

축소규모 고감쇠 및 납삽입형 면진베어링에 대한 특성시험고찰

Characteristic Tests of Reduced-Scale High Damping and Lead Rubber Bearings

유 봉* 이 재 한** 구 경 회**
Yoo, Bong Lee, Jae-Han Koo, Gyeong-Hoi

ABSTRACT

The characteristic tests of reduced-scale high damping and lead rubber bearings are performed by changing the shear displacements and the vertical loads. The test frequency is 0.5Hz. Test results show that the shear stiffnesses obtained for both bearings are less than target values, but the damping values are greater than the targets. The shear stiffness and damping of lead bearing are larger than those of high damping bearings. The shear-deformation characteristic values such as stiffness, damping and yield load values are changed according to the level of design vertical loads.

1. 서 론

면진시스템의 적용은 지진 피해가 심한 일본, 미국, 뉴질랜드, 이태리, 프랑스, 러시아 등에서 공공건물, 컴퓨터시설건물과 교량, 철도시설, LNG탱크 등의 산업시설, 문화재시설, 원자력시설 등에 활용되고 있다[1,2]. 국내에서는 유일하게 LNG 저장탱크에 면진설계를 적용하고 있고, 원자력 시설에는 앞으로 설계될 액체금속로에 적용하기위한 면진베어링 개발과 면진베어링의 특성시험 연구가 있어 왔다[3,4,5,6].

면진베어링은 그림 1에서 보는 바와 같이 고무와 강판의 교차 적층으로 만들어진다. 액체금속로용으로 설계된 실규모 면진베어링의 제원은 표 1에 나타난 바와같이 지름 120cm, 고무 높이 28cm, 설계 축하중 294톤이며, 감쇠계수는 100% 전단변형률에서 12% 이상, 수평 면진주파수는 0.7 Hz, 수직 고유진동수는 21 Hz로 설계되었다. 본 연구에서는 실 규모에 대한 성능시험은 시험 경비의 경제적인 문제와 시험시설 용량의 제한조건 때문에 상사성을 도입한 축소 면진베어링을 1/8 규모와 1/4 규모로 제작하였다. 시험된 면진베어링은 유니슨산업에서 제작한 고감쇠 면진베어

* 한국원자력연구소, 책임연구원, 정회원

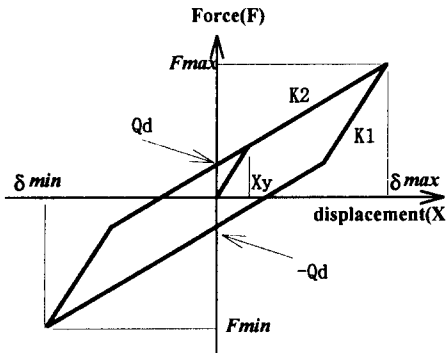
** 한국원자력연구소, 선임연구원

링과 중앙에 위치하는 납봉과 저감쇠의 천연고무로 제작한 납삼입형 면진베어링의 두 종류이다. 고감쇠 면진베어링은 고무로 강성과 감쇠 성능을 담당하며, 납삼입 면진베어링은 강성과 감쇠 성능을 고무와 납봉이 각각 분담한다. 본 연구에서는 수직하중이 다른 조건에서 전단변형시험을 각각 수행하고, 수직하중과 전단변형량에 따른 면진베어링의 성능특성을 비교 분석하였다.

2. 면진베어링 설계특성

면진베어링 설계를 위한 중요 설계변수는 설계축하중, 면진주파수, 감쇠값 및 최대 전단변형량 등이다. 면진베어링은 이들 설계변수에 적합한 고무의 기계적 특성치와 면진베어링의 형상계수, 직경, 전체 고무높이, 고무층수 및 강판의 두께 등 기하학적 특성을 고려하여 설계한다. 면진베어링의 성능은 수평강성, 수직강성, 최대 전단변형률 및 감쇠계수로 나타낼 수 있다. 수평강성은 면진베어링이 지지하는 상부구조물의 질량에 따라 면진구조계의 면진주파수를 결정하는 요소이며, 감쇠계수는 상부구조물로 전해지는 지진에너지 감쇠 성능 나타낸다.

적합한 면진베어링이 설계되면 제작을 통해서 수평 및 수직강성, 감쇠계수 및 파단변형률 등을 검증하기 위한 특성시험을 수행한다. 면진베어링의 특성시험 결과로부터 얻는 등가강성값(K_{eq})과 등가감쇠계수(ζ_{eq})는 일반적으로 다음과 같이 정의 된다.



$$K_{eq} = \frac{F_{max} - F_{min}}{\delta_{max} - \delta_{min}}, \quad \zeta_{eq} = \frac{\Delta W}{2\pi K_{eq} \delta_{max}}$$

여기서 F_{max} 및 F_{min} 은 면진베어링의 최대 및 최소 전단력이며, δ_{max} 및 δ_{min} 은 면진베어링의 최대 및 최소 전단변위이다. 그리고 ΔW 는 면진베어링의 이력감쇠에 의한 에너지 감쇠량을 나타낸다. 그리고 Q_d 는 항복하중 특성값을 나타낸다.

3. 면진베어링의 특성시험

시험은 MRPRA 고무로 제작한 고감쇠 면진베어링과 천연고무를 사용하고 중심에 납봉이 있는 납삼입형 면진베어링에 대한 것으로 1/8 규모와 1/4 규모의 면진베어링에 대해 가진주파수 0.5 Hz

로 전단변형 시험을 수행하였다[3]. 본 연구에서 다루는 1/4 및 1/8 규모의 축소 면진베어링은 유니슨산업에서 제작하고, 성능시험은 한국과학기술원의 시설을 이용하였으며, 그림 2는 면진베어링의 전단시험 장면이다. 1/8 규모 고감쇠 면진베어링은 추후 다른 시험을 위하여 최대 150% 전단변형까지 전단변형시험 수행하였고, 1/4 규모 면진베어링에 대해서는 시험시설의 용량에 따라 전단변형률 100%, 수직하중은 설계값의 150% 범위에서 성능시험을 수행하였다.

3.1 전단이력곡선 특성

각 면진베어링에 대한 전단시험이력을 나타낸 그림 3과 그림 4에서 알 수 있는 바와 같이 전단시험의 초기 이력곡선과 3번째 이력곡선에 차이가 발생되었다. 그림 5는 1/8 규모와 1/4 규모 고감쇠 면진베어링의 각 전단변형시험의 3번째 이력곡선을 나타낸 것으로 전단변형률이 150% 이내인 관계로 고무의 경화특성이 발생되지 않았다. 그림 6은 1/8 규모와 1/4 규모 납삽입 면진베어링의 각 전단변형시험의 3번째 이력곡선을 나타낸 것으로 전단변형률이 1/8 규모에서는 전단변형률이 300%까지 시험되어 200% 이상의 전단변형률에서는 고무경화에 따라 이력곡선에 비선형성이 나타났다. 고감쇠와 납삽입형의 이력곡선을 비교할 때 납삽입형 면진베어링의 곡선 특성이 좀더 단순한 것으로 나타났다.

3.2 수직하중 및 전단변형영향

설계수직하중과 전단변형에 대한 면진베어링 특성을 알아보기 위하여 수직하중을 설계하중의 50%,100%,200% 등으로 바꾸면서 각 전단변형에 대해 0.5 Hz로 수행한 시험결과를 그림 7에서 그림 10까지 나타냈다. 각 수치는 각 전단이력시험의 세 번째 사이클을 기준으로 계산한 자료이다.

고감쇠 면진베어링의 경우 그림 7과 그림 8에서 보는 바와 같이 100% 전단변형률 기준으로 수평강성은 1/8 규모와 1/4규모에서 각각 38.5 kgf/mm 및 80 kgf/mm로 목표값의 60% 수준으로, 감쇠값은 1/8 규모에서는 18%, 1/4 규모 면진베어링에 대해서는 16% 전후로 나타났다. 0.01 Hz의 정적 시험결과[4]와 비교할 때 등가강성은 차이가 없으나 감쇠값은 크게 증가하였다. 납삽입 면진베어링의 경우 그림 9와 그림 10에서 보는 바와 같이 100% 전단변형률 기준으로 감쇠값이 20% 범위에 존재하여 목표값 12%에 크게 상회하였다. 등가수평강성은 1/8 규모에서 목표값 71.1 kgf/mm에 73%에서 110% 수준까지, 1/4 규모 시험에서는 목표값 142.2 kgf/mm의 94%에서 105%까지 나타났다.

등가강성은 고감쇠 및 납삽입형 면진베어링 모두 수직하중이 커짐에 따라 작아지는 결과를 나타내고 있으며, 수직하중이 설계수직하중보다 작아지는 것이 커지는 경우보다 등가강성의 변화에 영향을 더 주는 것으로 나타났다. 변화의 폭은 수직하중이 절반으로 작아지는 경우, 최대 30%까지 등가강성이 커지고 2배로 커지는 경우는 약 15% 정도 작아지는 것으로 나타났다. 전단변형률에 따른 영향은 전단변형률이 200% 이하일 경우는 등가 강성이 계속 작아지지만 200%를 초과하

는 경우는 고무의 경화에 따라 등가강성이 증가하는 현상을 나타냈다.

감쇠값은 고감쇠 및 납삽입형 면진베어링 모두 수직하중이 커짐에 따라 커지는 결과를 보여주어 등가강성과는 반대되는 현상을 나타내고 있다. 전단변형에 따른 영향으로는 고감쇠 고무로 제작한 면진베어링의 경우 전단변형률이 150%까지 등가감쇠값이 17%에서 18% 사이로 큰 변화가 없으나 천연고무로 제작한 납삽입형 면진베어링의 경우는 초기 큰 값에서 전단변형이 커짐에 따라 감소되는 정도가 커지는 특성을 보이고 있다. 이는 감쇠값이 납봉에서 많이 얻어진 결과로 분석된다.

항복하중값은 수직하중이 커짐에 따라 일정한 경향을 보이지 않고 복잡한 양상을 보이고 있다. 전단변형률이 증가함에 따라 항복하중값은 고감쇠 및 납삽입형 모두 계속 커지는 것으로 나타나며, 고감쇠 면진베어링이 증가폭이 큰 것으로 나타났다. 납삽입형의 경우 전단변형률에 크게 영향을 받지 않을 것이라는 예상과 다른 특성을 보여주고 있어, 고무의 감쇠특성영향이 반영된 것으로 판단된다.

4. 결 론

고감쇠 면진베어링 및 납삽입 면진베어링의 1/4 규모 및 1/8 규모에 대한 전단변형시험을 수행하고 이에 대한 등가강성, 등가감쇠 및 항복하중 특성값을 비교분석하였다.

전단변형률이 증가함에 따라 고감쇠 및 납삽입 면진베어링의 등가강성은 작아지다 고무의 경화에 따라 점차 커지는 경향을 나타내며, 감쇠값은 계속 줄어드는 현상을 보이고 있다. 항복하중 특성값은 점차 증가하는 경향을 보이고 있다.

수직하중이 설계하중의 50%, 100%, 150(200)%까지 변하는 동안 고감쇠 및 납삽입 면진베어링의 경우, 등가강성은 작아지고, 감쇠값은 증가하며, 항복하중 특성값은 일관된 경향을 보이지 않았다.

면진베어링의 특성은 면진베어링이 갖는 하중이력 및 시험조건 등에 따라 많은 차이를 보이고 있기 때문에 표준화된 시험절차개발이 필요하며, 중규모 이상의 면진베어링 특성시험이 가능한 설비가 요구된다.

참 고 문 헌

1. Proceedings of 11th SMIRT Post Conf. Seminar(1991), "Seismic isolation of nuclear and non-nuclear structures," Nara, Japan.
2. Proceedings of Int'l Post-SMIRT(13th) Conf. Seminar(1995), "Seismic isolation, passive energy dissipation and active control of vibrations of structures," Santiago, Chile.
3. 유 봉, 이재한, 구경희(1997), "액체금속로용 축소규모 고감쇠 및 납삽입 면진베어링의 특성시험 결과 분석," KAERI/TR-809/97, 한국원자력연구소.

4. 유 봉, 이재한, 구경희(1995), “액체금속로용 고감쇠 면진베어링의 축소모델 시험결과 분석,” KAERI/TR-539/95, 한국원자력연구소.
5. Ian D. Aiken, et al(1996), Experimental Testing of Reduced-Scale KAERI Isolation Bearings, EERC, University of California Berkeley.
6. 유 봉, 이재한, 구경희(1997), “액체금속로용 축소규모 면진베어링 특성시험고찰 및 적용예,” 한국원자력학회 춘계학술발표회 논문집.

표 1. Specification and design Targets for Laminated Rubber Bearings

	Prototype LRB	1/4 Scale LRB	1/8 Scale LRB
Design Vertical Load (Ton)	294	18.4	4.6
Effective OD(cm) / ID(cm)	120/4	30/1.9(5.4**)	15/1.9(2.7**)
Rubber Thick.(mm)×Layers	278(9.6×29)	69.6(2.4×29)	34.8(1.2×29)
Steel Thick.(mm) ×Layers	3.2×28	2.3×28	1.8×28
Primary Shape Factor($D/4 t_R$)	31.25	31.25	31.25
Secondary Shape Factor($D/n t_R$)	4.31	4.31	4.31
Vertical Stiffness(kgf/cm)	51.6×10^5	12.9×10^5	6.4×10^5
Horizontal Stiffness (kgf/cm)	5,692	1,423	711.4
Damping Coefficient(%)	12 above	12 above	12 above
Max. Shear Strain(%)	300 above	300 above	300 above

**Inner Diameter of Lead Rubber Bearing and Diameter of Lead Plug

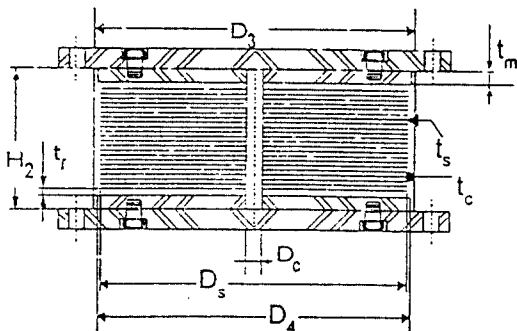


그림 1. 면진베어링 설계도면

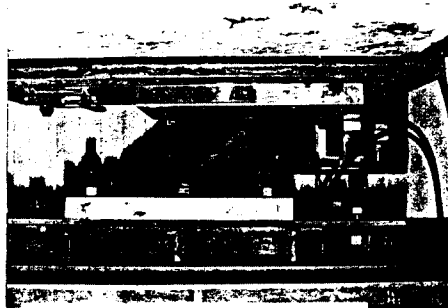


그림 2. 1/4 규모 면진베어링 수평전단시험

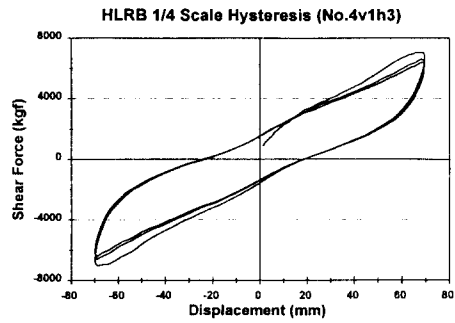
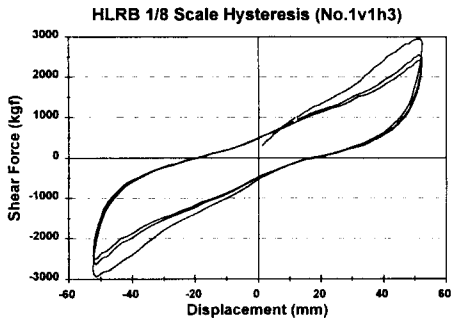


그림 4. 고감쇠 면진베어링 전단이력곡선(1/8 규모: 150%, 1/4 규모: 100%, 0.5Hz)

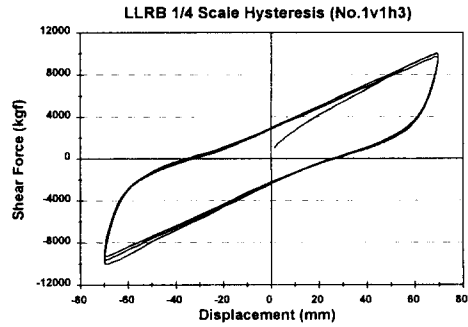
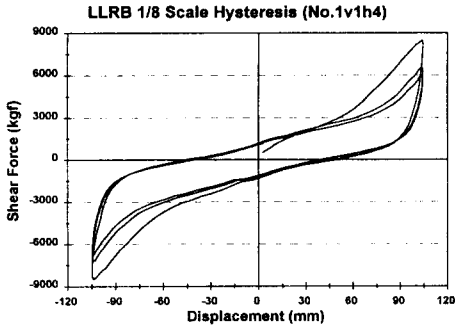


그림 5. 납삼입형 면진베어링 전단이력곡선(1/8 규모: 300%, 1/4 규모: 100%, 0.5Hz)

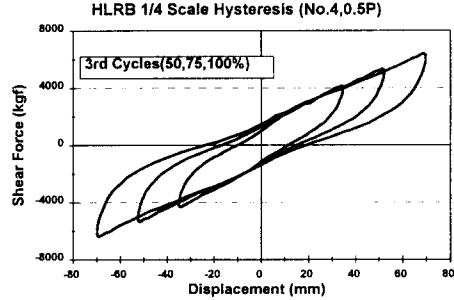
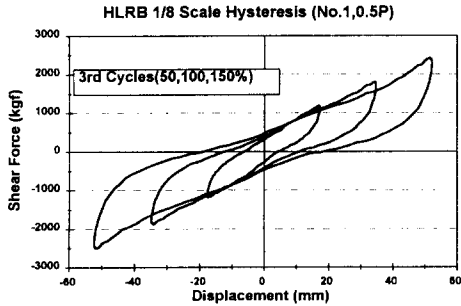


그림 6. 전단변형량에 따른 고감쇠 면진베어링 전단이력곡선(0.5Hz)

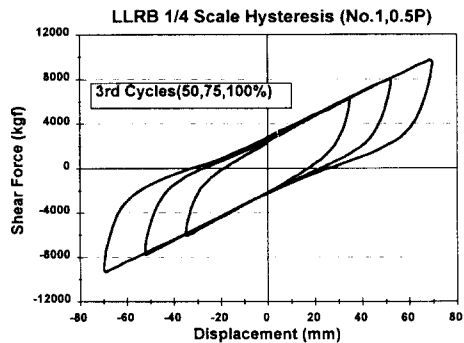
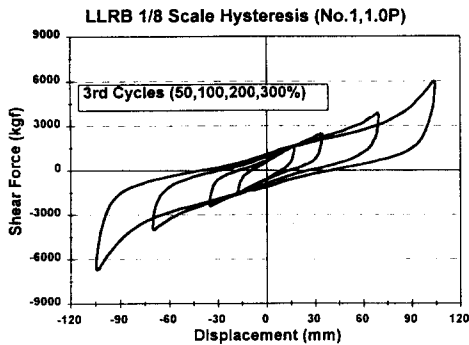


그림 7. 전단변형량에 따른 납삼입형 면진베어링 전단이력곡선(0.5Hz)

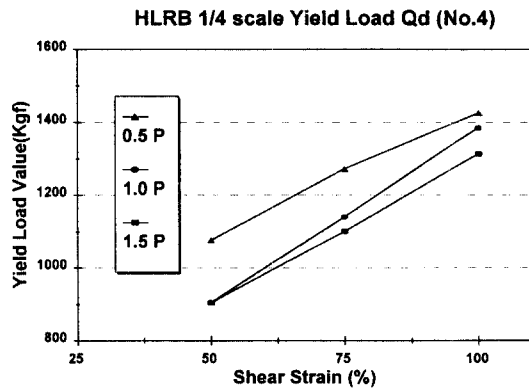
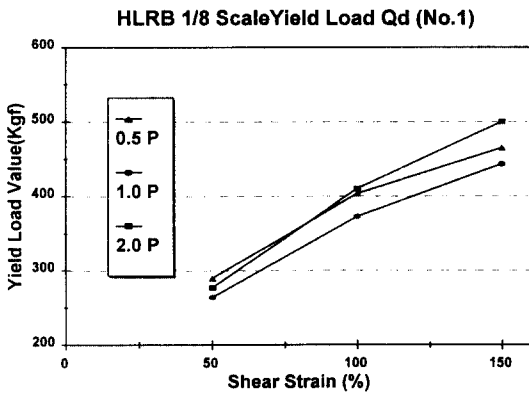
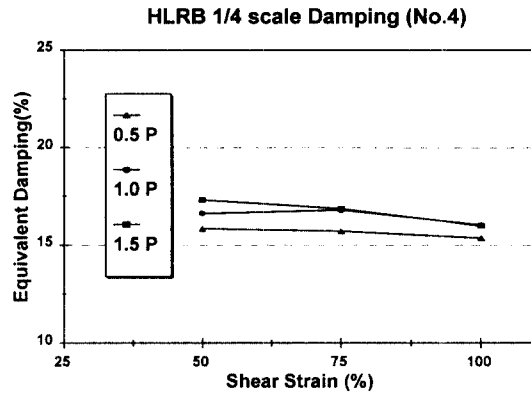
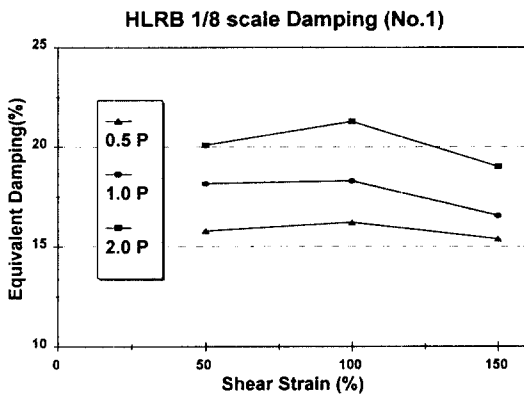
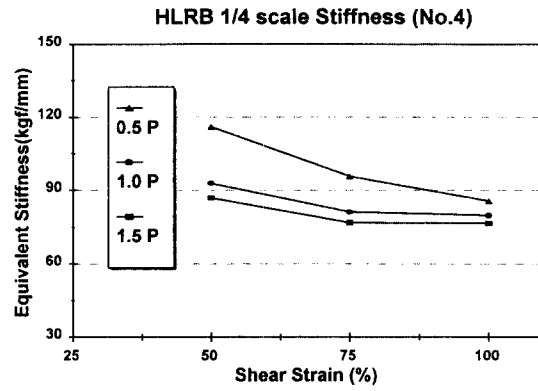
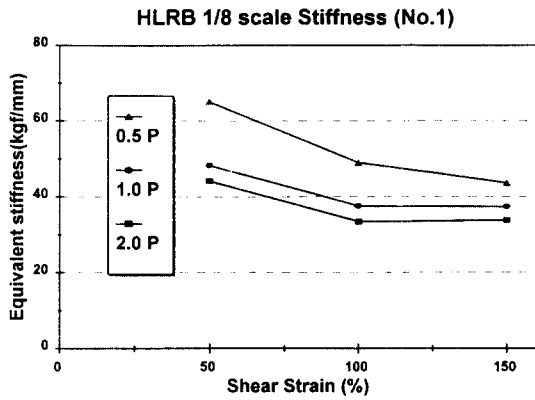


그림 8. 1/8 규모 고감쇠 면진베어링 특성시험 결과(0.5Hz)

그림 9. 1/4 규모 고감쇠 면진베어링 특성시험 결과(0.5Hz)

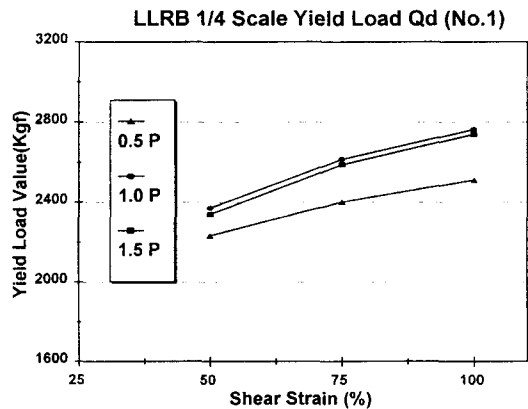
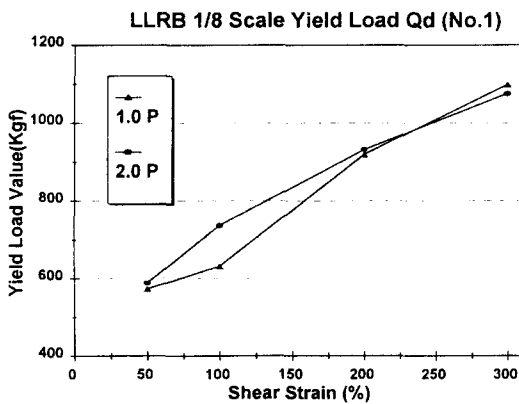
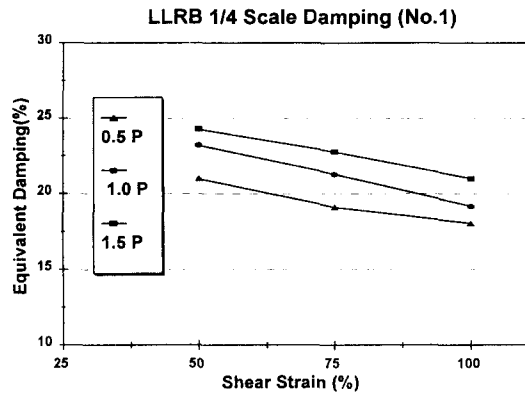
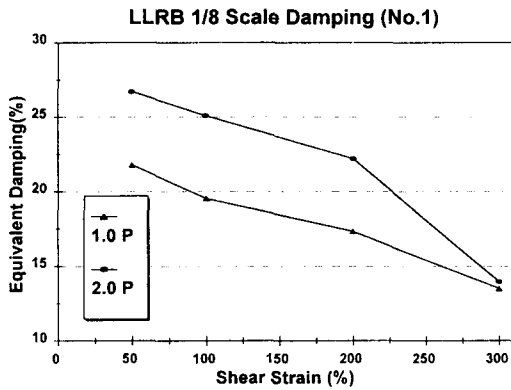
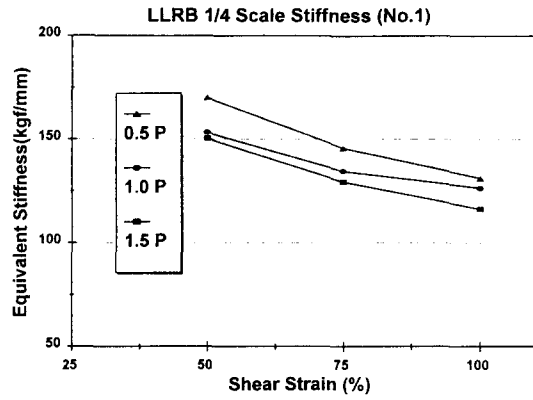
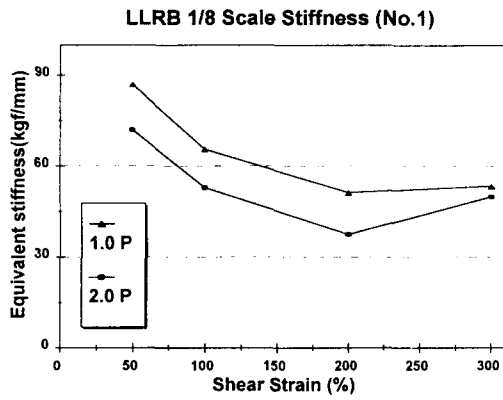


그림 10. 1/8 규모 납삽입형 면진베어링 특성시험 결과(0.5Hz)

그림 11. 1/4 규모 납삽입형 면진베어링 특성시험 결과(0.5Hz)