

Base Isolator의 製作 및 特性實驗

김 남 식* 유 춘 화** 이 동 근***

1. 서 론

고무의 특징은 금속에 비하여 1000% 정도의 연신율을 갖고 있고 고무의 내부마찰에 의한 감쇠성이 양호하여 공진시 진폭이 지나치게 커지지 않으며, 금속과의 접촉기술이 발달하여 금속과 결합시켜 제작되므로 설치가 간편하고, 형상을 다양하게 변화시킬 수 있는 장점을 가지고 있다 [1].

방진용 고무는 고무의 강도를 크게하기 위하여 가황을 한 가황고무 제품이 주를 이루며 내유성, 내후성, 내산성, 내오존성, 내염성등에 약함으로 용도에 따라 주의해서 제작하여야 한다. 방진용 고무는 고분자 유기물의 복합체로써 그 물성치를 정확히 해석하거나 표현하기가 어렵고, 상용 방진 고무의 제작시 첨가되는 첨가재의 양과 moulding 시 온도 및 압력등의 조건에 따라 고무의 동특성이 변화하며, 특히 비선형특성으로 인해 이론적으로 재료적인 특성을 파악하기 어렵기 때문에 정확한 실험장치와 방법이 요구되고 있다.

일반적으로 방진용 고무는 프레스, 단조기 및 대형엔진등의 방진마운트의 소재로 활용되며 지진 방지용 지지대등에 진동 및 충격의 방지, 완충을 목적으로 사용되고 있다[1]. 특히 교량에 설치되는

탄성받침이나 대형구조물의 진동을 제어하기 위한 장치로 쓰이고 있는 base isolator는 방진용 고무를 주된 재료로하며 steel plate를 조합하여 수직강성을 보강한다.

본 실험에서는 대형구조물의 방진을 목적으로 국내에서 제작된 laminated rubber bearing(LRB)의 정적 및 동적실험방법을 소개하며 실험결과를 토대로 실용가능성을 제시하고자 한다.

2. Laminated Rubber Bearing의 제작 및 설계

지금까지 대형구조물에 널리 쓰이고 있는 base isolator는 특히 지진하중에 대하여 상부구조물의 지반분리(base isolation)를 이용한 진동제어를 목적으로 하기 때문에 seismic isolator라 일컬어지고 있다. 일반적으로 base isolator에는 laminated rubber bearing(LRB) 방식과 resilient-friction base isolator(R-FBI) 방식으로 크게 나눌 수 있다. LRB 방식은 가장 널리 쓰이는 base isolator로써 초기강성 및 에너지소산능력을 증가시키기 위해서 단면 중앙에 납(lead plug)을 삽입하기도 한다. R-FBI 방식은 고무판 내부에 미끄럼판을 가지고 있으므로 LRB방식에 비하여 더 큰 수평변위를 허용한다.

본 실험에서는 국내에서 기존에 사용하고 있는 교량용 탄성받침의 단면제원을 변형하여 laminated rubber bearing을 제작하였다. 그림 2.1은

* 한국과학기술원 토목공학과 박사과정

** 유니슨산업(주) 유니슨기술연구소 주임연구원

*** 한국과학기술원 토목공학과 부교수

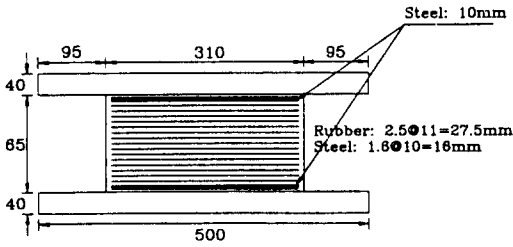


그림 2.1 Laminated Rubber Bearing(LRB)

실험에 사용된 LRB방식의 base isolator로써 가로 310mm, 세로 200mm, 높이 65mm의 직사각형으로 제작되었다. 각 고무층의 두께(t_R)는 2.5mm이며 1.6mm 두께(t_S)의 철판으로 수직강성을 보강하기 위하여 10개의 철판을 일정한 간격으로 삽입하였다. 그림 2.1에서 보이고 있는 고무층의 전체 높이(nt_R)는 27.5mm이며 base isolator와 두께 40mm의 mounting plate를 연결하기 위하여 isolator의 상하에 10mm 두께의 철판을 일체로 제작하여 mounting plate와 볼트로 연결하였다. 제작에 사용된 고무는 가황고무로써 경도(hardness) 60에 해당되며 고온, 고압의 조건에서 고무와 철판을 일체로 제작하였다.

일반적으로 사용되고 있는 base isolator는 수평방향으로 커다란 유연성을 가지며 수직방향으로는 매우 큰 강성이 나타나도록 설계한다. 본 실험에서는 base isolator의 제작에 앞서 이론적으로 구한 수평 및 수직강성을 실험결과와 비교함은 물론 추후 base isolator 설계의 기본자료로 활용하고자 한다.

본 실험에서 base isolator의 제작에 사용된 합성고무의 재료적인 성질은 다음과 같다[1].

$$G=1.0\text{MPa}, B=1.0\text{GPa}, \nu=0.5, \beta=3.527, \text{Hardness (durometer)}=60, E_c=0.866\text{GPa}$$

여기서 G 는 전단탄성계수(shear modulus), B 는 체적탄성계수(bulk compression modulus), E_c 는 압축탄성계수(apparent compression modulus), ν 는 포아송비(poisson ration), β 는 고무의 화학적 성분에 의해 결정되는 상수를 각각 나타낸다. 또한 고무의 형상에 따라 변화하는 압축탄성계수(apparent compression modulus for bending) E_b

를 구하면 식 1과 같다.

$$E_b = E_c(1 + \beta S^2) \quad (1)$$

여기서 형상계수(shape factor) S 는 하중을 받는 고무의 단면적을 팽창이 일어나는 자유단면적으로 나눈 값이다. 위에서 얻어진 값들을 이용하여 본 실험에서 제작한 base isolator의 장변에 대한 수평강성(K_H)과 수직강성(K_V)을 구하였다[2].

$$K_H = 23.37\text{KN/cm (수직하중 : } P_V = 200\text{KN)}$$

$$K_V = 9.535\text{MN/cm (전단변형 : } \gamma_H = 50\%)$$

3. 실험장치 및 방법

3.1 실험장치

본 실험에서는 base isolator의 정적실험 및 동적 실험을 수행하기 위하여 실험장치를 그림 3.1과 같이 설계하였다. 또한 사진 3.1에서는 전체적인

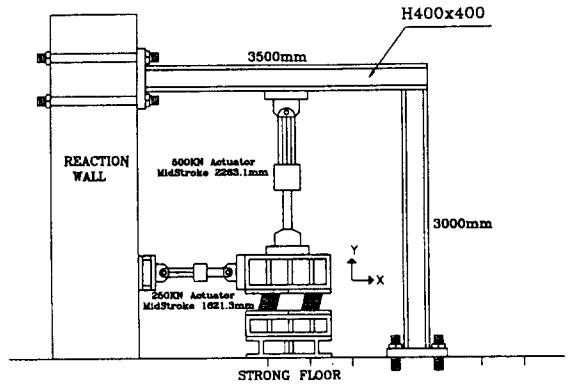


그림 3.1 실험장치

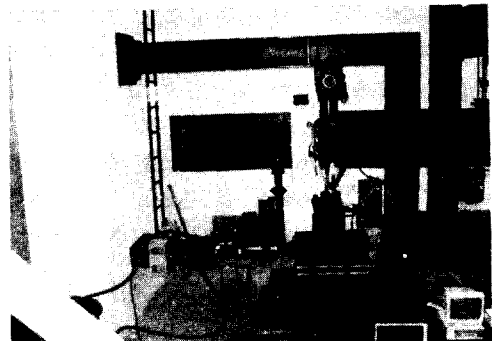


사진 3.1 설치된 실험장치

실험광경을 보이고 있다. 실험에 사용된 2대의 유압식가력기(hydraulic actuator)는 수직방향의 가력하중용량 및 가력변위는 각각 $\pm 500\text{KN}$, $\pm 150\text{mm}$ 이며 수평방향의 가력하중용량 및 가력변위는 $\pm 250\text{KN}$, $\pm 250\text{mm}$ 이다.

3.2 정적실험 방법

정적실험에서는 base isolator의 수평방향의 전단 변형 $\gamma_H (= \delta_H/n_{tr})$ 및 수직하중(P_V)의 크기에 따라 수평 및 수직강성의 특성을 파악하기 위해서 다양한 실험을 수행하였다. 수평방향의 최대전단변형은 10%(2.750mm)–150%(41.250mm), 수직하중은 0.0KN–300.0KN까지 변화시켜 정적실험을 수행하였으며 각각 3회의 반복하중을 입력하중으로 하였다. 가력장치의 제어방식은 수평방향은 변위 제어(displacement control), 수직방향은 하중제어(force control)로 이루어졌다. 실험에 사용된 2개의 base isolator는 직사각형의 장변방향으로 가력하여 실험을 수행하였다. 사진 3.2에서는 실험에 사용된 2개의 base isolator를 나타내고 있다.

3.3 동적실험 방법

동적실험방법 역시 정적실험방법과 동일한 실험장치를 사용하였으며, 이 경우에는 200.0KN의 수직하중상태에서 수평방향의 최대전단변형을 10%(2.750mm)로 가력하였다. 동적실험에서는 정적실험에서 얻은 수평방향의 강성과 차이를 구함으로써 동적확대계수(dynamic magnification factor)를 얻고자 한다. 따라서 일정한 수평방향의

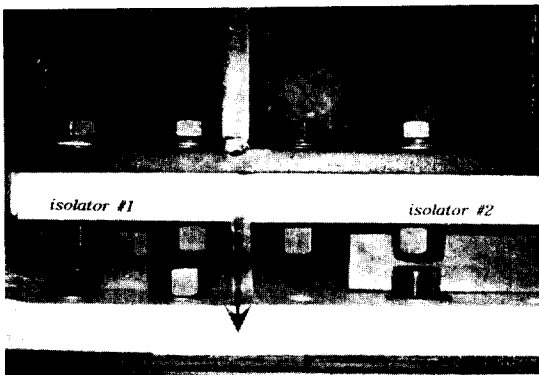


사진 3.2 설치된 2개의 시험체(LRB)

전단변형에 대해서 가력속도(loading rate)를 0.05Hz–5.0Hz까지 변화시켜 가며 실험을 수행하였다.

4. 실험결과 및 분석

앞 절에서 설명한 정적 및 동적실험방법을 통하여 얻어진 base isolator의 힘-변위관계는 strain-hardening에 의한 비선형성을 나타내며, 또한 고무의 재료적인 특성에서 비롯된 hysteretic damping이 포함된다. 따라서 laminated rubber bearing의 거동특성을 대표적으로 나타낼 수 있는 유효강성(effective stiffness: K_{eff}) 및 등가감쇠비(equivalent damping ratio: ξ_{eq})를 식 2와 식 3으로부터 구하였다[3].

여기서, P_{max} , P_{min} , δ_{max} 및 δ_{min} 는 실험으로부터 얻어진 힘-변위곡선의 최대, 최소값을 나타내며 ΔW 는 이 곡선의 면적을 의미한다.

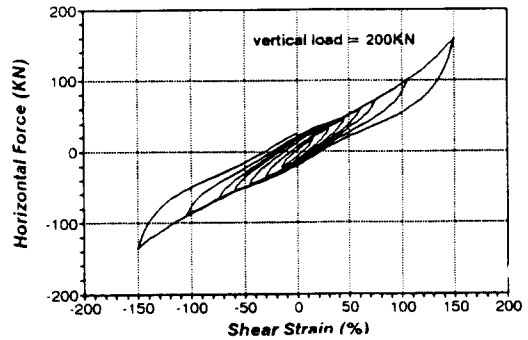


그림 4.1 수평방향의 힘-변위곡선

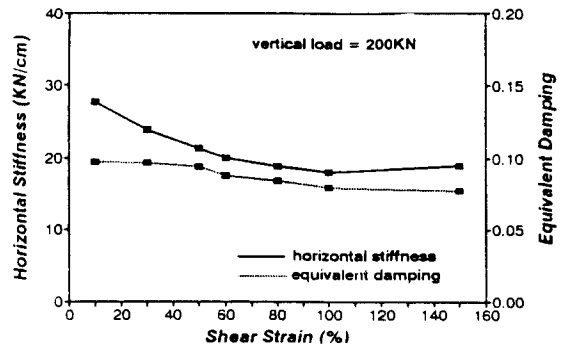


그림 4.2 전단변형에 따른 수평강성 및 등가감쇠비

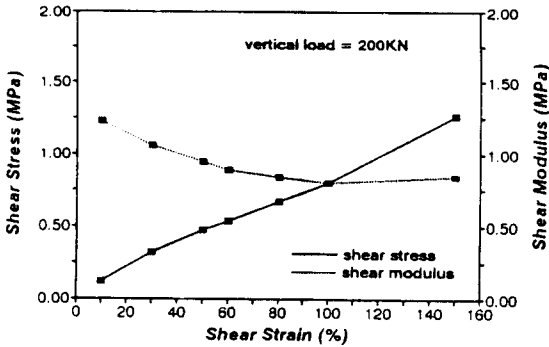


그림 4.3 전단변형에 따른 수평방향의 전단응력 및 전단탄성계수

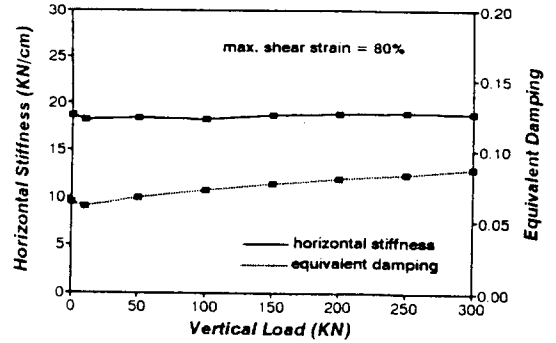


그림 4.4 수직하중에 따른 수평강성 및 등가감쇠비

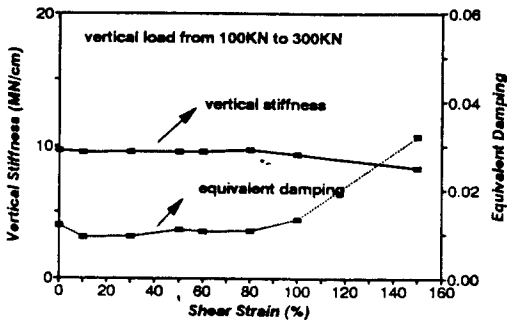


그림 4.5 전단변형에 따른 수직강성 및 등가감쇠비

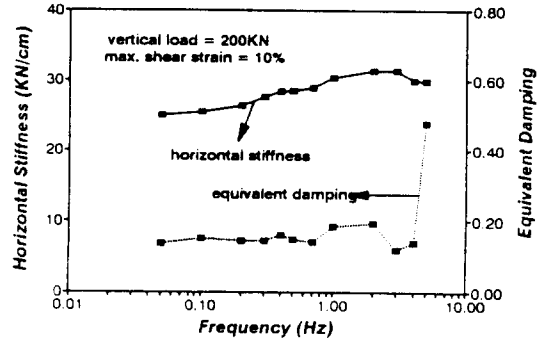


그림 4.6 가력속도에 따른 수평강성 및 등가감쇠비

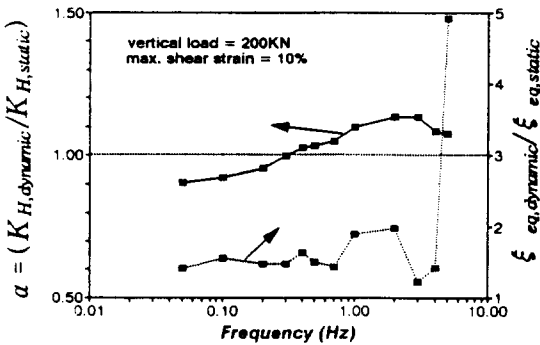


그림 4.7 가력속도에 따른 수평강성 및 등가감쇠비의 동적효과

$$K_{eff} = \frac{(P_{max} - P_{min})}{(\delta_{max} - \delta_{min})} \quad (2)$$

$$\xi_{eq} = \frac{\Delta W}{2\pi K_{eff} \delta_{max}^2} \quad (3)$$

그림 4.1은 전단변형을 최대 150%까지 변화시켜 얻어진 힘-변위곡선으로서 strain-hardening 효과가 100% 이상에서 나타남을 알 수 있다. 전단 변형 150% 이상에서는 mounting plate와 base solator사이의 볼트연결에 결함이 관찰되었다. 그림 4.2는 200KN 수직하중하에서 최대전단변형의 변화에 따른 수평강성 및 등가감쇠비를 구한 것이다. 그림 4.3에서 전단변형이 증가함에 따라서 전단탄성계수 G 가 작아짐을 알 수 있다. 또한 그림 4.4는 수직하중의 변화에 따른 수평강성 및 등가감쇠비를 80%의 최대전단변형에 대해서 구한 값이다. 여기서 수직하중의 변화가 수평강성에 큰 영향을 주지 않음을 알 수 있다. 그림 4.5는 수평방향의 전단변형에 따라 수직강성의 변화를 보여주고 있다. 100%이내의 수평 전단변형에 대해서는 수직강성의 변화가 없는 것으로 나타났

으며, 이 범위에서의 수직강성은 수평강성의 약 450배에 해당하는 값을 갖는다. 그림 4.6은 동적실험결과로서 가력속도(loading rate)에 따라서 얻어진 수평강성 및 동가감쇠비이다. 그림 4.7에서 나타난 동배율 $\alpha=(K_{H, dynamic}/K_{H, static})$ 는 base isolator 의 설계에 적용되는 유효주기(effective period)범위내에서 약 1.1보다 작은값을 보이고 있다.

5. 결 론

본 실험에서는 가장 널리 쓰이는 base isolator 의 한 종류로서 laminated rubber bearing을 제작하여 정적 및 동적특성실험을 수행하였다. 앞에서 간략하게 언급한 실험결과에 대한 분석자료는 상부구조물과 기초와의 분리(isolation)를 목적으로 본 실험에서 제작한 base isolator의 활용가능성을 검증하였다. 일반적으로 base isolator가 갖는 특성을 대부분 포함하고 있지만 본 실험결과에서 얻은 개선점은 i) 수직강성의 보강 ii) mounting plate와의 볼트연결부분 보완 iii) 최대전단변형을 증가시키기 위해서 base isolator의 전체높이 조정등으

로 요약할 수 있다.

6. 감사의 글

본 실험에서 제작한 laminated rubber bearing은 유니슨산업(주)와 유니슨기술연구소의 도움으로 제작하였기에 이에 감사드립니다.

참 고 문 헌

1. 유춘화, 이신연, "방진고무 재료의 진동특성 해석 및 실험(II)", 한국항공우주학회 학술발표회 논문집, 1992.
2. T. Fujita, et al. "Research, Development and Implementation of Rubber Bearings for Seismic Isolation", *Pressure Vessels and Piping Conference*, Vol.181, ASME, Hawaii, 1989, pp.35-42.
3. "Seismic Isolation and Response Control for Nuclear and Non-Nuclear Structures", *Special Issue for the Exhibition of the 11th International conference on Structural Mechanics in Reactor Technology (SMiRT 11)*, Tokyo, Japan, 1991.