

## 단거리 이동을 반복하는 위치결정장치를 위한 효율적인 진동저감 방법

홍성욱<sup>a\*</sup>, 배규현<sup>a</sup>

## A Method of Effective Vibration Reduction for Positioning Systems Undergoing Frequent Short-distance Movement

Seong-Wook Hong<sup>a\*</sup>, Gyu-Hyun Bae<sup>a</sup><sup>a</sup> Department of Mechatronics, Kumoh National Institute of Technology Daehak-ro 61, Gumi, Gyeongbuk, 730-701, Republic of Korea

## ARTICLE INFO

## Article history:

Received	7	January	2013
Revised	7	February	2013
Accepted	19	February	2013

## Keywords:

Positioning system  
Velocity profile  
Short-distance movement  
Input shaping

## ABSTRACT

The current vibration reduction methods for positioning systems lead to either complicated motion or the need for additional hardware when the positioning systems carry out frequent short-distance movements. This paper proposes a simple yet efficient vibration reduction method for positioning systems subjected to frequent short-distance movements. The essence of the proposed method is the trapezoidal or triangular velocity profiles, whose acceleration/deceleration rates are designed to be related to the natural frequency of concern. The combined use of the proposed method and the input shaping method is also proposed for the possible application to multi-mode systems. Experiments are performed to validate the proposed method. The simulation and experiments prove that the proposed method is of great use for residual vibration reduction in positioning systems subjected to frequent short-distance movement.

## 1. 서론

공작기계를 비롯하여 반도체나 LCD 생산장비 등 대부분의 산업 설비들이 생산성 향상을 위해 고속, 경량화 추세에 있다. 이를 위해 위치결정장치의 고속화가 필수적이지만 급격한 속도변화가 수반되면 장비 전체에 진동을 발생시키는 문제가 있다<sup>[1-3]</sup>. 특히 IT 관련 생산장비의 경우 단거리를 빠르게 반복적으로 움직이는 경우<sup>[4,5]</sup>가 많은데 이와 같은 운동으로 인해 발생하는 진동은 회피하기 쉽지 않아 구조물을 경량화 하는데 한계를 보이게 된다.

위치결정장치의 진동을 줄이기 위해 입력성형(Input shaping) 기법<sup>[6-13]</sup>이 널리 채용되고 있다. 입력성형기법은 입력성형기(Input

shaper)를 이용하여 자체적으로 발생시키는 진동을 상쇄하여 잔류 진동을 억제하는 기법으로서 위치결정장치 잔류진동 저감에 대한 탁월한 성능이 입증된 바 있다<sup>[10-13]</sup>. 그러나 입력성형기법은 본 연구에서 고려하고 있는 경우와 같이 간헐운동이 반복되는 경우, 잔류진동을 억제하기 위해 한 번의 단거리 이동에 출발정지를 2번 반복하는 등, 간헐운동이 2배가 됨으로서 시스템에 바람직하지 않은 비선형적 특성이나 마모를 가속화하는 등의 실용적인 차원의 문제를 유발시킬 가능성이 있다. 본 연구에서는 단거리를 반복적으로 이동할 때 진동을 최소화할 수 있는 편리한 속도프로파일을 제안하였다.

본 연구에서는 가장 일반적으로 채택되고 있는 사다리꼴형태 또

\* Corresponding author. Tel.: +82-54-478-7344

Fax: +82-54-478-7319

E-mail address: swhong@kumoh.ac.kr (Seong-Wook Hong).

는 삼각형태의 속도프로파일을 이용하면서도 잔류진동을 억제할 수 있도록 하는 방법을 제안하였다. 즉, 속도프로파일을 형성함에 있어, 가감속시간을 진동이 유발되는 주요 고유진동 주기 또는 그 배수로 일치시키는 방법을 제안하였다. 이 방법은 잔류진동을 회피하기 위해 초기 속도프로파일을 직접 설정한다는 측면에서 기존의 입력성형기법과 차별화된다. 특히, 입력성형기법을 적용할 때와는 달리 기준입력명령 자체를 진동이 최소화되도록 인가하는 방식으로서 시스템에 추가적인 조치없이 입력 자체를 변화시키는 방식이므로 적용이 매우 편리하다. 진동을 억제하고자 하는 특정모드에 맞춰 제안된 방법을 적용하게 된다면 별도의 조작없이 입력을 사다리꼴이나 삼각형태로 설계하여 해당모드 진동을 제거할 수 있게 된다. 제안된 방법은 1개의 모드에 대해서 진동을 억제할 수 있으나 다모드계에 대한 진동억제를 위해 입력성형기법과 결합하는 방식을 제안하였다. 제안된 방법을 검증하기 위해 시뮬레이션과 실험을 수행하였으며 그 우수성을 확인하였다.

## 2. 이동명령에 의한 진동계의 운동

위치결정장치에 탑재된 임의의 1자유도 진동계에서 위치결정장치의 운동에 의한 운동 특성을 검토하기 위해 Fig. 1과 같은 진동계를 고려한다.

Fig. 1에서  $x$ 는 위치결정장치로부터 진동계에 전달되는 운동입력이며,  $y$ 는 그에 대한 진동계의 응답을 의미한다. Fig. 1의 진동계에 대한 운동방정식은 다음과 같이 표현된다.

$$m\ddot{y} + k(y - x) = 0 \quad (1)$$

또는

$$\ddot{y} + \omega_n^2 y = \omega_n^2 x \quad (2)$$

여기서,  $\omega_n = \sqrt{k/m}$ 이며 탑재된 이동체의 고유진동수를 의미한다. 이 시스템에 입력  $x$ 를 단위계단으로 인가하면 계단형의 즉각적인 응답이 아니라 Fig. 2와 같이 목표이동위치를 기준으로 고유진동수로 진동하는 응답특성을 보이게 된다.

이러한 잔류 진동을 억제하기 위해 입력성형기법<sup>[11]</sup>이 매우 유용하다. 실용적으로 사용되는 속도입력프로파일에 Fig. 3과 같은 입력성형을 시행하게 되면 효과적으로 잔류진동을 억제할 수 있다. 그러나 단거리를 이동하는 경우 입력이 지속되는 시간이 시스템의 고유주기의 1/2보다 작아지는 경우 입력을 두 번에 나누어서 가해주는 양상이 되어 실용 상 문제가 있으며, 특히 운동과 정지를 반복

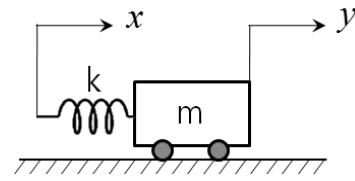


Fig. 1 Conceptual 1-DOF dynamic model of flexible positioning system

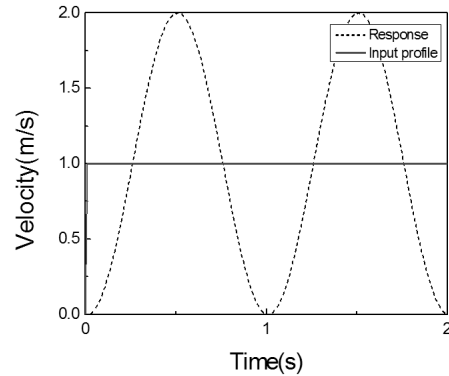


Fig. 2 Unit-step response

하는 과정에서 마찰의 영향 등에 의해 시스템 특성에 좋지 않은 영향을 줄 수 있다. 또한 진동모드수가 많아지면 이를 대응하기 위한 속도프로파일이 매우 복잡양상을 보이게 된다. 본 연구에서는 기존의 입력성형기법이 갖는 이와 같은 문제점을 개선할 수 있는 속도 프로파일을 제안하고자 한다.

## 3. 가감속 설정에 의한 잔류진동 억제

### 3.1 사다리꼴 속도프로파일

실용적인 속도프로파일은 목표로 하는 속도명령에 도달하는 과정과 정지하는 과정에 적절한 가속 또는 감속구간을 둬서 안정적으로 목표속도에 도달하게 한다. 따라서 사다리꼴 형태의 속도프로파일이 가장 손쉽고 널리 사용되고 있다. 이 때 가감속 시간을 억제하고자 하는 고유진동 주기의 배수로 설정하여 다음과 같다고 가정한다.

$$v_x(t) = \dot{x} = \frac{V}{T_N} \{r(t) - r(t - T_N)\} - \frac{V}{T_N} \{r(t - T_N - T_s) - r(t - 2T_N - T_s)\} \quad (3)$$

여기서,  $T_N = NT$ ,  $N=1,2,\dots$ ,  $T = \frac{2\pi}{\omega_n}$ 이며  $T_s$ 는 등속이 지속되는 시간을 의미한다. 또  $r(t)$ 는 단위래프함수를,  $r(t-a)$ 는  $a$ 만

크 지연된 단위래프함수이다. 이에 대한 시스템의 속도응답은 다음과 같이 나타난다.

$$v_y(t) = v_x(t) - \frac{V}{\omega_n T_N} [\sin\omega_n t - \sin\omega_n(t - T_N)u(t - T_N)] \quad (4)$$

$$+ \frac{V}{\omega_n T_N} \left[ \begin{array}{l} \sin\omega_n(t - T_N - T_s)u(t - T_N - T_s) \\ -\sin\omega_n(t - 2T_N - T_s)u(t - 2T_N - T_s) \end{array} \right]$$

여기서  $u(t)$ 는 단위계단함수를,  $u(t-a)$ 는  $a$ 만큼 지연된 단위계단함수를 의미한다. 식 (4)의 우변 둘째 항의 괄호에 포함된 항들은 출발구간에서의 응답이고, 셋째 항의 괄호에 포함된 항들은 정지구간에서의 응답이 된다. Fig. 3은  $T_N$ 을 증가시키면서 구한 출발구간에서의 속도응답을 보여주고 있다. 그림에서 볼 수 있는 바와 같이 감쇠가 없는 시스템에서는 잔류진동을 완전히 억제할 수 있다. 정지구간에서도 동일한 양상의 응답을 볼 수 있다.

한편 시스템에 감쇠가 포함된 경우,  $T_1$ 을 적용한 프로파일에 대해 같은 방법을 적용한 결과를 Fig. 4에 보여주고 있다. 그림에서 볼 수 있는 바와 같이 감쇠가 있게 되면 잔류진동이 남게 된다.  $T_1$ 을 적용했을 때, 감쇠에 따른 잔류진동 발생 크기를 Fig. 5에서 보

여주고 있다. 여기서 Percent vibration은 계단형으로 입력을 주었을 때의 잔류진동응답을 기준으로, 제안된 방법에 의한 입력이 발생시키는 잔류진동크기의 비를 %로 나타낸 것이다. 그림에서 볼 수 있는 바와 같이 감쇠에 의한 잔류진동 발생은 감쇠비가 0.2를 전후할 때 최대가 되며 8%에 못 미치는 크기를 보이고 있어 많은 실용적인 시스템에서는 큰 문제를 발생시키지 않을 것으로 예상된다. 가속시간을  $T_1$ 보다 크게 설정하게 되면 잔류진동은 더욱 줄어들게 된다.

한편, Fig. 6은 설정된 주파수에 오차가 있을 경우에 대한 민감도를 나타내고 있다. 설정된 주파수( $\omega_m = \frac{2\pi}{T_1}$ )에 대해 실제 주파수( $\omega_n$ )가 배수가 되는 경우 잔류진동이 나타나지 않는다. 주파수가 배수가 되지 않으면 오차에 의해 V자형으로 급격하게 잔류진동이 늘어남을 예측할 수 있다.

그러나 주파수비가 커질수록 잔류진동의 크기는 추세적으로 작아지는 양상을 보이게 되는데 이는 입력가속도가 작아짐에 따른 추세적 변화로 파악된다.

한편 Fig. 7는 감쇠비와 주파수비를 동시에 변화시킨 경우의 잔류진동에 대한 3차원 그림을 보여주고 있다.

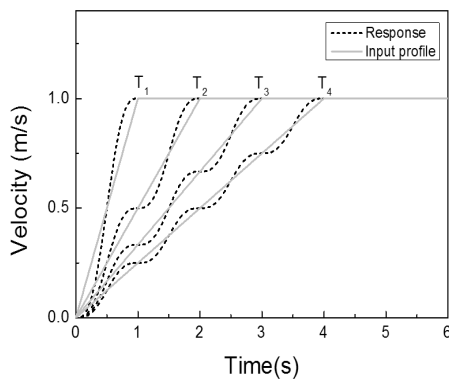


Fig. 3 Responses with acceleration time rate varied

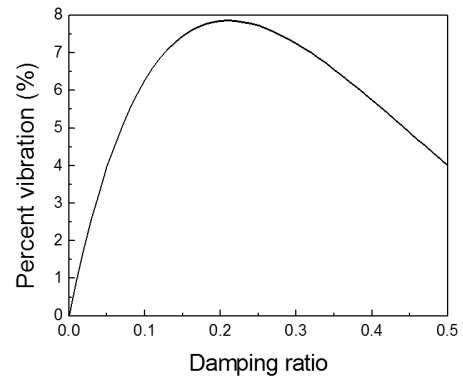


Fig. 5 Residual vibration ratio by damping ratio

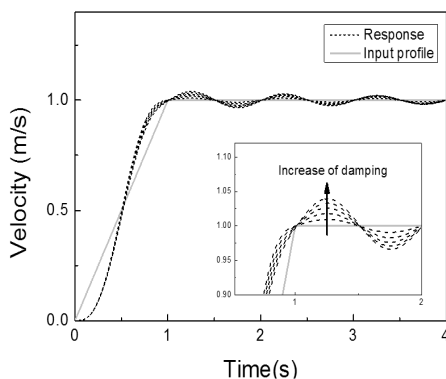


Fig. 4 Responses with damping ratio changes: damping ratio of 0.01~0.05

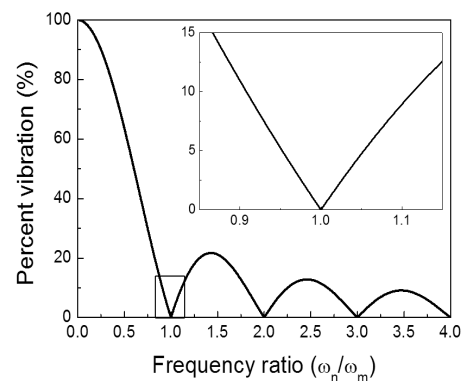


Fig. 6 Sensitivity plot for the ratio between natural frequency and design frequency

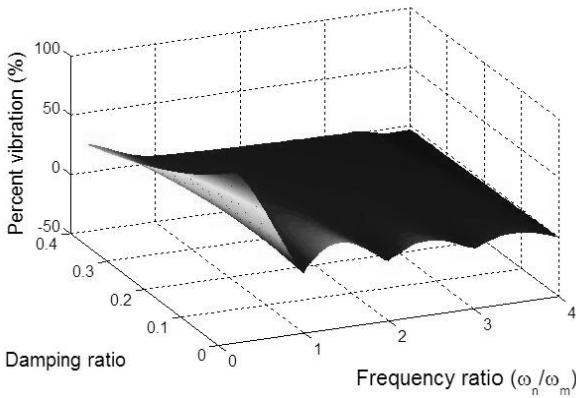


Fig. 7 3D-sensitivity plot with frequency error and damping ratio

### 3.2 삼각형 속도프로파일

단거리 이동 시에는 사다리꼴 프로파일의 경우처럼 등속구간에 도달하지 못하고 가속과 감속을 반복하는 형태의 삼각형 속도프로파일을 구성해야 할 경우가 빈번하다. 이 때 잔류진동을 없앨 수 있는 방법으로 다음과 같은 삼각형 속도프로파일을 고려하도록 한다. Fig. 8에 표현된 입력을 시간함수로 표현하면 다음과 같다.

$$v_x(t) = \frac{V}{T_N}(r(t) - 2r(t - T_N) + r(t - 2T_N)) \quad (5)$$

운동방정식에 대입하여 이에 대한 시간응답을 얻으면 다음과 같다.

$$v_y(t) = \frac{V}{T_N} [r(t) - 2r(t - T_N) + r(t - 2T_N)] - \frac{V}{\omega_n T_N} \left[ \frac{\sin \omega_n t - 2\sin \omega_n (t - T_N)u(t - T_N)}{\omega_n T_N} + \frac{\sin \omega_n (t - 2T_N)u(t - 2T_N)}{\omega_n T_N} \right] \quad (6)$$

Fig. 9에는 고유진동수가 1 Hz일 때, 속도의 최대값을 1로 두고  $T_N$ 을 증가시키면서 구한 응답을 보여주고 있다. 응답에 오실레이션이 나타나지 않게 됨을 알 수 있다. 결국 가속 또는 감속시간이 고유주기의 배수가 되면 진동이 발생하지 않음을 알 수 있다.

시스템에 감쇠가 포함된 경우 삼각형 속도프로파일을 적용한 결과를 Fig. 10에 보여주고 있다. 결과에서 볼 수 있는 바와 같이 제안된 방법을 감쇠가 있는 시스템에 적용하게 되면 약간의 잔류진동을 남기게 된다.

Fig. 11에서 볼 수 있는 바와 같이 감쇠가 커짐에 따라 조금씩 잔류진동의 양이 증가하게 되나 감쇠비가 0.28정도에서 최대오차를 보이고 그 이상이 되면 다시 잔류진동의 크기가 줄어들게 된다.

전체적으로 7% 이하 범위의 잔류진동을 하게 되므로 실용적인 관점에서의 문제는 크다고 볼 수 없다. 앞 선 사다리꼴 보다 잔류진동이 다소 감소하고 최대값을 갖게 되는 감쇠비도 높아진 것을 알 수 있다. 사다리꼴에서의 마찬가지로 잔류진동이 크고 오랫동안 지속되는 저감쇠 조건에서 제안된 방법은 탁월한 성능을 나타내게 된다.

고유진동수 정보에 오차가 있게 되면 잔류진동이 발생하게 된다. 실제 고유진동수( $\omega_n$ )와 설정주파수( $\omega_m$ )의 비에 따른 잔류진동의 크기는 식 (6)으로부터 다음과 같이 유도된다.

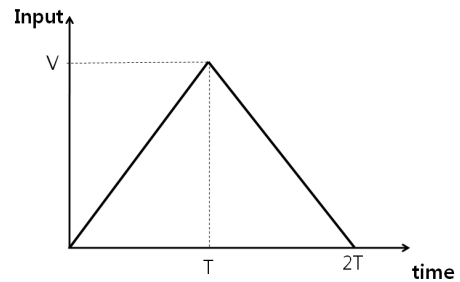


Fig. 8 triangular velocity profiles for short motions

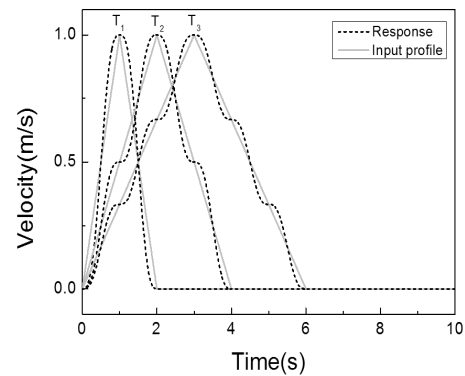


Fig. 9 Response of triangular velocity profiles

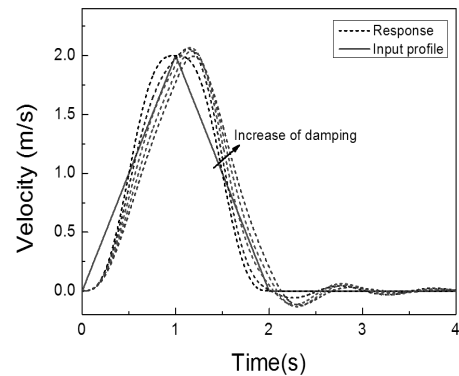


Fig. 10 Responses of triangular velocity profile with damping ratio changes

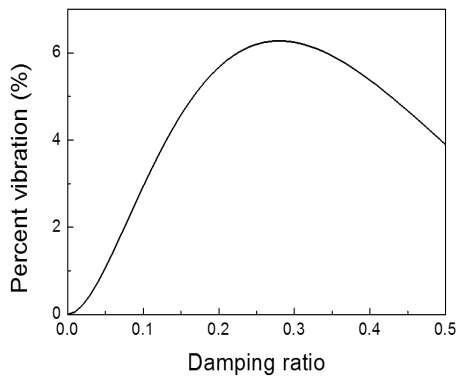


Fig. 11 Residual vibration ratio by damping ratio: triangular velocity profile applied

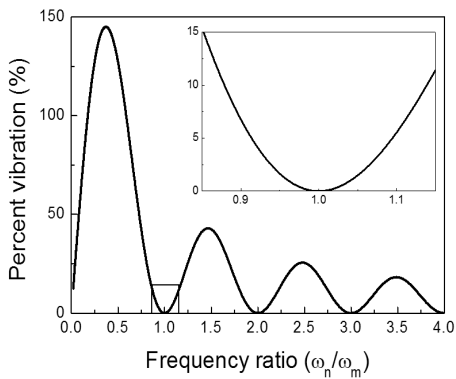


Fig. 12 Sensitivity plot for the frequency ratio : triangular velocity profile applied

$$\varepsilon\left(\frac{\omega_n}{\omega_m}\right) = abs\left\{\frac{2\pi\omega_m V}{\omega_n}\left[1 - 2e^{-j2\pi\frac{\omega_n}{\omega_m}} + e^{-j4\pi\frac{\omega_n}{\omega_m}}\right]\right\} \quad (7)$$

Fig. 12에서 볼 수 있는 바와 같이 주파수비가 배수가 되는 조건에서 모두 잔류진동이 나타나지 않게 됨을 알 수 있다. 특히 해당 영역에서 사다리꼴과는 달리 U자형의 변화가 발생하므로 약간의 주파수비 변화에 둔감한 특성을 보이고 있어 실용적으로 고유진동수 정보가 다소 부정확한 경우에도 활용이 가능할 것으로 예상된다. 가감속시간의 역수인  $\omega_m$ 이 감소하면 주파수비가 커지고 이에 따라 추세적으로 잔류진동이 감소하게 되므로 잔류진동을 줄이기 위해 가능하면 가감속 시간을 증가시키는 것이 바람직함을 알 수 있다.

#### 4. 다모드 시스템 진동저감에의 적용

##### 4.1 입력성형과의 결합

제안된 방법은 진동저감이 필요한 특정모드에 대한 저감법으로

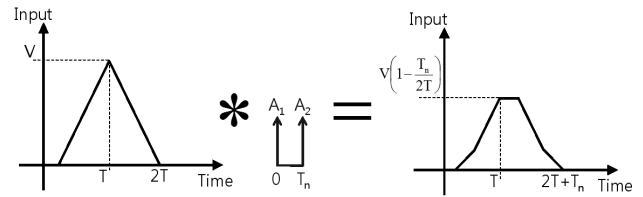


Fig. 13 Illustration of 2-mode velocity profile with the ZV input shaper and triangular velocity profile

서 1개의 모드만을 고려할 수 있다. 따라서 다수의 모드에 대한 잔류진동을 저감하는 것은 독립적으로 시행할 수 없다. 이 때는 입력성형기<sup>[11]</sup>와 같이 적용하는 것이 실용적으로 크게 도움이 될 수 있다. 예컨대 2개의 모드에 대한 잔류진동을 저감하는 경우 그 중 1개 모드는 제안된 방법으로, 나머지 1개 모드는 입력성형을 이용한 저감방법을 고려한 후 적용하게 되면 입력성형에서 2개 모드를 고려한 경우에 비해 간단하게 입력성형을 할 수 있게 된다. Fig. 13는 2모드 시스템에서 이와 같이 제안된 삼각형 프로파일과 가장 기본적인 입력성형방법인 ZV (Zero Vibration) 입력성형기<sup>[11]</sup>를 결합해서 사용하는 것을 예시하고 있다. ZV 성형기는 입력을 2단계로 나누어 줌으로서 앞단계에서 가해진 입력에 의한 진동을 다음 단계에서 가해진 입력에 의해 상쇄시키는 개념의 입력전처리기로 위치결정장치에 매우 유용하다. 3개모드 이상을 고려해야 할 경우에도 개별모드에 대한 입력성형기를 합성한 입력성형기<sup>[11]</sup>나 다모드 입력성형기<sup>[12]</sup>를 제안된 프로파일과 합성하는 방식으로 2모드 시스템과 마찬가지로 요령으로 적용할 수 있다.

##### 4.2 시뮬레이션

2자유도 위치결정장치의 운동에 의한 진동을 시뮬레이션하기 위하여 Fig. 14과 같은 진동계를 고려하였다. Fig. 14에서  $y_1, y_2$ 는 진동계 응답을 나타내며,  $x$ 는 위치결정장치에 전달되는 운동입력이다. Fig. 14의 진동계에 대한 운동방정식은 다음과 같이 표현된다.

$$\begin{bmatrix} m_1 & 0 \\ 0 & m_2 \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \ddot{y}_1 \\ \ddot{y}_2 \end{Bmatrix} + \begin{bmatrix} k_1 + k_2 & -k_2 \\ -k_2 & k_2 \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} y_1 \\ y_2 \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} k_1 x \\ 0 \end{bmatrix} \quad (8)$$

운동방정식에서 강성은 각각  $k_1 = 30\pi, k_2 = 70\pi N/m$ 로 두었고, 질량은  $m_1 = m_2 = 1kg$ 을 적용하여 시뮬레이션을 수행하였다. 이 때 고유진동수 2개는 각각 1.03, 3.53 Hz가 되며 2차모드가 1차모드의 정배수가 되지 않도록 설정하였다. Fig. 15는 제안한 방법을 적용한 경우와 제안 방법과 2차모드에 대한 입력성형기법을 함께 적용한 결과를 비교한 그림이다. 2개 이상의 모드를 가진 경

우 제안한 방법만을 적용하면 동작이 완료된 후 두 번째 모드에 의한 잔류진동이 남아 있는 것을 확인할 수 있다. 그러나 제안된 삼각형프로파일과 2차모드에 대한 입력성형을 함께 적용한 경우 잔류진동이 효과적으로 억제된 것을 볼 수 있다.

Fig. 16은 고유진동수의 오차에 따른 잔류진동의 크기를 삼각형 프로파일만 적용한 경우와 2차모드에 대한 입력성형을 결합한 경우를 비교해서 보여주고 있다. 2차모드에 대한 입력성형을 적용한 경우는 2차모드에 의한 효과가 없어 Fig. 12에서 보여준 단일 모드에 대한 민감도 선도가 얻어지는 반면, 삼각프로파일만을 적용한

경우에는 제거하지 않은 2 차모드의 영향으로 인해 오차에 의한 감도가 약간씩 상승하는 것을 볼 수 있다. 그러나 전체적으로는 유사한 성능을 보이고 있음을 알 수 있다. 특히 기준 주기의 배수에서 1차모드에 의한 진동이 소멸하여 2차모드에 의한 매우 작은 진동이 남게 되며, 삼각형 프로파일과 입력성형을 함께 적용한다면 잔류진동 전체를 효과적으로 제거하는 것이 가능함을 알 수 있다. 전체적으로, 고유진동수 오차에 대한 잔류진동발생이 완만한 변화를 보이고 있어 고유진동수 오차가 예상되는 실제 조건에서 강건성을 보일 수 있을 것으로 기대된다.

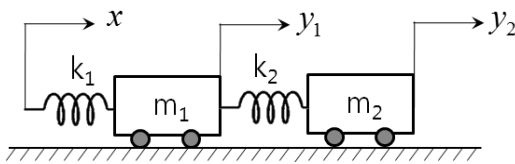


Fig. 14 Conceptual 2-DOF dynamic model

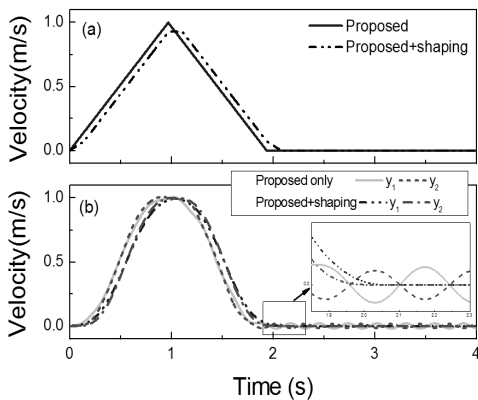


Fig. 15 Simulation responses of 2-mode system with the ZV input shaper and triangular velocity profile: (a) input profiles, (b) output velocities

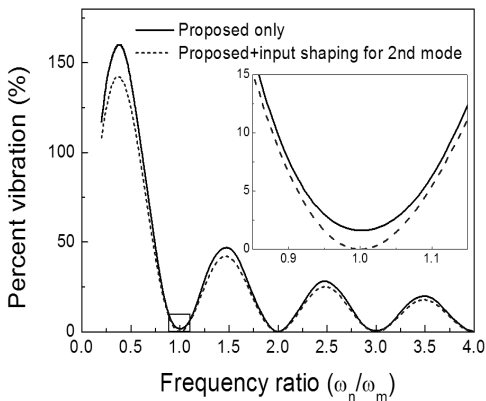
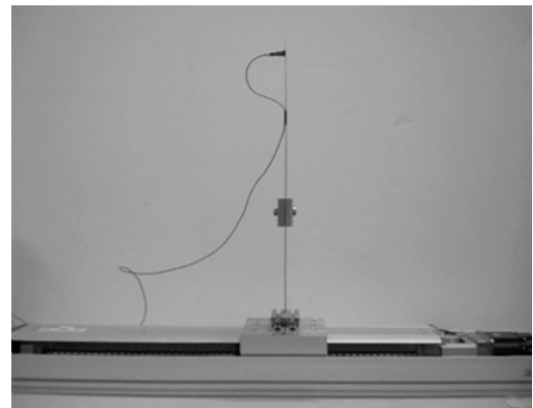


Fig. 16 Comparison of sensitivities for the frequency ratio : the proposed method only and the proposed method with input shaping for the 2nd mode

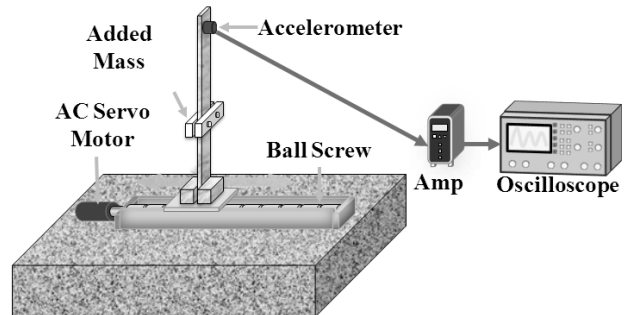
## 5. 실험 및 토의

### 5.1 실험 장치

실험장치는 외팔보와 질량으로 구성된 진동계와 진동계를 이동하기 위한 위치결정장치로 구성된다. Fig. 17은 실제 실험장치와 그 개념도를 보여주고 있다. 위치결정장치는 서보모터와 볼스크류를 이용하여 구동이 되며 서보모터의 제어를 위해 Umac제어기를 사용하였다. 진동을 관측하기 위해 보의 끝단에 가속도 센서를 설치하였다.



(a) Photo



(b) Schematic diagram

Fig. 17 Experimental system

### 5.2 단거리 이동 실험

제안된 삼각형 속도프로파일의 적용을 위해 먼저 진동계의 고유진동수를 확인하여야 한다. 일반적인 이동을 위한 사다리꼴 입력에 의한 잔류진동을 주파수 처리하여 분석한 결과 1차: 4.23 Hz, 2차: 16.9 Hz의 고유진동수를 확인할 수 있었다.

실험은 동일한 거리, 이동시간을 기준으로 사다리꼴의 속도 프로파일과 본 논문에서 제안한 삼각형 속도프로파일을 적용하였다.

먼저 Fig. 18은 단거리 이동 시 가감속주기를 고유주기에 일치시킨 삼각형프로파일 및 일반 사다리꼴 프로파일을 보여주고 있다. 그림에서 볼 수 있는 바와 같이 삼각형 프로파일은 가감속시간 0.2728 s, 최대속도 40 mm/s로 설정하였으며, 사다리꼴은 가감속시간 0.1 s, 정속시간 0.2728 s, 최대속도 26.67 mm/s로 설정하였다. Fig. 19는 이와 같은 조건에서의 진동계 가속도 응답을 보여주고 있다. 제안된 삼각형프로파일을 관측하면 2차 모드에 의해 고주파성분이 관측되고 있으나 1차모드가 크게 줄어 전체적으로 진동이 많이 감소한 것을 볼 수 있다.

Fig. 20과 21은 단거리 이동을 위해 출발-정지가 반복되는 조건을 위한 속도프로파일과 해당되는 가속도계 응답을 보여주고 있다. 앞서 1회 출발-정지를 실시한 경우와 마찬가지로 2차모드에 의한

고주파성분을 제외하면 삼각형프로파일에서 양호하게 입력을 추종하고 있으며 잔류진동도 크게 감소함을 볼 수 있다. 한편, 3.1절에서 제시한 바와 같이 사다리꼴 속도프로파일에서도 가감속시간과 주기를 일치시키면 마찬가지로 좋은 진동감소 효과를 얻을 수 있었으나 이동시간이 증가하여 동일조건에서의 비교 의미가 없어지므로 직접 비교는 생략하였다.

### 5.3 다모드 진동 억제 실험

앞서 얻어진 실험결과로부터 제안된 방법에 의해 단거리 이동에 따른 진동을 크게 억제할 수 있으나 2차모드에 의한 고주파 진동이 남아있음을 볼 수 있다. 이를 제거하기 위해 2차모드에 대해서는 입력성형기를 도입하여 속도프로파일을 수정하였다. Fig. 22는 적용된 속도프로파일 및 그 가속도 측정결과를 비교해서 보여주고 있다. 사다리꼴 속도프로파일을 적용한 경우, 이동 후 진동이 크게 발생하는 것을 볼 수 있다. 삼각형 프로파일을 적용한 경우에는 잔류진동이 크게 감소하였지만 두 번째 모드에 의한 진동이 남은 것을 볼 수 있다. 이러한 두 번째 모드에 의한 진동은 삼각프로파일에 ZV입력성형을 통해 수정한 속도프로파일을 적용한 경우 크게 억제된 것을 확인할 수 있다.

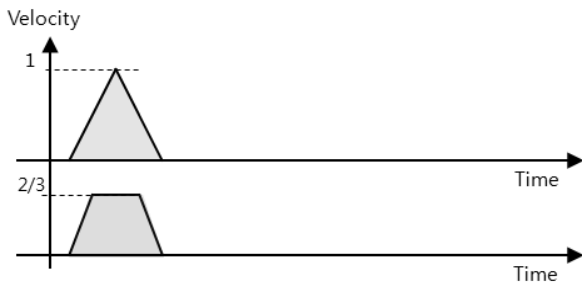


Fig. 18 Motion profile for short duration : triangular and trapezoidal velocity profile

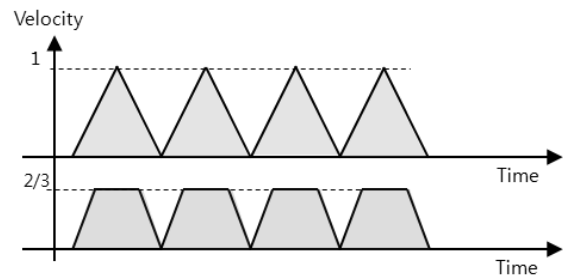


Fig. 20 Motion profile for frequent short-distance movement: triangular (proposed) and trapezoidal profile (conventional)

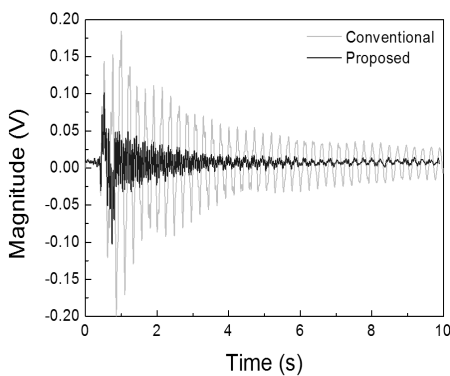


Fig. 19 Comparison of experimental responses with the proposed profile and conventional trapezoidal profile

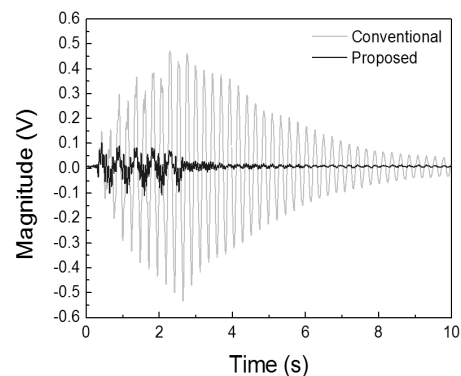
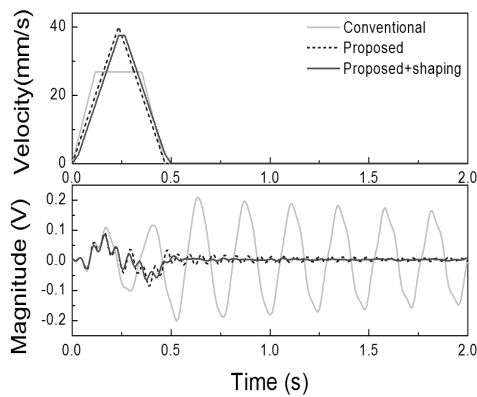


Fig. 21 Comparison of experimental responses with the proposed profile and the conventional trapezoidal velocity profile subject to frequent short-distance movement



**Fig. 22 Experimental responses of 2-mode system subject to the conventional trapezoidal profile, the proposed triangular profile and the proposed triangular profile modified by input shaping for the 2nd mode**

## 6. 결론

본 연구에서는 가감속시간을 조절하는 방식으로 잔류진동을 억제하는 방법을 제안하였으며 시뮬레이션 및 실험을 통해 검증하였다. 대표적인 속도프로파일 중 사다리꼴과 삼각형꼴을 중심으로 그 타당성을 보였다. 특히 삼각형꼴에 대한 방법은 출발-정지를 반복하며 단거리를 이동해야 하는 경우에 유용하게 활용할 수 있다. 제안된 방법은 입력프로파일을 직접적으로 수정하는 방식으로서 입력 변화를 위한 추가적인 작업없이 이루어질 수 있어 매우 효과적이다. 제안된 방법은 감쇠가 적은 시스템에 특히 유용하며 감쇠가 있게 되면 그 성능이 다소 나빠질 수 있으나 전체적으로는 미소한 진동을 보이게 되므로 활용성이 크게 나빠지지는 않는다. 제안된 방법의 활용도를 높이기 위해 입력성형기법과 결합해서 사용하는 것을 제안하였으며 다모드의 잔류진동저감에도 유용하게 활용이 가능함으로 확인하였다.

## 후기

본 연구는 제1저자의 금오공과대학교 교수연구년제에 의하여 수행된 연구임.

## References

- [1] Chung, W. J., Song, T. J., Hong, D. S., Kim, H. J., Bang, D. J., 2006, Acceleration Optimization of a High-speed LCD Transfer Crane Using Finite Jerk, *Journal of KSPE*, 23:3 110-117.
- [2] Kim, S. H., Yoon, K. S., Lee, M. H., 2002, The Optimization of Feed System by the Dynamics of Structure and Responsibility, *Proceedings of 2002 KSMTE Fall Conference*, 365-369.
- [3] Lee, C. H., Kim, B. S., 2011, Dynamic Behavior of a Flexible Machine Tools Structure during Acceleration and Deceleration, *Proceedings of 2011 KSPE Fall Conference*, 61-62.
- [4] Kim, K. H., Lee, J. H., Suh, J., 2010, Laser Scanner-stage on the Fly Technique for High Precision/Ultra Fast/Wide Area Fabrication, *Proceedings of 2010 KSME spring Conference*, 31-32.
- [5] Bae, Y. G., Lee, C. W., Song, J. Y., Park S. S., Jung, Y. S., 2008, Lightweight Picking System of High Speed Inspection System for Semiconductor Package, *Proceedings of 2008 KSMTE Spring Conference*, 92-97.
- [6] Jones, S., Ulsoy, A.G., 1999, An Approach to Control Input Shaping with Application to Coordinate Measuring Machines, *ASME J. of Dynamic Systems, Measurement and Control*, 121:2 242-247.
- [7] Park, S. W., Hong, S. W., 2008, Dynamic Modeling and Input Shaping Control of a Positioning Stage, *Journal of KSMTE*, 17:2 83-89.
- [8] Jang, J. W., Park, S. W., Hong, S. W., 2008, Command Generation Method for High-speed and Precise Positioning of XY Stage, *Journal of KSPE*, 25:10 122-129.
- [9] Seo, Y. G., Jang, J.W., 2009, Residual Vibration Reduction of Precise Positioning Stage Using Virtual-Mode Based Input Shapers, *Journal of KSMTE*, 18:3 255-260.
- [10] Kim, H.K, Kwon, O.Y., Bae, G. H., Hong, S. W., 2008, Application of Input Shaping Method for Positioning Stage in Consideration of Base Structure Vibration, *Proceedings of 2008 KSMTE Fall Conference*, 375-380.
- [11] Singhose, W., Seering, W., 2007, Command Generation for Dynamic System, Lulu.com.
- [12] Park, S. W., Hong, S. W., 2008, A New Design Method for Multi-mode Input Shapers to Eliminate Residual Vibration in Dynamic Systems, *Journal of KSPE*, 26:4 100-106.
- [13] Seo, Y. G., Bae, G. H., Hong, S. W., 2010, A Study on Residual Vibration Reduction for LCD Manufacturing Machine, *Proceedings of 2010 KSMTE Spring Conference*, 102-102.