bearing, *KSCE Journal of Civil Engineering*, 22(6), pp.1295~1307.

ISO 22762-1 (2010) Elastomeric seismicprotection isolators, Part 1:Test methods.

ISO 22762-3 (2010) Elastomeric seismicprotection isolators, Part 3:Applications for buildings Specifications.

JSSI (2009) 免震部材標準品リスト, 日本免震構造協會.

Kelly, J.M., Konstantinidis, D.A. (2011) Mechanics of Rubber Bearings for Seismic and Vibration Isolation.

Komodromos, P. (2000) Seismic Isolation for Earthquake Resistant Structures.

Kulak, R.F., Hughes, T.H. (1993) Frequency and Temperature Dependence of High Damping Elastomers, SMiRT-12, pp.243~248.

Roeder, C.W., Stanton, J.F., Feller, T. (1990) Low-Temperature Performance of Elastomeric Bearings, *Journal of Cold Regions Engineering*, 4(3), pp.161~201.

Skinner, R.I., Robinson, W.H., McVerry, G.H. (1992) An Introduction to seismic isolation.

Yakut, A., Yura, J.A. (2002) Parameters Influencing Performance of Elastomeric Bearings at Low Temperatures, *Journal of Structural Engineering*, 128(8), pp.986~994.

요 지

납코어가 삽입된 적층고무받침은 주요 재료가 온도에 대한 의존성을 보유하고 있으므로 온도 환경이 장치의 성능에 미치는 영향이 적지 않다. 따라서, 본 논문에서는 대표적인 면진장치인 납면진받침에 대하여 실규모 장치를 제작하고 온도변화에 따른 강성 및 감쇠 특성변화에 대하여 실험을 통하여 분석하고 평가하였다. 실물 크기의 납면진받침을 사용하여 -10℃, 0℃, 20℃, 30℃, 40℃의 온도 조건에 대하여 ISO22762:2010에서 제시하고 있는 특성시험법을 적용하여 수직강성 및 수평특성에 대하여 의존성 경향을 파악하였다. 또한, 면진받침 설계 시 주요한 평가지표로 사용되는 2차강성 및 특성강도에 대하여 해외 제조사에서 제시하고 있는 온도보정식과 시험결과를 비교하였으며 수직강성에 대한 온도의존 경향을 파악하였다.

핵심용어 : 납면진받침, 온도의존성, 저경도 고무, 원자력 구조물