

# 정밀 생산 설비의 PID 진동 제어 PID Vibration Control of Precision Production Facilities

\*이종원, 윤지현, 양인형<sup>1</sup>, 이규섭<sup>2</sup>, #오재응<sup>3</sup>

\*Jong-Won Lee, Ji-Hyun Yoon, In-Hyung Yang<sup>1</sup>, K. S. Lee<sup>2</sup>, #Jae-Eung Oh(jeoh@hanyang.ac.kr)<sup>3</sup>  
<sup>1</sup>한양대학교 대학원 기계공학과, <sup>2</sup>RMS 테크놀로지, <sup>3</sup>한양대학교 기계공학부

Key words : Vibration analysis, Vibration control, PID control

## 1. 서론

반도체 생산공정과 같은 고집적, 초정밀 산업분야가 발달함에 따라 생산 설비의 진동 저감에 대한 중요성 또한 높아지고 있다. 제진제 부착과 같은 수동 진동 저감 방법은 저주파 대역에서의 미세 진동 저감 효과를 기대하기 어렵다. 이러한 수동 진동 저감 대책의 한계를 해결하기 위해 발생하는 진동의 역위상을 액츄에이터로 가진하는 능동 진동 제어 기법이 많이 사용된다. 능동 진동 제어를 위한 여러가지 제어기 중에서 PID 제어기는 구조가 간단하고 견실성이 우수하며 현장 운전자에게 익숙하다는 장점 때문에 산업현장에서 널리 사용되고 있다.

현재 국내의 능동 진동 제어 기술은 Table 1의 Class B 수준에 도달해있으며 Class E 단계의 정밀도를 얻기 위한 연구가 활발히 진행되고 있다.

본 논문에서는 상부 가진에 의해 진동이 발생하는 정반을 진동을 해석하고 PID 제어를 통하여 진동을 제어하는 시뮬레이션을 수행하였다. 이 때 제어의 목표치를 Class C의 변위인 0.25 μm로 설정하여 최대변위가 그 이내로 들어오게 하였다.

Table 1 Comparison of measured roughness data

| Class | 사용장비   | 허용변위    |
|-------|--|---------|
| A     | 400 배 정도 현미경, Probe Test, 생산 지원설비 및 장치                               | 1 μm    |
| B     | 안과, 신경계 수술실, 방진설비를 갖춘 광학장비, 반도체 생산설비 등                               | 0.5 μm  |
| C     | 30,000 배 전자현미경 Magnetic Resonance Imagers, 반도체 생산 설비 : 1 M DRAM 정도   | 0.25 μm |
| D     | 30,000 배 이상 전자현미경 Mass Spectrometer 세포이식 장치, 반도체 생산 설비 : 4 M DRAM 정도 | 0.1 μm  |
| E     | Unisolated laser Optical research System : 64 M DRAM 정도              | 0.06 μm |

## 2. 정밀 생산 설비의 진동해석

일반적인 정밀 생산 설비는 Fig. 1과 같이 4 점지지 직사각형 강체로 모델링할 수 있다. 이와 같은 시스템의 진동을 일으키는 가장 큰 가진원은 상하방향의 가진이고, 이는 z 축의 병진과 x, y 축의 회전 운동을 발생시킨다.

이 시스템의 진동을 해석하기 위해서 모서리에 Impact 가진을 주었고, 이 때의 응답을 Matlab 으로 시뮬레이션하였다.

시스템의 물성치와 운동방정식은 다음과 같다.

2m×2m×0.25m, 3000kg  
 k = 2530 N/m, c = 300 N·s/m  
 a = b = 0  
 500N impact

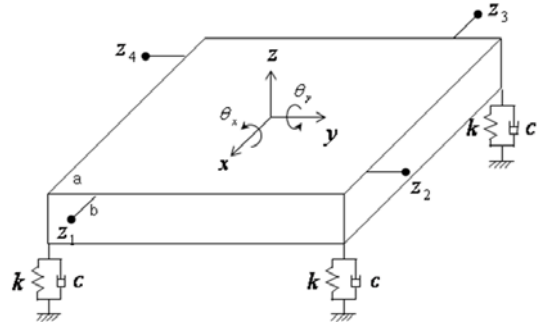


Fig. 1 Modeling of Precision Production Facility

$$m\ddot{z} + 4c\dot{z} + 4kz = F_z$$

$$I_{xx}\ddot{\theta}_x + cl_1^2\dot{\theta}_x + kl_1^2\theta_x = M_x$$

$$I_{yy}\ddot{\theta}_y + cl_2^2\dot{\theta}_y + kl_2^2\theta_y = M_y$$

이 운동방정식을 상태공간방정식으로 변환하면 다음과 같다.

$$\dot{\mathbf{x}} = \mathbf{Ax} + \mathbf{Bu}$$

$$\mathbf{y} = \mathbf{Cx} + \mathbf{Du}$$

$$\mathbf{A} = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \\ -\frac{4k}{m} & 0 & 0 & -\frac{4c}{m} & 0 & 0 \\ 0 & -\frac{kl_1^2}{I_{xx}} & 0 & 0 & -\frac{cl_1^2}{I_{xx}} & 0 \\ 0 & 0 & -\frac{kl_2^2}{I_{yy}} & 0 & 0 & -\frac{cl_2^2}{I_{yy}} \end{bmatrix}$$

$$\mathbf{B} = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \\ \frac{1}{m} & 0 & 0 \\ 0 & \frac{1}{I_{xx}} & 0 \\ 0 & 0 & \frac{1}{I_{yy}} \end{bmatrix}, \mathbf{u} = \begin{Bmatrix} F_z \\ M_x \\ M_y \end{Bmatrix}, \mathbf{D} = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}$$

$$\mathbf{C} = \begin{bmatrix} 1 & -\left(\frac{l_1}{2} - a\right) & -\left(\frac{l_2}{2} + b\right) & 0 & 0 & 0 \\ 1 & \left(\frac{l_1}{2} + b\right) & -\left(\frac{l_2}{2} - a\right) & 0 & 0 & 0 \\ 1 & \left(\frac{l_1}{2} - a\right) & \left(\frac{l_2}{2} + b\right) & 0 & 0 & 0 \\ 1 & -\left(\frac{l_1}{2} + b\right) & \left(\frac{l_2}{2} - a\right) & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}$$

위의 상태공간방정식을 통한 진동 시뮬레이션의 결과는 Fig. 2와 같다.

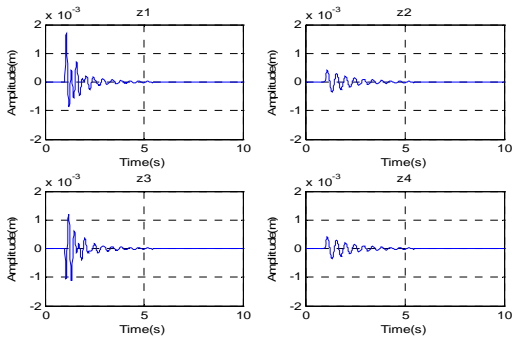


Fig. 2 Vibration Analysis

이는 각 모서리의 변위를 10 초까지 출력한 결과이다. 가장 진동이 큰 곳의 변위는 1.7mm 로 나타났다.

### 3. PID 진동 제어

앞 절의 진동 해석 결과를 바탕으로 PID 제어 시뮬레이션을 수행하였다. PID 제어를 통하여 4 점의 진동을 모두 제어할 수 있지만 가장 진동이 큰 지점의 진동 제어 결과만을 나타내었다. 제어의 블록 선도는 Fig. 3 과 같다.

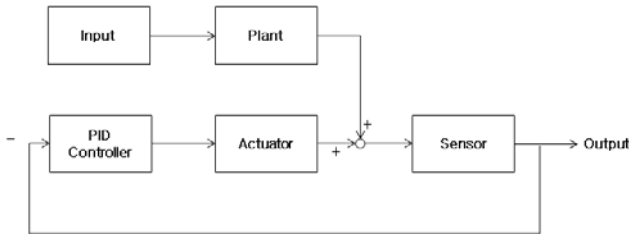


Fig. 3 Block diagram of PID vibration control

Impuse 입력이 가해지면 시스템을 거쳐 진동이 발생하고 이를 Feedback control loop 를 통해 제어하게 된다. 이 때 제어기로서 PID 제어기가 사용되게 된다.

Matlab Simulink 로 위의 Control loop 를 구성하여 시뮬레이션을 수행하였다. 이때 최적 제어 gain 값은 시행착오법을 통하여 구하였다. 시뮬레이션 결과는 Fig. 4 와 같다.

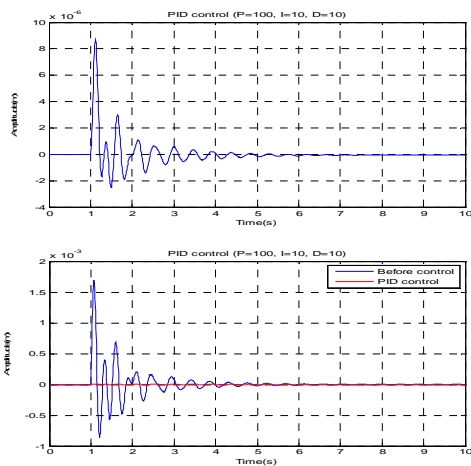


Fig. 4 (a) PID vibration control,

(b) Comparison of the result about before control and PID control

Fig. 4 를 통해 보았을 때, 진동이 상당 부분 저감됨을 알 수 있다. 최대 진동 변위가 1.7mm 에서 0.25  $\mu$ m로 저감되었고 이는 99.99%의 진동이 제어된 결과이다.

### 4. 결론

정밀 생산 설비의 진동 특성을 알기 위해 4 점지지 강체 시스템으로 모델링하였고 이를 상태공간 방정식으로 표현하여 500N 임펄스 입력에 대한 시스템 응답을 구하였다. 또한 이 결과를 바탕으로 PID 제어를 적용하여 시뮬레이션 하였다. 최적 PID gain 값을 찾아 적용한 결과 최대변위가 1.7mm 에서 0.25  $\mu$ m로 줄었고, 이는 진동 허용 기준의 Class C 에 해당하는 결과이다. 99.99%의 진동 제어 효과를 보임을 알 수 있었으며 이는 정밀 제어기로서 PID 제어기의 유효성을 보여주었다고 할 수 있다.

### 참고문헌

1. K. Astrom and T. Hagglund, 'PID Controllers: Theory, Design, and Tuning', 1995, ISA
2. Su Whan Sung, In-Beum Lee, 'PID Controllers and Automatic Tuning', 1999, A-Jin
3. 김규용, 'H $\infty$  제어에 의한 방진대의 능동제어', 1995
4. 최수용, '퍼지기법과 PID 제어기를 이용한 외팔보의 능동진동제어', 2003
5. Katsuhiko Ogata, 'Modern Control Engineering', Prentice hall, 2002