

## 칩마운터 구조물의 유연성을 고려한 위치와 진동 동시 제어

강민식<sup>†</sup>

<sup>†</sup>가천대학교 기계공학과

### Simultaneous Positioning and Vibration Control of Chip Mounter with Structural Flexibility

Min Sig Kang<sup>†</sup>

<sup>†</sup>Dept. of Mechanical Engineering, Gachon University

#### ABSTRACT

Chip mounter which is used to pick chips from the pre-specified position and place them on the target location of PCB is an essential device in semiconductor and LCD industries. Quick and high precision positioning is the key technology needed to increase productivity of chip mounter. As increasing acceleration and deceleration of placing motion, structural vibration induced from inertial reactive force and flexibility of mounter structure becomes a serious problem degrading positioning accuracy. Motivated from these, this paper proposed a new control design algorithm which combines a mounter structure acceleration feedforward compensation and an extended sliding mode control for fine positioning and suppression of structural vibration, simultaneously. The feasibility of the proposed control design was verified along with some simulation results.

**Key Words** : Chip mount device, XY- table, Structural flexibility, Acceleration feedforward compensation, Sliding mode control

#### 1. 서 론

XY-테이블과 같은 위치결정 장치는 반도체나 디스플레이 제조공정 장비로 많이 이용되고 있다[1]. 대부분의 위치결정 장치에서는 이동질량의 가속 및 감속 구간에서 장치에 가해지는 반작용력은 위치결정장치의 구조적 진동을 야기하여 위치제어의 안정시간을 증가시키는 요인이 된다. 이러한 위치결정 장치에서 잔류진동에 대한 많은 연구가 진행되어 왔으며, 대표적으로 기준입력 셰이핑방법 또는 다양한 형태의 되먹임제어와 기준입력 셰이핑방법을 혼합한 형태의 제어기 설계방법이 적용되어 왔다[2-6]. 하지만 이동질량 자체의 운동에 의해 발생된 반작용력이 원인인 장치 구조물의 진동에 대한 정밀 제어 방법은 그리 많지 않다[7]. 현재 반도체 관련 장비는 생산성 증대를 위해 이동질량의 속도를 높이고 있으며, 이에 따라 구조물에 가해지

는 가진력이 커져, 지금까지는 무시되었던 구조물의 진동이 장치의 성능에 영향을 미치게 될 것이다[8].

본 연구에서는 PCB(printed circuit board)에 칩을 조립하기 위해 사용하는 XY-테이블 형태의 칩마운터에서 위치제어 정밀도 구현과 동시에 축의 구동력에 의해 발생하는 XY-테이블 구조물의 진동을 최소화하는 제어 알고리즘을 제안한다.

제어방법으로는 테이블 구조물의 가속도 앞먹임 보상제어와 확장된 슬라이딩모드제어를 결합한 설계 방법을 제안한다. 가속도 앞먹임제어로 이동질량 운동을 구조물 진동과 분리시키며, 되먹임제어로는 계의 파라미터 변화와 외란에 강인하며 적용이 용이한 슬라이딩 모드제어(sliding mode control)[9-12]를 확장하여 적용한다. 기존의 슬라이딩모드제어기 설계에서는 슬라이딩 함수를 일반적으로 위치오차나 제어변수 등 단일 변수로 구성하지만, 본 연구에서는 이를 확장하여[13, 14] 이동질량의 위치오차는 물론 테이블 구조물의 진동을 포함하는 함수로 정의함으로써 위치제어와 구조

<sup>†</sup>E-mail : mskang@gachon.ac.kr

물 진동 감쇠를 동시에 얻을 수 있도록 한다.

제안된 제어기 설계 방법의 타당성과 성능 검증을 위해 XY-테이블의 단축 구동에 대한 시뮬레이션을 수행하고, 그 결과를 제시한다.

## 2. 칩마운트 장치 동역학 모델

Fig. 1은 일반적인 XY-테이블 구동방식의 칩 마운트 장비를 보인다. 그림에서 칩을 집는 그립퍼(gripper)와 칩을 조립할 PCB는 모두 XY-테이블에 장치된다. 그립퍼는 y-축을 따라 이동하며, 그립퍼와 y-축은 x-축을 따라 이동한다. 두 축은 모두 구동력이 크고 정밀제어가 용이한 리니어모터에 의해 구동된다. 그립퍼는 일정 위치에서 칩을 집어 x-y 방향 일정 위치로 이동한 후 상하방향 구동장치에 의해 칩을 PCB의 일정 목표 위치에 놓게 된다. 이와 같은 그립퍼의 P-to-P(point-to-point) 운동은 장치의 생산성을 위해 XY-테이블의 구동장치가 허용하는 최대 가속도와 최대 속도로 이동할 필요가 있다. 하지만 Fig. 1과 같은 구동메커니즘에서는 구동기가 마운트에 장착되어 있으므로 작용과 반작용 법칙에 의해 그립퍼를 구동하는 힘과 크기가 동일하고 방향이 반대인 힘이 마운트에도 전달된다. 따라서 그립퍼의 가속도가 클수록 마운트에 전달되는 힘도 증가하게 된다.

일반적으로 마운트 구조물은 충분한 강성을 갖도록 설계하지만, 구동 속도가 커짐에 따라 구조물의 유한한 강성 때문에 발생하는 구조물 진동을 고려할 필요가 있다.

Fig. 2는 XY-테이블의 한 축을 등가적으로 나타낸 것으로,  $M$ 은 그립퍼를 포함한 이동하는 물체의 질량,  $F_c$ 는 이동질량에 가해지는 구동력,  $p$ 는 구조물의 변위,  $q$ 는 이동질량의 변위,  $z$ 는 테이블에서 본 이동질량의 상대변위를 나타낸다. 여기서 칩의 조립을 위한 P-to-P

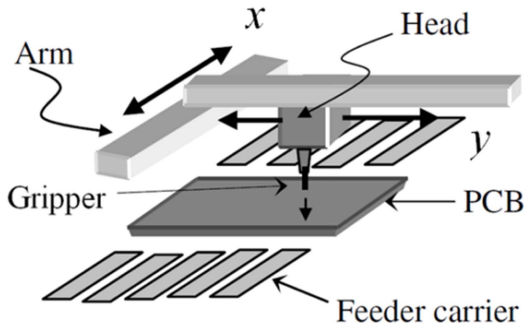


Fig. 1. Schematic of chip mount device.

운동은 테이블 기준 그립퍼의 상대변위인  $z$ 를 원하는 값을 갖도록 제어하는 것이다.

테이블 구조물은 이론적으로 무한대의 진동모드를 갖지만, 실제로 고차모드 진동은 그 크기가 매우 작으므로 이를 무시하고 첫 번째 진동모드만을 고려한다면, Fig. 2의 동역학 모델은 Fig. 3과 같이 나타낼 수 있다.

Fig. 3의 진동계의 운동방정식은 다음으로 나타낼 수 있다.

$$\begin{aligned} m\ddot{p} + kp &= -F_c + d \\ M\ddot{q} &= F_c + F_d \\ z &= q - p \end{aligned} \quad (1)$$

식 (1)에서  $d$ 는 테이블 축간의 연성이나 모델에 포함되지 않은 동역학 특성을 포함하며,  $F_d$ 는 구동계의 외란으로 마찰 등을 포함한다.

구동력과 그립퍼 상대변위 사이의 전달함수는 식 (1)로부터 식 (2)와 같이 쓸 수 있다.

$$Z(s) = \frac{(M+m)s^2 + k}{Ms^2(ms^2 + k)} F_c(s) + \frac{1}{Ms^2} F_d(s) - \frac{1}{(ms^2 + k)} D(s) \quad (2)$$

이 시스템의 반공진주파수  $\omega_z$ 와 고유진동수  $\omega_p$ 는 다음과 같다.

$$\omega_z = \sqrt{k/(M+m)}, \quad \omega_p = \sqrt{k/m} \quad (3)$$

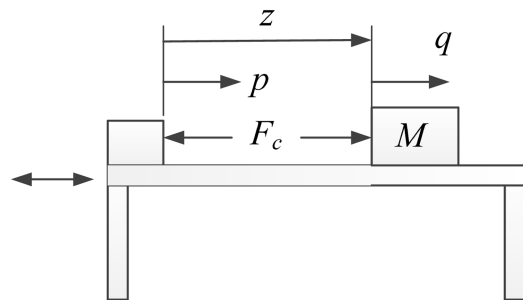


Fig. 2. Schematic of each axis of chip mount device.

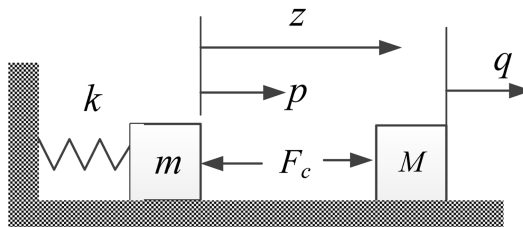


Fig. 3. Dynamic equivalent model of chip mount.

### 3. 제어기 설계

칩마운트의 P-to-P 제어 목적은 가장 빠른 시간에 칩을 목표 위치로 이동시키는 것이므로, 제어계의 위치기준입력은 Fig. 4와 같이 정지-최대가속도-정속도-최대감가속도-정지의 순서로 구성되며, 위치명령은 이 속도의 적분을 통해 결정된다. 칩마운트 P-to-P 제어에서는 이동중의 위치오차보다는 목표위치 도달시 오차가 중요하며, 따라서  $t = t_f$  부근에서의 안정된 응답을 얻어 정착시간을 최소화하는 것이 필요하다. 당연히  $t = t_f$  부근의 잔류진동은 정착시간 증가 요인이다.

식 (1)에서 만일 구조물의 강성이 충분히 높아서 구조물의 유연성을 무시하고 제어할 경우, 일반적으로 사용하는 다음의 PID-제어 + 앞먹임제어를 적용할 수 있다.

$$F_c = \{K_d \dot{e} + K_p e + K_i \int e dt\} + M \ddot{r} \quad (4)$$

여기서  $e$ 는 위치오차( $e = r - z$ )이며,  $r$ 은 기준위치명령이다.

제어기 (4)를 적용한 폐회로 동특성은 다음으로 표현된다.

$$Z(s) = R(s) + \frac{s}{Ms^3 + K_d s^2 + K_p s + K_i} F_d(s) \quad (5)$$

즉, 폐회로 응답의 추종오차는 외란  $F_d$ 만에 의해 발생

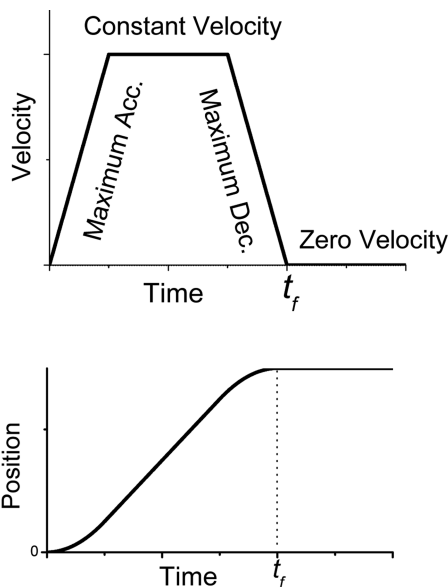


Fig. 4. Position command for p-to-p motion.

되며, 외란이 없을 경우 기준입력을 정확하게 추종한다.

하지만 구조물의 강성이 낮을 경우 (1)에서와 같이 제어입력  $F_c$ 가 구조물에도 작용하므로 구조물의 진동이 발생하게 되며, 따라서 정착시간이 증가하게 된다.

유연체의 잔류진동을 억제하는 방법으로 기준입력의 셰이핑 방법(command shaping) 또는 되먹임 제어기 설계 후 기준입력 셰이핑 방법이 많이 적용되고 있으나, 셰이핑 방법은 개회로 제어에 해당하므로 계의 모델 정확성에 민감하며, 고려하지 않은 고차의 진동모드에 의한 잔류진동이 발생하게 된다[2-6].

#### 3.1. 구조물 가속도 앞먹임 보상제어

만일 구조물의 가속도를 측정할 수 있을 경우 이를 앞먹임 보상하여 응답의 잔류진동을 억제할 수 있다.

(1)의 시스템에 Fig. 5와 같이 되먹임제어와 구조물 진동의 앞먹임 제어를 병합한 제어를 적용할 경우, Fig. 5의 블록선도에서

$$P = -G_p F_c + G_d D, \quad Q = \frac{1}{Ms^2} F_c \quad (6)$$

$$Z = Y - X = \frac{1 + Ms^2 G_p}{Ms^2} F_c - G_d D$$

여기서  $G_p = \frac{1}{ms^2 + k}$ ,  $G_d = \frac{1}{ms^2 + k}$  이다. 제어기는 식 (4)의 되먹임제어와 구조물 변위의 앞먹임 보상제어  $G_f$ 의 합이다. 즉,

$$F_c = G_1 R - G_2 Z + G_f P \quad (7)$$

식 (7)의 제어기를 적용한 폐회로 전달함수는 식 (8)과 같다.

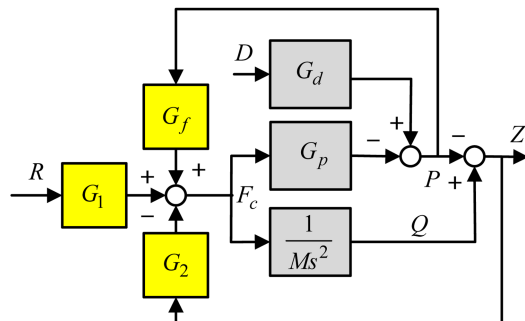


Fig. 5. Feedback control + mount acceleration feedforward compensation.

$$Z = \frac{1+Ms^2G_p}{Ms^2} \frac{G_1R-G_2Z+G_fG_dD}{1+G_pG_f} - G_dD \quad (8)$$

식 (8)에서  $G_f=Ms^2$ 로 정하면, 폐회로 전달함수는

$$Z = \frac{1}{Ms^2} \{G_1R-G_2Z\} \quad (9)$$

이 되므로, 마운트의 강성에 의한 진동을 고려하지 않고 제어가 가능하다. 즉, 마운트 가속도 앞먹임 보상제어는 이동질량이 마운트와 동일한 가속도로 운동하도록 힘을 가하는 제어에 해당하므로, 고정 마운트에서 위치제어를 하는 경우와 동일한 제어를 설계할 수 있다. 즉, 마운트 진동을 고려하지 않고 식 (4)의 제어를 적용할 수 있다.

식 (4)에서 식 (7)의 제어기 전달함수  $G_1$ 과  $G_2$ 는

$$\begin{aligned} G_1 &= Ms^3 + K_d s^2 + K_p s + K_i \\ G_2 &= K_d s^2 + K_p s + K_i \end{aligned} \quad (10)$$

이므로, 식 (10)을 식 (9)에 대입하면  $Z=R$ 이 되어 완벽한 추종제어가 가능하다. 하지만 이 때 마운트의 동역학은 식 (6), (7), (9)로부터 다음과 같으므로,

$$P = \frac{Ms^2}{(M+m)s^2+k} R + \frac{1}{(M+m)s^2+k} D \quad (11)$$

마운트는 식 (3)의 반공진주파수  $\omega_2$ 를 갖는 비감쇠 진동이 발생하게 된다.

### 3.2. 슬라이딩모드 제어

앞의 마운트 가속도 앞먹임 보상제어는 제어기 설계가 용이한 반면 마운트의 비감쇠 진동이 발생되므로, 실제 적용에는 한계가 있다. 따라서 이동질량의 P-to-P 제어 뿐 아니라 마운트 진동을 최소화하는 제어가 필요하다. 본 절에서는 이 목적에 적합한 슬라이딩모드 제어를 제안한다.

우선 식 (1)에서 제어입력을 식 (12)와 같이 앞의 마운트 가속도 앞먹임제어와 슬라이딩모드 제어입력  $F_s$ 의 합으로 정하면,

$$F_c = M\dot{p} + F_s \quad (12)$$

식 (12)를 식 (1)에 대입하여 정리하면

$$\begin{aligned} (M+m)\ddot{p} + kp &= -F_s + d \\ M\dot{z} &= F_s + F_d \end{aligned} \quad (13)$$

식 (13)에서 외란  $d$ 와  $F_d$ 는 매칭조건(matching condition)을 만족한다[9-12]. 식 (13)의 계에서 다음의 슬라이딩 평면을 정의한다[13,14].

$$\sigma = \{\dot{e} + K_d e + K_p \int e dt\} + \gamma \{\dot{p} + cp\} \quad (14)$$

여기서  $K_d, K_p, \gamma, c$ 는 결정해야 될 계수들이다.

식 (14)의 평면은 앞 괄호의 오차 동역학과 뒤 괄호의 마운트 동역학을 포함하며, 특히 마운트 동역학은 마운트의 진동 감쇠를 위해 포함되었다.

슬라이딩 모드 제어는 식 (14)의 슬라이딩 함수의 미분에서 정규선형시스템을 안정화하는 등가제어입력  $F_{eq}$ 와 계의 상태를 슬라이딩 평면에 도달시키는 비선형 제어입력  $F_n$ 의 합으로 구성된다. 식 (14)을 미분하고, 그 결과에 식 (13)를 대입하면,

$$\begin{aligned} \dot{\sigma} &= \ddot{r} + K_d \dot{e} + K_p e + \gamma c \dot{p} - \frac{\gamma k}{m+M} p \\ &\quad - \frac{m+M+\gamma M}{M(m+M)} F_s + \frac{\gamma}{m+M} d - \frac{F_d}{M} \end{aligned} \quad (15)$$

식 (15)에서 등가제어입력은 다음으로 결정되며,

$$F_{eq} = \frac{M(m+M)}{m+M+\gamma M} \left\{ \ddot{r} + K_d \dot{e} + K_p e + \gamma c \dot{p} - \frac{\gamma k p}{m+M} \right\} \quad (16)$$

식 (16)의 선형제어를 식 (15)에 대입한 결과는

$$\dot{\sigma} = \frac{\gamma}{m+M} d - \frac{F_d}{M} \quad (17)$$

이므로, 비선형제어를 식 (18)로 정하면

$$F_n = -\rho \operatorname{sgn}[\sigma], \rho > 0 \quad (18)$$

비선형 제어입력의 크기인  $\rho$ 를

$$\rho > \frac{\gamma}{m+M} |d| + \frac{1}{M} |F_d| \quad (19)$$

가 만족되도록 정하면  $\sigma \dot{\sigma} < 0$  이므로, 계의 상태는 슬라이딩 평면에 접근하여, 평면 내에 존재하게 된다. 식 (18)에서  $\operatorname{sgn}[\ ]$ 는 부호함수이다.

계의 상태가 슬라이딩 평면에 존재하는 경우, 식 (16)를 식 (13)에 대입하면 마운트 동역학과 이동질량 동역학의 관계를 구할 수 있다. 외란을 무시한 정규선형시스템응답을 정리하면 다음과 같다.

$$Z = \frac{B(s)}{A(s)} R, \quad P = -\frac{Ms^2 C(s)}{A(s)} R \quad (20)$$

여기서

$$\begin{aligned}
 A(s) &= as^4 + \{\gamma Mc + (m+M)K_d\}s^3 + \\
 &\quad \{k + (m+M)K_p\}s^2 + K_d k s + K_p k \\
 B(s) &= (s^2 + K_d s + K_p)\{(m+M)s^2 + k\} \\
 C(s) &= (s^2 + K_d s + K_p) \\
 a &= m + M + \gamma M
 \end{aligned}
 \tag{21}$$

식 (16)의 제어기 계수들은 폐회로 극점배치 방법에 따라 결정할 수 있다. 즉, 원하는 폐회로 특성다항식을 다음과 같이 정하면

$$P(s) = (s^2 + 2\zeta\omega_n s + \omega_n^2)^2 = s^4 + \alpha_1 s^3 + \alpha_2 s^2 + \alpha_3 s + \alpha_4
 \tag{24}$$

식 (21)의 다항식  $A(s)$ 와 식 (22)의  $P(s)$ 가 동일한 근을 갖도록 다음과 같이 결정할 수 있다.

$$\begin{aligned}
 \gamma &= \frac{k^2 + \alpha_4(m+M)^2 - \alpha_2(m+M)k}{M\{\alpha_2 k - \alpha_4(m+M)\}} \\
 K_p &= \alpha_4(m+M + \gamma M)/k \\
 K_d &= \alpha_3(m+M + \gamma M)/k \\
 c &= \{\alpha_1(m+M + \gamma M) - (m+M)K_d\}/\gamma M
 \end{aligned}
 \tag{23}$$

식 (18)의 비선형 제어는 제어입력이 무한 주파수로 스위칭하는 체터링(chattering) 문제가 내재되어 있다. 체터링은 액츄에이터에 무리를 가하거나, 구조진동을 야기하므로, 체터링의 제거 또는 완화 방법이 많이 제시되어 있다. 대표적인 예로는 부호함수를 다음의 포화함수로 근사화하는 의사슬라이딩모드제어(PSMC: pseudo-SMC)이다[9-11].

$$\rho \operatorname{sgn}[\sigma] \cong \begin{cases} \rho & \text{when } 1/h < \sigma \\ h\rho\sigma & \text{when } -1/h < \sigma < 1/h \\ -\rho & \text{when } \sigma < -1/h \end{cases}
 \tag{24}$$

이 근사함수를 적용할 경우 계의 상태는 슬라이딩 평면을 중심으로 일정 폭을 갖는 범위 내에 존재하게 된다.

#### 4. 시뮬레이션 결과

앞에서 제안한 제어 알고리즘의 적합성과 성능 검증을 위해 임의의 XY-테이블을 선정하여 시뮬레이션하였다. Fig. 3으로 표현된 XY-테이블의 시스템 파라미터는 Table 1과 같다.

Table 1. System parameters

Variable	Symbol	Value
Equivalent mass of structure	m	500 Kg
Moving mass	M	20 Kg
Equivalent Stiffness	k	$1.97 \times 10^6$ N/m

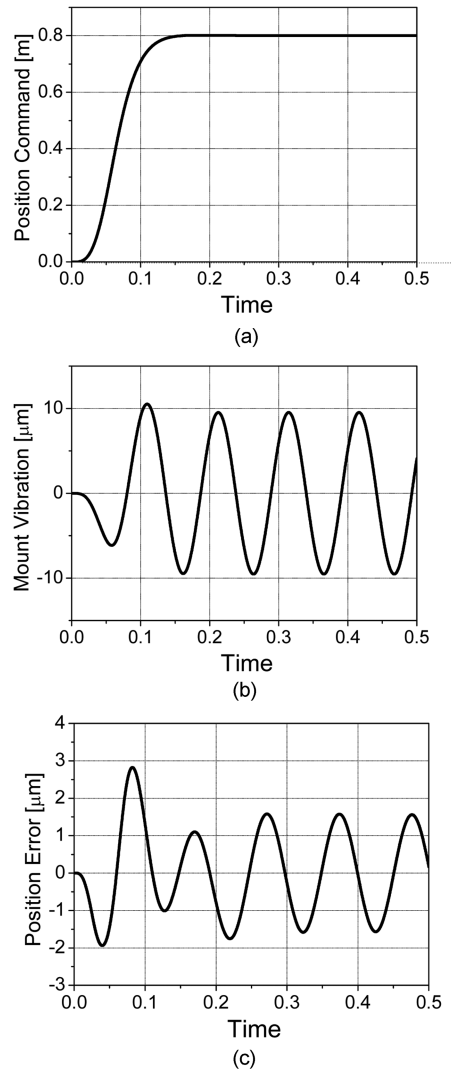


Fig. 6. Control w/o concerning mount flexibility (a) Position command, (b) Mount vibration, (c) Position error.

우선 마운터의 유연성을 무시하고 이동질량  $M$ 의 위치제어를 설계하였다. 제어기는 식 (4)의 형태이며, 이득은 폐회로의 지배적인 극점이 감쇠비 0.9, 고유진동수  $50$  [rad/s]이 되도록 정하였다. 이 때 결정된 제어기

이득은  $K_d=6,300$ ,  $K_p=45,500$ ,  $K_i=1.125 \times 10^7$ 이다.

이 제어를 Table 1의 재원을 갖는 Fig. 3의 XY-테이블에 적용하였다. Fig. 6(a)는 0.15초에 최종위치 800[mm]에 도달되는 기준위치입력이다. 이 기준입력은 Fig. 4의 가감속 프로파일을 적분하여 얻은 위치명령에 잔류진동 억제에 의해 반공진주파수의 70%에 해당하는 대역폭을 갖는 저역통과필터를 통과시켜 결정하였다. Fig. 6(b)는 제어 적용시 마운트의 진동, Fig. 6(c)는 이때의 위치오차이다. 앞의 분석에서와 같이 마운트 구조물은 반공진 주파수로 비감쇠 진동을 하며, 이로 인한 위치오차가 발생됨을 확인할 수 있다.

Fig. 7은 Fig. 6의 되먹임 제어에 Fig. 5의 마운트 가속도 앞먹임 보상제어를 추가한 경우 마운트 진동을 보인다. Fig. 6에 비해 마운트 진동의 차이는 크지 않으며, 반면에 위치추종오차는 없다. 이로써 마운트 가속도 앞먹임 보상제어는 이동질량의 운동을 마운트 진동에서 분리하여 제어하므로 위치제어성능은 뛰어나지만, 반면에 마운트 진동은 지속됨을 확인할 수 있다.

다음으로 본 연구에서 제안한 가속도 앞먹임 보상제어와 슬라이딩모드 제어를 이용한 위치추종과 구조물 진동의 동시제어를 적용하였다. Fig. 8(a)는 기준위치명령과 이동질량의 응답을 보인다. 응답은 기준입력에 비해 초반부는 선행되고, 중반

이후에는 지연을 보인다. 이 때의 위치오차는 Fig. 8(b)와 같이 응답초기에 큰 오차를 보이며, 오차를 확대한 Fig. 8(c)에서와 같이 0.15초 이후에는  $6 \mu\text{m}$  이내에 존재한다. 특히 Fig. 8(d)와 같이 마운트 구조물은 초기 진동 후 약 0.15초에 거의 감쇠가 이루어짐을 확인할 수 있다.

다음으로 본 연구에서 제안한 가속도 앞먹임 보상제어와 슬라이딩모드 제어를 이용한 위치추종과 구조물

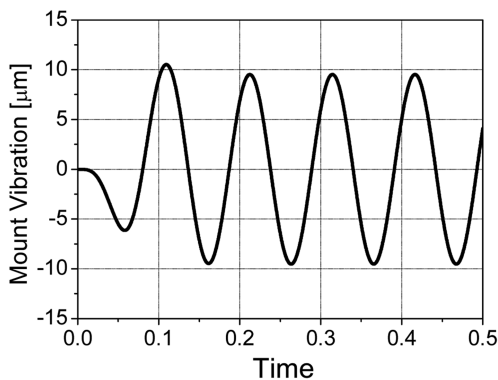


Fig. 7. Mount vibration when including acceleration feed-forward compensation.

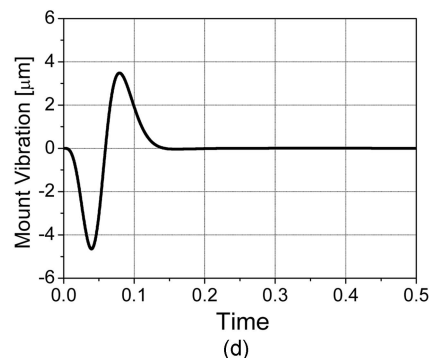
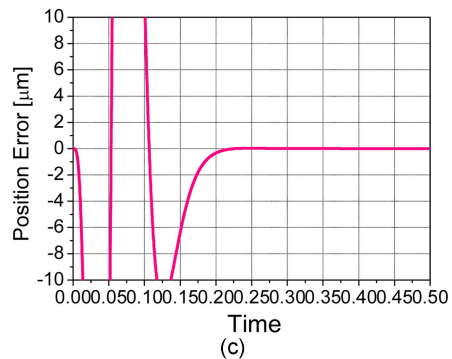
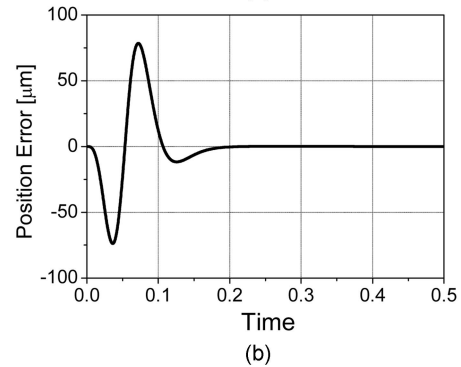
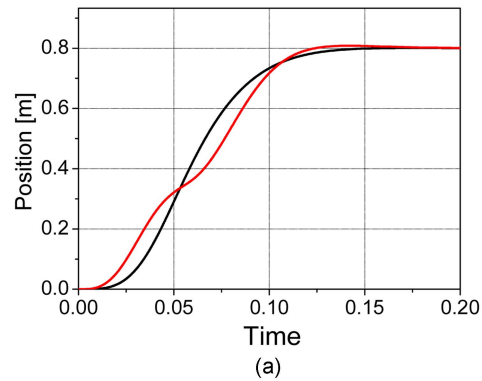


Fig. 8. Response of sliding mode control (a) Position command and response, (b) Position error, (c) Zoomed position error, (d) Mount vibration.

진동의 동시제어를 적용하였다. Fig. 8(a)는 기준위치 명령과 이동질량의 응답을 보인다. 응답은 기준입력에 비해 초반부는 선행되고, 중반 이상의 시뮬레이션을 통해 본 연구에서 제안한 위치추종과 구조물 진동의 동시제어가 가능함을 확인하였다.

## 4. 결 론

XY-테이블 구조의 칩마운터에서 이동질량의 위치결정을 위해 불가피한 가속 및 감속운동에서 발생하는 반작용력은 마운터 구조물의 비감쇠 진동을 야기하며, 이 잔류진동은 위치정밀도를 저하시키고, 정착시간을 증가시키는 요인이 된다. 본 연구에서는 이동질량의 위치결정 성능을 유지하며 마운트의 잔류진동을 동시에 감쇠시킬 수 있는 마운트 가속도 앞먹임제어와 확장된 슬라이딩모드 제어를 이용한 새로운 제어기 설계 방법을 제안하였다. 제안된 제어기 설계 알고리즘은 시뮬레이션을 통해 그 적용성과 성능을 확인하였다. 이 제어 알고리즘은 칩마운터 이동질량의 큰 가속과 감속에 의한 구조물 진동 문제를 완화시킬 수 있을 것이므로, 칩마운터의 생산성 향상에 도움이 될 것으로 기대한다.

## 감사의 글

이 논문은 2010년도 정부(교육과학기술부)의 재원으로 한국연구재단의 기초연구사업 자원을 받아 수행된 것임(No. 2010-0008252).

## 참고문헌

1. Ayob M. and Kendall, G., "A Survey of Surface Mount Device Placement Machine Optimization: Machine Classification", *European Journal of Operational Research*, Vol. 186, pp. 893-914, 2008.
2. Park, S. W., Hong, S. W., Choi, H. S. and Singhose, W. E., "A Study on Dynamic Performance of of Precise XY Stage Using Real-time Input Shaping", *Proc. of the ISMTII 2007*, Sendai, Japan, 2007.
3. Huey, J. R. and Singhose, W., "Design of Proportional-Derivative Feedback and Input Shaping for Control of Inertia Plants", *IET Control Theory Application*, Vol. 6, No. 3, pp. 357-364, 2010.
4. Liu, K. P. and Li, Y. C., "Vibration Suppression for a Class of Flexible Manipulator Control with Input Shaping Technique", *Proc. of the 5-th International Conference on Machine Learning and Cybernetics, Dalian*, pp.835-839, 2006.
5. Cole, M. O. T., "A Class of Low-pass FIR Input Shaping Filters Achieving Exact Residual Vibration Cancelation", *Automatica*, Vol. 48, pp.2377-2380, 2012.
6. Cole, M. O. T. and Wongratanaphisan, T., "Optimal FIR Input Shaper Designs for Motion Control with Zero Residual Vibration", *Transactions of the ASME, Journal of Dynamic Systems, Measurement, and Control*, Vol. 133, No. 2, 2011.
7. Bae, G. H., Park, A. Y. and Hong, S. W., "Vibration Reduction for Positioning-System Base Subjected to Moving Stage Using Command Shaping", *12-th International Conference on Control, Automation and Systems*, pp. 656-660, 2012.
8. Kim, J. J., Choi, Y. M. and Kim K. H., "A New Mode Switching Control for Fast Settling and High Precision Positioning," *J. of the Semiconductor & Display Equipment Technology*, Vol. 5, No. 4, pp.1-4, 2006.
9. Edward, C. and Spurgeon, S. K., *Sliding Mode Control Theory and Application*. Taylor & Francis Ltd. 1998.
10. Utkin, V. I., Guldner, J. and Shi, J., *Sliding Mode Control in Electromechanical Systems*. New-York: Taylor & Francis. 1999.
11. Young, D. K., Utkin, V. I., and Ozguner, A., "Control Engineer's Guide to Sliding Mode Control", *IEEE Trans. on Control Systems Technology*, Vol. 7, No. 3, pp. 328-342, 1999.
12. Kawamura, A., Itoh, H., and Sakamoto, K., "Chattering Reduction of Disturbance Observer Based Sliding Mode Control", *IEEE Trans. Ind. Application*, Vol. 41, No. pp. 456-461, 1994.
13. Lee, J. K., Park, B. S., Kim, K. H. and Kang, M. S., "Chatter-free Sliding Mode Control for Inertial Stabilization of OTM (On-the-move) Antenna Driven by Gear and Flexible Shaft", *International Journal of Precision Engineering and manufacturing*, Vol.13, No.8, pp.1317-1325, 2012.
14. Kang, M. S., Yoon, W. H. and Lee, J. B., "LOS Stabilization Control of OTM Antenna Driven by Geared Flexible Transmission", *KSNVE*, Vol. 21, No. 10, pp. 951-959. 2011.

접수일: 2013년 3월 4일, 심사일: 2013년 3월 14일,  
게재확정일: 2013년 3월 18일