

# 위치결정 스테이지에 대한 동적 모델링과 입력성형 제어

박상원\*, 홍성욱<sup>+</sup>, 최훈석<sup>++</sup>, 장준원<sup>++</sup>  
(논문접수일 2007. 12. 26, 심사완료일 2008. 1. 30)

## Dynamic Modeling and Input Shaping Control of a Positioning Stage

S. W. Park\*, S. W. Hong<sup>+</sup>, H. S. Choi<sup>++</sup>, J. W. Jang<sup>++</sup>

### Abstract

This paper presents the dynamic analysis and input shaping control of a positioning stage. Vibration characteristics of the positioning stage are affected not only by the structural dynamics but also by the servo actuators that consist of the mechanism; driving motor and controller. This paper proposes an integrated dynamic model to accommodate both the structural dynamics and the servo actuators. Theoretical modal analysis with a commercial finite element code is carried out to investigate the dynamic characteristics of the experimental positioning stage. Experiments are performed to validate the theoretical modal analysis and estimate the equivalent stiffness due to the servo actuators. This paper deals with an input shaping scheme to suppress vibration of the positioning stage. Input shapers are systematically implemented for the positioning stage in consideration of its dynamics. The effects of servo control gain are also investigated. The experiments show that input shaping effectively removes residual vibrations and then improves the performance of positioning stage.

**Key Words** : Dynamic Characteristic(동특성), Input Shaping(입력성형), CMM(삼차원측정기), Industrial Crane(산업용 크레인), Natural Frequency(고유진동수), Residual Vibration(잔류 진동)

## 1. 서론

반도체 및 LCD 제조 등과 같은 산업에서 고속 및 정밀 위치결정 스테이지에 대한 요구가 증가되고 있다. 이런 이유로 위치결정 스테이지에 대한 동적 해석과 진동 제어가 필요하게 된다<sup>(1,2)</sup>. 위치결정 스테이지의 진동 특성은 구조 동

역학적 특성뿐만 아니라 구동 모터 및 컨트롤러로 이루어진 서보 액추에이터(Servo Actuator)의 영향을 받는다. 위치결정 스테이지의 동특성을 정확하게 예측하기 위해서는 서보 액추에이터와 구조 동역학에 대한 좋은 모델들이 요구되어진다<sup>(3)</sup>. 본 논문에서는 구조 동역학적 특성과 서보 액추에이터의 특성을 동시에 고려하는 통합적인 동역학적 모델을

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

제안하였다. 유한요소해석 소프트웨어인 ANSYS<sup>®</sup>를 이용한 모드 해석(Modal Analysis)을 통해 실험장치의 동특성을 이론적으로 계산하였다. 또한 이론적인 모델은 서보모터, 구동 메커니즘 그리고 컨트롤러로 이루어진 서보 액추에이터의 동역학적 특성을 포함하는 모델로 재정의가 되었다. 특히, 등가스프링상수(Equivalent Spring Constant)는 서보 액추에이터의 동역학적 특성에 의해 정의될 수 있으며, 본 논문에서는 실험을 통해 이론적인 모델을 검증하고 등가스프링상수를 평가 하였다.

유연 구조(Flexible Structure)에서 불균일 동작으로 인해 발생된 진동을 제거하기 위한 많은 연구가 있었다. 선행 연구결과들로부터 입력성형기법이 유연 구조물의 불균일 동작으로 발생하는 잔류진동을 효과적으로 제거할 수 있는 방법으로 잘 알려져 있다<sup>(4-8)</sup>. 본 논문에서도 위치결정 스테이지의 잔류진동을 제거하기 위한 방법으로 입력성형기법을 적용하였다. 위치결정 스테이지의 동역학적 특성을 고려하여 입력성형기법을 적용할 수 있는 방법을 개발하는 것이 본 논문의 목적 중 하나이다. 본 논문에 사용된 입력성형기(Input Shaper)는 ZV(Zero Vibration)와 ZVD(Zero Vibration and Derivative)이다<sup>(4-6)</sup>. 이들 입력성형기들은 동역학적 해석을 통해 얻은 정보를 바탕으로 설계를 하였다. 또한 서보 게인(Servo Gain) 변화에 따른 효과에 대해서도 연구를 하였다.

## 2. 3축 이송계의 동적 모델링

### 2.1 실험장치

Fig. 1은 본 연구에서 사용된 브릿지형 3축 위치결정 스테이지와 서보 액추에이터들이다. 본 실험장치는 삼차원측정기(CMM, Coordinate Measuring Machine)와 산업용 크레인(Industrial Crane)을 모사할 수 있도록 설계/제작 되었다. 그렇지만 본 논문은 3축 위치결정 시스템에만 국한되어 있다. 3축 위치결정 스테이지는 직교 좌표(Cartesian Coordinates)를 사용하고, 서보계로 구성되어 있다. 삼차원 측정기와 동일한 브릿지형 3축으로 구성되어 있으며, XY 스테이지에는 산업용 크레인의 적재물을 대신할 추와 이를 위/아래로 움직일 수 있는 장치가 탑재되어 있다.

본 실험장치의 3축 모두 AC 서보 모터를 사용 하였으며, 최고 이송 속도는 400mm/s이다. 본 연구에서 사용된 이송 속도는 300mm/s 이다. 산업용 크레인 모델에 사용된 모터는 브레이크가 장착된 속도 가변이 되는 AC 모터를 사용 하였다. X축과 Y축은 삼차원 측정기와 동일한 모션특성을 만들기 위해 내부에 철심이 들어있는 타이밍 벨트를 사용하

였으며, 본 실험 장치에 사용된 모든 모터는 제어 박스의 스위치를 이용하여 실시간으로 컨트롤이 가능하도록 되어 있다. 모션 컨트롤러는 DSP 보드를 사용하였으며, 서보 모터의 제어 모드는 속도로 설정이 되어있다. 또한 모션에 관련된 인자(Parameter), 특히 제어이득은 컨트롤에서 조절이 가능하며, 모든 특성 변수(속도, 가속도, 위치 등)들에 대한 정보를 실시간으로 모니터링이 되도록 소프트웨어를 설계하였다. 또한, 모든 제어 및 데이터 획득은 이 소프트웨어를 통해 이루어지며 그 구성은 Fig. 2와 같다.

### 2.2 동적 모델링 및 동특성 분석

Fig. 3은 동적 모델링을 통한 결과를 보여주고 있으며, 특히 최초 4개의 모드 형상에 대해 나타내고 있다. 1차 모드의 진동 방향은 Y축과 평행한 방향인 반면 2차 모드는 X축과 평행한 방향이다. 1차 모드와 2차 모드는 강제와 동일한 진동 형태를 가진다. Fig. 3은 또한 3차 모드와 4차 모드에 대해서도 나타내고 있다. 3차 모드는 Z축의 상부가 Y축과 평행한 방향으로 흔들리고, 4차 모드는 X축과 평행한 방향으로 흔들린다. 반면 3차 모드와 4차 모드는 프레임의 유연성에

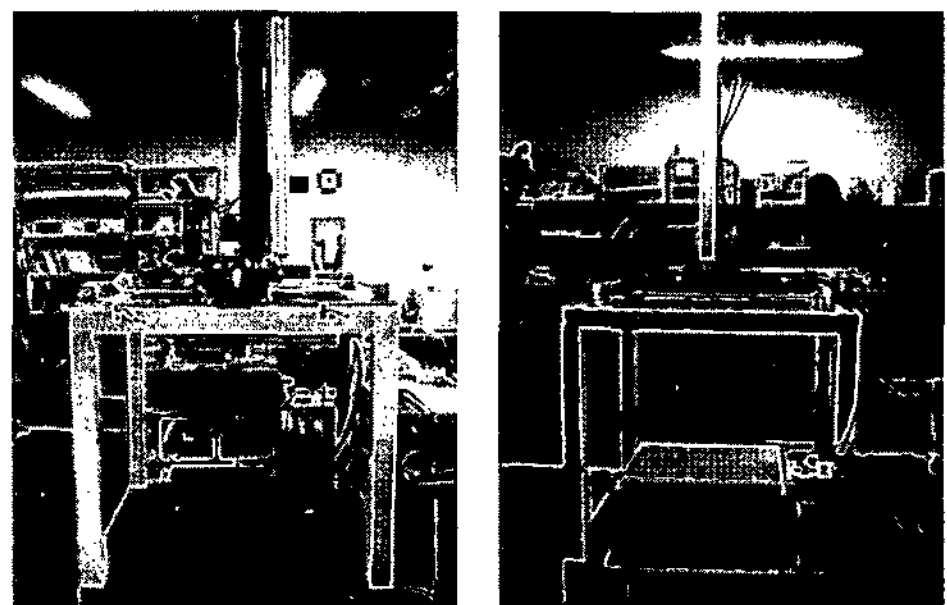


Fig. 1 Experimental Apparatus

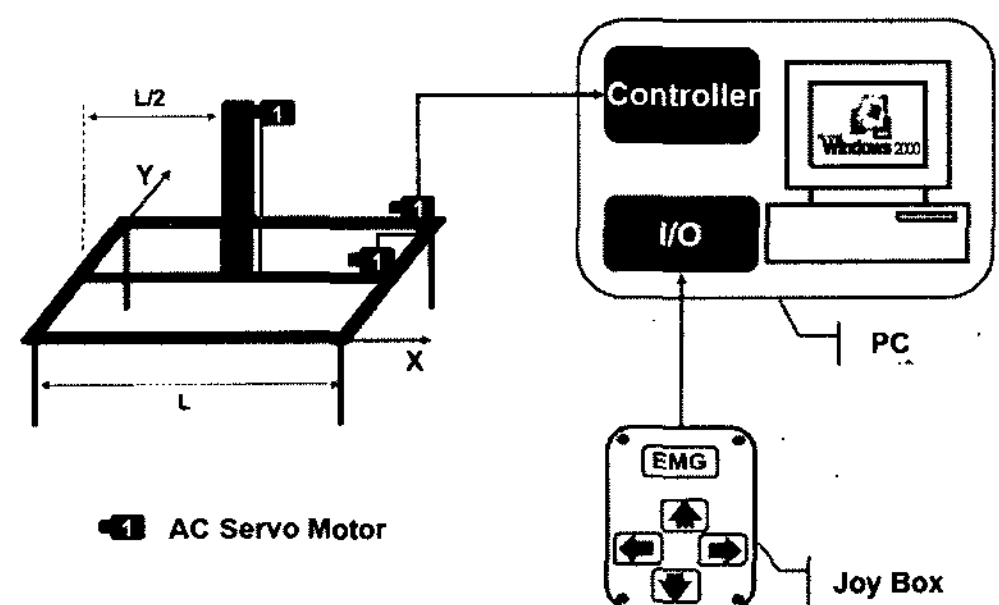


Fig. 2 Schematic diagram of system and the coordinates system

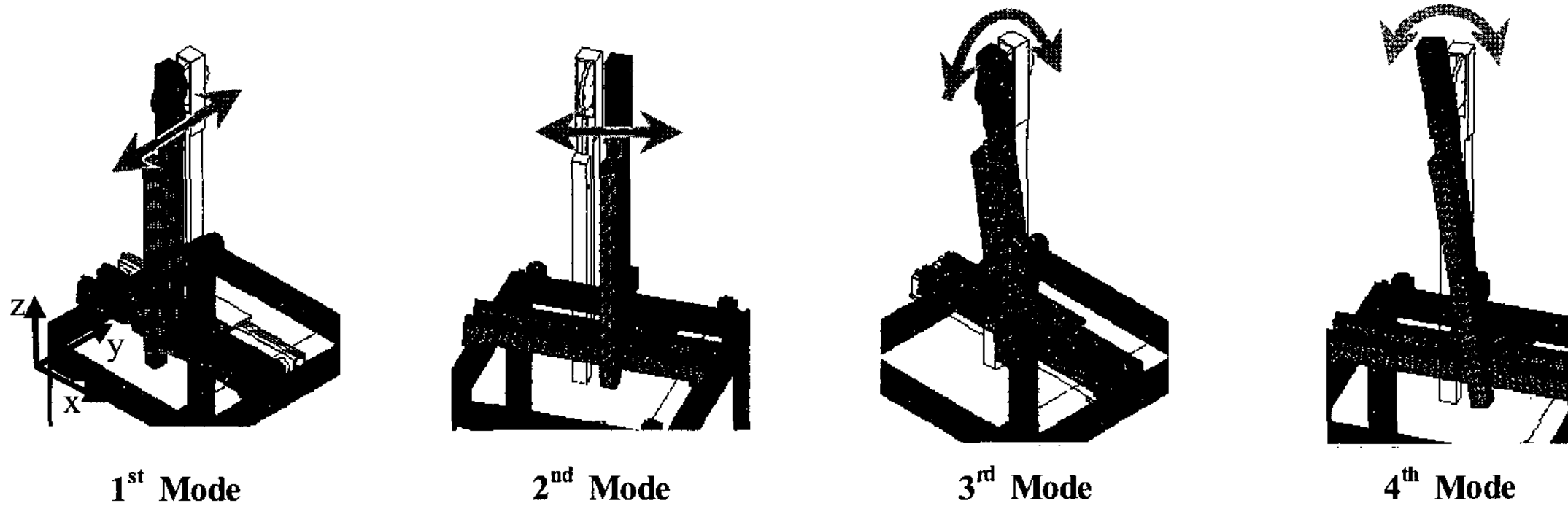


Fig. 3 The first four mode shapes of the system

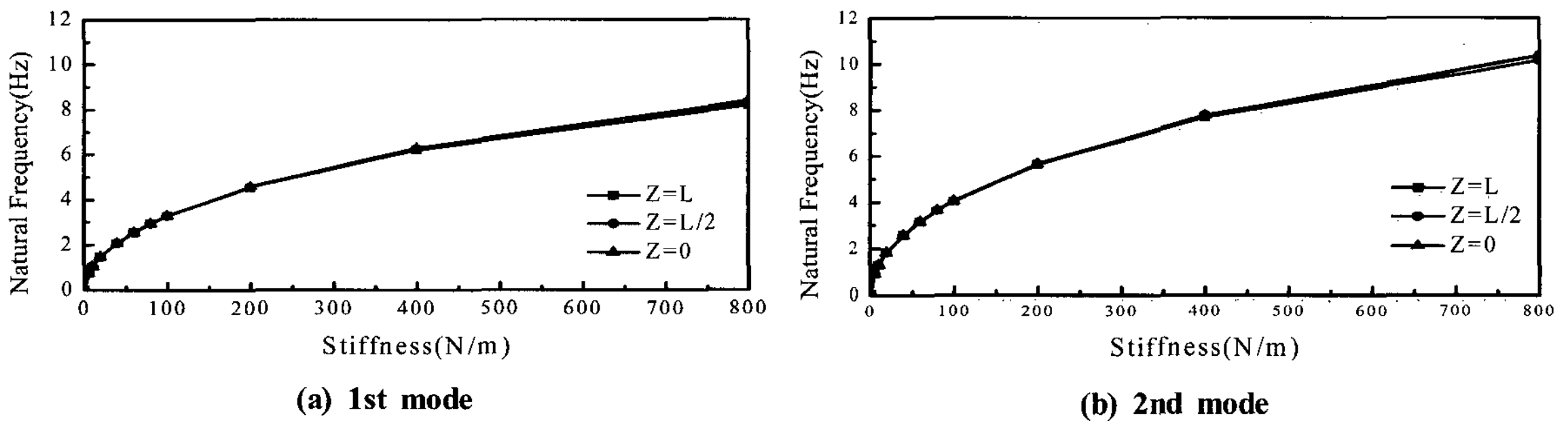


Fig. 4 Comparison of natural frequencies with equivalent stiffness varied

지배적으로 영향을 받지만 등가강성(Equivalent Stiffness)에는 거의 영향으로 받지 않는다.

유한요소해석 소프트웨어인 ANSYS<sup>®</sup>를 이용하여 본 논문에서 사용된 실험 장치를 모델링하고 실험장치 구조물에 대한 고유진동수를 계산하였다. 본 논문에서 사용된 실험 장치는 크게 두 부분으로 나눌 수 있다. 속이 빈 사각 스틸 파이프로 이루어진 프레임 부분과 알루미늄의 강도를 높이기 위해 후처리된 3축 위치결정 스테이지 부분이 그것이다. 또한 서보 모터 되먹임 제어에 의한 강성을 집중 스프링 상수  $k$ 를 도입하여 모델링 하였으며, 스프링 상수  $k$ 를 0.01 부터 800(N/m) 까지 변화 시키면서 1차 모드와 2차 모드에 대한 각각의 고유진동수에 대한 변화를 알아보았다. 또한, 수직축(Z축)의 위치에 대한 구조물 변화를 고려하여 수직축의 위치를 변화 시키면서 특성변화를 계산하였다. Z축의 총 행정  $L$ 은 600 mm이고 계산된 위치는 0,  $L/2$ ,  $L$  이다. Z축의 원점 위치는 Z축이 XY 스테이지와 만나는 부분이다.

Fig. 4는 Z축의 위치와 강성의 변화에 대한 유한요소 계산 결과들 중 1차 모드와 2차 모드에 대한 결과를 비교한 데이터이다. Fig. 4의 결과에서 나타나는 것처럼 1차 모드와 2차

모드 모두 Z축의 위치에 따른 변화는 미미하며, 서보계의 강성의 변화에 의해 고유 진동수가 변화함을 알 수 있다. 상대적으로 서보계의 강성이 낮아 Fig. 3의 결과처럼 1차 모드와 2차 모드에서 수직축 전체가 강체처럼 움직이는 형태의 진동모드를 보이고 있으며 수직축 및 구조물의 탄성효과를 3차 이상의 모드에서부터 나타나기 시작한다. 1차 모드와 2차 모드에 비해 3차 모드와 4차 모드가 Z축 암의 위치에 영향을 받는다. 그렇지만 3차 모드와 4차 모드는 1차 모드와 2차 모드에 비해 중요하지 않으므로 고려하지 않아도 된다. 따라서 입력성형기법을 위해 사용되어지는 고유진동수는 1차 모드의 고유진동수이며, 이것은 실제 시스템의 동특성을 지배하는 중요한 인자이다.

Fig. 5는 유한요소 해석에 의해 계산된 1차부터 4차 모드까지의 고유진동수를 서보강성 및 Z축의 위치 변화에 따른 차이에 대해 비교한 그림이다. Fig. 5의 (a)는 Z축이 원점(0)에 있을 때이고 (b)는 중간위치( $L/2$ ), 그리고 (c)는 가장 위( $L$ )에 있을 때이다. 1, 2차 모드와 달리 3, 4차 모드는 Z축의 위치에 의해서도 비교적 큰 영향을 받음을 알 수 있다. 특히 Fig. 5 (a)와 Fig. 5 (c)를 비교해 보면 그 경향이 더욱 확연

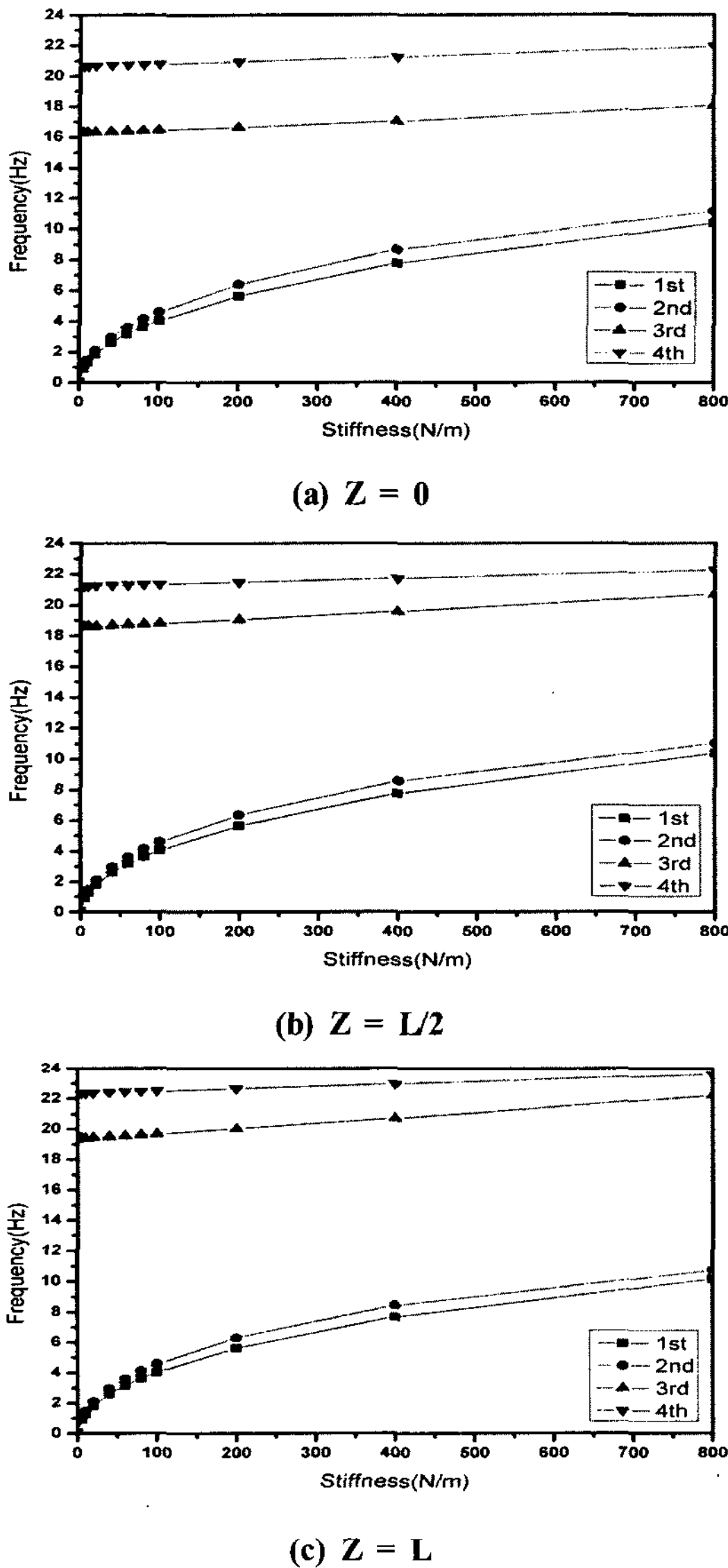


Fig. 5 Comparison of natural frequencies with Z axis position varied by 0, L/2, L

히 나타나게 되는데 3, 4차 모드에서 Z축의 위치가 L일 때 강성이 증가함에 따라 서로 근접해가는 경향을 볼 수 있다. 반면 Z축이 0의 위치에 있을 경우에는 3, 4차 모드의 고유진동수 차이가 줄어들지 않는다. 또한 Z축의 위치가 L일 경우 강성이 매우 커지면 1차 모드와 2차 모드, 그리고 3차 모드와 4차 모드가 서로 교차하게 된다. 고유 진동수 크기는 Z축의 위치가 0에서 L로 이동할수록 높아짐을 알 수 있다.

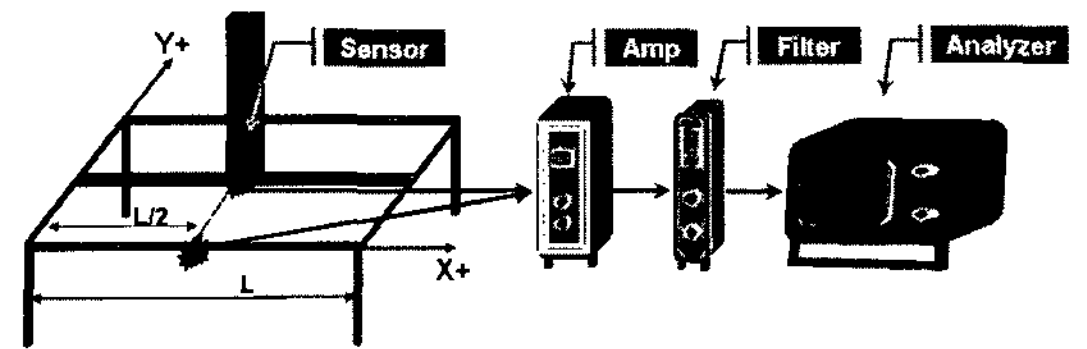
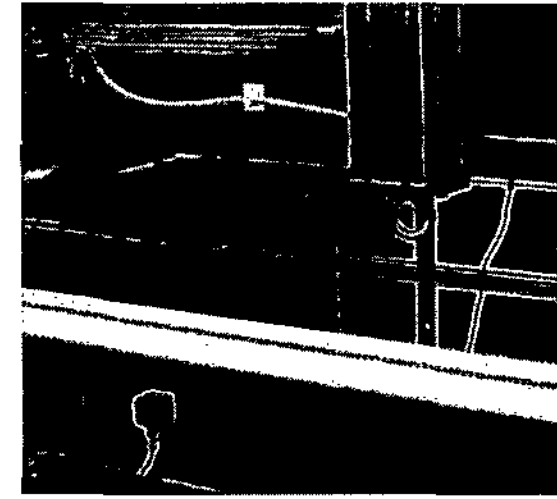


Fig. 6 Schematic diagram of measuring mechanism

Table 1 Measured fundamental natural frequencies with the servo gain changed and the associated equivalent stiffness

Servo Gain	Natural Frequency(Hz)	Estimated Stiffness(N/m)
8	6.50	274
10	6.70	293
20	7.00	323
30	7.33	358
40	7.47	375

### 2.3 동특성 측정

Fig. 6과 같이 가속도 센서 및 신호 분석기를 사용하여 XY 스테이지에 대한 고유진동수를 측정 하였다. 실험 장치 구조물에 대한 진동 측정은 석정반위에 고정된 프레임(Frame)의 X, Y 축 방향에서 측정이 이루어졌다. 측정된 위치는 Fig. 6과 같이 X, Y축 모두 L/2이다. 실제 시스템에서 서보 모터의 강성값을 변화시키기 위해 서보계의 게인들을 변화시키면서 고유진동수를 측정하였고 이를 유한요소해석 결과의 고유진동수와 비교하여 서보강성 값을 추정 하였다.

등가강성은 이론적으로 계산된 결과와 측정결과를 비교함으로써 평가할 수 있다. Table 1은 고유진동수의 관계를 이용하여 얻어진 서보 게인과 등가강성의 상관관계를 나타내고 있다. 서보 게인과 등가강성 사이의 관계는 Fig. 7에서 보여지는 것처럼 거의 선형에 가깝다. 여기에서 서보 게인(K<sub>v</sub>)은 컨트롤러의 속도 루프 게인(Velocity Loop Gain)이기 때문에 Fig. 7과 같은 결과는 당연하다고 할 수 있다. 권

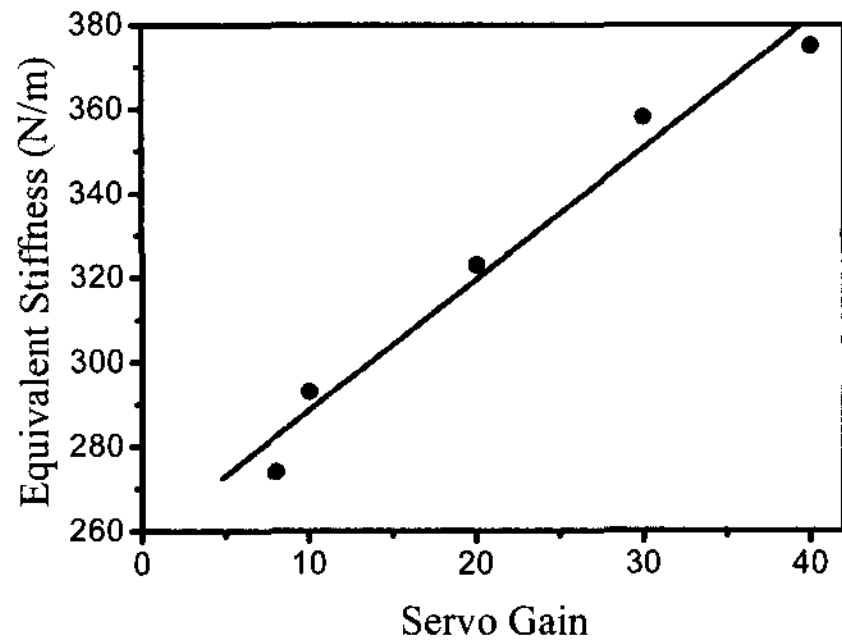


Fig. 7 Equivalent stiffness vs. servo gain

트롤로의 속도 루프 게인( $K(s)$ )은 식 (1)과 같이 정의할 수 있으며, 여기에 사용된  $T_i$ 는 적분 시정수이다.

$$K(s) = K_v \left( 1 + \frac{1}{T_i s} \right) \quad (1)$$

그렇지만 등가강성은 서보 게인 뿐만 아니라 XY 스테이지에 사용된 타이밍 벨트(Timing Belt)와 감속기(Reducers)에도 영향을 받는다. 선형회귀분석(Linear Regression Analysis)을 통해 등가강성( $K$ )은 식 (2)와 같이 표현할 수 있다.

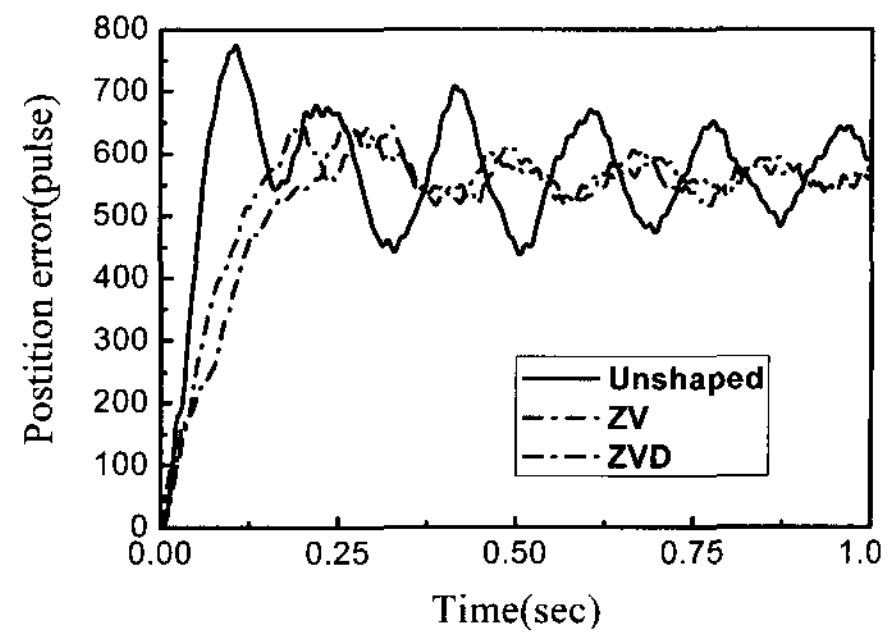
$$K = 257.68 + 3.10K_v \quad (2)$$

1차 모드와 2차 모드의 고유진동수만 고려할 때 프레임 탄성은 앞으로의 해석에서 무시할 수 있을 정도로 충분히 강체인 반면 서보 게인은 낮은 모드의 고유진동수들에 지배적으로 영향을 미치게 된다. 비록 전체 시스템이 프레임 구조, 기계장치 그리고 서보 게인에 영향을 받을지라도 최초 두 개의 고유진동수들은 서보 게인의 함수로 표현할 수 있다. 다음은 유연 구조의 불균형 운동에 의해 야기된 잔류진동을 입력성형기법을 사용하여 제거하는 방법에 대해 논의하였다. 지금까지의 얻어진 결과들은 시스템에 입력성형기법을 적용하기 위해 사용되어 진다.

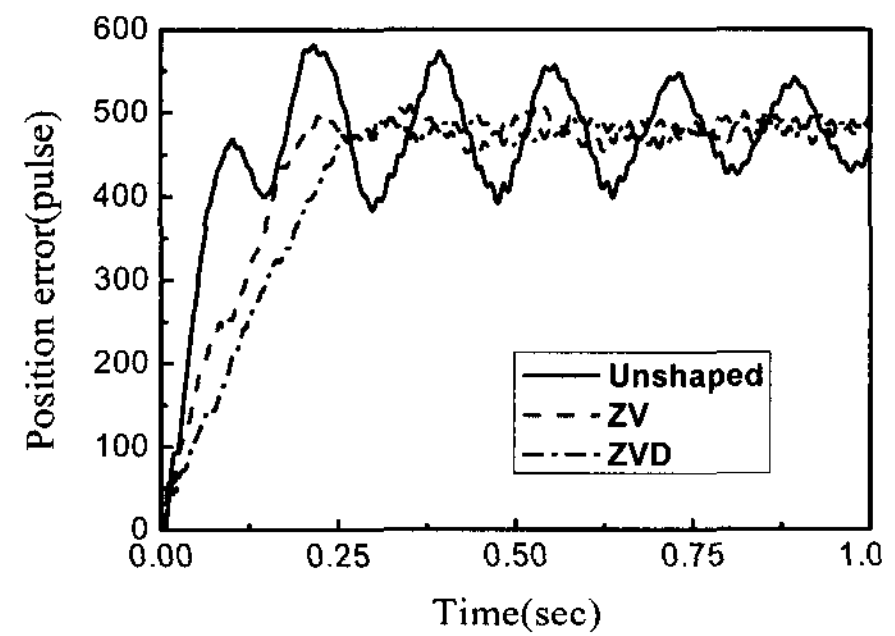
### 3. 입력성형에 의한 동특성 개선

#### 3.1 입력성형 적용 방법

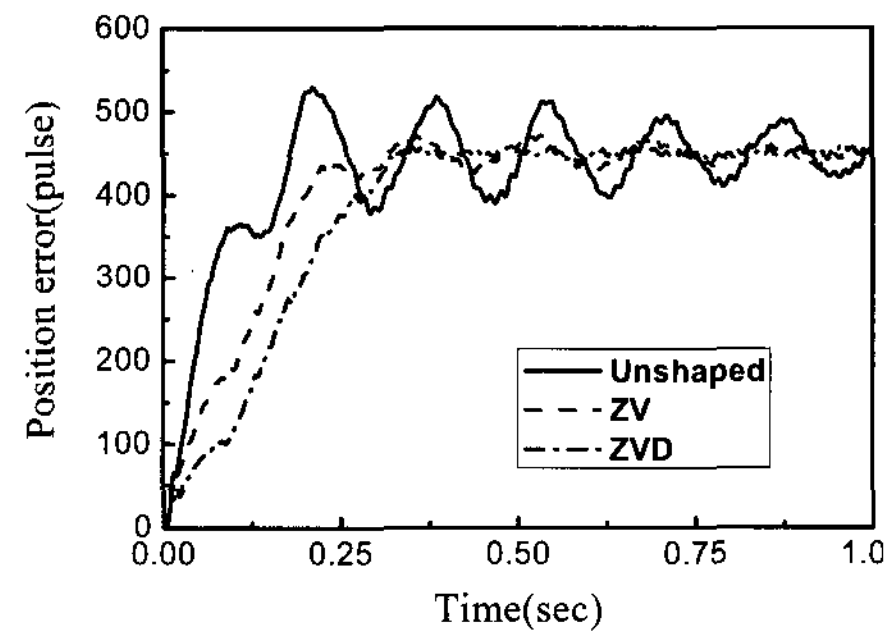
본 논문에서는 초기에 생성된 기준 명령과 입력성형기를 순차적으로 컨벌루션 연산을 수행하여 생성된 수정된 기준 명령을 사용하였다. 실시간 입력성형 기법에 대해서는 선행 연구<sup>(8)</sup>에 나타나있다. 이와 같은 입력성형 과정을 실시간으로 적용함으로써 현장 작업자에 의해 임의로 입력된 명령에



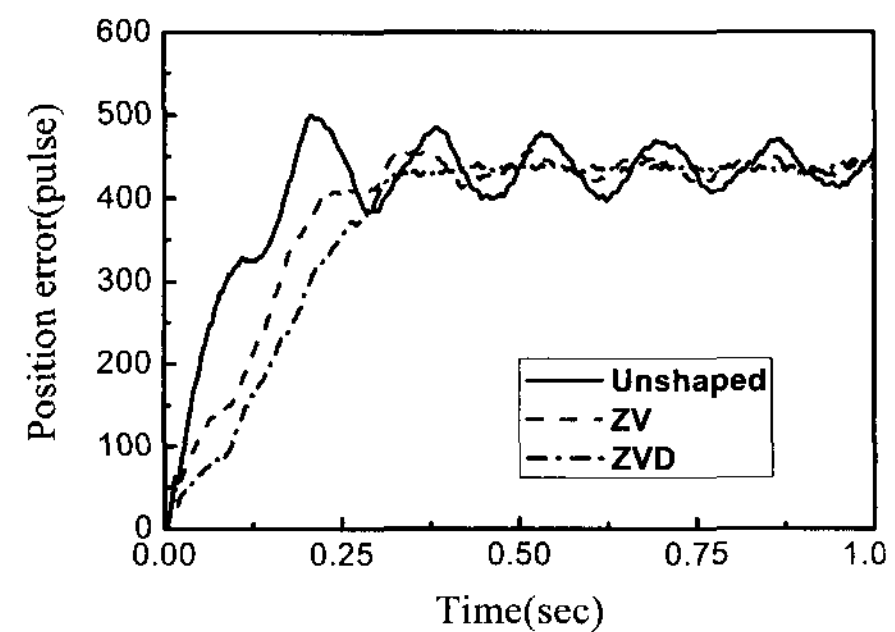
(a) Servo Gain = 10



(b) Servo Gain = 20



(c) Servo Gain = 30



(d) Servo Gain = 40

Fig. 8 Comparison of the position errors without and with input shaping using an identical input shaper

의한 이송시에도 잔류진동을 최소화할 수 있는 이송이 가능하도록 하였다.

ZV 입력성형기는 2개의 임펄스를 가지고 있는 반면 ZVD 입력성형기는 3개의 임펄스를 가지고 있어 상승시간(Rising Time)이 더 길어지게 된다<sup>(8)</sup>.

### 3.2 위치결정 스테이지의 정밀도 평가 및 개선

시스템의 정밀도뿐만 아니라 진동 특성을 향상시키기 위해 구동 레일에 대해 평탄도 오차 보상(Flatness error compensation)을 하였다. 조정전에 비하여 조정후의 평탄도가 대략 66% 정도 향상 되어, 이송정밀도가 높아졌을 뿐만 아니라 이송의 안정성이 개선되었다.

### 3.3 입력성형기법 실험 및 고찰

입력성형 방법 중 ZV와 ZVD<sup>(4)</sup>를 이용한 경우와 이를 적용하지 않았을 때의 이송계 및 프레임의 진동을 비교하는 방식으로 입력성형 효과를 검토하였다. 이송계 및 프레임의 진동을 측정하기 위해 각각 서보계의 피드백 신호를 통한 위치오차와 가속도계의 신호를 이용하였다. 가속도 센서의 부착위치는 Z축의 원점 위치에 X축 방향으로 설치하였다.

측정은 실제로 컨트롤박스에서 동일한 사람이 입력성형을 적용했을 경우와 그렇지 않은 경우로 구분해서 연속적으로 이루어졌다. 가속 및 감속시간은 400ms 이고, 고유진동수는 6.25Hz, 최고 속도는 300m/s이다.

Fig. 8은 입력성형기법을 적용한 경우와 그렇지 않은 경우에 대해 위치오차(Command Signal - Actual Signal)를 나타내고 있다. Fig. 8은 서보 게인이 40일 때의 입력성형기를 모든 경우에 대해 적용한 결과이고, 입력성형기의 종류에 상관없이 서보 게인이 증가함에 따라 위치오차 즉, 잔류진동이 줄어들음을 알 수 있다. 이것은 서보 게인을 증가 시키면 시스템의 고유진동수(Natural Frequency)와 감쇠비(Damping Ratio)가 증가하기 때문에 일반적으로 위치 오차는 서보 게인을 증가 시킬수록 줄어들게 된다. 입력성형기의 종류에 따른 결과를 비교해 보면 서보 게인의 변화에 상관없이 ZVD가 ZV보다 잔류진동을 제거하는데 더 효과가 있음을 알 수 있다. 하지만, 시스템의 상승시간은 ZV가 더 짧음을 알 수 있다.

Fig. 9는 실험장치의 프레임에 장착한 가속도계로부터 획득한 가속도 신호를 비교한 것이다. 가속도계의 설치 위치와 데이터 획득 방법은 Fig. 6에서 언급한 것과 동일하며, 입력

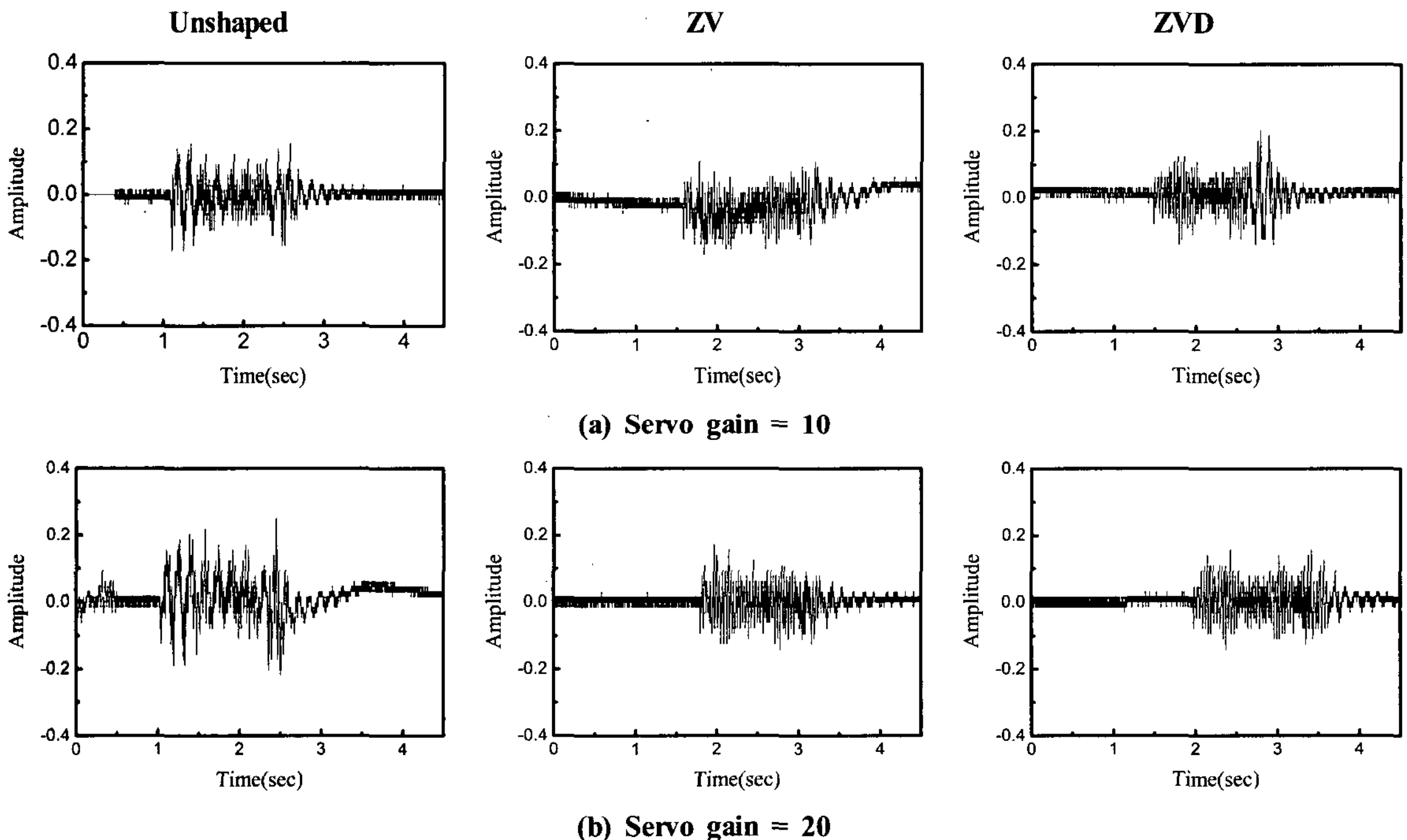


Fig. 9 Comparison of accelerations measured at the frame with and without input shaping

성형기법이 프레임의 잔류진동 억제에도 효과적임을 실험결과로부터 알 수 있다. 비록 입력성형기법을 적용하였지만 높은 고유진동수는 여전히 잔류함을 알 수 있다. 하지만, 높은 고유진동수는 시스템의 정밀도에 영향을 거의 미치지 않으므로 무시할 수 있다.

#### 4. 결론

본 논문은 3축 위치결정 스테이지와 주변장치들에 대해 동역학적 해석과 입력성형기법을 이용한 진동 제어에 관해 고찰해 보았다. 이를 위해, 동역학적 해석은 구조적인 동역학뿐만 아니라 서보 액추에이터의 등가강성을 포함한 유한 요소모델에 대해 수행하였으며, 동역학적 모델 및 서보 액추에이터의 대한 등가강성에 대해 실험적으로 평가함으로써 다음과 같은 결과를 얻었다.

- (1) 3축 위치결정 스테이지에 대한 동역학적 모델링은 등가강성 의한 서보계 모델링에 유용하다.
- (2) 시스템의 1차 모드는 병진 운동 양상을 나타내며 전체 시스템의 진동에 지배적인 영향을 미치므로 입력성형기법을 적용하기 위한 시스템의 대표 고유진동수로 사용할 수 있다.
- (3) 입력성형기법에 대한 실험을 통해 입력성형기법이 위치결정 스테이지의 잔류진동 제거에 효과적이다.
- (4) 두 개의 입력 성형기(Input Shaper) - ZV와 ZVD - 를 위치결정 스테이지의 잔류진동제거를 위해 사용하였으며 제안된 동역학적 모델이 입력 성형기 설계에 유용하게 활용할 수 있다.

#### 참고 문헌

- (1) Reeds, J., et. al, 1985, "High Speed Precision XY Stage," *Journal of Vacuum Science and Technology B*, Vol. 3, pp. 112~116.
- (2) Tseng, Y. T. and Liu, J. H., 2003, "High-Speed and Precise Positioning of an XY Table," *Control Engineering Practice*, Vol. 11, pp. 357~365.
- (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) Singhose, W. E. and Seering, W., 2007, *Command Generation for Dynamic Systems*, Lulu.com.
- (5) Meckl, P. H. and Seering, W. P., 1990, "Experimental Evaluation of Shaped Inputs to Reduce Vibration for a Cartesian Robot," *ASME Journal of Dynamic Systems, Measurement and Control*, Vol. 112, pp. 159~165.
- (6) Singer, N. C., 1989, "Residual Vibration Reduction in Computer Controlled Machines," *MIT Artificial Intelligence Laboratory Technical Report Number AITR-1030*, MIT Artificial Intelligence Lab.
- (7) Park, S. W., Hong, S. W., Choi, H. S., and Singhose, W., 2007, "A Study on Dynamic Performance of Precise XY Stages Using Real-Time Input Shaping," *The 8th International Symposium on Measurement Technology and Intelligent Instruments*, Sendai, Japan.
- (8) Park, S. W., Hong, S. W., Choi, H. S., and Singhose, W., 2007, "Discretization Effects of Real Time Input Shaping in Residual Vibration Reduction," *Transactions of the Korean Society of Machine Tool Engineers*, Vol. 16, No. 4, pp. 71~78.