

디스플레이 반송로봇 잔류진동 저감방안

문성배*·임경화**†

*한국기술교육대학교 대학원 메카트로닉스공학과

**† 한국기술교육대학교 메카트로닉스공학부

Method of Reducing Residual Vibration at the LCD Transfer Robot

Sung Bae Moon* and Kyung-Hwa Rim**†

*Graduate Department of Mechatronics Engineering, Korea University of Technology and Education

**† School of Mechatronics Engineering, Korea University of Technology and Education

ABSTRACT

In the display industry, the residual vibration of the transfer robot can increase the process time and cause the breakage of the glass substrate, which is critical to productivity of display manufacturing. In this paper, the natural frequencies of transfer robot are analyzed by finite element method. On the basis of the analyzed data, we investigated the response characteristics of input shaping control with or without the glass presence on the hand of the transfer robot using MATLAB program, and compared with the current response characteristics of input shaping control applied to the industry. Based on this, we suggest an optimal residual vibration control method for the practical application in display industry.

Key Words : Input Shaping Method, Residual Vibration, LCD Transfer Robot

1. 서 론

액정표시장치(LCD) 기술을 이용한 평판 디스플레이 산업은 2000년대 이후 꾸준히 발전하고 있다. 현재 TV 시장의 수요는 50인치를 넘어서면서 대형 디스플레이 생산이 주력 제품으로 자리 잡고 있으며, 실내 외에서 소비자들에게 정보를 전달하기 위한 대형 DID (Digital Information Display) 제품 수요 또한 꾸준히 증가하고 있다. 기존 평판 디스플레이와 비교해 두께가 얇고, 가볍고, 저전력 기능을 갖춘 제품에 대한 소비자의 선호도가 증가함에 따라 초박막 제품 개발이 꾸준히 이루어지고 있으며, 평판 디스플레이의 근본적인 시야 왜곡 현상을 최소화해 선명한 화질과 몰입감을 향상하고자 하는 기술들이 지속해서 개발되고 있다.

이러한 혁신기술을 통한 제품개발은 새로운 재료를 투입하고 공정 기술을 추가하게 되어 반송시간과 반송 횟수의 증가로 인한 생산성 저하의 문제점을 안고 있다.

또한 유리기관의 대형화로 디스플레이 장비, 반송 물류, 반송 로봇이 대형화되고 설비의 대형화는 부하 상승으로 인해 설비 유지관리에 많은 어려움이 있다. 특히 디스플레이 반송로봇의 경우 반송동작 중 발생하는 잔류진동으로 유리기관이 파손되는 문제가 많이 발생하고 있다. 이를 최소화하기 위해 산업현장에서 로봇 속도를 허용최대속도의 80% 내외 수준으로 감소시켜 운영하기도 하고, 로봇의 구분 동작마다 진동이 멈출 때까지 안정화 시간을 적용하여 해결하지만, 이로 인해 제조생산성이 떨어지는 문제점이 발생한다.

Fig 1은 현재 8세대 디스플레이 산업 현장에 적용된 LTR-AD8F10모델의 반송 로봇이고, Table 1은 8세대 디스플레이 산업에 적용 중인 유리기관의 사양을 나타낸다.

†E-mail: rim@koreatech.ac.kr

8세대 디스플레이 반송로봇은 크기 2200x2500 mm, 질량 7-10 kg 내외의 유리기판을 지속 반복적으로 운반한다. 따라서 로봇 잔류진동을 저감하기 위해서는 로봇 핸드(Hand)에 유리기판을 탑재하고 있는 경우와 없는 경우의 상황을 모두 고려하여야 한다. 즉 유리기판 질량에 따른 고유진동수 변화로 디스플레이 반송로봇의 진동제어는 서로 다른 두 개의 고유진동수를 가진 동적시스템을 제어하여야 하는 상황으로 고려해야 한다.

본 논문에서는 8세대 디스플레이 산업현장에 적용된 반송로봇의 핸드(Hand) 위 유리기판 유/무에 따른 고유진동수를 유한요소기법(FEM)을 통해 파악하였고, 이를 기반으로 입력성형기법(Input Shaping Method)을 적용하여 잔류진동 시뮬레이션을 통해 현재 산업현장에 적용된 기존방식과 개발된 입력성형방식을 비교하여 안정적이고 빠른 잔류진동 제어방안을 제시하였다.



Fig. 1. 8th Display Transfer Robot.

Table 1. Features of the 8th LCD Substrate

	Substrate	
Size	2200 x 2500 mm	
Thickness	0.5 mm	0.7 mm
Mass	7 kg	10 kg

2. 입력성형기법

잔류진동을 저감하기 위한 입력성형제어기법은 1958년대 Smith의 포지캐스트(Posicast) 제어에서 제안되었다. [1] 이 방식은 입력을 두 단계로 나누어 입력함으로써 잔류진동이 없는 기준입력을 얻었다. 하지만 이 방식은 시스템 오차에 대한 강인성이 나쁘고, 진동 모드가 2개 이상인 경우에는 적용할 수 없는 단점이 있다.

이후 1990년 Singer는 포지캐스트 제어 방식을 발전시켜 시스템의 임펄스 응답을 이용한 입력성형기법을 개발하였다. [2] 이 방식은 연속된 임펄스가 시스템에 가해지면 각각의 임펄스 응답이 서로 중첩되어 진동이 서로 상쇄되는 현상을 이용하였다. 이렇게 얻어진 임펄스 열을 주어진 입력과 컨볼루션(Convolution) 적분하여 시스템의 기준입력으로 가하는 방식이다. 이때 임펄스의 개수를 증가시키면 시스템의 고유진동수, 감쇠비 오차에도 강인하게 진동을 제어할 수 있으나 임펄스 열 증가로 인한 정착시간이 증가되는 문제점이 있다.

이러한 정착시간 지연 문제를 개선하기 위해 음의 임펄스 열을 이용한 입력성형기법을 연구하였고 [3], 반도체 웨이퍼 이송 장비 및 LCD 반송 로봇에 입력성형 기법을 적용한 연구도 진행되었다. [4,5]

2.1 입력성형기 설계

입력성형기법의 원리는 시스템의 임출력 특성에 근거하여 입력을 여러 단계로 나눔으로써 자체 입력에 의한 진동상쇄 효과를 얻도록 하는 방법이다. Fig 2와 같이 고유진동수가 1Hz인 시스템에 임펄스 A1 크기의 입력을 인가한 이후, 고유주기의 절반인 0.5초 시점에 A2 크기의 임펄스를 인가하여 두 임펄스에 대한 입력이 서로 중첩되어 잔류진동이 사라지게 하는 방법이다.

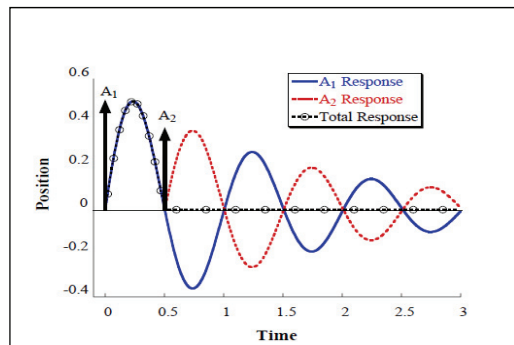


Fig. 2. Superposition of impulse responses.

입력을 $U(s)$, 출력을 $Y(s)$ 로 하는 일반적인 2차 진동시스템의 전달함수 $G(s)$ 는 다음과 같다.

$$G(s) = \frac{Y(s)}{U(s)} = \frac{\omega_n^2}{s^2 + 2\zeta\omega_n s + \omega_n^2} \quad (1)$$

ζ : 시스템 감쇠비

ω_n : 시스템 고유진동수

이 시스템에 A 의 임펄스가 $t=t_0$ 순간에 가해지는 응답을 시간에 대한 응답식으로 나타내면 식 (2)와 같다.

$$y(t) = [A \frac{\omega_n}{\sqrt{1-\zeta^2}} e^{-\zeta\omega_n(t-t_0)}] \text{Sin}(\omega_n \sqrt{1-\zeta^2}(t-t_0)) \quad (2)$$

이 식에 N 개의 임펄스가 순차적으로 가해지면 응답의 진폭은 식 (3)과 같다.

$$A_{amp} = \sqrt{(\sum_{i=1}^n B_i \text{Sin} \phi_i)^2 + (\sum_{i=1}^n B_i \text{Cos} \phi_i)^2} \quad (3)$$

여기서

$$\phi_i = \omega_n \sqrt{1-\zeta^2} t_i$$

$$B_i = A_i \frac{\omega_n}{\sqrt{1-\zeta^2}} e^{-\zeta\omega_n(t_n-t_i)}$$

이다.

- n : 임펄스 개수
- A_i : i 번째 임펄스 크기
- t_i : i 번째 임펄스 인가시간
- t_n : 마지막 임펄스 인가시간

마지막 임펄스 인가시간인 t_n 이후에는 진동의 진폭이 없어야 하므로, 식 (3)의 A_{amp} 는 0이 되어야 한다. 따라서 괄호 안의 두 항이 0이 되어야 하므로 식 (4), 식 (5)를 만족하여야 한다.

$$\sum_{i=1}^n A_i e^{-\zeta\omega(t_n-t_i)} \sin(\omega \sqrt{1-\zeta^2} t_i) = 0 \quad (4)$$

$$\sum_{i=1}^n A_i e^{-\zeta\omega(t_n-t_i)} \cos(\omega \sqrt{1-\zeta^2} t_i) = 0 \quad (5)$$

이때 t_n A_i 의 미지수를 구하기 위해 첫 번째 임펄스 인가 시간은 0, 시스템의 입력의 임펄스의 합이 1이 되는 기준으로 입력성형기법이 설계된다.

$$t_1 = 0$$

$$\sum_{i=1}^n A_i = 1$$

$N=2$ 일 때 임펄스 크기와 입력시간은 다음과 같다.

$$t_1 = 0, t_2 = \frac{\pi}{\sqrt{1-\zeta^2}}$$

$$A_1 = \frac{1}{1 + \text{EXP}(\frac{-\zeta\pi}{\sqrt{1-\zeta^2}})}$$

$$A_2 = 1 - \frac{1}{1 + \text{EXP}(\frac{-\zeta\pi}{\sqrt{1-\zeta^2}})}$$

Fig. 3과 같이 임펄스 2개로 잔류진동을 제어하는 방식을 ZV(Zero Vibration) 입력성형기법이라 한다.

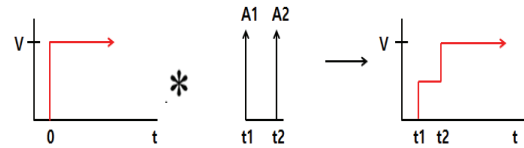


Fig. 3. ZV Input Shaping for step input.

2.2 강인한 입력성형기

ZV 입력성형기 설계시 시스템의 고유진동수와 감쇠비를 정확히 일치시키지 않으면 오차에 민감한 특성을 나타낸다. 이러한 문제점을 보완하기 위해 임펄스 열을 증가시켜 시스템 고유진동수의 오차에 대해서도 강인하게 진동을 줄일 수 있는 제어기를 ZVD (Zero Vibration Derivative) 입력성형기법이라 한다.

ZVD 입력성형기법은 $N=3$ 으로 임펄스 열의 개수를 늘리기 위해 식 (4), 식 (5)의 고유주파수에 대한 미분 값이 0이 된다는 조건을 추가하여 설계되었다. 조건식은 식 (6), 식 (7)과 같다.

$$\sum_{i=1}^n A_i t_i e^{-\zeta\omega(t_n-t_i)} \sin(\omega \sqrt{1-\zeta^2} t_i) = 0 \quad (6)$$

$$\sum_{i=1}^n A_i t_i e^{-\zeta\omega(t_n-t_i)} \cos(\omega \sqrt{1-\zeta^2} t_i) = 0 \quad (7)$$

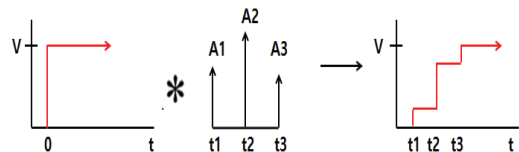


Fig. 4. ZVD Input Shaping for ramp input.

시스템 오차에 대해서 더 강인한 잔류진동 제어를 위해 고유진동수에 대한 2번 미분 값이 0이 된다는 조건을 추가

하여 N=4인 입력성형기법을 ZVDD(Zero Vibration Derivative Derivative) 입력성형기법이라 한다. 미분 조건을 추가하여 임펄스 열을 늘릴수록 시스템 오차에 대해 강인하게 잔류진동을 제어할 수 있으나 임펄스 열 증가로 인한 정착시간(Settling Time)은 느려지는 단점을 가지고 있다.

2.3 다중모드 입력성형기법

ZV, ZVD, ZVDD 입력성형기법은 1자유도계 동적시스템인 경우에 대해서 잔류진동을 제어하는 방식이다.

고유진동수가 2개 이상인 다자유도계 시스템의 경우 각각의 고유진동수에 대해 따로 임펄스 열을 계산하여 계산된 임펄스 열을 컨볼루션 적분한다. 이것을 입력과 다시 컨볼루션하여 성형된 입력을 시스템에 인가하여 잔류진동을 제어하는 방법을 다중모드 입력성형기법이라 한다.

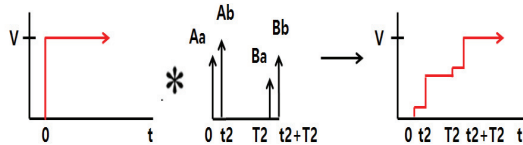


Fig. 5. Multi-Mode input shaping for step input.

지금까지 정리한 입력성형기법은 임펄스 열을 증가시킬수록 시스템 오차에 대한 강인성이 좋아진다. 하지만 시스템에 임펄스가 모두 적용되어야 정상상태가 되므로, 임펄스 열 증가는 정착시간(Settling Time)이 지연되는 문제점을 가지고 있다. 따라서 강인성과 응답속도의 두 가지 상충조건을 적절한 비중으로 적용하여 시스템 제어설계가 되어야 한다.

3. 시뮬레이션

본 연구에서는 8세대 디스플레이 반송 로봇시스템에서 핸드(Hand) 유연성의 특성만을 고려하여, 1자유도계 모델로 단순화하여 잔류진동 특성을 분석하였다.

3.1 유한요소기법을 통한 고유진동수 해석

디스플레이 반송 로봇의 핸드 고유진동수를 해석하기 위하여 상용패키지인 ANSYS프로그램을 활용하였다.

로봇 핸드(Hand)는 Fig. 6과 같이 본체(Bracket)에 핑거(Finger)가 5개 고정된 외팔보 형태를 가지고 있고, 유리기판은 핑거(Finger)에 뚫려 있는 진공구멍(Vacuum Hole)에 의해 고정된다.

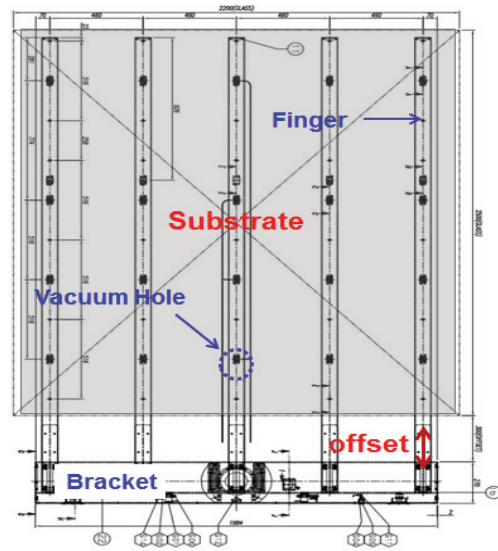


Fig. 6. Robot hand drawing.

핸드(Hand)의 세부 사양은 Table2와 같다.

Table 2. The robot hand features

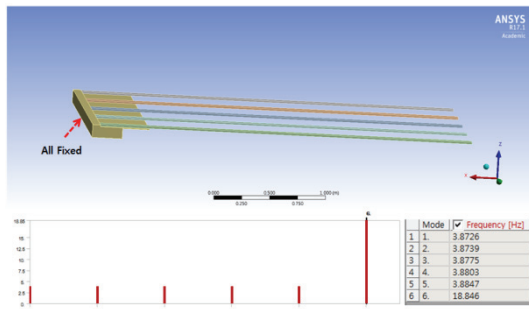
Robot Hand	
Finger Length	3342 mm
Width	80 mm
Thickness	3 mm
Mass	38 kg
Material	Carbon fiber reinforced plastic

로봇 핸드에 적용된 탄소섬유 강화 플라스틱(Carbon Fiver Reinforced Plastic)의 물성치는 Table3과 같다.

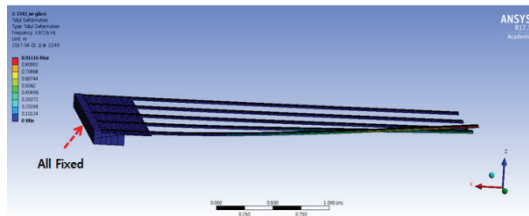
Table 3. Material property of the robot hand

	Finger	Bracket
Young's Modulus	254 GPa	43.6 GPa
Shear Modulus	15.5 GPa	15.5 GPa
Poisson's ratio	0.28	0.28
Density	1.56 g/cm ³	1.56 g/cm ³

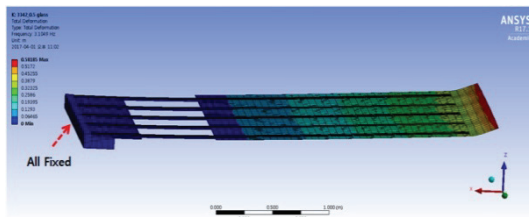
Fig 7은 본체(Bracket) 끝단이 고정된 외팔보 형태의 디스플레이 반송로봇 핸드(Hand)의 모델링과 1차 모드 모드 형상을 나타낸다. 유한요소기법을 활용하여 해석된 디스플레이 반송 로봇의 1차 모드 고유진동수는 Table4와 같다.



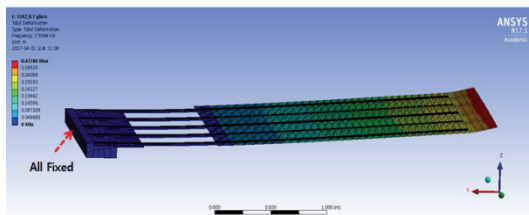
(a) Finite element model of the robot hand



(b) 1st mode shape of the robot hand



(c) 1st mode shape of 0.5T Substrate on the robot hand



(d) 1st mode shape of 0.7T substrate on the robot hand

Fig. 7. Simulation Results of FEM.

Table 4. Natural frequencies of the robot hand

	1 st Natural frequency	Gap
No Glass	3.87 Hz	-
With 0.5T Glass	3.01 Hz	19.9 %
With 0.7T Glass	2.94 Hz	25.0 %

반송로봇 핸드는 5세대 디스플레이 산업까지 금속재료로 제작됐으나 로봇에 부하를 감소시키고 더욱 빠르게 유리기

판(Glass Substrate)을 운반하기 위하여 핸드(Hand) 질량을 줄이는 경량화 연구가 꾸준히 진행되고 있다. [6] 8세대 디스플레이 산업에서는 탄소섬유 강화플라스틱 재질로 핸드 제작되었으며, 선행 연구된 탄소섬유강화 플라스틱의 대략적인 감쇠비(Damping Ratio) 범위와 납품제조업체의 사양을 감안하여 감쇠비는 고정하고, 잔류진동 특성을 분석하였다.

3.2 입력성형기법 응답 특성

디스플레이 반송 로봇의 입력성형기법의 특성 분석은 로봇 핸드(Hand) 탑재 유리기판 유무에 따른 두 개의 고유진동수를 제어하여야 한다. 현재 8세대 디스플레이 산업현장에서는 유리기판의 원가 절감과 얇은 디자인의 제품을 생산하기 위해 유리기판의 두께가 지속 감소되고 있고 현재는 0.5T, 0.7T 두 종류의 유리기판이 적용되어 있다.

본 연구에서는 로봇 핸드에서 유리기판이 없는 경우와 두께 0.7T 유리기판이 로봇 핸드에 안착되었을 경우의 고유진동수에 대하여 효과적인 잔류진동 제어 방안에 대해서 MATLAB 프로그램을 활용하여 시뮬레이션 하였다.

Fig 8과 같이 현재 산업현장에서 일반적으로 관리하는 최대 오버슈트 5% 이하 및 정상상태 오차 5% 이내 도달하는 정착시간을 비교분석 하였다.

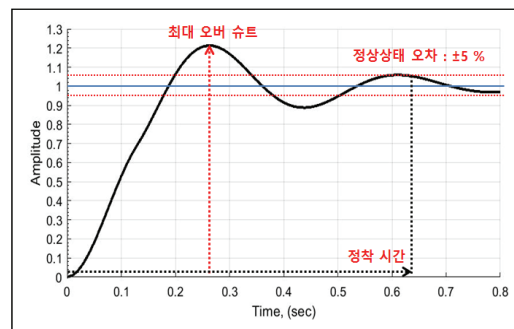


Fig. 8. Field management rules.

3.2.1 산업현장 적용현황

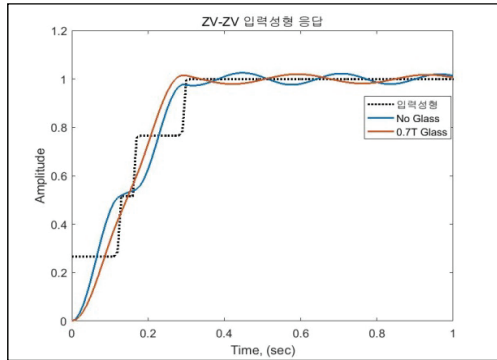
8세대 디스플레이 산업의 반송로봇에서 보통 AVS(Anti Vibration Suppressor) 제어기로 로봇 핸드의 잔류진동을 입력성형기법을 통해 이미 제어하고 있다.

상용화에 채택된 입력성형기법은 다중모드 입력성형기법을 기본으로 사용한다. 초기 설정 값으로 단일모드 입력성형기법에 강인성을 보완한 ZVD 입력성형기를 컨볼루션 적분시킨 강인한 다중모드 입력성형기법, 즉 ZVD-ZVD 입력성형기법이 적용되어 있다. 그리고 최대 적용 범위는 단일 진동모드 입력성형기법에 강인성을 보완한 ZVDD 입력성형기를 서로 컨볼루션 적분시킨 ZVDD-ZVDD 입력성형

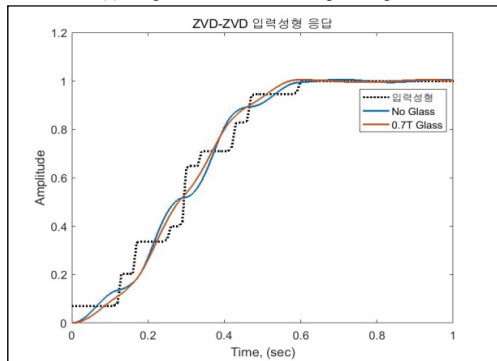
기법까지 적용할 수 있다.

디스플레이 반송로봇의 핸드 위 유리기관 유/무에 따른 두 개의 고유진동수에 대해서 단일모드 입력성형방식인 ZV, ZVD, ZVDD 입력성형방식을 적용하여 주파수 오차에 대한 민감도를 확인하였다.

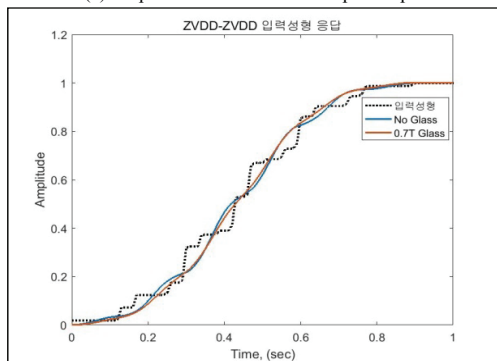
산업현장 제어기의 적용 가능한 다중모드 입력성형기법에 적용이 가능한 입력성형방법 조합을 적용하면, 응답특성은 Fig.9와 같이 수치해석을 통해 예측된다.



(a) Response of the ZV-ZV Input Shaper



(b) Response of the ZVD-ZVD Input Shaper



(c) Response of the ZVDD-ZVDD Input Shaper

Fig. 9. Simulation results of the multi-mode input shaper.

Table 5. Response of the multi-mode input shaper

입력성형기	임펄스 개수	오버슈트 (%)	정착시간 (sec)
ZV-ZV	4	2.55	0.28
ZV-ZVD	6	1.16	0.43
ZV-ZVDD	8	0.6	0.58
ZV-ZVDDD	10	0.28	0.70
ZVD-ZVD	9	0.6	0.54
ZVDD-ZVDD	16	0.14	0.71

Table 5의 시뮬레이션 결과와 같이, 로봇 핸드에서의 유리기관 유/무에 따른 두 개의 고유진동수 경우를 다중모드 입력성형기법을 통해 제어할 수 있음을 확인할 수 있다. 강인성을 보완하기 위해 임펄스 열을 늘릴수록 오버슈트가 감소되어 시스템을 안정적으로 제어할 수 있으나, 정착시간은 증가되는 경향을 확인할 수 있다.

Fig. 10은 반송로봇 핸드의 고유주파수 오차에 대한 다중모드 입력성형기법의 민감도 특성을 나타낸다. ZV-ZV 조합인 경우, 유리기관 유/무 경우의 고유진동수(각각 3.87Hz, 2.94Hz)에서 잔류진동이 완벽하게 상쇄되지만, 약간의 고유진동수 오차가 있는 반송로봇에서 잔류진동이 많이 증가됨을 알 수 있다. 이에 비해 임펄스 열을 증가시킨 강인한 다중모드 입력성형기법일수록 주파수 오차에 대한 강인한 특성을 확인할 수 있다.

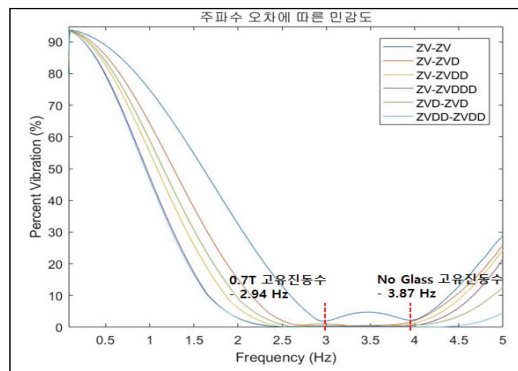


Fig. 10. Sensitivity curves for multi-input shaper.

3.2.2 개선된 입력성형기법

Fig. 11과 같이 단일모드용 ZVD 입력성형기법의 주파수 오차에 대한 민감도 특성에서 오버슈트가 각각 5%를 넘지 않는 가운데, 유리기관 유무 두 경우의 감도곡선에서의 주파수 교차 지점이 확인된다. 이러한 사실에 착안하여 로봇 Hand위 유리기관 유/무에 따른 고유 진동수의 중간 주파수를 활용하여 ZVD 입력성형기법에 특성을 분석하여 보았다.

Fig. 12의 (a)는 No Glass 고유진동수의 ZVD 입력성형기법

응답특성이고, (b)는 0.7T 고유진동수의 ZVD 입력성형기법의 응답특성이다. 각각 해당 단일모드 고유진동수는 효과적으로 제어가 되지만, 오차로 인해 고유진동수가 달라지면 제어가 되지 못함을 확인할 수 있다. (c)는 중간 주파수를 활용한 ZVD 입력성형기법의 응답특성이다. 유리기판 유무에 따른 두 개의 고유진동수 모두 효과적으로 제어할 수 있음을 확인할 수 있다.

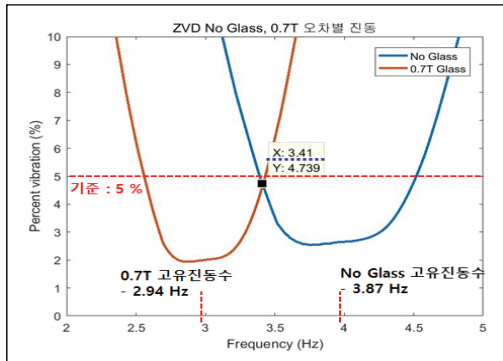
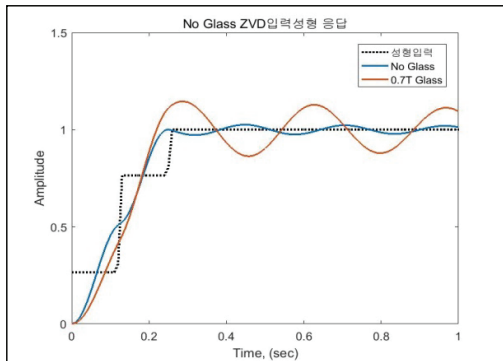
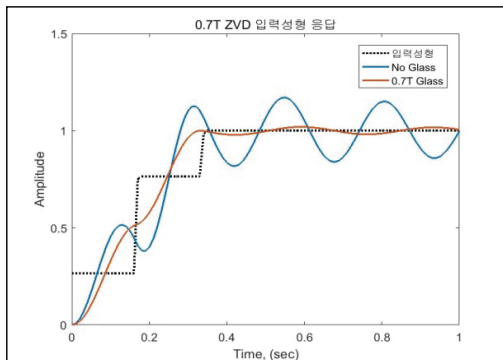


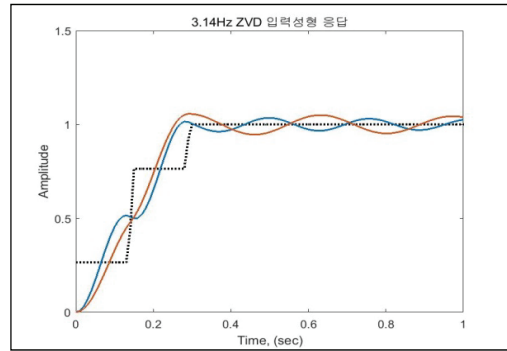
Fig. 11. Sensitivity curves for ZVD input shaper.



(a) Response to a ZVD input shaper with No Glass frequency



(b) Response to a ZVD input shaper with 0.7T frequency



(c) Response to a ZVD input shaper with optimized frequency

Fig. 12. Responses of the ZVD input shaper.

3.3 입력성형기법 비교

8세대 디스플레이 산업 현장에 이미 적용된 입력성형기법과 중간주파수를 활용한 입력성형기법을 비교하였다.

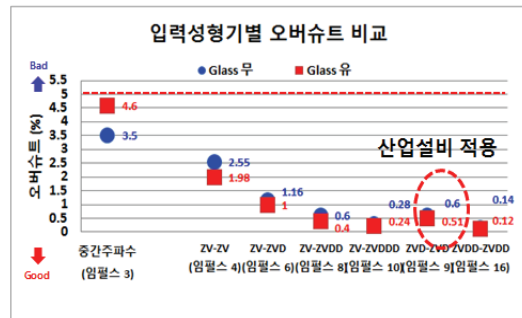


Fig. 13. Overshoot comparison between optimized input shaper and multi-mode input shaper.

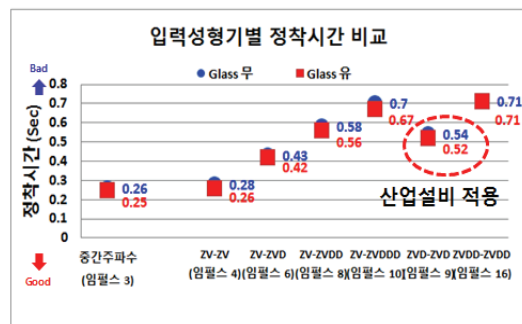


Fig. 14. Settling Time comparison between optimized input shaper and multi-mode input shaper.

현재 산업현장에서 초기설정으로 많이 적용되고 있는 ZVD-ZVD 입력성형기법과 중간주파수를 활용한 입력성형기법을 비교하였을 때, Fig. 13과 같이 오버슈트는 중간주파

수 응답이 약 3% 이상 증가함을 알 수 있으나 중간 주파수를 활용한 입력성형기법 또한 5% 이하 관리기준에 만족함을 알 수 있다. Fig. 14와 같이 정착시간은 중간주파수를 활용한 입력성형기법이 약 52% 개선됨을 알 수 있다.

4. 결 론

다양한 시뮬레이션을 통해 입력성형기법은 임펄스 열을 증가시킬수록 시스템 오차에 대한 강인한 특성을 가져 안정적으로 잔류진동을 제어할 수 있으나, 증가한 임펄스 열이 모두 도달하여야 정착이 완료됨으로 정착시간 지연에 문제점을 가지고 있는 것을 확인할 수 있었다. 따라서 두 가지 상충조건을 적절한 비중으로 적용하여 시스템 제어가 필요하다.

현재 산업현장에 적용된 강인한 다중모드 입력성형기법의 경우, 약 25% 시스템 고유진동수 오차에도 강인하게 잔류진동을 제어할 수 있으나 늘어난 임펄스 열로 인하여 생산성을 저해하는 지연문제를 가지고 있다.

로봇 핸드의 유리기판 유/무에 따른 중간주파수를 활용한 ZVD 입력성형기법은 산업현장 관리 기준에 충족하는 오버슈트 안정성을 가지면서, ZVD-ZVD 입력성형기법 대비 52% 빠른 응답특성을 가지므로 산업현장에 가장 적합한 제어 방식으로 판단된다.

또한 산업현장에 유리기판의 두께가 지속적으로 감소되고 있어, 로봇 핸드 위 유리기판 유/무에 따른 고유진동수 편차는 감소하게 된다. 두 개의 고유진동수 편차가 감소하면 중간 주파수를 활용한 ZVD입력성형 방식은 더 안정적인 오버슈트 특성을 가질 수 있다.

참고문헌

1. Smith, O.J.M., "Posicast control of damped oscillatory systems," Proceedings of the IRE, Vol. 45, pp. 1249-1255, 1957.
2. 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.
3. YUN, S.K, CHANG, P.H, PARK, J.Y, "Development of negative input shaping technique for MIMO system," Journal of Control, Automation and Systems Engineering, Vol. 6, No. 12, pp. 1045-1052, 2000.
4. YIM, J.C, AHN, T.K, CHO, J.K, "Reduction of residual vibration in wafer positioning system using input shaping," Transactions of the Korean Society for Noise and Vibration Engineering, pp. 559-563, 2005.
5. KIM, S.K and KIM, J.H, "A study on vibration reduction of LCD transfer robot arms," Korea Automatic Control Conference, pp. 779-784, 2005.
6. SHIN, D.H, KWON, I.J, PARK, S.M, PARK, Y.M, "A numerical study and material test for damping factor of carbon-aramid fiber reinforced plastics robot arm," Formerly Journal of the Korean Fiber Society, Vol. 52, No. 6, pp. 444-450, 2015.

접수일: 2017년 6월 21일, 심사일: 2017년 6월 23일,
 게재확정일: 2017년 6월 23일