

◆특집◆ 진동 제어 및 응용 기술

정밀 위치결정 시스템의 진동 저감을 위한 입력성형 기법

홍성욱\*, 박상원\*\*, W. E. Singhose\*\*\*

Input Shaping for Vibration Reduction in Precise Positioning System

Seong-Wook Hong\*, Sang-Won Park\*\* and William E. Singhose\*\*\*

**Key Words** : Precise Positioning Stage (정밀 위치결정 스테이지), Input Shaper (입력성형기), Natural Frequency(고유진동수), CMM(3 차원 측정기), Feedforward Control(앞먹임 제어)

1. 서론

정밀가공, 측정 및 검사를 위해 위치결정 스테이지가 널리 쓰이고 있으며 그 정밀도와 효율성의 개선을 위해 고속화 및 정밀 위치결정에 대한 요구가 증가하고 있다. 산업전반에 사용되고 있는 정밀 위치결정 스테이지(Precise Positioning Stage)의 고속화에 따라 광범위하고 빈번하게 발생하는 문제가 시스템의 잔류진동(Residual Vibration)이다.

예컨대, 정밀 검사 장비에서 많이 사용되는 비전 시스템(Vision System)의 경우 이송에 의해 발생된 목표지점에서의 잔류진동으로 인해 검사의 정밀도가 악화되거나 검사시간이 증가하게 된다. 주로 제품의 형상을 측정하기 위한 장비인 3 차원 측정기(CMM : Coordinate Measuring Machine)의 경우에도 측정속도를 높이면 잔류진동으로 인한 측정 정밀도 저하로 측정지연시간이 요구된다. 이와 같은 이유로 잔류진동의 증가는 정밀 위치결정 스테이지를 채용한 장비의 생산성을 떨어뜨리는 직접적인 요인이 되고 있다. 그렇지만, 잔류진동으로 발생하는 문제에 대한 해답을 찾기란 쉽지가 않다.

잔류진동을 억제하기 위해 우선적으로 적용되

고 있는 기술은 잘 알려진 바와 같이 되먹임제어(Feedback Control)이다. 대부분의 정밀위치결정 스테이지는 서보모터를 채용하고 있으며 서보모터의 되먹임제어 매개변수를 조정하는 방식으로 1 차적인 진동제어가 가능하다. 그러나 스테이지에 탄성이나 관성이 큰 구조물이 결합된 경우에는 효과적이지 못한 경우가 많다. 보다 직접적인 방법으로 입력 명령을 조작하는 앞먹임제어(Feedforward Control)가 있다. 잔류진동을 제어하기 위한 앞먹임제어들에 대한 많은 연구가 이루어졌으며,<sup>1,2</sup> 앞먹임제어는 되먹임제어에 비해 되먹임을 위한 센서 등이 필요하지 않으므로 비교적 간단히 구현할 수 있다. 따라서 기존 시스템에 큰 수정 없이 간단히 적용할 수 있는 장점을 가지고 있다. 본 논문에서는 앞먹임제어방식 중 잔류진동을 효과적으로 제거하는 것으로 잘 알려져 있는 입력성형기법(Input Shaping Method)<sup>3</sup>을 적용하는 과정을 소개하고자 한다. 이를 위해 입력성형기(Input Shaper) 설계 방법과 입력성형기법을 적용한 두가지 사례를 소개하고 이 방법이 갖는 장점에 대해 논의하고자 한다.

2. 입력성형기 설계

2.1 기본적인 입력성형기 설계 방법

대상 시스템의 고유진동수(Natural Frequency)를  $\omega$ , 감쇠비(Damping Ratio)를  $\zeta$  라 하고, 시스템에

\* 금오공과대학교 기계공학부

Tel. 054-478-7344, Fax. 054-478-7319

Email : swhong@kumoh.ac.kr

\*\* 금오공과대학교 기계공학부 대학원

\*\*\* Mechanical Engineering, Georgia Institute of Technology, USA

2 개의 임펄스를 시차를 두고 가한 경우의 잔류진동은 식(1)과 같이 표현할 수 있다.<sup>1</sup>

$$V(\omega, \zeta) = e^{-\zeta\omega t_n} \sqrt{C(\omega, \zeta)^2 + S(\omega, \zeta)^2} \quad (1)$$

여기서  $C(\omega, \zeta), S(\omega, \zeta)$  는 다음과 같다.

$$C(\omega, \zeta) = \sum_{i=1}^2 A_i e^{\zeta\omega t_i} \cos(\omega_d t_i),$$

$$S(\omega, \zeta) = \sum_{i=1}^2 A_i e^{\zeta\omega t_i} \sin(\omega_d t_i)$$

또  $A_i$  는  $i$  번째 임펄스의 크기이고,  $t_i$  는  $i$  번째 임펄스의 입력 시간이다.  $n$  은 임펄스 열의 임펄스 개수를 나타낸다.  $\omega_d = \omega\sqrt{1-\zeta^2}$  는 감쇠 고유진동수(Damped Natural Frequency) 이다.

잔류진동을 제거하기 위해서는 잔류진동을 표현한 식 (1)이 0 이 되면 된다. 이렇게 획득된 성형기를 ZV 성형기(Zero Vibration Input Shaper)라 하며, 식 (2)와 같이 표현된다.<sup>4</sup>

$$I(t) = A_1\delta(t) + A_2\delta(t - 0.5T_d) \quad (2)$$

여기서  $A_1 = \frac{1}{1+K}, A_2 = \frac{K}{1+K}, K = \exp\left(\frac{\zeta\pi}{\sqrt{1-\zeta^2}}\right)$ ,

이며  $T_d$  는 진동주기(Vibration Period) 이다.

ZV 성형기는 식 (2)에서와 같이 2 개의 임펄스가 진동주기의 반에 해당하는 시간간격을 가지고 순차적으로 나열된 것이다. ZV 성형기를 실제 시스템에 적용하기 위한 간략한 개념도를 Fig. 1 에 보이고 있다. 시스템에 입력되는 입력이 계단 입력이라 가정하면 계단 입력과 ZV 성형기를 컨벌루션 과정을 통해 최종적으로 수정된 명령을 생성할 수 있다. 최초의 계단 입력에 입력성형기법을 적용함으로써 두 개의 계단으로 나누진 명령으로 수정된다.

Fig. 2 는 입력성형기법을 적용하기 전과 후의 명령이 잔류진동에 미치는 영향에 대해 시뮬레이션 한 결과를 나타낸 것이다. 시뮬레이션에 사용된 잔류진동의 고유진동수는 1Hz 이고 비감쇠이다. 입력성형기법을 적용하지 않는 응답을 보여주는 실선은 잔류진동이 1s 진동 주기를 가지고 있다. 반

면, 잔류진동을 제거하기 위해 입력성형기법을 적용한 응답을 보여주는 점선은 진동주기의 반에 해당하는 0.5s 이후부터는 잔류진동이 제거됨을 알 수 있다.

Fig. 3 은 입력성형기법을 적용함에 있어 입력성형기 설계시 사용되는 고유진동수의 오차가 잔류진동에 미치는 영향에 대해 계산한 결과를 나타낸 것이다. Fig. 3(a)는 잔류진동의 고유진동수와 입력성형기 설계를 위해 사용된 고유진동수가 완전하게 일치할 경우에 대한 응답을 나타내었다. 사용된 입력성형기는 ZV, ZVD(Zero Vibration and Derivative), ZVDD 이다. ZV 성형기는 2 개의 임펄스로 구성이 되어 있지만, ZVD 성형기는 3 개 그리고 ZVDD 는 4 개의 임펄스로 구성이 되어있다. Fig. 3(a)에서 보여 지는 결과와 같이 실제 고유진동수와 입력성형기의 고유진동수가 일치한 경우에는 입력성형기의 종류에 상관없이 잔류진동이 효과적으로 제거됨을 알 수 있다.

Fig. 3(b)는 실제 고유진동수와 입력성형기의 고유진동수의 오차가 30%일때의 응답을 보여주고 있다. Fig. 3(a)에 비해 잔류진동 제거효과가 좋지 않음을 알 수 있다. 하지만, ZVDD 성형기의 경우 고유진동수의 오차에도 불구하고 대체로 잔류진동이 잘 제거됨을 알 수 있다. 이것은 입력성형기의 임펄스의 개수가 증가할수록 고유진동수 오차에 덜 민감함(Insensitivity)을 증명하는 것이다.

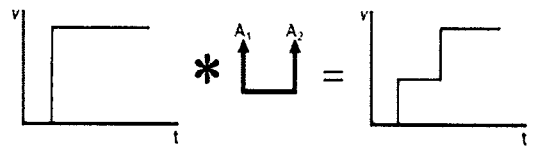


Fig. 1 Input shaping for a step input

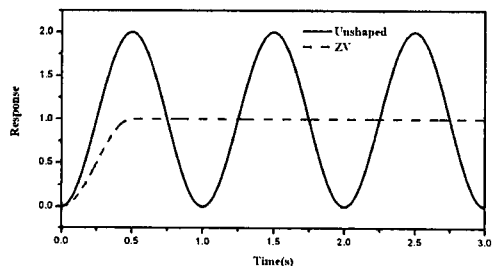
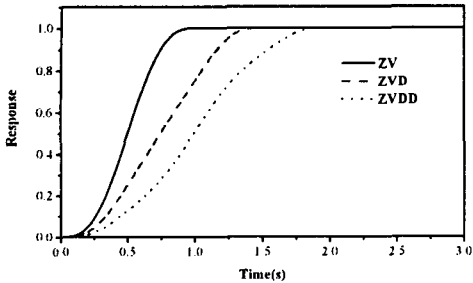
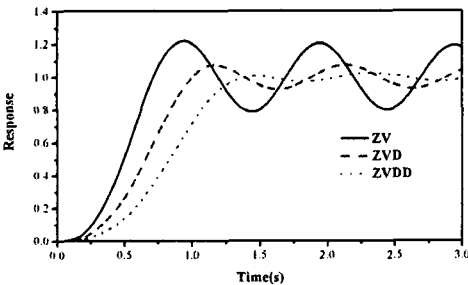


Fig. 2 Response to step input and ZV shaped input



(a) Perfect model



(b) 30% error

Fig. 3 Comparison of system responses for ideal and imperfect models

Fig. 4는 입력성형기 설계에 사용되는 인자들의 변화에 대한 진동발생률을 3 차원으로 표현한 것이다.<sup>4</sup> X 축은 모델의 고유진동수 비( $\omega_o/\omega_m$ )를 나타낸 것이고, Y 축은 감쇠비 그리고 Z 축은 진동발생률(Vibration Percentage)을 나타낸 것이다.  $\omega_o$ 는 시스템의 실제 고유진동수이고,  $\omega_m$ 는 입력성형기 설계에 사용된 고유진동수이다. 고유진동수 비가 1 일 경우 모델의 고유진동수와 실제 시스템의 고유진동수가 일치하는 경우이다. 이 값을 기준으로 진동발생률의 범위를 제한할 수 있도록 고유진동수와 감쇠비의 값을 조정하여 입력성형기를 설계하면 된다. 통상적으로 입력성형기법을 사용함에 있어 진동발생률이 0.05(5%) 이내가 되도록 입력성형기를 설계하게 된다.

## 2.2 실시간 입력성형<sup>4,5</sup>

작업자의 수동 조작에 의해 기준명령이 실시간으로 발생하는 경우는 위치결정 시스템에서 빈번하다. 실시간 기준명령 입력에 대한 입력성형기법을 이용한 명령은 간단한 컨벌루션으로 생성할 수

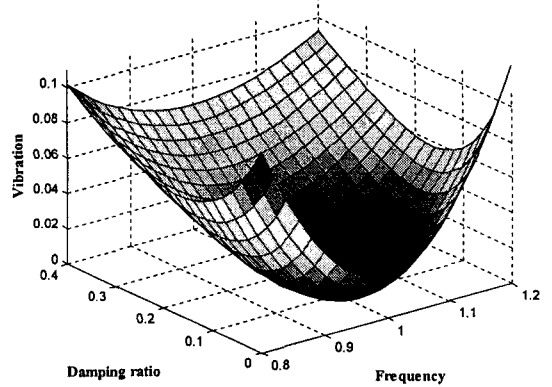


Fig. 4 3D-vibration sensitivity with respect to damping ratio and frequency error

있다.

Fig. 5는 ZV 성형기를 이용한 실시간 입력성형 명령을 생성하는 과정을 간략히 나타낸 것이다. 여기에서 가장 중요한 것은 각 시간 간격(Timing)에 대한 성형된 명령을 저장할 수 있는 버퍼(Buffer)가 존재한다는 것이다. 기준 명령의 시간 간격이 1 인 경우에, 첫 번째 시간 간격에 대한 기준 명령에 대해 입력성형기법을 적용한 명령을 첫 번째 버퍼에 저장을 하고,  $n$ -번째 기준 명령은  $n$ -번째 버퍼에 저장한다. 이런 과정이 작업자에 의한 동작이 종료시까지 실시간으로 이루어 진다.

Fig. 6은 실시간 입력성형기법을 적용한 결과를 나타낸 것이다. 사용된 입력성형기는 ZV 성형기와 ZVD 성형기이다. Fig. 5에서 보여준 실시간 입력성형기법을 이용하여 생성된 입력성형 명령이 작업자의 수동조작에 의해 발생된 잔류진동 제거에 효과적임을 Fig. 6의 결과로 알 수 있다.

입력성형기법을 실시간으로 적용함에 있어 버퍼에 저장되는 시간 간격과 각 시간 간격에서의 가속 시간이 매우 중요하다. 시간 간격이 작을수록 진동 제거에는 효과적이지만 시스템의 한계보다 작을 경우 시스템의 시간지연으로 인해 정확한 실시간 입력성형기법을 구현할 수 없게 된다. 그리고 가속 시간이 너무 짧을 경우에는 충격 형태의 입력이 가해짐으로 인해 진동이 발생하게 되고, 이로 인해 시스템의 정착시간이 증가하게 된다. 하지만, 가속 시간이 시간 간격과 가까울수록 가속 구간에서의 진동의 크기도 줄고 정착시간도 짧아진다.<sup>5</sup>

### 3. 입력성형기법 응용

#### 3.1 정밀 XY 스테이지<sup>6</sup>

Fig. 7은 산업 전반에서 널리 사용되고 있는 고속 정밀 위치결정 XY 스테이지 및 제어 시스템에 대해 간략히 나타낸 것이다. 실험장치의 구성은 XY 스테이지와 각 축을 구동하기 위한 서보 모터 그리고 LM 가이드 등으로 구성되어 있다. 또한 XY 스테이지의 작업테이블에는 실제 작업 조건을 근사화하기 위해 적당한 질량이 부착되어 있다. XY 스테이지는 석정반 위에 고정되어 있으며 모션 컨트롤러는 DSP 보드를 사용하였다.

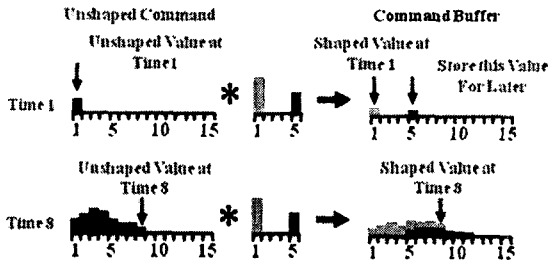


Fig. 5 Parameters of real-time input shaping<sup>4</sup>

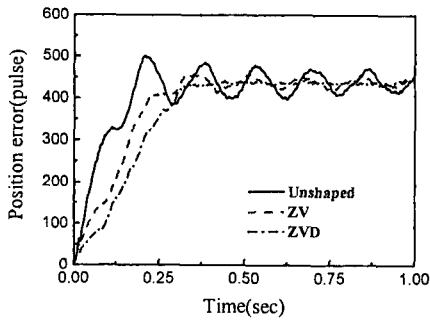


Fig. 6 Comparison of position error with and with input shaping

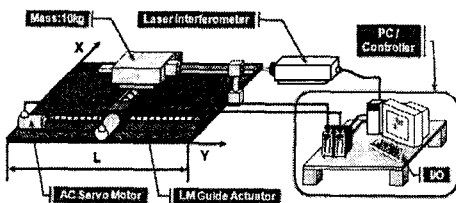


Fig. 7 Schematic diagram of experimental setup

또한 모터에 관련된 데이터 및 모든 제어 변수(속도, 가속도, 위치 등)를 실시간으로 수정하고, 모니터링할 수 있는 소프트웨어로 구성이 되어있다.

Fig. 8은 이송 시 발생하는 시스템의 잔류진동에 대해 기준명령과 되먹임 신호의 차로 계산된 위치오차(Position Error)를 이용하여 나타낸 것이다. 이 실험결과로 알 수 있는 것은 가속구간 및 감속구간 이후에서 구동계의 운동으로 인해 잔류진동이 존재하는 것이다. 특히, 목표지점에서 발생하는

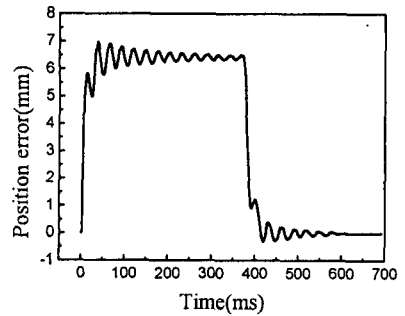


Fig. 8 Position error without input shaping

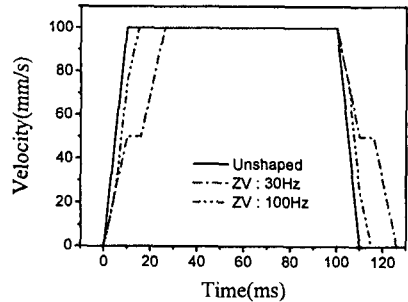


Fig. 9 Comparison of the velocity profiles for unshaped and shaped commands

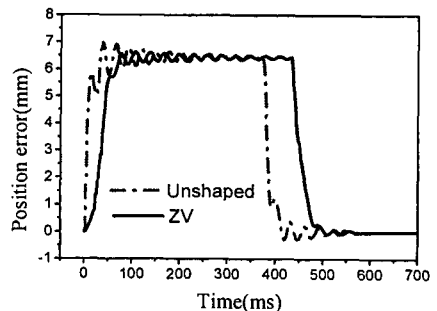


Fig. 10 Comparison of position errors with and without input shaping

잔류진동은 위치결정 시간에 직접적인 영향을 미치게 된다.

Fig. 9 는 위치결정 작업에서 발생하는 잔류진동을 제거하기 위한 입력성형기를 이용하여 생성한 새로운 명령을 나타낸 것이다. 실선은 입력성형기법을 적용하지 않은 최초의 기준명령에 대해 나타낸 것이고, 점선은 고유진동수가 각각 30Hz 와 100Hz 인 시스템에 대해 ZV 성형기를 이용하여 생성한 명령을 나타낸 것이다. 각 위치결정 명령의 면적은 동일함으로써 이동거리가 동일하다.

Fig. 10 은 입력성형기법을 이용한 XY 스테이지에서의 위치결정에 대한 실험 결과를 나타낸 것이다. Fig. 10 에서 보여지는 것처럼 위치결정 작업에 있어 점선으로 표시한 입력성형기법을 적용한 경우에 상승구간과 특히 목표지점에서의 잔류진동 제거에 효과적임을 알 수 있다. 입력성형기법을 통해 목표지점에서의 잔류진동을 제거함으로써 위치결정완료 시간을 단축시켜 시스템의 성능을 향상시킬 수 있다.

### 3.2 3 차원 측정기<sup>4</sup>

Fig. 11 은 피측정물의 형상에 대한 3 차원 좌표를 정밀 측정하기 위해 주로 사용되는 3 차원 측정기를 간략히 나타낸 것이다. Fig. 11 과 같은 3 차원 측정기를 브릿지형 3 차원 측정기(Bridge Type CMM)이라 하고, 3 개의 좌표와 측정을 수행하는 접촉식 프로브(Touch Trigger Probe) 등으로 구성되어 있다. 반복 측정을 위해 서보 시스템을 이용한 구동계로 자동 측정 기능을 가지고 있는 삼차원 측정기가 많이 사용되고 있다.

Fig. 12 는 3 차원 측정기를 이용하여 측정하기 위한 기본적인 과정을 시간에 대한 이동 위치로 나타낸 것이다. 여기에는 크게 4 부분의 구분 동작으로 나누어져 있다. 첫 번째는 측정 목표지점에 근접한 위치까지 빠른 속도로 이동한다(Gross Motion). 두 번째는 목표지점으로 접근하기 전 짧은 시간 동안 정지를 한다. 일반적으로 프로브의 잔류진동을 일시적으로 줄이기 위한 부분이라 할 수 있다. 세 번째는 실제로 측정이 이루어지는 부분으로, 실제 측정을 위해 프로브가 측정 속도로 이동하여 측정하게 된다. 측정을 위한 구간을 프로브 접근 구간(Probe Approach Region)이라 하며 측정 정밀도 및 측정 시간에 많은 영향을 미친다. 마지막으로 네 번째는 측정을 완료 후 측정 방향과 반

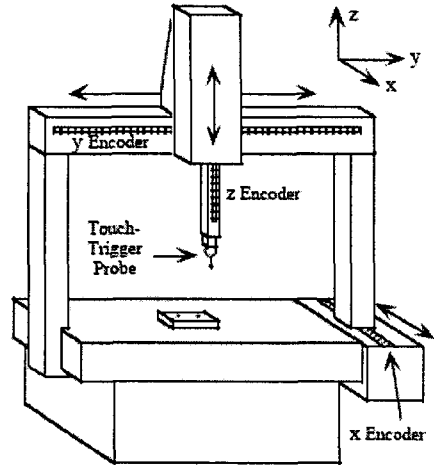


Fig. 11 Sketch of moving bridge CMM<sup>4</sup>

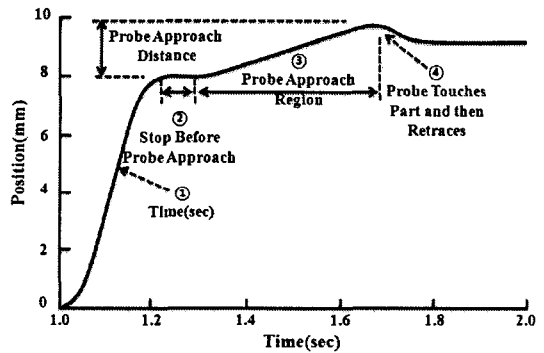


Fig. 12 Probe position during a measurement of the moving bridge CMM<sup>4</sup>

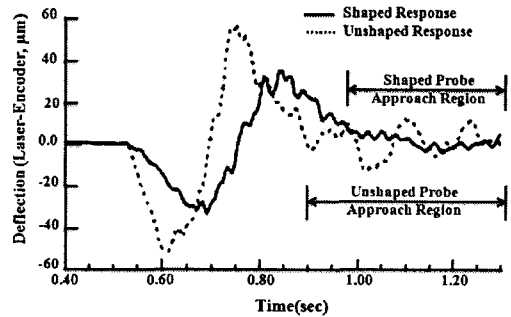


Fig. 13 Comparison of deflections during shaped and unshaped measurement cycles<sup>4</sup>

대 방향으로 신속히 돌아오는 부분이다.

Fig. 13 는 실제 측정에 관여하는 두 번째와 세

번개의 과정에서 3 차원 측정기의 거동 특성에 대한 실험 결과를 나타낸 것이다. 실선은 입력성형기법을 적용한 결과이고, 점선은 입력성형기법을 적용하지 않는 경우의 결과를 나타내고 있다. 3 차원 측정기의 측정 시간에 많은 영향을 미치는 접근 구간이 입력성형기법을 적용한 경우가 그렇지 않은 경우에 비해 10ms 정도 짧다. 이 결과를 바탕으로 입력성형기법을 사용할 경우 3 차원 측정기의 측정 시간이 줄어들 수 있음을 알 수 있다.

잔류진동 측면에서도 입력성형기법을 적용하지 않은 경우에 비해 입력성형기법을 적용한 경우에 잔류진동이 줄어들음을 알 수 있다. 이것은 3 차원 측정기를 이용한 형상 측정 시 입력성형기법이 측정 정밀도의 향상에 좋은 영향을 미칠 수 있음을 의미한다.

#### 4. 요약

본 논문은 정밀 위치결정 시스템의 잔류진동을 효과적으로 제거할 수 있는 입력성형기법을 소개하고, 실시간 입력성형기법을 적용하는 방법을 설명하였다. 또한 두 가지 응용 분야에 대한 실험결과를 바탕으로 입력성형기법의 성능을 고찰하였다. 일반적으로 입력성형기법은 정밀 위치결정 시스템에 대해 동작 완료시간을 단축 시키는 효과가 있을 뿐만 아니라 위치결정 정밀도를 향상시키는 효과가 있다. 그리고 되먹임제어 방법에 비해 적용 방법도 간단하며 저렴하게 구성할 수 있다는 장점이 있으므로 많은 정밀 위치결정 시스템에 유용할 것으로 생각된다.

#### 참고문헌

1. Singer, N. C. and Seering, W. P., "Preshaping Command Inputs to Reduce System Vibration," *Journal of Dynamic Systems, Measurement and Control*, Vol. 112, pp. 76 - 82, 1990.
2. Magee, D. P. and Book, W. J., "Implementing Modified Command Filtering to Eliminate Multiple Modes of Vibration," *Proceedings of the American Control Conference*, pp. 2700 - 2704, 1993.
3. Singer, N. C., "Residual Vibration Reduction in Computer Controlled Machines," PhD-thesis, Department of Mechanical Engineering, MIT, 1988.
4. Singhose, W. and Seering, W. L., "Command Generation for Dynamic Systems," Lulu.com, 2007.
5. Park, S. W., Hong, S. W., Choi, H. S. and Singhose, W., "Discretization Effects of Real-Time Input Shaping in Residual Vibration Reduction for Precise XY Stage," *Trans. of the Korean Society of Machine Tool Engineers*, Vol. 16, No. 4, pp. 71-78, 2007.
6. Jang, J. W., Park, S. W. and Hong, S. W., "Precise Positioning of High-Speed XY Stage by Improved Input Shaping," *Proc. of the Korean Society of Machine Tool Engineers Fall Conference*, pp. 203-206, 2007.