

정밀 제진대 개발 및 동특성에 관한 실험적 연구

Development of precision vibration isolation table and study of dynamic characteristics with experiment

0 김인수*, 김종연*, 한문성*, 김영중**

Insoo Kim, Jongyun Kim, Munsung Han, Youngjoog Kim

Key word : Air Spring(공기스프링), Vibration isolation table(제진테이블), LRB(적층고무베어링)

Abstract

Recently, the high precision technology can not be developed continuously if we don't have anti vibration technology. Vibration isolation technology using an air spring and laminated rubber bearing is widely used because it has excellent vibration isolation characteristics. We developed high precision vibration table with two good element(air spring and LRB) for semiconductor factory. Air Spring is used for isolating the vertical vibration and LRB is used for isolating the horizontal Vibration. As a result, It has D-Class degree in BBR-Criteria. In this paper, we talk about orifice characteristics in the self-damped air spring and design flow of the laminated rubber bearing. The orifice characteristics is delicate shade of length and diameter. When we do experimentation to find orifice characteristics, length is fixed and diameter is changed. The orifice diameter is the wider and the air spring stiffness is the softer.

1. 서론

현대의 정밀 측정 및 가공산업과 반도체 산업의 추세는 초정밀 기술을 필요로 하고 있으며 이러한 기술을 가능하게 하는 것은 미진동 제어에서 부터 시작한다 할 수 있다. 반도체공장과 같은 미진동을 요구하는 건물은 건물자체의 입지 부지에서부터 진동을 최소화 할 수 있는 곳을 선정하고 있으며 부가적으로 협진장비에 대해서는 독립적인 제진장치를 적용하고 있다.

공기스프링은 여러 산업 현장에서 제진 및 방진용으로 가장 효율적인 요소로 사용되고 있고 적층 고무 베어링(LRB)은 지진 대책용으로 사용되고 있다. 위 두 요소를 결합한 제진장치는 일본의 경우 수직진동의 제어는 공기스프링을 주 절연요소로 이용하고, 수평진동의 절연에는 적층고무베어링(LRB)를 적용하고있다⁽¹⁾. 이와 같은 추세는 일본내 제진대를 생산하는 회사로 특허기구나 쇼와사이언스 등을 살펴볼 때 일반화된 경향임을 확인 할 수 있다. 이는 평평한 다이어그램을 사용하는 에어스프링의 강성을 낮게 하는 것이 기술적인 어려움에 따

* (주)유일산업 기술연구소

** 한국기계연구원

라 LRB를 적용하여 손쉽게 계의 수평 고유진동수를 1Hz 이하의 영역으로 결정할 수 있기 때문이다.

본 연구에서는 반도체 공장의 Access Floor에 설치되는 협진장비를 대상으로 하였으며, 현재 장비의 하중이 부가 장치를 포함하여 약 10ton 이상으로 대형화함에 따라 고하중의 장비를 지지할 수 있으며, 낮은 설치높이를 만족하는 공기스프링 및 LRB 사용 형식의 수동제진대 개발함에 있다.

2. 제진대 성능

제진대는 지반으로부터 전달되는 진동을 차단하는 장치이며 계략도는 Fig.1과 같으며 지면으로부터 전달되는 진동이 스프링과 댐핑으로 지지된 제진 테이블을 통해 상부로 전달되는 전달율은 다음의 식 (1)과 같이 계산된다.

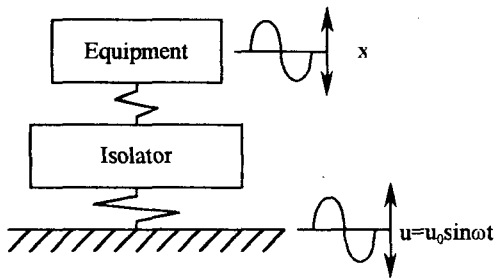


Fig.1 Schematic diagram of vibration isolation system

$$TR = \frac{x_0}{u_0} = \frac{1 + \left(2\zeta \frac{\omega}{\omega_n}\right)^2}{\sqrt{\left(1 - \frac{\omega}{\omega_n}\right)^2 + \left(2\zeta \frac{\omega}{\omega_n}\right)^2}} \quad (1)$$

2.1 제진대 설계사양

실험용 제진대는 현재 일반적으로 건설되는 반도체 공장의 격자보로부터 Access Floor까지의 높이인 약 400mm 이하의 높이를 유지하고 10ton 이상의 하중에도 안정한 구조를 가질 수 있도록 하였다. 지반으로부터 전달되는 가진 주파수를 고려하여 제진대의 수직 고유진동수는 약 2.5Hz로 설계하였으며, 수평고유진동수는 12ton의 하중을 고려하여 약 2Hz로 설계하였다. 설계사양에 적용한 요소는 table 1과 같다.

Table 1. Parameter of system element

품명	모델명	스프링 상수
Air Spring	MAS-A-343 (main chamber)	15kgf/mm(수직) 17kgf/mm(수평)
Orifice	-	Diameter: 1.6 mm Length: 2 mm
LRB	LRB-100-60	473kgf/mm(수직) 48kgf/mm(수평)

Table 1의 요소를 사용하여 설치한 제진대는 Fig.2와 같다.



Fig.2. Vibration Isolation Table Installed on the Shaking Table

2.2 제진대 성능 평가

제진대 성능 평가를 위한 측정은 TMS 사의 6 자유도 진동대를 이용하여 가진하였으며, 응답 측정은 IMV 사의 서보타입 가속도계인 VP-5155 와 B&K 사의 8318C 를 이용하여하였으며, 증폭기는 IMV 사의 VM-5112 와 B&K 사의 NEXUS 를 사용하였다. 데이터 수집기로는 National Instrument DAQ Card-AI-16E-4 를 사용하였다.

진동대로 유지한 진동테이블의 압진동 레벨은 BBN-Criteria 를 기준으로 하여 X, Y 방향은 B-Class 가진영역이며, Z 방향은 A-Class 가진 수준의 영역이었다.

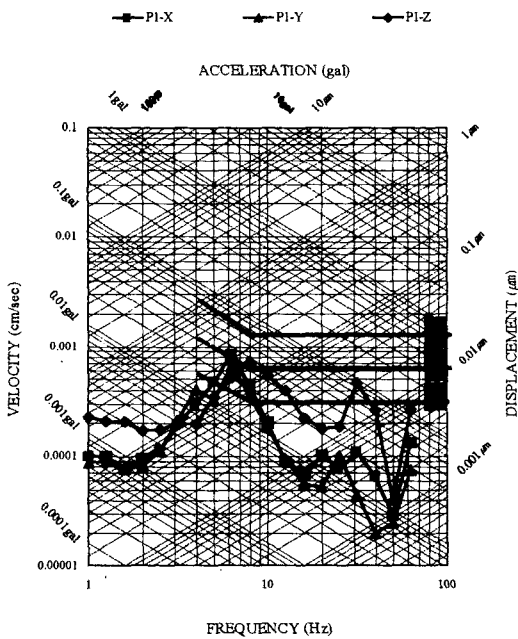


Fig.3 Vibration Level Test

Fig.3 은 진동테이블의 가진에 따른 제진테이블에서의 진동 응답 환산도이며 X,Y,Z 모든 방향에서 D-Class 수준의 압진동환경을 확보하고 있다.

3. 제진대 구성요소

제진대를 구성한 요소의 유효수압면적이 변위에 따라 거의 일정한 공기스프링과 천연고무를 이용한 적층고무베어링이다. 이 두 요소의 설계는 다음과 같다.

3-1 공기스프링

공기스프링은 공기가 압축되는 성질을 이용한 것으로 일반적인 형상은 Fig.4 와 같다.

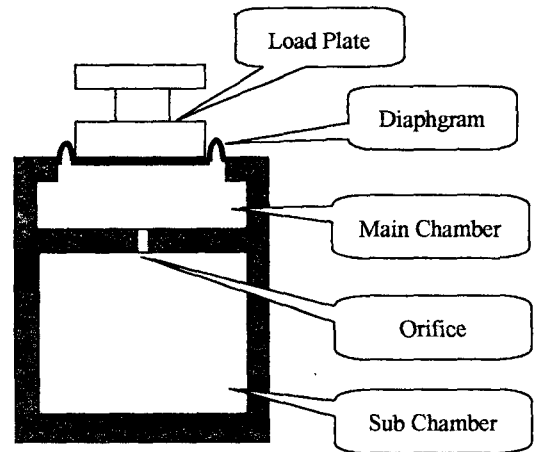


Fig.4 Schematic diagram of a self-damped Air Spring

공기스프링의 스프링 상수는 공기 체적에 반비례하고 내부압력과 유효수압면적의 제곱에 비례하는 특징을 갖는다. Fig.4 의 경우를 고려하여 스프링상수를 식으로 나타내면 식(2)와 같다.

$$k = \frac{n \cdot P_i \cdot S^2}{V_i + V_b} \quad (2)$$

여기서, n : 비열비
 P_i : 내부압력

S : 유효수압면적
 V_1 : 주탱크 체적
 V_2 : 보조탱크 체적

식(2)는 일반적인 표현이며, 오리피스를 통과하는 공기의 속도에 따라 V_2 가 스프링 강성에 영향을 미치는 영역과 미치지 못하는 영역이 있다. 즉, 유속이 빨라 오리피스를 통과하는 공기가 난류영역으로 접어들면 V_2 가 스프링상수를 낮게 하려는 역할을 할 수 없으며, 보조탱크 역할을 하더라도 그 기여도가 극히 미약해진다. Fig.5는 가진기로 가진 주파수 1Hz, 진폭변위 +/-1mm로 측정한 변위 하중 곡선이고, Fig.6은 Fig.5로부터 저장강성과 손실강성으로 분리한 비교도이다.

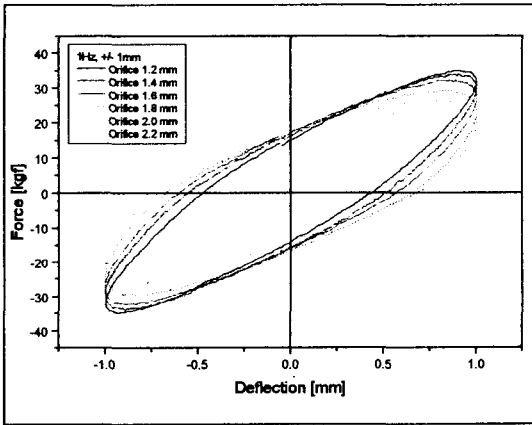


Fig.5 Deflection and Force Curve for Vertical Test

Fig.5에서 오리피스 직경이 커질수록 기울기가 감소함을 볼 수 있다. 즉, 오리피스 직경이 커지면 스프링 상수가 감소함을 알 수 있다.

Fig.6은 오리피스가 증가함에 따라 저장 강성과 손실 강성의 변화를 비교하였으며, 오리피스 직경이 1.8mm를 넘어서면서부터 손실강성계수도 감소함을 보이고 있다.

즉, 이 영역 이상에서는 손실강성이 감소하므로 적당한 오리피스의 직경을 선정함이 보조탱크의 역할을 결정할 수 있다 할 수 있다.

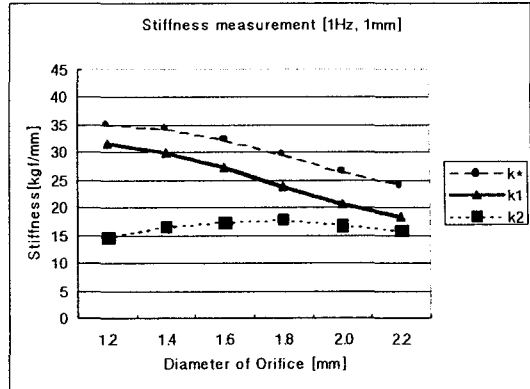


Fig.6 Compare Storage Stiffness with Loss Stiffness

3-2 적층 고무 베어링(LRB)

적층 고무 베어링의 설계는 지진 격리장치로 개발된 요소로 변형량을 고려한 설계와 작용하는 면압을 고려하는 설계로 나뉜다. 장주기화 즉, 고유진동수를 작게하는 것을 목표로 할 경우 면압을 고려한 설계를 하는 것이 일반적인 경향이다.

본 연구에서는 제진대에 적용하는 LRB는 4점 지지를 기본으로 하며, 마이크로 단위의 진동 진폭을 가지는 영역에 사용함으로 수평 변위가 거의 발생하지 않으므로 하중면적의 변화가 거의 없다. LRB의 설계는 다음과 같은 순서로 할 수 있다.

가. 수평 및 수직 고유진동수의 결정

설계하고자 하는 수평 및 수직 고유진동수를 결정하고 식(3)과 식(4)로 수평 및 수직 강성을 산정한다.

$$K_H = \frac{W}{g} \left(\frac{2\pi}{T_H} \right)^2 \quad (3)$$

$$K_v = \frac{W}{g} \left(\frac{2\pi}{T_v} \right)^2 \quad (4)$$

여기서, K_H : 수평강성
 K_v : 수직강성
 T_H : 수평주기
 T_v : 수직주기
 W : 지지하중
 g : 중력가속도

나. 하중면적 결정

하중면적은 허용할 면압으로부터 결정된다. 여기서는 50kgf/cm^2 를 허용하중으로 적용하여 식(5)에 의해 필요면적을 계산한다.

$$A = \frac{W}{\sigma} \quad (5)$$

여기서, A : 하중 지지 면적
 σ : 허용 하중

다. 고무 총두께 산정

고무 총두께는 식(6)으로 계산 할 수 있고, 고무의 전탄성계수는 경도 40 ~ 45의 천연고무로 5kgf/cm^2 로 계산한다.

$$t = \frac{A \cdot G}{K_H} \quad (6)$$

여기서, t : 고무층 총 두께
 G : 고무 전탄 탄성계수

라. 고무 1개층 두께 산정

고무 1개층 두께를 결정하기 위해서는 고무의 종탄성계수, 체적탄성계수 및 형상계수의 결정이 필요하다. 체적탄성계수가 고려된 고무의 종탄성계수는 식(7)과 같다.

$$E_c = \frac{K_v \cdot t}{A} \quad (7)$$

여기서, K_c : 종탄성계수(체적탄성계수 고려)

겔보기 탄성계수는 식(8)과 같다.

$$E_{gp} = \frac{E_c \cdot E_\infty}{E_\infty - E_c} \quad (8)$$

여기서, E_{gp} : 겔보기 탄성계수
 E_0 : 체적 탄성계수

겔보기 탄성계수로부터 1차 경상계수는 식(9)로 계산 할 수 있다.

$$S_1 = \sqrt{\frac{E_{gp} - 1}{E_0 - 2 \cdot k}} \quad (9)$$

여기서, S_1 : 형상계수
 E_0 : 종탄성계수(체적탄성계수 미 고려)
 k : 경도보정계수

구해진 형상계수로부터 고무 1개층의 두께는 식(10)으로 구할 수 있다.

$$tr = \frac{D}{4 \cdot S_1} \quad (10)$$

4. 결론

본 연구를 통하여 다음과 같은 결과를 얻을 수 있었다.

가. 반도체 공장 클린룸의 구조에 입각한 제진대 구성으로 Access Floor 전체를 BBN-Criteria 로 D-Class 이하로 암진동 환경을 유지 할 수 있는 기반을 확립하였다.

나. Self-damped 공기스프링의 동특성을 좌우하는 오리피스 직경은 매우 민감하여 적은 변화에도 스프링상수를 30%이상 변화 시킬 수 있으며, 최적의 저장손실 강상을 보이는 점이 있음을 알 수 있었다. 다시 말해, 오리피스의 통과유속에 따라 특성값이 바뀌음을 알 수 있다.

다. 적층고무배어링을 사용하면 수평강성을 보다 낮게 유지할 수 있다.

vibration isolator : Theory and experiment", Journal of Sound and Vibration, Vol. 218, No.1, pp. 81 ~ 101.

7. Alan N. Gent, Engineering with Rubber, Chapter. 3, 8, Oxford University Press. New York, 1992.

참고문헌

1. Hideki TSUJI, Shinji MITSUTA, Hiroyuki ITOH, Daisuke EBI, Akira TERAMURA, Osamu YOSHIDA, "Development of Active Isolation System for Semiconductor Equipment", 日本機械學會 Dynamics and Design Conference 2000 CD-ROM 論文集.
2. 박종권, 1994, "초정밀 가공기의 방진시스템 설계기술연구", 한국정밀공학회 '94 추계학술대회논문집, pp. 171 ~ 176.
3. 日本 ゴム 協會, 2000, 免震用積層 ゴム 핸드ブック.
4. Cyril M. Harris, SHOCK & VIBRATION HANDBOOK(1ed), Chapter. 33, McGraw-Hill 1961.
5. Cyril M. Harris, SHOCK & VIBRATION HANDBOOK(3ed), Chapter. 33, McGraw-Hill 1988.
6. C. Erin. et al., 1998, "An improved of a pneumatic