

입력성형을 통한 웨이퍼 이송장치의 잔류진동 감소

Reduction of Residual Vibration in Wafer Positioning System Using Input Shaping

임재철† · 안태길* · 조중근**

JAE-CHUL YIM, TAE-KIL AHN, JUNG-KEUN CHO

Key Words : Input Shaping(입력 성형), Wafer Positioning System(웨이퍼 이송 장치)

ABSTRACT

The wafer positioning robot used in the semiconductor industry is required to operate at high speed for the improvement of productivity. However, the residual vibration produced by the high speed of the wafer positioning robot makes the life of the robot shorter and the cycle time longer. In this study, the input shaping and the path of the system are designed for the reduction of the residual vibration and the optimization of the cycle time. The followings are the process for the reduction and the optimization; 1)System modeling of wafer positioning robot, 2)Verification of dynamic characteristic of wafer positioning robot, 3)Input shaping plan using impulse response reiteration, 4)Simulation test using simulink, 6)Analysis of result.

1. 서론

산업현장에서는 생산성을 향상하기 위하여 많은 종류의 로봇들이 고속으로 동작된다. 그러나 이러한 고속 동작들로 인하여 기계에 잔류진동이 발생하고 이는 다시 로봇의 마모와 피로를 발생시켜 수명을 단축시킨다. 또한 정확한 위치 제어를 필요로 하는 로봇들의 경우 잔류진동이 완전히 멈출 때까지 다음 작업을 수행할 수 없으므로, 작업 속도가 저하 된다.

설계할 당시에 이러한 잔류진동이 없도록 설계하여야 하겠지만 실제적으로 잔류진동이 없는 로봇을 설계하기는 힘들다. 또한 이러한 잔류진동의 문제를 경제적인 면에서 볼 때, 로봇을 다시 설계 하는 것보다는 이미 사용 중인 로봇의 잔류진동이 줄이거나 없어지도록 제어 하는 것이 더 유리하다는 것은 분명하다.

오래전부터 이러한 진동문제를 포함한 시스템의 잔류진동을 없애기 위하여 많은 연구가 진행되어 왔다.

본 연구에서는 Singer의 입력 성형기법을 사용하여, 웨이퍼 이송장치의 잔류진동을 없애는데 주안점을 두었다. 이 잔류진동은 저속으로 작동할 때는 발생하지 않으나 고속의

응답을 얻기 위하여 제어기의 이득을 크게 하고 계단입력 등 급격한 입력을 가하는 경우, 진동이 발생하여 다음동작을 하기위해 정지해 있는 시간을 기준 값 이하로 줄일 수가 없게 된다. 이 로봇에 Singer의 방법으로 임펄스 증첩을 만들어 적용함으로써, 잔류진동이 없는 응답을 얻고자 한다.

지금까지 잔류진동을 없애기 위해 입력 성형기 기법이 많이 연구해 왔다. 그러나 입력 성형기 기법에 대한 이론적인 연구가 많이 이루어 졌지만, 실제 로봇에 적용한 예는 적은 편이며 실험적인 적용일지라도, 대부분이 특수 제작한 로봇에 적용한 것이다. 따라서 본 연구는 감속기가 있는 산업용 로봇인 웨이퍼 이송장치에 실제적으로 적용하여 실용적인 측면에서 접근하였다.

2. 이론 해석

2.1 시스템의 동적 모델링

로봇 핸드의 움직임은 Fig. 1과 같이 1자유도계의 운동 모델로 나타낼 수 있다. 그림에서 X_1 은 시스템이 이동하는 변위이고 X_2 는 그에 따라 발생하는 잔류진동으로 볼 수 있다.

Fig. 1을 운동 방정식으로 표현하면 다음과 같다.

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

식 (1)을 다시 x_1, x_2 에 대하여 이항하여 정리하면,

† 호서대학교 일반대학원 기계공학과
E-mail : autoeng@office.hoseo.ac.kr
Tel : (041)540-5213, Fax : (041)540-5318

* 호서대학교 자동차공학과

** 세메스(주) 연구소

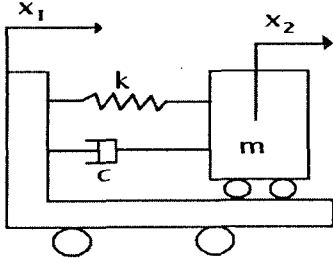


Fig. 1 로봇핸드의 동적 모델링

$$m\ddot{x}_2 + C\dot{x}_2 + kx_2 = C\dot{x}_1 + kx_1 \quad (2)$$

이 되고, 이를 다시 Laplace Transform하면 다음과 같다.

$$ms^2X_2 + CsX_2 + kX_2 = CsX_1 + kX_1 \quad (3)$$

식 (3)의 양변에 m을 나눠주고 $\frac{C}{m} = 2\zeta\omega_n$, $\frac{k}{m} = \omega_n^2$ 로 변환하여 대입하면 다음과 같다.

$$s^2X_2 + 2\zeta\omega_n sX_2 + \omega_n^2X_2 = 2\zeta\omega_n sX_1 + \omega_n^2X_1 \quad (4)$$

다시 식 (4)를 X_1 , X_2 에 대하여 정리하여 표현하면 최종적으로 다음과 같다.

$$X_2 = \frac{2\zeta\omega_n s + \omega_n^2}{s^2 + 2\zeta\omega_n s + \omega_n^2} X_1 \quad (5)$$

2.2 잔류진동의 동적 특성 규명

웨이퍼 이송 로봇의 동적인 특성 정의는 로봇의 잔류진동을 측정하여 이를 운동 방정식으로 표현함으로써 가능하다. 본 연구에서는 측정된 데이터를 바탕으로 1자유도계의 고유진동수(natural frequency) 및 감쇠비(damped ratio)를 구하여 웨이퍼 이송 로봇의 동특성을 구하기로 한다.

1자유도계의 진동 모델은 Fig. 1의 그림과 같이 표현되어지며 이를 다시 운동방정식으로 표현하면 다음과 같다.

$$m\ddot{x} + C_e\dot{x} + kx = f(t) \quad (6)$$

여기서 $m\ddot{x}$ 는 관성력(m : 질량), $C_e\dot{x}$ 는 점성 저항력(C_e : 감쇠계수), kx 는 스프링의 복원력(k : 스프링 정수), $f(t)$ 는 외력을 가진 함수 $f(t) = F = F_0\sin(\omega t)$ 이다.

이 방정식은 다시 외력이 없는 자유진동의 경우 $f(t) = 0$ 이 되고 다음과 같다.

$$m\ddot{x} + C_e\dot{x} + kx = 0 \quad (7)$$

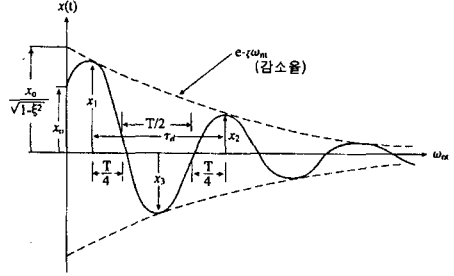


Fig. 2 부족감쇠 응답

또한 Fig. 2처럼 부족감쇠 응답 ($0 < \zeta < 1$)의 경우 그 해는 다음과 같다.

$$y(t) = 1 - \frac{e^{-\zeta\omega_n t}}{\sqrt{1-\zeta^2}} \sin(\omega_d t + \tan^{-1} \frac{\sqrt{1-\zeta^2}}{\zeta})$$

여기서, ζ 는 감쇠비, ω_n 은 감쇠진동의 고유 각진동수 이다. 이때 감쇠진동의 고유 진동수 ω_d 는 다음과 같다.

$$\omega_d = \omega_n \sqrt{1-\zeta^2} \quad (9)$$

Fig. 2에서 변위진폭 x_1, x_2 때의 시간을 t_1, t_2 이라고 하여 시간과 변위진폭의 비를 지수함수로 나타내면 다음과 같다.

$$\frac{x_1}{x_2} = e^{-\frac{2\pi\zeta}{\sqrt{1-\zeta^2}}} \quad (10)$$

잔류진동은 $\zeta \ll 1$ 일 때 발생하므로 $\sqrt{1-\zeta^2} \approx 1$ 로 볼 수 있다. 따라서 식(10)로부터 ζ 를 구하면 다음과 같다.

$$\zeta \approx -\frac{\ln(\frac{x_1}{x_2})}{2\pi} \quad (11)$$

2.3 입력 성형 기법

Singer가 발표한 입력 성형 기법은 다음과 같은 특징을 갖고 있다.

첫째, 개루프(open loop) 기법이어서 별도의 센서가 필요치 않다. 따라서 기존의 하드웨어나 펌프 체어를 변경할 필요가 없으므로, 적용이 간편하고 비용이 적게 든다.

둘째, 일종의 필터로서, 어떤 형태의 입력이라도 입력 성형기 필터를 거치면 잔류진동을 유발하지 않는 기준입력이 된다.

셋째, 결과적으로 극점-영점 소거이다. 이 사실은 Singh가 밝혔는데, 입력 성형기 필터는 영점을 갖고 있어서, 이 영점이 진동모드의 극점과 상쇄되는 것이다.

넷째, 적용할 수 있는 시스템은 기본적으로 제한이 없다. 외란이 아닌 명령입력에 의해 가진되는 진동이라면, 이

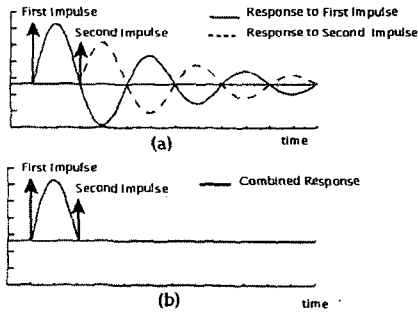


Fig. 3 임펄스 응답 중첩

기법을 사용하여 잔류진동을 피할 수 있게 된다.

입력 성형기 기법은 시스템의 임펄스 응답에 기초를 두고 설계 하였다. Fig. 3에서 보이는 것과 같이 두 개의 임펄스가 시간차를 두고 입력되었을 때, 각각의 입력대항 응답은 (a)와 같다. 두 입력에 대한 시스템의 전체 응답은 이 두 응답을 중첩한 것과 같으므로, (b)와 같은 응답을 얻게 된다. 따라서 두 번째 임펄스가 입력된 이후에는 시스템의 진동이 남아있지 않게 된다.

입력을 $U(s)$ 그리고 출력을 $Y(s)$ 로 하는 일반적인 2 차 진동 시스템을 $G(s)$ 라 하면

$$G(s) = \frac{Y(s)}{U(s)} = \frac{w^2}{s^2 + s\xi ws + w^2} \quad (12)$$

이 시스템의 임펄스 응답은 다음과 같다.

$$y(t) = A \frac{w}{\sqrt{1-\xi^2}} e^{-\xi w(t-t_0)} \times \sin(w\sqrt{1-\xi^2}(t-t_0)) \quad (13)$$

여기서, A 는 $t=t_0$ 순간에 가해지는 임펄스이며, w 는 시스템의 비감쇠 고유진동수 이다. ξ 는 시스템의 감쇠비, t_0 는 임펄스 입력이 작용될 때의 시작을 나타낸다.

서로 다른 N 개의 임펄스가 동시에 작용하면 임펄스 응답은 다음과 같다.

$$A_{amp} = \sqrt{\sum_{i=1}^N (B_i \cos \Phi_i)^2 + \sum_{i=1}^N (B_i \sin \Phi_i)^2} \quad (14)$$

여기서,

$$\begin{aligned} \Phi_i &= w\sqrt{1-\xi^2}t_i \\ B_i &= A_i \frac{w}{\sqrt{1-\xi^2}} e^{-\xi w(t_N-t_i)} \end{aligned} \quad (15)$$

위의 식에서 A_i , t_i 는 i 번째 가해지는 임펄스의 크기와

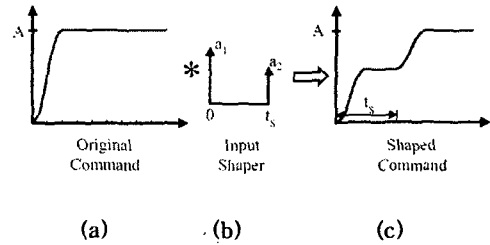


Fig. 4 계단 입력

시간이며 t_N 이후의 시스템의 응답 A_{amp} 가 영(zero)이 되는 것이 목적이므로 아래의 식을 얻을 수 있다.

$$\sum_{i=1}^N A_i e^{-\xi w(t_N-t_i)} \sin(t_i w\sqrt{1-\xi^2}) = 0 \quad (16)$$

$$\sum_{i=1}^N A_i e^{-\xi w(t_N-t_i)} \cos(t_i w\sqrt{1-\xi^2}) = 0 \quad (17)$$

이와 더불어 다음과 같은 구속조건들이 더 추가 된다. 첫 번째 임펄스 열이 시각 0에서 시작하기 때문에 $t_0=0$

이 되며, 시스템 게인(gain)에 변화를 주지 않기 위해서 다음과 같이 된다.

$$\sum_{i=0}^N A_i = 1 \quad (18)$$

또한, 고주파의 가진을 방지하기 위해 부가적으로 다음식이 추가 된다.

$$A_i \geq 0 \quad \text{for} \quad i=0,1,2,\dots,N \quad (19)$$

주어진 입력을 임펄스 열과 컨볼루션(convolution) 적분하여 페루프의 기준 입력으로 준다. 임펄스 열과의 컨볼루션 적분은 기준 입력의 시간 추이(time shift)이다. 일례로, Fig. 4는 계단입력이 임펄스 열과 컨볼루션 적분되었을 때의 모양을 보여준다. (a)의 계단 입력이 (b)에서 보이는 임펄스 열과 컨볼루션 적분 되었을 때, (c)와 같이 된다.

이를 적용하기 위해서 식(16), (17)을 풀면, N 개의 임펄스 열을 사용할 때, i 번째 임펄스의 크기 A_i 와 가해지는 시간 t_i 는 다음과 같다.

$$A_i = \frac{\binom{N-1}{i-1} K^{i-1}}{\sum_{i=0}^{N-1} \binom{N-1}{i} K^i} \quad (20)$$

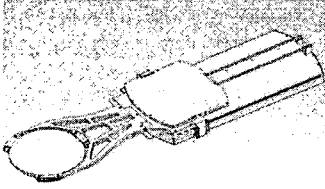


Fig. 5 웨이퍼 이송 로봇 핸드 결합체

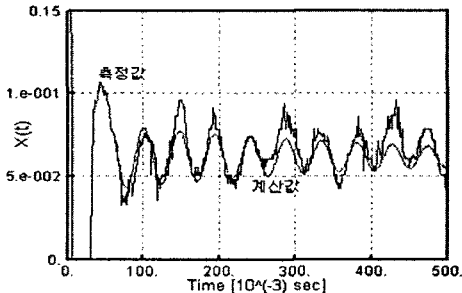


Fig. 6 웨이퍼 이송 로봇의 잔류진동 측정값, 계산값

$$t_i = (i-1) \frac{\pi}{\omega \sqrt{1-\zeta^2}} \quad (21)$$

$$K = e^{-\frac{\zeta \pi}{\sqrt{1-\zeta^2}}} \quad (22)$$

3. 입력 성형기 설계 및 모의실험

3.1 웨이퍼 이송 로봇의 동특성 실험

본 연구는 비 접촉 레이저 변위 측정 센서를 사용하여 웨이퍼 이송 로봇에서 발생하는 잔류진동을 측정하고 여기서 나오는 주파수 응답함수를 구한 뒤 이를 분석하여 동적 특성을 찾아내는 방법을 이용하였다.

Fig. 5는 웨이퍼 이송 로봇 핸드 결합체로 로봇 핸드 를 지지하고 구동시키는 마운트 어셈블리 부분이다. 웨이퍼 지지부는 어셈블리 마운트에 내장되어 있는 리니어 모터를 통해 제어 된다.

웨이퍼 이송 로봇의 잔류진동 측정은 비접촉 레이저 변위 측정 센서를 사용하였으며, 장비는 Keyence사의 LK-G3001V의 컨트롤러와 LK-G30의 센서 헤드로 1 KHz의 샘플링 주파수를 사용하였다.

잔류진동을 측정된 결과는 Fig. 6과 같으며 이를 정리 한 결과는 Table. 1과 같다. 그림에서 보는 것처럼 실측된 데이터 값과 계산되어진 계산 값은 일정부분 오차가 발생하고 있다. 이는 측정 장소에서 발생하고 있는 환경 노이즈로 예상되며, 측정된 데이터는 필터를 통해 최대한 노이즈를 제거한 후에 계산 하였다.

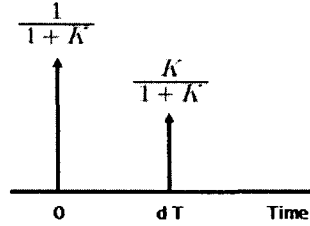


Fig. 7 두개의 임펄스를 가진 열의 크기

Parameter	Value
고유진동수	24.48 Hz
	145.48 rad/s
감쇠비	0.0198

Table. 1 웨이퍼 이송 로봇의 동적 특성 값

Parameter	Value
K	0.9396
ΔT	0.0216 sec
$\frac{1}{1+K}$	0.5155
$\frac{K}{1+K}$	0.4845

Table. 2 입력성형을 위한 임펄스 열의 설계 값

3.2 입력 성형 설계

본 연구에서의 입력 성형의 임펄스 열은 두 개로 설계 하였다. 이와 같은 두 개의 임펄스 응답 중첩을 통한 잔류진

여기서 $\frac{1}{1+K}$ 는 첫 번째 임펄스의 높이 비율,

$\frac{K}{1+K}$ 는 두 번째 임펄스 높이 비율 나타내는 것이며, dT 는 첫 번째 임펄스를 주고, 다시 두 번째 임펄스를 줄때 까지의 지연시간을 의미 한다.

이에 따른 임펄스 열 설계 값은 Table. 2와 같다.

3.3 모의실험(simulation)

설계한 입력 성형 명령의 결과를 사전에 확인하고 성형 전의 결과 값과 그 값의 비교를 위하여 컴퓨터를 이용한 가상 실험을 하였다. 이를 위하여 Matlab(ver 6.5)의 Simulink 소프트웨어를 이용하였다.

Fig. 8의 (a)는 입력 성형 전의 스텝 명령이며, 여기서 수평한 부분은 시스템이 정지해 있는 상태를 의미한다. (b)는 입력 성형 후의 스텝 명령으로 스텝 명령 중간에 dT 만큼의 지연시간이 반영되었다.

모의실험 결과 값을 바탕으로 성형 명령은 Fig. 9에서 보여 지는 것처럼 전체 싸이클(cycle) 시간을 증가 시키지 않고 잔류진동을 현저하게 감소시키는 것으로 나타났다.

4. 결론

모의실험을 통하여 웨이퍼 이송 로봇에 입력 성형을 적용하면 잔류진동의 최대값은 성형 전에 비하여 0.13배로 줄었으며, 잔류진동 최대값의 10% 이하로 줄어드는 시점까지의 시간은 0.37배로 단축되는 것을 확인 하였다. 이는 결국 잔류진동을 감소 시켜 로봇 수명을 연장 시킬 수 있으며, 궁극적으로 다음 동작을 하기 위한 지연시간을 단축 시켜 전체 싸이클 시간을 단축 시켜 생산성 향상에도 기여 할 수 있다.

참 고 문 헌

- (1) Singer, N. c. and Seering, W. P., 1990, "Preshaping Command Inputs to Reduce System Vibration," *ASME Journal of Dynamic System, Measurement and control*, Vol. 112, pp. 76-82
- (2) Singh, T. and Vadali, S. R., 1993, "Robust Time Delay Control," *ASME Journal of Dynamic System, Measurement and control*, Vol. 115, pp. 303-306
- (3) Smith, O. J. M., 1958, *Feedback Control System*, McGraw-Hill, New York, 1958, p. 338.
- (4) 박주이, 장평훈, 1994, "입력 다듬기기법을 이용한 유연관절을 갖는 로봇의 잔류진동 제거," *대한기계학회논문집*, 제11권, pp. 3066-3074.
- (5) 이지형, 이재원, 주해효, 1994, "성형 입력에 의한 유연한 로봇의 잔류진동 제어," *한국자동제어학술회의논문집*, pp. 603-607

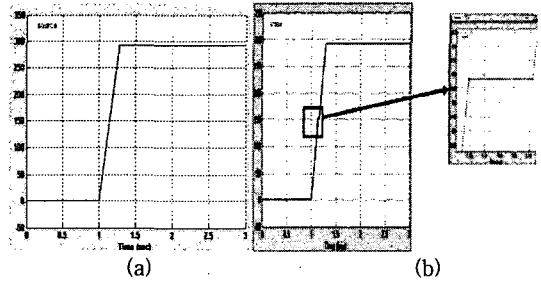


Fig. 8 입력 성형 전후의 명령

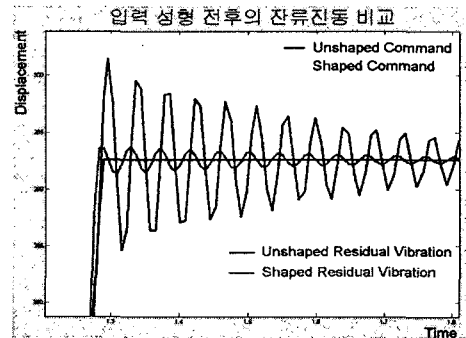


Fig. 9 입력 성형 전후의 잔류진동