



저작자표시-비영리-동일조건변경허락 2.0 대한민국

이용자는 아래의 조건을 따르는 경우에 한하여 자유롭게

- 이 저작물을 복제, 배포, 전송, 전시, 공연 및 방송할 수 있습니다.
- 이차적 저작물을 작성할 수 있습니다.

다음과 같은 조건을 따라야 합니다:



저작자표시. 귀하는 원저작자를 표시하여야 합니다.



비영리. 귀하는 이 저작물을 영리 목적으로 이용할 수 없습니다.



동일조건변경허락. 귀하가 이 저작물을 개작, 변형 또는 가공했을 경우에는, 이 저작물과 동일한 이용허락조건하에서만 배포할 수 있습니다.

- 귀하는, 이 저작물의 재이용이나 배포의 경우, 이 저작물에 적용된 이용허락조건을 명확하게 나타내어야 합니다.
- 저작권자로부터 별도의 허가를 받으면 이러한 조건들은 적용되지 않습니다.

저작권법에 따른 이용자의 권리는 위의 내용에 의하여 영향을 받지 않습니다.

이것은 [이용허락규약\(Legal Code\)](#)을 이해하기 쉽게 요약한 것입니다.

[Disclaimer](#)

2010년 2 월
석사학위 논문

유연시스템의 과도변위 제한을 위한 비선형 입력성형제어기

조선대학교 대학원

기계공학과

장 인 성

유연시스템의 과도변위 제한을 위한 비선형 입력성형제어기

Nonlinear deflection-limiting control
for flexible systems

2010년 2월 25일

조선대학교 대학원

기계공학과

장 인 성

유연시스템의 과도변위 제한을 위한 비선형 입력성형제어기

지도교수 성 윤 경

이 논문을 석사학위신청 논문으로 제출함.

2009년 10월

조선대학교 대학원

기계공학과

장 인 성

장인성의 석사학위논문을 인준함

위원장 조선대학교 교수 이 규 태 인

위 원 조선대학교 교수 장 완 식 인

위 원 조선대학교 교수 성 윤 경 인

2009년 11월

조선대학교 대학원

목 차

List of Figures	IV
List of Tables	IX
Nomenclature	X
Abstract	XI
제 1 장 서 론	1
제 1 절 연구 필요성	1
제 2 절 연구 배경	4
제 3 절 연구 목적 및 구성	6
제 2 장 MINI-CRANE 개발	7
제 1 절 하드웨어 구성	8
1. 전체 하드웨어	8
2. Control box	10
제 2 절 소프트웨어 구성	11
제 3 절 시스템 프로그래밍	12
제 4 절 GUI(Graphical User Interface)	14
제 5 절 Vision Sensor 및 Spectation	16

제 3 장 입력성형제어 이론 20

제 1 절 입력성형제어 기초이론 20

제 2 절 입력성형제어기 이론 23

- 1. 제어시간 단축을 위한 입력성형제어기 23
- 2. 강인한 입력성형제어기 25
- 3. 과도변위 제한을 위한 입력성형제어기 28
- 4. Vector diagram approach 30
- 5. 가속도 및 속도 프로파일의 비교 32

**제 4 장 비선형 시스템의 과도 및 잔류진동 제거를
위한 입력성형제어기** 33

제 1 절 가속도나 Jerk 가 입력성형제어기에 주는 영향 34

- 1. 속도명령어에 따른 성능실험 34
- 2. 가속도 및 jerk에 따른 입력성형제어기의 성능 실험 37

제 2 절 실제 시스템 구동기의 분석 39

- 1. 비선형 구동기의 영향 39
- 2. 비선형 구동기에서의 입력성형제어기의 평가 41
- 3. Time constants의 영향 46

제 3 절 MDL-ZVC 개발 48

제 4 절 MDL-ZVC의 분석 및 검증 62

- 1. MDL-ZVC 입력성형제어기 분석 62
- 2. MDL-ZVC 입력성형제어기 검증 66

제 5 절 결론 69

제 5 장 비선형 시스템의 강인한 과도 및 잔류진동 제거를 위한 입력성형제어기	70
제 1 절 MDL-ZVDC 개발	71
제 2 절 MDL-ZVDC 입력성형제어기 분석	76
제 3 절 MDL-ZVDC2 입력성형제어기 성능 검증	82
제 4 절 결론	85
제 6 장 과도변위 저감을 위한 입력성형제어기	86
제 1 절 HDL-ZV입력성형제어기 개발	87
제 2 절 HDL-ZV입력성형제어기의 분석	89
제 3 절 HDL-ZV입력성형제어기의 검증	94
제 4 절 결론	100
제 7 장 결론	101
REFERENCES	102
Appendix	106

LIST OF FIGURES

Fig. 1-1	Bridge crane(Henan yuntian company)	1
Fig. 1-2	A flexible system with one-mode	2
Fig. 1-3	Desired and actual commands with nonlinearity	2
Fig. 1-4	Response to unshaped and shaped commands	2
Fig. 2-1	A flexible system	7
Fig. 2-2	A hardware configuration	8
Fig. 2-3	A control box	10
Fig. 2-4	A software connection for the system programming	11
Fig. 2-5	A flowchart of system programming	13
Fig. 2-6	A GUI by Wincc flexible	14
Fig. 2-7	Process of upload	15
Fig. 2-8	Process of download	15
Fig. 2-9	Spectation	16
Fig. 2-10	Vision sensor calibration	17
Fig. 2-11	Curve fitting for the focal length(6mm)	18
Fig. 2-12	Curve fitting for the focal length(4mm)	19
Fig. 3-1	Open loop input shaping	20
Fig. 3-2	Zero-vibration concept of input shaping controller	21
Fig. 3-3	UM-ZV for rest-to-rest motion	24
Fig. 3-4	Position response to ZV and UM-ZV controllers	24
Fig. 3-5	Rest-to-rest command with ZVD controller	26
Fig. 3-6	Sensitivity curve of ZV and UM-ZV	27
Fig. 3-7	5% insensitivity with move distance	27

Fig. 3-8	3-8 MUM-ZV2 controller for rest-to-rest motion	29
Fig. 3-9	Deflection responses to A_3	29
Fig. 3-10	A vector diagram approach	30
Fig. 3-11	Residual vibration by impulse sequence	31
Fig. 3-12	Vector diagram approach of ZV controller	31
Fig. 3-13	Velocity shaped commands	32
Fig. 3-14	Acceleration shaped commands	32
Fig. 4-1	Effect on nonlinear drive	33
Fig. 4-2	Experimental velocity command with $36,000\text{mm/s}^2$ and $\infty\text{mm/s}^3$	34
Fig. 4-3	Velocity measurement of no-shape	35
Fig. 4-4	Velocity measurement of ZV controller	36
Fig. 4-5	Velocity measurement of UMZV controller	36
Fig. 4-6	Deflection measurement to acceleration variation	37
Fig. 4-7	Deflection measurement to jerk variation	38
Fig. 4-8	Command generation process	39
Fig. 4-9	Deflection response with linear drive	40
Fig. 4-10	Deflection response with nonlinear drive	40
Fig. 4-11	Short command of ZV controller	41
Fig. 4-12	Long command of ZV controller	42
Fig. 4-13	Interference command of ZV controller	42
Fig. 4-14	Short command of UM-ZV controller	43
Fig. 4-15	Long command of UM-ZV controller	44
Fig. 4-16	Interference command of UM-ZV controller	44
Fig. 4-17	Residual vibration comparison of ZV controller and unshaped input shaping	45
Fig. 4-18	Residual vibration comparison of UM-ZV controller	

and unshaped input shaping	45
Fig. 4-19 Residual vibration of ZV controller to t_p and τ_b	47
Fig. 4-20 Residual vibration of UM-ZV controller to t_p and τ_b	47
Fig. 4-21 Nonlinear crane system	48
Fig. 4-22 Linear crane system	48
Fig. 4-23 Control input process to planar crane	49
Fig. 4-24 Conceptual planar crane	49
Fig. 4-25 MUM-ZV profile of desired and actual velocity	51
Fig. 4-26 MUM-ZV actual velocity profile for start motion	51
Fig. 4-27 Vector diagram	54
Fig. 4-28 MUM-ZV actual velocity profile for stop motion	55
Fig. 4-29 Constraints on τ_a / T and τ_b / T for MDL-ZVC(A_3 : 1)	
①n, m:0 ②n, m:1 ③n:1, m:2 ④n:2, m:3 ⑤n:2, m:4	59
Fig. 4-30 Constraints on τ_a / T and τ_b / T for MDL-ZVC(A_3 : 0.8)	
①n, m:0 ②n, m:1 ③n:1, m:2 ④n:2, m:3 ⑤n:2, m:4	59
Fig. 4-31 Constraints on τ_a / T and τ_b / T for MDL-ZVC(A_3 : 0.6)	
①n, m:0 ②n, m:1 ③n:1, m:2 ④n:2, m:3 ⑤n:2, m:4	60
Fig. 4-32 Constraints on τ_a / T and τ_b / T for MDL-ZVC(A_3 : 0.4)	
①n, m:0 ②n, m:1 ③n:1, m:2 ④n:2, m:3 ⑤n:2, m:4	60
Fig. 4-33 Deflection response to n and m	61
Fig. 4-34 Time location of MDL-ZVC with deflection limit	62
Fig. 4-35 Desired velocity of MDL-ZVC along A_3	63
Fig. 4-36 Actual velocity of MDL-ZVC along A_3	63
Fig. 4-37 Transient deflection of MDL-ZVC controller to A_3	64
Fig. 4-38 Residual vibration of MDL-ZVC controller to t_p and τ_b	65
Fig. 4-39 Pulse duration time of MDL-ZVC2 along A_3 and x_d	66

Fig. 4-40 Deflection of MDL-ZVC2 along D_{lim}	67
Fig. 4-41 Experimental verification of transient deflection	68
Fig. 4-42 Experimental verification of residual vibration	68
Fig. 5-1 MUM-ZVD actual velocity profile for start motion	72
Fig. 5-2 Switching times of MDL-ZVDC controller to deflection limit	76
Fig. 5-3 Switching times of MDL-ZVDC controller with $\tau_a(0.1)$ and $\tau_b(0.1)$	77
Fig. 5-4 Desired velocity of MDL-ZVDC2 along A_5	78
Fig. 5-5 Velocity commands of MDL-ZVDC2 controller to A_5	79
Fig. 5-6 t_6 of MDL-ZVDC2 controller to A_3 and x_d	80
Fig. 5-7 Switching times of MDL-ZVDC2 controller with $\tau_a=0.1$ and $\tau_b=0.05$	80
Fig. 5-8 Experimental verification of transient deflection	83
Fig. 5-9 Experimental verification of residual vibration	83
Fig. 5-10 Sensitivity of MDL-ZVC and MDL-ZVDC controllers	84
Fig. 5-11 5% insensitivity of MDL-ZVC and MDL-ZVDC controllers to move distance	84
Fig. 6-1 Deflection response of input shaping controller	86
Fig. 6-2 HDL-ZV input shaping	87
Fig. 6-3 Velocity command of HDL-ZV controller	89
Fig. 6-4 Switching time to D_{lim}	90
Fig. 6-5 HDL-ZV2 controller for rest-to-rest motion	90
Fig. 6-6 Pulse duration time of HDL-ZV2 controller to A and x_d	91
Fig. 6-7 Position response of payload to A	92
Fig. 6-8 Deflection response of payload to A	92
Fig. 6-9 Transient deflection along A and ω	93

Fig. 6-10 5% Insensitivity of MUM-ZV and HDL-ZV controllers
to move distance 94

Fig. 6-11 Transient deflection along velocity($D_{lim}=0.4$) 96

Fig. 6-12 Transient deflection along velocity($D_{lim}=0.3$) 96

Fig. 6-13 Comparison of transient deflection($D_{lim}=0.4$) 97

Fig. 6-14 Comparison of transient deflection($D_{lim}=0.3$) 97

Fig. 6-15 Last impulse time of MUM-ZV and HDL-ZV 98

Fig. 6-16 Experimental verification of transient deflection 99

Fig. 6-17 Experimental verification of residual vibration 99

LIST OF TABLE

Table 2-1 Information of MINI-CRANE	9
Table 2-2 Experimental measurement(focal length: 6mm)	18
Table 2-3 Experimental measurement(focal length: 4mm)	19
Table 4-1 Experiment parameters	34
Table 4-2 Residual vibration comparison with the variation of acceleration and jerk	38
Table 4-3 Mini-crane experimental parameters	62
Table 5-1 Switching time calculation of MDL-ZVDC controller (τ_a : 0.1, τ_b :0.05)	76
Table 5-2 Switching time calculation of MDL-ZVDC controller (τ_a : 0.1, τ_b :0.1)	77

NOMENCLATURE

$G(s)$	Transfer function
$Y(s)$	Output
$U(s)$	Input
T	Period
ζ	Damping ratio
ω	Natural frequency
A_i	Amplitudes of impulses
t_i	Time locations of impulses
θ_{ss}	Steady-state response
A	Magnitude of vector
\emptyset	Phase of vector
v_t	Actual velocity profile
L	Suspension length
$g_i(t)$	Segments of actual velocity profile
V_{\max}	Maximum velocity
τ_a	Acceleration time constants
τ_b	deceleration time constants
D_{\lim}	Deflection limit
x_d	Move distance

ABSTRACT

Nonlinear deflection-limiting control for flexible systems

Jang In Sung

Advisor : Prof. Sung Yoon-Gyung Ph.D.

Department of Mechanical Engineering,

Graduate School of Chosun University

For the vibration reduction of flexible systems, input shaping controller could be used. In the reality, there are many non-ideal effects such as electrical and physical factors, nonlinear actuator dynamics. Due to the non-ideal effects in the industrial applications such as robotics, semiconductor and aerospace industry sectors, the input shaping controller has been shown with limited control performance.

In order to cope with the non-ideal effects, system modeling errors, several exact solutions by using the input shaping technique are newly developed to reduce the transient deflection and residual vibration of flexible systems and to present a high control performance with control robustness. This thesis presents a test-bed for the experimental verification of presenting the below developing controller algorithms, a deflection-limiting controllers with the inclusion of non-ideal actuator dynamics, and a high-speed deflection-limiting controller by utilizing variable impulse magnitudes.

At first, the test-bed, called MINI-CRANE, which is built with Siemens PLC (Programmable Logic Controller)-Technology CPU, Sinamics CU320, and synchronous servo-motors with absolute encoders, and intelligent vision camera. For a user interface, the GUI (graphical user interface) program is developed with the softwares of WinCC flexible, SCL, CFC, visual basic.

Secondly, MDL-ZVC (Modified Deflection Limiting Zero Vibration) controller is developed by approximating the actuator nonlinearity by an exponential function which will result in the controller performance degradation. The MDL-ZVC controller is shown that it presents the adjustable transient deflection magnitude and zero residual vibration under the nonlinear actuator dynamics. For the rest-to-rest motion, the MDL-ZVC controller is used symmetrically to get a specified move distance by a pulse duration.

Thirdly, the MDL-ZVDC (Modified Deflection Limiting Zero Vibration Derivative Compensation) controller is developed to improve the robustness of the MDL-ZVC controller with respect to the modelling error of flexible systems. For the MDL-ZVDC controller, a numerical optimization formulation is presented by minimizing the final switching time with the nonlinear formula to non-ideal actuators. For the rest-to-rest motion, the MDL-ZVDC2 controller is developed by symmetrically utilizing the MDL-ZVDC controller for a specified move distance.

Fourthly, the HDL-ZV(High speed Deflection Limiting Zero Vibration) controller is developed to use the maximum linear actuator speed with the adjustable transient deflection magnitude and zero

residual vibration of flexible systems. The HDL-ZV controller presents the high-speed cruising operation which will be necessary for industrial applications with the reduction of bending moment.

제 1 장 서론

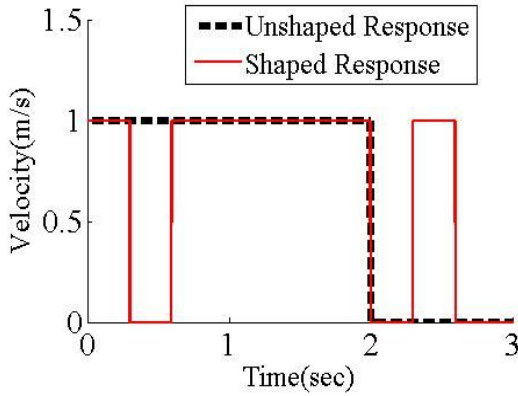
제 1 절 연구 필요성

Fig. 1-1과 같은 유연시스템 브릿지 크레인은 작동 시 잔류진동이 발생 된다. 잔류진동은 시스템에 피로와 마모를 발생시켜 수명을 단축시키고, 정확한 이동경로로 이동하지 못하여 주변시설물에 파손 및 작업자에게 상해를 입히는 산업재해를 발생 시킨다. 또한 목표지점에 정지하기 까지 많은 시간이 소요되어 작업 효율을 저하 시킨다.

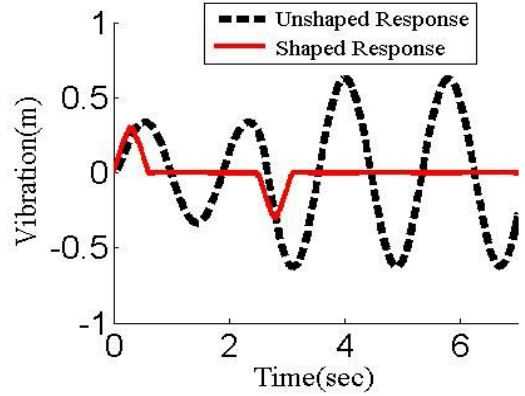
진동현상을 저감하기 위해 산업현장에서 개루프(Open-loop)제어 방식의 입력성형제어기법(Input shaping controller)을 활용 할 수 있다. 그러나, 산업현장에는 시스템의 구동기의 동적특성과 제어시스템의 파라메타의 uncertainty로 인한 과도 및 잔류진동저감은 challenging problem 이다. 입력성형제어기의 특성을 표시하기 위해 Fig. 1-2는 임의의 속도 command에 대하여 입력성형제어를 단일모드의 유연시스템에 대한 응답특성을 나타내었다. Fig. 1-2 (b)에 표시된 시스템응답에서 입력성형제어기를 적용한 경우 잔류진동이 저감됨을 보이고 있다.



Fig. 1-1 Bridge crane(Henan yuntian company)



(a) Velocity command



(b) Time Response

Fig. 1-2 A flexible system with one-mode

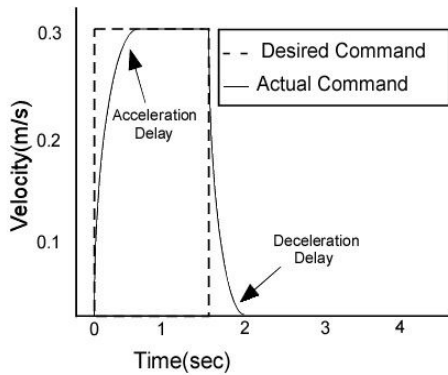


Fig. 1-3 Desired and actual commands with nonlinearity

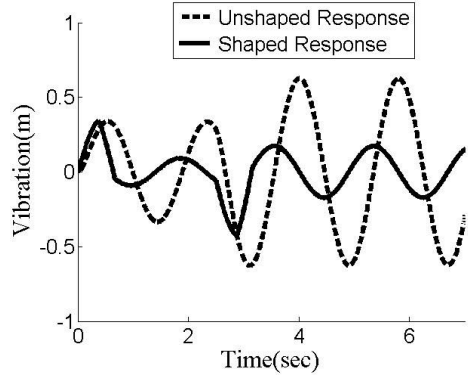


Fig. 1-4 Response to unshaped and shaped commands

그러나, 산업현장에서 시스템 구동기의 비선형 동적 특성에 의해 입력성형제어기의 잔류진동 저감 성능이 감소한다. 산업현장의 크레인의 동작특성은 관성력 및 시스템의 전기적 특성으로 인해 비선형성을 나타낸다. 그러므로, 입력성형제어기의 잔류진동 저감 성능을 극대화하기 위해 연구가 필요하다. Fig. 1-3은 이론적인 속도와 비선형 구동기의 영향으로 가속도와 감속도 시간지연에 의해 변화된 실제 속도 command이다. Fig. 1-4는 비선형 구동기의 특성을 고려하지 않은 입력성형제어기를 유연시스템에 적용하였을 때, 입력성형제어기를 적용한 경우 입력성형제어

기를 적용하지 않은 경우보다 진동이 감소하였지만, 시스템 구동기의 비선형 동적 특성에 때문에 잔류진동이 발생한다.

입력성형제어기의 성능을 감소시키는 원인으로는 유연시스템의 modelling error에 의해 입력성형제어기의 진동저감 성능은 저감되므로 modeling error에 대한 robustness한 입력성형제어기 개발이 요구된다. 전자기 구동기가 사용되는 로봇, 반도체 및 항공우주 분야의 엄격한 과도 및 잔류진동 현상을 저감하기 위해 입력성형제어기의 개선이 필요하다.

제 2 절 연구 배경

유연시스템의 진동현상을 저감하기 위해 1985년 처음으로 Smith가 Posicast방법을 개발하였다.^(1,2) posicast방법은 step input을 두 단계로 나누어 잔류진동을 제거한다. 그러나, 시스템 매개변수의 modelling error에 대해 강인성이 미흡하여 실용성이 낮게 나타났다. modelling error에 대해 제어성능을 개선하기 위해 Singer와 Seering은 Smith의 입력성형제어기를 개발하였다.^(3,4) 입력성형제어기는 유연시스템의 연속된 임펄스가 시스템에 가해지면, 각각의 임펄스 응답이 서로 중첩되어 잔류진동이 서로 상쇄되는 원리를 이용하였다. 이렇게 얻어진 impulse sequence를 임의의 input과 convolution 하여 시스템 입력을 생성한다. Impulse의 수를 추가하므로서 modelling error에 대한 강인한 입력성형제어기가 설계된다..

numerical optimization을 활용하여 잔류진동을 제거하는 방법에 대해 많은 연구가 있었다.^(5,6,7) 최적화기법은 최적 해를 구하는데 계산이 복잡하고 가격함수는 총체적인 경로오차로 표시되어 진동모드가 특별한 경우에 반영되지 않는다. 따라서 잔류진동은 감소하여도 과도응답에서 진동이 발생될 수 있다.

Seering과 Meckl은 경사사인(ramped sinusiod)함수와 버사인(versine)함수를 이용하여 smooth input을 개발하였는데⁽⁸⁾, 함수의 조합에서 유연시스템의 고유진동수 성분을 제거함으로써, 유연시스템의 가진력을 최소화하는 방법이다. 토크계산 기법은 원하는 출력의 궤적을 정의하고 그 inverse model을 이용하여 출력과 동일한 입력을 구한다.⁽⁹⁾ 그러나 유연시스템의 modeling error에 대한 낮은 강인성때문에 실용화에는 많은 문제를 야기 한다.

입력성형제어기법이 발표된 이후로 sliding-mode control 방법과 입력성형제어기 기술을 통합한 유연시스템 진동제어를 위한 adaptive control 방법⁽¹⁰⁾ 및 2개 모드를 갖는 유연시스템의 잔류진동 저감 및 에너지 절감형input shaping controller가 개발되었다.^(11,12) 그리고, 선형구동기의 동작속도 제한이 있는 유연시스템에 대한 과도진동변위를 제한하기 위한 제어기와 구동기의 2개의 속도영역을 활용한 제어기^(13,14)가 개발되었다. 또한 유연 시스템 구동기의 성능을 고려하여 On-off command 로 연료절약을 위한 입력성형제어기가⁽¹⁵⁾ 개발 되었다.

최근에 유연시스템의 비선형 구동기를 고려한 입력성형제어기의 개발이 많이 진행되었다.^(16,17,18) 특히 Lawrence는 선형 입력성형제어기에 비선형 구동기의 영향으

로 발생하는 가속도 및 감속도에 의한 시간지연을 고려하여 잔류진동저감 성능을 개선한 비선형 입력성형제어기를 개발 하였다.⁽¹⁹⁾ 그러나, 과도변위는 고려하지 않았다. 본 논문에서는 유연시스템의 비선형 구동기를 포함하고 잔류 및 과도변위를 강인하게 제어하는 입력성형제어기를 개발한다.

제 3 절 연구 목적 및 구성

본 논문에서는 유연시스템의 구동기의 비선형 동적 특성을 고려하고 잔류 및 과도변위를 제한하기 위한 입력성형제어기 MDL-ZVC(Modified deflection limiting zero vibration compensation) 제어기를 개발한다. 그리고 rest-to-rest 구동을 위해 MDL-ZVC2제어기를 개발 한다. 두 번째로 numerical optimization을 활용하여 MDL-ZVC제어기에 강인성을 추가한 입력성형제어기 MDL-ZVDC (Modified deflection limiting zero vibration and derivative compensation)제어기를 개발하고, rest-to-rest구동을 위한 MDL-ZVDC2제어기를 개발 한다. 세 번째로는 신속한 rest-to-rest구동, 과도변위를 제한 및 bending moment를 저감하는 입력성형제어기를 개발한다.

본 논문의 2장에서는 이론검증을 위해 PLC(Programmable logic controller)를 활용하여 실험장치에 대해 설명한다. 3장은 입력성형제어기 이론 및 입력성형제어기를 설계하기 위한 기본적인 방법에 대해 설명한다. 4장에서는 비선형 구동기의 특성을 분석하여 비선형성을 고려하고 과도 및 잔류진동을 제어하는 입력성형제어기 MDL-ZVC및 MDL-ZVC2 입력성형제어기에 대해 설명한다. 5장에서는 MDL-ZVC에 강인성을 추가한 MDL-ZVDC와 rest-to-rest motion을 위한 MDL-ZVDC2 입력성형제어기에 대해 설명한다. 그리고 6장에서는 rapid rest-to-rest motion, 과도변위 제한 및 bending moment 저감 특성을 나타내는 입력성형제어기에 대해 설명하고 마지막 7장에서는 본 논문에 대해 정리한다.

제 2 장 MINI-CRANE 개발

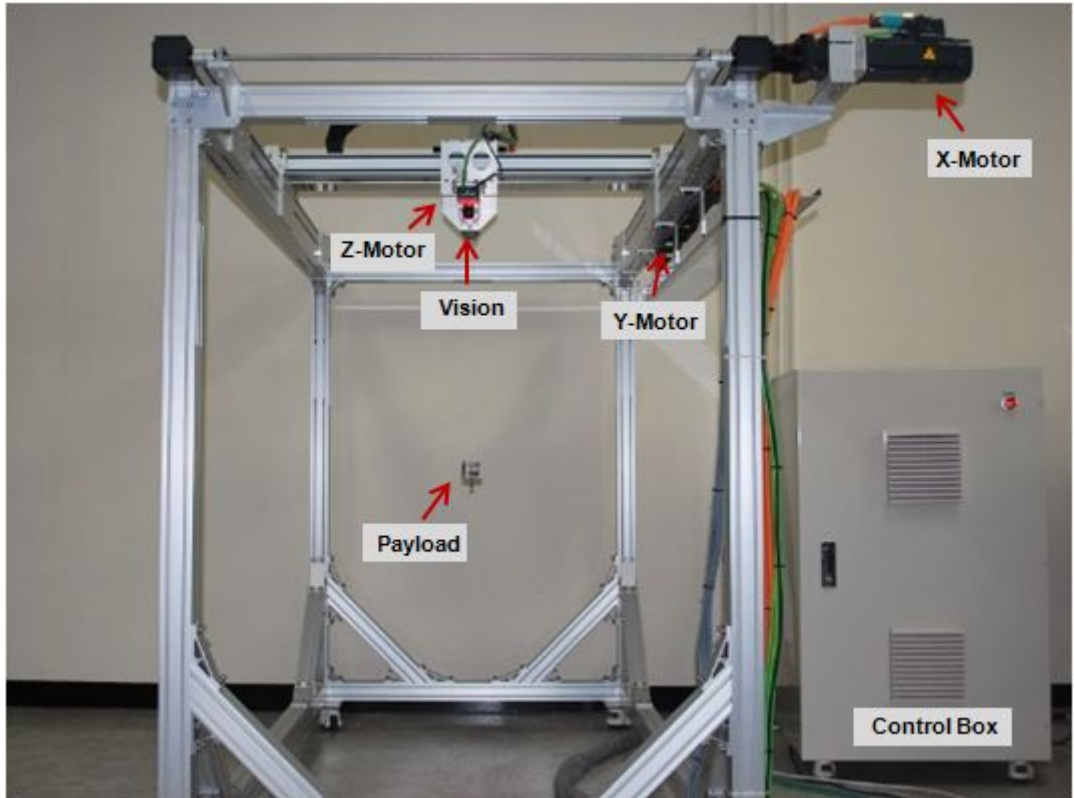


Fig. 2-1 A flexible system

본 연구에서 개발된 입력성형제어기의 과도변위 제한 및 잔류진동 저감 성능을 실험적으로 검증하기 위해 Fig. 2-1의 실험 장치를 개발하였다. MINI-CRANE은 Siemens PLC (programmable logic controller)로 구성하고, 이론 검증을 위해 시스템 구동을 위한 pendant와 실험 data의 입출력할 수 있게 프로그램을 개발하였다. 실험장치의 구동에는 절대 엔코더를 사용하는 3개의 servo motor를 사용했고 payload의 흔들림을 측정하기 위해 Siemens VS720x 계열의 intelligent vision sensor를 사용하였다.

제 1 절 하드웨어 구성

1. 전체 하드웨어

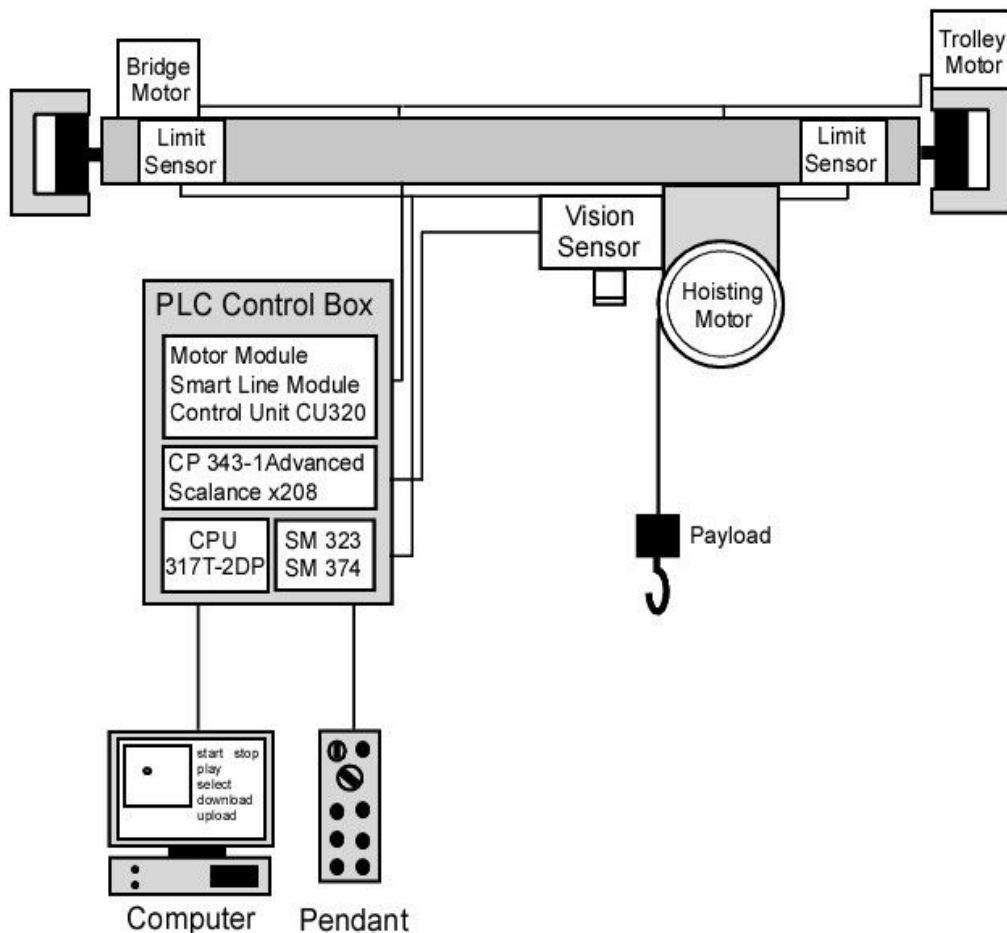


Fig. 2-2 A hardware configuration

실험장치는 효율적인 data처리를 위해 제어장치를 제작하고, 정확한 속도, 가/감 속도 및 위치를 제어하고, absolute encoder를 이용하여 motor의 정보를 확인할 수 있는 3개의 servo motor를 이용해 Bridge (X-축), Trolley(Y-축), Hoisting (Z-축)으로 구성 하였다. 또한 실험장치의 안전을 고려하여 x-축 및 y-축의 양끝에 limit sensor를 설치 하였다.

Table 2-1 Information of MINI-CRANE

내용	수치
x축 최대 행정	1300mm
y축 최대 행정	755mm
z축 최대 행정	1400mm
hook 무게	385g
최대 속도	1.5 m/s
encoder pulses per revolution	512pulses/revolution

실험분석을 목적으로 intelligent vision sensor(VS 720 Series)를 활용하였으며, payload의 변위를 측정하여 control box로 전송한다. 실험장치의 작동을 위해 산업 현장의 pendant와 유사하게 제작 하였으며, 실험장치 작동을 위한 스위치 및 다양한 input shaping 제어를 선택하는 스위치를 포함하여 14개의 버튼으로 구성 하였다. Table 2-1 는 실험장치의 payload 운전에 대한 사양을 나타낸다. 또한, 실험 장치는 다양한 속도에서 실험이 가능하며 절대 엔코더의 사용으로 현재의 위치를 항상 저장하고 있어 위치 재설정이 불필요하다.

2. Control box

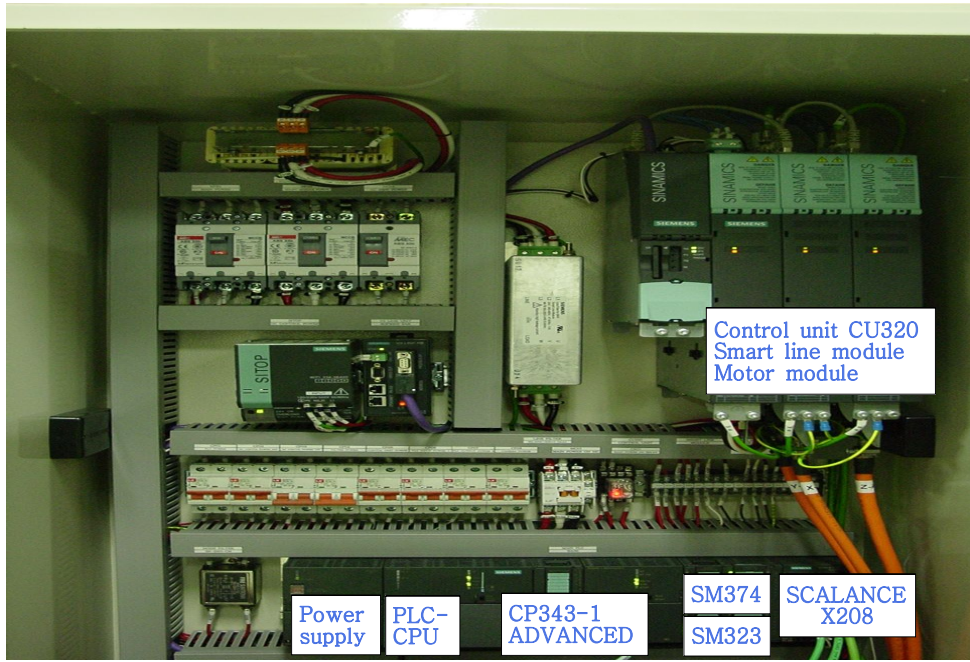


Fig. 2-3 A control box

Fig. 2-3의 control box는 전체 실험 장치를 제어하는 step7-300 PLC-Technology CPU와 신호처리용 DI/DO를 지원하는 시그널 모듈을 구성했다. 그리고, PLC-Technology CPU와 intelligent vision sensor와의 full duplex로 통신하기 위해 하드웨어 CP343-1 ADVANCED를 설치하였고, ethernet 통신의 확장을 위해 SCALANCE-X208를 사용하였다. 모터의 작동을 위한 하드웨어로는 모터에 전원을 공급하기 위한 smart line module과 PLC-CPU와 통신하여 모터를 제어하기 위한 control unit(CU320)을 사용하였고, 3개의 모터에 필요한 전력을 공급하기 위해 double motor module을 설치하였다.

제 2 절 소프트웨어 구성

실험장치의 작동과 실험을 위해 6개의 소프트웨어가 유기적으로 통합되어 시스템의 운전을 통제한다. step7은 전체 소프트웨어를 관리하고, 실제 하드웨어의 정보를 가상으로 구성하여 전체 하드웨어를 제어한다. 지원하는 프로그래밍 언어는 FBD(Function Block Diagram), LAD(Ladder Diagram) 그리고 STL(Statement List)를 지원한다. 특화된 제어프로그래밍을 위해 소프트웨어 S7-SCL(Structured Control Language)를 사용하였다.⁽²⁰⁾ SCL코드로 작성된 시스템 구동함수들의 data 입출력을 효율적으로 통합하기 위해 소프트웨어 S7-CFC(Continuous Function Chart)를 사용하였다.^(21,22) 그리고 실험장치의 특성을 고려하여 정확한 속도(mm/s), 가/감속도(mm/s²) 및 jerk(mm/s³)의 설정이 가능하고 여러 제어기능을 지원하는 소프트웨어 S7-Technology를 사용하였다.^(23,24,25) 또한, 컴퓨터제어(computer control)을 위해 GUI(Graphic User Interface)는 소프트웨어 S7-Wincc flexible을 사용 하였다.⁽²⁶⁾ 마지막으로 intelligent vision sensor의 사양을 설정하고 PLC와의 통신을 위한 소프트웨어 spectation을 사용하였다.^(27,28) Fig. 2-4에 소프트웨어 관계를 표시하였다.

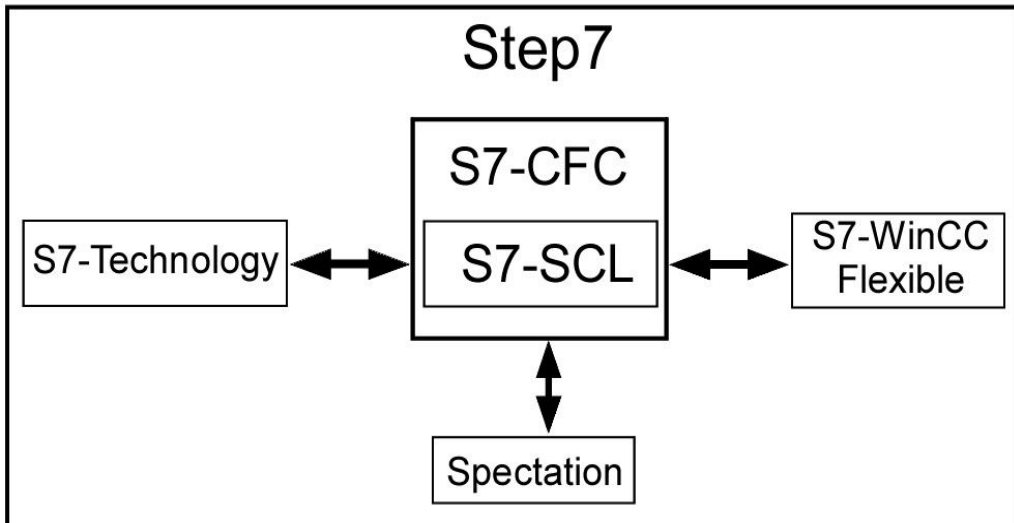


Fig. 2-4 A software connection for the system programming

제 3 절 시스템 프로그래밍

시스템 프로그래밍은 실험장치가 입력성형제어기를 실행하고 실험 및 분석을 통한 검증이 용이하도록 구성되었다.

실험장치의 작동을 위한 입력은 3가지 방법으로 구성하였다. pendant에 의한 입력, GUI에 의한 입력과 가상의 시그널모듈을 이용한 입력으로 3가지 방법으로 실험장치가 작동하게 프로그래밍 하였다. 3개의 입력은 각자 할당된 어드레스에 의해 실험장치에 신호를 전달할 수 있다. 두 번째 입력은 소프트웨어 Matlab를 활용하여 생성한 설계된 속도 및 위치로 작동되도록 GUI에서 실험장치에 실험정보를 업로드 하여 작동될 수 있게 프로그래밍 하였다. 마지막으로 세 번째는 실험장치가 homing 기능을 위해 절대엔코더의 정보를 활용한 프로그래밍 하였다.

시스템 프로그램의 실행순서는 payload이동을 위한 신호가 입력성형제어기로 전달되어 convolution과정을 수행하고, shaped input은 limit sensor의 신호를 지속적으로 monitoring하면서 각각의 servo-motor에 전달된다. 한편, shaped input을 실험하기 전에 S7-Technology 의 built-in function을 사용하여 모터의 속도, 가/감속도 및 jerk의 설정이 필요하다. 최종 과정으로 intelligent vision sensor에서 측정된 payload의 위치를 PLC로 실시간으로 전송하고, 실험분석을 위해 data저장 및 GUI에 표시한다. Fig. 2-5에 시스템의 프로그래밍을 flowchart로 나타냈다.

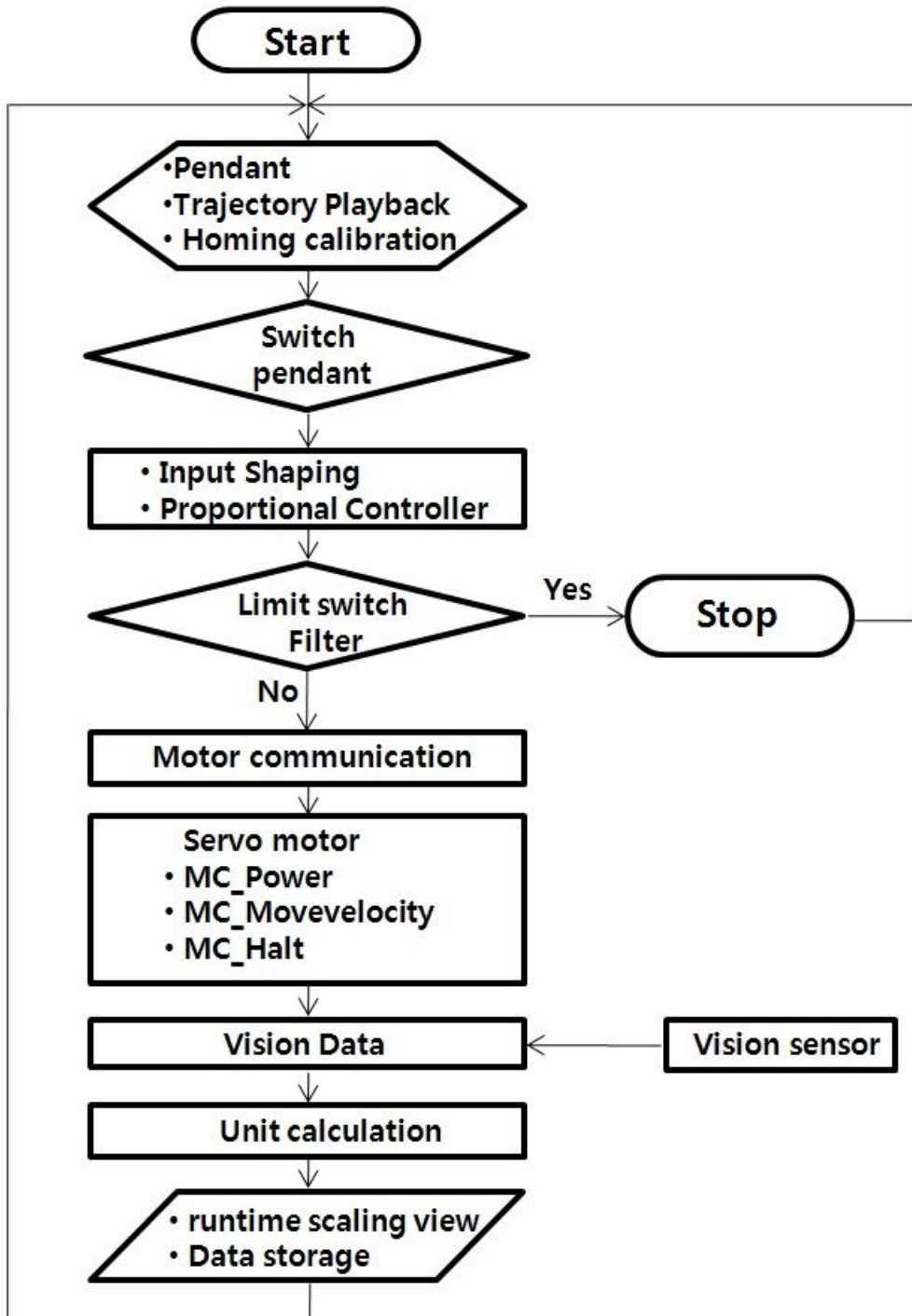


Fig. 2-5 A flowchart of system programming

제 4 절 GUI(Graphical User Interface)

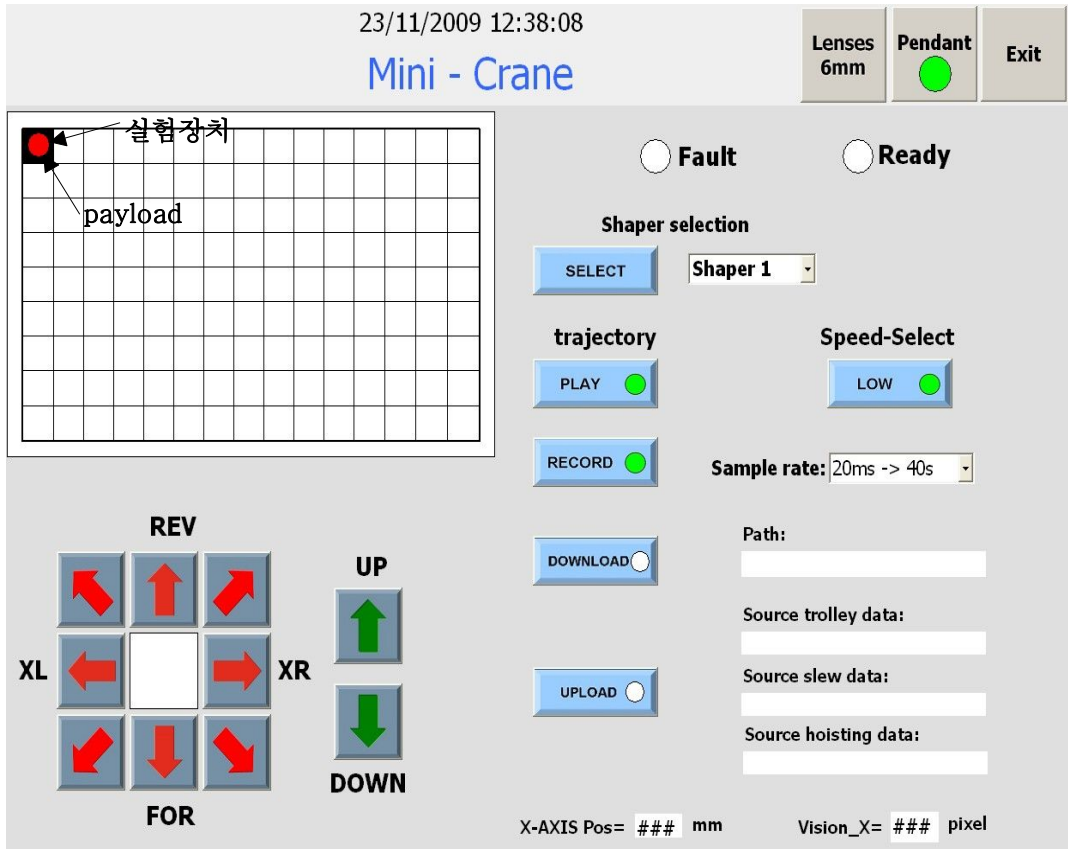


Fig. 2-6 A GUI by Wincc flexible

소프트웨어 S7-WinCC Flexible을 이용하여 실험 및 결과분석을 위한 GUI(Graphical User Interface)는 Fig. 2-6 이다. 다중입력에 대한 실험을 위해 pendant에는 포함 되어 있지 않은 대각선 작동기능을 포함하였다. 또한, 실시간으로 trolley 위치를 비례 축소하여 나타내었으며, trolley 위치 대해 offset 변위를 intelligent vision sensor 정보를 활용한 payload 위치를 나타내었다. 여기서, camera lenses의 focal length에 따른 pixel의 상대적인 보정(calibration)을 수행하였다. 실험 장치의 속도변경을 위해 고속 및 저속 선택 기능이 있다. 실험 및 분석을 위해 실험 data의 다운 및 업로드 기능을 활용할 수 있다.



Fig. 2-7 Process of upload

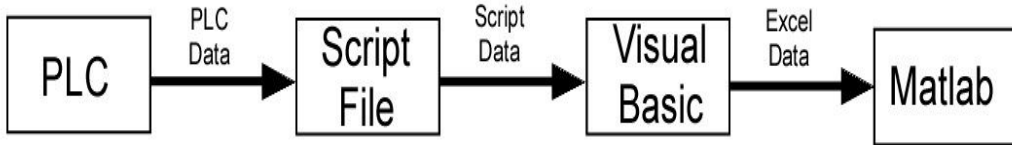


Fig. 2-8 Process of download

Fig. 2-7는 업로드 과정으로 Matlab을 활용하여 실험data를 생성하고 GUI script file로 변경한 후에 PLC-Technology CPU로 전송하여 실험data에 따라 속도와 위치가 제어된다. Fig. 2-8는 다운로드 과정으로 실험결과를 분석하기 위해 필요하며, 실험data는 GUI의 script file로 변경되어 script with visual basic language에 의해 microsoft excel formatted-file로 변경된다. 실험data는 Matlab을 활용한 결과분석을 수행하게 된다.

제 5 절 Vision Sensor 및 Spectation

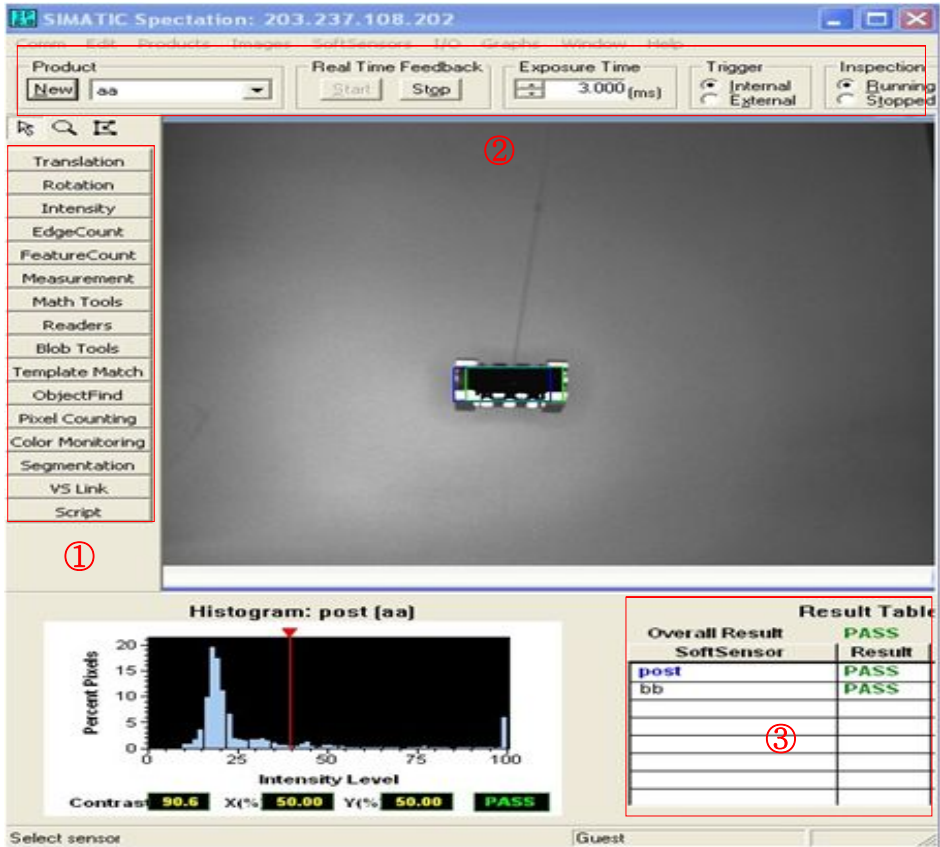


Fig. 2-9 Spectation

Fig. 2-9는 spectation 화면으로 vision sensor를 setting 및 vision programming을 위한 소프트웨어이다. Fig. 2-9에 표시된 ①은 spectation에서 지원하는 softsensor로 크게 line shape와 area shape를 find edge 한다. ②는 real time feedback 과 exposure time 그리고 trigger등 software의 기본기능을 설정한다. ③은 result table로 현재 프로그램들의 상황을 나타낸다. spectation의 실행 순서로는 지정한 검사 영역을 이진화(binary coding)하고 edge shape 검색한다. 다음으로 vision sensor의 pixel을 계산하고, 중심 pixel을 찾아서 PLC로 실시간으로 전송할 수 있게 프로그래밍 하였다.

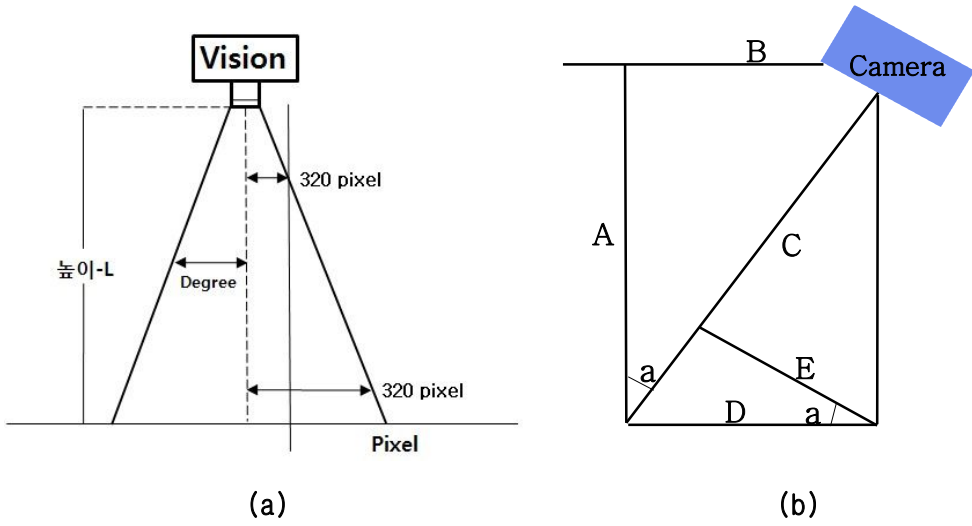


Fig. 2-10 Vision sensor calibration

Fig. 2-10는 payload의 실제 위치를 측정하기 위한 vision sensor calibration 위해 Fig. 2-10 (a)와 같이 vision camera로 측정한 image는 vision camera에서 payload까지의 높이(L)에 따라 측정되는 pixel 수의 보정이 필요하다. lense에 따른 보상을 위해 실험에서 가장 많이 사용되는 높이(L) 500mm~1200mm의 구간에서 payload를 측정할 수 있는 focal length 4mm 와 6mm를 선정 하였다. Fig. 2-10 (b)는 vision이 인식하는 거리와 실제거리의 관계로 $a = \tan^{-1} B/A$ 로 표시되고 실제 거리 $D = E / \cos(a)$ 로 구할 수 있다. 여기서 A: 카메라에서 payload까지의 높이, B: payload에서 카메라까지의 직선거리, C: vision에서 payload까지의 거리, D: 실제거리이고 E: vision이 인식하는 거리이다. Table 2-3는 카메라 focal length 6mm를 사용하였을 때, 카메라가 찾은 pixel의 수와 이때의 실제 거리를 실험한 결과이며, Fig. 2-11은 pixel이 나타내는 degree이다. pixel에 따라 degree의 값을 curve fitting 하여, 함수 $y = 0.0708x + 0.217$ 를 구했다. Table 2-4는 focal length 4mm를 사용하였을 때, 카메라가 찾은 Pixel의 수와 이때의 실제 거리를 실험한 결과이며, Fig. 2-12는 pixel이 나타내는 degree이다. 다음은 pixel에 따라 degree값을 curve fitting 하여, 함수 $y = 0.1089x + 0.0291$ 를 얻었다.

Table 2-2 Experimental measurement(focal length: 6mm)

Degree(°)	1	2	3	5	7
Pixel의 수	12	25	38	68	96
실제 거리(mm)	8.72	17.46	26.2	43.74	61.4

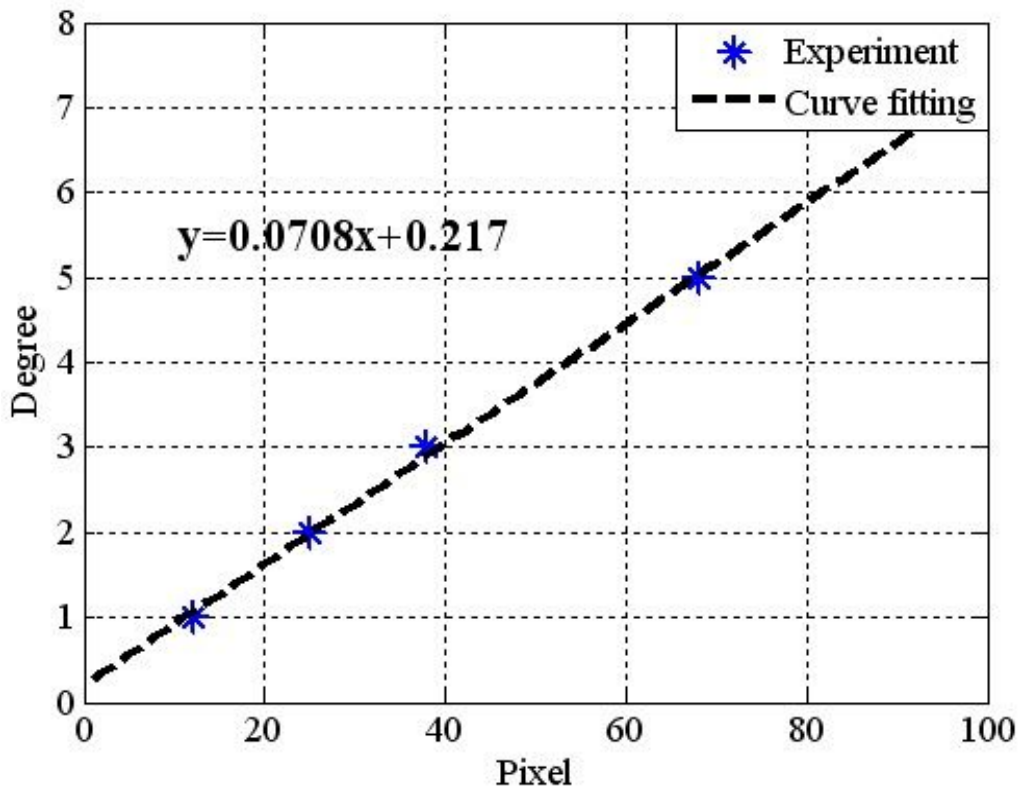


Fig. 2-11 Curve fitting for the focal length(6mm)

Table 2-3 Experimental measurement(focal length: 4mm)

Degree(°)	1	2	3	5	7
Pixel의 수	9	19	27	44	65
실제 거리(mm)	8.72	17.46	26.2	43.74	61.4

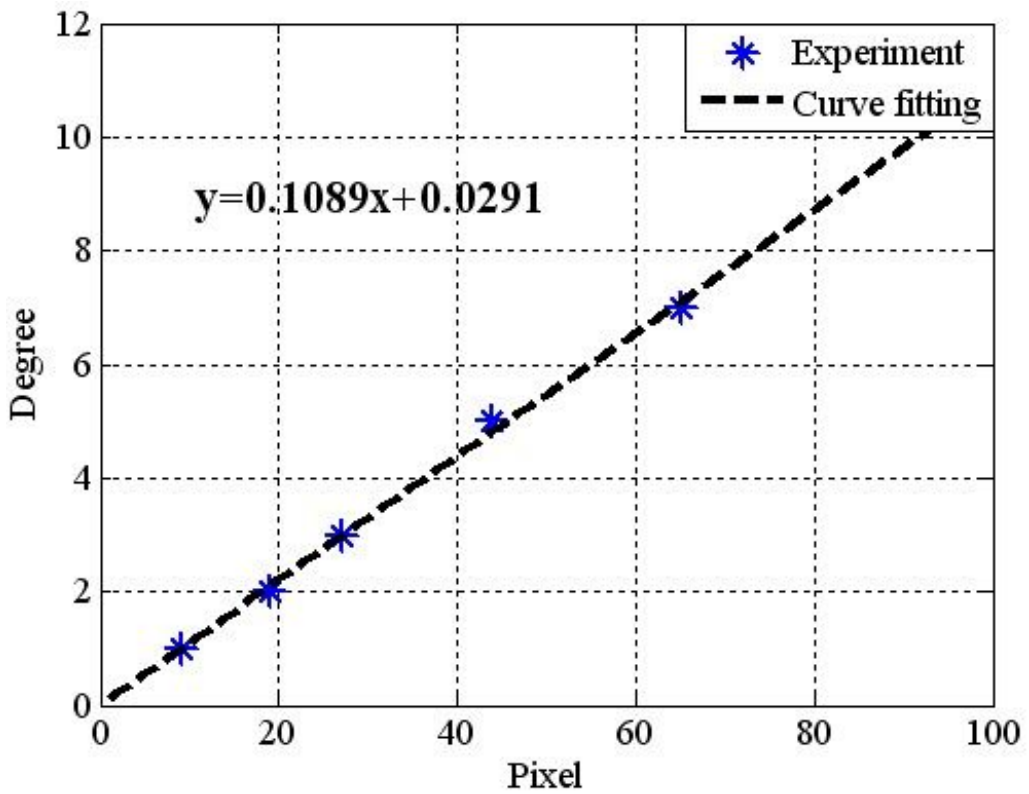


Fig. 2-12 Curve fitting for the focal length(4mm)

3 장 입력성형제어 이론

제 1 절 입력성형제어 기초이론

본 장에서는 입력성형제어기의 기초이론을 요약한다. 입력성형제어기는 임의의 입력명령어를 성형하여, 유연시스템의 극점(pole)을 입력성형제어기의 영점(zero)로 상쇄시켜 진동을 저감시킨다.⁽²⁹⁾ 입력성형제어기는 Fig. 3-1의 블록선도와 같이 개루프(open-loop)제어 방식으로 유연시스템의 주파수와 감쇠비로 표시되는 입력성형제어기를 open-loop control방법으로 쉽게 구현할 수 있다.

입력성형제어기는 임펄스응답을 활용한 일반적인 원리는 Fig. 3-2와 같이 A1크기의 입력을 가했을 때 time response를 상쇄시키기 위해 계산된 시간에 A2 크기의 입력을 가한다. 두 개의 입력이 중첩되어 결과적으로는 진동이 발생되지 않는 결과를 얻는다.

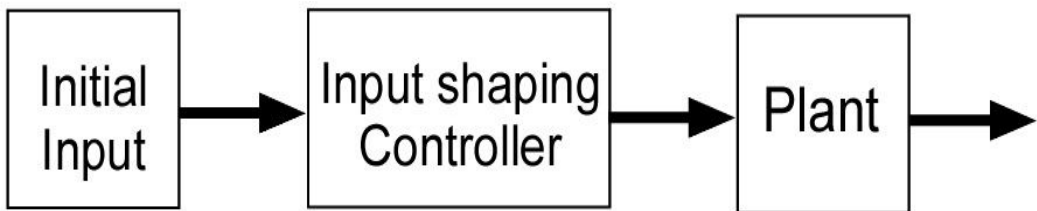


Fig. 3-1 Open loop input shaping

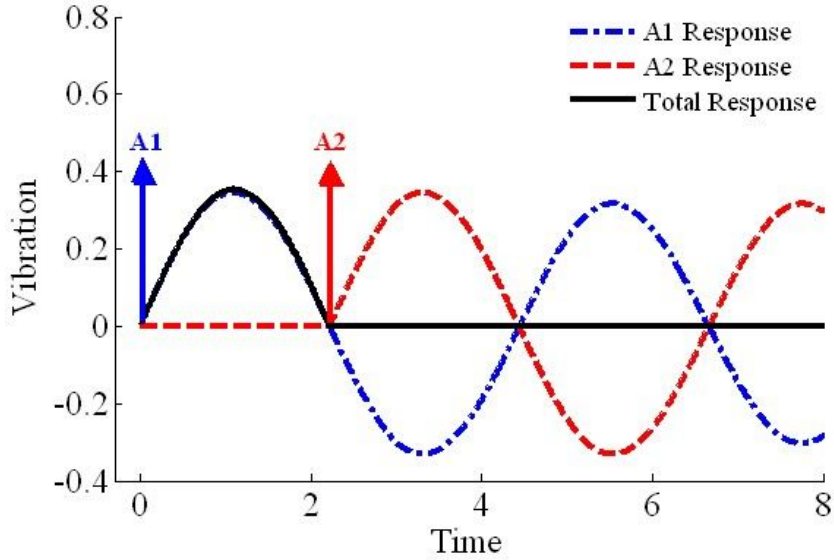


Fig. 3-2 Zero-vibration concept of input shaping controller

유연시스템의 잔류진동을 없애기 위한 입력의 크기와 시간은 다음과 같이 구할 수 있다. 2차 시스템의 전달함수는 식(1)과 같이 나타난다.⁽³⁰⁾

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

식 (1)의 전달함수를 이용하여 입력의 크기 A가 시간 t에 가해지면, impulse 응답은 식(2)와 같이 나타낼 수 있다.

$$y(t) = \left[A \frac{\omega}{\sqrt{1-\zeta^2}} e^{-\zeta\omega(t-t_0)} \right] \cdot \sin(\omega \sqrt{1-\zeta^2}(t-t_0)) \quad (2)$$

식 (2)에 n개의 입력이 가해진 진폭은 식 (3)과 같다.

$$A_{amp} = \sqrt{\left(\sum_{i=1}^n B_i \sin \varnothing_i\right)^2 + \left(\sum_{i=1}^n B_i \cos \varnothing_i\right)^2} \quad (3)$$

여기에서 \varnothing_i 와 B_i 는 식 (4)와 (5)이다.

$$\varnothing_i = -\omega \sqrt{1-\zeta^2} t_i \quad (4)$$

$$B_i = \frac{A_i \omega}{\sqrt{1-\zeta^2}} e^{-\zeta \omega (t_n - t_i)} \quad (5)$$

이때 A_i 와 t_i 는 i 번째 가해지는 입력의 크기와 시간이다. 마지막 시간인 t_n 일 때 A_{amp} 는 0 이 되어야 하므로, 식 (3)의 괄호안의 두 항은 각각 0(zero) 이 되어야 한다. 그러므로 식 (6)과 (7)을 만족해야 한다.

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

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

$$\sum_{i=1}^n A_i = 1 \quad (8)$$

식 (6) 과 (7)로부터 A_i, t_i 를 구할 수 있다. 식 (6) 과 (7)은 잔류진동을 0(zero)로 만들기 위한 식으로 방정식이 2개 이므로 impulse가 2개인 경우에 적용된다. impulse의 수에 증가에 따라 다수의 A_i 와 t_i 를 구한다. 그리고, 입력성형제어기를 통과한 임의의 명령어가 구동기의 최대 성능을 넘지 않게 하기 위해 제한조건 식 (8)를 추가한다.

제 2 절 입력성형제어기 이론

본 절에서는 입력성형제어를 구현하는 입력성형제어기를 설계하는데 필요한 이론 및 방법과 입력성형제어기의 각 특성에 따른 조건에 대해 정리한다. 제어시간의 단축을 위한 음의 입력 값을 포함한 입력성형제어기, modelling error에 더욱 강인한 입력성형제어기, 입력성형제어기를 실행하는 도중의 과도변위를 제한하기 위한 입력성형제어기 대해 정리한다. 또한, 입력성형제어기를 설계하기 위한 vector diagram approach에 대한 설명과 입력성형제어기 설계 시 초기입력을 가속도와 속도로 선정할 때의 차이점에 대해 정리한다.

1. 제어시간 단축을 위한 입력성형제어기

유연시스템의 잔류진동의 저감을 위해 입력성형제어기의 활용하는데, 입력성형제어기의 time delay 특성으로 제어종료시간이 증가한다. 시간 증가는 산업현장의 생산성을 저감하는 요인으로 작용될 수 있다. 제어종료시간을 단축하기 위해 음의 입력을 포함한 입력성형제어기 UM-ZV (Unit Magnitude Zero Vibration)제어기가 제안 되었다.⁽³¹⁾ zero 잔류진동을 얻기 위한 조건을 만족하고 입력크기가 식 (9)를 만족하는 조건을 이용하여 UM-ZV제어기의 입력의 크기와 시간을 구하면 식 (10)으로 표현된다. UM-ZV제어기를 활용 하여 시스템의 rest-to-rest motion을 위한 입력성형제어기는 Fig. 3-3 과 같이 나타난다.

$$A_i = (-1)^i \tag{9}$$

$$\begin{bmatrix} A_i \\ t_i \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & -1 & 1 \\ 0 & \frac{T}{6} & \frac{T}{3} \end{bmatrix} \tag{10}$$

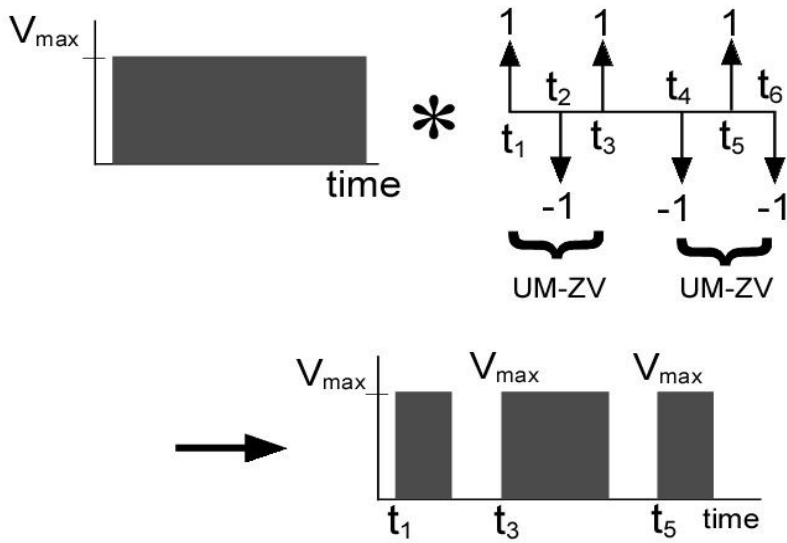


Fig. 3-3 UM-ZV for rest-to-rest motion

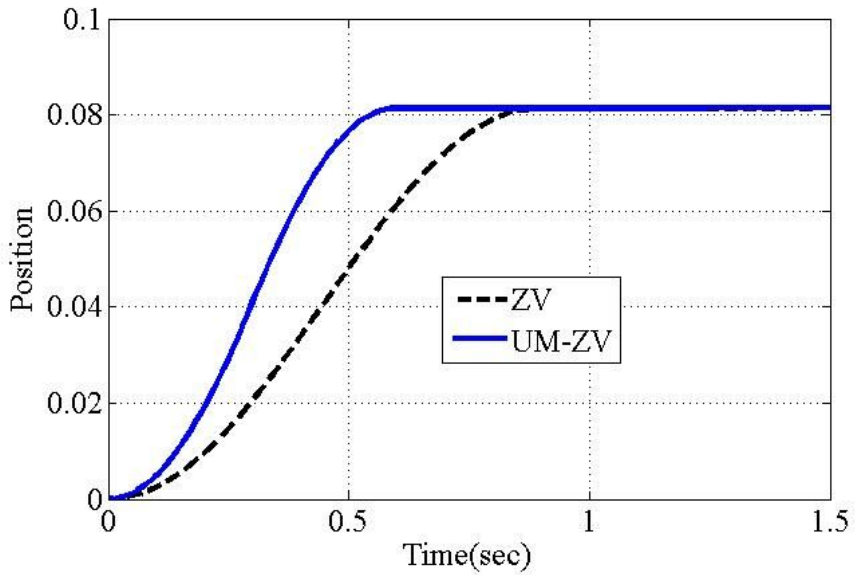


Fig. 3-4 Position response to ZV and UM-ZV controllers

Fig. 3-4는 입력성형제어기 ZV(Zero Vibration)⁽³²⁾와 비교했을 때 UM-ZV입력성형제어기가 정상상태에 도달하는 시간이 ZV보다 단축됨을 보인다.

2. 강인한 입력성형제어기

입력성형제어기의 설계 시 사용된 주파수와 감쇠비가 실제 시스템의 주파수 및 감쇠비와 정확하게 일치 하지 않거나, 제어도중에 변화 하면 입력성형제어기의 잔류진동 저감의 높은 성능을 기대하기 어렵다. system modeling error에 강인한 제어기를 설계하기 위해 impulse의 수를 증가시킨 입력성형제어기가 개발되었다.⁽³³⁾ 잔류진동을 얻기 위한 식 (3)에서 시스템주파수 변화에 강인한 입력성형제어기를 개발하기 위해 ω_n 로 미분하여 식(11)과 같이 나타냄으로써, 시스템주파수에 강인한 입력성형제어기를 설계할 수 있다.

$$0 = \frac{d}{d\omega_n} e^{-\zeta\omega t_n} \sqrt{\left[\sum_{i=1}^n A_i e^{\zeta\omega t_i} \cos(\omega \sqrt{1-\zeta^2} t_i)\right]^2 + \left[\sum_{i=1}^n A_i e^{\zeta\omega t_i} \sin(\omega \sqrt{1-\zeta^2} t_i)\right]^2} \quad (11)$$

식 (11)의 괄호안의 두 항은 각각 0(zero) 가 돼야 하므로, 식 (12)과 (13)을 만족해야 한다.

$$\sum_{i=1}^n A_i t_i e^{-\zeta\omega(t_n-t_i)} \sin(t_i \omega \sqrt{1-\zeta^2}) = 0 \quad (12)$$

$$\sum_{i=1}^n A_i t_i e^{-\zeta\omega(t_n-t_i)} \cos(t_i \omega \sqrt{1-\zeta^2}) = 0 \quad (13)$$

impulse의 수가 증가할수록 입력성형제어기는 강인성이 증가하지만 정상상태 도달 시간의 증가하게 된다. 그러므로, 강건성과 응답속도를 trade-off하여 입력성형제어기를 설계한다. 식 (14)는 ZV제어기에 감쇠비를 0(zero)일 때, 시스템주파수에 대해 강건성을 개선한 ZVD(Zero Vibration Derivative)제어기다. 여기서 k는 식(15)에 나타나 있다.

$$\begin{bmatrix} t_i \\ A_I \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & \frac{\pi}{\omega} & \frac{2\pi}{\omega} \\ \frac{k^2}{k^2 + 2k + 1} & \frac{2k}{k^2 + 2k + 1} & \frac{1}{k^2 + 2k + 1} \end{bmatrix} \quad (14)$$

$$k = \frac{5\pi}{e\sqrt{1-\zeta^2}} \quad (15)$$

ZVD제어기를 활용하여 시스템의 rest-to-rest motion을 위한 입력성형제어기는 Fig. 3-5 와 같이 나타난다.

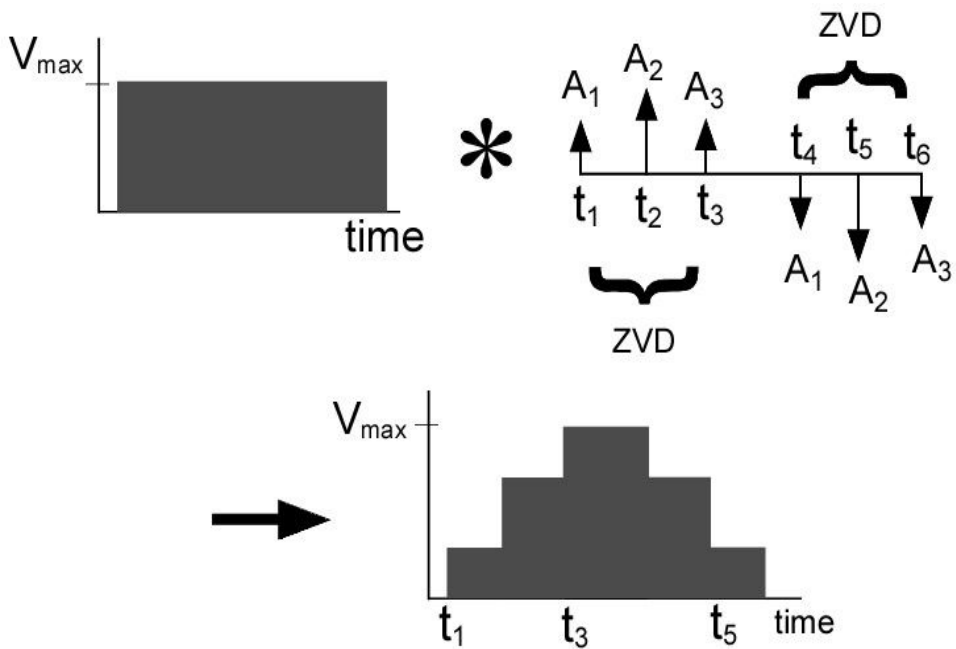


Fig. 3-5 Rest-to-rest command with ZVD controller

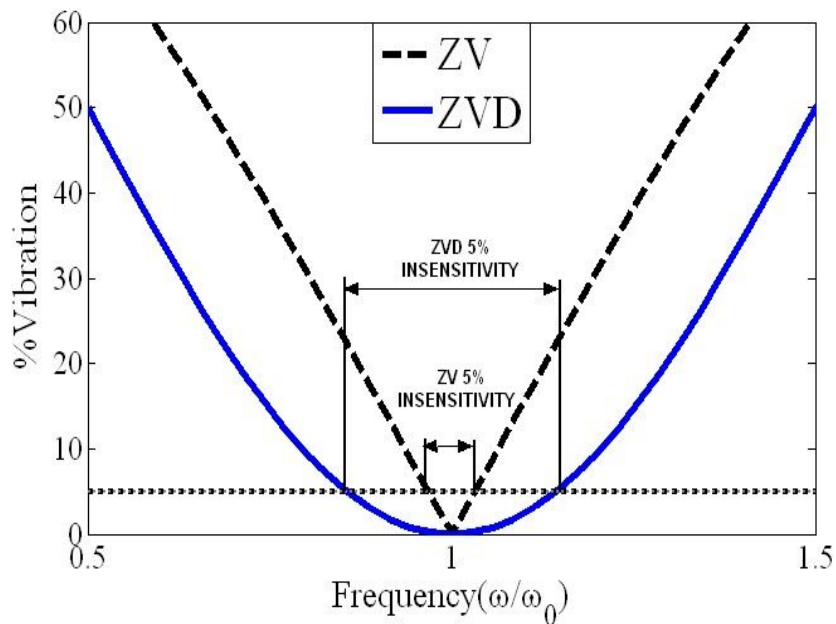


Fig. 3-6 Sensitivity curve for ZV and ZVD

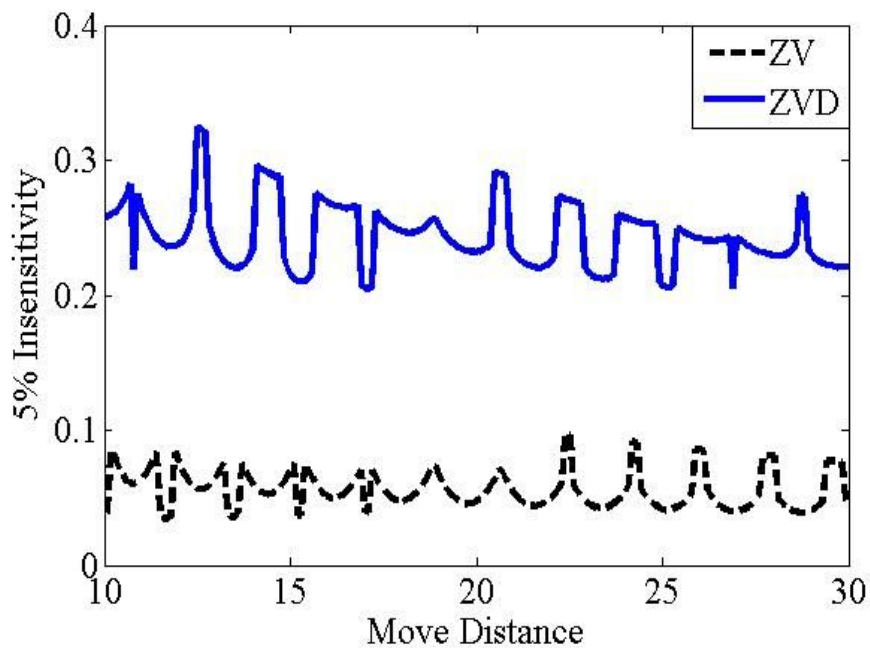


Fig. 3-7 5% insensitivity with move distance

Fig. 3-6 는 ZV와 ZVD제어기의 강인성을 비교한 그림으로 x축은 실제 주파수로 normalization하였다. 실제 주파수와 이론 주파수의 값이 동일한 1을 기준하여 허용 잔류진동(residual vibration) 5% 으로 insensitivity를 정의 할 때, x축의 오차 범위가 넓은 ZVD제어기가 ZV제어기보다 강인하다는 것을 확인 할 수 있다. Fig. 3-7 은 유연시스템의 rest-to-rest motion을 위해 적용한 ZV와 ZVD제어기를 이동거리에 대해 5% insensitivity를 실제주파수를 이론주파수로 나눈 오차 값을 y축에 나타냈다. move distance에 따른 ZV제어기보다 ZVD제어기의 강건성이 높음을 나타내고 있다.

3. 과도변위 제한을 위한 입력성형제어기

앞 절까지는 입력성형제어기의 잔류변위에 관해 정리하였고, 과도변위에 대해 문헌상의 내용을 정리한다. 유연시스템의 과도변위는 시스템에 충격을 가해 피로와 마모를 유발하여 시스템의 수명을 단축하며 안전사고의 원인이 된다. 이런 문제점을 보완하기 위해 UM-ZV제어기의 t_3 때 impulse 크기를 1 보다 작은 A_3 선택한 과도변위를 제한한 입력성형제어기 MUM-ZV (Modified Unit Magnitude Zero Vibration)가 개발되었다.⁽³⁴⁾ MUM-ZV제어기의 impulse의 크기와 시간은 식 (16)로 나타난다. 시간 t_2 와 t_3 는 각각 식(17)과 (18)이다.

$$\begin{bmatrix} t_i \\ A_I \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & t_2 & t_3 \\ 1 & -1 & A_3 \end{bmatrix} \quad (16)$$

$$t_2 = \frac{1}{\omega} \cos^{-1} \left(1 - \frac{A_3^2}{2} \right) \quad (17)$$

$$t_3 = \frac{1}{\omega} \cos^{-1} \left(-\frac{A_3}{2} \right) \quad (18)$$

MUM-ZV제어기를 활용하여 시스템의 rest-to-rest motion을 위해 개발한 입력성형제어기는 Fig. 3-8과 같이 나타난다. Fig. 3-9는 과도변위 제한 성능 검증을

위해 최대속도를 1로 설정하여 과도변위를 제한하지 않은 UM-ZV제어기와 A_3 를 각각 0.8 과 0.6으로 설정한 MUM-ZV제어기의 rest-to-rest motion에서의 수치 시뮬레이션 결과이다. start motion을 위한 MUM-ZV제어기 및 stop motion을 위한 MUM-ZV제어기의 A_3 값에 따라 과도변위가 감소하였다.

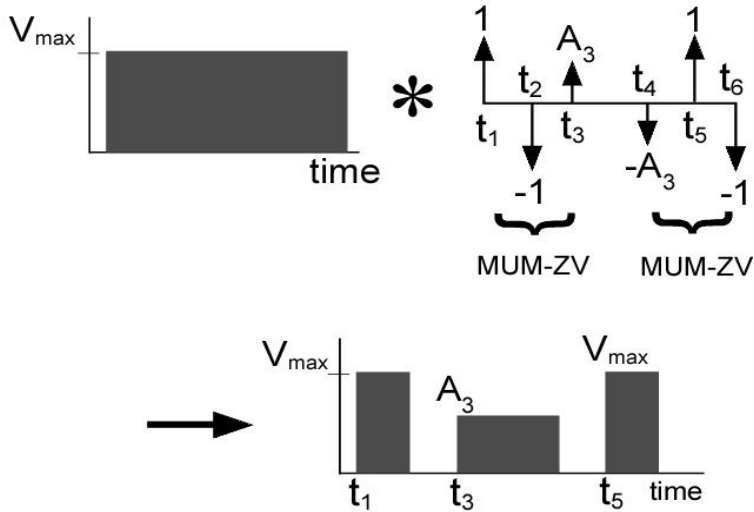


Fig. 3-8 MUM-ZV2 controller for rest-to-rest motion

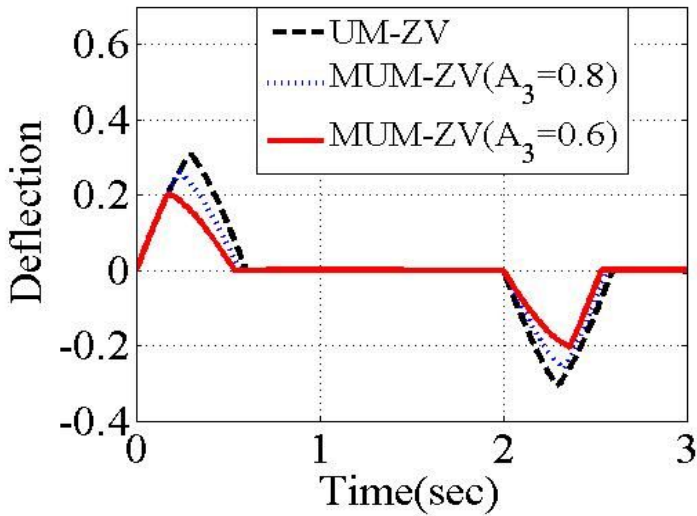
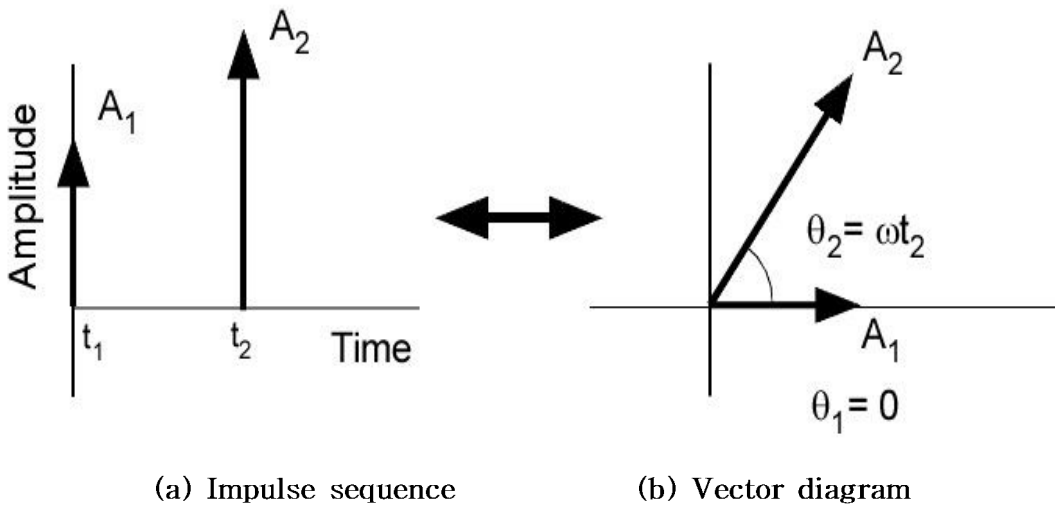


Fig. 3-9 Deflection responses to A_3

4. Vector diagram approach

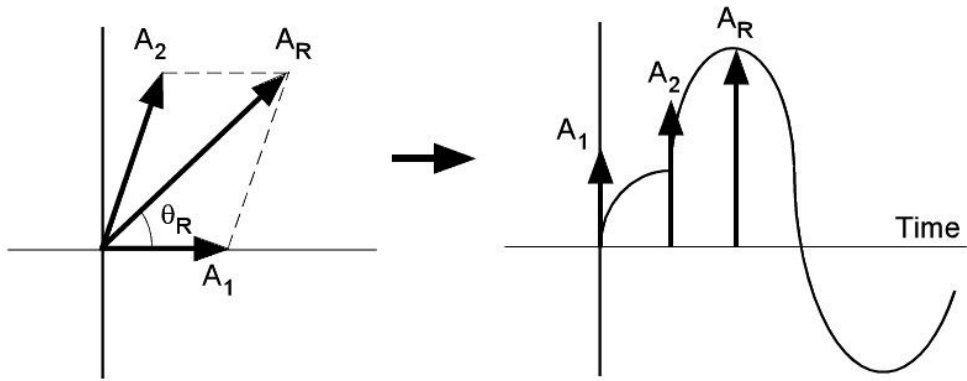
입력성형제어기의 설계과정을 단순화하기 위해 graphical method로 vector calculus를 이용하여 impulse의 크기와 시간을 결정하기 위해 vector diagram approach가 개발 되었다.^(35,36) impulse의 크기를 vector의 크기로 나타내고 시간을 vector의 각으로 표시한다. Fig. 3-10는 impulse sequence를 (a)시간 영역 과 (b) vector 영역으로 표시하면, 시간영역에서 A_1 와 A_2 는 vector의 크기로 나타나고, t_1 및 t_2 는 $\theta_1=0$ 와 $\theta_2=\omega t_2$ 로 표현된다. Fig. 3-10 (b)의 A_1 와 A_2 가 합은 Fig. 3-11 (a)에서와 같이 A_R 의 크기에 따라 impulse sequence에 의해 잔류진동은 Fig. 3-11 (b)로 나타난다.



(a) Impulse sequence

(b) Vector diagram

Fig. 3-10 A vector diagram approach

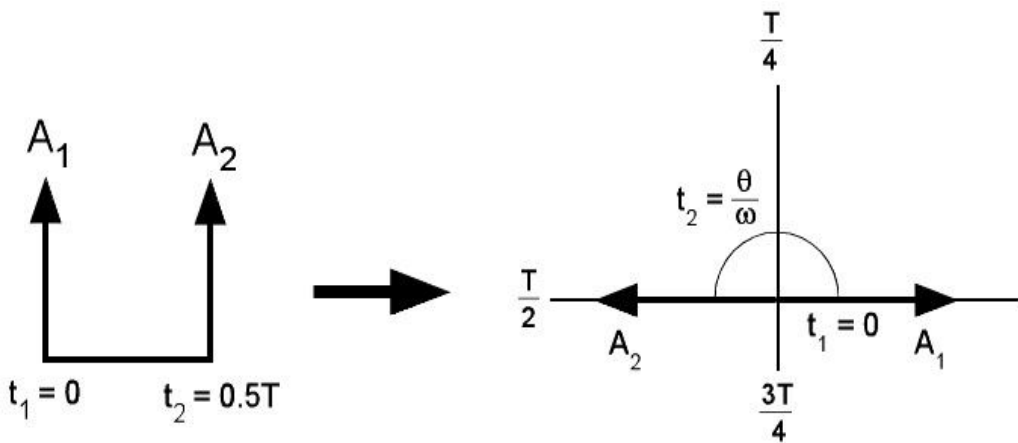


(a) Vector diagram

(b) Time domain

Fig. 3-11 Residual vibration by impulse sequence

Fig. 3-12의 (b)는 (a)의 ZV제어기의 vector diagram으로 표현한 것이다. vector sum이 (0)zero인 θ 를 구하면, zero residual vibration을 위한 각각의 impulse의 time location을 쉽게 결정 할 수 있다.



(a) ZV controller

(b) Vector diagram of ZV controller

Fig. 3-12 Vector diagram approach of ZV controller

5. 가속도 및 속도 명령어의 비교

입력성형제어기는 속도 혹은 가속도로 표시되는 임의의 input command에 대해 잔류진동을 저감하기 위해 적용된다. 속도와 가속도는 미적분관계가 있으므로, 입력성형제어기가 적용된 shaped command의 형태가 달라진다. step input을 활용하여 간단히 shaped command의 미적분관계를 설명한다. Fig. 3-13은 속도 command가 trapezoidal shaped command로 나타나고, Fig. 3-14는 가속도 command가 ZV input shaper 형태의 shaped command를 얻는다.

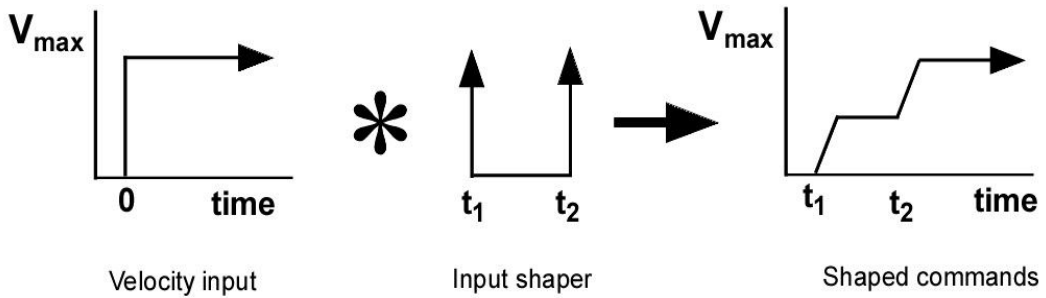


Fig. 3-13 Velocity shaped commands

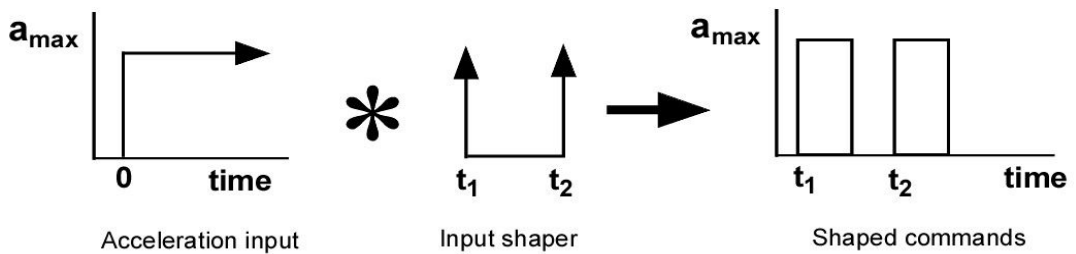


Fig. 3-14 Acceleration shaped commands

제 4 장 비선형 시스템의 과도 및 잔류진동 제거를 위한 입력성형제어기

산업현장에서 사용되는 유연시스템의 구동기(actuator)는 전기적 및 물리적 동적 특성으로 인해 Fig. 4-1과 같이 shaped command는 비선형 드라이버에 의해 변형된 shaped command로 나타난다. 설계된 입력성형제어기의 잔류진동 저감 성능이 크게 감소한다.

본 장에서는 위해 유연 시스템의 비선형 구동기 및 과도변위를 제한하기 위해 선형 과도변위 제한 입력성형제어기인 MUM-ZV에 vector diagram approach을 활용하여 MDL-ZVC(Modified Deflection Limiting Zero Vibration)제어기를 개발한다. 또한 MDL-ZVC를 활용하여 시스템의 rest-to-rest motion을 위한 MDL-ZVC2 제어기를 개발한다.

MDL-ZVC의 개발을 위해 먼저 구동기의 가속도(mm/s^2)와 jerk(mm/s^3)가 입력성형제어기에 어떤 영향을 주는지 분석하고, 실험을 통하여 시스템 구동기의 속도 명령어에 따른 입력성형제어기의 제어성능을 평가한다. 입력성형제어기의 성능분석의 결과를 반영한 입력성형제어기에 대해 과도변위 제한 및 잔류진동 저감 성능을 수치 시뮬레이션과 실험을 통하여 검증한다.

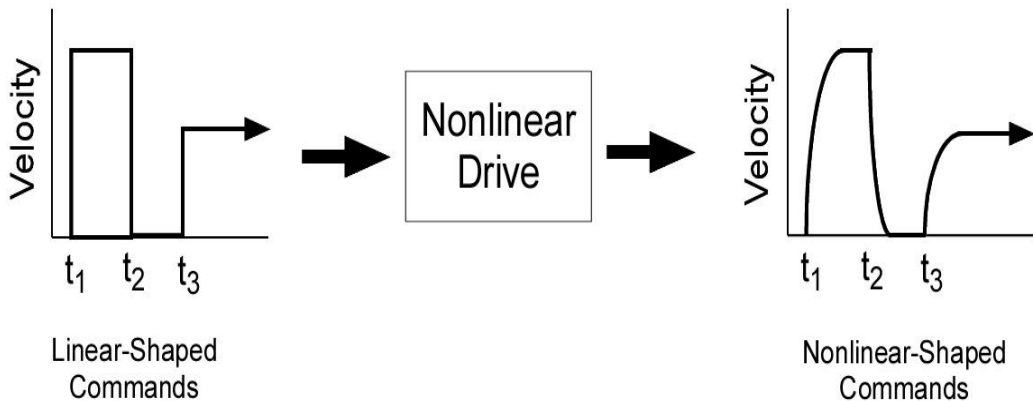


Fig. 4-1 Effect on nonlinear drive

제 1 절 가속도나 Jerk 가 입력성형제어기에 주는 영향

1. 속도명령어에 따른 성능실험

실험장치를 활용하여 가속도(mm/s^2)와 jerk(mm/s^3)값에 따른 입력성형제어기에 대한 효과분석을 하였다.⁽³⁷⁾ Fig. 4-2는 실험장치의 최대성능으로 가속도와 Jerk를 setting 하였을 때, rest-to-rest motion을 위한 측정된 속도명령어이다. pulse duration 이 5초인 경우, no-shape, UM-ZV제어기 및 ZV제어기의 순서로 final ending time이 결정된다. 가속도와 jerk가 입력성형제어기의 제어성능에 대한 영향을 분석하기 위해 실험조건은 Table 4-1에 나타나 있다.

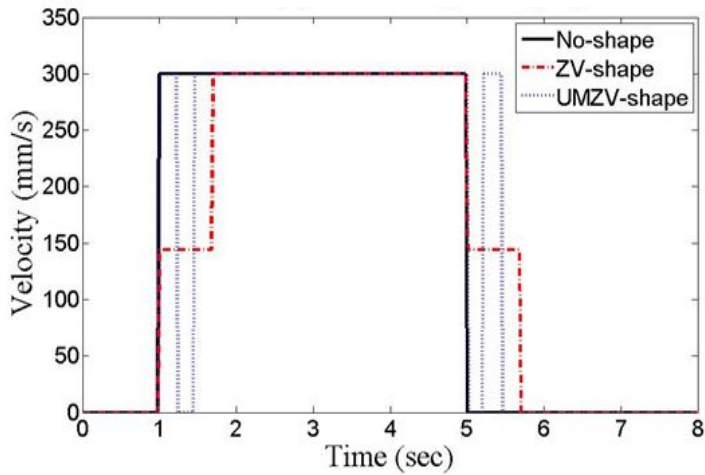
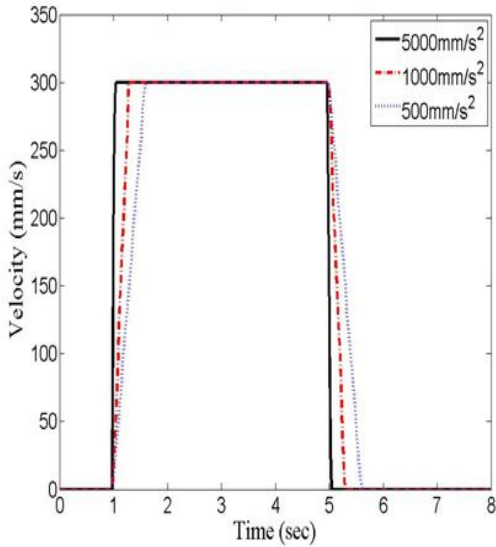


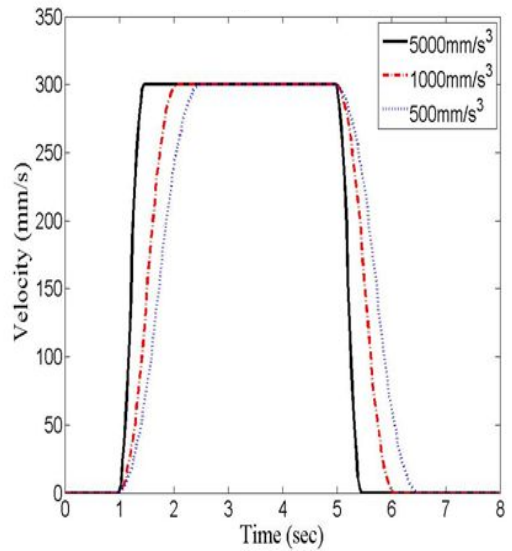
Fig. 4-2 Experimental velocity command with $36,000\text{mm/s}^2$ and $\infty\text{mm/s}^3$

Table 4-1 Experimental parameters

Suspension length	max velocity	Acceleration	Jerk
840(mm)	300(mm/s)	$100\sim 36000(\text{mm/s}^2)$	$200\sim 36000(\text{mm/s}^3)$



(a) acceleration with $\infty \text{mm/s}^3$



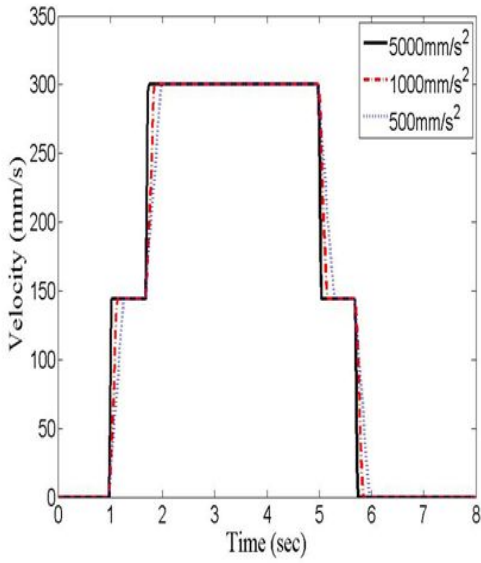
(b) jerk with 36000mm/s^2

Fig. 4-3 Velocity measurement of no-shape

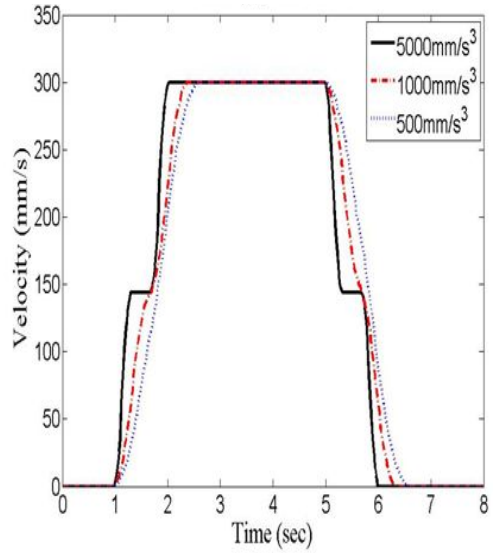
Fig. 4-3은 입력성형제어기를 사용하지 않은 no-shape의 경우, 가속도 및 jerk 값에 따른 실험장치의 속도를 측정된 결과를 나타내고 있다. 가속도값은 속도명령어의 기울기에 관여하고, jerk는 속도명령어의 변곡지역에 영향을 나타내어 시간지연이 발생된다. no-shape의 실험결과로 부터 속도명령어는 가속도나 jerk 값이 작을수록 시간지연이 더 많이 발생되어, 최고 및 최소 속도에 도달하는데 더 많은 시간이 소요된다.

Fig. 4-4는 ZV제어기를 가속도와 jerk에 따른 실험장치의 속도명령어 측정결과이다. 가속도에 따른 ZV속도명령어의 기울기 변화를 야기한다. 그러나, jerk값에 따른 시간지연 효과 때문에 1000mm/s^3 이하에서는 ZV 제어기의 속도명령어가 collapse 된다.

Fig. 4-5는 UMZV제어기를 가속도와 jerk에 따라 측정된 속도명령어이다. 가속도를 변화한 속도명령어는 가속도 값이 1000mm/s^2 이하의 값에서는 속도명령어가 collapse된다. jerk값에 따른 속도명령어는 5000mm/s^3 이하에서 이론적인 UMZV속도명령어가 collapse된다.

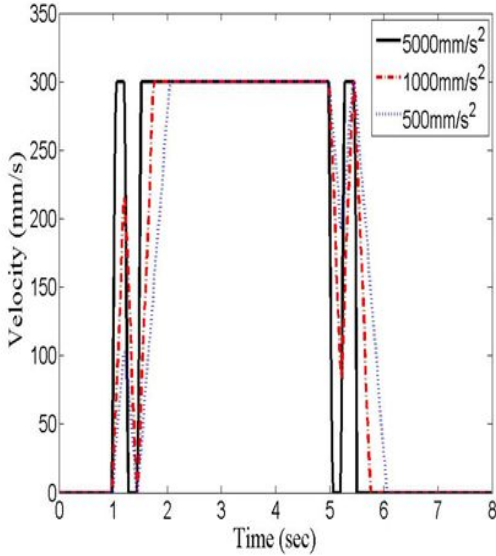


(a) acceleration with $\infty \text{mm/s}^2$

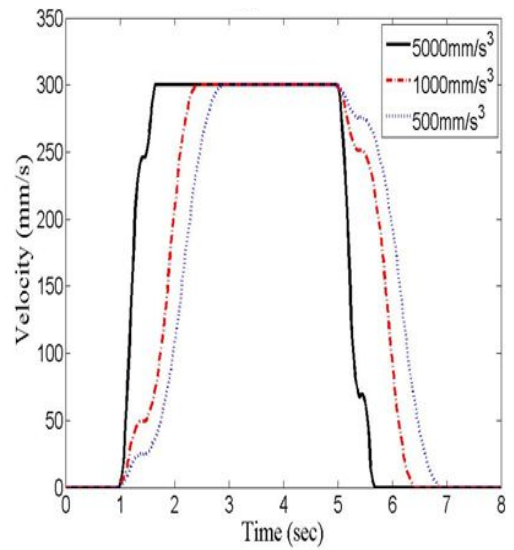


(b) jerk with 36000mm/s^2

Fig. 4-4 Velocity measurement of ZV controller



(a) acceleration with $\infty \text{mm/s}^2$



(b) jerk with 36000mm/s^2

Fig. 4-5 Velocity measurement of UMZV controller

2. 가속도 및 jerk에 따른 입력성형제어기의 성능실험

가속도와 jerk가 입력성형제어기의 잔류진동 저감 성능에 대한 영향분석을 위해 실험하였다. Fig. 4-6 은 가속도값에 따른 잔류진동을 측정한다. jerk에 영향을 제거하기 위해 최대 jerk인 무한대(∞)로 설정하고, 실험장치의 운전영역을 고려한 최소값인 100mm/s^2 에서 최고 30000mm/s^2 까지 잔류진동을 측정하였다. no-shape의 경우 500mm/s^2 이상에서 130mm 의 잔류진동이 발생된다. ZV와 UMZV 제어기는 약 20mm 의 잔류진동변위를 나타내어 no-shape에 비해 85%의 개선효과를 나타내었다.

Fig. 4-7은 jerk값에 따른 잔류진동변위를 측정하였다. 가속도값의 영향을 최소화하기 위해 최고값으로 설정 하였고, 실험장치의 운전영역을 고려하여 200mm/s^3 에서 30000mm/s^3 까지 잔류진동변위를 측정하였다. no-shape의 경우 5000mm/s^3 이하에서 jerk에 의한 시간지연 효과를 잔류진동변위가 낮게 나타났다. ZV 제어기는 전체 실험영역에서 약 20mm 의 잔류진동변위를 보였다. UMZV 제어기는 20000mm/s^3 이상에서 잔류진동변위가 20mm 로 나타났다. Fig. 4-5 (b)에서 jerk에 따른 속도명령어가 no-shape와 유사한 형태로 나타나기 때문에 5000mm/s^3 에서 no-shape과 거의 동일하게 잔류진동변위가 발생되었다.

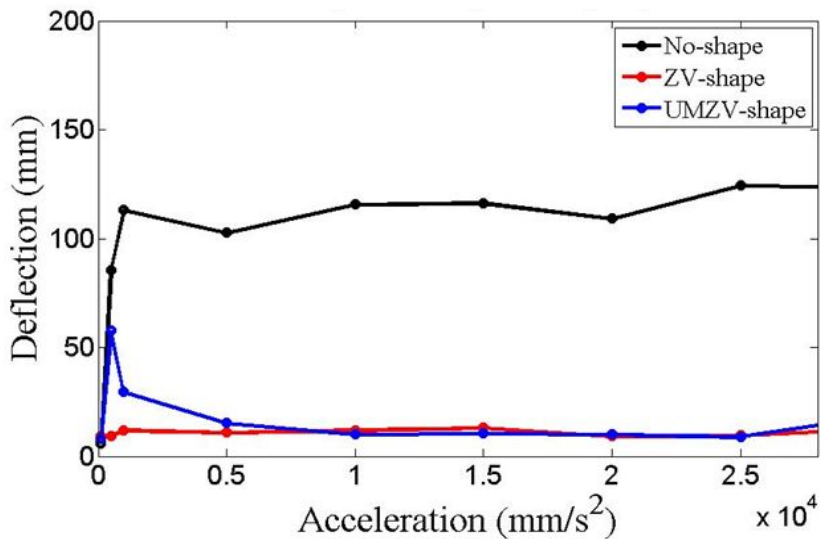


Fig. 4-6 Deflection measurement to acceleration variation

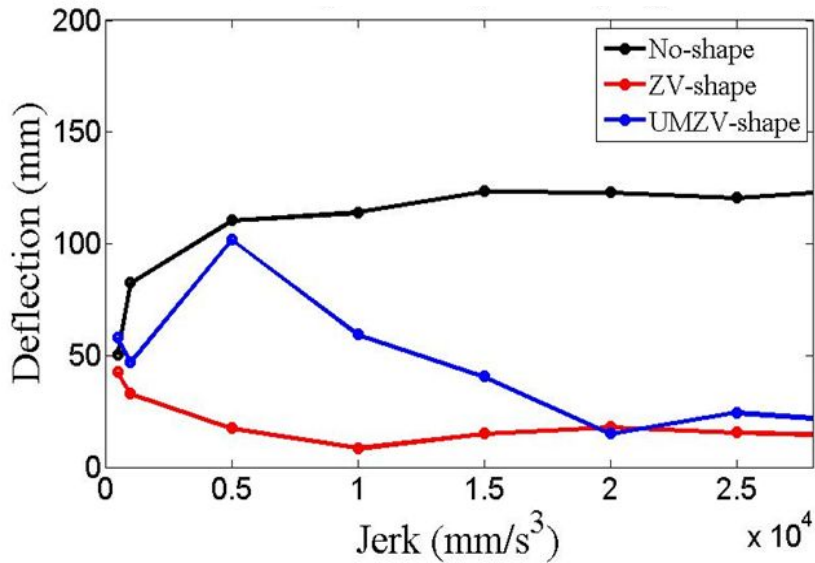


Fig. 4-7 Deflection measurement to jerk variation

가속도와 jerk가 입력성형제어기에 어떤 영향을 주는지 실험을 통하여 다음의 결론을 얻었다. 가속도나 jerk의 값에 의해 정상속도에 도달하는데 시간지연이 발생되어 입력성형제어기의 잔류진동 저감 성능이 감소된다. Table 4-2에 no-shape에 대한 잔류진동변위의 개선효과를 나타내었다.

Table 4-2 Residual vibration comparison with the variation of acceleration and jerk

구분	실험 값	ZV controller	UMZV controller
가속도(mm/s ²)	1000mm/s ² 이상	90% 감소	90% 감소
	1000mm/s ² 이하	90% 감소	90% 감소
jerk(mm/s ³)	5000mm/s ³ 이상	약 80% 감소	약 60% 감소
	5000mm/s ³ 이하	약 50% 감소	약 20% 감소

제 2 절 실제 시스템 구동기의 분석

1. 비선형 구동기의 영향

본 절에서는 유연시스템의 비선형 구동기의 특성에 따라 입력성형제어기에 어떤 영향을 주는지 분석한다.⁽³⁸⁾ 시스템 구동기의 비선형의 원인으로서는 크게 두 가지로 나눌 수 있다. 첫 번째, 짧은 시간에 최대속도 및 최소속도로의 급격한 속도의 변화는 시스템에 많은 충격을 야기하고, 시스템의 수명을 단축한다. 안전한 시스템의 구동을 위해 구동기의 운전을 exponential function로 설계된다. 두 번째, 시스템 구동기의 전기적 특성과 시스템 inertia force로 인한 물리적 특성으로 짧은 시간에 최대속도 혹은 최소속도로의 속도명령어는 exponential function으로 나타난다. Fig. 4-8은 비선형 명령어가 생성되는 과정을 블록선도를 표시했다. 계단입력은 입력성형제어기와 convolution되어 shaped command가 생성된다. nonlinear drive에 의해 가감속구간이 exponential function으로 나타난다.

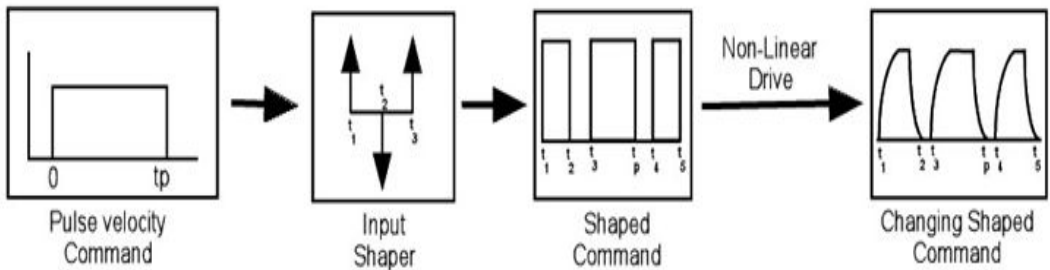


Fig. 4-8 Command generation process

Fig. 4-9는 이상적인 입력성형제어기에 대한 응답으로 제어명령이 완료된 후, 잔류진동이 발생되지 않는다. Fig. 4-10은 비선형 구동기에서 이상적인 입력성형제어기의 시간응답으로 잔류진동변위의 저감 성능이 감소한다.

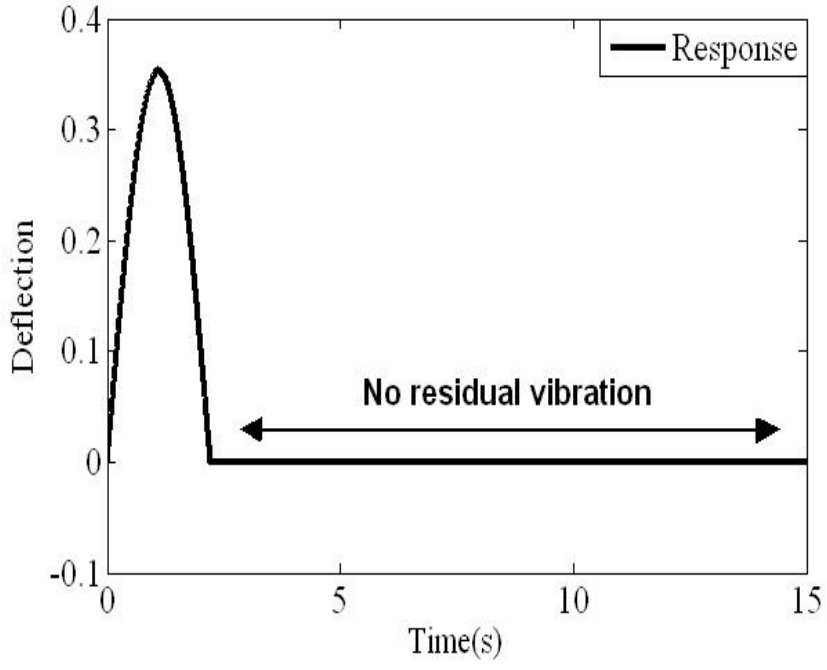


Fig. 4-9 Deflection response with linear drive

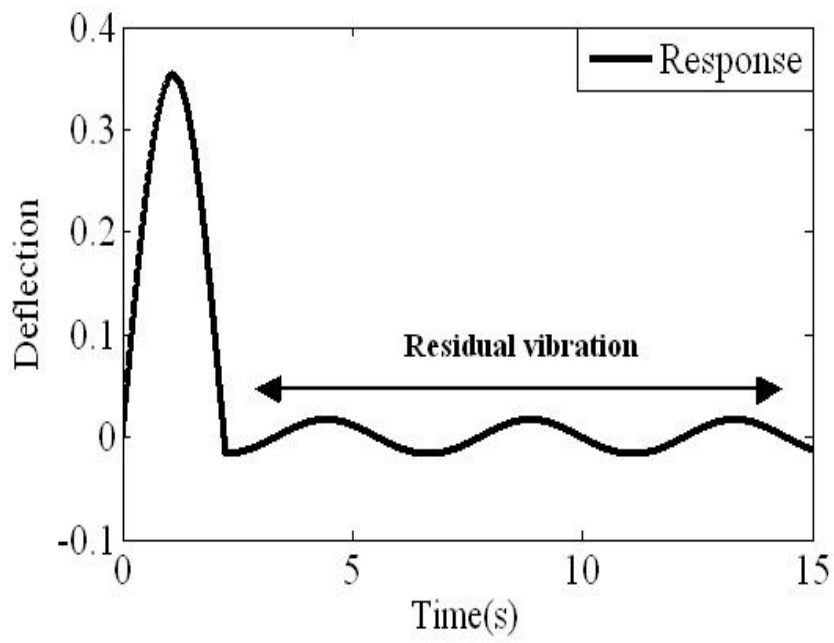


Fig. 4-10 Deflection response with nonlinear drive

2. 비선형 구동기에서의 입력성형제어기의 평가

유연시스템의 rest-to-rest motion을 위한 ZV2 와 UM-ZV2제어기에 대해 비선형 구동기의 효과를 분석하였다. Fig. 4-11은 ZV제어기의 이상적인 속도명령어와 비선형 구동기에 의한 실제 속도명령어이다. pulse duration이 ZV제어기의 t_2 보다 작을 경우의 short command라고 한다. 입력성형제어기는 비선형에 의해 지연된 시간에 영향을 받지 않아 가감속의 변환 전에 최대 및 최소 속도에 도달한다. Fig. 4-12는 pulse duration이 ZV제어기의 t_2 보다 큰 경우의 long command로 한다. long command는 속도가 증가하는 구간인 ramp-up 부분과 감속하는 구간인 ramp-down으로 나누어지고, 가감속의 변환 전에 최대 및 최소 속도까지 도달한다. Fig. 4-13은 ZV제어기의 short command와 long command의 중간인 interference command이다. interference command는 비선형 구동기에 의해 가감속의 변환 전에 최대 및 최소 속도까지 도달하기 전에 입력이 변경된다.

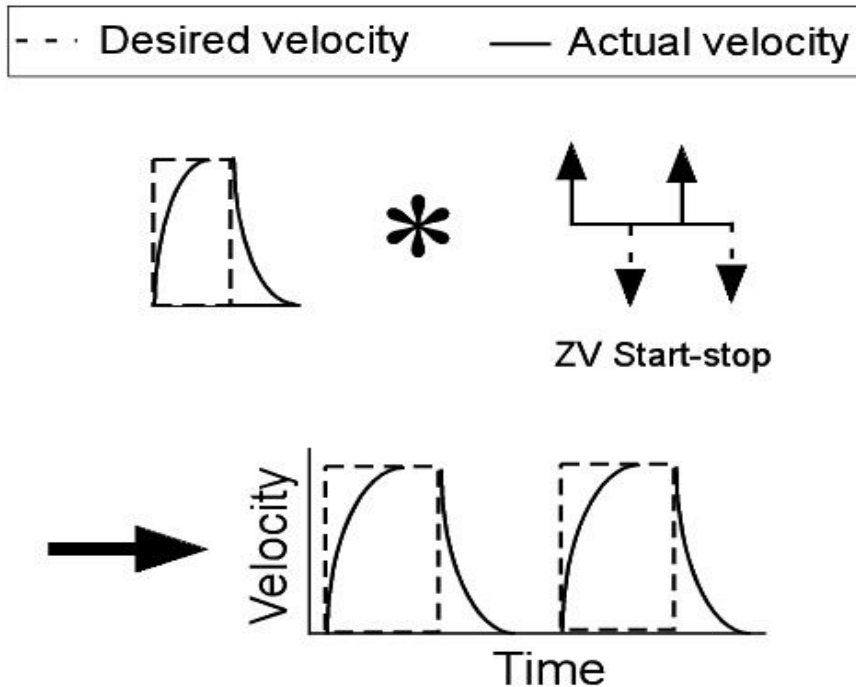


Fig. 4-11 Short command of ZV controller

- - - Desired velocity — Actual velocity

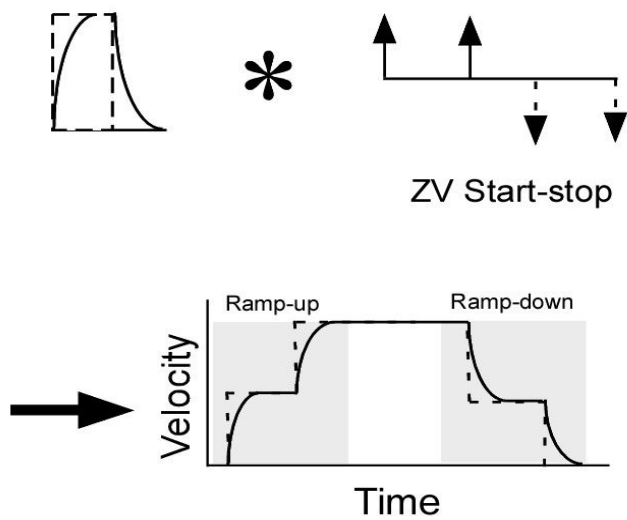


Fig. 4-12 Long command of ZV controller

- - - Desired velocity — Actual velocity

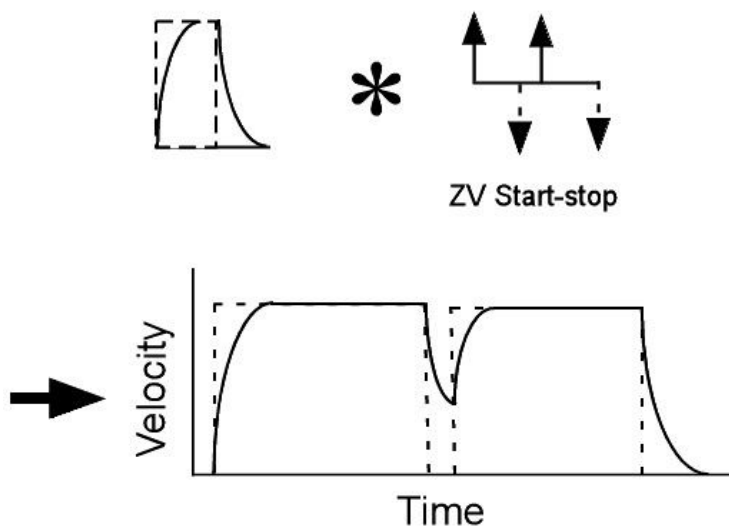


Fig. 4-13 Interference command of ZV controller

Fig. 4-14는 UM-ZV2제어기의 이상적인 속도명령어와 비선형 구동기에 의해 변환된 실제 속도명령어로 pulse duration이 UM-ZV제어기의 t_3 보다 작을 경우의 short command이다. 음에 속도를 포함하고 있어서 입력성형제어 도중에 방향이 변경되며, short command는 비선형에 의해 지연된 시간에 영향을 받지 않아 가속속의 변환 전에 속도가 최대 및 최소 속도까지 도달 후에 가속과 감속이 전환된다.

Fig. 4-15는 pulse duration이 UM-ZV제어기의 t_3 보다 클 경우의 long command이다. short command와 상이하게 음의 속도를 포함하고 있지 않고, 최대 및 최소 속도까지 도달 후에 가속과 감속이 전환된다.

Fig. 4-16은 UM-ZV제어기에서 short command와 long command 중간인 interference command 이다 비선형 구동기에 의해 지연된 시간이 다음 입력시간 보다 짧아서 최대 및 최대 속도까지 도달하기 전에 가속과 감속이 전환된다.

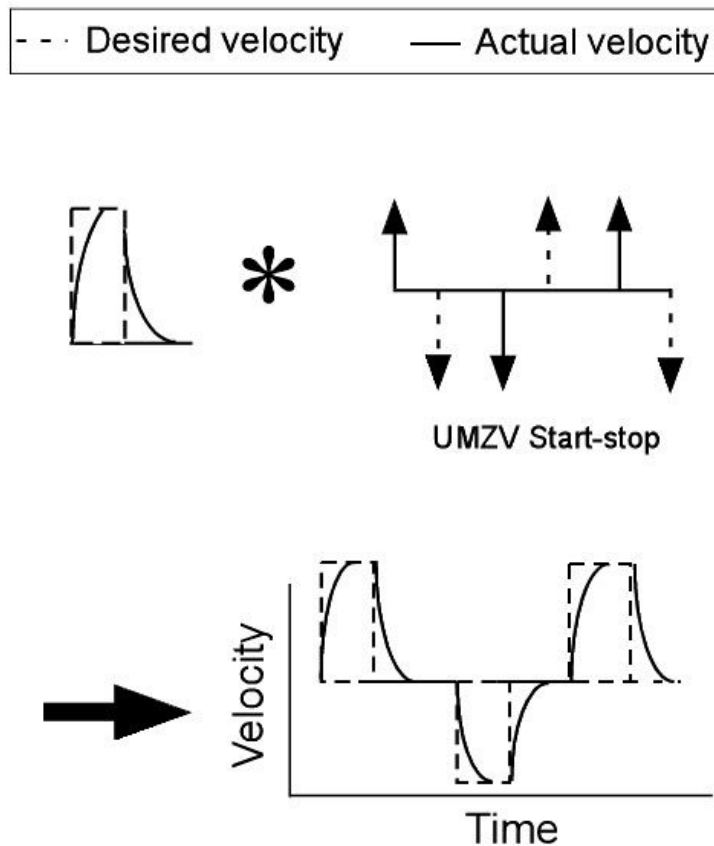


Fig. 4-14 Short command of UM-ZV controller

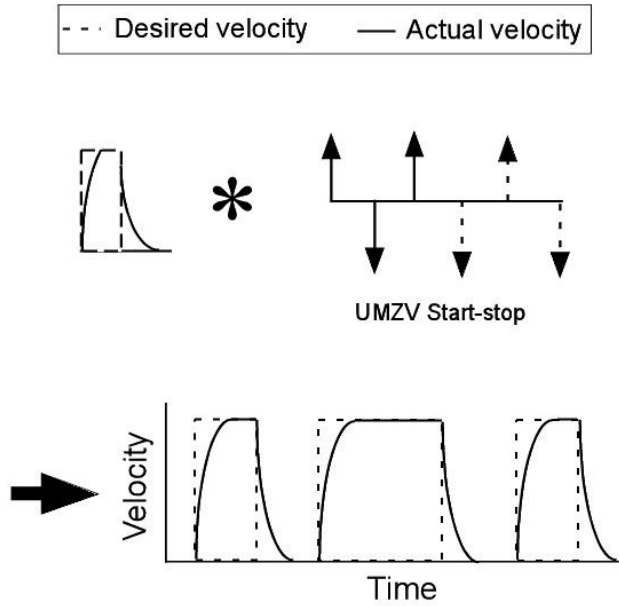


Fig. 4-15 Long command of UM-ZV controller

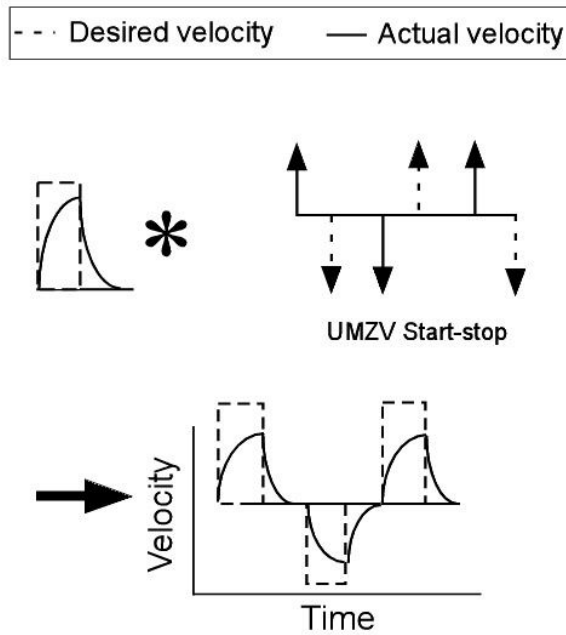


Fig. 4-16 Interference command of UM-ZV controller

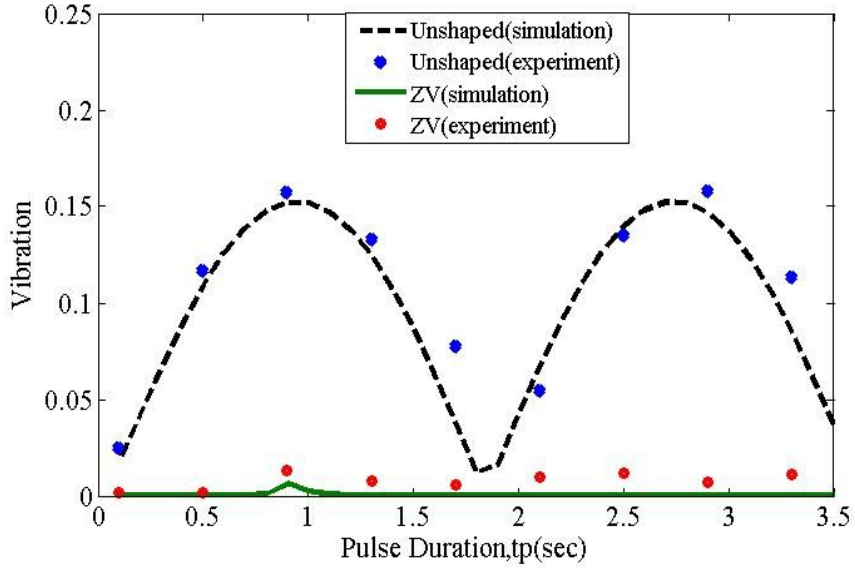


Fig. 4-17 Residual vibration comparison of ZV controller and unshaped input shaping

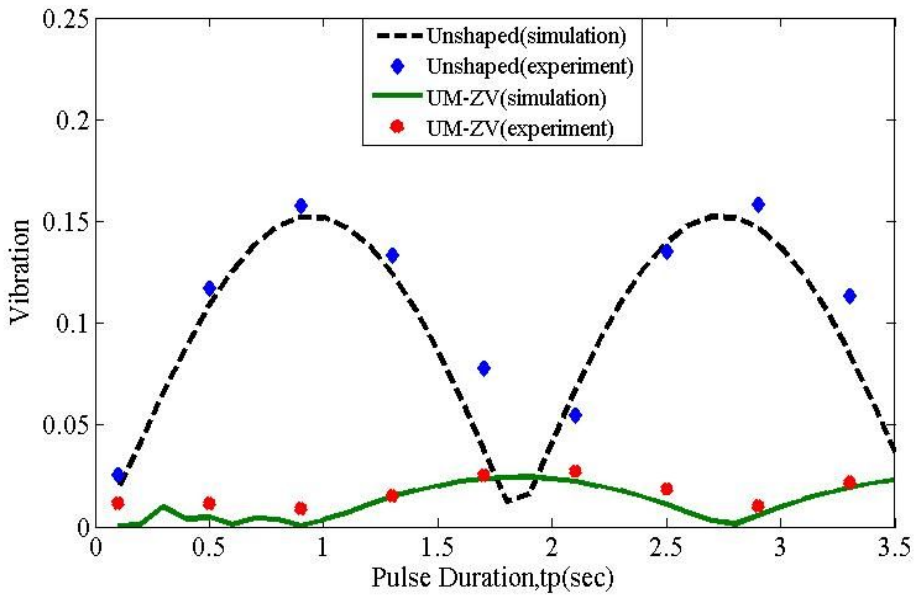


Fig. 4-18 Residual vibration comparison of UM-ZV controller and unshaped input shaping

Fig. 4-17와 4-18은 유연시스템에 입력성형제어기의 명령어가 완료된 후, pulse duration에 따른 잔류진동변위를 측정하였고, 실험장치의 최대속도를 0.2m/s 와 payload까지의 길이는 0.8m로 설정 하였다. 그리고, 최대속도의 63% 까지 도달하는 시간 acceleration time constant(τ_a)=0.1(sec)로 설정하고 최소속도의 63% 까지 도달하는 시간 deceleration time constant(τ_b)=0.05(sec) 로 설정 하였다. Fig. 4-17는 ZV2제어기의 잔류진동변위를 측정하였다. ZV2제어기의 $t_2= 0.9$ 초로 pulse duration이 0.9초를 기준으로 short command와 long command로 나뉜다. 수치 시뮬레이션 및 실험결과 short과 long command를 결정하는 t_2 를 경계로 약간의 시간을 제외하고, 잔류진동의 발생이 저감 되었다. 그러나, pulse duration이 t_2 의 short command와 long command 사이의 interference command에서는 입력성형제어기의 잔류진동 저감 성능이 감소하여 진동이 발생되었다. Fig. 4-18은 pulse duration에 따른 UM-ZV2제어기의 잔류진동변위를 측정하였다. 여기서 UM-ZV2제어기의 $t_3=0.6$ 초로 pulse duration이 0.6초를 기준으로 short command와 long command로 나뉜다. UM-ZV2제어기는 ZV2제어기와 상이하게 short command를 제외하고 잔류진동변위가 발생 되었다.

유연시스템의 비선형 구동기가 입력성형제어기에 미치는 영향에 대해 실험한 결과, 비선형 구동기에 의한 지연시간이 입력성형제어기의 impulse location보다 짧으면 최대 및 최대 속도까지 도달하기 전에 가속과 감속이 전환되어 입력성형제어기의 잔류진동변위 저감 성능이 감소한다.

3. Time constants의 영향

유연시스템의 비선형 구동기에 영향에 의한 acceleration time constant(τ_a)와 deceleration time constant(τ_b)가 동일하면, 입력성형제어기에 의한 잔류진동변위 저감 성능이 향상된다. 그러나, τ_a 와 τ_b 의 차이가 클 수록 τ_b 에 의해 변화된 입력을 τ_b 의 입력이 보상되지 않아, 입력성형제어기의 제어성능이 낮게 나타난다. Fig. 4-19는 ZV2제어기의 τ_a 를 0.1초로 설정하고 τ_b 를 0.01초에서 0.3초로 까지 변경하여 수치 시뮬레이션 결과이며, τ_b 와 τ_a 가 동일한 시간인 0.1초에서 시스템이 선형 시스템과 유사해져 진동변위가 발생되지 않았고, 0.1초를 기준으로 멀어질수록 많은 진동변위가 발생 된다. Fig. 4-20은 UM-ZV2제어기를 τ_a 를 0.1초로 설정하고 τ_b

를 0.01초에서 0.3초로 까지 변경하여 수치 시뮬레이션 결과이며, τ_a 와 동일한 시간 인 τ_b 이 0.1초에서는 진동변위가 발생되지 않았고, 0.1초를 기준으로 멀어질수록 많은 진동변위가 발생되었다.

수치 시뮬레이션 결과, 제어의 강건성이 낮은 UM-ZV2제어기가 ZV2제어기보다 더 많은 잔류진동변위가 발생되었다. 앞장에서의 실험결과에서도 확인 하였듯 UM-ZV2제어기는 ZV2제어기에 비해 입력의 값이 급격하게 변하므로 ZV2제어기 보다 작은 τ_a 와 τ_b 에서 입력성형제어기의 잔류진동변위 저감 성능이 감소한다.

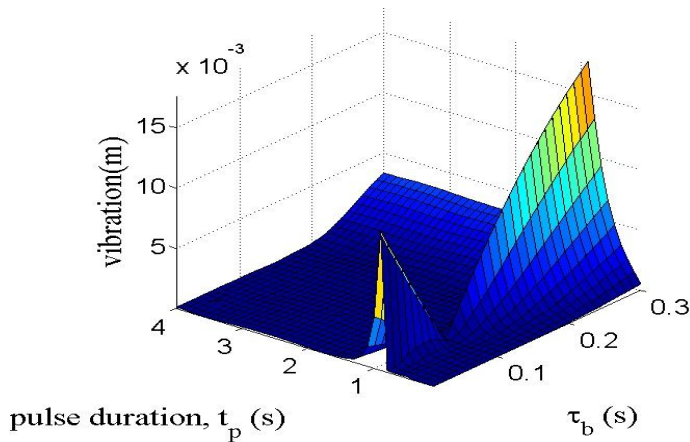


Fig. 4-19 Residual vibration of ZV controller to t_p and τ_b

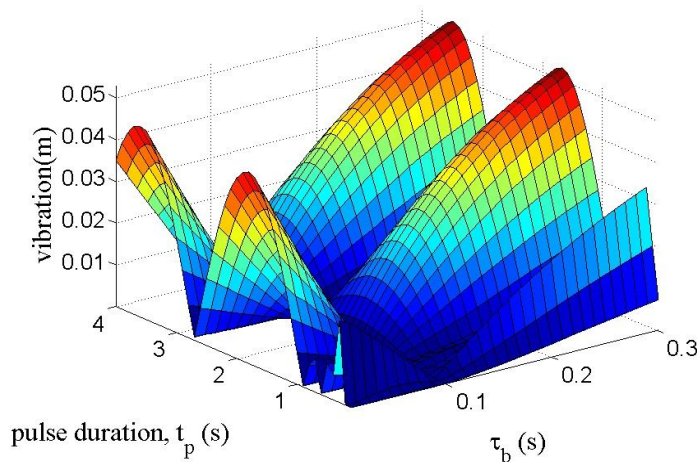


Fig. 4-20 Residual vibration of UM-ZV controller to t_p and τ_b

제 3 절 MDL-ZVC 개발

유연시스템의 진동변위 저감을 위해 비선형 구동기의 동적특성을 고려한 입력성형제어기 MDL-ZVC(Modified Deflection Limiting Zero Vibration Compensation)의 개발에 앞서 비선형 구동기에 의한 비선형 응답의 분석이 필요하다. 비선형 응답을 얻기 위해 두 가지 방법을 사용한다.⁽³⁹⁾ Fig. 4-21과 같이 선형 속도명령어를 비선형 시스템에 입력하여 시간응답을 얻는 방법과 Fig. 4-22와 같이 비선형 속도명령어를 선형 시스템에 입력하여 시간응답을 얻는 방법이다. 두 방법의 결론은 동일하나 Fig. 4-21의 방법은 비선형시스템을 modeling의 복잡성과 완전한 비선형 동적특성을 포함하는데 한계가 있다. 그러므로, 본 논문에서는 Fig. 4-22 방법으로 비선형 시간응답을 얻는다.

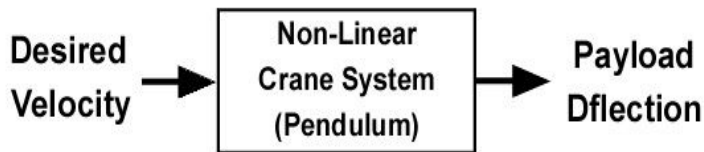


Fig. 4-21 Nonlinear crane system

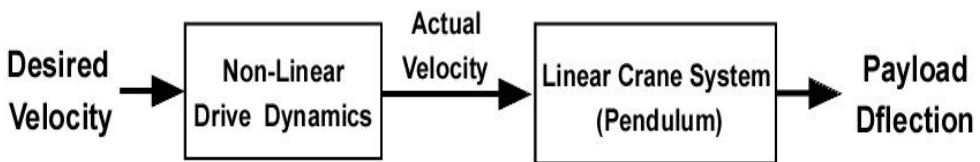


Fig. 4-22 Linear crane system

MDL-ZVC제어기는 선형구동기의 과도변위를 제한하기 위한 입력성형제어기 MUM-ZV(Modified Unit Magnitude Zero Vibration)제어기에 비선형을 고려하여 개발 하였다.⁽⁴⁰⁾

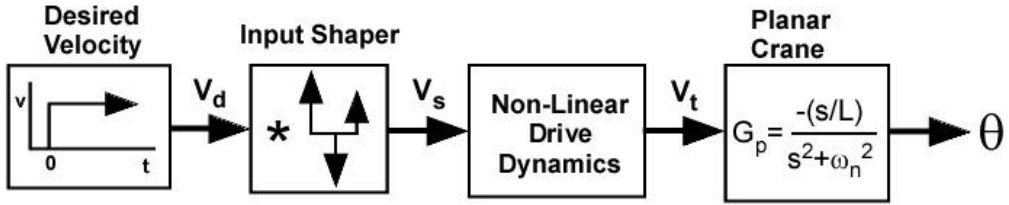


Fig. 4-23 Control input process to planar crane

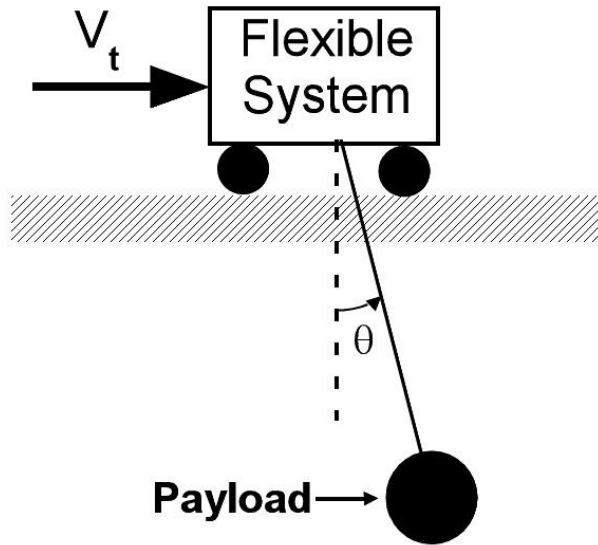


Fig. 4-24 Conceptual planar crane

Fig. 4-23은 시스템의 블록선도이며, planar crane는 Fig. 4-24의 pendulum 시스템으로 전달함수는 다음과 같이 표시된다.⁽⁴¹⁾ 일반적인 steady-state response θ_{ss} 는 식 (1)과 같이 나타난다.⁽⁴²⁾ 여기에서 magnitude와 phase는 식 (2)이다.

$$\theta_{ss}(t) = A \sin(\omega t + \phi) \tag{1}$$

$$A = \left| \sum \vec{v}_i \right| \qquad \phi = \angle \left| \sum \vec{v}_i \right| \tag{2}$$

일반적인 pendulum의 응답은 식(3)과 같다.⁽⁴³⁾ 응답 $\Theta(s)$ 는 식 (4)와 같이 시스템과 sine input으로 표현된다. $s=j\omega$ 로 바꾸어 식 (1)의 steady state response 으로 나타내면 식 (5)로 나타낼 수 있다.

$$\theta(s) = G_p(s) \cdot v_t(s) = -\frac{\frac{s}{L}}{s^2 + \omega^2} v_t(s) \quad (3)$$

$$\theta(s) = \underbrace{-\frac{v_t(s) \cdot s}{L}}_{C(S)} \cdot \underbrace{\frac{1}{s^2 + \omega^2}}_{\text{Sine Input}} \quad (4)$$

$$\theta_{ss}(t) = \frac{|v_t(j\omega)|}{L} \sin(\omega t - \frac{\pi}{2} + \angle v_t(j\omega)) \quad (5)$$

벡터의 amplitude 와 phase로 나타내면, 식(6)으로 나타난다.

$$\vec{v} = \frac{|v_t(j\omega)|}{L} \angle (-\frac{\pi}{2} + \angle v_t(j\omega)) \quad (6)$$

Fig. 4-25는 MUM-ZV2제어기의 이론적인 속도명령어와 구동기의 비선형에 의해 변형된 실제 속도명령어 이다. 여기서, 입력 $v(t)$ 는 Fig. 4-25의 실제 속도명령어를 이용하여 구한다. start motion 을 위한 MUM-ZV제어기의 실제 속도명령어를 개별적으로 나누면 Fig. 4-26과 같다. 전체 속도명령어에 대한 함수는 식 (7)으로 나타낼 수 있다.

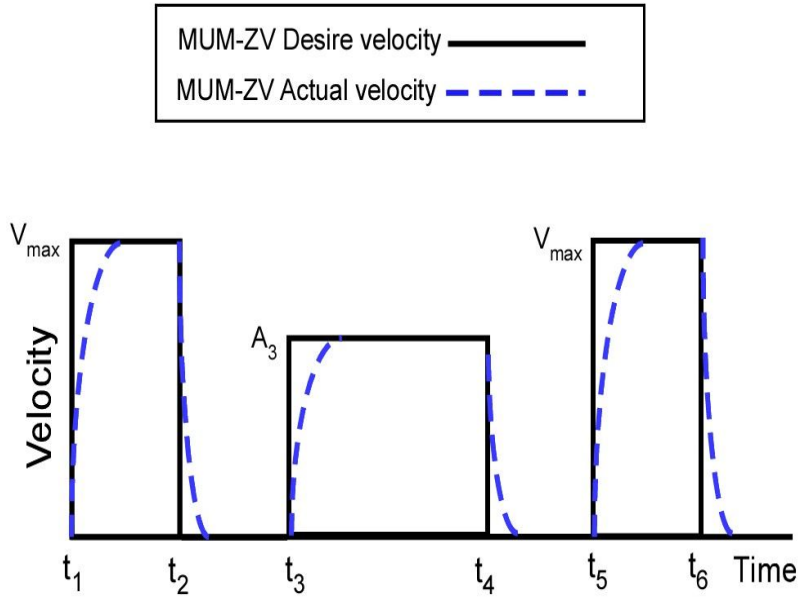


Fig. 4-25 MUM-ZV profile of desired and actual velocity

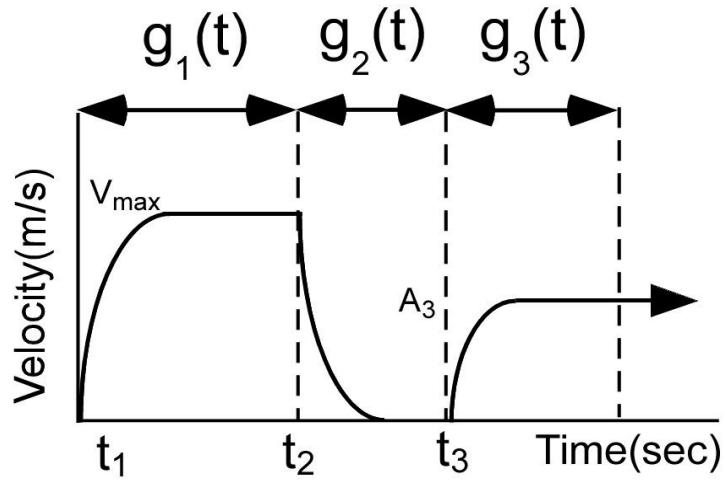


Fig. 4-26 MUM-ZV actual velocity profile for start motion

$$v_i(t) = \sum_{i=1}^3 g_i(t) * \delta(t - t_i) \quad (7)$$

식 (7)을 부분 적으로 나타내면 식(8), (9)와 (10)과 같다.

$$g_1(t) = v_{\max} \cdot (1 - e^{-t/\tau_a}) \quad (8)$$

$$g_2(t) = -v_{\max} \cdot (1 - e^{-t/\tau_b}) \quad (9)$$

$$g_3(t) = A_3 \cdot (1 - e^{-t/\tau_a}) \quad (10)$$

각각 Laplace Transform 하면 식(11), (12) 및 (13) 으로 나타난다.

$$g_1(s) = v_{\max} \cdot \frac{1}{s(1 + \tau_a s)} \quad (11)$$

$$g_2(s) = -v_{\max} \cdot \frac{1}{s(1 + \tau_b s)} \quad (12)$$

$$g_3(s) = A_3 \cdot \frac{1}{s(1 + \tau_a s)} \quad (13)$$

식(11), (12)와 (13)을 벡터의 amplitude 와 angle로 나타내면 식 (14), (15) 및 (16)으로 나타난다.

$$\vec{V}_1 = \frac{V_{\max}}{L\omega \sqrt{(\tau_a \omega)^2 + 1}} \angle [\tan^{-1}(\frac{1}{\tau_a \omega}) - \frac{3\pi}{2}] \quad (14)$$

$$\vec{V}_2 = \frac{V_{\max}}{L\omega \sqrt{(\tau_b\omega)^2 + 1}} \angle [\tan^{-1}(\frac{1}{\tau_b\omega}) - \frac{\pi}{2}] \quad (15)$$

$$\vec{V}_3 = \frac{A_3}{L\omega \sqrt{(\tau_a\omega)^2 + 1}} \angle [\tan^{-1}(\frac{1}{\tau_a\omega}) - \frac{3\pi}{2}] \quad (16)$$

간단하게 나타내기 위해 \vec{V}_1 의 amplitude로 3개의 벡터의 amplitude를 나눠주고, 3개 벡터의 angle에서 \vec{V}_1 의 angle로 빼주면 식 (17), (18) 그리고 (19)로 표현된다. ($t_1 = 0$)

$$\vec{V}_1 = 1 \angle [\omega t_1] \quad (17)$$

$$\vec{V}_2 = \sqrt{\frac{(\tau_a\omega)^2 + 1}{(\tau_b\omega)^2 + 1}} \angle [\omega t_2 + \tan^{-1}(\frac{1}{\tau_a\omega}) - \tan^{-1}(\frac{1}{\tau_b\omega})] \quad (18)$$

$$\vec{V}_3 = \frac{A_3}{v_{\max}} \angle [\omega t_3] \quad (19)$$

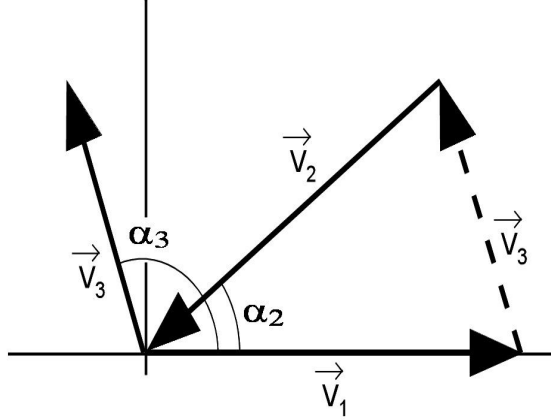


Fig. 4-27 Vector diagram

3장의 vector diagram approach를 활용하여 MDL-ZVC제어기의 시간을 결정할 수 있다. 식(17), (18) 및 (19)를 vector diagram으로 나타내면 Fig. 4-27로 여기서 $\alpha_2 = \angle \vec{V}_2$ 와 $\alpha_3 = \angle \vec{V}_3$ 이다. cosines law를 이용하면 식(20)과 (21)로 나타난다.

$$\cos(\omega t_2) = \frac{1}{\beta} + \frac{\beta}{4} - \frac{\left(\frac{A_3}{V_{\max}}\right)^2}{\beta} \quad (20)$$

$$\cos(\pi - \omega t_3) = \frac{A_3}{2V_{\max}} + \frac{V_{\max}}{2A_3} \left(1 - \left(\sqrt{\frac{(\tau_a \omega)^2 + 1}{(\tau_b \omega)^2 + 1}}\right)^2\right) \quad (21)$$

식 (20)과 (21)을 계산하면 MDL-ZVC제어기의 start motion을 위한 t_2 와 t_3 는 식 (22)와 (23)과 같다.

$$t_2 = \frac{1}{\omega} \left(\tan^{-1}\left(\frac{1}{\omega \tau_b}\right) - \tan^{-1}\left(\frac{1}{\omega \tau_a}\right) + \cos^{-1}\left(\frac{1}{\beta} + \frac{\beta}{4} - \frac{(A_3/v_{\max})^2}{\beta}\right) \right) + nT \quad (22)$$

$$t_3 = \frac{1}{\omega} \cos^{-1} \left(\frac{v_{\max}}{2A_3} \left(\frac{1}{4} \beta^2 - 1 \right) - \frac{A_3}{2v_{\max}} \right) + mT \quad (23)$$

여기서 β 는 식 (24) 이고 t_1 은 0 이다.

$$\beta = 2 \sqrt{\frac{(\tau_a \omega)^2 + 1}{(\tau_b \omega)^2 + 1}} \quad (24)$$

시스템의 stop motion을 위한 MDL-ZVC제어기도 start motion의 MDL-ZVC제어기와 동일한 방법으로 구할 수 있다. stop motion을 위한 MUM-ZV제어기의 실제 속도명령어를 개별적으로 나누면 Fig. 4-28과 같다. 전체 속도명령어에 대한 함수는 식 (25)으로 나타낼 수 있다.

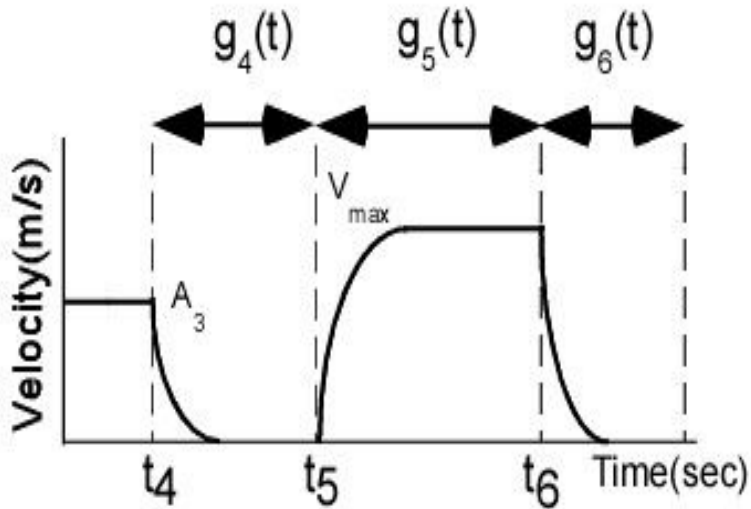


Fig. 4-28 MUM-ZV actual velocity profile for stop motion

$$v_i(t) = \sum_{i=4}^3 g_i(t) * \delta(t - t_i) \quad (25)$$

식 (25)을 부분적으로 나타내면 식(26), (27)및 (28)로 나타난다.

$$g_4(t) = -A_3 \cdot (1 - e^{-t/\tau_b}) \quad (26)$$

$$g_5(t) = v_{\max} \cdot (1 - e^{-t/\tau_a}) \quad (27)$$

$$g_6(t) = v_{\max} \cdot (1 - e^{-t/\tau_b}) \quad (28)$$

식(26), (27)및 (28)를 벡터의 amplitude 와 angle로 나타내고 간단히 하면, 식(29), (30)및 (31)으로 나타난다.

$$\vec{V}_1 = \frac{A_3}{\sqrt{(\tau_b \omega)^2 + 1}} \angle \left[\tan^{-1} \left(\frac{1}{\tau_b \omega} \right) - \frac{\pi}{2} \right] \quad (29)$$

$$\vec{V}_2 = \frac{V_{\max}}{\sqrt{(\tau_a \omega)^2 + 1}} \angle \left[\tan^{-1} \left(\frac{1}{\tau_a \omega} \right) - \frac{3\pi}{2} \right] \quad (30)$$

$$\vec{V}_3 = \frac{V_{\max}}{\sqrt{(\tau_b \omega)^2 + 1}} \angle \left[\tan^{-1} \left(\frac{1}{\tau_b \omega} \right) - \frac{\pi}{2} \right] \quad (31)$$

간단하게 나타내기 위해 \vec{V}_1 의 amplitude로 3개의 벡터의 amplitude를 나눠주고 3개 벡터의 angle에서 \vec{V}_1 의 angle로 빼주면 식 (32), (33)그리고 (34)로 표현된다.(t_4 = pulse duration)

$$\vec{V}_4 = 1 \angle [\omega t_4] \quad (32)$$

$$\vec{V}_5 = \frac{v_{\max}}{A_3} \sqrt{\frac{(\tau_a \omega)^2 + 1}{(\tau_b \omega)^2 + 1}} \angle [\omega t_2 + \tan^{-1}\left(\frac{1}{\tau_b \omega}\right) - \tan^{-1}\left(\frac{1}{\tau_a \omega}\right)] \quad (33)$$

$$\vec{V}_6 = \frac{v_{\max}}{A_3} \angle [\omega t_3] \quad (34)$$

MDL-ZVC제어기 start motion의 방법과 동일한 방법으로 cosines law를 이용하면 식(35)와 (36)으로 나타난다.

$$\cos(\omega t_2) = \frac{A_3}{2V_{\max}\beta'} + \frac{V_{\max}\beta}{2A_3} - \frac{V_{\max}}{2A_3\beta'} \quad (35)$$

$$\cos(\pi - \omega t_3) = \frac{A_3}{2V_{\max}} + \frac{V_{\max}}{2A_3} - \frac{V_{\max}\beta^2}{2A_3} \quad (36)$$

stop motion을 위한 MDL-ZVC제어기의 t_5 와 t_6 을 구하면 식 (37) 및 (38)과 같다. β' 는 식 (39)이고 t_4 는 pulse duration 시간이다.

$$t_5 = \frac{1}{\omega} \left(\tan^{-1}\left(\frac{1}{\omega\tau_a}\right) - \tan^{-1}\left(\frac{1}{\omega\tau_b}\right) + \cos^{-1}\left(\frac{A_3}{\beta'v_{\max}} + \frac{\beta'v_{\max}}{4A_3} - \frac{v_{\max}}{\beta'A_3}\right) \right) + nT \quad (37)$$

$$t_6 = \frac{1}{\omega} \cos^{-1}\left(\frac{v_{\max}(\beta')^2}{8A_3} - \frac{v_{\max}}{2A_3} - \frac{A_3}{2v_{\max}}\right) + mT \quad (38)$$

$$\beta' = 2 \sqrt{\frac{(\tau_b \omega)^2 + 1}{(\tau_a \omega)^2 + 1}} \quad (39)$$

식(40)은 시간에 대한 속도 값을 나타내는 식으로 MDL-ZVC제어기를 개발하는 데 사용된다. 제어기의 입력시간 t_2 , t_3 , t_4 와 t_5 와 t_6 에서 n 과 m 은 τ_a 와 τ_b 에 의한 구동기의 비선형을 보상하기 위한 값으로 입력성형제어의 다음 시간 전에 속도가 최대 및 최소 속도의 95%이상 도달해야 하기 위해 τ_a 및 τ_b 의 4배를 한 시간으로 MDL-ZVC제어기가 collapse되지 않는 조건을 만족하기 위한 값이다. 항상 $n \leq m$ 이고 $t_2 \leq t_3$ 와 $t_4 \leq t_5$ 를 만족한다. n 을 결정하기 위한 조건은 식(41)이고 m 을 결정하기 위한 조건은 식 (42)이다.

$$V(t) = V_{\max, \min} \left(1 - e^{-\frac{t}{\tau_a}}\right) \quad (40)$$

$$term1: \quad t_2 > 4\tau_a, \quad t_4 - t_p > 4\tau_b \quad (41)$$

$$term2: \quad t_3 - t_2 > 4\tau_b, \quad t_5 - t_4 > 4\tau_a \quad (42)$$

τ_a 및 τ_b 의 값이 식(40), (41)을 만족하지 못해 MDL-ZVC2제어기를 설계하지 못하는 값인 No-solution 은 식 (43)으로 구한다.

$$term3: \quad \tau_b > \frac{\sqrt{(\omega\tau_a)^2 - 4}}{2\omega} \quad \tau_a > \frac{\sqrt{(\omega\tau_b)^2 - 4}}{2\omega} \quad (43)$$

MDL-ZVC제어기의 과도변위 제한을 위한 A_3 의 값이 1, 0.8 , 0.6 과 0.4일 때의 n , m 은 Fig. 4-29, 4-30, 4-31과 4-32 으로 나타난다. No-solution은 τ_a 와 τ_b 의 값이 커서 유연시스템 구동기의 비선형을 정확하게 보상할 수 없어MDL-ZVC2제어기를 설계 할 수 없는 구역이다.

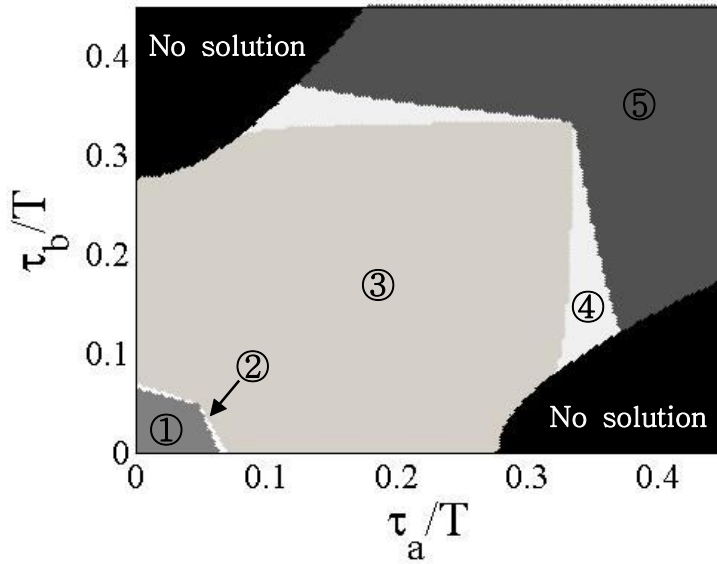


Fig. 4-29 Constraints on τ_a / T and τ_b / T for MDL-ZVC($A_3: 1$)
 ①n, m:0 ②n, m:1 ③n:1, m:2 ④n:2, m:3 ⑤n:2, m:4

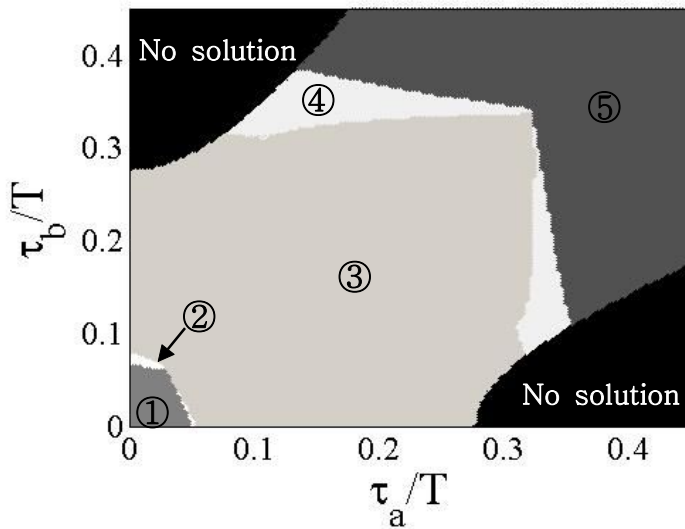


Fig. 4-30 Constraints on τ_a / T and τ_b / T for MDL-ZVC($A_3: 0.8$)
 ①n, m:0 ②n, m:1 ③n:1, m:2 ④n:2, m:3 ⑤n:2, m:4

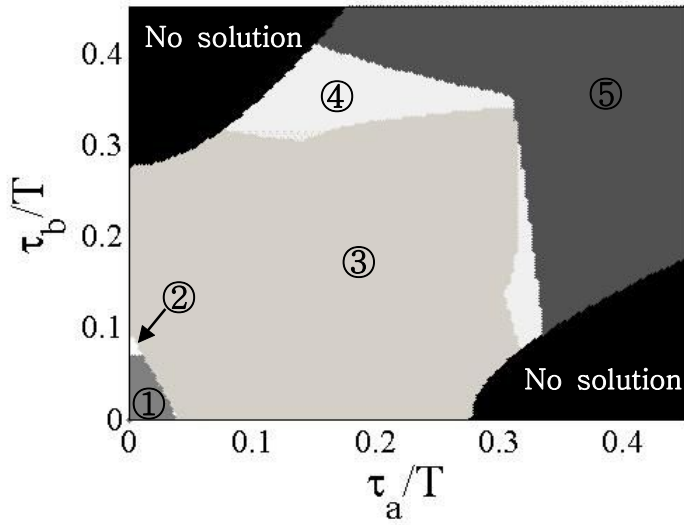


Fig. 4-31 Constraints on τ_a / T and τ_b / T for MDL-ZVC(A_3 : 0.6)

①n, m:0 ②n, m:1 ③n:1, m:2 ④n:2, m:3 ⑤n:2, m:4

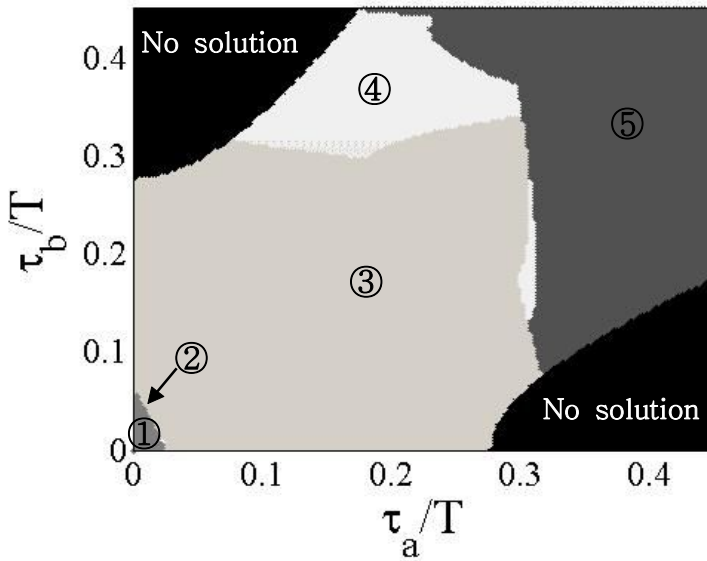


Fig. 4-32 Constraints on τ_a / T and τ_b / T for MDL-ZVC(A_3 : 0.4)

①n, m:0 ②n, m:1 ③n:1, m:2 ④n:2, m:3 ⑤n:2, m:4

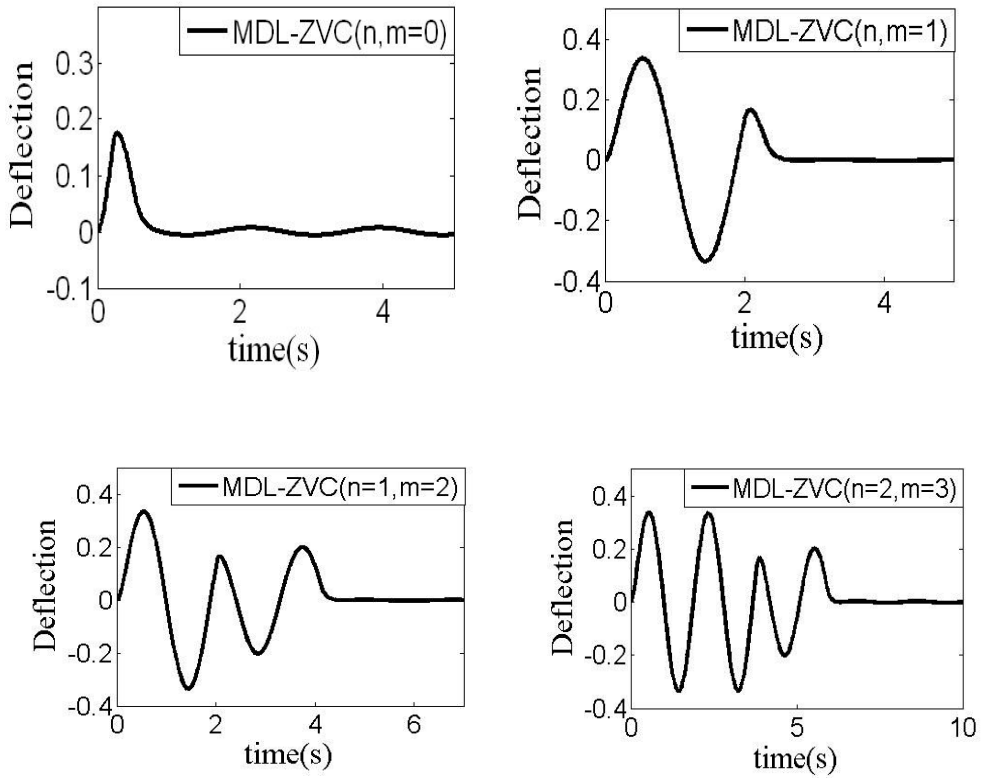


Fig. 4-33 Deflection response to n and m

Fig. 4-33은 n 과 m 에 따른 MDL-ZVC제어기의 진동변위를 나타내었다. 한주기가 끝나기 전에 입력성형제어기를 마친 n 과 m 이 0인 경우, payload의 과도변위가 최대값에 도달하지 않는다. 그러나 n 과 m 이 1 이상인 결과는 payload의 과도변위가 최대 값에 도달한다. 그러므로 MDL-ZVC제어기는 가능한 n 과 m 을 단축해야 한다.

제 4 절 MDL-ZVC의 분석 및 검증

1. MDL-ZVC 입력성형제어기 분석

Table 4-3 Mini-crane experimental parameters

Acceleration time constant(τ_a)	Deceleration time constant(τ_b)	Suspension length	Max velocity
0.1(sec)	0.05(sec)	0.8(m)	0.2(m/s)

Table 4-3는 실험장치의 설정한 파라미터이다. 시뮬레이션 결과와 실험 결과가 일치되는 실험속도 0.2m/s로 설정하였다. Fig. 4-34는 pulse duration인 t_4 를 1초로 설정 하였을 때 deflection limit(D_{lim})에 따른 MDL-ZVC2제어기의 switching time을 나타냈다. 여기서 deflection limit는 식(44)로 나타낼 수 있다. t_5 를 제외한 시간에서 deflection limit가 증가 하면 switching time도 증가 한다.

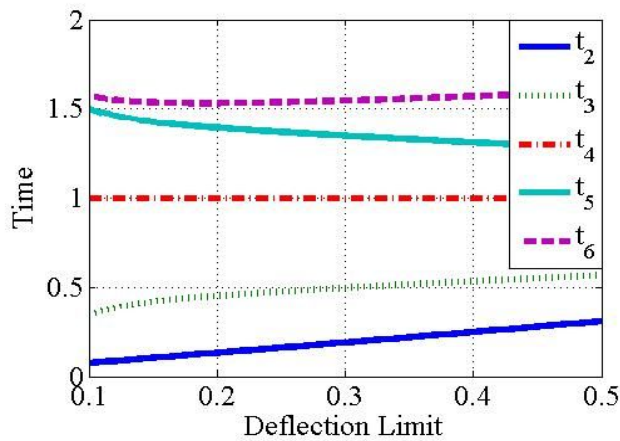


Fig. 4-34 Time location of MDL-ZVC with deflection limit

$$D_{lim} = \frac{A_3}{2} \tag{44}$$

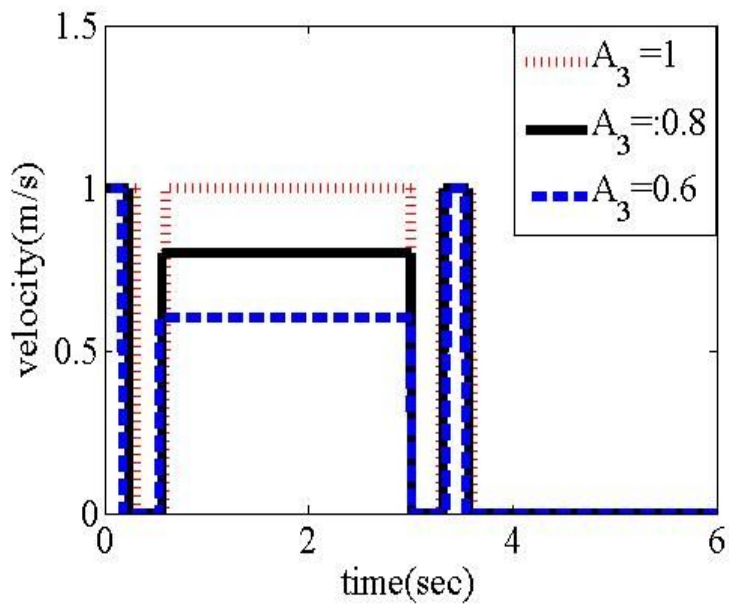


Fig. 4-35 Desired velocity of MDL-ZVC along A_3

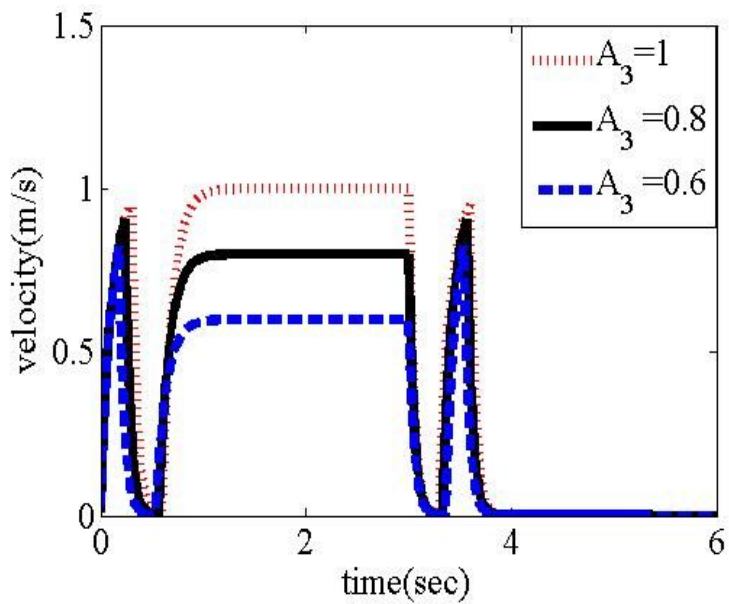


Fig. 4-36 Actual velocity of MDL-ZVC along A_3

Fig. 4-35는 MDL-ZVC2제어기의 이론적인 속도명령어로 A_3 의 값에 대한 형태를 표시 했다. Fig. 4-36은 시스템 비선형 구동기에 의해 이론적인 속도명령어가 변화된 실제 속도명령어로 A_3 의 값에 대한 형태를 표시 하였다. Fig. 4-37은 주파수와 A_3 의 값에 따라 발생하는 과도변위를 나타냈다. 주파수가 작아지고 A_3 의 값이 증가 하면 과도변위가 증가한다. Fig. 4-38은 0.1초 τ_a 대해 τ_b 와 pulse duration의 변화에 따른 잔류진동변위를 나타냈다. ZV와 UM-ZV제어기와 동일하게 τ_a 와 τ_b 가 동일한 곳에서는 선형 시스템과 유사하게 되어서 잔류진동변위가 감소한다. 그러나, τ_a 와 τ_b 차이가 클수록 입력성형제어기의 잔류진동변위 저감 성능이 감소하여 많은 잔류진동이 발생 된다.

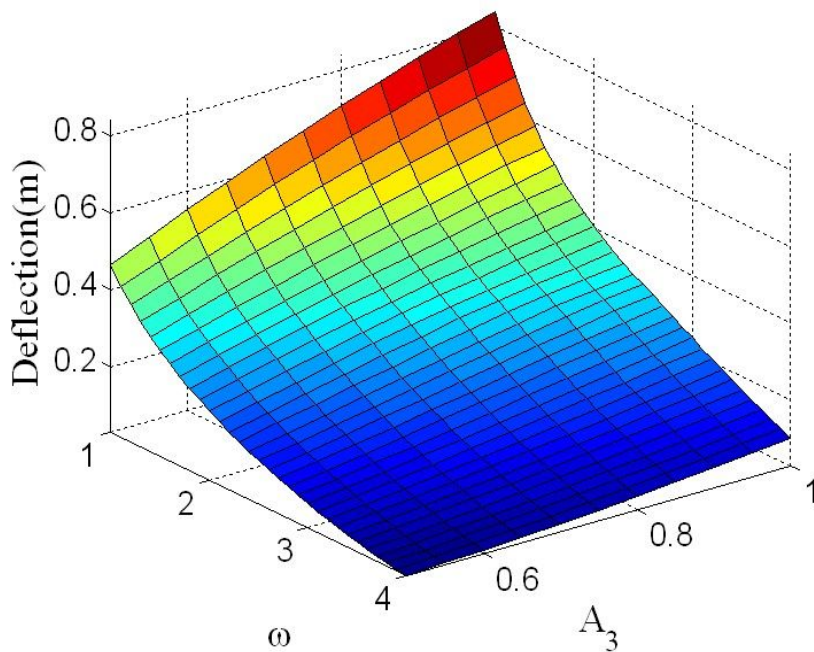


Fig. 4-37 Transient deflection of MDL-ZVC controller to A_3

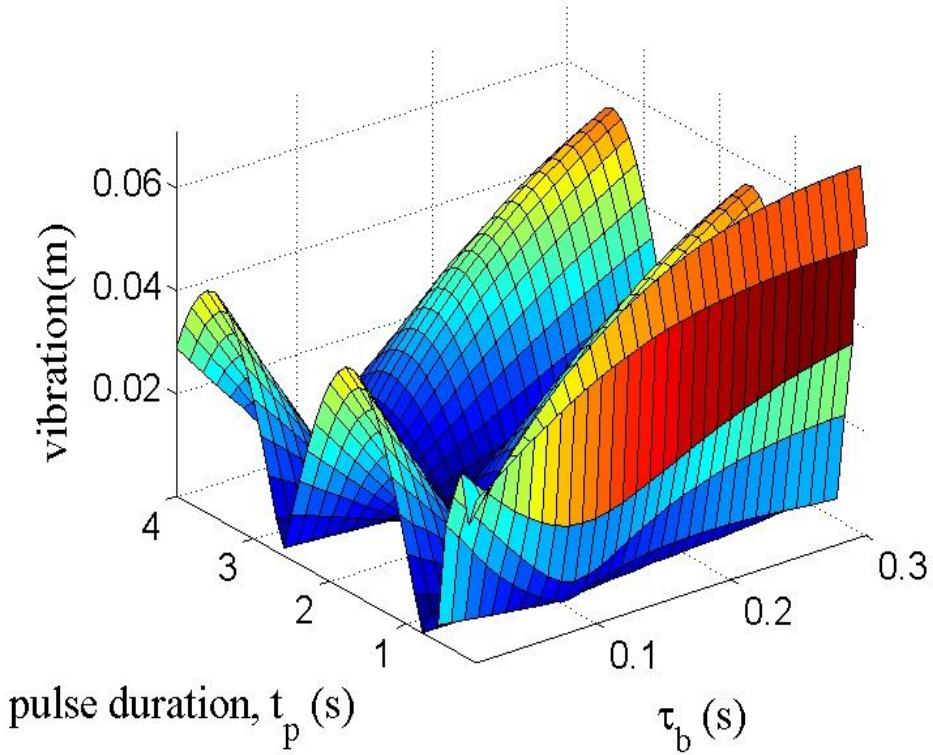


Fig. 4-38 Residual vibration of MDL-ZVC controller to t_p and τ_b

식 (45)는 MDL-ZVC2제어기가 rest-to-rest motion을 위해 이동거리(move distance)에 따른 pulse duration인 t_4 의 시간을 결정하는 식으로, x_d 는 이동거리다. 수치 연산 프로그램인 Matlab나 Maple를 활용하여 값을 계산하였다.

$$t_4 = -\frac{1}{A_3} \left(\left(\begin{array}{l} -A_3 t_3 e - \text{Lambert } W \\ \left(\frac{-2\tau_a v_{\max} t_2 e + 2\tau_a v_{\max} e^{-\frac{t_2+1}{\tau_a}} + 2\tau_b v_{\max} - \tau_a A_3 e + \tau_b A_3 - x_d e}{\tau_a A_3} \right) e^{-1} \\ -e \\ \tau_a A_3 e - 2v_{\max} \left(\tau_a e + t_2 e + \tau_a v_{\max} e^{-\frac{t_2+1}{\tau_a}} \right) \\ + 2\tau_b v_{\max} - \tau_a A_3 e + \tau_b A_3 - x_d e \end{array} \right) e^{-1} \right) \quad (45)$$

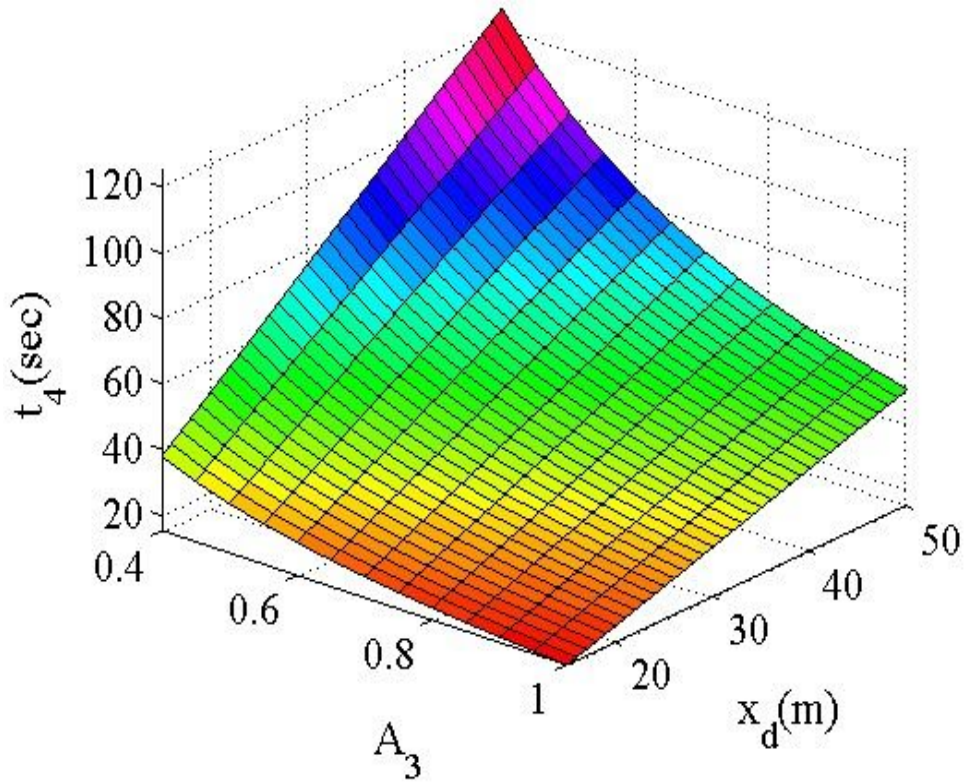


Fig. 4-39 Pulse duration time of MDL-ZVC2 along A_3 and x_d

Fig. 4-39는 A_3 와 시스템의 이동거리(x_d)에 따라 pulse duration 시간 t_4 를 나타냈다. A_3 와 x_d 가 증가함에 따라 t_4 도 증가한다.

2. MDL-ZVC 입력성형제어기 검증

Fig. 4-40은 MDL-ZVC2제어기의 deflection limit값에 따라 발생하는 과도변위를 나타냈다. Deflection limit의 값에 따라 과도변위가 감소한다. Fig. 4-41은 move distance(x_d)와 deflection limit 값에 따른 과도변위 값을 수치 시뮬레이션 및 실험 결과로 표시했다. 이동거리에 무관하게 전체 구간에서 deflection limit의 값에 따라 과도변위가 저감됨을 나타내었다. Fig. 4-42는 유연시스템 비선형 구동기를 고려하

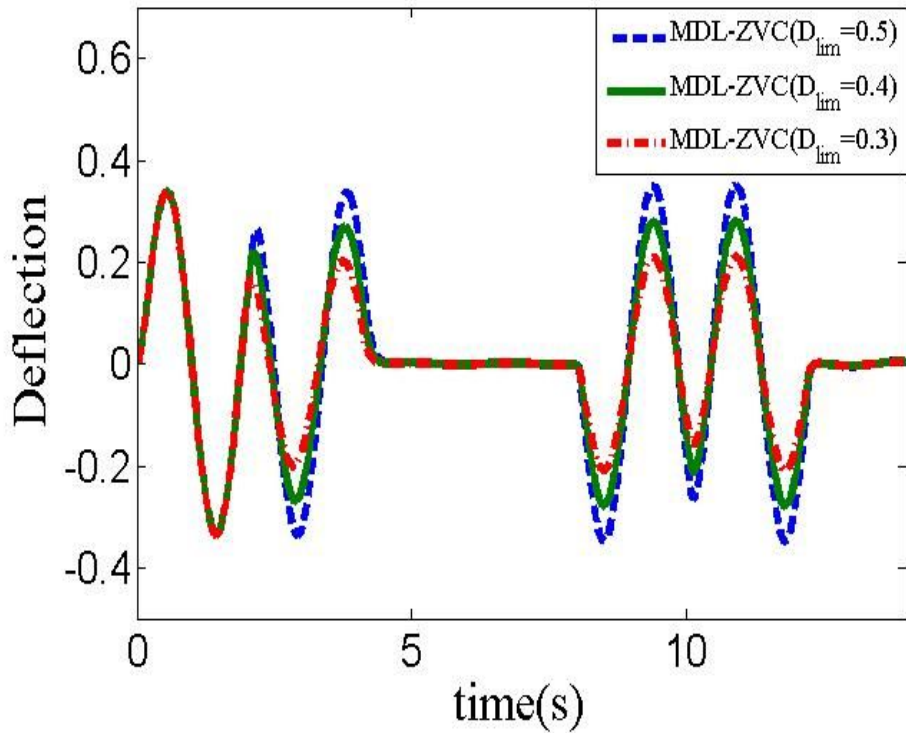


Fig. 4-40 Deflection of MDL-ZVC2 along D_{lim}

지 않고 과도변위 및 잔류진동만을 제한하는 입력성형제어기 MUM-ZV2제어기와 비선형 구동기를 고려하고 과도변위 및 잔류진동을 제한하기 위해 본 장에서 개발한 입력성형제어기 MDL-ZVC2제어기의 잔류진동변위 저감 성능을 수치 시뮬레이션 및 실험으로 나타냈다. 비선형 구동기를 고려하지 않은 MUM-ZV2제어기에 비해 MDL-ZVC2제어기의 잔류진동변위 저감 성능이 30%이상 개선되었다.

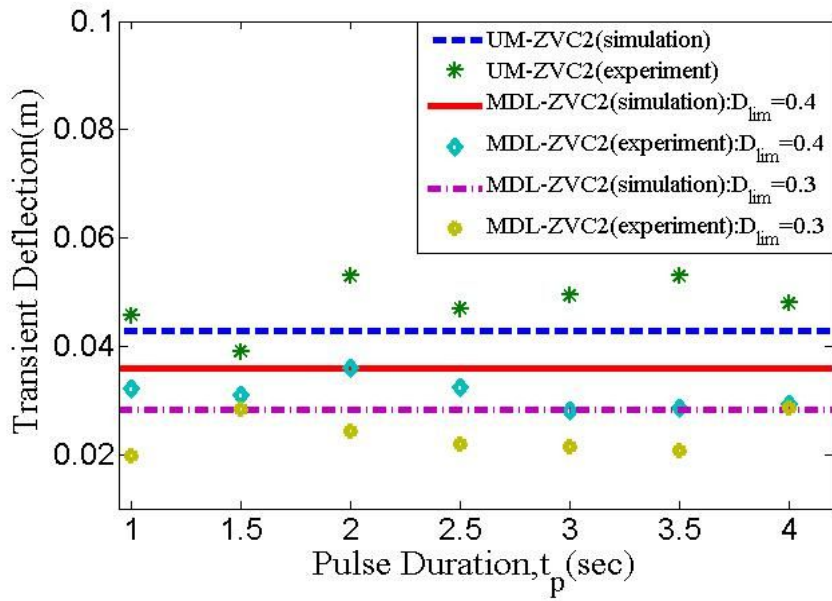


Fig. 4-41 Experimental verification of transient deflection

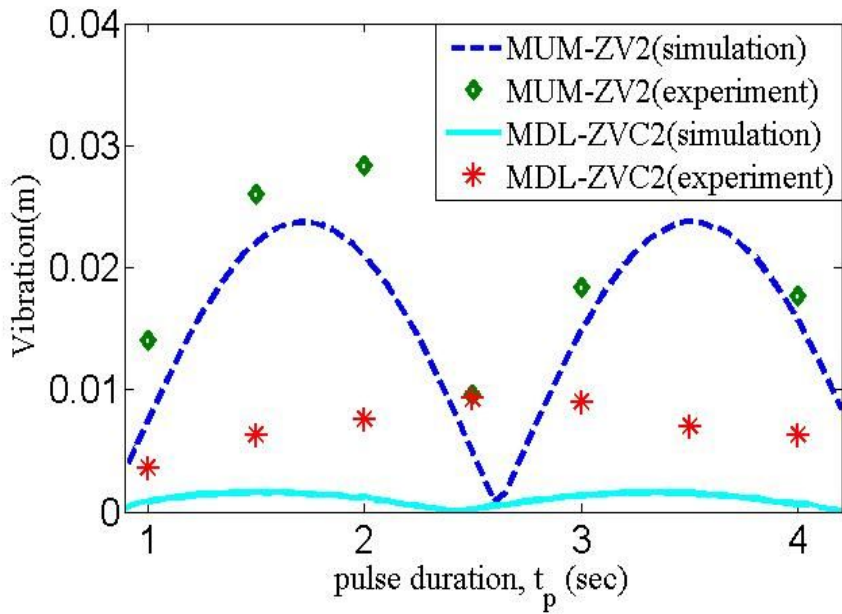


Fig. 4-42 Experimental verification of residual vibration

제 5 절 결론

본 장에서는 구동기의 비선형 동적 특성을 고려하여 유연시스템의 잔류진동변위 및 과도변위를 제한하기 위한 MDL-ZVC(Modified Deflection Limiting Zero Vibration Compensation)제어기를 개발하였다.

(1) 구동기의 비선형 동적 특성을 first-order dynamics으로 나타내고, 과도변위 제한을 위해 variable pulse magnitude로 표시하여 vector diagram approach를 활용하여 MDL-ZVC제어기를 개발 했다.

(2) 유연시스템의 rest-to-rest motion을 위해 MDL-ZVC제어기를 symmetry으로 적용하여 MDL-ZVC2제어기를 개발하고, move distance에 따른 pulse duration 시간인 t_4 를 결정하는 식을 제시했다.

(3) MDL-ZVC2제어기를 수치 시뮬레이션과 실험적으로 평가 및 분석하고 과도변위 및 잔류진동변위가 효율적으로 저감됨을 보였다.

제 5 장 비선형 시스템의 강인한 과도 및 잔류진동 변위 저감을 위한 입력성형제어기

입력성형제어기를 설계하기 위해 사용한 주파수와 실제 유연 시스템의 주파수에 오차가 발생되면 입력성형제어기의 잔류진동 저감 성능은 감소한다. 이런 문제를 해결하기 위해 impulse의 수를 추가해 강인한 입력성형제어기가 개발된다.

비선형 시스템의 과도 및 잔류진동변위의 저감을 위해 MDL-ZVC제어기를 개선하여 modelling error에 강인한 MDL-ZVDC(Modified Deflection Limiting-Zero Vibration Derivative Compensation)제어기를 개발한다. MDL-ZVDC제어기의 impulse time location을 결정하기 위해 소프트웨어 Matlab을 활용한 numerical optimization^(44,45) 방법을 사용하였다. 유연시스템의 rest-to-rest motion을 위해 MDL-ZVDC제어기를 대칭적으로 사용하여 MDL-ZVDC2제어기를 개발하고, move distance(x_d)에 따른 pulse duration 시간 t_6 를 결정하는 식을 제시한다. 그리고, MDL-ZVDC2제어기의 강인성 및 잔류진동변위의 저감 성능 및 과도변위 제한 성능을 실험적으로 검증한다.

제 1 절 MDL-ZVDC 개발

본 절에서는 구동기의 비선형을 고려하고 과도변위를 제한한 MDL-ZVC제어기에 강인성을 추가한 MDL-ZVDC제어기를 개발한다. MDL-ZVDC제어기의 switching time은 Matlab의 optimization toolbox를 사용하여 결정하였다. optimal cost function(J)은 입력성형제어기의 제어시간을 단축하기 위한 식 (1) 이다. constraints는 비선형을 고려하여 잔류진동을 제거하기 위한 식 (2)와 (3)을 사용하였고, 강인성을 추가한 식 (4)와 (5)를 사용하였다. 여기서 v 와 r 은 식 (6)이고 α 와 β 는 식 (7)이다.

$$J = \min(t_i) \quad (1)$$

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

$$\sum_{i=1}^n v_i A_i e^{-\zeta\omega(t_n - t_i)} \cos(t_i \omega \sqrt{1 - \zeta^2} + r_i) = 0 \quad (3)$$

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

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

$$\begin{bmatrix} v_i \\ r_i \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & \alpha & 0 & \alpha & 0 \\ 0 & \beta & 0 & \beta & A_5 / V_{\max} \end{bmatrix} \quad (6)$$

$$\alpha = \sqrt{\frac{(\tau_a \omega)^2 + 1}{(\tau_b \omega)^2 + 1}} \quad \beta = \tan^{-1}\left(\frac{1}{\tau_a \omega}\right) - \tan^{-1}\left(\frac{1}{\tau_b \omega}\right) \quad (7)$$

식 (7)의 α 와 β 는 구동기의 비선형을 보상하기 위한 값으로, 아래 과정에 의해 결정된다. 비선형 구동기에 의해 변환된 MUM-ZVD제어기의⁽⁴⁶⁾ 실제 속도명령어를 개별적으로 나누면 Fig. 5-1과 같다. 전체 속도명령어에 대한 함수는 식 (8)으로 나타낼 수 있다.

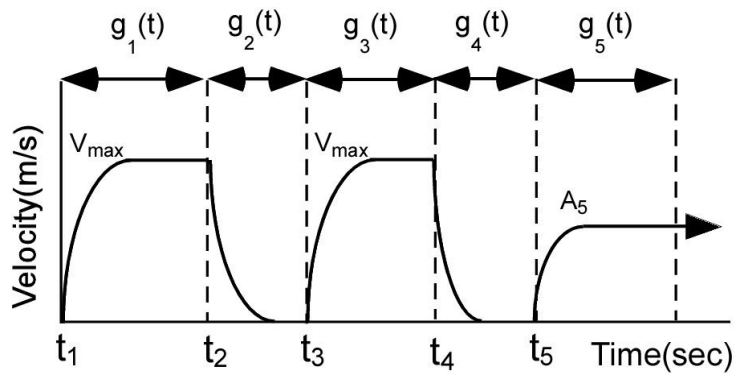


Fig. 5-1 MUM-ZVD actual velocity profile for start motion

$$v_t(t) = \sum_{i=1}^5 g_i(t) * \delta(t - t_i) \quad (8)$$

식 (8)을 부분 적으로 나타내면 식(9), (10), (11), (12) 및 (13)과 같다.

$$g_1(t) = v_{\max} \cdot (1 - e^{-t/\tau_a}) \quad (9)$$

$$g_2(t) = -v_{\max} \cdot (1 - e^{-t/\tau_b}) \quad (10)$$

$$g_3(t) = v_{\max} \cdot (1 - e^{-t/\tau_a}) \quad (11)$$

$$g_4(t) = -v_{\max} \cdot (1 - e^{-t/\tau_b}) \quad (12)$$

$$g_5(t) = A_5 \cdot (1 - e^{-t/\tau_a}) \quad (13)$$

각각을 Laplace Transform하면 식(14), (15), (16), (17) 및 (18)으로 나타난다.

$$g_1(s) = v_{\max} \cdot \frac{1}{s(1 + \tau_a s)} \quad (14)$$

$$g_2(s) = -v_{\max} \cdot \frac{1}{s(1 + \tau_b s)} \quad (15)$$

$$g_3(s) = v_{\max} \cdot \frac{1}{s(1 + \tau_a s)} \quad (16)$$

$$g_4(s) = -v_{\max} \cdot \frac{1}{s(1 + \tau_b s)} \quad (17)$$

$$g_5(s) = A_5 \cdot \frac{1}{s(1 + \tau_a s)} \quad (18)$$

식(14),(15),(16),(17)과 (18)을 4장 3절 pendulum 시스템의 steady state response의 속도에 대입하여 벡터의 amplitude 와 angle로 나타내면 식 (19),(20),(21),(22) 및 (23)으로 나타난다.

$$\vec{V}_1 = \frac{V_{\max}}{L\omega \sqrt{(\tau_a \omega)^2 + 1}} \angle [\tan^{-1}(\frac{1}{\tau_a \omega}) - \frac{3\pi}{2}] \quad (19)$$

$$\vec{V}_2 = \frac{V_{\max}}{L\omega \sqrt{(\tau_b\omega)^2 + 1}} \angle [\tan^{-1}(\frac{1}{\tau_b\omega}) - \frac{\pi}{2}] \quad (20)$$

$$\vec{V}_3 = \frac{V_{\max}}{L\omega \sqrt{(\tau_a\omega)^2 + 1}} \angle [\tan^{-1}(\frac{1}{\tau_a\omega}) - \frac{3\pi}{2}] \quad (21)$$

$$\vec{V}_4 = \frac{A_3}{L\omega \sqrt{(\tau_a\omega)^2 + 1}} \angle [\tan^{-1}(\frac{1}{\tau_a\omega}) - \frac{3\pi}{2}] \quad (22)$$

$$\vec{V}_5 = \frac{A_3}{L\omega \sqrt{(\tau_a\omega)^2 + 1}} \angle [\tan^{-1}(\frac{1}{\tau_a\omega}) - \frac{3\pi}{2}] \quad (23)$$

간단하게 나타내기 위해 \vec{V}_1 의 amplitude로 각 벡터의 amplitude를 나눠주고 벡터의 angle에서 \vec{V}_1 의 angle을 빼주면 식 (24),(25),(26),(27),그리고 (28)로 표현된다.($t_1 = 0$)

$$\vec{V}_1 = 1 \angle [\omega t_1] \quad (24)$$

$$\vec{V}_2 = \sqrt{\frac{(\tau_a\omega)^2 + 1}{(\tau_b\omega)^2 + 1}} \angle [\omega t_2 + \tan^{-1}(\frac{1}{\tau_a\omega}) - \tan^{-1}(\frac{1}{\tau_b\omega})] \quad (25)$$

$$\vec{V}_3 = 1 \angle [\omega t_1] \quad (26)$$

$$\vec{V}_4 = \sqrt{\frac{(\tau_a\omega)^2 + 1}{(\tau_b\omega)^2 + 1}} \angle [\omega t_4 + \tan^{-1}(\frac{1}{\tau_a\omega}) - \tan^{-1}(\frac{1}{\tau_b\omega})] \quad (27)$$

$$\vec{V}_5 = \frac{A_5}{v_{\max}} \angle [\omega t_5] \quad (28)$$

벡터의 amplitude와 angle은 입력성형제어기의 impulse의 크기와 시간으로 구동기의 비선형에 의한 τ_a 와 τ_b 를 입력성형제어기의 입력의 크기와 시간을 결정하는데 추가 하므로써 구동기의 비선형을 고려한 MDL-ZVDC제어기의 switching time을 결정한다. 여기서, 비선형 구동기에 의해 변경된 impulse의 크기와 시간은 식 (25)와 (27)의 amplitude와 angle이 식(7)의 α 와 β 의 식으로 표시된다.

제 2 절 MDL-ZVDC제어기의 성능분석

Fig. 5-2 과 Fig. 5-3은 deflection limit의 변화에 따라 MDL-ZVDC제어기의 switching time을 numerical optimization으로 구한 값을 나타냈다. Table 5-1 및 5-2 는 Fig. 5-2 와 Fig. 5-3을 curve fitting하여 2차 다항식으로 가정하고 MDL-ZVDC제어기의 switching time을 함수로 나타내기 위한 값이다.

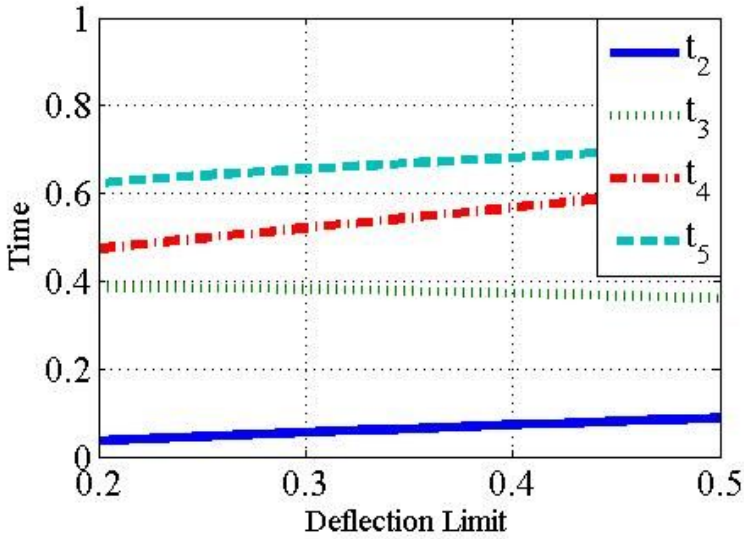


Fig. 5-2 Switching times of MDL-ZVDC controller to deflection limit

Table 5-1 Switching time calculation of MDL-ZVDC controller

($\tau_a: 0.1, \tau_b: 0.05$)

	a	b	c
t ₂	-0.0652	0.2179	-0.0049
t ₃	-0.2053	0.059	0.3818
t ₄	0.0766	0.4204	0.3872
t ₅	-0.094	0.3413	0.5604

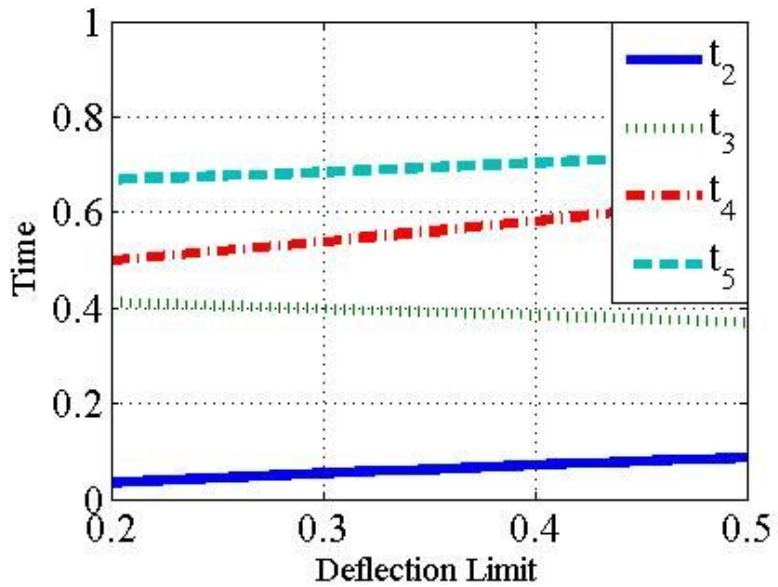


Fig. 5-3 Switching times of MDL-ZVDC controller with $\tau_a(0.1)$ and $\tau_b(0.1)$

Table 5-2 Switching time calculation of MDL-ZVDC controller ($\tau_a: 0.1, \tau_b: 0.1$)

	a	b	c
t ₂	-0.0659	0.2207	-0.0071
t ₃	-0.0327	-0.1146	0.4349
t ₄	0.2750	0.2431	0.4406
t ₅	0.2158	0.04	0.6522

Table 5-1와 5-2의 값은 $t_i = a \cdot D_{lim}^2 + b \cdot D_{lim} + c + n_{i-1} \cdot T$ ($R=0.9999$) 에 대입하여 2차 다항식으로 MDL-ZVDC 제어기의 switching time을 결정한다. 여기서 T는 주기이

고 n_{i-1} 는 4장 3절에서 MDL-ZVC제어기의 개발 과정에서 사용한 변수와 동일하다. n_i 는 식 (29),(30),(31)과 (32)로 결정된다. Fig. 5-4는 MDL-ZVDC2제어기의 이론적인 속도명령어로 A_5 에 값에 대한 속도명령어의 형태를 나타냈다. Fig. 5-5는 이론적인 속도명령어가 비선형 구동기에 의해 변경된 실제 속도명령어로 A_5 에 값에 따라 변경된다.

$$n_1 : t_2 > 4\tau_a \tag{29}$$

$$n_2 : t_2 + 4\tau_b > t_3 \tag{30}$$

$$n_3 : t_3 + 4\tau_a > t_4 \tag{31}$$

$$n_4 : t_4 + 4\tau_b > t_5 \tag{32}$$

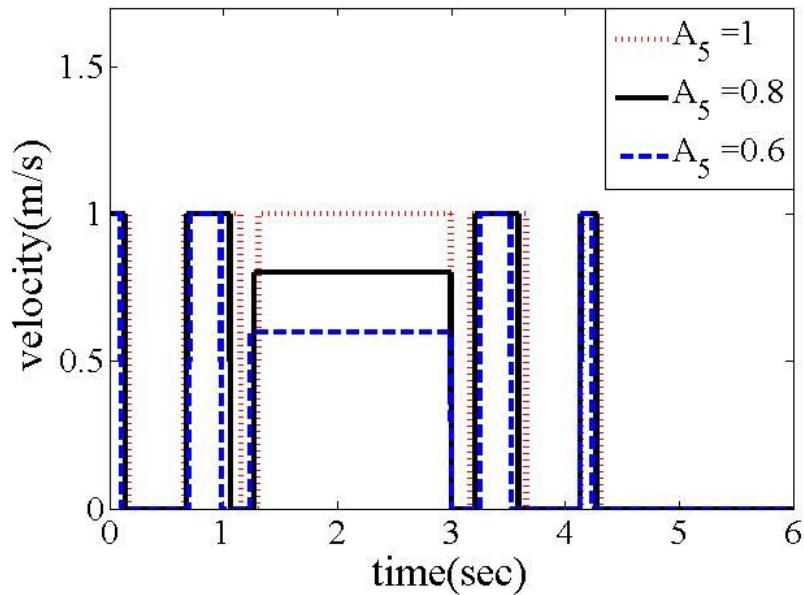


Fig. 5-4 Desired velocity of MDL-ZVDC2 along A_5

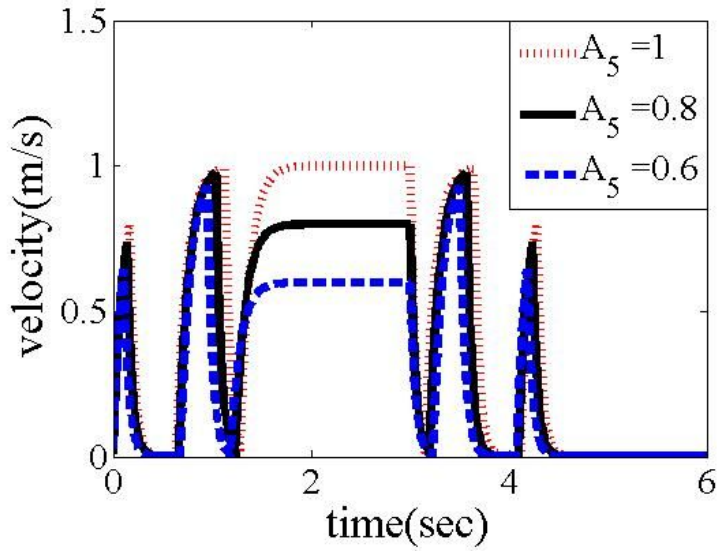


Fig. 5-5 Velocity commands of MDL-ZVDC2 controller to A_5

$$t_6 = -\frac{1}{A_5} \left(\left(\begin{array}{c} -A_5 t_5 e - \text{Lambert } W \\ \left(\frac{1}{\tau_a A_5} \left(\begin{array}{c} -2v_{\max} \left(2\tau_a e + t_2 e + \tau_a e^{-\frac{t_2}{\tau_a} + 1} \right) + 2\tau_b \\ -2v_{\max} t_3 e + 2\tau_a v_{\max} e^{-\frac{-t_4 + t_3}{\tau_a} + 1} \\ + t_4 e^{-\tau_a A_5 e + \tau_b A_5 - x_d e} \end{array} \right) e^{-1} \right) \right) \\ -e \\ \tau_a A_5 e - \tau_a A_5 e + \tau_b A_5 - x_d e \\ -2v_{\max} \left(\begin{array}{c} 2\tau_a e + t_2 e + \tau_a e^{-\frac{-t_2}{\tau_a} + 1} \\ + 2\tau_b + t_4 e - t_3 e + \tau_a e^{-\frac{-t_4 + t_3}{\tau_a} + 1} \end{array} \right) \end{array} \right) e^{-1} \right) \quad (33)$$

식 (33)는 MDL-ZVDC2제어기가 rest-to-rest motion을 위해 move distance에 따른 pulse duration t_6 의 시간을 결정한다. 여기서 x_d 는 이동거리이고 4장 4절과 동일한 방법으로 수치 연산 프로그램인 Matlab이나 Maple를 활용하여 값을 계산하였다.

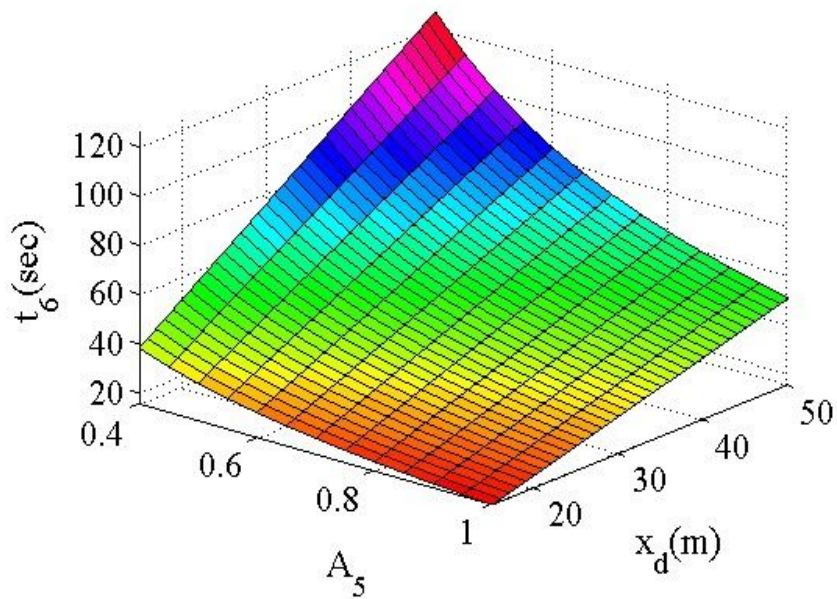


Fig. 5-6 t_6 of MDL-ZVDC2 controller to A_3 and x_d

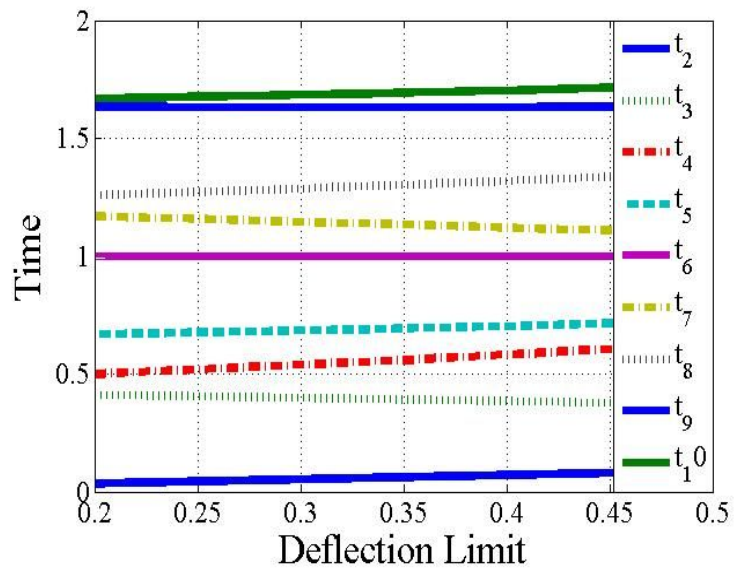


Fig. 5-7 Switching times of MDL-ZVDC2 controller with $\tau_a=0.1$ and $\tau_b=0.05$

Fig. 5-6은 A_5 와 x_d 에 따라 stop-motion을 위한 pulse duration인 t_6 를 나타냈다. A_5 와 x_d 가 증가함에 따라 t_6 도 증가한다. Fig. 5-7은 유연시스템의 start-stop motion을 위한 MDL-ZVDC2제어기의 τ_a 를 0.1초와 τ_b 를 0.05초로 설정했을 때 deflection limit에 대해 switching times을 나타냈다. MDL-ZVC2제어기와 상이하게 MDL-ZVDC2제어기에서 stop-motion을 위한 switching time은 식 (34), (35), (36)과 (37)로 나타난다.

$$t_7 = t_6 + t_5 - t_4 \quad (34)$$

$$t_8 = t_7 + t_4 - t_3 \quad (35)$$

$$t_9 = t_8 + t_3 - t_2 \quad (36)$$

$$t_{10} = t_9 + t_2 \quad (37)$$

제 3 절 MDL-ZVDC2 입력성형제어기 성능 검증

본 절에서는 유연시스템의 비선형 구동기를 고려하고 과도변위를 제한하기 위한 MDL-ZVC제어기에 강인성을 개선한 MDL-ZVDC제어기의 잔류진동변위, 과도변위 및 강인성의 성능을 수치 시뮬레이션 및 실험으로 검증 하였다.

Fig. 5-8은 pulse duration(t_p)과 deflection limit 값에 따른 수치 시뮬레이션 및 실험 결과로 pulse duration(t_p)에 무관하게 전체 구간에서 deflection limit의 값에 따라 일정한 과도변위를 나타내었다. Fig. 5-9는 구동기의 비선형을 고려하지 않은 MDL-ZVD2제어기와⁽⁴⁶⁾ 구동기의 비선형을 고려한 MDL-ZVDC2제어기의 잔류진동변위의 저감성능을 비교 하였다. 시뮬레이션 및 실험의 결과 MDL-ZVDC2제어기의 잔류진동변위 저감성능이 90%개선됨을 나타 내었다.

Fig. 5-10는 MDL-ZVC제어기와 강인성을 추가한 MDL-ZVDC제어기에 대해 수치 시뮬레이션으로 비교했다. MDL-ZVDC제어기가 5% 범위 안에 MDL-ZVC제어기보다 이론 주파수와 실제 주파수가 동일한 1을 기준으로 더 넓게 확장됨을 보인다. MDL-ZVDC제어기가 더 강인성이 더 우수함을 보였다. Fig. 5-11은 move distance의 변화에 대해 강인성을 검증하기 위한 수치 시뮬레이션으로 다양한 move distance에서 MDL-ZVC2제어기보다 MDL-ZVDC2제어기가 강인함을 보였다.

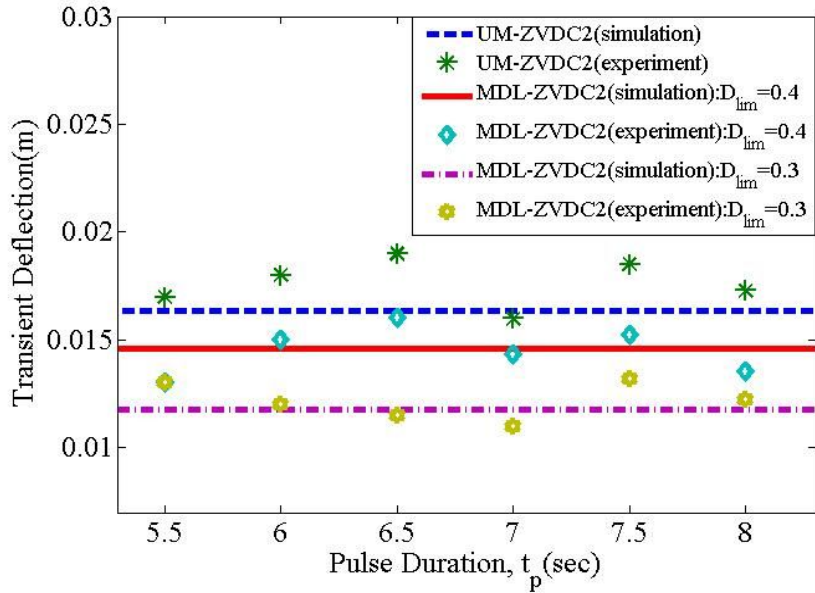


Fig. 5-8 Experimental verification of transient deflection

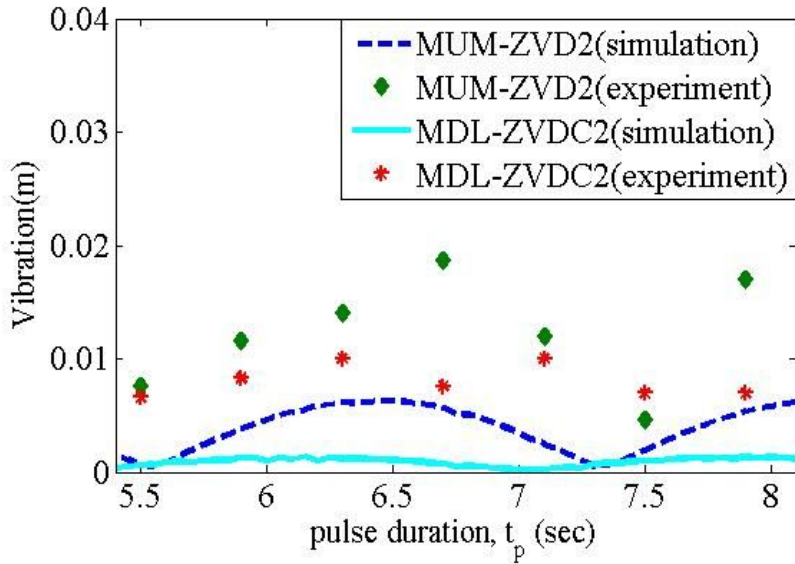


Fig. 5-9 Experimental verification of residual vibration

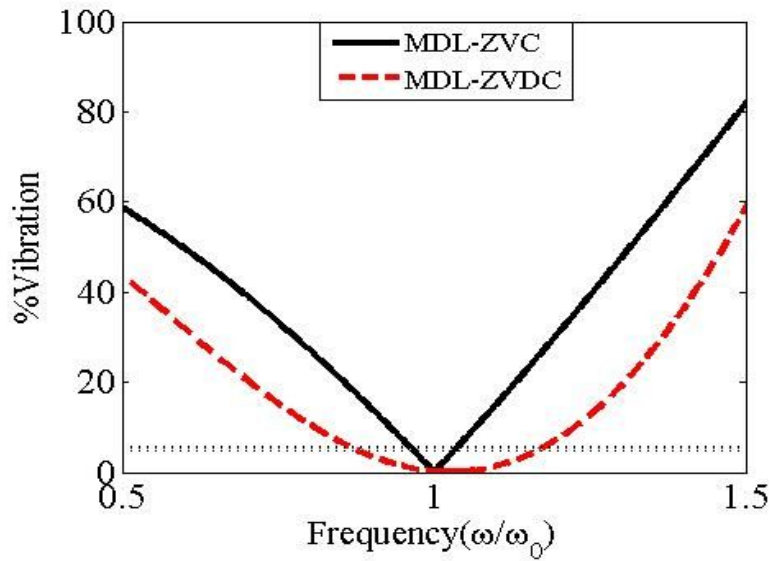


Fig. 5-10 Sensitivity of MDL-ZVC and MDL-ZVDC controllers

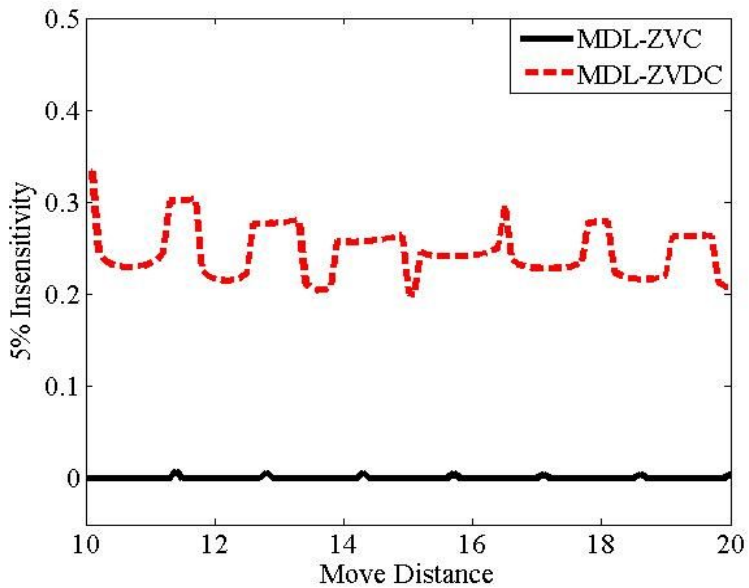


Fig. 5-11 5% insensitivity of MDL-ZVC and MDL-ZVDC controllers to move distance

제 4 절 결론

본 장에서는 구동기의 비선형 동적 특성을 고려하여 유연시스템의 잔류진동변위 및 과도변위를 제한하기 위한 MDL-ZVC제어기에 강인성을 향상시킨 MDL-ZVDC(Modified Deflection Limiting-Zero Vibration Derivative Compensation) 제어기를 개발하였다.

(1) numerical optimization방법과 curve fitting 방법을 활용하여 MDL-ZVDC의 swticing times을 결정됨을 제시하였다.

(2) 유연시스템의 rest-to-rest motion을 위해 MDL-ZVDC제어기를 symmetry으로 적용하여, MDL-ZVDC2제어기를 개발하고 move distance에 따른 pulse duration 시간인 t_6 를 결정하는 식을 제시 하였다.

(3) MDL-ZVDC2를 실험적으로 평가 및 분석하고, 과도변위 및 잔류진동변위가 효율적으로 저감됨을 보이고 강인성의 증대를 실험적으로 검증 하였다.

제 6 장 과도변위 저감을 위한 입력성형제어기

Fig. 6-1 과 같이 입력성형제어기가 실행되는 도중에 과도한 과도변위가 발생되어, 과도변위를 제한하는 MUM-ZV (Modified Unit Magnitude Zero Vibration)제어기가 개발 되었다. MUM-ZV제어기는 시스템 구동기의 최대속도보다 작은 값인 A_3 으로 rest-to-rest motion을 위한 commands를 설계 할 때, 목표거리까지 가는데 많은 시간이 소요된다. 또한 급격한 과도변의 발생 및 감소로 인해 유연시스템에 큰 bending moment를 발생 시킨다.

본 논문에서는 과도변위를 제한하고 구동기의 최고속도가 구현되어, 목표거리에도달하는 시간을 단축하고 bending moment발생을 저감한 HDL-ZV(High speed Deflection Limiting Zero Vibration)제어기를 개발한다. HDL-ZV제어기는 수치 시뮬레이션 및 실험을 통하여 검증된다.

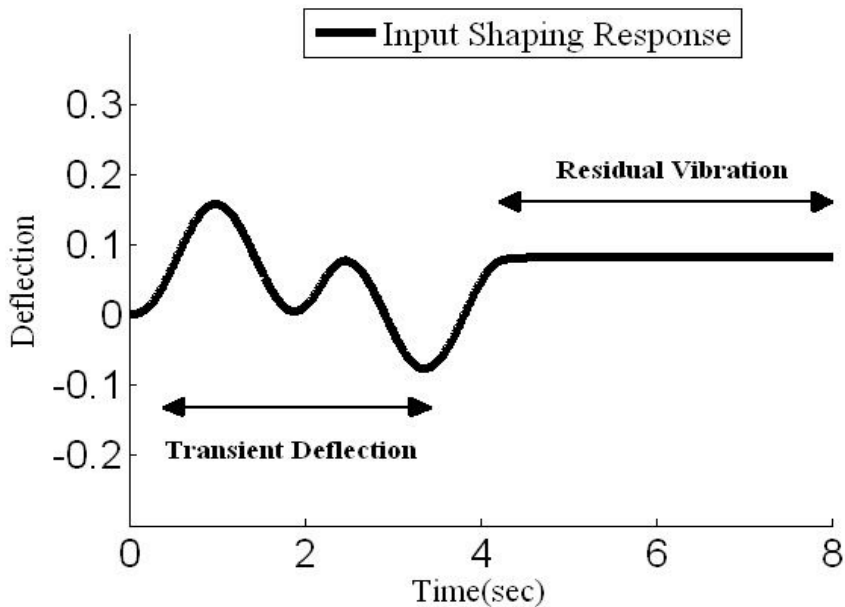


Fig. 6-1 Deflection response of input shaping controller

제 1 절 HDL-ZV제어기 개발

Fig. 6-2는 HDL-ZV제어기를 나타내고 있으며, impulse 의 amplitude 및 switching time은 식 (1)과 같이 표시된다. switching time t_2 와 t_3 는 잔류진동조건을 만족하기 위한 식 (2)와 (3)에 의해 HDL-ZV제어기 입력의 크기를 대입하면 식 (4)와 (5)로 나타낼 수 있다.

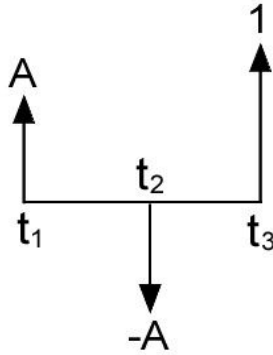


Fig. 6-2 HDL-ZV input shaping

$$\begin{bmatrix} Ai \\ t_i \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} A & -A & V_{\max} \\ 0 & t_2 & t_3 \end{bmatrix} \quad (1)$$

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

$$\sum_{i=1}^n A_i e^{-\zeta\omega(t_n - t_i)} \cos(t_i \omega \sqrt{1 - \zeta^2}) = 0 \quad (3)$$

$$A - A \cos(\omega t_2) + \cos(\omega t_3) = 0 \quad (4)$$

$$-A \sin(\omega t_2) + \sin(\omega t_3) = 0 \quad (5)$$

식 (4) 와 (5)로 부터 HDL-ZV의 t_2 와 t_3 는 식 (6)과 (7)로 표시된다. 여기서, $t_1=0$ 이다.

$$t_2 = \frac{1}{\omega} \cos^{-1}\left(\frac{2A^2-1}{2A^2}\right) \quad (6)$$

$$t_3 = \frac{1}{\omega} \cos^{-1}\left(-\frac{1}{2A}\right) \quad (7)$$

제 2 절 HDL-ZV제어기의 분석

Fig. 6-3는 D_{lim} 에 따른 HDL-ZV제어기의 속도명령어로 D_{lim} 의 값에 따라 처음 및 마지막 입력의 크기가 감소한다. Fig. 6-4은 deflection limit(D_{lim}) 에 따라 입력 시간 t_2 와 t_3 을 나타냈다. D_{lim} 은 변위제한을 위한 값으로 $D_{lim}=A/2$ 이다. D_{lim} 의 최소 값 0.25이하에서는 두 개의 입력크기의 합이 다른 하나의 입력크기보다 작아 제어기의 sequence가 collapse된다. 최대 값 0.5는 구동기의 최대 속도와 동일하다. D_{lim} 이 증가 할수록 t_2 와 t_3 가 감소한다. 결론적으로 과도변위를 많이 제어 할수록 정상상태에 도달 되는 시간이 지연된다. 과도변위 제한과 정상상태 도달시간에 따라 HDL-ZV제어기의 설계가 필요하다. Fig. 6-5는 시스템의 rest-to-rest motion 을 위해 HDL-ZV제어기를 활용하여 설계한 HDL-ZV2제어기다. move distance(x_d) 를 위한 t_4 는 식 (7)로 결정되고, 나머지 switching time은 start motion을 위한 HDL-ZV와 symmetry로 식 (8)과 (9)이다. 여기서 V_{max} 는 최고 속도이다.

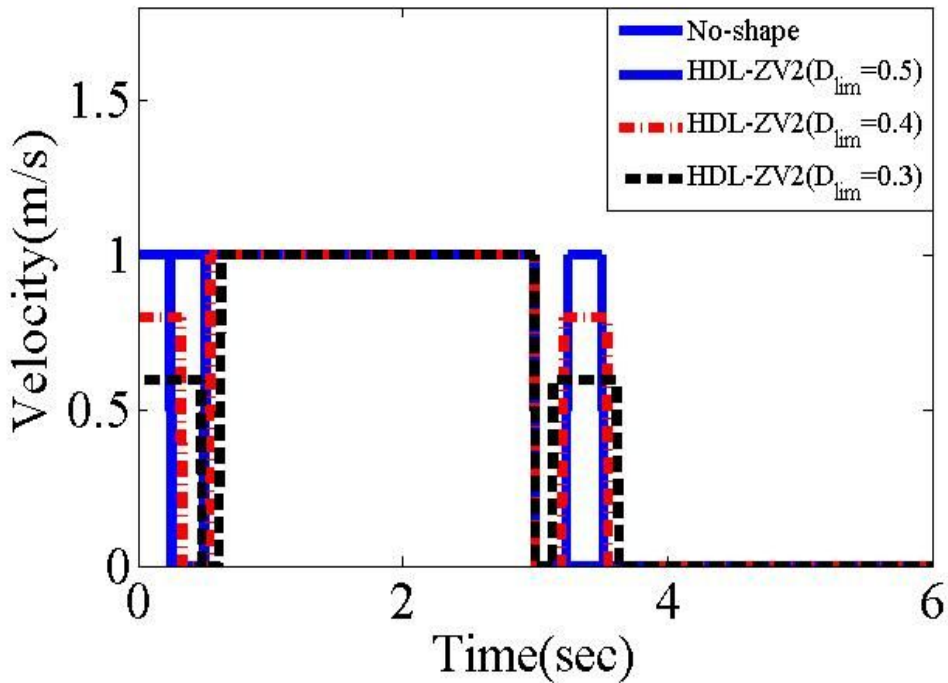


Fig. 6-3 Velocity command of HDL-ZV controller

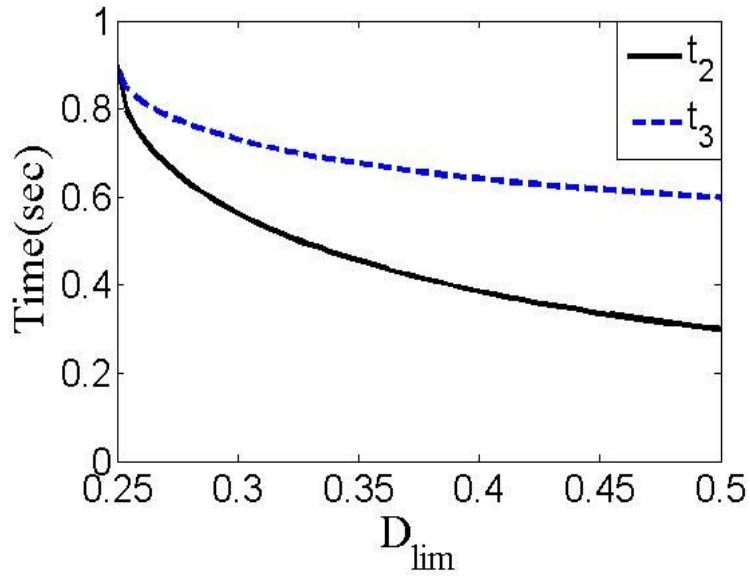


Fig. 6-4 Switching time to D_{lim}

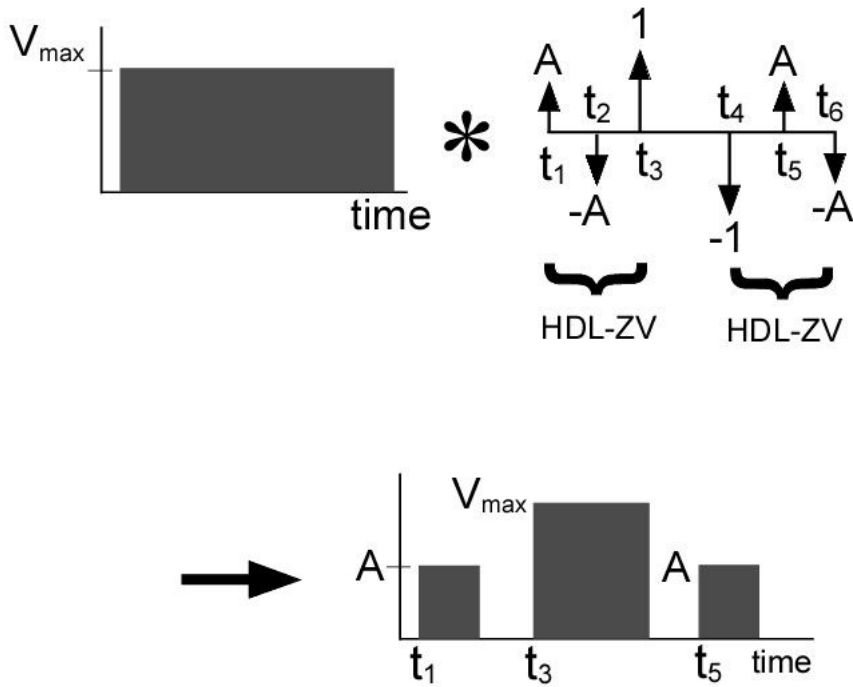


Fig. 6-5 HDL-ZV2 controller for rest-to-rest motion

$$t_4 = \frac{x_d - 2At_2}{V_{\max}} + t_3 \quad (7)$$

$$t_5 = t_4 + t_3 - t_2 \quad (8)$$

$$t_6 = t_5 + t_2 \quad (9)$$

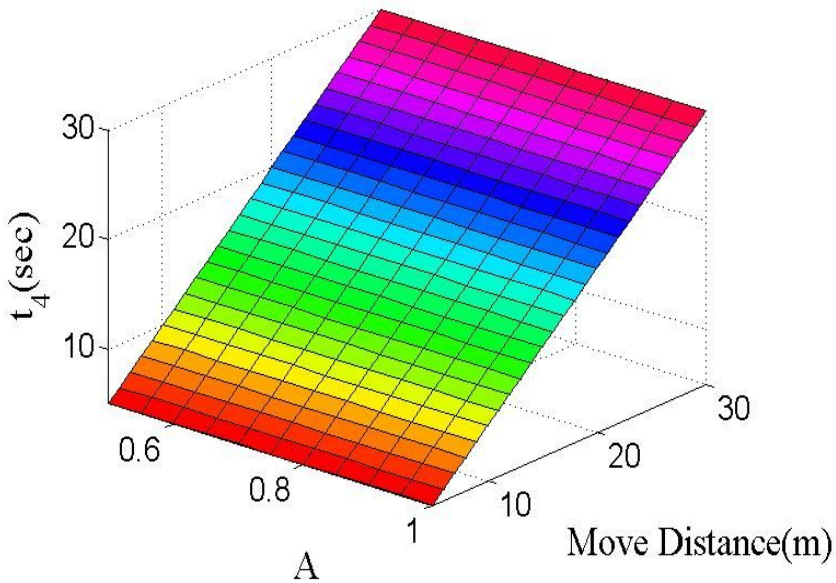


Fig. 6-6 Pulse duration time of HDL-ZV2 controller to A and x_d

Fig. 6-6은 HDL-ZV2제어기의 A와 x_d 에 따른 pulse duration시간 t_4 를 나타냈다. 이동거리가 증가함에 따라 t_4 가 증가 하고 A의 감소에 따라 t_4 가 증가하지만 move distance에 따른 t_4 변화는 적다. Fig. 6-7은 HDL-ZV2제어기의 A값에 따라 payload의 시간응답을 나타내었으며, 제어기명령이 끝난 잔류진동변위가 발생되지 않았다. 한편, 입력의 크기 A의 값이 작을수록 정상상태에 도달하는 시간이 지연된다.

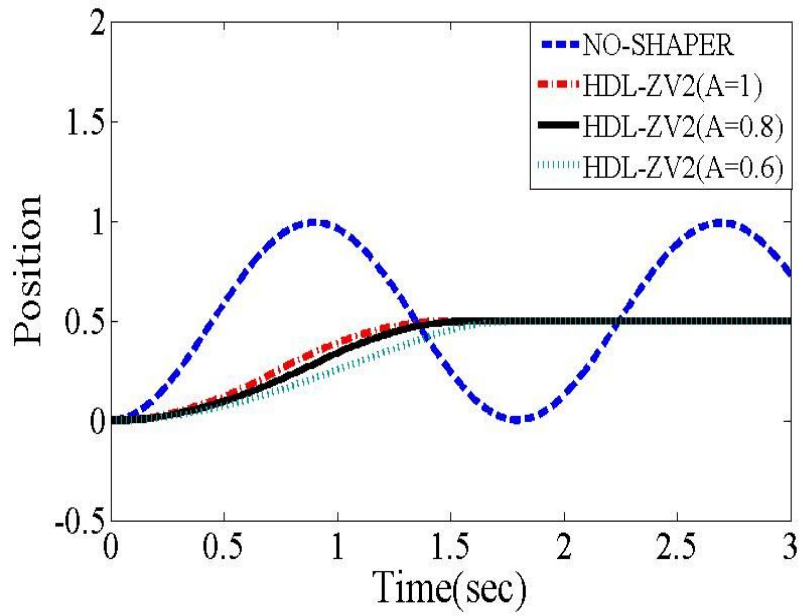


Fig. 6-7 Position response of payload to A

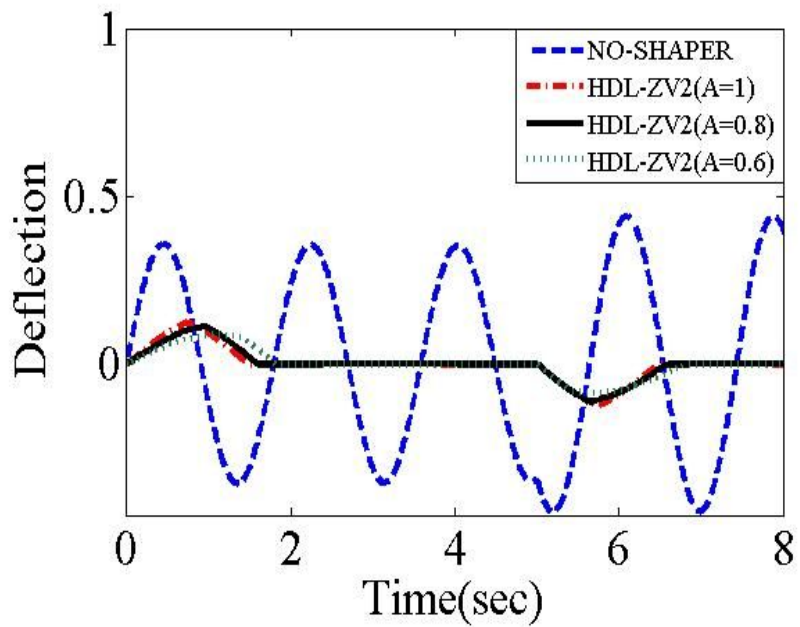


Fig. 6-8 Deflection response of payload to A

Fig. 6-8은 A에 따른 과도변위의 크기를 나타냈다. 입력성형제어기를 실행하지 않는 경우 no-shaper보다 과도변위가 많이 감소하였고, A값에 따라 과도변위가 감소한다. Fig. 6-9는 주파수와 입력의 크기 A의 값에 대한 과도변위를 나타냈다. HDL-ZV제어기의 A값이 작고, 시스템주파수가 클수록 과도변위의 발생이 저감됨을 보인다.

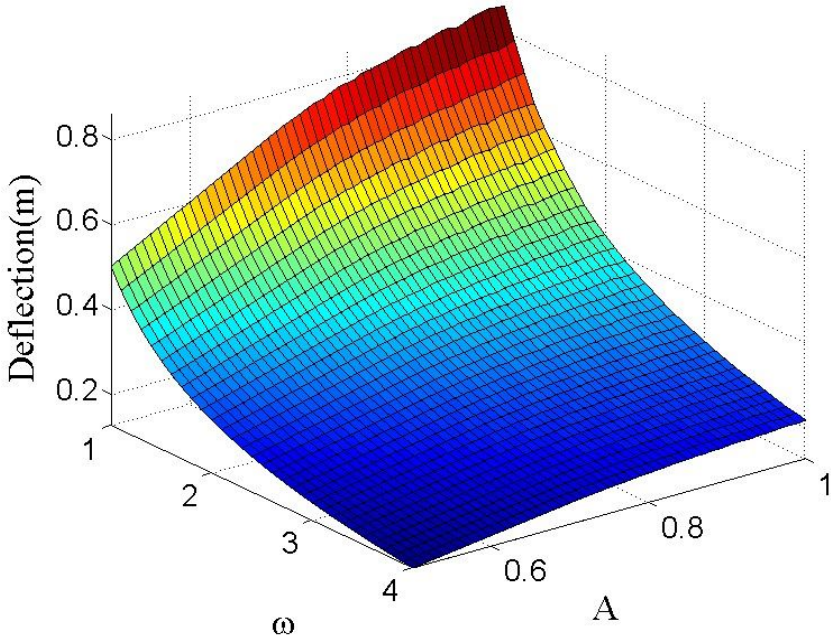


Fig. 6-9 Transient deflection along A and ω

제 3 절 HDL-ZV입력성형제어기의 검증

HDL-ZV제어기를 기존의 MUM-ZV제어기와 비교하여 과도변위 제한 및 잔류진동변위 저감 성능을 검증한다. Fig. 6-10은 과도변위를 제한하기 위해 개발된 기존의 MUM-ZV2제어기와 HDL-ZV2제어기를 move distance(x_d)대해 5% insensitivity 를 나타냈다. x_d 와 무관하게 유사한 insensitivity 값을 얻었다. HDL-ZV제어기의 강인성이 MUM-ZV제어기와 동일함을 보였다.

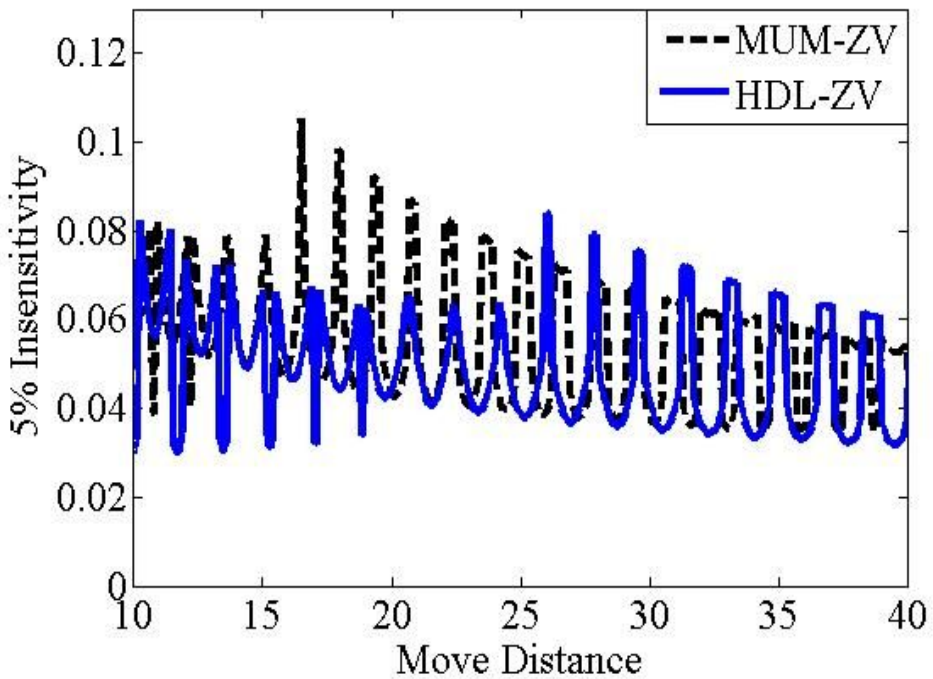


Fig. 6-10 5% Insensitivity of MUM-ZV and HDL-ZV controllers to move distance

Fig. 6-11과 6-12는 속도에 따른 과도변위의 크기를 수치 시뮬레이션 및 실험으로 나타냈다. 실험속도는 0.05m/s에서 0.3m/s까지 설정하였으며, UM-ZV, MUM-ZV와 HDL-ZV제어기들은 속도가 증가함에 따라 과도변위 크기가 증가한다. D_{lim} 이 0.4일때의 Fig. 6-11의 과도변위를 제한한 MUM-ZV제어기는 과도변위를 제한하지 않은 UM-ZV제어기보다 17% 과도변위가 개선되었고, HDL-ZV제어기는 15%의 과도변위가 개선되었다. D_{lim} 이 0.3 일때의 Fig. 6-12의 과도변위를 제한한 MUM-ZV제어기는 과도변위를 제한하지 않은 UM-ZV제어기보다 31% 과도변위가 개선되었고, HDL-ZV제어기는 30%의 과도변위가 개선되었다. 실험결과로부터 과도변위를 제한하지 않은 UM-ZV제어기 보다 과도변위를 제한할 목적으로 개발된 입력성형제어기의 과도변위 제한 성능을 확인할 수 있고, HDL-ZV제어기가 MUM-ZV제어기보다 과도변위 제한 성능은 약간 낮게 나타난다.. Fig. 6-13와 6-14는 속도를 0.2m/s로 설정했을 때의 D_{lim} 을 0.4와 0.3으로 제한한 MUM-ZV제어기 와 HDL-ZV제어기의 과도변위의 크기를 확대 비교 하였다. MUM-ZV제어기가 HDL-ZV제어기 보다 과도변위 제한 성능이 약간 우수하다. 그러나, Fig. 6-13과 6-14에서 MUM-ZV제어기의 과도변위는 급격한 기울기를 나타내어, 유연시스템에 큰 bending moment를 발생 시키는 원인이 되며 시스템에 충격을 가해 수명을 단축한다. HDL-ZV제어기가 과도변위 제한 성능은 MUM-ZV제어기보다는 조금 감소하나, bending moment의 발생을 저감하는 것을 검증 하였다.

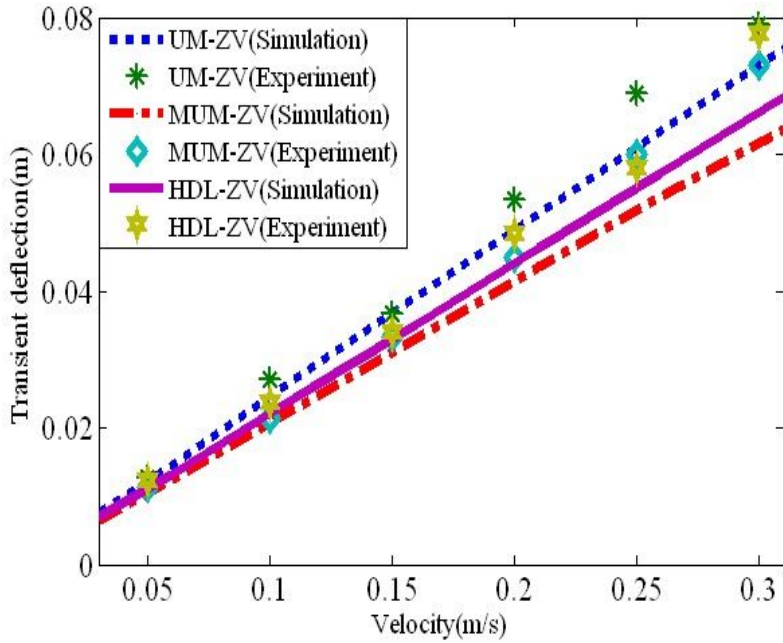


Fig. 6-11 Transient deflection along velocity($D_{lim}=0.4$)

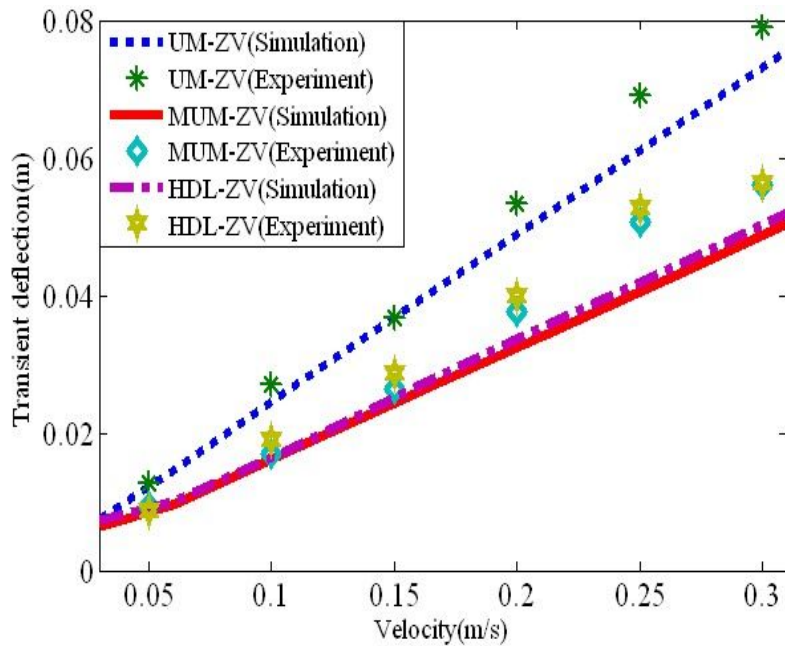


Fig. 6-12 Transient deflection along velocity($D_{lim}=0.3$)

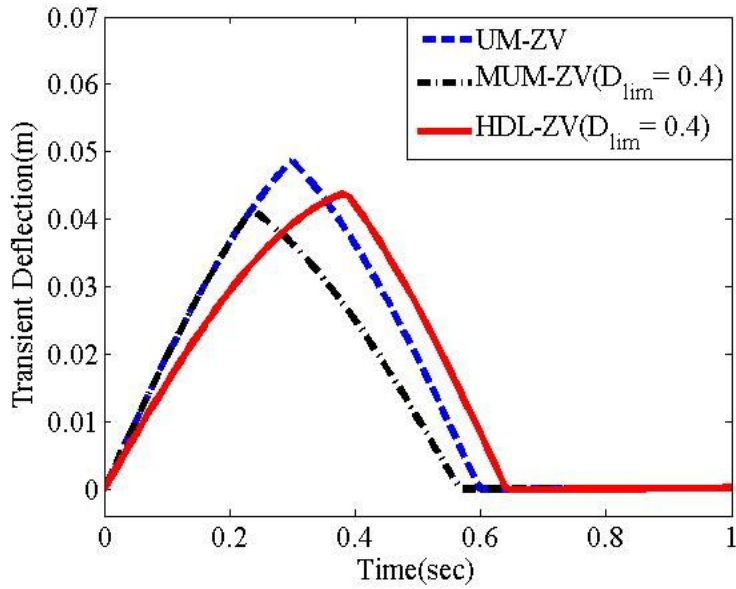


Fig. 6-13 Comparison of transient deflection($D_{lim}=0.4$)

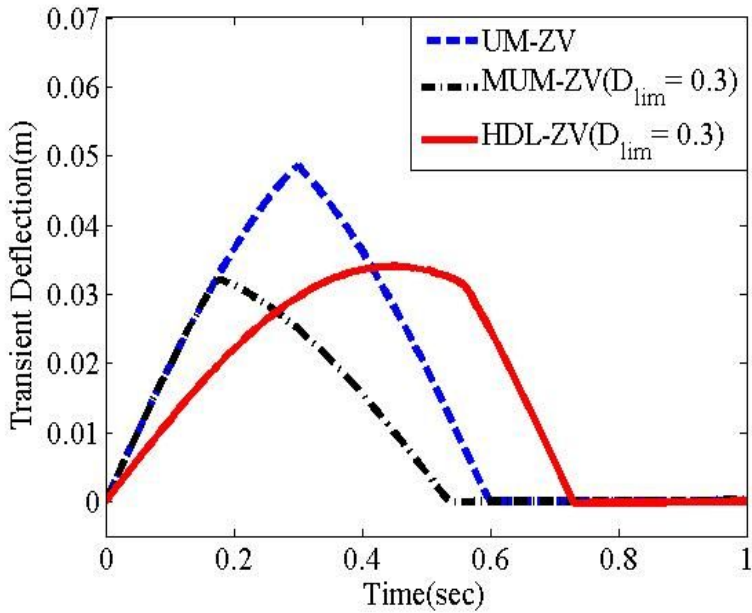


Fig. 6-14 Comparison of transient deflection($D_{lim}=0.3$)

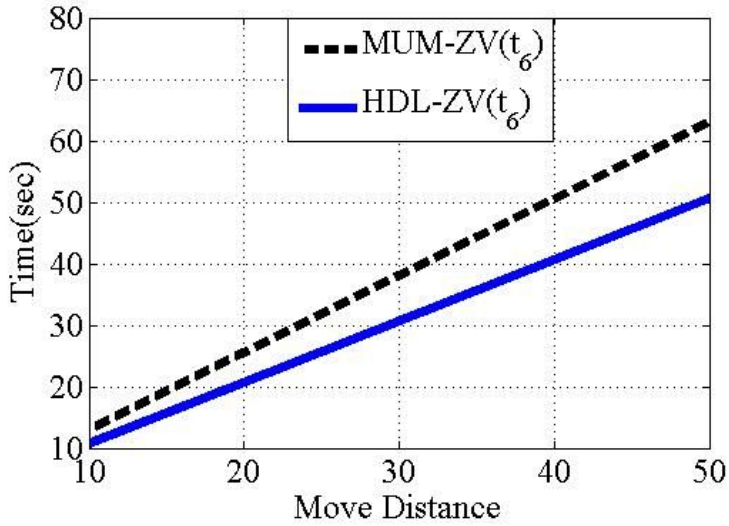


Fig. 6-15 Last impulse time of MUM-ZV and HDL-ZV

Fig. 6-15은 rest-to-rest motion 을 위한 MUM-ZV2제어기와 HDL-ZV2제어기의 move distance(x_d)에 대해 t_6 에 대해 비교했다. 수치 시뮬레이션 결과 HDL-ZV2 제어기는 목표거리 move distance(x_d)에 도달하는 시간이 MUM-ZV2제어기 보다 단축 되었다. Fig. 6-16는 실험속도는 0.2m/s일때의 pulse duration(t_p)과 deflection limit 값에 따른 과도변위 값을 측정하였다. 수치 시뮬레이션 및 실험의 결과 pulse duration(t_p)에 무관하게 전체 구간에서 deflection limit의 값에 따라 과도변위가 감소하였다. Fig. 6-17는 입력성형제어를 실행하지 않은 경우와 HDL-ZV2제어기의 잔류진동 저감 성능을 비교 하였다. 수치 시뮬레이션 및 실험의 결과 HDL-ZV2제어기의 잔류진동변위 저감성능을 보였다. 실험결과 과도변위를 제한하기 위해 HDL-ZV제어기의 과도변위 및 잔류진동 저감 성능을 검증 하였고, MUM-ZV제어 보다 목표 도달시간의 단축과 bending moment발생의 저감을 보였다.

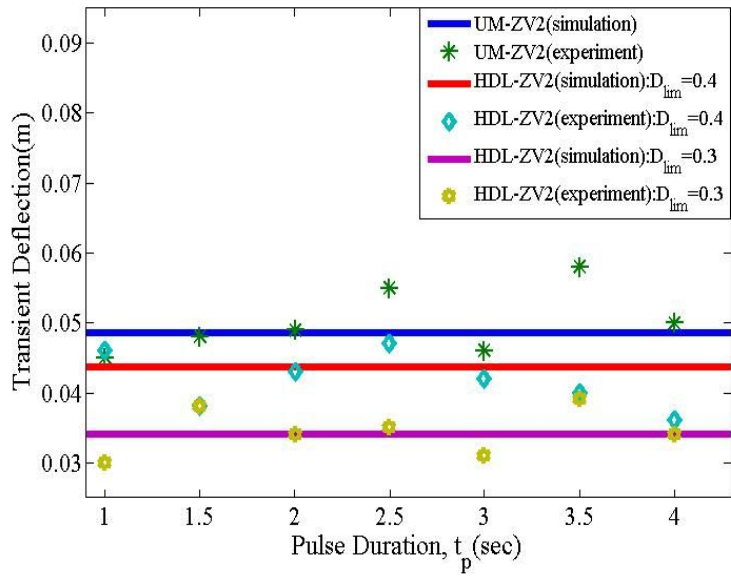


Fig. 6-16 Experimental verification of transient deflection

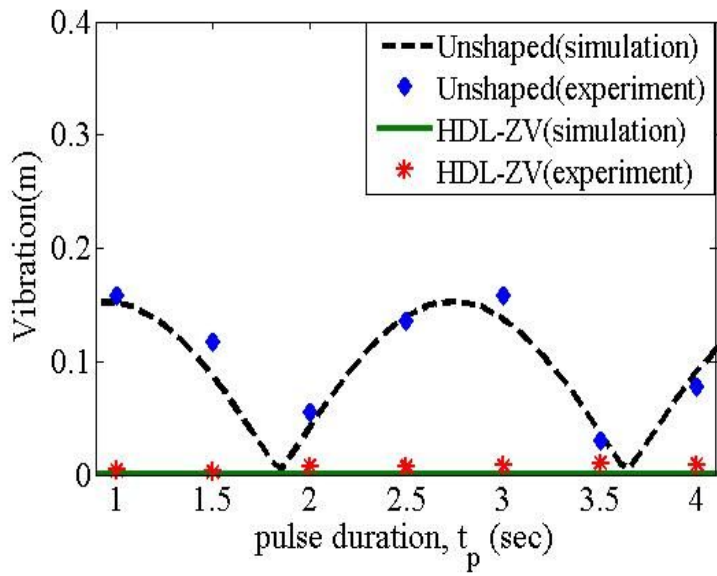


Fig. 6-17 Experimental verification of residual vibration

제 4 절 결론

본 장에서는 과도변위를 제한하기 위해 기존에 개발된 MUM-ZV제어기의 move distance까지 도달시간을 단축하기 위해 HDL-ZV(High speed Deflection Limiting Zero Vibration)제어기를 개발 하였다.

(1) 잔류진동 조건을 활용하여 과도변위를 제한하기 위한 HDL-ZV(High speed Deflection Limiting Zero Vibration)제어기를 개발 하였다.

(2) 유연시스템의 rest-to-rest motion을 위해 HDL-ZV제어기를 symmetry으로 적용하여 HDL-ZV2제어기를 개발하고, move distance에 따른 pulse duration 시간인 t_4 를 결정하는 식을 제시 하였다.

(3) HDL-ZV2제어기를 MUM-ZV2제어기와 비교하였다. 시뮬레이션 및 실험을 통하여 과도변위 제한 및 잔류진동 저감 성능과 강인성에 대해 동일한 성능을 보였으나, 목표거리 도달시간의 단축과 bending moment의 저감을 검증하였다.

제 7 장 결론

본 논문에서는 비선형 구동기를 고려하고 과도 및 잔류진동을 제한하기 위한 입력성형제어기를 개발하고, 여기에 강인성을 추가한 입력성형제어기를 개발 하였다. 또한, 고속 및 bending moment가 저감된 과도변위를 제한하기 위해 입력성형제어기를 개발 하였다.

1. 입력성형제어기의 성능을 실험하기 위해 PLC(Programmable Logic Controller)와 intelligent vision sensor을 활용하여 gantry 실험 장치를 개발하였다.
2. 비선형 구동기의 동적특성을 분석하고 vector diagram approach를 활용하여, 비선형 구동기를 고려하고 과도 및 잔류진동을 제한하기 위한 입력성형제어기 MDL-ZVC(Modified Deflection Limiting Zero Vibration)를 개발하였다. 유연시스템의 rest-to-rest motion 위해 MDL-ZVC제어기를 활용하여 MDL-ZVC2제어기를 개발하였다.
3. MDL-ZVC제어기에 강인성을 추가하여 MDL-ZVDC(Modified Deflection Limiting-Zero Vibration Derivative Compensation)제어기를 개발하고, 유연시스템의 rest-to-rest motion 위해 MDL-ZVDC2제어기를 개발하였다.
4. 입력성형제어기의 과도변위를 제한하기 위해 새로운 과도변위 제한 HDL-ZV(High speed Deflection Limiting Zero Vibration)제어기를 개발하고, MUM-ZV(Modified Unit Magnitude Zero Vibration)제어기와 비교하였다. 과도 및 잔류진동변위 제한 성능과 강인성에 대해 동일한 성능을 보였으나, 동일 목표거리 도달시간의 단축과 bending moment의 저감성능을 검증하였다.

Reference

- (1) Smith, O. J. M, 1985, Feedback Control Systems, Mcgraw-Hill, New York. P338
- (2) Tallman, G.H, and Smith, G.H, 1958,"Analog study of Dead-Beat P osicast Control," IRE Transactions on Automatic Control, Vol. AC-3, pp. 14~21.
- (3) Singer, N. C. and Seering, W. P, 1990, "Preshaping Command Inputs of Reduce System Vibration, ASME J. Dynamic Systems, Measurement, and Control, Vol. 112, pp. 76~82
- (4) Singer, Neil C., 1988, "Residual Vibration Reduction in Computer Controlled Machines," Ph. D thesis, Department of Mechanical Engineering. MIT. also AI-TR-1030, The Artificial Intelligence Laboratory, Massachusetts Institute fo Technology, Cambridge, Mass.
- (5) Chun, Hon M., Turner, James, D. and Juang, Jer-Nam, 1985, Di s turbance Accommodating Tracking Maneuvers of Flexible Spacecraft, Journal of the Astronautical Sciences, Vol. 33, No. 2,pp. 197~216.
- (6) Junkins, John L. and Turner, James K., 1986, Optimal Spacecraft Rotational Maneuvers, Elsevier Science Publishers, New York.
- (7) Juang, Jer-Nam, Turner, James D, and Chun, Hon M, 1985, "Closed-Form Solution for Feedback Control with Terminal Constraints," Journal of Guidance and Control with Terminal Constraints," Journal of Guidance and Control, Vol. 8, No. 1, pp. 39~43.
- (8) Meckl, Peter H. and Seering. Warren P.,1985, "Minmizing Residual Vibration for Point-to-Point Motion," ASME Journal of Vibration, Acoustics, Stress, and Reliability in Design, Vol. 107, No.4,pp.378~382.
- (9) Asada, Haruhiki, Ma, Zeng-Dong and Tokumaru, Hidekatsu, 1987, "Inverse Dynamics of Flexible Robot Arms of Trajectory Control,"

- Modelling and Control of Robotic Manipulators ASME winter Annual Meeting, pp. 329~336.
- (10) Sung, Y. G, 1999, "Adaptive robust vibration control with input shaping as a flexible maneuver strategy," *KSME International journal*, Vol.13, pp.807~817.
 - (11) Sung, Y. G, Singhose, W, 2007, "Closed-Form Specified-Fuel Commands for Two-Mode Systems," *IEEE. Control, and automation*, pp.74~79.
 - (12) Sung, Y. G, Singhose, W, 2008, "Robustness analysis of input shaping commands for two-mode flexible systems," *IET. Control, Theory and applications*, Vol.3, pp.722~730.
 - (13) Sung, Y. G, Singhose, W, 2008, "Deflection-Limiting Commands to Slew Flexible Systems with Velocity Limits," *IEEE ,Control, Automation and Systems*, pp.2234~2239.
 - (14) Sung, Y. G, Singhose, W, 2009, "Limited-state commands for systems with two flexible modes", *Mechatronics*, Vol.19, pp.780~787.
 - (15) Singhose, W, Singer, N. C. and Seering, 1997, "On-Off Control of Flexible Spacecraft with Specified Fuel Usage", *Proceedings of the American Control Conference Albuquerque*, pp. 2308~2312.
 - (16) Lawrence, J., Singhose, W, and Hekman, K., "Friction-compensating command shaping for vibration reduction," *ASME J. of Vibration and Acoustics*, vol. 127, pp. 307~314, 2005.
 - (17) smith, J. Y., Kozak, K., and Singhose, W., "Input shaping for a simple nonlinear system," in *American Control Conference*, (Anchorage, AK), pp. 821~826, 2002.
 - (18) Blackburn, D. F., Singhose, W., Kitchen, J. P., Petrangenaru, V. P., Lawrence, J., Kamoi, T., and Taura, A., "Advanced input shaping algorithm for nonlinear tower crane dynamics," in *8th International Conference on Motion and Vibration Control*, (Daejeon, Korea), 2006.

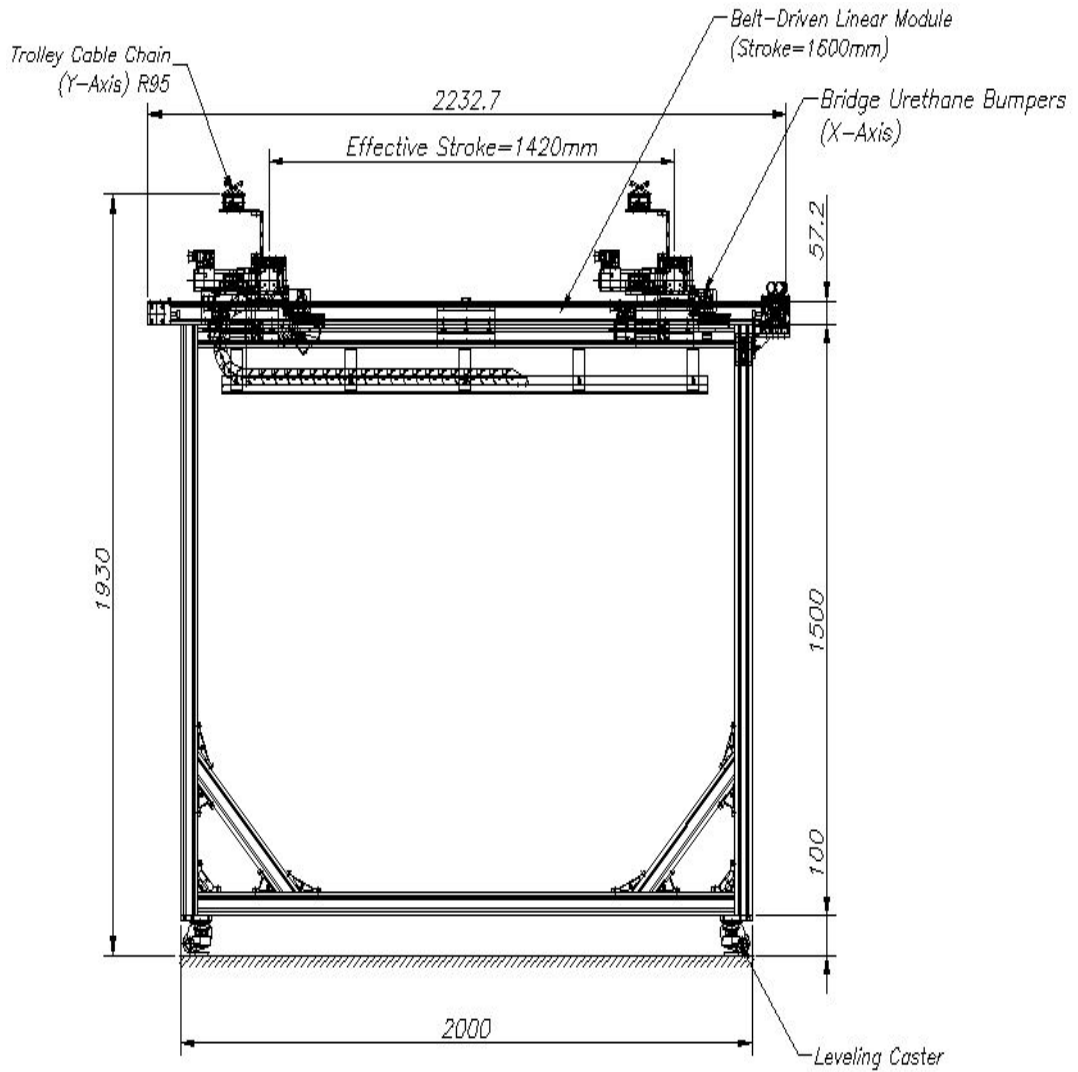
- (19) Lawrence, J. 2006, "Crane Oscillation Control: Nonlinear Elements and Educational Improvements", Ph. D. Thesis, Georgia Institute of Technology, USA.
- (20) Siemens Automation and Drives, "SIMATIC S7-SCL V5.3 for S7-300/400", Siemens Software Manual, 2005.
- (21) Siemens Automation and Drives, "SIMATIC CFC for S7, Manual", Siemens Software Manual, 2005.
- (22) Siemens Automation and Drives, "SIMATIC CFC for SIMATIC S7, Manual", Siemens Software Manual, 2006.
- (23) Siemens Automation and Drives, "SIMATIC S7-Technology, Manual", Siemens Software Manual, 2006.
- (24) Siemens Automation and Drives, "SINAMICS S120 Drive Functions, Function Manual", Siemens Software Manual, 2007.
- (25) Siemens Automation and Drives, "SINAMICS S List Manual, Manual", Siemens Software Manual, 2007.
- (26) Siemens Automation and Drives, "SIMATIC HMI WinCC flexible 2007 Compact/ Standard/ Advanced, User's Manual", Siemens Software Manual, 2007.
- (27) Siemens Automation and Drives, "SIMATIC Spectation Script Programing, Reference Guide", Siemens Software Manual, 2003.
- (28) Siemens Automation and Drives, "SIMATIC VS 72x/ Spectation, Manual", Siemens Software Manual, 2005.
- (29) Leonaed, Meirovitch, 2001, FUNDAMENTALS of VIBRATIONS, Mcgraw-Hill International Edition.
- (30) Haym Benaroya, 1998, MECHANICAL VIBRATION-ANALYSIS, UNCERTAINTIES, AND CONTROL.
- (31) Singhose, W, Seering, W. P. and Singer, N. C, 1997, "Time-Optimal Negative Input Shapers," ASME J. Dynamic Systems, Measurement, and Control, Vol. 115, pp. 198~205.

- (32) Singh, T, and Singhose, W, "Tutorial on Input Shaping/Time Delay Control of Maneuvering Flexible Structures", in American Control Conference, Anchorage, AK, 2002.
- (33) Singer, N. C. and Seering, W. P, "Preshaping Command Inputs to Reduce System Vibration," *J. of Dynamic Sys., Measurement, and Control*, vol. 112, pp. 76~82, 1990.
- (34) Robertson, M. 2005, "Command Generation for Tethered Satellite Systems", Ph. D. Thesis, Georgia Institute of Technology, USA.
- (35) Shaping Inputs to Reduce Vibration: A Vector Diagram Approach Singhose, W, Seering, W. P, and Singer, N, \Shaping inputs to reduce vibration: A vector diagram approach", in IEEE International Conference on Robotics and Automation, 1990.
- (36) Singhose, W. Seering, W. P., and Singer, N., \Residual vibration reduction using vector diagrams to generate shaped inputs," *J. of Mechanical Design*, vol. 116, pp. 654~659, 1994.
- (37) Sung, Y. G, Jang, I. S , Jang, W. S, 2009, "Evaluate of input shaping controller with flexible system", Proceedings of the KSME 2009 Spring Annual Meetings.
- (38) Jang, I. S , Sung, Y. G, Jang, W. S, 2009, "An input shaping controller for drivers with non-linear dynamics", Proceedings of the KSME 2009 Fall Annual Meetings.
- (39) Donald T. Greenwood, 1988, Principles of dynamics, Prentice Hall, Second Edition.
- (40) Jean-Jacques E, Slotine Weiping Li, 1991, Applied Nonlinear Control, Prentice Hall.
- (41) Charlesm. Close/ Dean h. Frederick, Jonathah C, Newell , 2001, Modeling and Analysis of Dynamic Systems, Third Edition.
- (42) GENEFF, FRANK LIN J, DAVID Powell, Abbas Emami-NAEINI, 2002, Feedback Control of Dynamic Systems, Prentice Hall.

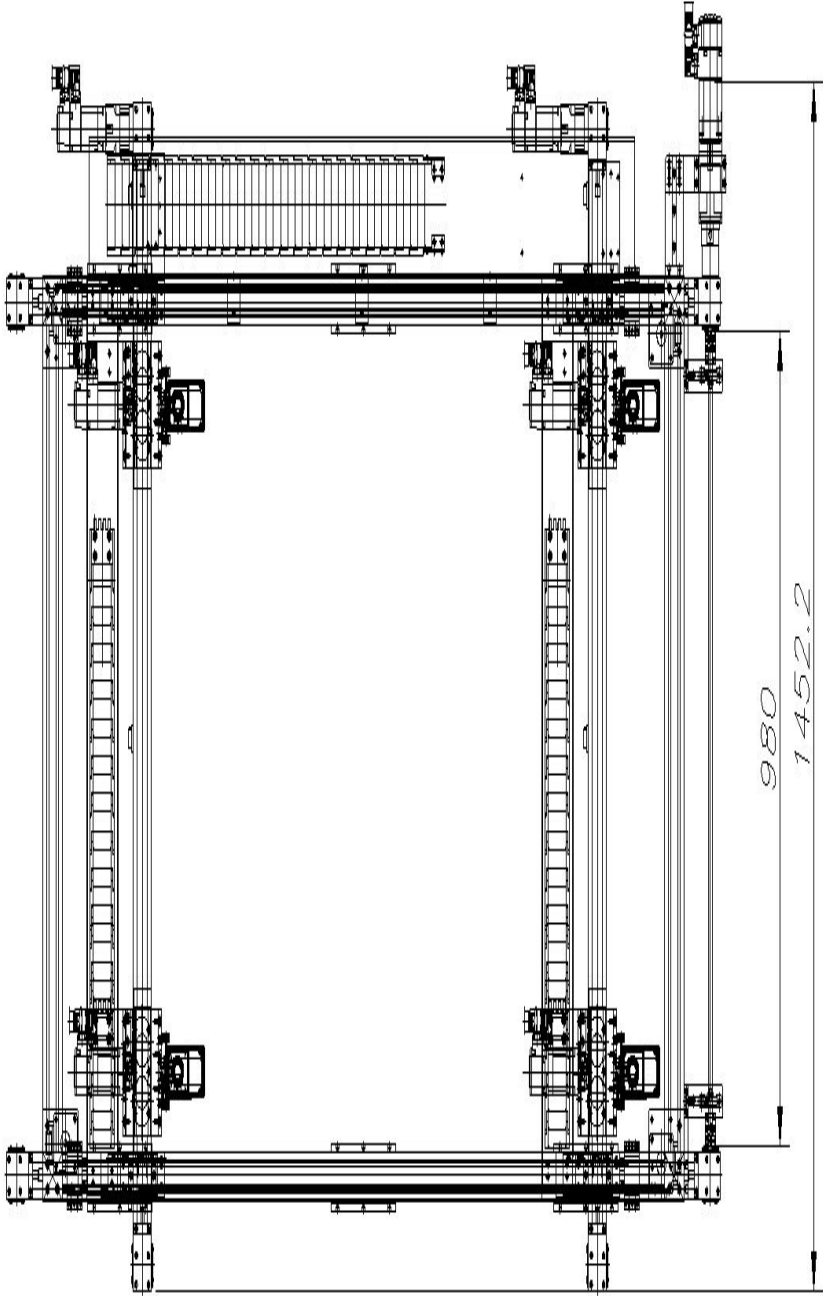
- (43) William L. Brogan, Modern Control Theory, prentice Hall. Third Edition.
- (44) Jerzy moscinski Zbigniew ogonowski, 1995, Advanced Control with Matlab and Simulink, ellis horwood.
- (45) Stevenc. Chapra , Raymond P. Canale, 2006, Numerical Methods for engineers, FIFTH Edition.
- (46) Michael, J. 2005, "Command Generation for Tethered Satellite Systems", Ph. D. Thesis, Georgia Institute of Technology, USA.

Appendix

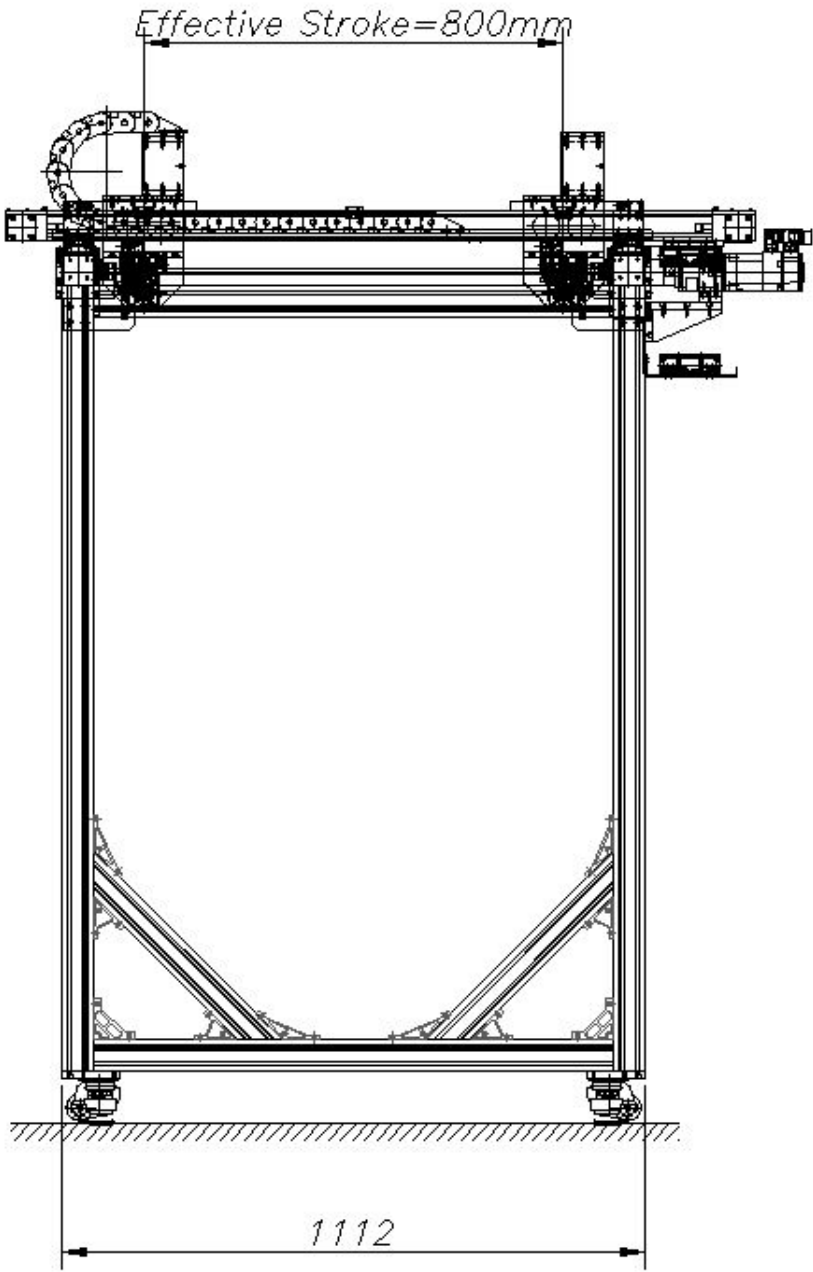
Front plan of mini-crane



Ground plan of mini-crane



Lateral plan of mini-crane



감사의 글

2년 이란 시간동안 제 나름대로 열심히 생활하고 노력했지만 부족한 점이 너무나도 많기에 졸업 논문을 마무리 하는 지금 시점에서도 아쉬움이 많이 남습니다. 학위과정을 무사히 마칠 수 있도록 도움을 주신 분들께 감사의 마음을 전합니다.

본 논문이 완성되기 까지 학문의 올바른 길과 참된 연구 자세를 일깨워 주시고 어디서나 제가 홀로 설수 있는 사람이 될 수 있도록 많은 조언과 격려로 지도해 주신 성윤경 교수님께 진심으로 감사드립니다.

논문이 완성되기 까지 조언 및 심사를 해주신 이규태 교수님, 장완식 교수님께 진심으로 감사드립니다.

저를 낳아서 길러 주시느라 고생하시고 항상 믿고 바른 길로 이끌어 주신 부모님께 진심으로 감사드립니다. 언제나 바르고 최선을 다하겠다고 약속드리고 부모님의 은혜에 보답하면서 사는 아들이 되겠습니다. 항상 든든한 힘이 되어주신 하나뿐인 형님과 따뜻한 말로 위로해 주신 형수님에게 감사드립니다. 바쁘다는 이유로 많이 놀아주지 못한 조카 서연이게는 미안함을 전합니다. 저에게 항상 따뜻한 관심을 보여주신 친척분들께 진심으로 감사드립니다.

2년 동안 실험실에서 같이 고생하고 많은 도움을 준 상홍에게 감사한 마음을 전하고, 항상 열심히 하고 많은 도움을 준 후배 김득현에게 감사함을 전합니다. 선배가 없어 어려움이 많았던 제게 많은 조언과 도움을 주신 시스템 제어, 제어공학, 나노계측메카트로닉스 실험실의 선배님들에게 감사드립니다.

마지막으로 제가 항상 열심히 할 수 있도록 용기를 북돋우어 주고 많은 조언을 해주신 학교 선배님들과 친구들에게 깊은 감사를 드립니다.

2009 년 12 월 지능메카트로닉스 실험실에서....