

액체금속로용 축소규모 면진베어링 특성시험고찰 및 적용예

유 봉 이 재 한 구 경 회

한국원자력연구소

대전광역시 유성구 덕진동 150

요 약

액체금속로의 안전성과 경제성을 향상시키는데 중요한 요소로 부각된 면진설계기술을 개발하기 위하여 고감쇠 면진베어링의 축소모델을 제작하고, 성능확인을 위한 다양한 시험을 실시하였다. 면진베어링의 성능을 나타내는 전단강성, 감쇠특성, 항복하중특성값, 전단변형능력 등에 대한 시험결과 전단강성은 목표값에 비하여 작았지만 감쇠값과 전단변형은 목표값에 근접하였다. 이를 이용한 면진 원자로건물의 지진응답을 분석한 결과 면진베어링은 건물의 지진응답 가속도를 대폭 줄여주는 것으로 나타났다.

1. 서 론

면진시스템은 지진시 지진응답을 크게 낮추는 효율적인 방법으로 알려져 있어 지진이 빈번한 지역에서 공공건물, 문화재 및 원자력시설 등 주요 구조물의 보호를 위해 활용되고 있다[1,2]. 국내에서는 이미 LNG 저장탱크에 이를 적용하고 있고 앞으로 액체금속로에 적용할 계획으로 있어 면진베어링 개발과 면진 구조물의 지진응답에 대한 연구가 있어 왔다[3,4,5,6].

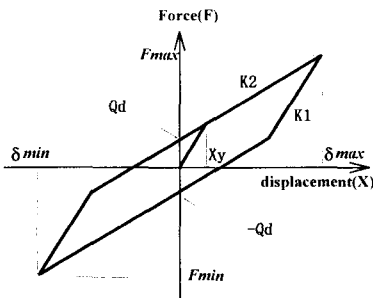
면진베어링은 그림 1과 같이 고무와 강판의 교차 적층으로 만들어진다. 액체금속로용으로 설계된 면진베어링의 제원은 표 1에 나타낸 바와 같이 지름 120cm, 고무 높이 28cm, 설계수직하중 294톤, 감쇠계수는 12%, 수평 면진주파수는 0.7 Hz, 수직 고유진동수는 21 Hz로 설계되었다. 본 연구에서는 실 규모 면진베어링에 대한 성능시험이 시험경비와 시험시설 용량의 한계를 갖기 때문에 상사성을 갖는 1/8과 1/4 규모의 축소 면진베어링으로 성능시험을 수행하였다. 또한 이의 적용성을 보기 위하여 원자력발전소 지진응답 해석모델에 면진시스템을 도입하고 지진하중을 가한 경우에 건물 주요 부위의 가속도를 계산하였다.

2. 면진베어링 설계특성

면진베어링 설계를 위한 중요 설계변수는 설계축하중, 면진주파수, 감쇠값 및 전단변형률 등이다. 이들 설계변수에 적합한 고무재질의 기계적 특성치를 이용하고, 면진베어링의 형상계수, 직경, 고무높이 및 고무 적층수 등 기하학적 특성을 결정하여 설계한다. 고무재질의 기계적

물성치는 고무시편에 대한 인장 및 압축, 평면시험(또는 순수전단시험), 이축시험(비전단시험) 및 체적탄성시험 등으로 구한다. 면진베어링 성능은 수평강성, 수직강성, 최대 전단변형률 및 감쇠계수로 나타낼 수 있다. 특히 수평강성은 면진베어링 위에 설치하고자 하는 상부구조물의 질량에 따라 면진 구조계의 면진주파수를 결정하는 요소이며, 감쇠계수는 상부구조물로 전해지는 지진에너지를 흡수하여 상부구조물이 받는 지진에너지를 감소시킨다. 면진베어링의 최대 전단변형률은 지금까지 발생한 지진 중에서 가장 큰 지진 및 가상지진에 대해서도 견딜 수 있도록 결정한다.

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 Qd는 항복하중 특성값을 나타낸다.

3. 면진베어링의 특성시험

본 연구에서 다루는 1/4 및 1/8 규모의 축소 면진베어링은 유니슨산업에서 제작하고, 성능시험은 한국과학기술원의 시설을 이용하였으며, 그림 2는 면진베어링의 전단시험장면이다.

3.1 정적시험결과

특성시험은 1/8 규모 면진베어링에 대해 100%, 200%, 300% 전단시험을 설계 수직력(4.6ton 정도)과 가진주파수 0.01Hz로 정적시험을 수행하고 결과를 그림 3에 나타냈다[5]. 면진베어링의 이력곡선은 시험 시작후 10~20% 전단변형률에서는 큰 강성값(K_1)을 나타내지만 이후 150% (52mm)까지의 전단변형률은 2차 강성값(K_2)을, 200%(70mm) 이상의 전단변형률에서는 다시 고무의 강화(hardening)에 의해 강성값이 기지는 현상을 보이고 있다. 감쇠계수는 전단변형률 100%에서 11% 정도이나 200% 이상에서는 8~9%로 떨어지는 것을 알 수 있다. 항복하중 특성값은 전단변형률이 커짐에 따라 계속 증가하고 있다. 그리고 시험결과에서 300% 전단시험의 초기 이력곡선과 3번째 이력곡선에 차이가 발생되었다. 한편 1/4 규모 면진베어링에 대한 50%, 100%, 150% 전단변형 시험결과는 1/8 규모의 경우와 크게 다르지 않았으며 그 결과는 표 2에 나타냈다.

3.2 동적시험결과

2차 시험은 MRPRA 고무로 제작한 고감쇠 면진베어링에 대한 시험으로 1/8 규모와 1/4 규모의 면진베어링에 대해 가진주파수 0.5 Hz로 수직하중을 바꾸면서 전단시험을 수행하였다[6]. 동적시험에서 100% 전단변형률 기준으로 수평강성은 1/8 규모와 1/4 규모에서 각각 385 kgf/cm 및 800 kgf/cm로 목표값의 60% 수준으로, 감쇠값은 1/8 규모에서는 18%, 1/4 규모 면진베어링에 대하여 각 16% 전후로 나타나 정적시험 결과와 비교할 때 등가강성은 차이가 없으나 감쇠값은 크게 증가하였다. 그리고 면진베어링에 대한 최대 전단시험이력을 나타낸 그림 4에서 알 수 있는 바와같이 전단시험의 초기 이력곡선과 3번째 이력곡선에 차이가 발생되었다. 그러나 그 차이는 10% 이내로 되었다. 그림 5는 각 전단변형률에 따른 전단시험의 3번째 이력곡선을 나타낸 것으로 전단변형이 커질수록 고무의 경화특성에 따라 이력곡선의 비선형성이 나타나는 것을 알 수 있고 이력곡선의 궤적이 전단변형률에 따라 달라지는 것을 알 수 있다.

3.3 수직하중 및 전단변형영향

설계수직하중과 전단변형에 대한 면진베어링 특성을 알아보기 위하여 수직하중을 설계하중의 50%, 100%, 150% 또는 200% 등으로 바꾸면서 각 전단변형에 대해 0.5 Hz로 수행한 시험결과를 그림 6과 그림 7에 나타냈다. 각 수치는 각 전단이력시험의 세 번째 사이클로 계산한 자료이다.

등가강성은 수직하중이 커짐에 따라 작아지는 결과를 나타내고 있으며, 설계수직하중을 기준으로 수직하중이 절반으로 작아지는 경우 최대 30%까지 등가강성이 커지고 두 배로 커지는 경우는 약 15% 정도 작아지는 것으로 나타나 수직하중이 작아지는 것이 등가강성에 더 영향을 주는 것으로 나타났다. 전단변형에 따른 영향은 전단변형률이 200% 이하일 경우는 등가강성이 계속 작아지지만 200%를 초과하면 고무의 경화에 따라 등가강성이 커지는 것으로 나타났다.

등가감쇠는 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 전단변형이 커짐에 따라 감소되는 특성을 보이고 있다. 항복하중값은 수직하중이 커짐에 따라 일정한 경향을 보이지 않지만 전단변형률이 증가함에 항복하중값은 비례적으로 커지는 것으로 나타났다.

3.4 가진속도영향

고감쇠 면진베어링은 점성거동 특성을 갖는다. 이로부터 등가강성 및 감쇠는 가진속도의 영향을 받을 수 있다. 면진베어링 시험에서 이력곡선을 얻기 위한 가진속도에 따른 영향을 0.01 Hz의 일정속도(sawtooth)로 시험한 그림 3의 1차 시험결과와 싸인파 0.5 Hz로 시험한 그림 6의 2차 시험결과로부터 분석할 수 있다. 두 시험결과에서 등가강성에는 큰 차이가 없는 것으로 나타났으나 감쇠값과 항복하중 특성값은 가진속도를 크게 한 2차 시험결과에서 100% 전단변형 기준으로 각각 17%와 370 kgf 정도로 나타나 1차 시험의 11%와 250 kgf 보다 큰 값을 얻었다. 실제 면진베어링이 받는 하중은 지진하중으로 동적시험결과에 가깝지만 면진주파수가 각기 다르기 때문에 보통은 표준시험절차를 기준으로 성능평가가 이루어진다.

3.5 파단시험

그림 8은 고감쇠 고무로 제작한 1/8 규모 면진베어링에 대한 파단시험결과를 나타냈다. 고감쇠 면진베어링은 340% 전단변형률에서 파단 되었다.

4. 면진구조물의 지진응답

지진응답해석에는 가압경수형 원자로건물의 집중질량 강성모델을 사용하였다[3,4]. 구조물의 전체 무게는 약 68,000톤이다. 면진구조물의 면진주파수를 0.5 Hz로 하고, 면진시스템의 등가강성은 전단변형률 100%일 때의 면진베어링의 이력곡선을 이용하였다. 이 면진시스템은 실제 크기의 면진베어링 220개가 사용된다. 해석에서 USNRC RG 1.60 표준 설계응답스펙트럼에 상응하는 인공 지진가속도 시간기록을 입력지진으로 지진응답을 구하여 그림 9에 나타냈다. 해석결과 주요 안전계통 및 기기의 고유진동수인 3 Hz에서 40 Hz 범위에서는 최대 질두가속도 응답이 입력지진의 최대 가속도보다 작게 나타나 면진시스템이 매우 효율적임을 알 수 있다.

5. 결 론

고감쇠 면진베어링에 대한 구조특성시험결과 다음과 같은 결론을 도출하였다. 동적시험과 정적시험을 비교할 때 등가강성은 큰 차이가 없으나 감쇠값은 크게 증가하였다.

전단변형률이 증가함에 따라 고감쇠 면진베어링의 등가강성은 작아지다 고무의 경화에 따라 점차 거지는 경향을 나타내며, 항복하중 특성값은 계속 증가하는 경향을 보이고 있다. 그리고 감쇠값은 항복하중 특성값과는 반대로 점차 줄어드는 현상을 보이고 있다.

수직하중이 50%에서 200%까지 변하는 동안 고감쇠 면진베어링의 등가강성은 작아지며, 감쇠값은 점차 줄어드는 현상을 보이고 있다. 그러나 항복하중 특성값은 수직하중 변화에 대해 일관된 특성을 보여주지 못하였다.

면진베어링의 성능특성은 면진베어링이 갖는 하중이력이나 시험조건에 따라 큰 차이가 나타나므로 많은 시험을 통해 면진베어링의 성능특성을 객관적으로 정의하고 표준화할 수 있는 시험절차서 개발 등이 요구된다. 한편 면진 원자로건물에 대한 지진응답을 해석한 결과 면진시스템은 구조물의 가속도응답을 크게 감소시키는 것으로 나타났다.

참 고 문 헌

1. Proceedings of 11th SMIRT Post Conf. Seminar, "Seismic Isolation of Nuclear and Non-Nuclear Structures," Aug. 26~27, 1991, Nara, Japan.
2. Proceedings of the First International Seminar, "Seismic Base Isolation for Nuclear Facilities," August, 1989, San Francisco, Cal., USA, A Post Conference Seminar of The 10th Int'l. Conf. on SMIRT-10, USA.
3. 유 봉, 이재한, 구경희, "지반특성에 따른 면진 및 비면진구조물의 가속도응답 영향평가," 한국원자력학회 '96 춘계 학술발표회 논문집, 1996.
4. B.Yoo and J.H. Lee et al, "Effects of High Damping Rubber Bearing on Seismic Response of Superstructure in Base Isolated System," 13th Int'l. Conf. on SMIRT, Aug. 1995. pp.621~627.

5. 유 봉, 이재한, 구경희, “액체금속로용 고감쇠 면진베어링의 축소모델 시험결과 분석,” KAERI/TR-539/95, 한국원자력연구소, 1995.
6. 유 봉, 이재한, 구경희, “액체금속로용 축소규모 고감쇠 및 납삽입 면진베어링의 특성시험 결과분석,” KAERI/TR-809/97, 한국원자력연구소, 1997.

표 1. Specification and Design Targets for Laminated Rubber Bearings

	Prototype LRB	1/4 Scale HLRB	1/8 Scale HLRB
Design Vertical Load (Ton)	294	18.4	4.6
Effective OD(cm) / ID(cm)	120/4	30/1.9	15/1.9
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
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, Max. Shear Strain(%) = 300% above			
Primary Shape Factor($D/4t_R$) = 31.25, Secondary Shape Factor($D/n t_R$) = 4.31			

표 2. Equivalent Damping(ζ_{eq}) and Stiffness(Keq) of Reduced HLRB Models

Shear Strain Percent		50 %	100 %	150 %	200 %	300 %
1/8 Scale (0.01Hz)	ζ_{eq} (%)	-	10.64	-	8.91	8.68
	Keq (kgf/cm)	-	395.6	-	407.3	514.5
1/8 Scale (0.5Hz)	ζ_{eq} (%)	18.0	18.0	16.5	-	-
	Keq (kgf/cm)	495.	385.	380.	-	-
1/4 Scale (0.01Hz)	ζ_{eq} (%)	11.30	11.94	11.18	-	-
	Keq (kgf/cm)	1061.	775.4	736.4	-	-
1/4 Scale (0.5Hz)	ζ_{eq} (%)	17.0	16.0	-	-	-
	Keq (kgf/cm)	950.	800.	-	-	-

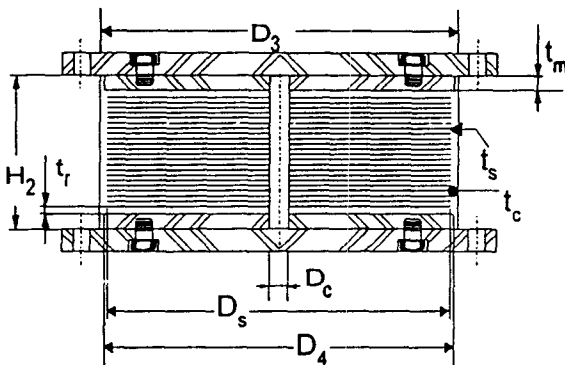


그림 1. 면진베어링 설계도면

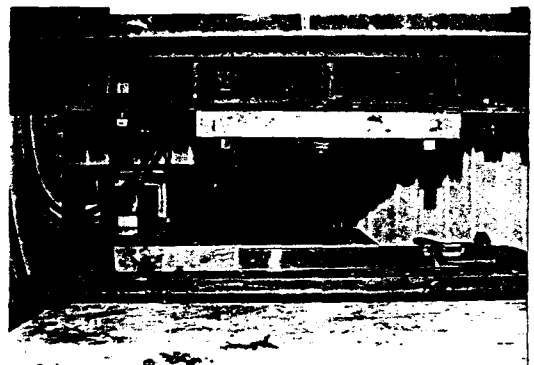


그림 2. 1/4 규모 면진베어링 수평전단시험

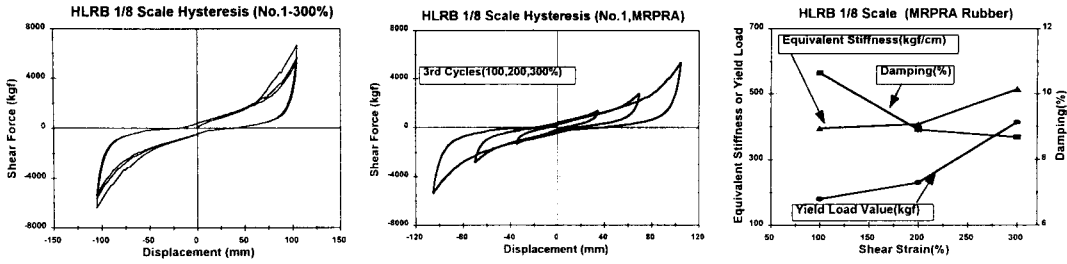


그림 3.1 차 1/8 규모 고감쇠 면진베어링 특성시험결과(0.01 Hz)

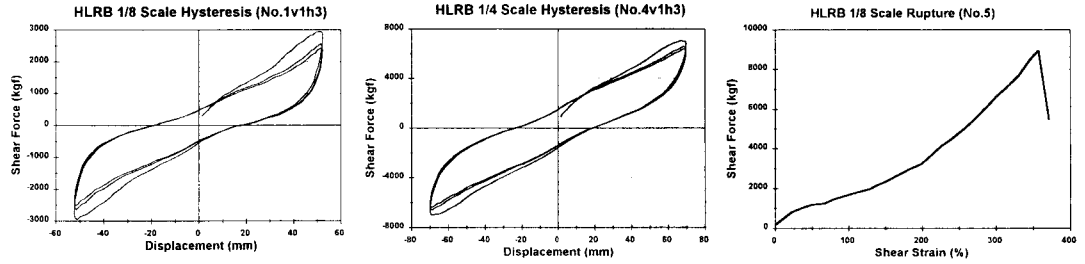


그림 4. 고감쇠 면진베어링 전단이력곡선

그림 8. 1/8 HLRB 전단파단시험

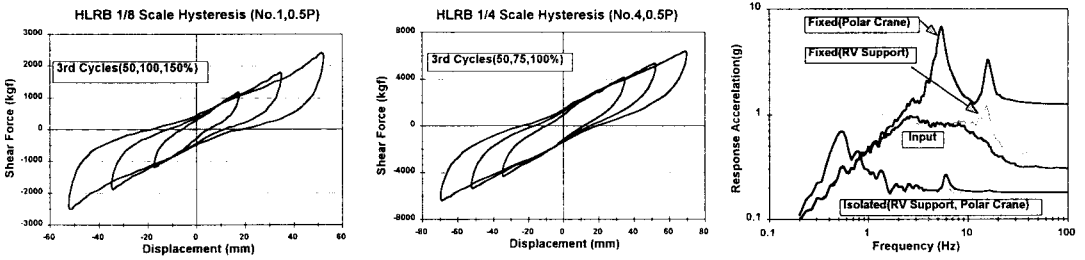


그림 5. 전단변형량에 따른 고감쇠 면진베어링 전단이력곡선

그림 9. 면진구조물 지진응답

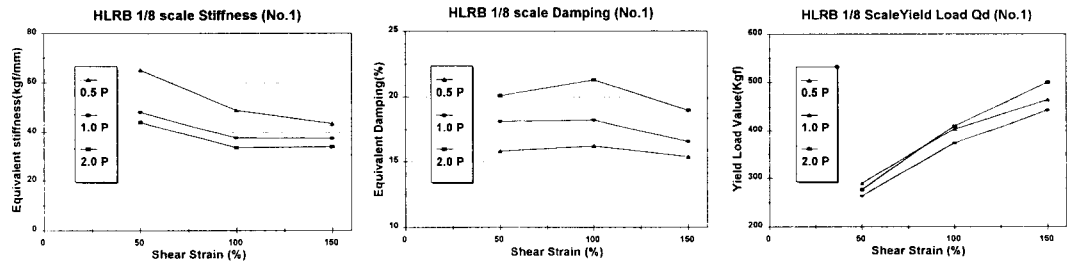


그림 6. 1/8 규모 고감쇠 면진베어링 특성시험 결과

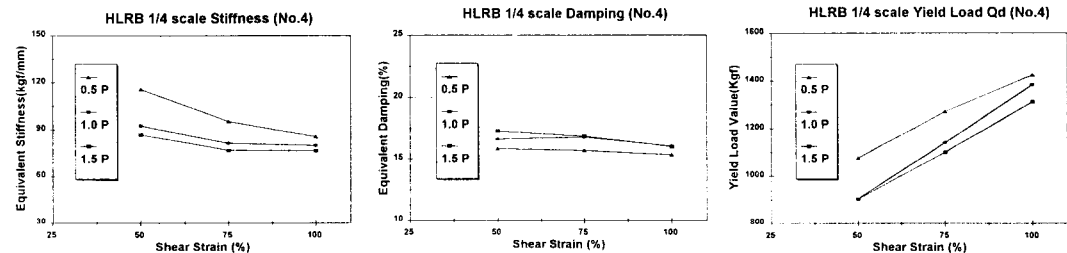


그림 7. 1/4 규모 고감쇠 면진베어링 특성시험 결과