

정밀 XY 스테이지 잔류진동 억제를 위한 실시간 입력성형에서의 이산화 효과에 관한 연구

박상원*, 홍성욱⁺, 최훈석⁺⁺, William Singhose⁺⁺⁺

(논문접수일 2007. 4. 12, 심사완료일 2007. 5. 29)

Discretization Effects of Real-Time Input Shaping in Residual Vibration Reduction for Precise XY Stage

Sang-won Park*, Seong-wook Hong⁺, Hun-seok Choi⁺⁺, William Singhose⁺⁺⁺

Abstract

Input shaping is known to be a very effective tool for suppressing residual vibration without introducing any complicated sensors and feedback control. Real-time input shaping schemes necessitate a process such that the input command is discretized to deal with non-prescribed, real-time input. Thus parameters associated with input command discretization, such as time spacing and duration time, are unknowns which affect the performance of input shaping schemes, especially for small and fast XY stages. This paper investigates the effects of input command discretization parameters, such as time spacing and duration time, on the dynamic performance of XY stages subjected to real-time input shaping. An experimental system is developed which is equipped with an XY stage driven by servo-motors and real-time user command. Experiments are performed to investigate the dynamic performance of XY stage by changing these parameters and to yield a strategy to gain better performance.

Key Words : Input Shaping(입력성형), XY Stage(XY 스테이지), Discretization(이산화), Time Spacing(시간간격), Input Duration Time(입력지속시간), Time Delay(시간지연)

* 금오공과대학교 대학원
+ 교신저자, 금오공과대학교 기계공학부 (swhong@kumoh.ac.kr)
주소: 730-701 경북 구미시 양호동 금오공과대학교
++ 금오공과대학교 대학원
+++ Georgia Institute of Technology

1. 서론

일반적으로 고속 이송계에서는 가감속이 이루어지는 과도상태에서나 방향을 전환할 때 또는 목표지점에 도달한 후 잔류진동이 존재하게 된다. 이런 이유로 인해 이송계를 원하는 경로로 이송하거나, 이송 경로 상에 위치한 방해물을 피하기가 어려워지게 된다. 또한, 최종 목표지점에서 의 잔류진동으로 인하여 위치 안정화 시간을 필요로 하게 되므로 작업시간이 길어지게 된다. 정밀 고속 이송 및 측정이 요구되는 XY 스테이지(XY Stage), 삼차원 측정기(CMM, Coordinate Measuring Machine)의 경우에도 목표지점에서의 잔류진동이 측정 정밀도와 측정 시간에 치명적인 영향을 끼치게 된다. 특히, 프로그램에 의해 미리 정해진 경로로 운전할 때에는 가감속이나 이송속도 등을 프로그램에 의해 미리 적절히 조절하여 잔류진동을 줄일 수 있지만, 일반적인 XY 스테이지와 삼차원 측정기와 같은 시스템에서 작업자가 현장에서 미리 정해지지 않은 경로로 직접 운전하여 이송시킬 경우 별도의 잔류진동에 대한 대책이 필요하다.^(1,2) 입력성형 기법은 이와 같은 잔류진동 억제를 위한 효과적인 방법으로 널리 알려져 있다⁽³⁻⁸⁾.

이송경로가 결정되어 있는 경우에는 이송명령에 입력성형기를 중합(Convolution)하여 얻어지는 수정된 입력을 시스템에 가할 수 있도록 미리 프로그램 함으로서 쉽게 입력성형기법을 구현할 수 있다. 그러나 입력성형기법을 작업자의 실시간 입력에 대해 적용하는 실시간(Real-time) 적용에서는 미리 선정한 시간간격으로 입력을 샘플링하면서 실시간으로 생성된 입력을 만들어서 시스템에 입력을 주는 방식을 택해야 하며 이때, 시간간격과 속도제어시의 가속시간 등이 성능에 큰 영향을 미치게 된다. 그러나 이와 같은 변수들에 의한 성능 또는 특성 변화에 대해서 연구된 결과는 거의 없는 실정이다. 본 논문에서는 범용의 삼차원 측정기를 모형화한 브릿지형 이송장비의 특성을 연구할 수 있도록 개발된 장비를 이용하여 XY 스테이지에 대해 입력성형기법을 실시간으로 적용함에 있어 입력성형 기법의 인자들 중 입력성형 입력시간간격(Input Time Spacing)과 컨트롤러의 입력지속시간(Input Duration Time) 변화에 따른 XY 스테이지의 잔류 진동 특성을 실험적으로 조사하였다.

2. 입력성형기법

입력성형(Input Shaping)기법이란 속도의 가감속 방법을 한 단계로 실행하는 것이 아니라 입출력 특성에 근거하여

여러 단계로 나눔으로서 자체의 입력에 의한 진동 상쇄효과를 얻을 수 있도록 하는 것이다. Fig. 1은 대표적인 입력성형 기법인 ZV(Zero Vibration)에 의해 임펄스 A₁의 응답에 임펄스 A₂의 응답을 컨벌루션을 수행함으로써 전체 응답이 임펄스 A₂가 입력된 이후에 상쇄 되는 것을 예시하고 있다. 이처럼 입력성형 기법의 원리는 초기 입력에 의해 나타나는 진동을 적정한 시간 간격 후에 적절한 크기의 입력을 가함으로써 진동을 상쇄 시키는 것이다. 여기서 가장 중요한 것은 두 번째 입력의 크기와 시간인데, 이는 시스템이 갖는 고유진동수와 감쇠비에 의해 계산된다. 본 연구에서는 입력성형 기법을 적용하지 않은 상태에서의 XY 스테이지 구동을 통하여 얻어진 위치 오차 응답을 이용하여 고유진동수와 입력성형 입력 임펄스의 크기를 결정하였다. 또한 본 연구에서 사용된 입력성형의 형태는 ZV(Zero Vibration)와 ZVD(Zero Vibration and Derivative)이다. ZV 입력성형은 Fig. 2 (a)와 같이 T/2만큼의 간격을 가지고 각각 A₁, A₂의 크기로 임펄스를 입력하는 것이다. 반면 ZVD 입력성형은 Fig. 2 (b)와 같이 A₁, A₂, A₃ 크기의 임펄스를 각각 0, T/2, T만큼의 간격으로 컨벌루션하는 것이다. 여기에서 T는 시스템의 고유진동수에 해당하는 주기이다. 이때 A₁, A₂, A₃의 크기는 Singhose⁽⁵⁾로부터 얻을 수 있다.

입력성형기법을 실시간으로 적용하기 위해서는 입력 변화에 대응하여 일정한 시간간격으로 입력성형을 실시하는 방법을 많이 채택하고 있다. 특히 서보모터를 이용하는 경우에는 가감속 시간을 설정하여 운전할 필요가 있다. 본 연구에서는 이와 같은 입력성형 입력시간간격 및 컨트롤러의 입력지속시간의 설정이 입력성형기법의 성능에 미치는 영향에 대해 검토하고자 한다. Fig. 3은 실시간으로 입력성형기법을 적용하는 것에 대해 나타낸 것이다. 여기서 T_d는 컨트롤러의

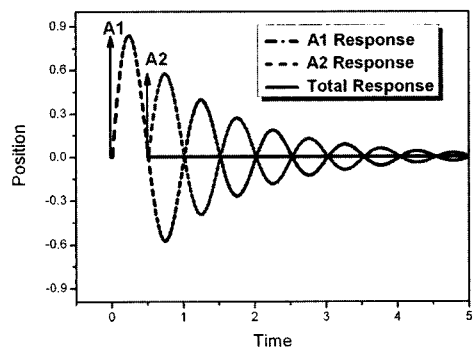


Fig. 1 Vibration elimination with input shaping⁽⁵⁾

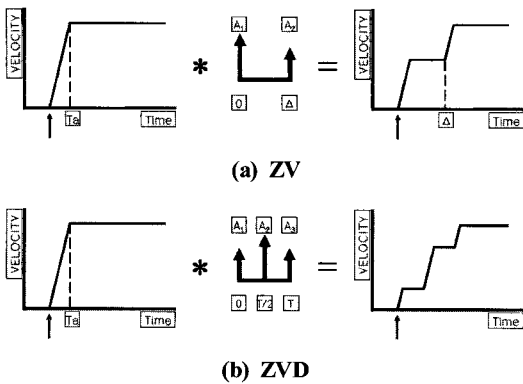


Fig. 2 ZV and ZVD input shaping

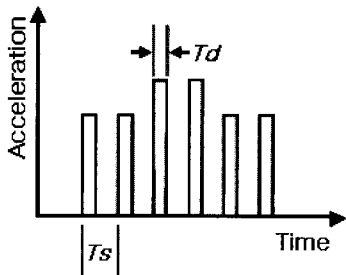


Fig. 3 Parameters of real-time input shaping

입력지속시간, T_s 는 임펄스 입력시간간격이다.

3. 입력성형 이산화 인자 특성 연구

3.1 실험장치

Fig. 4는 본 연구에 사용된 브릿지형 3축 이송계 실험 장치이다. 삼차원 측정기, XY 스테이지 그리고 산업용 크레인을 모사할 수 있도록 설계/제작 되었다. 본 실험장치는 삼차원 측정기와 동일한 브릿지형 3축으로 구성되어 있으며, XY 스테이지에는 산업용 크레인의 호이스트 적재물을 대신할 추와 이를 위/아래로 움직일 수 있는 장치가 탑재되어 있다. 삼차원 측정기와 XY 스테이지를 모사하기 위해 사용된 2축은 정밀 고속 이송을 위하여 모두 200W AC 서보 모터를 사용 하였으며, 최고 속도는 400mm/s 이다. 본 연구에서는 대략 300mm/s로 실험을 수행하였다. X축과 Y축은 삼차원 측정기에서와 같은 모션 특성을 만들기 위해 내부에 철심이 들어있는 타이밍 벨트와 LM 가이드를 사용하였으며, 실험장치에 사용된 모든 모터는 제이거 박스에서 스위치

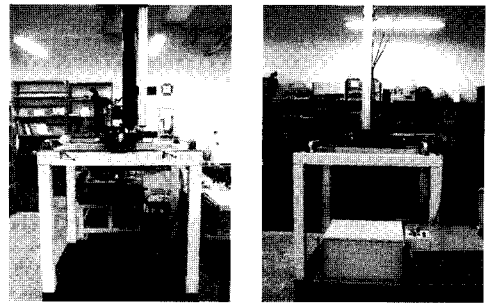


Fig. 4 Experimental Apparatus

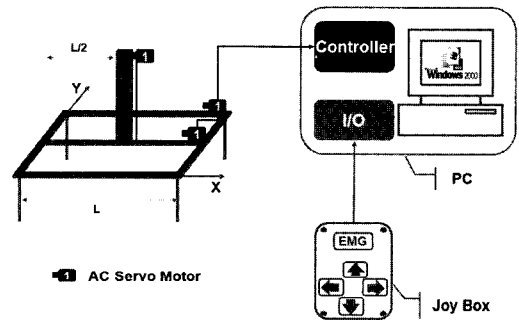


Fig. 5 Schematic diagram of measurement system

를 이용하여 실시간으로 컨트롤이 가능하다. 호이스트 모터를 제외한 3축 모두 AC 서보 모터와 풀리 사이에는 감속기를 사용하였으며, 감속기의 기어비는 10 : 1이다. 모션 컨트롤러는 미국의 MEI 모션 보드를 사용하였으며, 서보 모터와의 제어 모드는 속도로 설정이 되어있다. 또한 모션에 관련된 데이터, 특히 제어이득은 컨트롤러에서 조정 가능하며, 모든 특성 변수(속도, 가속도, 위치 등)가 실시간으로 모니터링이 되도록 소프트웨어를 개발하였다. 본 연구에 사용된 전체 시스템 구성은 Fig. 5와 같다.

3.2 XY 스테이지 입력성형 기본 인자의 결정

입력성형 기법을 이용하기 위해 사용되는 중요 인자들은 대상 시스템에 대한 고유진동수, 운전 속도, 가속 및 감속시간, 시간지연 그리고 컨벌루션을 하기 위한 임펄스(Impulse)의 크기 등이다. 본 연구에서는 서보계의 신호 중 위치 오차(명령위치 - 실제위치)를 이용하여 시스템의 고유진동수 및 감쇠비를 결정하였다. 즉 이송 중 급격히 정지 명령을 인가하였을 때 잔류진동에 의한 위치 오차 신호를 관측하여 결정하였다. 본 연구에 사용된 실험장치 Fig. 4의 Y 방향에 대한

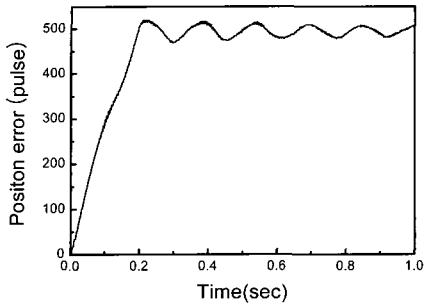


Fig. 6 Position error due to the residual vibration caused by a sudden stop

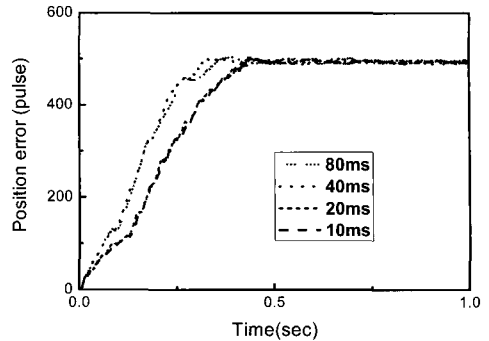
Table 1 Input shaping parameters for ZV shaper

Natural Frequency	6.25Hz
Velocity	180,000pps
Acceleration Time	200ms
A_1	0.52
A_2	0.48

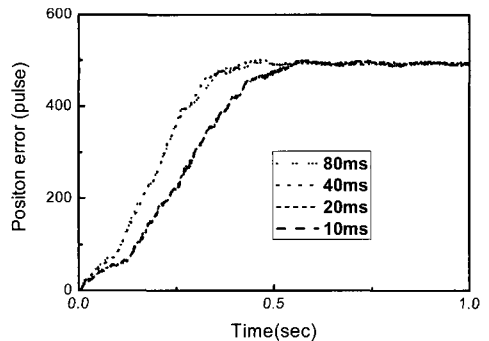
위치 오차의 응답을 Fig. 6과 같이 획득하였으며, 이렇게 획득된 결과에 대해 대수감소분을 이용하여 입력성형 임펄스의 크기(A_1 , A_2)를 결정하였다. Table 1은 이렇게 결정된 시스템의 고유진동수 및 입력성형 기법을 이용하기 위한 주요 인자들에 대한 표이다.

3.3 XY 스테이지 위치 오차

본 연구에서는 XY 스테이지에 적용되는 입력성형 기법의 인자들 중 특히 입력성형 입력시간간격과 컨트롤러 입력지속시간의 변화에 따른 XY 스테이지의 구동특성을 분석하였다. 여기에 사용되는 입력성형 입력시간간격은 입력성형기(Input Shaper)를 불특정 하게 입력되는 기준명령(Reference Command)에 대해 반복적으로 컨벌루션 하기 위한 시간간격이다. 이후부터 입력성형 입력 시간간격을 시간간격이라 칭한다. 또한 컨트롤러 입력지속시간은 시간간격 후 이전 기준명령에서 컨벌루션으로 생성된 새로운 기준명령까지 도달하는 시간이다. Fig. 7은 입력성형기법을 실시간으로 적용함에 있어 각각의 시간간격에 대한 시스템이 가지는 시간지연(Time Delay) 효과를 비교하기 위한 실험결과이다. 여기에서 입력지속시간은 시간간격과 동일하게 사용되었다. Fig. 7의 횡축은 구동 시간을 나타내고, 종축은 XY 스테이지의 위치 오차, 즉 진동 크기를 나타낸다. Fig. 7의 (a)는



(a) ZV



(b) ZVD

Fig. 7 Comparison of time delay with the time spacing varied at ZV and ZVD

ZV, (b)는 ZVD에 대한 결과이다. ZVD가 ZV에 비교해서 전반적으로 상승시간(Rising Time)이 증가하는 경향을 보여주고 있으나 시간간격에 의한 변화는 동일한 양상을 보여주고 있다. 특히, 두 경우 모두 시간간격이 20ms 이하로 설정될 때 시스템에 의한 시간지연이 응답에 직접적인 영향을 미치게 됨을 알 수 있다. 이것은 컨트롤러 및 컨트롤러를 포함하고 있는 시스템 성능의 한계로 인한 결과이다. 따라서 시간간격에서의 임펄스 입력은 컨트롤러 및 시스템에 중속적임을 알 수 있다.

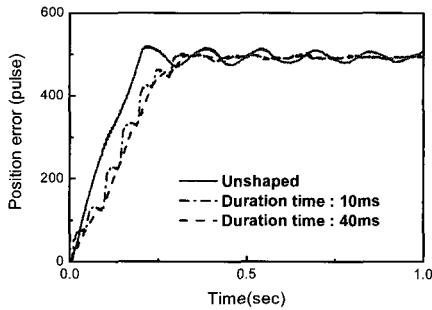
산업용 크레인과 같이 고유진동수가 낮고 저속으로 움직이는 시스템의 경우에는 입력성형기법을 적용함에 있어 시간지연으로 야기되는 문제는 아주 미미하여 고려할 필요가 없다. 하지만 삼차원측정기 또는 XY 스테이지와 같이 고유진동수가 높고, 고속으로 동작하는 시스템에 있어서 실시간으로 입력성형기법을 적용할 경우 시간지연으로 인해 치명적인 결과를 초래할 수 있다. 따라서 입력성형기법을 적용함에 있어 시간간격을 20ms 이상으로 설정하고 고유진동수의 반주기에

대한 시간간격비가 정수배가 될 수 있도록 설정하는 것이 중요하다. 따라서 본 연구에서의 시간간격은 고유진동수의 반주기에 대한 시간간격비가 정수가 되고 시간간격이 20ms 이상인 40ms와 80ms로 설정하였으며, 각각의 시간간격에 대해 입력지속시간 변화는 Table 2와 같다. 여기에서 T는 시스템 고유진동수의 주기에 해당되며, 그 간격은 160ms이다.

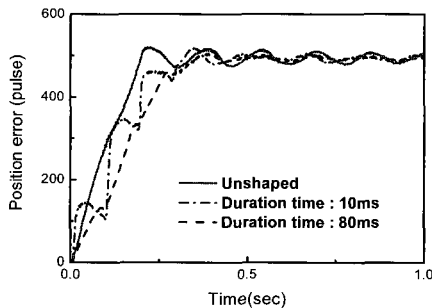
Fig. 8, 9는 입력성형기법 중 ZV와 ZVD를 사용할 경우 시간간격과 컨트롤러의 입력지속시간 변화에 따른 XY 스테이지의 위치 오차에 대한 응답을 각각 나타낸 것이다. Fig. 8과 Fig. 9의 (a)는 시간간격이 40ms 일 때의 위치 오차에 대한 응답 그래프이고, (b)는 시간간격이 80ms 일 때의 위치 오차에 대한 응답 그래프이다. 컨트롤러의 입력지속시간과

Table 2 Experimental condition

Time spacing(ms)	Duration time(ms)
40(T/4)	10, 20, 40
80(T/2)	10, 20, 40, 80



(a) Time spacing : 40ms

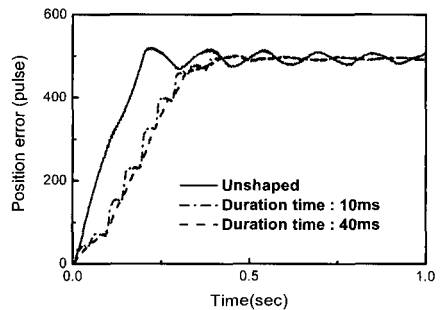


(b) Time spacing : 80ms

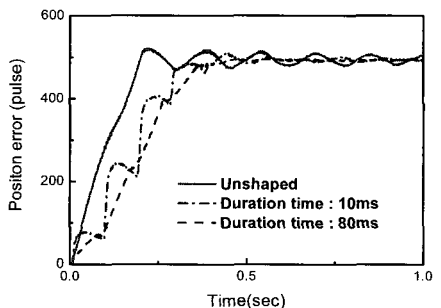
Fig. 8 Comparison of position errors with the time spacing varied at ZV

시간간격에 상관없이 입력성형기법을 사용한 경우가 그렇지 않았을 경우에 비해 잔류진동을 효과적으로 제거하게 되어 궁극적으로 정착시간(Settling Time)이 줄어들게 된다. 컨트롤러의 입력지속시간이 10ms의 경우, 입력의 지속시간이 짧아지게 됨으로서 충격 형태의 입력이 가해짐으로 인해 진동이 발생하게 되는데 이로 인한 진동이 정착시간에도 영향을 미치게 된다. 하지만 시간간격이 40ms 일 경우에는 컨트롤러의 짧은 가속시간에 의해 발생된 진동이 정착시간에 미치는 영향이 미미하다. 시간간격과 입력성형 종류에 상관없이 컨트롤러의 입력지속시간이 시간간격과 가까울수록 가속 구간에서의 진동의 크기도 줄고 정착시간도 짧아짐을 알 수 있다. 또한 두 값이 동일할 경우 잔류진동 제거에 가장 효과적임을 알 수 있다. ZV와 ZVD모두 시간간격에 있어서는 80ms 보다 40ms 일 때가 더 좋은 결과를 보인다. 따라서, 시간간격이 짧을수록 구동특성이 개선 됨을 알 수 있다.

XY 스테이지의 잔류진동 제거 측면에서의 입력성형기법 변화에 따른 차이는 미미하지만 ZV 보다는 ZVD가 더 효과적임을 알 수 있다.



(a) Time spacing : 40ms



(b) Time spacing : 80ms

Fig. 9 Comparison of position errors with the time spacing varied at ZVD

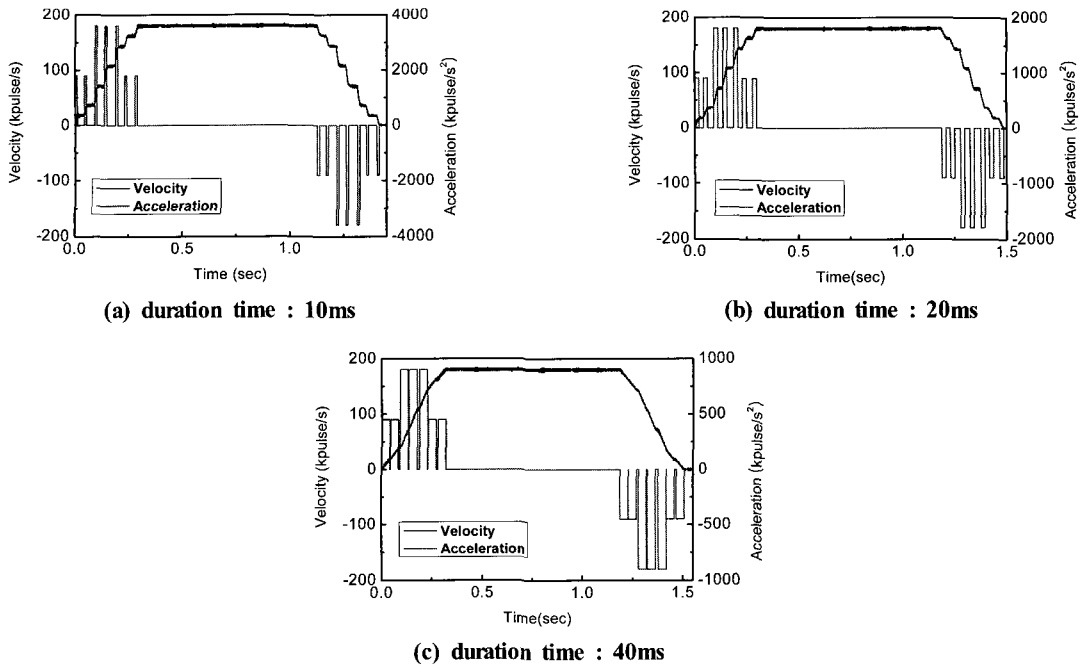


Fig. 10 Velocity and acceleration profiles with the time spacing of 40ms at ZV

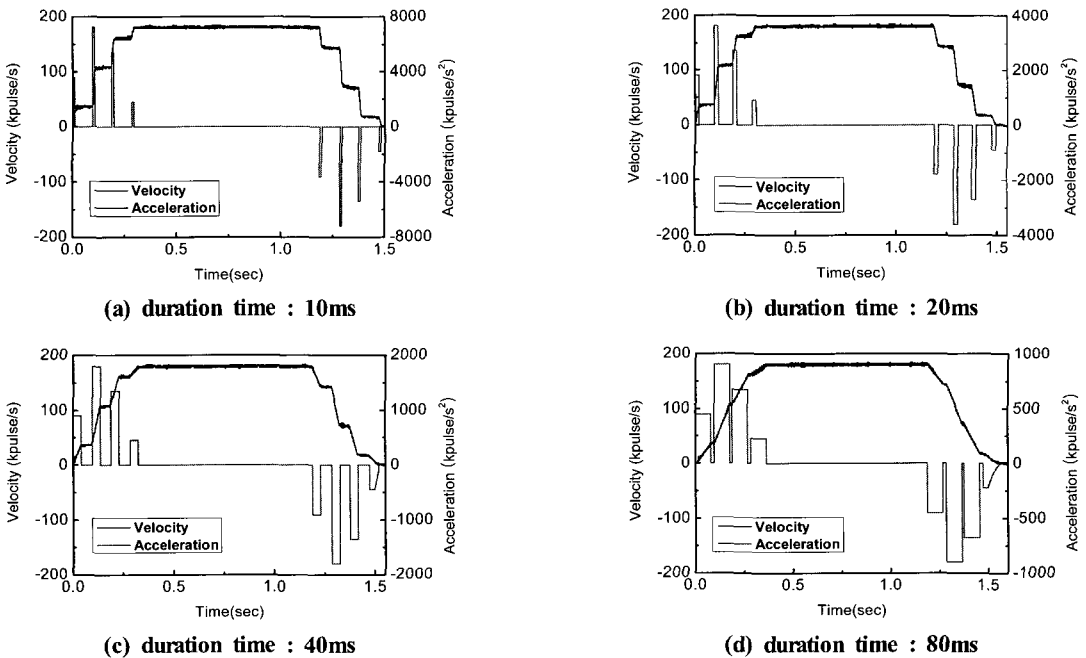
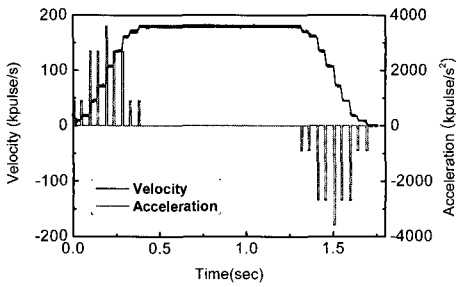
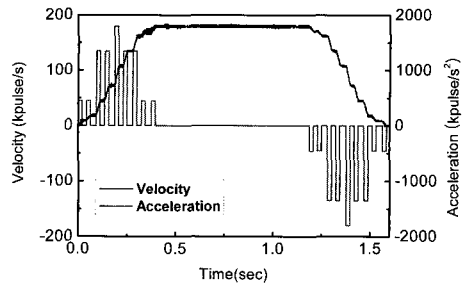


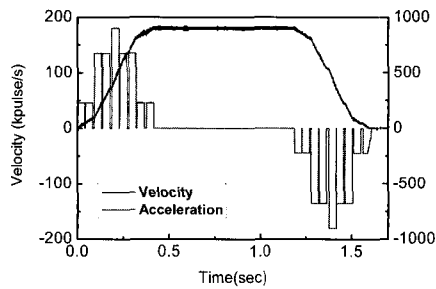
Fig. 11 Velocity and acceleration profiles with the time spacing of 80ms at ZV



(a) duration time : 10ms

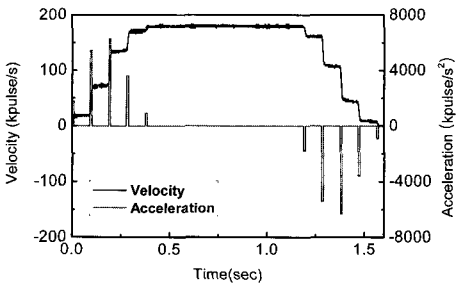


(b) duration time : 20ms

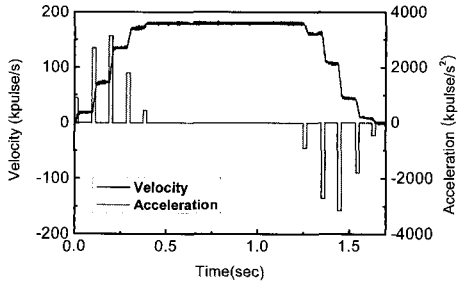


(c) duration time : 40ms

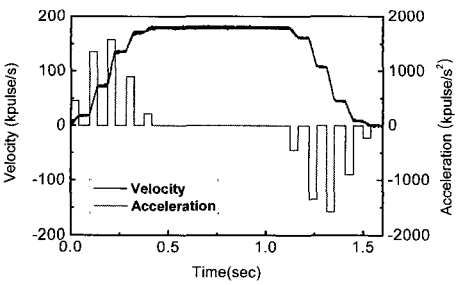
Fig. 12 Velocity and acceleration profiles with the time spacing of 40ms at ZVD



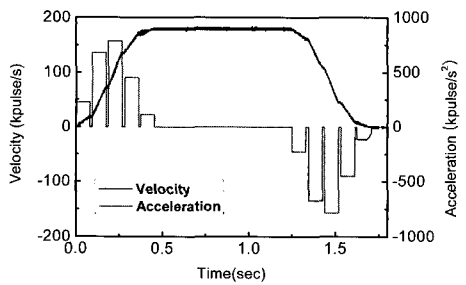
(a) duration time : 10ms



(b) duration time : 20ms



(c) duration time : 40ms



(d) duration time : 80ms

Fig. 13 Velocity and acceleration profiles with the time spacing of 80ms at ZVD

3.4 XY 스테이지 속도 프로파일

Fig. 10에서 Fig. 13까지는 시간간격이 각각 40ms와 80ms일 때 입력지속시간에 따른 XY 스테이지의 속도와 가속도에 대한 응답 그래프들이다. Fig. 10과 Fig. 11은 ZV에 대한 응답 그래프이고, Fig. 12와 Fig. 13은 ZVD에 대한 응답 그래프이다. 그래프의 횡축은 구동 시간을 나타내고, 종축은 XY 스테이지의 속도와 가속도의 크기를 보여주고 있다. 입력성형의 종류에 상관없이 입력지속시간이 짧을수록 속도 프로파일에서 급격한 변화를 볼 수 있다. 이와 같은 변화는 시스템에 충격 형태의 가진을 하게 됨으로써 고주파의 진동을 야기할 가능성이 크다. 따라서 입력지속시간은 가능한 범위에서 길게 하는 것이 바람직하다.

위치오차 결과와 마찬가지로 입력성형 종류에 상관없이 속도에서도 입력지속시간이 시간간격과 가까울수록 구동속도 프로파일이 개선됨을 알 수 있다. 한편, 시간간격에 의한 결과를 비교해 보면 두 경우가 큰 차이가 없으나 이미 논의한 바와 같이 시간간격을 어느 이상 작게 하면 시스템에 의해 유발되는 시간지연에 의해 입력성형 성능이 급격히 나빠지게 된다. 또, 고유진동수의 반주기 이상에서 시간간격을 둘 경우 시스템에 인가되는 실제 입력이 입력성형에 의거하여 적절히 배치되지 못해 응답특성을 저해하게 된다. 따라서 실제 응용을 위해서는 시스템의 반주기를 정수로 나누어 얻어지는 값 중 시간지연에 의한 영향을 받지 않는 범위에서 가장 작은 값을 선택하는 것이 바람직하다.

4. 요약 및 결론

본 연구는 XY 스테이지에 입력성형기법을 실시간으로 적용함에 있어 입력성형 인자들의 변화로 나타나는 구동 특성에 대해 조사하였다. 이를 위해 자체 제작된 XY 스테이지에 대해 두 가지 입력성형 기법, 즉 ZV와 ZVD 기법을 적용하였으며 잔류진동 제거 측면에서 두 방법 모두 탁월한 효과가 있음을 확인하였다. 또, 입력성형 인자들 중 입력성형 입력 시간간격과 실제 입력명령을 수행하는 컨트롤러의 입력지속 시간의 변화에 대한 효과를 관찰함으로써 컨트롤러 및 컨트롤 시스템을 가지는 한계를 확인하고 이를 근거로 적절한 입력성형 인자의 값을 결정할 수 있었다. 입력성형 종류(ZV, ZVD)에 상관없이 시간간격은 짧을수록, 시간간격과 컨트롤러의 입력지속시간의 차이가 적을수록 XY 스테이지의 구동 특성이 상당히 개선됨을 알 수 있었다. 그러나 시간간격을 일정 한계 이상으로 줄이면 시스템 자체의 특성에 기인하는 시간지연 효과에 의한 성능 저하가 야기되므로 시스템 특성

에 맞추어 적절한 범위 내의 작은 값을 선정해야 한다. 특히 입력성형 시간간격은 시스템의 고유진동수와 컨트롤 시스템의 성능에 매우 밀접한 관계가 있음을 알 수 있었다.

후 기

본 연구는 금오공과대학교 학술연구비 지원에 의해 연구되었으며 연구비 지원에 감사드립니다.

참 고 문 헌

- (1) Tseng, Y. T. and Liu, J. H., 2003, "High-speed and Precise of Positioning an X-Y table," *Control Engineering Practice*, Vol. 11, No. 4, pp. 357~365.
- (2) Liu, Z. Z., Luo, F. L. and Rashid, M. H., 2004, "Robust High Speed and High Precision Linear Motor Direct-drive XY-table Motion System," *Control Theory Appl.*, Vol. 151, No. 2, pp. 166~173
- (3) Park, S. W., Hong, S. W., Singhose, W. E. and Seo, Y. G., 2006, "Evaluation and Improvement of Dynamic Characteristics of 3-axis Gantry-type Stage," *Proceedings of the KSNVE Annual Spring Conference*.
- (4) Park, S. W., Hong, S. W., Choi, H. S. and Singhose, W. E., 2006, "Effect of Input Shaping Parameters on Driving Characteristics of XY Stage," *Proceedings of the KSMTE Autumn Conference*, pp. 263~267.
- (5) Singhose, W. E. and Seering, W. P., 2007, *Command Generation for Dynamic Systems*, Lulu.com
- (6) Pao, L. Y. and Singhose, W. E., 1998, "Robust Minimum Time Control of Flexible Structures," *Automatica*, pp. 229~236.
- (7) Jones, S. and Ulsoy, A. G., 1999, "An Approach to Control Input Shaping with Application to Coordinate Measuring Machines," *Journal of Dynamics, Measurement and Control*, pp. 242~247.
- (8) Pao, L. Y. and Lau, M. A., 2000, "Robust Input Shaper Control Design for Parameter Variations in Flexible Structures," *ASME Journal of Dynamic Systems, Measurement and Control*, Vol. 122, pp. 63~70.