

# 미진동 제어장치의 수학적 모델에 대한 고찰

## A Study on Mathematical Model of Micro-Vibration Isolator

박수홍† · 김준섭\* · 옥승호\* · 이규섭\*\*

Soo-Hong Park, Joon-Seob Kim, Seung-Ho Ock, Gyu-Seob Lee

### 1. 서 론

많은 첨단 제조설비들은 진동에 매우 밀접한 관련을 가지고 있다. 기가급(giga class)의 메모리반도체(DRAM)를 생산하기 위해서는 0.23~0.1 $\mu$ m 이하의 회로 선폭을 가공할 수 있는 기술이 요구되고 있으며, 현재 연구 단계에 있는 테라급(tera class)의 메모리반도체에서는 이 보다 더 정밀한 가공기술이 필요할 것으로 예상된다. 이러한 고집적 반도체 제품의 가공과 검사를 위하여 가공 선폭 이상의 분해능을 가진 고정밀 생산, 검사 장비가 필요하다. 특히, 레이저 빔을 사용하여 웨이퍼에 미세 패턴을 형성시키는 노광 장비는 웨이퍼 최소 가공 선폭의 1/5~1/20 수준의 정밀도가 요구되고 있으며 이러한 정밀도의 향상은 내외부로부터 입력되는 진동에 더욱 더 민감한 영향을 받게 된다. 따라서 진동민감장비 하부에 미진동 제어장치(진동절연장치, Micro-Vibration Isolator)를 사용하게 된다. 즉, 미진동 제어장치란 초정밀 측정설비나 정밀 가공설비, 검사설비 등에 사용되어 지반이나 부속설비에서 발생하는 미진동을 제어하기 위한 장비 또는 설비를 말한다. 이러한 미진동 제어장치의 설계 및 성능예측을 위하여 미진동제어장치의 수치모델이 필요하다.

따라서 본 연구에서는 공압을 사용하는 미진동 제어장치에 대한 수학적 모델을 개발하였고, 수학적으로 모델링이 어려운 힘든 부분은 실험데이터로써 튜닝(tuning)하여 미진동 제어장치의 수치모델을 구하였다. 이 수치모델을 이용하여 미진동 제어장치 설계를 위한 해석적 접근과 실제 사용 조건에서의 정확한 제진특성 파악을 도모하고자 한다.

### 2. 미진동 제어장치의 수학적모델 및 해석

† 교신저자; 한국산업기술시험원  
E-mail : psh@ktl.re.kr  
Tel : (02) 860-1514, Fax : (02) 860-1549

\* 한국산업기술시험원  
\*\* 알엠에스테크놀로지(주)

#### 2.1 미진동 제어장치의 단진동 모델

미진동 제어장치를 수학적으로 표현하는 방법은 지반으로부터 진동변위 또는 가속도가 입력될 때 진동민감장비에서 발생하는 진동량의 비로 표현하는 것이며, 이를 위한 가장 간단한 모델은 1자유도 단진동 모델을 사용하는 것이다. 이러한 단진동(점성감쇠) 모델식을 살펴보면 다음과 같다.

$$m\ddot{x}_2 + c(\dot{x}_2 - \dot{x}_1) + k(x_2 - x_1) = 0 \quad \dots\dots\dots (1)$$

$$\frac{x_1}{x_2} = \frac{k + jc\omega}{(k - m\omega^2) + jc\omega} \quad \dots\dots\dots (2)$$

$$T = \frac{cs + k}{ms^2 + cs + k} = \frac{\alpha s + \beta}{s^2 + \alpha s + \beta} \quad \dots\dots\dots (3)$$

여기에서 T : 진동 전달률  
 $x_1$  : 미진동제어장치 상판의 변위  
 $x_2$  : 지반의 변위  
 $\omega$  : 가진 주파수  
 $\alpha, \beta$  : 매개변수 1, 2

#### 2.2 공압형 미진동 제어장치의 수학적 모델

공압을 이용하여 제진하는 장치는 현재 수동형 진동제어장치 중에 가장 널리 사용되고 있다. 이는 공압을 이용할 경우 높은 댐핑특성을 얻을 수 있으며 낮은 고유진동수도 만들 수 있는 장점 때문이다. 공압을 이용한 장치로는 크게 두가지 경우가 있는데 하나는 공기유동이 없이 만들어진 경우이고 다른 하나는 보조탱크를 만들어 놓고 진동의 발생에 따라 공기의 유출이 발생하고 이에 따라 진동을 제어하는 방식이다. 보조탱크를 갖는 미진동 제어장치에 대한 수학적 모델을 식으로 표현하면 다음과 같다.

$$T = \frac{\frac{nP_0A_p^2}{V_{1_0}}(s + \frac{nP_0C_r}{V_2})}{m_1s^3 + \frac{m_1nP_0C_rV_{1_0} + V_2}{V_{1_0}V_2}s^2 + \frac{nP_0A_p^2}{V_{1_0}}s + \frac{n^2P_0^2C_rA_p^2}{V_{1_0}V_2}} \quad \dots\dots\dots (4)$$

여기에서 m : 미진동제어장치 상판의 질량

$V_{1,2}$  : air chamber의 부피  
 $n$  : 공기의 비열비 (=1.4)  
 $P_0$  : 공기압,  $C_r : \frac{\pi d^4}{128\mu l}$   
 $A_p$  : 피스톤의 면적

여기에 다이어프램의 감쇠와 강성을 고려하면 전달율은 다음과 같다.

$$T = \frac{c_d s^2 + (k_h + k_d)s + k_c}{m_1 s^3 + (c_h + c_d)s^2 + (k_h + k_d)s + k_c} \quad \dots (5)$$

여기에서,

$$c_h = \frac{m_1 n P_0 C_r V_{1_0} + V_2}{V_{1_0} V_2}, \quad k_h = \frac{n P_0 A_p^2}{V_{1_0}}$$

$$k_{ch} = \frac{n^2 P_0^2 C_r A_p^2}{V_{1_0} V_2} = k_h \frac{n P_0 C_r}{V_b}$$

$k_c = k_{ch} + k_{cd}$ ,  $c_d, k_d, k_{cd}$  : 다이어프램의 실험상수

### 3. 수학적 모델의 튜닝

앞에서 유도한 수학적 모델의 인자를 정확히 구하는것은 어려운일이며, 특히 공압부분과 다이어프램 부분은 비선형성으로 인하여 이를 단일조건에서의 실험적 데이터로 성능을 평가하기에는 어려움이 많다. 따라서 수학적 모델을 매개변수화 하여 실험을 통하여 매개변수를 확정할 수 있다면 다른 조건에서의 특성변화를 예측할 수 있게 된다. 또한 모델 매개변수를 결정함으로써 평가의 일반성을 얻을 수도 있게 된다. 따라서 본 절에서는 진동제어 장치에서 가장 중요한 성능변수인 전달률에 대해 이론적 모델과 실험결과 사이의 차이를 살펴보고 그 오차를 확인함으로써 적절한 모델의 설정을 검토해 보도록 한다.

#### 3.1 단진동 모델의 튜닝

특정 모델의 공압식 미진동 제어장치에 대하여 수치해석적 방법에 의하여 단진동 모델의 매개변수  $\alpha, \beta$ 를 구하면 ( $\alpha = 6.23, \beta = 298.3$ )이다. 이론적 모델과 실험결과 사이의 차이는 표 1과 같다.

표 1 실험치와 tuning 결과와의 오차 통계

오차변수	평균	sd	min	max
결과	1.169	0.962	0.001	3.251

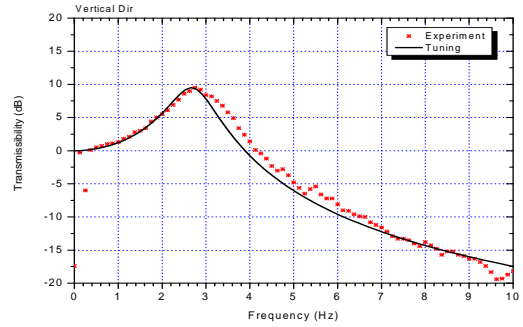


그림 1 단진동 모델의 경우 최종 Tuning 결과

#### 3.2 공압 모델의 튜닝

특정 모델의 공압식 미진동 제어장치에 대하여 수치해석적 방법에 의하여 다이어프램이 있는 공압모델의 매개변수  $k_h, k_d, c_h, c_d, k_c$ 를 구하면 각각 200, 123, 3, 5, 500이다. 이론적 모델과 실험결과 사이의 차이는 표 2와 같다.

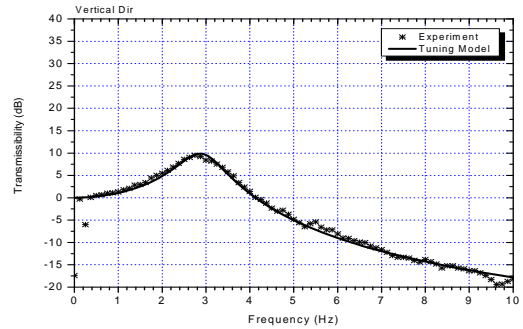


그림 2 복합 모델에 대한 최종 tuning 결과

표 2 실험치와 tuning 결과와의 오차 통계

오차변수	평균	sd	min	max
결과	0.600	0.420	0.050	2.027

위의 표 1, 2를 비교해 보면 10Hz 이하 범위에서 오차 평균이 1.169dB에서 0.6dB 그리고 오차표준편차는 0.962dB에서 0.420dB로 감소하였다. 이로부터 단진동 모델에 비해 공압모델의 오차가 상대적으로 작음을 알 수 있었다.

### 4. 결 론

본 연구에서는 공압을 사용하는 미진동 제어장치에 대한 수학적 모델을 개발하였고, 수학적으로 모델링이 어려운 힘든 부분은 실험데이터를 써 튜닝(tuning)하여 미진동 제어장치의 수치모델을 구하였다. 수치모델들에 의한 전달률과 실험적으로 구한 전달률을 비교하여 이 수치모델의 타당성을 입증하였다.