



저작자표시-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.
- 이 저작물을 영리 목적으로 이용할 수 있습니다.

다음과 같은 조건을 따라야 합니다:



저작자표시. 귀하는 원저작자를 표시하여야 합니다.



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](#)

2014년 2 월  
석사학위 논문

# 가속도가 제한된 유연시스템을 위한 입력성형기

조선대학교 대학원

기계공학과

민 윤 상

# 가속도가 제한된 유연시스템을 위한 입력성형기

Input Shaping Commands for Flexible Systems with  
Acceleration Limits

2014년 2월 25일

조선대학교 대학원

기계공학과

민 윤 상

# 가속도가 제한된 유연시스템을 위한 입력성형기

지도교수 성 윤 경

이 논문을 석사학위신청 논문으로 제출함.

2013년 10월

조선대학교 대학원

기계공학과

민 윤 상

# 민윤상의 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)

2013년    11월

조선대학교 대학원

# 목 차

List of Figures	V
List of Tables	IX
Nomenclature	X
Abstract	XI
1 입력성형 제어방법 및 논문의 구조	1
1.1 입력성형 제어방법	1
1.1.1 입력성형 제어의 제약조건	3
1.1.2 입력성형 제어기	4
1.1.2.a Zero Vibration 입력성형 제어기	5
1.1.2.b 강건한 입력성형 제어기	5
1.1.2.c Negative 입력성형 제어기	7
1.1.2.d 과도변위저감 입력성형 제어기	7
1.1.3 입력성형 제어기의 성능검증	9
1.1.4 Vector Diagram Approach	11
1.2 논문의 구성	12
2 가속도가 제한된 유연시스템을 위한 강건한 입력성형 제어기	14
2.1 서론	14
2.2 가속도가 제한된 시스템의 Phasor Vector	16
2.3 가속도제한 입력성형기 개발	19
2.3.1. 가속도 제한을 고려한 ZV 입력성형 제어기	19

2.3.1.a ALZV 와 ZV shapers의 비교	21
2.3.2. 가속도 제한을 고려한 ZVD 입력성형	24
2.3.2.a ALZVD shaper 개발	25
2.3.3. 가속도제한을 고려한 EI 입력성형제어기	28
2.3.3.a ALEI shaper 개발	31
2.4 가속도제한 입력성형기 평가	36
2.4.1. ALZVD shaper 분석	37
2.4.2. ALEI shaper 분석	40
2.5 가속도제한입력성형기의 실험적 검증	42
2.5.1. 실험장치 설정	42
2.5.2. 실험결과	43
2.6 결론	47

<b>3 가속도가 제한된 유연시스템을 위한 On-off 입력성형제어기</b>	<b>48</b>
3.1 서론	48
3.2 가속도가 제한된 시스템의 Phasor Vector	50
3.3 가속도 제한을 고려한 UMZV 입력성형제어기	53
3.3.1 ALUMZV shaper의 개발	55
3.4 ALUMZV shaper의 입력성형기 평가	59
3.5 ALUMZV shaper의 입력성형기의 실험적 검증	63
3.5.1. 실험장치 설정	63
3.5.2. 실험 결과	64
3.6 결론	67

4	가속도가 제한된 유연시스템을 위한 과도변위저감 입력 성형제어기 .....	69
4.1	서론 .....	69
4.2	가속도가 제한된 시스템의 Phasor Vector .....	71
4.3	가속도제한 과도변위 저감 입력성형기 개발 .....	74
4.3.1.	가속도 제한을 고려한 MUMZV 입력성형제어기 .....	74
4.3.1.a	ALMUMZV shaper의 개발 .....	76
4.3.1.b	ALMUMZV shaper의 과도변위제약조건 .....	80
4.3.2.	가속도 제한을 고려한 High Deflection Limit Zero Vibration 입력성형제어기 .....	83
4.3.2.a	AHDLZV shaper의 개발 .....	84
4.3.2.b	AHDLZV shaper의 과도변위제약조건 .....	88
4.4	가속도제한 과도변위저감 입력성형제어기 평가 .....	89
4.4.1.	ALMUMZV shaper의 분석 .....	90
4.4.2.	AHDLZV shaper의 분석 .....	93
4.5	가속도제한 과도변위저감 입력성형기의 실험적 검증 .....	96
4.5.1.	실험장치 설정 .....	96
4.5.2.	실험 결과 .....	99
4.6	결론 .....	103
5	논문의 결론 .....	104
	<b>APPENDIX A</b> .....	105
A.1	A Pendulum Model .....	105
A.2	A Benchmark Model .....	107



<b>APPENDIX B</b> .....	109
B.1 MUMZV shaper의 과도변위제한 조건식.....	109
B.2 HDLZV shaper의 과도변위제한 조건식.....	111
<b>REFERENCES</b> .....	113

# LIST OF FIGURES

Fig. 1-1	Flexible Systems.....	1
Fig. 1-2	Input Shaping Technique.....	2
Fig. 1-3	Control Sequence of System by Input Shaper.....	4
Fig. 1-4	Zero Vibration (ZV) Shaper.....	5
Fig. 1-5	Zero Vibration Derivate (ZVD) Shaper.....	6
Fig. 1-6	Unity Magnitude Zero Vibration (UMZV) Shaper.....	7
Fig. 1-7	Modifide Unity Magnitude Zero Vibration (MUMZV) Shaper.....	8
Fig. 1-8	High Deflection Limit Zero Vibration (HDLZV) Shaper.....	9
Fig. 1-9	Response of Input Shaper.....	9
Fig. 1-10	Sensitivity of Input Shaper.....	10
Fig. 1-11	Vector Diagram Approach.....	11
Fig. 1-12	Residual Vibration by Impulse Sequence.....	11
Fig. 1-13	Vector Diagram Approach of ZV Shaper.....	12
Fig. 2-1	Flexible System (Pendulum) .....	17
Fig. 2-2	Separation of Velocity of ZV Shaper .....	18
Fig. 2-3	Residual Vibratio of ZV to $t_p$ .....	20
Fig. 2-4	Deconvolution of ZV Short Command .....	20
Fig. 2-5	Deconvolution of ZV Long Command .....	21
Fig. 2-6	Distorted Command of ZV Shaper .....	22
Fig. 2-7	Separation of Velocity of ALZV Shaper .....	22
Fig. 2-8	Vector Diagram of ALZV Shaper .....	23
Fig. 2-9	Residual Vibratio of ZVD to $t_p$ .....	24
Fig. 2-10	Deconvolution of ZVD Short Command .....	24
Fig. 2-11	Deconvolution of ZVD Long Command .....	25
Fig. 2-12	Distorted Command of ZVD Shaper .....	26
Fig. 2-13	Separation of Velocity of ALZVD Shaper .....	26
Fig. 2-14	Vector Diagram of ALZVD Shaperr .....	27
Fig. 2-15	Residual Vibratio of EI to $t_p$ .....	29

Fig. 2-16	Deconvolution of EI Short Command .....	29
Fig. 2-17	Deconvolution of EI Long Command .....	30
Fig. 2-18	Distorted Command of EI Shaper .....	31
Fig. 2-19	Separation of Velocity of ALEI Shaper .....	31
Fig. 2-20	Vector diagram of ALEI Shaper .....	33
Fig. 2-21	Sensitivity Curve of ALEI Shaper .....	33
Fig. 2-22	Residual Vibration of ALZVD Shaper to $\kappa_a$ and $\kappa_d$ .....	37
Fig. 2-23	Residual Vibration of ALZVD Shaper to $\kappa_a$ and $t_p$ .....	38
Fig. 2-24	Sensitivity of ALZVD Shaper to $\kappa_a$ and $\kappa_d$ .....	38
Fig. 2-25	Sensitivity of ALZVD Shaper to $\kappa_a$ and $L$ .....	39
Fig. 2-26	Residual Vibration of ALEI Shaper to $t_p$ .....	40
Fig. 2-27	Sensitivity Vibration of ALEI Shaper to $L/L_m$ .....	41
Fig. 2-28	Sensitivity Vibration of ALEI Shaper to $L/L_m$ and $\kappa_a/\kappa_{am}$ .....	41
Fig. 2-29	Mini-Bridge Crane for Testbed .....	42
Fig. 2-30	Experiment of Velocity Error .....	43
Fig. 2-31	Velocity Command of ZVD, ALZVD, EI and ALEI Shapers .....	44
Fig. 2-32	Deflection Response of ZVD, ALZVD, EI and ALEI Shapers .....	44
Fig. 2-33	Sensitivity of ALZVD and ALEI Shapers to $L/L_m$ .....	45
Fig. 2-34	Residual Vibration of ALZVD and ALEI Shapers to $t_p$ .....	45
Fig. 2-35	Sensitivity of ALZVD and ALEI Shapers to $\kappa_a/\kappa_{am}$ .....	46
Fig. 3-1	Flexible System (Pendulum) .....	50
Fig. 3-2	Separation of Velocity of UMZV Shaper .....	52
Fig. 3-3	Residual Vibratio of UMZV to $t_p$ .....	53
Fig. 3-4	Deconvolution of UMZV Short Command .....	54
Fig. 3-5	Deconvolution of UMZV Long Command .....	54
Fig. 3-6	Distorted Command of UMZV Shaper .....	55
Fig. 3-7	Separation of Velocity of ALUMZV Shaper .....	56
Fig. 3-8	Vector Diagram of ALUMZV Shaper .....	57
Fig. 3-9	Residual Vibration of ALUMZV Shaper to $\kappa_a$ and $\kappa_d$ .....	60
Fig. 3-10	Residual Vibration of ALUMZV Shaper to $\kappa_a$ and $t_p$ .....	60

Fig. 3-11	Sensitivity of ALUMZV Shaper to $\kappa_a$ and $\kappa_d$ .....	61
Fig. 3-12	Sensitivity of ALUMZV Shaper to $\kappa_a$ and $L$ .....	61
Fig. 3-13	Sensitivity of ALUMZV Shaper to $\kappa_a/\kappa_{am}$ .....	62
Fig. 3-14	Mini-Bridge Crane for Testbed .....	63
Fig. 3-15	Experiment of Velocity Error .....	64
Fig. 3-16	Velocity Command of UMZV and ALUMZV Shapers .....	65
Fig. 3-17	Deflection Response of UMZV and ALUMZV Shapers .....	65
Fig. 3-18	Sensitivity of ALUMZV Shaper to $L/L_m$ .....	66
Fig. 3-19	Residual Vibration of ALUMZV Shaper to $t_p$ .....	66
Fig. 3-20	Sensitivity of ALUMZV Shaper to $\kappa_a/\kappa_{am}$ .....	67
Fig. 4-1	Benchmark System .....	71
Fig. 4-2	Separation of Velocity of MUMZV 2haper .....	73
Fig. 4-3	Residual Vibratio of MUMZV to $t_p$ .....	74
Fig. 4-4	Deconvolution of MUMZV Short Command .....	75
Fig. 4-5	Deconvolution of MUMZV Long Command .....	75
Fig. 4-6	Distorted Command of MUMZV Shaper .....	76
Fig. 4-7	Separation of Velocity of ALMUMZV Shaper .....	77
Fig. 4-8	Vector Diagram of ALMUMZV shaper .....	78
Fig. 4-9	Unshap Acceleration Limits Command .....	81
Fig. 4-10	Shaped Acceleration Limits Command .....	81
Fig. 4-11	Residual Vibratio of HDLZV to $t_p$ .....	83
Fig. 4-12	Deconvolution of HDLZV Short Command .....	83
Fig. 4-13	Deconvolution of HDLZV Long Command .....	84
Fig. 4-14	Distorted Command of HDLZV Shaper .....	85
Fig. 4-15	Separation of Velocity of AHDLZV Shaper .....	85
Fig. 4-16	Vector Diagram of AHDLZV shaper .....	86
Fig. 4-17	Shaped Acceleration Limits Command .....	88
Fig. 4-18	Residual Vibration of ALMUMZV Shaper to $\kappa_a$ and $\kappa_d$ .....	90
Fig. 4-19	Residual Vibration of ALMUMZV Shaper to $\kappa_a$ and $t_p$ .....	91
Fig. 4-20	Sensitivity of ALMUMZV Shaper to $\kappa_a$ and $\kappa_d$ .....	91

Fig. 4-21	Transient Deflection of ALMUMZV Shaper to $\kappa_a$ and $\kappa_d$ .....	92
Fig. 4-22	Sensitivity of ALMUMZV Shaper to $\kappa_a/\kappa_{am}$ .....	92
Fig. 4-23	Residual Vibration of AHDLZV Shaper to $\kappa_a$ and $\kappa_d$ .....	93
Fig. 4-24	Residual Vibration of ALHDLZV Shaper to $\kappa_a$ and $t_p$ .....	94
Fig. 4-25	Sensitivity of ALMUMZV Shaper to $\kappa_a$ and $\kappa_d$ .....	94
Fig. 4-26	Transient Deflection of AHDLZV Shaper to $\kappa_a$ and $\kappa_d$ .....	95
Fig. 4-27	Sensitivity of AHDLZV Shaper to $\kappa_a/\kappa_{am}$ .....	96
Fig. 4-28	Mini-Bridge Crane for Testbed .....	97
Fig. 4-29	Experiment of Velocity Error by MUMZV Shaper .....	97
Fig. 4-30	Experiment of Velocity Error by HDLZV Shaper .....	98
Fig. 4-31	Velocity Command of ALMUMZV and AHDLZV Shapers .....	99
Fig. 4-32	Deflection Response of ALMUMZV and AHDLZV Shapers .....	99
Fig. 4-33	Deflection Response of ALMUMZV and AHDLZV Shapers .....	100
Fig. 4-34	Residual Vibration of ALMUMZV and AHDLZV Shapers to $t_p$ .....	101
Fig. 4-35	Sensitivity of ALMUMZV and AHDLZV Shapers to $\kappa_a/\kappa_{am}$ .....	101
Fig. 4-36	Transient Deflection of ALMUMZV and AHDLZV Shapers to $\kappa_a$ .....	102

## LIST OF TABLE

Table 2-1. System Parameters of ALZVD and ALEI Shapers .....	36
Table 3-1. System Parameters of ALUMZV Shaper .....	59
Table 4-1. System Parameter of AMUMZV and AHDLZV Shapers .....	89
Table 4-2. System Parameter for Experiment .....	98

# NOMENCLATURE

$\kappa_a$	Acceleration
$v_t$	Actual velocity profile
$A_i$	Amplitudes of impulses
$\zeta$	Damping ratio
$\kappa_d$	Deceleration
$V_d$	Desire velocity
$U(s)$	Input
$ V $	Magnitude of vector
$\omega_n$	Natural frequency
$Y(s)$	Output
$T$	Period
$\angle V$	Phase of vector
$t_p$	pulse duration
$g_i(t)$	Segments of actual velocity profile
$\theta_{ss}$	Steady-state response
$L$	Suspension length
$t_i$	Time locations of impulses
$G(s)$	Transfer function

# ABSTRACT

## Input Shaping Commands for Flexible Systems with Acceleration Limits

Min, Yoon-Sang

Advisor : Professor Sung, Yoon-Gyung

Department of Mechanical Engineering,

Graduate School of Chosun University

In this thesis, input shaping commands are developed to reduce the transient and residual deflections of flexible systems with acceleration limits. The input shaping techniques have been efficiently employed for the applications in industrial machines, cranes, computer hard disks, control systems with either voice-coil actuators or piezo-actuators, etc. However, it has been suffered from control performance degradation because of no consideration of acceleration limits of actuators. The acceleration limits could be caused from mechanical dynamics, electronic driver or electronic power of actuators so that it is necessary to take care of the acceleration limits to improve the control performance of existing input shaping techniques.

A ramp-step function for velocity profile is used in order to develop new input shapers with respect to acceleration limits. The new input shapers are obtained in closed-form with a vector diagram approach and the superposition principle. At first, it shows that the ZV(zero vibration) shaper with two impulses is not affected by acceleration limits. Then, in order to improve the robustness, a new ZVD(zero vibration differential) shaper is presented. For more robustness of the new ZVD, a new EI(extended insensitivity) shaper is proposed with constraint formulas to ensure the symmetry of sensitivity properties to modeling error. Secondly, On-Off shaped velocity commands are developed with



acceleration limits. It presents implementation issues with respect to the accomplishment of designed input velocity commands. Thirdly, deflection-limiting commands with acceleration limits are newly proposed in closed-form with a deflection-limiting formula as a command design criteria.

The new input shapers are evaluated with benchmark models to analyze residual deflection, robustness of system modeling, robustness of design parameters of ramp-step function and transient deflection. Furthermore, the new input shapers are experimentally evaluated and verified with a min-bridge crane.

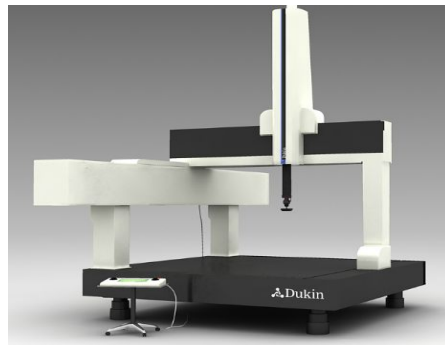
# 1 입력성형방법 및 논문의 구조

## 1.1 입력성형방법

많은 기계적인 시스템들의 성능은 설계, 형상, 제어, 환경등 여러 가지 요소들의 영향을 받는다. 따라서 이론적인 성능에는 미치지 못하는 경우가 대부분이다. 특히 최근의 산업현장에서의 시스템들은 보다 빠르게, 보다 가볍게, 보다 유연하게 만들어지기 때문에 산업현장에서의 시스템들은 유연하고 가볍고 빠른 성능을 보이지만 움직임에 대한 변위는 증가하고 따라서 위치제어가 어려워지고 있다. 산업 현장에서 이동과 위치에 관한 제어는 상당히 중요하다. 그 이유는 이동과 위치제어를 통해 불량률을 줄이고 작업시의 정확한 위치 제어로 인하여 작업자의 안전성을 확보 할수 있으며 작업속도 역시 상승하여 생산력에 증대를 가져온다. 그에 따라 작업 효율과 제품의 정밀도를 높일 수 있다.



(a) 크레인



(b) 좌표측정기



(c) 로봇



(d) 우주구조물

Fig. 1-1 Flexible Systems

이러한 문제들을 해결하기 위해 많은 연구가 있어 왔으며, 많은 제어방법들 중에서 feedforward control방법인 input shaping technique이 성공적으로 유연시스템의 변위저감제어에 활용되고 있다.

Fig. 1-2은 입력성형의 기본적인 개념을 No Damping 시스템의 deflection response를 통하여 나타내고 있다. 입력성형은 Fig. 1-1에 나타난 것과 같이 첫 번째 임펄스와 두 번째 임펄스 간의 나타나는 응답이 서로 상쇄되어 변위가 없어지는 것을 이용하여 시스템의 잔류 변위를 감소시킨다. 점선은 첫 번째 임펄스  $A_1$ 에 의해 시스템에서 나타나는 변위며 1점쇄선은  $A_2$ 에 의해 나타나는 변위이다. 실선은 실제 시스템의 변위로 입력성형이 종료되는 시점  $t_2$ 이후에 변위가 사라진다.

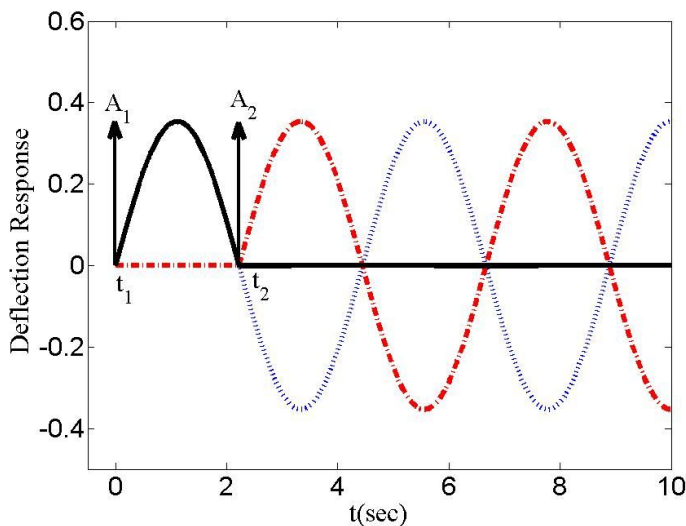


Fig. 1-2 Input Shaping Technique

여기서 No Damping 시스템으로 한정하여 설계한 이유는 시스템의 Damping 요소는 시스템 변위를 저감하는데 있어 제어적인 관점에서 장점으로 작용한다. 그러므로, 본 연구에서는 damping effect를 고려하지 않은 입력성형기제어방법에 대한 연구결과를 제시한다. 또한, 입력성형방법은 개루프제어방법으로 입력커맨드 성형을 통해 과도 및 잔류변위를 제어 할 수 있다. 입력성형기술은 설계시 제약 조건에 따라 잔류변위 뿐만아니라 과도변위 저감, modeling error에 대한 강건성 증가 등 다양한 목적을 가진 제어방법들이 있으며 현재도 연구가 계속되고 있다.

이번 절에서는 입력성형방법에 설계시의 제약조건식의 유도과 가장 간단한 형태인 posicast control 방법과 그밖에 modeling error에 대해 강건성을 확보한 ZVD, EI, shapers 빠른 제어 속도를 갖는 UMZV shaper, 과도변위를 제어하는 MUMZV shaper, HDLZV shaper에 대하여 소개하고 simulation을 통해 입력성형기들이 가지는 특징 및 성능을 간략히 정리 한다.

### 1.1.1 입력성형 제어기의 제약조건

입력성형의 제약 조건을 계산하기 위하여 임펄스에 대한 시스템의 응답을 구하여 유연시스템의 잔류변위를 없애기 위해 시스템의 전달함수를 이용하여 그 응답을 나타내고 임펄스에 대한 응답을 구한다.

2차 시스템의 전달함수는 식(1.1)과 같이 나타난다.

$$G(s) = \frac{Y(s)}{U(s)} = \frac{\omega_n^2}{s^2 + 2\zeta\omega_n s + \omega_n^2} \quad (1.1)$$

식 (1.1)의 전달함수를 이용하여 입력의 크기 A가 시간 t에 가해지면, impulse 응답은 식(1.2)와 같이 나타낼 수 있다.

$$y(t) = \left[ A \frac{\omega_n}{\sqrt{1-\zeta^2}} e^{-\zeta\omega_n(t-t_0)} \right] \cdot \sin(\omega_n \sqrt{1-\zeta^2}(t-t_0)) \quad (1.2)$$

식 (1.2)에 n개의 입력이 가해진 진폭은 식 (3)과 같다.

$$A_{amp} = \sqrt{\left( \sum_{i=1}^n B_i \sin \varnothing_i \right)^2 + \left( \sum_{i=1}^n B_i \cos \varnothing_i \right)^2} \quad (1.3)$$

여기에서  $\varnothing_i$ 와  $B_i$ 는 식 (1.4)와 (1.5)이다.

$$\varnothing_i = -\omega_n \sqrt{1-\zeta^2} t_i \quad (1.4)$$

$$B_i = \frac{A_i \omega_n}{\sqrt{1-\zeta^2}} e^{-\zeta \omega_n (t_n - t_i)} \quad (1.5)$$

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 (1.3)의 괄호안의 두 항은 각각 0(zero) 이 되어야 한다. 그러므로 식 (1.6)과 (1.7)을 만족해야 한다.

$$\sum_{i=1}^n A_i e^{-\zeta \omega_n (t_n - t_i)} \sin(t_i \omega_n \sqrt{1-\zeta^2}) = 0 \quad (1.6)$$

$$\sum_{i=1}^n A_i e^{-\zeta \omega_n (t_n - t_i)} \cos(t_i \omega_n \sqrt{1-\zeta^2}) = 0 \quad (1.7)$$

$$\sum_{i=1}^n A_i = 1 \quad (1.8)$$

식 (1.6) 과 (1.7)로부터  $A_i, t_i$  를 구할 수 있다. 식 (1.6) 과 (1.7)은 잔류변위를 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, 입력성형제 어기를 통과한 임의의 명령어가 구동기의 최대 성능을 넘지 않게 하기 위해 제한 조건 식(1.8)을 추가한다.

### 1.1.2 입력성형제어기

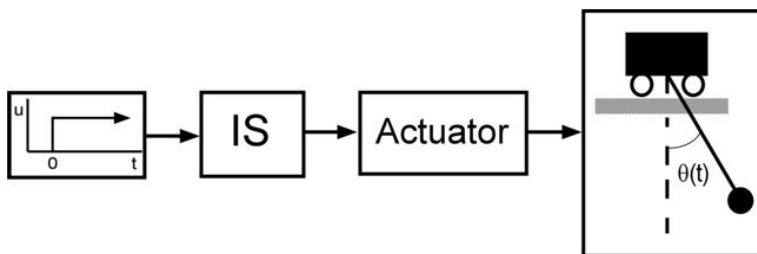


Fig. 1-3 Control Sequence of System by Input Shaper(IS)

입력성형방법은 기존의 시스템의 변화 없이 잔류변위를 저감하는데 효과적인 방법이다. Fig. 1-3 에서 보는바와 같이 입력 커맨드와 구동기 사이에 위치하며 임펄스 시퀀스와 입력 커맨드의 convolution을 통해 입력성형커맨드가 생성되며 이에 따라 구동기에 전달된다. 전달된 명령에 따라 출력의 변위를 제어한다.

### 1.1.2.a Zero Vibration 입력성형제어기

Fig. 1-4는 임펄스 입력이 끝난 후에 시스템이 변위 없이 운동할 수 있도록 두 개의 임펄스가 가진 될 수 있다는 것을 설명해준다. 이 방법은 유연시스템의 변위 현상을 저감하기위해 1985년 처음으로 Singer[1]방법을 개발하였다. 이 방법은 위의 잔류변위식 (1.6)와 (1.7) 그리고 성능에 따른 제약조건(1.8)을 이용하여 임펄스가 두 개인 솔루션을 구하였다. 임펄스의 크기와 시간은 식(1.9)와 같다. ZV shaper 는 step input을 두 단계로 나누어 잔류변위를 제거한다. 그러나, 시스템 매개변수의 modelling error에 대해 강인성이 미흡하여 실용성이 낮게 나타난다. 여기서 T 는 시스템의 주기를 의미한다.  $T=2\pi/\omega_n$ 이다.

$$\begin{bmatrix} A_i \\ t_i \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0.5 & 0.5 \\ 0 & \frac{T}{2} \end{bmatrix} \quad (1.9)$$

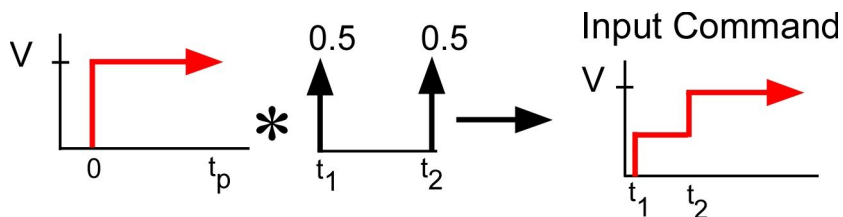


Fig. 1-4 Zero Vibration (ZV) Shaper

### 1.1.2.b 강건한 입력성형 제어기

입력성형제어기의 설계 시 사용된 주파수와 감쇠비가 실제 시스템의 주파수 및 감쇠비와 정확하게 일치 하지 않거나, 제어도중에 변화 하면 입력성형제어기의 잔류변위 저감의 높은 성능을 기대하기 어렵다. system modeling error에 강인한 제어기를 설계하기 위해 impulse의 수를 증가시킨 입력성형제어기가 개발되었다. 시

시스템주파수 변화에 강인한 입력성형제어기를 개발하기 위해  $\omega_n$  로 미분하여 시스템주파수에 강인한 입력성형제어기를 설계할 수 있다.

Impulse의 수가 증가할수록 입력성형제어기는 강인성이 증가하지만 정상상태 도달의 증가하게 된다. 그러므로, 강건성과 응답속도를 trade-off하여 입력성형제어기를 설계한다. Fig. 1-5는 ZV shaper의 감쇠비가 0(zero)일 때, 시스템주파수에 대해 강건성을 개선한 Zero Vibration Derivative (ZVD) shaper [1]제어기다.

$$\begin{bmatrix} A_i \\ t_i \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0.25 & 0.5 & 0.25 \\ 0 & T/2 & T \end{bmatrix} \quad (1.10)$$

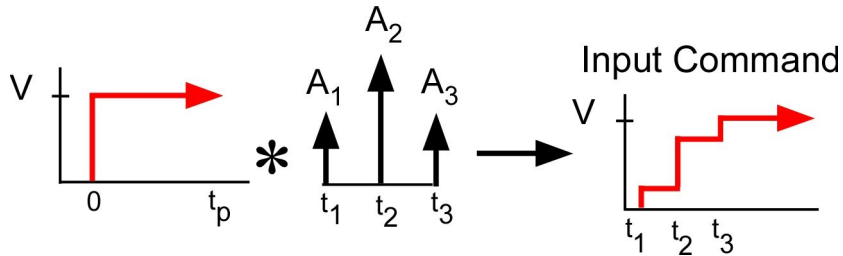


Fig. 1-5 Zero Vibration Derivate (ZVD) Shaper

이후 ZVD shaper보다 강건한 입력성형방법으로 일정한 변위를 허용하는 대신 보다 강건한 입력 성형 방법이 Extra Insensitivity shaper[2]가 제시 되었다. 이 입력성형기는 잔류변위의 크기가 0이 아닌 대신에 Sensitivity Curve에서 Hump형태를 띄어 일정 변위 내에서는 ZVD shaper보다 강건한 특성을 보인다. 여기서  $V_{lim}$ 은 변위의 제한비율로 실제 발생하는 잔류변위는 기준은 unshap의 잔류변위의  $V_{lim}\%$ 가 된다.

$$\begin{bmatrix} A_i \\ t_i \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0.25(1 + V_{lim}) & 0.5(1 - V_{lim}) & 0.25(1 + V_{lim}) \\ 0 & T/2 & T \end{bmatrix} \quad (1.11)$$

### 1.1.2.c Negative 입력성형제어기

유연시스템의 잔류변위의 저감을 위해 입력성형제어기의 활용하는데, 입력성형 제어기의 time delay 특성으로 제어종료시간이 증가한다. 시간 증가는 산업현장의 생산성을 저감하는 요인으로 작용될 수 있다. 또한 on-off 구동기에 대해 여러단계의 속도의 명령어로 이루어진 입력성형제어기는 활용될수 없다. 따라서 제어종료 시간을 단축하고 on-off 형태의 구동기를 위하여 음의 입력을 포함한 Fig. 1-6와 같은 Unity Magnitude Zero Vibration(UMZV) shaper[3]가 제안 되었다. zero 잔류 변위를 얻기 위한 조건을 만족하고 입력크기가 on-off를 만족하는 조건을 이용하여 UMZV shaper의 입력의 크기와 시간을 구하면 식 (1.12)으로 표현된다.

$$\begin{bmatrix} A_i \\ t_i \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & -1 & 1 \\ 0 & T & T \\ 0 & \frac{T}{6} & \frac{T}{3} \end{bmatrix} \quad (1.12)$$

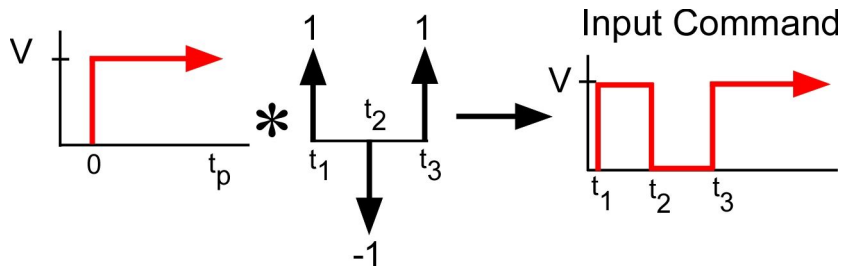


Fig. 1-6 Unity Magnitude Zero Vibration (UMZV) Shaper

### 1.1.2.d 과도변위 저감 입력성형제어기

입력 성형 방법은 잔류 변위 저감 뿐만 아니라 과도 변위 저감에도 효과적이다. 과도변위는 시스템의 수명에 크게 미치는 요소이므로 실제 산업 현장에서는 과도 변위를 저감해줄 필요가 있다. 이와 같은 문제점을 해결하기 위해 UMZV shaper의  $A_3$ 의 impulse 크기를 1 보다 작은  $2D_{lim}$ 으로 변경하여 Fig. 1-7와 같은 과도변위를 제한한 입력성형제어기 Modified Unit Magnitude Zero Vibration (MUMZV) shaper가 개발되었다. 여기서  $D_{lim}$ 은 deflection limit 이다. MUMZV



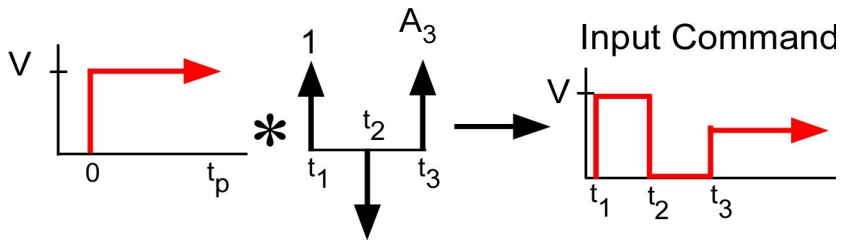
shaper의 impulse의 크기와 시간은 식 (1.14)로 나타난다. 시간  $t_2$  와  $t_3$  는 각각 식(1.15)와 (1.16)이다. 여기서  $A_3 = 2D_{lim}$ 이다.[4] 하지만  $A_3 = 2D_{lim}$ 은 가속도 입력의 경우 이다. 따라서 속도입력의 경우 속도  $D_{lim}$ 값을 계산하면 Appendix B의 계산 과정에 따라  $A_3$ 는 다음과 같다.

$$A_3 = \sqrt{2 - 2\sqrt{1 - D_{lim}^2}} \quad (1.13)$$

$$\begin{bmatrix} A_i \\ t_i \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & -1 & A_3 \\ 0 & t_2 & t_3 \end{bmatrix} \quad (1.14)$$

$$t_2 = \frac{1}{\omega_n} \cos^{-1} \left( 1 - \frac{A_3^2}{2} \right) \quad (1.15)$$

$$t_3 = \frac{1}{\omega_n} \cos^{-1} \left( -\frac{A_3}{2} \right) \quad (1.16)$$



**Fig. 1-7 Modified Unity Magnitude Zero Vibration (MUMZV) Shaper**

한편 마지막 임펄스 크기가 줄면서 구동기의 최대 속도보다 낮은 속도로 움직이기 때문에 이러한 문제를 해결하고자 High Deflection Limit Zero Vibration (HDLZV)[5]가 개발 되었다. Fig. 1-8과 같이 HDLZV shaper는 기존의 UMZV shaper에서  $A_1$ 과  $A_2$ 의 값을 보다 작게하여  $2D_{lim}$ 으로 변경하여 설계 되었다. 여기도 역시 MUMZV와 마찬가지로 Appendix B의 따라 속도 입력에 대한  $A_1$ 은 다음과 같다. 다음과 같다.

$$A_1 = D_{lim} \quad (1.17)$$

$$\begin{bmatrix} A_i \\ t_i \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 2D_{lim} & -2D_{lim} & 1 \\ 0 & t_2 & t_3 \end{bmatrix} \quad (1.18)$$

$$t_2 = \frac{1}{\omega_n} \cos^{-1} \left( \frac{2A_1^2 - 1}{2A_1^2} \right) \quad (1.19)$$

$$t_3 = \frac{1}{\omega_n} \cos^{-1} \left( -\frac{1}{2A_1} \right) \quad (1.20)$$

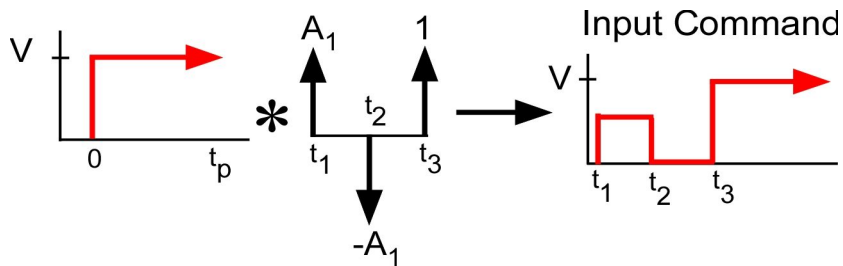


Fig. 1-8 High Deflection Limit Zero Vibration (HDLZV) Shaper

### 1.1.3 입력성형제어기의 성능검증

이번 절에서는 앞에서 표시한 입력성형제어기의 성능을 평가를 통해 각각의 입력성형기가 가지는 특징 및 장단점을 정리 요약한다.

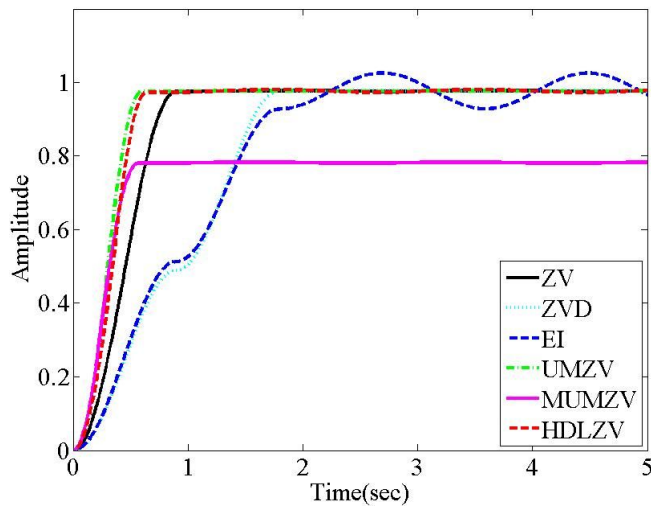


Fig. 1-9 Response of Input Shaper

Fig. 1-9은 앞에서 설명한 각각의 입력성형기의 Response를 나타내고 있다. UMZV shaper의 경우가 가장 빠르고 ZVD와 EI shapers의 경우 제어시간이 상당히 길고 강건성 제고를 위해 임펄스 수가 증가되어 duration time이 길어진다. 또한 MUMZV shaper의 경우 최종 속도가 낮기 때문에 가장 낮다. 이를 보완한 HDLZV shaper의 경우 거의 UMZV shaper나 다른 입력성형기와 마찬가지로 거의 같은 크기를 나타내고 있다.

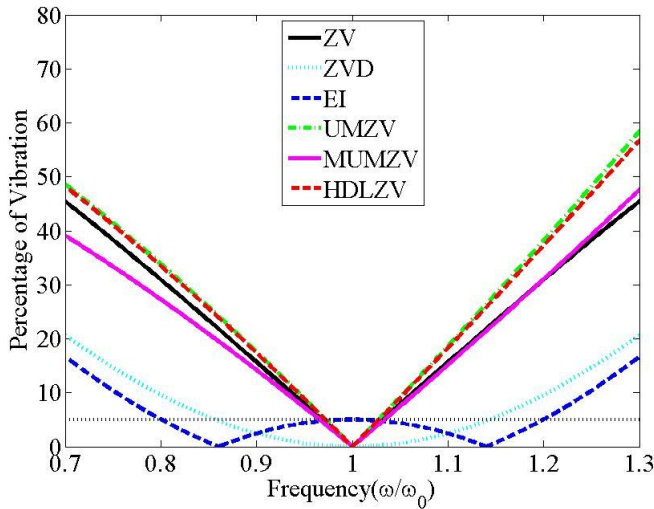
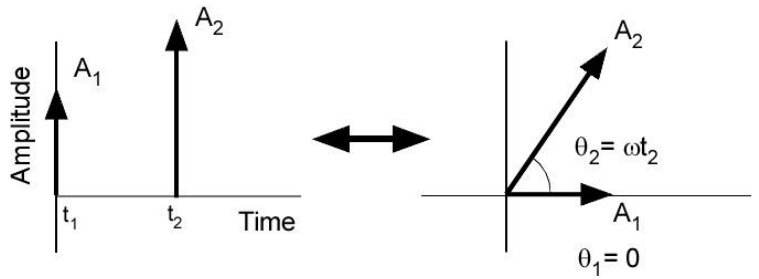


Fig. 1-10 Sensitivity of Input Shaper

Fig. 1-10은 앞서 설명한 각각의 입력 성형기를 주파수의 modeling error에 대한 sensitivity를 나타낸 것이다. 검정 점선은 unshap 변위의 5%를 나타내고 있다. Fig. 1-9에서 속도가 가장 빨랐던 UMZVshaper의 경우 가장 강건성이 떨어지고 Robust입력성형기인 ZVD와 EI shapers의 경우 가장 강건함을 나타냈다. ZVD와 EI shapers를 비교해보면 EI shaper의 경우 x축이 1인 지점에서 0변위를 하진 않으나 hump형태로인하여 기준 5%의 변위를 허용할 때 고유주파수의 불확실성에 대해 가장 강건함을 보이고 있다.

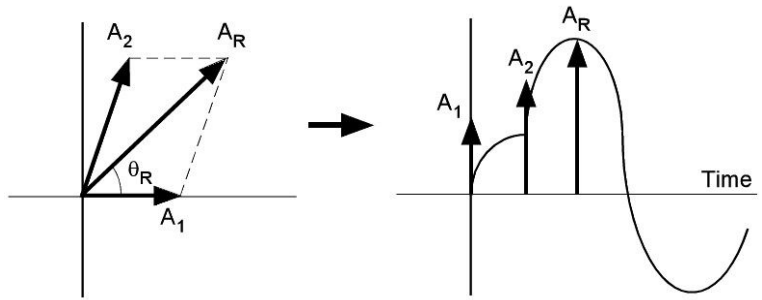
### 1.1.4 Vector Diagram Approach

입력성형제어기의 설계과정을 단순화하기 위해 graphical method로 vector calculus를 이용하여 impulse의 크기와 시간을 결정하기 위해 vector diagram approach가 개발 되었다.<sup>(35,36)</sup> impulse의 크기를 vector의 크기로 나타내고 임펄스의 시간을 vector의 각으로 표시한다. Fig. 1-11은 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. 1-11 (b)의  $A_1$  와  $A_2$  가 합은 Fig. 1-12 (a)에서와 같이  $A_R$ 의 크기에 따라 impulse sequence에 의해 잔류 변위는 Fig.1-12 (b)로 나타난다.



(a) Impulse sequence (b) Vector diagram

Fig. 1-11 Vector Diagram Approach



(a) Vector diagram (b) Time domain

Fig. 1-12 Residual Vibration by Impulse Sequence

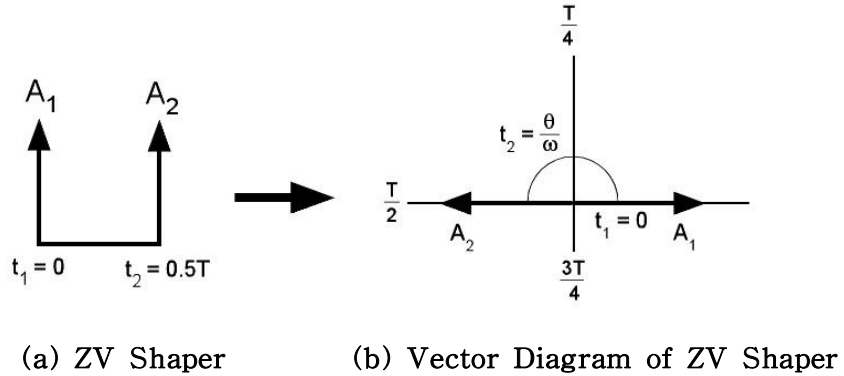


Fig. 1-13 Vector Diagram Approach of ZV Shaper

Fig. 1-13 의 (b)는 (a)의 ZV shaper의 vector diagram으로 표현한 것이다. vector sum이 (0)zero인  $\theta$ 를 구하면, zero residual vibration을 위한 각각의 impulse의 time location을 쉽게 결정 할 수 있다.

## 1.2 논문의 구성

1절에서 언급된 입력성형방법들은 모두 linear 구동기에 대한 솔루션들이다. 하지만 산업현장의 시제 구동기는 대부분 구동기드라이브나 자체의 성능으로 인하여 최대 가속도가 제한 되어 있는 경우가 많다. 따라서 이동시에 최대 가속도나 구동기 드라이브의 세팅으로 인한 제한된 가속도는 기존의 입력성형방법을 사용할 때 ramp형태의 속도 프로파일을 보이기 때문에 기존의 square 형태의 속도프로파일을 이용한 입력성형방법의 경우 속도 프로파일 형태의 차이로 인하여 잔류변위가 발생하고 정밀한 제어가 어려워지기 때문에 실제 산업 현장에서는 입력 성형시에 가속도 제한을 고려한 입력성형방법이 요구된다. 따라서 기존의 linear 기반의 exact solution을 가속도 제한을 고려한 shaper개발을 위하여 가속도제한에 대한 응답을 근사화 하여 phasor form 형태의 벡터로 나타내고 이를 vector diagram approach을 이용하여 exact solution을 다음과 같은 각각의 이유로 솔루션을 제시한다.

1) 시스템들의 일반적으로 외부적인 요소로 설계변수의 추정시의 정확도가 떨어지고 구동기 드라이브로 인한 가속도제한으로 인한 성능 감소가 일어난다. 따라서

가속도 제한과 modeling error에 대한 강건성 확보를 위한 솔루션을 제시한다.

2) 시스템 구동기의 경우 on-off 구동기 형태로 이루어진 경우가 많기때문에 기존의 두개이상의 속도로 이루어진 솔루션을 사용하기에는 제약 조건이 발생 된다. 따라서 입력 성형시에 on-off시스템의 따른 제약 조건과 가속도 제한을 고려한 솔루션을 제시한다.

3)정확한 위치제어와 장비의 긴수명을 필요로 한다. 하지만 과도 변위에 의하여 위치제어의 부정확성과 장비의 수명 감소등이 문제시 되고 있다. 따라서 과도변위를 저감할수 있는 솔루션을 제시했다.

위의 각각의 제시한 입력성형제어기를 이용하여 잔류변위크기, 강건성을 numerical simulation을 통해 평가 및 검증하고 제시한 입력성형방법은 mini-bridge crane을 이용한 실험을 통해 sensitivity 및 잔류변위저감 성능을 검증 한다.

## 2 가속도가 제한된 유연시스템을 위한 강건한 입력성형제어기

본 논문은 구동기 드라이브로 인한 가속도제한을 갖는 강건한 입력성형제어방법을 제시한다. 산업현장의 유연시스템은 일반적으로 외부적인 요소로 설계변수의 추정시의 정확도가 떨어지고 구동기 드라이브로 인한 최대 가속도가 고정되어 있기 때문에 ramp형태의 속도 프로파일을 가지게 된다. 이러한 문제로 기존의 linear system theory를 기반한 square 형태의 속도프로파일을 이용한 입력성형방법은 실제 산업 현장에서 설계변수의 부정확성과 가속도제한으로 인한 ramp속도 프로파일로 인하여 rest-to-rest 기동시에 잔류변위를 발생시키고 성능이 저하된다. 따라서 본 논문에서 기존의 linear 기반의 exact solution을 강건성을 확보하면서 가속도 제한을 고려한 shaper개발을 위하여 가속도제한에 대한 응답을 근사화 하여 phasor form 형태의 벡터로 나타내고 이를 vector diagram approach을 이용하여 exact solution을 제시한다. 제시한 입력성형제어기를 이용하여 잔류변위크기, 강건성을 numerical simulation을 통해 평가 및 검증한다. 제시한 입력성형방법은 mini-bridge crane을 이용한 실험을 통해 sensitivity 및 잔류변위저감 성능을 검증한다.

### 2.1 서론

산업 현장에서 이동과 위치에 관한 제어는 상당히 중요하다. 작업 효율을 높일 수 있으며 안전성을 확보 할수 있다. 이러한 측면에서 입력 성형 방법은 이동과 이동이 끝난 직후의 변위를 저감하여 매우 효과 적인 방법이다. 하지만 산업현장의 경우 외부적인 요소들로 인하여 시스템의 변수 추정에 어려움이 있으며 이에 따라 잔류변위 저감의 성능 감소가 일어난다. 또한 구동모터는 대부분 모터드라이브나 모터 자체의 성능으로 인하여 최대 가속도가 제한 되어 있는 경우가 많다. 따라서 이동시에 최대 가속도나 모터 드라이브의 세팅으로 인한 제한된 가속도는 ramp형태의 속도 프로파일을 보이기 때문에 기존의 이론적인 square 형태의 속도프로파일을 이용한 입력성형방법[1,6,7,8]의 경우 잔류변위가 발생하고 정밀한 제어가 어려워지기 때문에 실제 산업 현장에서는 입력 성형시에 구동기의 가속도 제한을 고려함과 동시에 강건한 입력성형방법이 요구된다.

산업 현장의 대해 입력 성형방법들은 보다 설계변수에 대하여 강건성 요구 하게

되었으며 그에 관한 연구들이 진행 되어 왔다. 고유주파수의 오차에 대한 강건성을 위하여 Singer[9]은 기존의 임펄스 두 개를 이용한 Zero Vibration(ZV) shaper의 고유 주파수를 미분한 식을 이용한 임펄스 3개 형태의 Zero Vibration Derivate shaper(ZVD) shaper를 개발 하였다. 하지만 이 솔루션의 경우 역시 linear system theory를 기반으로 있어 실제의 산업현장에서는 성능 감소가 일어난다. Singhose, Seering과 Singer[2]는 잔류 변위 식을 잔류 변위 벡터로 나타내어 vector diagram 을 이용하여 sensitivity curve에서 hump형태의 Extra Insentivity shaper를 제시하였다. EI shaper는 원하는 잔류변위를 허용하는 대신 강건성을 향상시킨 것으로 기존의 ZVD shaper와 같은 shaper duration을 가지면서 일정 허용 변위 안에서 보다 modeling error에 대한 강건함을 보인다. 하지만 이솔루션 역시 가속도 제한은 고려되지 않아 실제 산업현장에서 활용시의 잔류변위의 성능 감소가 나타난다. Singhose, Derezinski와 Singer[6]는 reaction jet시스템에서 잔류 변위의 식을 이용하여 sensitivity curve의 hump형태의 원하는 잔류변위를 허용하는 대신 강건성을 향상시킨 single 및 multi modes의 EI shaper를 optimization을 이용하여 제시하였다. 하지만 이 경우 가속도 제한이 고려되지 않았으며 optimization방법으로 제시된 솔루션이기 때문에 실시간 구현에 어려움이 있다.

시스템의 비선형성 역시 산업현장의 잔류 변위 감소 성능 향상 및 정확도 향상을 위해 몇몇의 연구 되어졌다.. Sorenson[12]은 saturation, backlash, rate limiting, dead zone의 비선형성으로 인한 shaper에 성능감소에 대하여 deconvolution 방법을 이용한 shaper의 성능분석방법을 제시하였다.Kinceler와 Meckl[13]는 비선형시스템(예, robot manipulator)의 point-to-point motion을 위해 inverse dynamics 및 open-loop optimal formulation을 통해 time-varying 고유주파수에 대한 input command 생성하는 방법을 개발하고, energy consumption 및 computational burden을 평가하였으며, parameter uncertainty에 대한 제어성능 저감으로 parameter estimation의 필요성을 언급하였다. Gorinevsky와 Vukovich[14]는 nonlinear dynamics으로 표시되는 회전 우주 유연구조물의 잔류변위를 저감하기 위해 collocated feedback controller와 feedforward control방법을 동시에 활용하는 제어방법을 제시하였다. 여기서, feedforward control command는 spline함수를 활용한 iterative optimization방법으로 input command를 설계하였다. Danielson[15]은 nonlinear dynamics를 kinematic formulation을 통하여 구한 linearized system에 대해 기존의 input shaping 방법들을 평가하였다.



구동기와 관련한 성능저하에 관한 연구들이 제안한 Lawrence[16]는 선형 입력성형제어기에 비선형 구동기의 영향으로 발생하는 가속도 및 감속도에 의한 시간 지연을 고려하여 잔류변위저감 성능을 개선한 비선형 입력성형제어기를 개발 하였다. 산업 현장의 비선형 구동기의 동적특성을 고려한 입력성형제어기 설계에 필요한 정확한 변수가 필요하다. Danielson[17]은 구동기의 가속도 제한을 고려하여 optimization 방법을 제시 하였다. 하지만 optimization 방법은 실제 시스템에 적용하는데 계산시간이 많이 걸리기 때문에 실제 적용에는 다소 어려움이 있다.

가속도 제한은 실제 산업현장의 구동기는 드라이브에 의해 가속도 및 감속도의 제한을 두고 있으며 일반적인 구동기의 동특성을 가장 간단히 근사화한 형태이다. 따라서 본 논문에서는 구동기의 동특성 중 가속도제한을 고려하여 exact 입력성형제어기를 제시한다.

2절에서는 Pendulum system을 통해 응답식을 통해 phasor 형태의 벡터로 나타낸다. 3절에서는 앞절에서 계산한 phasor vector를 활용한 vector diagram approach[2]을 적용하여 Acceleration Limits Zero Vibration(ALZV) shaper와 Acceleration Limits Zero Vibration Derivate(ALZVD) shaper, 그리고 잔류변위의 허용 변위를 포함하는 hump형태의 shaper인 Acceleration Limits Extra - Insensitivity (ALEI) shaper를 개발한다. 4절에서는 numerical simulation을 통해 shaper들의 잔류변위, 강건성을 성능 평가를 한다. 5절에서는 shaper들을 mini-bridge crane을 통한 sensitivity, residual vibration 실험 결과를 통해 성능 검증을 한다.

## 2.2 가속도가 제한된 시스템의 Phasor Vector

이번 2장에서 Fig. 2-1과 같은 기본적인 Flexible System 중 하나인 Pendulum System의 전달함수를 이용하여 정상상태 응답을 구하고 응답을 phasor vector의 형태로 나타내어 잔류변위에 대한 변위 벡터를 나타낸다. 변위벡터는 3절에서 입력성형제어기의 설계시에 사용된다.

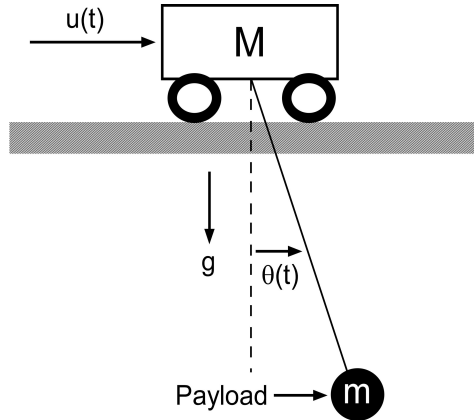


Fig. 2-1 Flexible System (Pendulum)

Fig. 2-1과 같은 일반적인 pendulum의 모델에 대한 식을 Lagrange equation을 이용하여 계산하면 다음과 같다. 식(2.1)까지의 계산과정은 Appendix A.1에 설명되어 있다.

$$L\ddot{\theta} + g^* \sin(\theta) = \ddot{x} \cos(\theta) \quad (2.1)$$

$\theta$ 를 미소각 이라 가정하면 식(2.1)은 다음과 같이 선형화 된다.

$$L\ddot{\theta} + g\theta = u(t) \quad (2.2)$$

위의 식(2.1)을 라플라스 변환을 통해 응답을 구하면 식(2.3)과 같다. 여기서 가속도 입력  $u(t)$ 는 속도 입력  $\dot{V}_t(t)$ 로 나타나며 라플라스 변환시에  $sV(s)$ 로 치환된다.

$$\theta(s) = G_p(s) \cdot v_t(s) = -\frac{s}{L} \frac{1}{s^2 + \omega_n^2} v_t(s) \quad (2.3)$$

응답  $\theta(s)$ 는 식 (2.4)와 같이 시스템입력  $C(s)$ 와 sine input으로 변형된 식으로 나타낸다.

$$\theta(s) = \underbrace{-\frac{v_t(s) \cdot s}{L}}_{C(s)} \cdot \underbrace{\frac{1}{s^2 + \omega_n^2}}_{\text{Sine input}} \quad (2.4)$$

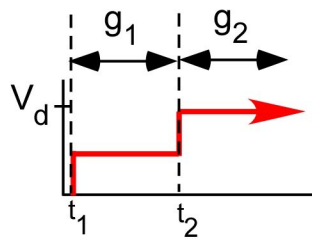
식(2.4)를 steady state response 으로 나타내면 식 (2.5)로 나타낼 수 있다.

$$\theta_{ss}(t) = \frac{|v_t(j\omega_n)|}{L} \sin(\omega_n t - \frac{\pi}{2} + \angle v_t(j\omega_n)) \quad (2.5)$$

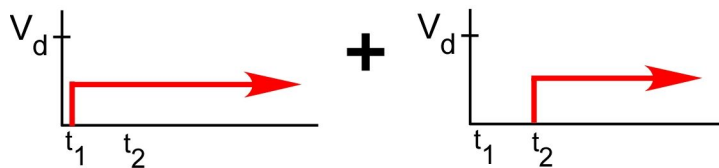
여기서  $v_t(j\omega)$ 는  $j\omega_n$ 만의 함수가 아니고  $A_i t_i$  등 여러변수의 함수지만 간략화 해서  $v_t(j\omega)$ 로 표시한다.

벡터의 amplitude 와 phase로 나타내면, 식(2.6)으로 나타난다.

$$\vec{v} = \frac{|v_t(j\omega_n)|}{L} \angle (-\frac{\pi}{2} + \angle v_t(j\omega_n)) \quad (2.6)$$



(a)Range Division



(b)Segmented Profiles

Fig. 2-2 Separation of Velocity of ZV Shaper

Fig. 2-2 (a)의 실제 속도명령어를 임펄스 시간에 따라 개별적으로 나누면 Fig. 2-2 (b)와 같다. 따라서 전체 속도명령어에 대한 함수는 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$v_i(t) = \sum_{i=1}^n g_i(t) * H(t - t_i) \quad (2.7)$$

여기서  $g_i(t)$ 는 shaped 입력을 Fig.2-2와 같이 나누었을때의 각 부분의 속도의 함수를 의미한다.

가속도 제한으로 인한 구동기 함수를 ramp 함수로 표시하여 식(2.8)과 같이 나타낼 수 있다.

$$g_i(t) = \kappa_i t - \left( \kappa_i \left( t - \frac{V_d}{\kappa_i} \right) \cdot \delta \left( t - \frac{V_d}{\kappa_i} \right) \right) \quad (2.8)$$

여기서  $\kappa_i$ 는 감속도 또는 감속도로 양의 임펄스 일때는  $\kappa_a$  음의 임펄스 일때는  $\kappa_d$  이다,  $V_d$ 는 요구되는 속도값이다.

식 (2.6)와 식 (2.8)을 이용하여 Laplace transform 하여 벡터의 amplitude와 phase로 나타내면 식 (2.9)과 같다.

$$\vec{V}_i = \left| \frac{2 \kappa_i \sin \left( \frac{1}{2} \frac{\omega_n V_d A_i}{\kappa_i} \right)}{L \omega_n^2} \right| \angle \left[ \omega_n t_i + \frac{1}{2} \frac{\omega_n V_d A_i}{\kappa_i} \right] \quad (2.9)$$

이 벡터는 임펄스로 인한 pendulum에 정상상태응답에 대한 변위의 크기와 위상 각을 나타낸다. 3절에서 입력성형제어기 개발시에 식 (2.9)를 이용하여 vector diagram approach를 이용하여 ALZV, ALZVD와 ALEI shapers를 제시한다.

## 2.3 가속도제한 입력성형제어기의 개발

기존의 ZV, ZVD와 EI shapers들의 가속도 제한의 경우 성능 향상을 위해 2절에서 계산된 가속도제한의 phasor vector를 vector diagram approach를 이용하여 exact shapers를 계산한다.

### 2.3.1 가속도 제한을 고려한 ZV 입력성형기

입력성형기의 명령 일반적으로 임펄스 시퀀스와 step입력의 convolution을 통해 생성된다. 하지만 이 명령은 pulse duration( $t_p$ )에 따라 short과 long 그리고

interference command 세가지로 분류된다. 따라서 세가지의 커맨드를 구분하고 ZV 형태의 shaper를 개발한다.

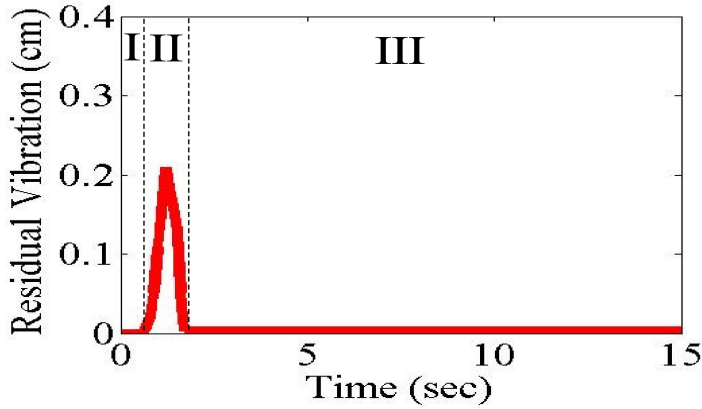


Fig. 2-3 Residual Vibratio of ZV to  $t_p$

Fig.2-3 는  $t_p$ 에 따라 ZV의 잔류변위를 나타내었다. 그림에서 보는바와 같이 그래프상에서 3가지의 구간으로 구분된다. 먼저 I구간 은 short command 구간으로 실제 잔류변위가 발생하지 않고 있다. II구간은 Interference command 구간으로 커맨드가 잔류변위가 크게 발생되고 있다. III는 약간의 변위가 발생되고 있으며 다른 구간과 달리  $t_p$ 에 따라 주기적인 특성을 보인다는 것이 특징이다.

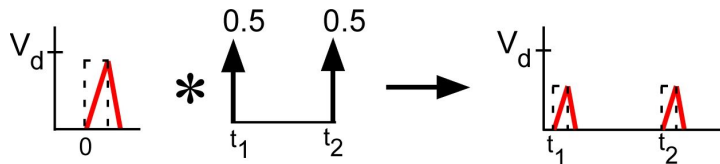


Fig. 2-4 Deconvolution of ZV Short Command

Fig. 2-4 는 ZV의 short command를 나타내고 있다. ZV short command는 펄스 입력과 임펄스 시퀀스의 convolution을 통해 생성되며 두 개의 펄스 형태로 구성된다. 이와 같은 short command가 사용되기 위해서는  $t_p$ 가 다음과 같은 조건을 만족해야한다.

$$t_p \leq t_2 - \frac{V_d A_1}{\kappa_d} \quad (2.10)$$

이때 사용되는 시간  $t_2$ 는 linear solution을 사용해야 한다.  $\frac{V_d A_1}{\kappa_d}$ 는 펄스가 하강시에 걸리는 시간으로 펄스자체가  $t_2$ 안에서 생성되기 위한 조건이다.

ZV interference command는  $t_p$ 가 short command와 long command 사이에 위치할 경우 발생된다. 따라서 ZV interference command가 사용되기 위해서는  $t_p$ 가 다음과 같은 조건을 만족해야한다.

$$t_2 - \frac{V_d A_1}{\kappa_a} \leq t_p \leq t_2 + \frac{V_d A_2}{\kappa_a} \quad (2.11)$$

ZV interference command는 커맨드가 정상상태에 도달하지 않기 때문에 실제 약간의 잔류 변위를 발생시킨다.

Fig. 2-5 는 ZV의 long command를 나타내고 있다. ZV long command는 ramp up과 ramp down 에 따라 각기 다른 펄스입력과 임펄스 시퀀스의 convolution을 통해 생성된다. 이와 같은 long command가 사용되기 위해서는  $t_p$ 가 다음과 같은 조건을 만족해야한다.

$$t_p \geq t_2 + \frac{V_d A_2}{\kappa_a} \quad (2.12)$$

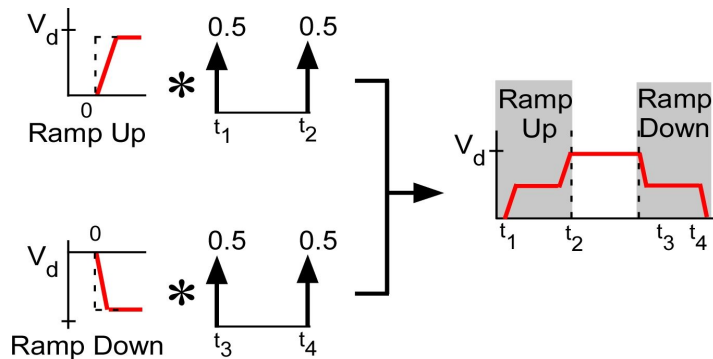


Fig. 2-5 Deconvolution of ZV Long Command

### 2.3.1.a ALZV 와 ZV shapers의 비교

기존의 ZV shaper를 가속도 제한이 고려된 solution으로 구한다. Fig. 2-6는 기존의 square 형태의 ZV shaper가 가속도 제한으로 인하여 속도 커맨드가 ramp 형태

인 로 입력이 변하고 왜곡된 입력 커맨드에 대한 응답을 나타낸다. 하지만 ZV shaper의 응답에서 보는바와 같이 가속도제한이 영향을 주지 않고 있다. 따라서 실제로 ZV shaper가 가속도에 영향을 받지 않는지 수식으로 계산과정을 통해 검증한다. 앞서 계산된 시스템의 잔류변위에 대한 phasor 벡터를 이용한다. 여기서 우리는  $t_1$ 을 0,  $A_1$ 과  $A_2$ 를 각각 0.5로 가정한다.

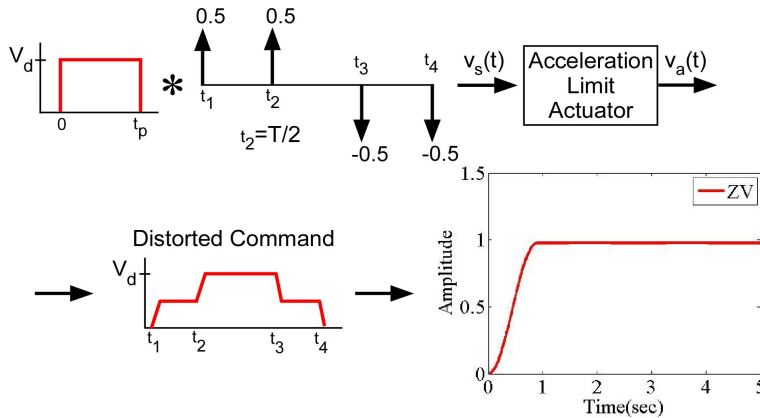


Fig. 2-6 Distorted Command of ZV Shaper

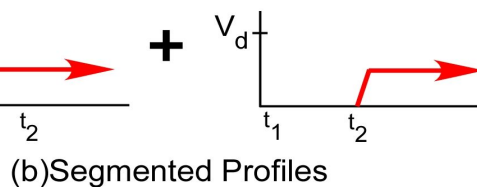
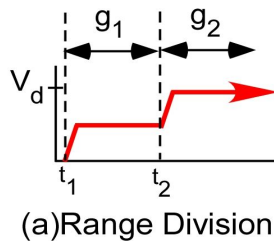


Fig. 2-7 Separation of Velocity of ALZV Shaper

Fig. 2-7 (a)의 실제 속도명령어를 임펄스 시간에 따라 개별적으로 나누면 Fig. 2-7 (b)와 같다. 따라서 식 (2.9)를 이용하여 각각의 임펄스  $A_1$ 과  $A_2$ 에 대한 정상상태응답의 변위 벡터  $\vec{V}_1$ ,  $\vec{V}_2$ 는 다음과 같이 표현 된다.

$$\vec{V}_1 = \left| \frac{2\kappa_a \sin\left(\frac{1}{2} \frac{\omega_n V_d A_1}{\kappa_a}\right)}{L\omega_n^2} \right| \angle \left[ \omega_n t_1 + \frac{1}{2} \frac{\omega_n V_d A_1}{\kappa_a} \right] \quad (2.13)$$

$$\vec{V}_2 = \left| \frac{2\kappa_a \sin\left(\frac{1}{2} \frac{\omega_n V_d A_2}{\kappa_a}\right)}{L\omega_n^2} \right| \angle \left[ \omega_n t_2 + \frac{1}{2} \frac{\omega_n V_d A_2}{\kappa_a} \right] \quad (2.14)$$

위의 두 벡터  $\vec{V}_1$ ,  $\vec{V}_2$ 의 크기와 위상각을 정리하면 다음과 같다.

$$\vec{V}_1 = |1| \angle [0] \quad (2.15)$$

$$\vec{V}_2 = |1| \angle [\omega_n t_2] \quad (2.16)$$

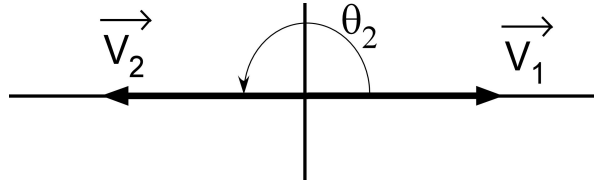


Fig. 2-8 Vector Diagram of ALZV Shaper

위의 두 벡터를 이용하여 임펄스의 시간  $t_2$ 를 계산 하면 같은 크기를 가지는 두 벡터가 잔류 변위가 0이 되는 경우는 Fig. 2-7과 같이 벡터다이아그램에서 x축상에 평행 한 경우이다. 따라서 임펄스의 시간  $t_2$ 는 다음과 같다.

$$t_2 = \frac{\pi}{\omega_n} = \frac{T}{2} \quad (2.17)$$

즉  $t_1$ 이 0이기 때문에  $t_2$ 는  $T/2$ 의 값을 가진다. 이는 기존의 ZV shaper와 같은 결과를 가진다. 그러므로 ZV shaper인 경우 구동기의 가속도 제한으로 인한 성능저감은 없음을 의미한다.[16]



### 2.3.2. 가속도 제한을 고려한 ZVD 입력성형기

입력성형기의 명령 일반적으로 임펄스 시퀀스와 step입력의 convolution을 통해 생성된다. 하지만 이 명령은 pulse duration( $t_p$ )에 따라 short과 long 그리고 interference command 세가지로 분류된다. 따라서 세가지의 커맨드를 구분하고 ZVD 형태의 shaper를 개발한다.

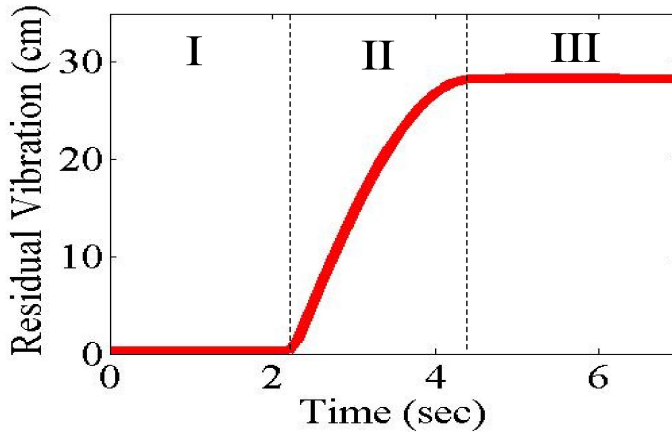


Fig. 2-9 Residual Vibration of ZVD to  $t_p$

Fig.2-9 는  $t_p$ 에 따라 ZVD의 잔류변위를 나타내었다. 그림에서 보는바와 같이 그래프상에서 3가지의 구간으로 구분된다. 먼저 I구간 은 short command 구간으로 실제 잔류변위가 발생하지 않고 있다. II구간은 Interference command 구간으로 커맨드가 잔류변위가 크게 발생되고 있다. III는 약간의 변위가 발생되고 있으며 다른 구간과 달리  $t_p$ 에 따라 주기적인 특성을 보인다는 것이 특징이다.

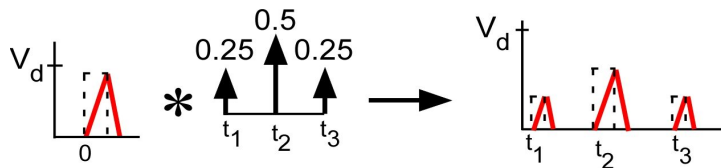


Fig. 2-10 Deconvolution of ZVD Short Command

Fig. 2-10은 ZVD의 short command를 나타내고 있다. ZVD short command는 펄스입력과 임펄스 시퀀스의 convolution을 통해 생성되며 세 개의 펄스 형태로 구성된다. 이와 같은 short command가 사용되기 위해서는  $t_p$ 가 다음과 같은 조건을 만족해야한다.

$$t_p \leq t_2 - \frac{V_d A_1}{\kappa_d} \quad \text{and} \quad t_p \leq t_3 - t_2 - \frac{V_d A_2}{\kappa_d} \quad (2.18)$$

ZVD interference command는  $t_p$ 가 short command와 long command 사이에 위치할 경우 발생된다. 따라서 ZVD interference command가 사용되기 위해서는  $t_p$ 가 다음과 같은 조건을 만족해야한다.

$$t_p \geq t_2 - \frac{V_d A_1}{\kappa_d} \quad \text{and} \quad t_p \geq t_3 - t_2 - \frac{V_d A_2}{\kappa_d} \quad \text{and} \quad t_p \leq t_3 + \frac{V_d A_3}{\kappa_a} \quad (2.19)$$

ZVD interference command는 커맨드가 정상상태에 도달하지 않기 때문에 실제 약간의 잔류 변위를 발생시킨다.

Fig. 2-11는 ZVD의 long command를 나타내고 있다. ZVD long command는 ramp up과 ramp down 에 따라 각기 다른 펄스입력과 임펄스 시퀀스의 convolution을 통해 생성된다. 이와 같은 long command가 사용되기 위해서는  $t_p$ 가 다음과 같은 조건을 만족해야한다.

$$t_p \geq t_3 + \frac{V_d A_3}{\kappa_a} \quad (2.20)$$

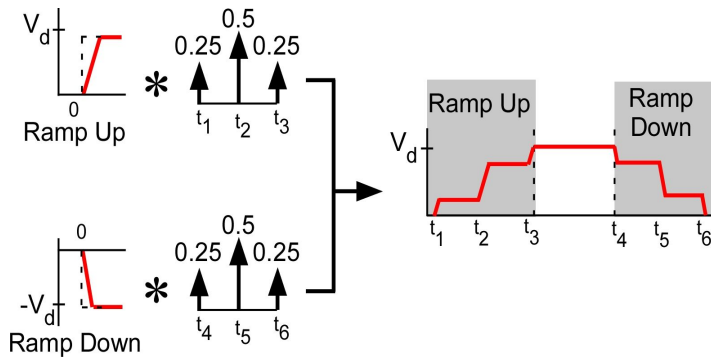


Fig. 2-11 Deconvolution of ZVD Long Command

### 2.3.2.a ALZVD shaper 개발

기존의 ZVD shaper를 가속도 제한이 고려된 solution으로 제시한다. Fig. 2-12은 기존의 ZVD shaper가 가속도 제한으로 인하여 속도 커맨드가 왜곡된 형태의 명령어로 변하게되어 응답에서 잔류변위가 발생하는 것을 보여준다. 커맨드의 변화에 따라 기존의 속도 명령어의 변화로 인하여 잔류변위를 저감하지 못하고 있다.

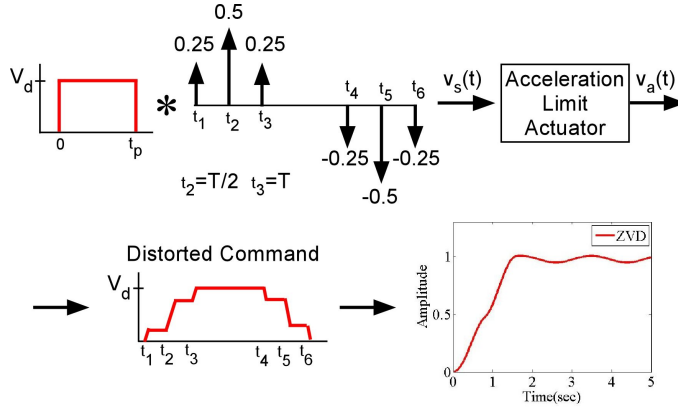


Fig. 2-12 Distorted Command of ZVD Shaper

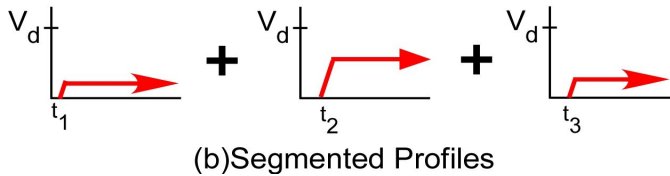
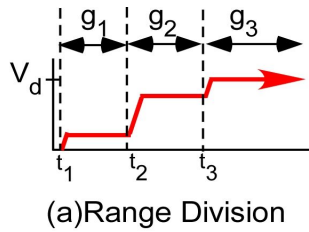


Fig. 2-13 Separation of Velocity of ALZVD Shaper

우리는  $t_1$ 을 0, 그리고 ZVD shaper와 같은 임펄스 크기를 갖도록  $A_1$ 과  $A_3$ 를 0.25,  $A_2$ 를 0.5 로 정한다. Fig. 2-13 (a)의 실제 속도명령어를 임펄스 시간에 따라 개별적으로 나누면 Fig. 2-13 (b)와 같다. 따라서 식 (2.9)를 이용하여 각각의 임펄스에 대한 phasor 벡터  $\vec{V}_1, \vec{V}_2, \vec{V}_3$ 는 다음과 같이 표현 된다.

$$\vec{V}_1 = \left| \frac{2\kappa_a \sin\left(\frac{0.25 \omega_n V_d}{2 \kappa_a}\right)}{L \omega_n^2} \right| \angle \left[ \omega_n t_1 + \frac{0.25 \omega_n V_d}{2 \kappa_a} \right] \quad (2.21)$$

$$\vec{V}_2 = \left| \frac{2\kappa_a \sin\left(\frac{0.5 \omega_n V_d}{2 \kappa_a}\right)}{L\omega_n^2} \right| \angle \left[ \omega_n t_2 + \frac{0.5 \omega_n V_d}{2 \kappa_a} \right] \quad (2.22)$$

$$\vec{V}_3 = \left| \frac{2\kappa_a \sin\left(\frac{0.25 \omega_n V_d}{2 \kappa_a}\right)}{L\omega_n^2} \right| \angle \left[ \omega_n t_3 + \frac{0.25 \omega_n V_d}{2 \kappa_a} \right] \quad (2.23)$$

위의 두 벡터  $\vec{V}_1$ ,  $\vec{V}_2$ ,  $\vec{V}_3$ 의 크기와 위상각을 정리하면 다음과 같다.

$$\vec{V}_1 = \left| \sin\left(\frac{1}{8} \frac{\omega_n V_d}{\kappa_a}\right) \right| \angle [0] \quad (2.24)$$

$$\vec{V}_2 = \left| \sin\left(\frac{1}{4} \frac{\omega_n V_d}{\kappa_a}\right) \right| \angle \left[ \omega_n t_2 + \frac{1}{8} \frac{\omega_n V_d}{\kappa_a} \right] \quad (2.25)$$

$$\vec{V}_3 = \left| \sin\left(\frac{1}{8} \frac{\omega_n V_d}{\kappa_a}\right) \right| \angle [\omega_n t_3] \quad (2.26)$$

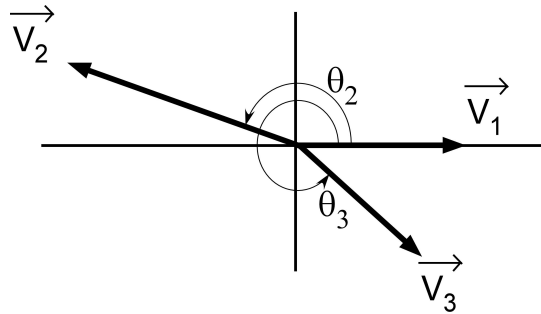


Fig. 2-14 Vector Diagram of ALZVD Shaper

위의 세 벡터를 이용하여 Fig. 2-14과 같이 나타내고 임펄스의 시간  $t_2$ 와  $t_3$ 를 계산하기 위하여 vector diagram approach에서 cosine law를 활용하여 임펄스의 시간을 결정한다.

$$t_2 = \frac{1}{w_n} \left( \pi - \frac{\omega_n V_d}{4\kappa_a} \right) \quad (2.27)$$

$$t_3 = \frac{1}{w_n} \left[ \pi + \cos^{-1} \left\{ 1 - 2\cos^2 \left( \frac{V_d \omega_n}{8\kappa_a} \right) \right\} \right] \quad (2.28)$$

stop motion의 시작 시간은  $t_p$ 에 의해 결정되며  $\kappa_a$ 대신  $\kappa_d$ 를 이용하여 계산 하면 된다. 따라서 stop motion의 임펄스의 시간은 다음과 같다.

$$t_5 = t_4 + \frac{1}{w_n} \left( \pi - \frac{\omega_n V_d}{4\kappa_d} \right) \quad (2.29)$$

$$t_6 = t_4 + \frac{1}{w_n} \left[ \pi + \cos^{-1} \left\{ 1 - 2\cos^2 \left( \frac{V_d \omega_n}{8\kappa_d} \right) \right\} \right] \quad (2.30)$$

ALZVD shaper의 경우  $t_i$ 가 항상  $t_i$ 가 항상 실수값을 가져야 한다.[31] 따라서  $\cos^{-1}$ 의 항의 괄호가  $-1 \sim 1$ 사이의 값을 가져야 한다. 또한 임펄스의 간격이 원하는 속도에서 가속도(속도 감소시에는 감속도)로 나눈 값보다 커야된다. 그이유는 이조건을 만족하지 못할 경우 속도프로파일이 원하는 속도까지 도달하지 못하여 커맨드가 정상상태에 도달하지 못한다.

$$t_{i+1} - t_i \geq \frac{V_d A_i}{\kappa_i} \quad (\kappa_i \text{는 } A_i \text{가 양수일때 } \kappa_a \text{음수일때 } \kappa_d) \quad (2.32)$$

위의 입력성형기의 설계 시 설계자는 식(2.31)과 식(2.32)를 사용하고자 하는 시스템의 변수값을 이용하여 사용가능한 범위를 확인하고 사용해야한다. 만약 위의 조건을 만족하지 못할때는 입력성형기의 잔류진동 저감 성능의 감소를 가져온다.

### 2.3.3 가속도제한을 고려한 EI 입력성형기

입력성형기의 명령 일반적으로 임펄스 시퀀스와 step입력의 convolution을 통해 생성된다. 하지만 이 명령은 pulse duration( $t_p$ )에 따라 short과 long 그리고 interference command 세가지로 분류된다. 따라서 세가지의 커맨드를 구분하고 EI 형태의 shaper를 개발한다.

Fig.2-15 는  $t_p$ 에 따라 EI의 잔류변위를 나타내었다. 그림에서 보는바와 같이 그래프상에서 3가지의 구간으로 구분된다. 먼저 I구간 은 short command 구간으로 실제 잔류변위가 발생하지 않고 있다. II구간은 Interference command 구간으로 커맨드가 잔류변위가 크게 발생되고 있다. III는 약간의 변위가 발생되고 있으며 다른 구간과 달리  $t_p$ 에 따라 주기적인 특성을 보인다는 것이 특징이다

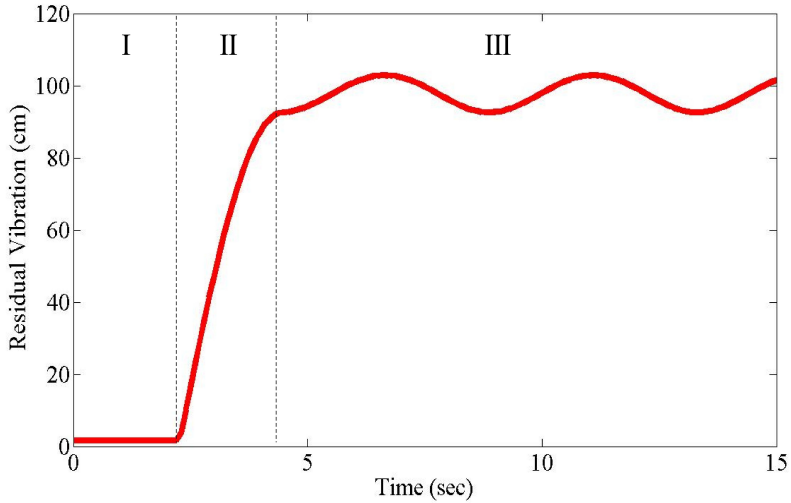


Fig. 2-15 Residual Vibration of EI to  $t_p$

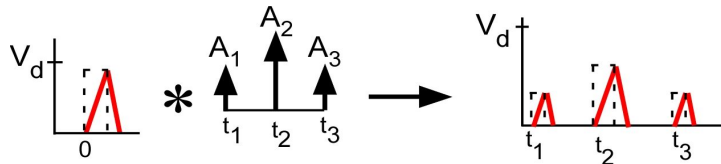


Fig. 2-16 Deconvolution of EI Short Command

EI interference command는  $t_p$ 가 short command와 long command 사이에 위치할 경우 발생된다. 따라서 EI interference command가 사용되기 위해서는  $t_p$ 가 다음과 같은 조건을 만족해야한다.

$$t_p \geq t_2 - \frac{V_d A_1}{\kappa_d} \quad \text{and} \quad t_p \geq t_3 - t_2 - \frac{V_d A_2}{\kappa_d} \quad \text{and} \quad t_p \leq t_3 + \frac{V_d A_3}{\kappa_a} \quad (2.35)$$

EI interference command는 커맨드가 정상상태에 도달하지 않기 때문에 실제 약간의 잔류 변위를 발생시킨다.

Fig. 2-13은 EI의 short command를 나타내고 있다. EI short command는 펄스입력과 임펄스 시퀀스의 convolution을 통해 생성되며 세 개의 펄스 형태로 구성된다. 이와 같은 short command가 사용되기 위해서는  $t_p$ 가 다음과 같은 조건을 만족해야한다.

$$t_p \leq t_2 - \frac{V_d A_1}{\kappa_d} \quad \text{and} \quad t_p \leq t_3 - t_2 - \frac{V_d A_2}{\kappa_d} \tag{2.33}$$

EI interference command는  $t_p$ 가 short command와 long command 사이에 위치할 경우 발생된다. 따라서 EI interference command가 사용되기 위해서는  $t_p$ 가 다음과 같은 조건을 만족해야한다.

$$t_p \geq t_2 - \frac{V_d A_1}{\kappa_d} \quad \text{and} \quad t_p \geq t_3 - t_2 - \frac{V_d A_2}{\kappa_d} \quad \text{and} \quad t_p \leq t_3 + \frac{V_d A_3}{\kappa_a} \tag{2.34}$$

EI interference command는 커맨드가 정상상태에 도달하지 않기 때문에 실제 약간의 잔류 변위를 발생시킨다.

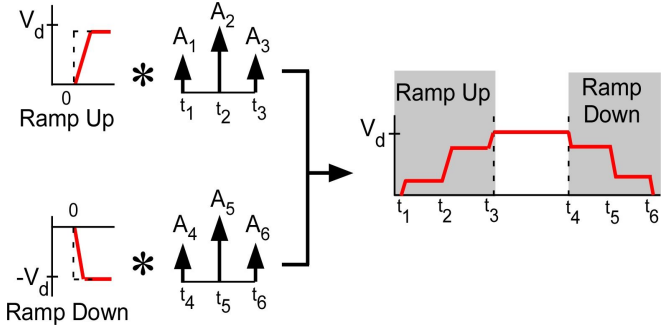


Fig. 2-17 Deconvolution of EI Long Command

Fig. 2-17 는 EI의 long command를 나타내고 있다. EI long command는 ramp up과 ramp down 에 따라 각기 다른 펄스입력과 임펄스 시퀀스의 convolution을 통해 생성된다. 이와 같은 long command가 사용되기 위해서는  $t_p$ 가 다음과 같은 조건을 만족해야한다.

$$t_p \geq t_3 + \frac{V_d A_3}{\kappa_a} \tag{2.35}$$

### 2.3.3.a ALEI shaper의 개발

기존의 EI shaper를 가속도 제한이 고려된 solution으로 계산한다. Fig. 2-18는 EI shaper가 가속도 제한으로 인하여 속도 커맨드가 ramp 형태로 변하게되어 응답에서 잔류변위가 발생하는 것을 보여준다. 커맨드의 변화에 따라 기존의 속도 명령어의 변화로 인하여 잔류변위성능을 보여주지 못한다.

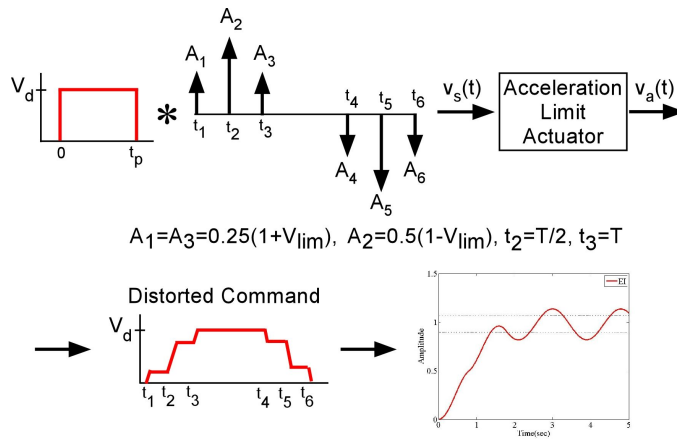
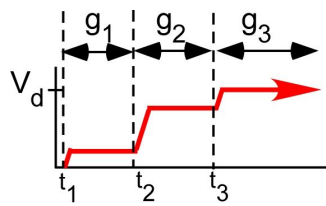
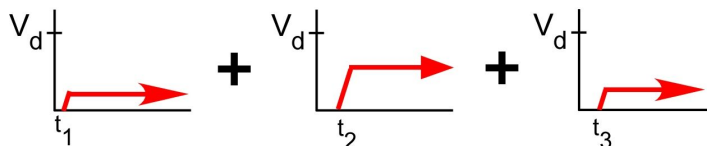


Fig. 2-18 Distorted Command of EI Shaper



(a)Range Division



(b)Segmented Profiles

Fig. 2-19 Separation of Velocity of ALEI Shaper



여기서 우리는  $t_1$ 을 0,  $A_i$ 를 EI shaper의 amplitude로 가정한다 또한 벡터의 대칭성을 위하여  $t_3=2*t_2$ 의 조건을 가정한다. Fig. 2-19 (a)의 실제 속도명령어를 임펄스 시간에 따라 개별적으로 나누면 Fig. 2-19 (b)와 같다. 따라서 식 (2.9)를 이용하여 각각의 임펄스에 대한 벡터  $\vec{V}_1, \vec{V}_2, \vec{V}_3$ 는 다음과 같이 표현 된다.

$$\vec{V}_1 = \left| \frac{2\kappa_a \sin\left(\frac{1}{2} \frac{\omega_n V_d A_1}{\kappa_a}\right)}{L\omega_n^2} \right| \angle \left[ \omega_n t_1 + \frac{1}{2} \frac{\omega_n V_d A_1}{\kappa_a} \right] \quad (2.36)$$

$$\vec{V}_2 = \left| \frac{2\kappa_a \sin\left(\frac{1}{2} \frac{\omega_n V_d A_2}{\kappa_a}\right)}{L\omega_n^2} \right| \angle \left[ \omega_n t_2 + \frac{1}{2} \frac{\omega_n V_d A_2}{\kappa_a} \right] \quad (2.37)$$

$$\vec{V}_3 = \left| \frac{2\kappa_a \sin\left(\frac{1}{2} \frac{\omega_n V_d A_3}{\kappa_a}\right)}{L\omega_n^2} \right| \angle \left[ \omega_n t_3 + \frac{1}{2} \frac{\omega_n V_d A_3}{\kappa_a} \right] \quad (2.38)$$

위의 두 벡터  $\vec{V}_1, \vec{V}_2, \vec{V}_3$ 의 크기와 위상각을 정리하면 다음과 같고 Fig. 2-20과 같이 나타낼수 있다.

$$\vec{V}_1 = \left| \sin\left(\frac{1}{2} \frac{\omega_n V_d A_1}{\kappa_a}\right) \right| \angle [0] \quad (2.39)$$

$$\vec{V}_2 = \left| \sin\left(\frac{1}{2} \frac{\omega_n V_d A_2}{\kappa_a}\right) \right| \angle \left[ \omega_n t_2 + \frac{1}{2} \frac{\omega_n V_d}{\kappa_a} (A_2 - A_1) \right] \quad (2.40)$$

$$\vec{V}_3 = \left| \sin\left(\frac{1}{2} \frac{\omega_n V_d A_3}{\kappa_a}\right) \right| \angle \left[ \omega_n t_2 + \frac{1}{2} \frac{\omega_n V_d}{\kappa_a} (A_3 - A_1) \right] \quad (2.41)$$

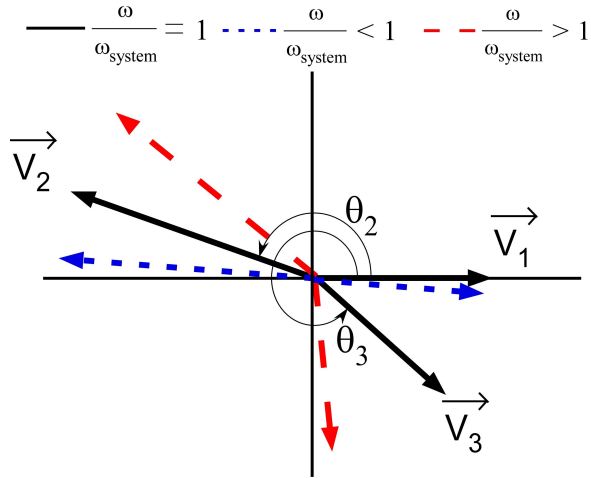


Fig. 2-20 Vector diagram of ALEI Shaper

ALEI shaper를 설계하기 위해서는 Fig. 2-21에서 보여지는 hump 형태의 sensitivity curve를 만들기 위해서는 같이 세가지의 제약 조건이 만족해야한다. 시스템의 고유주파수와 설계시 추정된 주파수의 비가 1보다 작거나 클 때 잔류 변위의 크기가 각각 0이어야 하며 1과 같을 때 잔류 변위는 unshape일때의 변위 $\times V_{lim}$ 이어야 한다. 여기서  $V_{lim}$ 은 unshape의 잔류변위의 비율을 나타낸다. 위의 세가지 조건을 만족하게 되면 hump 형태의 sensitivity curve가 나타난다.

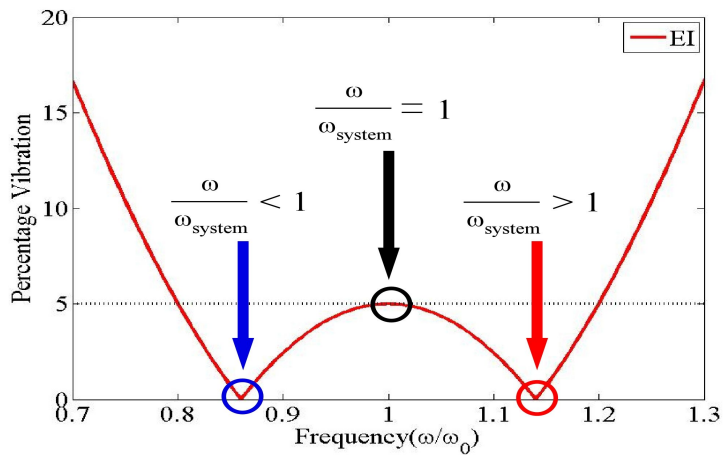


Fig. 2-21 Sensitivity Curve of ALEI Shaper

우선  $\frac{\omega}{\omega_{system}} < 1$  일 때 잔류 변위는 0이어야 하기 때문에  $\omega = \omega_l$  일 때 세 벡터를 이용하여 임펄스의 시간  $t_2$ 와  $t_3$ 를 계산하기 위하여 vector diagram approach에서 cosine law를 활용하여 잔류 변위가 0일 조건을 찾을 수 있다. 이식을  $a_1 = (\theta_3 - 2\alpha) - \pi$   $a_2 = \theta_2 - \alpha$  조건을 이용하여 계산하면 다음과 같다.

$$\cos(2(\theta_2 - \alpha)) = \frac{|\overrightarrow{V_2}|^2 - |\overrightarrow{V_1}|^2 - |\overrightarrow{V_3}|^2}{2|\overrightarrow{V_1}| |\overrightarrow{V_3}|} \quad (2.42)$$

$$\cos(\theta_2 - \alpha) = \frac{|\overrightarrow{V_1}|^2 + |\overrightarrow{V_2}|^2 - |\overrightarrow{V_3}|^2}{2|\overrightarrow{V_1}| |\overrightarrow{V_2}|} \quad (2.43)$$

위의 두식이 각이 두배의 차이가 나므로 삼각 함수 공식을 이용하여  $\cos(2\theta) = \cos^2(\theta) - 1$ 을 이용하여 조건식을 계산하면 다음과 같다.

$$A_1 = A_3 \quad (2.44)$$

또한  $\frac{\omega}{\omega_{system}} > 1$  일 때 역시 잔류 변위는 0이어야 하지만 벡터들의 대칭성의 조건이기 때문에 식 (2.35)와 같은 결과가 계산된다.

마지막으로  $\frac{\omega}{\omega_{system}} = 1$  일 때의 잔류 변위의 크기가 unshape 일때의 변위  $\times V_{lim}$ 의 크기와 같아야 된다. 이것은 벡터의 합에 의해서 x축 성분과 y축 성분의 각각의 제곱의 합을 제곱근시키면 벡터의 크기가 된다. 따라서 식 (2.36)를 대입하여 벡터들의 합을 계산하면 다음과 같다.

$$|\overrightarrow{V_2}|^2 + 4|\overrightarrow{V_2}| |\overrightarrow{V_3}| \cos(\theta_2) + 4|\overrightarrow{V_3}|^2 \cos^2(\theta_2) = V_{lim}^2 |\overrightarrow{V_{us}}|^2 \quad (2.45)$$

위의 식(2.45)을  $\theta_2$ 에 대하여 계산하면

$$\theta_2 = \pi - \cos^{-1} \left( \frac{1}{2} \frac{|\vec{V}_2| + V_{\text{lim}} |\vec{V}_{us}|}{|\vec{V}_3|} \right) \quad (2.46)$$

$\Theta_3$ 는  $t_3=2*t_2$  의 가정에 의하여  $\theta_3 = 2\theta_2$ , 임펄스의 시간  $t_2$ 와  $t_3$ 는 다음과 같다.

$$t_2 = \frac{1}{\omega_n} \left\{ \pi - \cos^{-1} \left( \frac{1}{2} \frac{|\vec{V}_2| + V_{\text{lim}} |\vec{V}_{us}|}{|\vec{V}_3|} \right) - \frac{V_d \omega}{2} (A_2 - A_1) \right\} \quad (2.47)$$

$$t_3 = \frac{2}{\omega_n} \left\{ \pi - \cos^{-1} \left( \frac{1}{2} \frac{|\vec{V}_2| + V_{\text{lim}} |\vec{V}_{us}|}{|\vec{V}_3|} \right) \right\} \quad (2.48)$$

stop motion의 시작 시간은  $t_p$ 에 의해 결정되며  $\kappa_a$ 대신  $\kappa_d$ 를 이용하여 계산 하면 된다. 따라서 stop motion의 벡터의 크기는 다음과 같다.

$$\vec{V}_4 = \left| \sin \left( \frac{1}{2} \frac{\omega_n V_d A_1}{\kappa_d} \right) \right| \angle [0] \quad (2.49)$$

$$\vec{V}_5 = \left| \sin \left( \frac{1}{2} \frac{\omega_n V_d A_2}{\kappa_d} \right) \right| \angle \left[ \omega_n t_2 + \frac{1}{2} \frac{\omega_n V_d}{\kappa_d} (A_2 - A_1) \right] \quad (2.50)$$

$$\vec{V}_6 = \left| \sin \left( \frac{1}{2} \frac{\omega_n V_d A_3}{\kappa_d} \right) \right| \angle \left[ \omega_n t_2 + \frac{1}{2} \frac{\omega_n V_d}{\kappa_d} (A_3 - A_1) \right] \quad (2.42)$$

위의 세벡터를 앞서 계산한 방식과 같은 방법을 이용하여 계산하면 임펄스의 시간  $t_5$ ,  $t_6$ 는 다음과 같다.

$$t_4 = t_p \quad (2.51)$$

$$t_5 = t_4 + \frac{1}{\omega_n} \left\{ \pi - \cos^{-1} \left( \frac{1}{2} \frac{|\vec{V}_5| + V_{\text{lim}} |\vec{V}_{us}|}{|\vec{V}_6|} \right) - \frac{V_d \omega}{2} (A_5 - A_4) \right\} \quad (2.52)$$

$$t_6 = t_4 + \frac{2}{\omega_n} \left\{ \pi - \cos^{-1} \left( \frac{1}{2} \frac{|\overrightarrow{V_5}| + V_{\text{lim}} |\overrightarrow{V_{us}}|}{|V_6|} \right) \right\} \quad (2.53)$$

ALEI shaper의 경우  $t_i$ 가 항상  $t_i$ 가 항상 실수값을 가져야 한다.[31] 따라서  $\cos^{-1}$ 의 항의 괄호가  $-1 \sim 1$ 사이의 값을 가져야 한다. 또한 임펄스의 간격이 원하는속도에서 가속도(속도 감소시에는 감속도)로 나눈 값보다 커야된다. 그이유는 이조건을 만족하지 못할 경우 속도프로파일이 원하는 속도까지 도달하지 못하여 커맨드가 정상상태에 도달하지 못한다.[17]

$$t_{i+1} - t_i \geq \frac{V_d A_i}{\kappa_i} \quad (\kappa_i \text{는 } A_i \text{가 양수일때 } \kappa_a \text{음수일때 } \kappa_d) \quad (2.55)$$

위의 입력성형기의 설계 시 설계자는 식(2.54)과 식(2.55)를 사용하고자 하는 시스템의 변수값을 이용하여 사용가능한 범위를 확인하고 사용해야한다. 만약 위의 조건을 만족하지 못할때는 입력성형기의 잔류진동 저감 성능의 감소를 가져온다.

## 2.4 가속도제한 입력성형기 평가

이번 절에서는 MATLAB<sup>®</sup>을 이용하여 앞에서 개발한 각각의 shaper에 대하여 numerical simulation을 진행 한다. 하지만 ZV shaper의 경우기존의 솔루션과 같은 결과 값을 보이므로 제외 하고 나머지 ALZVD와 ALEI shapers의 시뮬레이션을 통해 기존의 ZVD와 EI shapers의 성능 비교를 한다. 시뮬레이션의 기본적인 변수들의 값은 다음과 같이 설정 하였다.

**Table 2-1. System Parameters of ALZVD and ALEI Shapers**

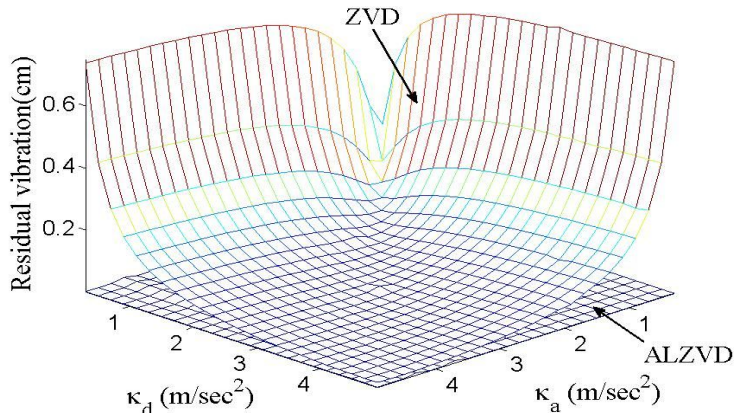
변수	L	$\kappa_a$	$\kappa_d$	$V_d$	$t_p$
값	0.8m	0.5m/sec <sup>2</sup>	1m/sec <sup>2</sup>	0.2m/sec	3.5sec

위의 설정된 값은  $\kappa_a$ 와  $\kappa_d$ 의 경우 값이 같을 경우 linear 솔루션과 같은 결과를 가지게 되므로 가속도와 감속도의 값을 서로 다른 값으로 설정 하였으며 일반적으로

로 가속도 보다 감속도가 크기 때문에  $\kappa_d$ 를  $\kappa_a$ 보다 작게 나타내었으며 실제 모터의 가속도와 감속도는 최대 속도의 2배 이상의 값을 가진다. 이 값을 이용한 simulation은  $\kappa_a$ ,  $\kappa_d$ ,  $t_p$ 에 대하여 잔류변위 저감 성능과 설계변수  $\kappa_a$ ,  $\kappa_d$ , L에 대한 강건성을 기존의 linear 기반의 shaper와 비교하였다.

### 2.4.1 ALZVD shaper의 분석

3절에서 개발한 ALZVD shaper의 numerical simulation을 진행 한다. 시뮬레이션에 사용된 변수 값은 Table 2-1과 같이  $\kappa_a=0.5\text{m/s}^2$ ,  $\kappa_d=1\text{m/s}^2$ ,  $t_p = 3.5\text{sec}$ ,  $L = 0.8\text{m}$ ,  $V_d = 0.2\text{m/s}$ 로 설정하였으며 실험에 따라 L,  $t_p$ ,  $\kappa_a$ 를 변경하면서 평가를 하였다.



**Fig. 2-22 Residual Vibration of ALZVD Shaper to  $\kappa_a$  and  $\kappa_d$**

위의 Fig. 2-22는  $\kappa_a$ 와  $\kappa_d$ 에 대하여 ALZVD와 ZVD shapers의 잔류 변위의 저감 성능을 비교한 그림이다. 변수 설정은 Table 2-1과 동일 하며  $\kappa_a$ 와  $\kappa_d$ 의 범위를 0.3~5 m/sec<sup>2</sup>의 영역에서 진행 하였다. ALZVD shaper의 경우 전체 적인 영역에서의 잔류 변위가 0이지만 ZVD shaper의 경우 잔류변위가 그래프 상에서 0에서 0.73cm정도의 변위가 발생한다.  $\kappa_a$ 와  $\kappa_d$ 가 같은 값을 가질 경우 ZVD shaper의 잔류변위가 없어지고 있다. 이는  $\kappa_a$ 와  $\kappa_d$ 가 같을 경우 ZVD와 ALZVD shapers의 임펄스의 시간이 동일한 값을 갖게 되어 잔류변위가 발생하지 않는다. 또한 ZVD shaper의 경우  $\kappa_a$ 와  $\kappa_d$ 의 값이 커질수록 잔류변위가 줄어드는 현상을 보인다. 이는  $\kappa_a$ 와  $\kappa_d$ 의 값이 커질수록 linear 구동기와 유사한 구동을 하기 때문에 그 오차가 줄어 잔류변위 자체도 줄어들게 된다.

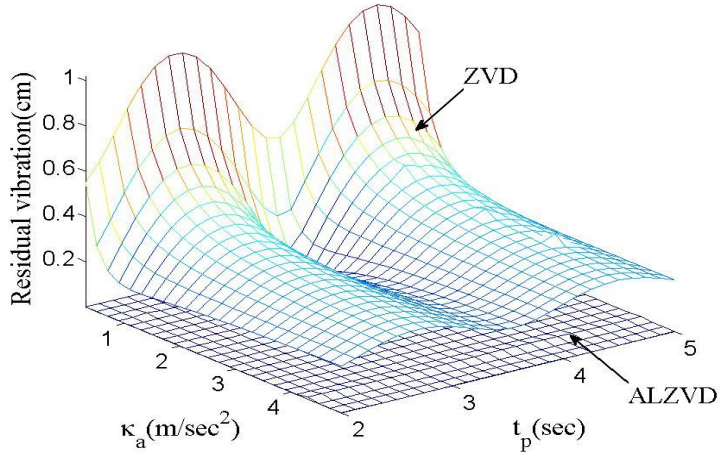


Fig. 2-23 Residual Vibration of ALZVD Shaper to  $\kappa_a$  and  $t_p$

위의 Fig. 2-23은  $\kappa_a$ 와  $t_p$ 에 대하여 ALZVD와 ZVD shapers의 잔류 변위 나타내고 있다. 변수 설정은 Table2-1과 동일 하며  $\kappa_a$  범위를 0.3~5,  $t_p$ 의 범위를 2~5(sec)로 설정하여 진행 하였다. ALZVD shaper의 경우 전체 적인 영역에서의 잔류 변위가 0이지만 ZVD shaper의 경우 잔류변위가 그래프 상에서 약 0.2~1cm 정도의 변위가 발생한다.  $t_p$ 에 따라 ZVD shaper의 변위가 주기적으로 반복 되고 있다. 이는 stop motion의 시작 지점의 초기 변위값이 0이 아니므로  $t_p$ 값에 따라 잔류 변위의 크기가 주기적인 특성을 보인다.

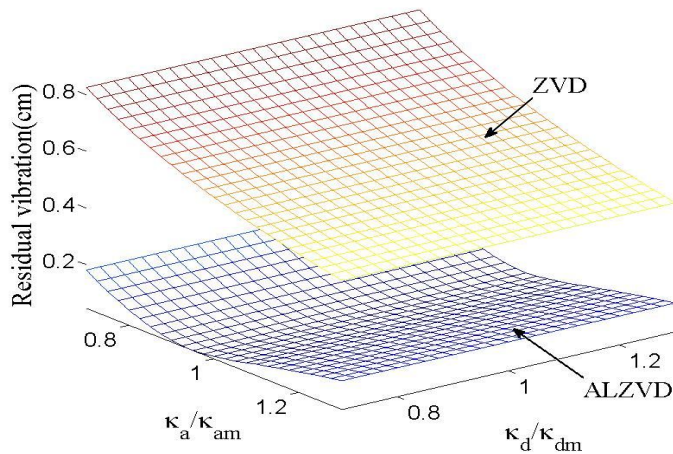


Fig. 2-24 Sensitivity of ALZVD Shaper to  $\kappa_a$  and  $\kappa_d$

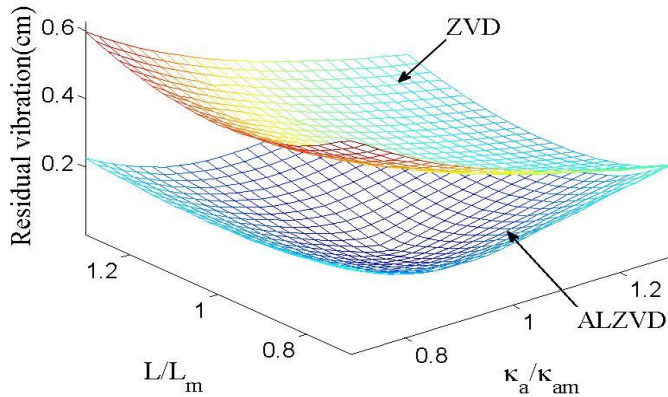


Fig. 2-25 Sensitivity of ALZVD Shaper to  $\kappa_a$  and L

위의 Fig. 2-24은  $\kappa_a$ 와  $\kappa_d$ 에 대하여 ALZVD와 ZVD shapers의 강건성을 나타내고 있다. 변수 설정은 Table 2-1과 동일 하며  $\kappa_{am}$ 을 0.5,  $\kappa_{dm}$ 을 1로 설정하고 진행하였다. ALZVD shaper의 경우 전체 적인 영역에서의 잔류 변위가 약 0.2이하로 ZVD shaper보다 낮게 나타나고 있다. 또한  $\kappa_a/\kappa_{am}$ 와  $\kappa_d/\kappa_{dm}$ 의 값이 1일 때 잔류 변위의 크기가 0으로 낮게 나타나고 있다.  $\kappa_{dm}$ 의 경우  $\kappa_{am}$ 보다 값의 크기가 1로  $\kappa_a$ 보다 크기 때문에 보다 linear형태에 가까워 잔류변위에 작은 영향을 미치고 있다.

위의 Fig. 2-25은  $\kappa_a$ 와 줄길이 L에 대하여 ALZVD와 ZVD shapers의 강건성을 나타내고 있다. 변수 설정은 Table 2-1과 동일 하며  $\kappa_{am}$ 을 0.5, L을 0.8로 설정하고 진행 하였다. ALZVD shaper의 경우 전체적인 영역에서의 잔류 변위가 ZVD shaper보다 낮게 나타나고 있다. 또한  $\kappa_a/\kappa_{am}$ 와  $\kappa_d/\kappa_{dm}$ 의 값이 1일 때 잔류 변위의 크기가 0으로 낮게 나타나고 있다. 이는 가속도제한구동기의 경우 ALZVD shaper가 보다 강건함을 나타낸다.

Simulation을 통해 잔류변위의 크기와 각각의 변수들의 강건성을 평가한결과 기존의 ideal shaper와 비교하여 잔류변위가 줄어들고 제어가 가능해 졌으며 강건성 역시 증가함을 보인다. 따라서 새로개발한 ALZVD shaper가 ZVD shaper보다 가속도제한의 경우에 성능이 향상되었다.



## 2.4.2 ALEI shaper의 분석

3절에서 개발한 ALEI shaper의 numerical simulation을 진행 한다. 시뮬레이션에 사용된 변수 값은 Table 2-1과 같이  $\kappa_a=0.5\text{m/s}^2$ ,  $\kappa_d=1\text{m/s}^2$ ,  $t_p = 3.5\text{sec}$ ,  $L = 0.8\text{m}$ ,  $V_d = 0.2\text{m/s}$ 로 설정하였으며 실험에 따라  $L$ ,  $t_p$ ,  $\kappa_a$ 를 변경하면서 실험을 진행 하였다.

Fig. 2-26는  $t_p$ 에 대하여 ALEI와 EI shapers의 step command의 변위에 대한 잔류 변위의 크기의 정도를 나타내고 있다. 사용된 변수 값은 Table 2-1과 같이  $\kappa_a=0.5\text{m/s}^2$ ,  $\kappa_d=1\text{m/s}^2$ ,  $L = 0.8\text{m}$ ,  $V_d = 0.2\text{m/s}$ 로 설정하였으며  $V_{\text{lim}} = 5\%$ 일때 ALEI shaper의 경우 0~20%사이의 잔류변위를 보이는 반면 EI shaper의 경우 잔류변위가 크게 상승함을 보이고 있다. 이는 가속도제한의 구동기에서 허용 잔류변위를 제어하는데 오차율이 ALEI shaper의 경우 보다 작아 제어성능이 우수하다.

Fig. 2-27은 각각 EI와 ALEI shapers의 sensitivity를 보이고 있다. 사용된 변수 값은 Table 2-1과 같이  $\kappa_a=0.5\text{m/s}^2$ ,  $\kappa_d=1\text{m/s}^2$ ,  $t_p = 3.5\text{sec}$ ,  $L = 0.8\text{m}$ ,  $V_d = 0.2\text{m/s}$ 로 설정하였다. ALEI shaper의 경우  $V_{\text{lim}}$  값에 따라  $L/L_m=1$ 일때의 잔류변위의 크기가 증가 하고 있다. 하지만 EI shaper의 경우  $V_{\text{lim}}$ 에 따라 변위가 제어되지 않고 있으며 민감도 곡선이 좌우에 0에 닿지 않고 있다. 이는 실제 허용 잔류변위에 따른 변위가 제어되지 않고 있다는 의미 이다.

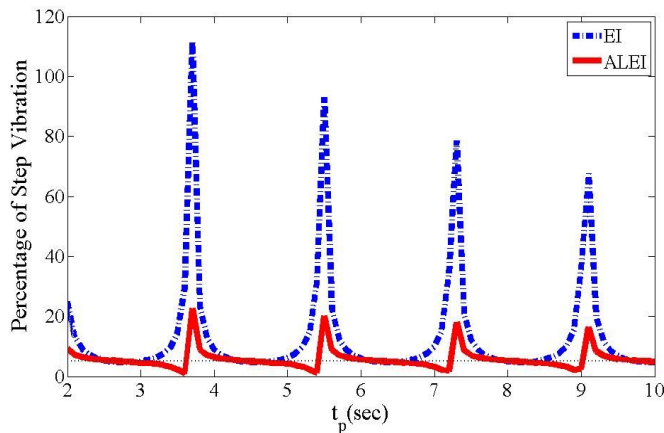


Fig. 2-26 Residual Vibration of ALEI Shaper to  $t_p$

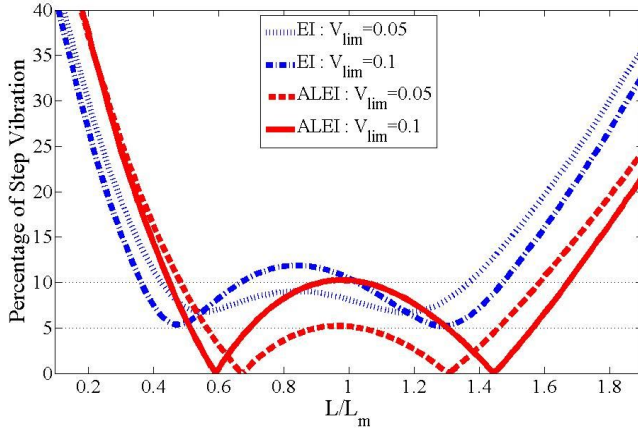


Fig. 2-27 Sensitivity Vibration of ALEI Shaper to L/L<sub>m</sub>

Fig. 2-28은 각각 EI와 ALE shapers의  $\kappa_a$ 와 L에 대하여 sensitivity를 보이고 있다. 사용된 변수 값은 Table 2-1과 같이  $\kappa_a=0.5\text{m/s}^2$ ,  $\kappa_d=1\text{m/s}^2$ ,  $t_p = 3.5\text{sec}$ ,  $L = 0.8\text{m}$ ,  $V_d = 0.2\text{m/s}$ 로 설정 하였다. ALEI shaper의 경우  $\kappa_a$ 에 값이 1이 아니더라도 어느정도의 EI shaper의 특성인 hump의 특성을 보이고 있다. 하지만 EI shaper의 경우 변위도 클뿐만 아니라  $\kappa_a$ 의 값에 따라 hump특성이 사라졌다.

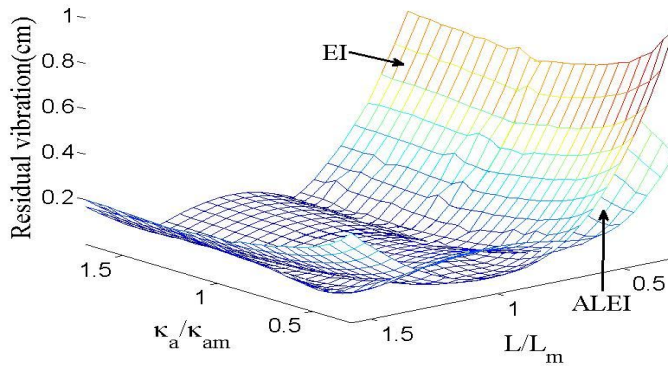


Fig. 2-28 Sensitivity Vibration of ALEI Shaper to L/L<sub>m</sub> and  $\kappa_a/\kappa_{am}$

Simulation을 통해 잔류변위의 크기와 각각의 변수들의 강건성을 평가한결과 기존의 ideal shaper와 비교하여 잔류변위가 줄어들고 허용잔류변위에 대해 변위가 제어가능해 졌으며 강건성 역시 증가함을 보인다. 따라서 새로 개발한 ALEI가 EI shapers보다 가속도제한의 경우에 성능이 향상되었다.

## 2.5 가속도제한된 입력성형제어기의 검증

### 2.5.1 실험장치 설정

본 연구에서 개발된 입력성형제어기들의 과도변위 제한 및 잔류변위 저감 성능을 실험적으로 검증하기 위해 Fig. 2-29의 실험 장치를 사용했다. mini-bridge crane은 Siemens PLC (programmable logic controller)로 구성되어있고, 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.

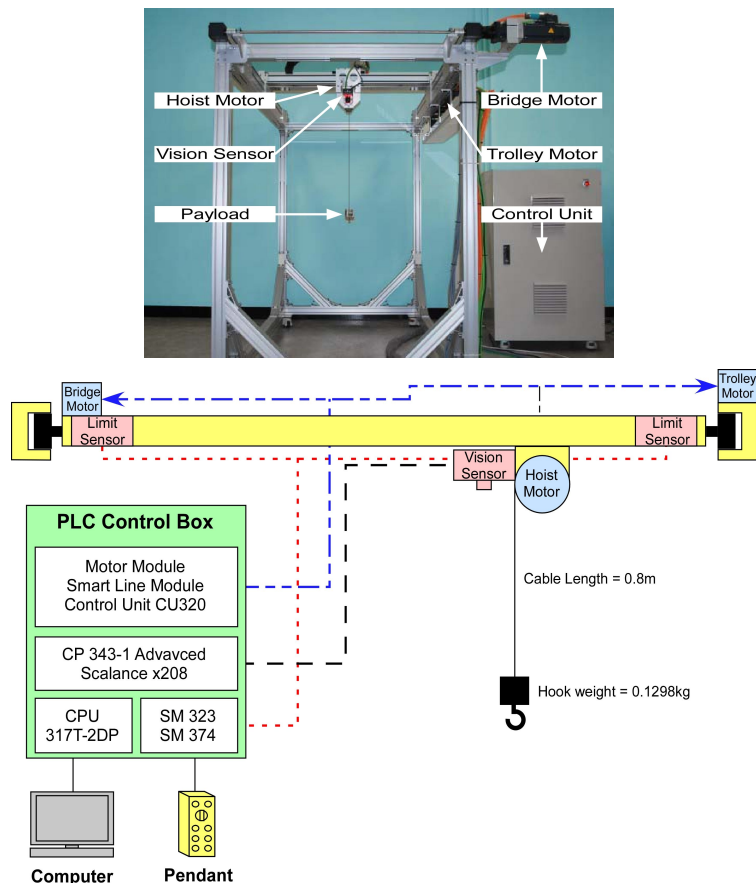


Fig. 2-29 Mini-Bridge Crane for Testbed

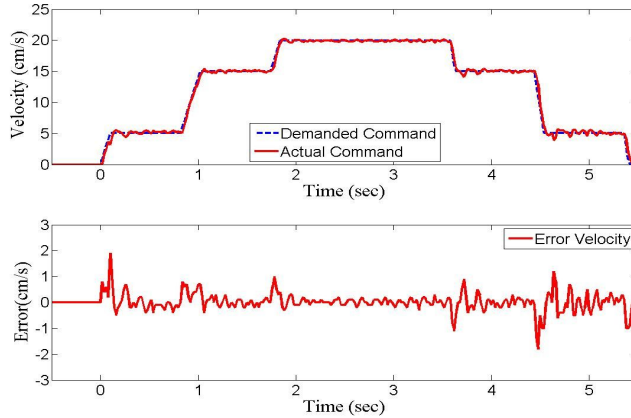
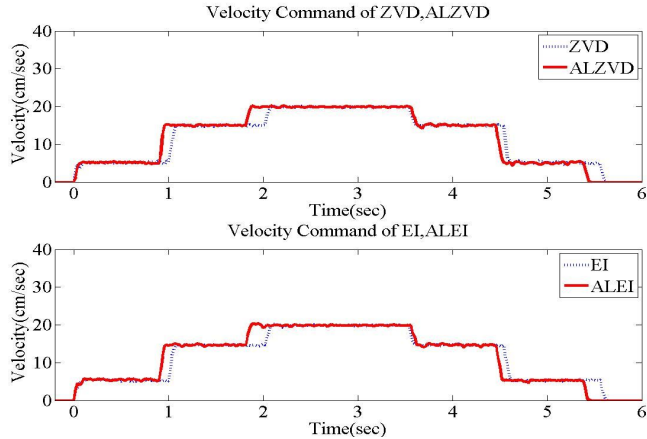


Fig. 2-30 Experiment of Velocity Error

가속도 제한이 고려된 velocity profile을 upload를 통해 실험을 하였으며, upload 하는 속도프로파일은 ramp 함수를 이용하여 만들고, 이를 motion control 할 수 있는 실험 장치의 모터드라이버의 세팅을 모터의 가속도와 감속도를 실험장치의 최대값인  $3.6 \times 10^8 \text{ rad/sec}$ 로 모터 세팅을 하여 생성된 프로파일을 잘 추적할수 있도록 하였다. Fig. 2-27는 실제 ZVD shaper를 이용하여 가속도제한 속도프로파일을 입력한 후 입력한 속도 프로파일과 실제 모터의 속도값을 비교하였다. 실제 나타난 error plot의 경우와 같이 최대  $\pm 2 \text{ cm/sec}^2$ 의 오차는 있으나 명령된 속도 프로파일을 허용범위 안에서 추적하고 있다. intelligent vision sensor를 통해 payload 변위측정을 하였고, MATLAB<sup>®</sup> software을 통해 측정된 변위를 분석했다. 실험은  $\kappa_a = 0.5 \text{ m/sec}^2$ ,  $\kappa_d = 1 \text{ m/sec}^2$ ,  $t_p = 3.5 \text{ sec}$ ,  $L = 0.8 \text{ m}$ ,  $V_d = 0.2 \text{ m/s}$ 로 설정하였으며 start-stop motion을 통해 cable length 또는  $t_p$ 을 바꿔가며 잔류변위를 검증했다.

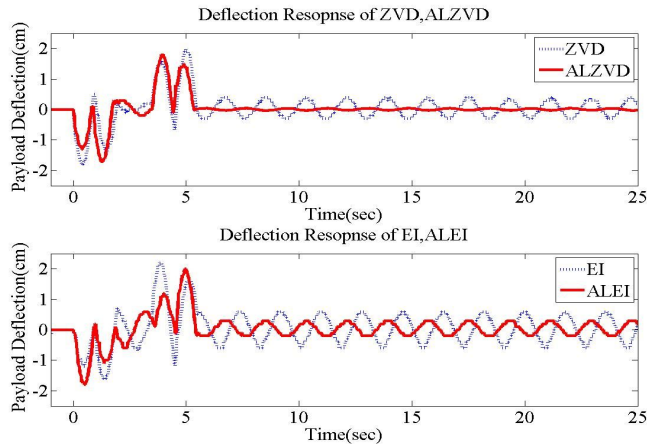
## 2.5.2 실험결과

ramp 형태의 속도 프로파일을 생성하여 mini-bridge crane을 활용해 실험을 진행했다. 진행시의 변수값은 시뮬레이션과 동일하게  $\kappa_a = 0.5 \text{ m/s}^2$ ,  $\kappa_d = 1 \text{ m/s}^2$ ,  $t_p = 3.5 \text{ sec}$ ,  $L = 0.8 \text{ m}$ ,  $V_d = 0.2 \text{ m/s}$ 로 설정하였으며 실험에 따라  $L$ ,  $t_p$ ,  $\kappa_a$ 를 변경하면서 실험을 진행 하였다.



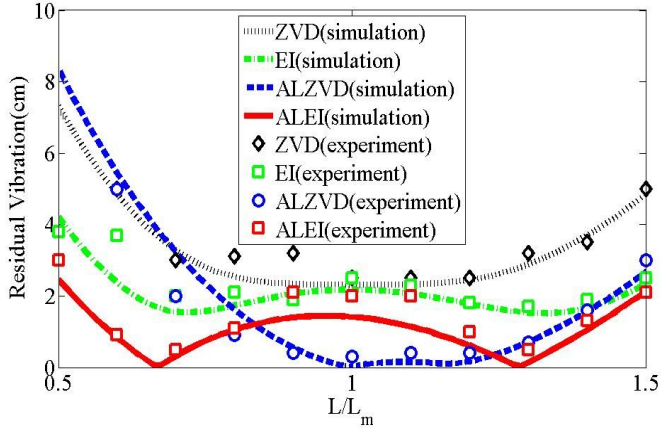
**Fig. 2-31 Velocity Command of ZVD, ALZVD, EI and ALEI Shapers**

Fig. 2-31는 실험에 사용된 속도 프로 파일을 나타내고 있다. 실제적으로 커맨드의 임펄스의 크기는 같지만 시간의 차이만 나타난다. 실제 모터의 속도를 나타내기 때문에 이론적인 속도와 비교하여 약간의 오차가 있지만 이론적인 속도의  $\pm 2\text{cm/sec}^2$  이내이다.



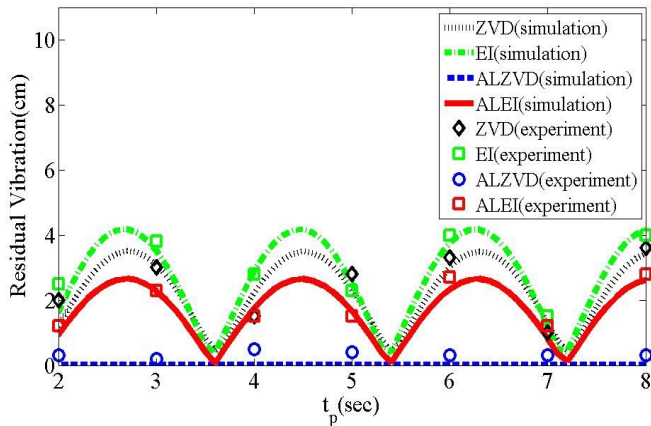
**Fig. 2-32 Deflection Response of ZVD, ALZVD, EI and ALEI Shapers**

Fig. 2-32은 실험을 통해 얻은 Deflection Response를 나타내고 있다. 잔류변위가 약간 발생하는 이유는 이론적으로는 잔류변위가 0의 값을 가지지만 실제 시스템에서의 경우는 외란이나 속도프로파일의 이론적이 형태로 구동하기는 힘들기 때문이다. 과도 변위의 크기 변화는 거의 차이가 없으나 70%의 잔류변위의 저감의 성능 향상을 보이고 있음을 알수 있다.



**Fig. 2-33 Sensitivity of ALZVD and ALEI Shapers to  $L/L_m$**

위의 Fig. 2-33은 줄길이  $L$ 에 대한 Modeling error 에 대한 sensitivity curve 이다. 실험변수 값은  $\kappa_a=0.5m/s^2$ ,  $\kappa_d=1m/s^2$ ,  $t_p = 3.5sec$ ,  $L = 0.8m$ ,  $V_d = 0.2m/s$ 로 설정하였다. 기존의 shaper들은 EI shaper의 경우 잔류변위의 크기가 제어되지 않고 있으며 나머지 ZVD shaper 역시 잔류변위가 발생하고 있다. 하지만 acceleration limits shaper의 경우 잔류변위를  $V_{lim}$ 값을 이용하여 제어하거나 0으로 만들고 있다.  $L/L_m=1$ 일 때 변위의 경우 기존의 shaper보다 낮게 나타나고 있다. ALEI shaper의 경우 기존의 shaper와 새로 개발한 ALZVD shaper보다 강건함을 보이고 있다.



**Fig. 2-34 Residual Vibration of ALZVD and ALEI Shapers to  $t_p$**

위의 Fig. 2-34는  $t_p$ 에 대한 잔류변위를 나타낸다. 실험변수 값은  $\kappa_a = 0.5\text{m/s}^2$ ,  $\kappa_d = 1\text{m/s}^2$ ,  $L = 0.8\text{m}$ ,  $V_d = 0.2\text{m/s}$ 로 설정하였다. 기존의 shaper들은 EI shaper의 경우 잔류변위의 크기가 제어되지 않고 있으며 나머지 ZVD shaper 역시 잔류변위가 발생하고 있다. 하지만 acceleration limits shaper의 경우 잔류변위를  $V_{lim}$ 값을 이용하여 제어하거나 0으로 만들고 있다.  $L/L_m=1$ 일 때 변위의 경우 기존의 shaper보다 낮게 나타나고 있다. 여기서 ALEI shaper의 경우  $V_{lim}$  만큼의 변위가 발생하기 때문에 기존의 입력성형기와 마찬가지로 주기적인 변위 특성을 보이지만 나타나는 변위 자체는 기존의 방법보다 낮은 변위를 보이고 있다.

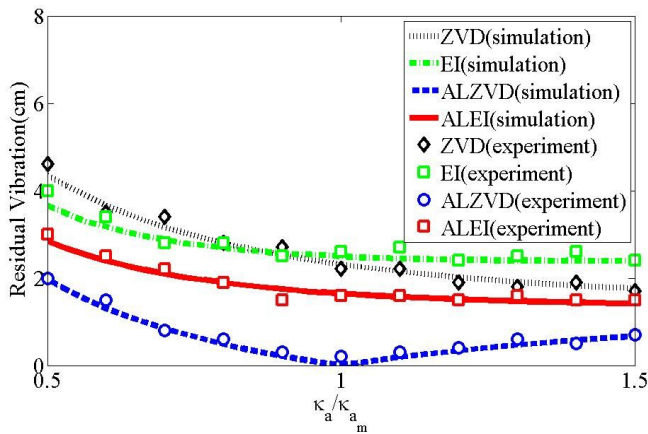


Fig. 2-35 Sensitivity of ALZVD and ALEI Shapers to  $\kappa_a/\kappa_{am}$

위의 Fig. 2-35은 가속도제한의 중요 변수중 하나인  $\kappa_a$ 에 대한 modeling error에 대하여 강건성을 나타낸 것이다. 실험변수 값은  $\kappa_a = 0.5\text{m/s}^2$ ,  $\kappa_d = 1\text{m/s}^2$ ,  $t_p = 3.5\text{sec}$ ,  $L = 0.8\text{m}$ ,  $V_d = 0.2\text{m/s}$ 로 설정하였다. ZVD와 EI shapers의 경우 잔류 변위를 저감 하지 못하고 있으며 ALZVD shaper의 경우는  $\kappa_a/\kappa_{am}$ 이 1인 경우 잔류 변위가 0임을 보이고 있다. ALEI shaper의 경우 shaper의 특성상  $\kappa_a/\kappa_{am}$ 이 1일 때 잔류변위가 나타나지만 기존의 shaper보다 낮은 변위를 나타낸다. 따라서 ALEI shaper나 ALZVD shapers가 ideal shaper보다  $\kappa_a/$  대해서 강건하다..

## 2.6 결론

본 논문에서는 산업현장에서 입력성형의 적용을 위해 고유 주파수 추정오차에 강건하고 일반적으로 사용하고 있는 구동기 드라이브의 가속도 제한에 의한 잔류 변위저감 성능을 저하를 고려한 exact 형태의 ALZV, ALZVD 그리고 ALEI shapers를 제시하였다.

ALZV shaper의 경우 기존의 ideal solution의 값과 같은 결과를 얻었다. 즉 ALZV shaper의 경우 가속도 제한에 따른 성능감소는 일어나지 않는다. 제시한 shaper는 가속도 제한시 발생하는 ramp step에 대한 응답을 phasor form 형태로 나타내고 이것을 vector diagram approach를 활용하여 exact solution 형태로 개발 되었다. 제어기의 성능 평가를 위해 설계변수에 대한 잔류변위의 크기와 modeling error에 대한 sensitivity를 기존의 linear 기반의 shaper와 비교 하였으며 성능 비교에서 성능 향상을 보였으며 sensitivity curve 역시 기존의 shaper 보다 modeling error에 강건함을 보였다. 이를 검증하기 위하여 실제 pendulum system 실험장비인 mini-bridge crane에 적용하여 주파수에 대한 modeling error,  $t_p$ 에 따른 잔류변위를 이론과 실험을 통해 비교 및 검증 하였다.



### 3 가속도가 제한된 유연시스템을 위한 On-Off 입력성형제어기

본 논문은 구동기 드라이브로 인한 가속도제한을 갖는 on-off flexible system을 위한 입력성형제어방법을 제시한다. reaction jet, 크레인, Piezo 구동기 등의 유연시스템들은 on-off 형태의 구동기가 많이 활용 되어 지고 있다. 또한 일반적으로 구동기 드라이브에 의해 최대 가속도가 제한되어 있기 때문에 ramp형태의 속도 프로파일을 가지게 된다. 따라서 기존의 입력성형방법들은 구동기 드라이브에 의한 가속도제한과 on-off 구동기의 특성으로 인해 rest-to-rest 기동시에 잔류변위를 발생시키고 성능이 저하된다. 따라서 본 논문에서 기존의 linear 기반의 on-off exact solution을 가속도 제한 형태의 속도 프로파일을 갖는 shaper개발을 위하여 가속도 제한에 대한 응답을 근사화 하여 phasor form 형태의 벡터로 나타내고 이를 vector diagram approach을 이용하여 exact solution을 제시했다. 제시한 입력성형제어기를 이용하여 잔류변위크기, 강건성을 numerical simulation을 통해 평가 및 검증한다. 제시한 입력성형방법은 mini-bridge crane을 이용한 실험을 통해 sensitivity 및 잔류변위저감 성능을 검증 했다.

#### 3.1 서론

현재 reaction jet, 크레인, Piezo 구동기 등의 유연시스템의 경우 구동기의 경우 on-off 구동기 형태로 이루어진 경우가 많다. 이러한 시스템의 위치제어, 정밀성의 향상에 저해하는 큰 요소 중 하나는 잔류변위이다. 이러한 잔류 변위를 해결하기 위한 방법중 입력성형은 큰 시스템 변화 없이 활용 할수 있는 효과적인 방법 중에 하나이다. on-off 형태의 시스템의 적용할 경우 기존의 입력 성형 방법 ZeroVibration(ZV) shaper와 Zero Vibration Deration(ZVD) shaper와 여러단계의 속도로 이루어진 shaper의 경우 적용할 수없어 제약이 존재 한다. 또한 Unity Magmitude Zero Vibration(UMZV) shaper의 경우도 구동기 드라이브에 의해 최대 가속도가 고정되어 있기 때문에 ramp형태의 속도 프로파일을 가지게 되어 square 형태의 속도프로파일을 이용한 입력성형방법의 경우 속도 프로파일 형태의 차이로 인하여 잔류변위가 발생하고 정밀한 제어가 어려워지기 때문에 입력 성형시에 on-off시스템의 다른 제약 조건과 가속도 제한을 고려한 입력성형방법이 요구된다.

유연시스템의 on-off형태의 시스템을 위해 negative input shaper 에 관한 연구

들이 진행 되어져 왔다. Singhose[18]는 기존의 ZV와 ZVD shaper 보다 빠른 UMZV shaper를 잔류변위 식을 이용하여 exact solution을 제시 하였다. 기존의 입력성형 보다 빠른 입력 성형 속도를 보였으나 강건성 측면에서 기존의 positive shaper(ZV and ZVD shapers)보다 낮게 나타났다. 이 솔루션은 linear 기반의 솔루션으로 가속도 제한이 고려되지 않은 입력성형방법이다. Singhose, Mills 과 Seering[19]은 가속도 프로 파일을 갖는 multi mode시스템의 fuel usage, robust modeling error, transient deflection의 제약조건을 time optimal 방법을 제시하였다. 이 방법은 기존의 on-off형태의 over currenting 문제로 인한 과도변위의 증가 및 강건성을 확보하였으나 기존의 가속도 제한문제가 고려되진 않았다. Sorensen, Daftari, Singhose와 Hekman[20]은 on-off 형태의 솔루션이 갖는 over currenting 문제 해결을 위하여 over currenting에 대한 제약 조건을 포함 한 입력성형방법을 optimization을 활용하여 제시하였다. 이 결과를 통해 over currenting를 해결 함으로써 과도 변위를 저감 하였다. 하지만 이 방법역시 linear 기반의 솔루션으로 가속도 제한이 고려되지 않은 입력성형방법이며 optimization 솔루션이기 때문에 실제 산업 현장과는 맞지 않다. 그밖에 다른 on-off shaper[22,23]관련 input shaping 기술 역시 linear system theory를 기반하고 있어 가속도가 제한 시스템에 활용 되기에는 어렵고 잔류 변위 저감 성능이 떨어진다.

비선형유연시스템의 잔류변위를 저감에 활용하기 위한 연구가 초기단계에 있다. Sorenson[12]은 saturation, backlash, rate limiting, dead zone의 비선형성으로 인한 shaper에 성능감소에 대하여 deconvolution 방법을 이용한 shaper의 성능분석방법을 제시하였다. 구동기와 관련한 비선형성 연구들이 제안되었다. Lawrence[16]는 선형 입력성형제어기에 비선형 구동기의 영향으로 발생하는 가속도 및 감속도에 의한 시간지연을 고려하여 잔류변위저감 성능을 개선한 on-off 형태의 비선형 입력성형제어기를 개발 하였다. 이 경우 1st-order형태의 구동기의 비선형을 고려 했으며 산업 현장의 비선형 구동기의 동적특성을 고려한 입력성형제어기 설계에 필요한 정확한 변수가 필요하다. Danielson[17]은 구동기의 가속도 제한을 고려하여 optimization 방법을 하였다. 하지만 또한 on-off 시스템은 고려하지 않았으며 optimization방법이기 때문에 계산 과정이 필요하므로 실제 산업 현장에 적용하기에는 어려움이 있다. 그밖에 다른 비선형을 고려한 input shaping[13,14]관련 기술 역시 linear system theory를 기반하고 있어 가속도가 제한 시스템에 활용 되기에는 어렵고 잔류 변위 저감 성능이 떨어진다.

현재 가속도제한을 고려하면서 on-off형태의 솔루션은 아직까지 한번도 다루어지지 않았

다. 따라서 본 논문에서는 구동기의 동특성 중 가속도제한을 고려하여 on-off 형태의 exact 입력성형제어기를 제시한다.

2절에서는 Pendulum system을 통해 응답식을 통해 phasor 형태의 벡터로 나타낸다. 3절에서는 앞절에서 계산한 phasor vector를 vector diagram approach[2]를 활용하여 Acceleration Limits Unit Magnitude Zero Vibration(ALUMZV) shaper를 개발한다. 4절에서는 MATLAB®을 이용한 numerical simulation을 통해 shaper들의 잔류변위, 강건성을 성능 평가를 한다. 5절에서는 shaper들을 mini-bridge crane을 통한 sensitivity, residual vibration 실험 결과를 통해 성능 검증을 한다.

### 3.2 가속도가 제한된 시스템의 Phasor Vector

이번 절에서 Fig. 3-1과 같은 기본적인 Flexible System 중 하나인 Pendulum System의 전달함수를 이용하여 정상상태 응답을 구하고 응답을 phasor vector의 형태로 나타내어 잔류변위에 대한 변위 벡터를 나타낸다. 변위벡터는 3절에서 입력성형제어기의 설계시에 사용된다.

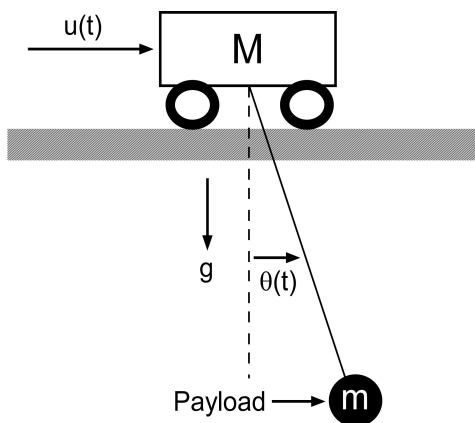


Fig. 3-1 Flexible System (Pendulum)

Fig. 2-1과 같은 일반적인 pendulum의 모델에 대한 식을 Lagrange equation을 이용하여 계산하면 다음과 같다. 식(3.1)까지의 계산과정은 Appendix A.1에 설명되어 있다.

$$L\ddot{\theta} + g^* \sin(\theta) = u(t)\cos(\theta) \quad (3.1)$$

$\theta$ 를 미소각 이라 가정하면 식(3.1)은 다음과 같이 선형화 된다.

$$L\ddot{\theta} + g\theta = u(t) \quad (3.2)$$

위의 식(3.2)를 라플라스 변환을 통해 응답을 구하면 식(3.3)과 같다. 여기서 가속도 입력  $u(t)$ 는 속도 입력  $\dot{V}_t(t)$ 로 나타나며 라플라스 변환시  $sV(s)$ 로 치환된다.

$$\theta(s) = G_p(s) \cdot v_t(s) = -\frac{s}{L} \frac{1}{s^2 + \omega_n^2} v_t(s) \quad (3.3)$$

응답  $\theta(s)$ 는 식 (3.4)와 같이 시스템입력  $C(s)$ 와 sine input으로 변형된 식으로 나타낸다.

$$\theta(s) = \underbrace{-\frac{v_t(s) \cdot s}{L}}_{C(s)} \cdot \underbrace{\frac{1}{s^2 + \omega_n^2}}_{\text{Sine input}} \quad (3.4)$$

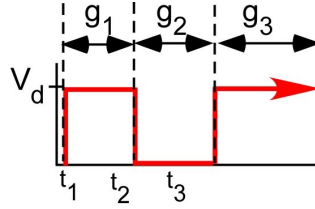
식(3.4)를 steady state response 으로 나타내면 식 (3.5)로 나타낼 수 있다.

$$\theta_{ss}(t) = \frac{|v_t(j\omega_n)|}{L} \sin(\omega_n t - \frac{\pi}{2} + \angle v_t(j\omega_n)) \quad (3.5)$$

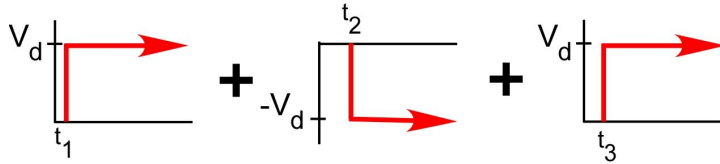
여기서  $v_t(j\omega_n)$ 는  $j\omega_n$ 만의 함수가 아니고  $A_i t_i$  등 여러변수의 함수지만 간략화 해서  $v_t(j\omega)$ 로 표시한다.

벡터의 amplitude 와 phase로 나타내면, 식(3.6)으로 나타난다.

$$\vec{v} = \frac{|v_t(j\omega_n)|}{L} \angle (-\frac{\pi}{2} + \angle v_t(j\omega_n)) \quad (3.6)$$



(a) Range Division



(b) Segmented Profiles

Fig. 3-2 Separation of Velocity of UMZV Shaper

Fig. 3-2 (a)의 실제 속도명령어를 임펄스 시간에 따라 개별적으로 나누면 Fig. 3-2 (b)와 같다. 따라서 실제 속도명령어를 임펄스 시간에 따라 개별적으로 나누면 전체 속도명령어에 대한 함수는 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$v_t(t) = \sum_{i=1}^3 g_i(t) * \delta(t - t_i) \quad (3.7)$$

여기서  $g_i(t)$ 는 shaped 입력을 Fig.3-2와 같이 나누었을때의 각 부분의 속도의 함수를 의미한다.

가속도 제한 형태인 ramp함수의 전달 함수는 식(3.8)과 같이 나타낼수 있다.

$$g_i(t) = \kappa_i t - (\kappa_a (t - \frac{V_d}{\kappa_i}) \cdot \delta(t - \frac{V_d}{\kappa_i})) \quad (3.8)$$

여기서  $\kappa_i$ 는 감속도 또는 감속도로 양의 임펄스 일때는  $\kappa_a$  음의 임펄스 일때는  $\kappa_d$  이다,

식 (3.6)와 식 (3.8)을 이용하여 Laplace transform 하여 벡터의 amplitude와 phase로 나타내면 식 (3.9)와 같다.

$$\vec{V}_i = \left| \frac{2\kappa_i \sin\left(\frac{1}{2} \frac{\omega_n V_d A_i}{\kappa}\right)}{L\omega_n^2} \right| \angle \left[ \omega_n t_i + \frac{1}{2} \frac{\omega_n V_d A_i}{\kappa_i} \right] \quad (3.9)$$

이 벡터는 임펄스로 인한 pendulum에 정상상태응답에 대한 변위의 크기와 위상각을 나타낸다. 3절에서 식 (3.9)를 이용하여 vector diagram approach를 이용하여 ALUMZV shaper를 제시한다.

### 3.3 가속도 제한을 고려한 UMZV 입력성형기

입력성형기의 명령 일반적으로 임펄스 시퀀스와 step입력의 convolution을 통해 생성된다. 하지만 이 명령은 pulse duration( $t_p$ )에 따라 short과 long 그리고 interference command 세가지로 분류된다. 따라서 세가지의 커맨드를 구분하고 EI 형태의 shaper를 개발한다.

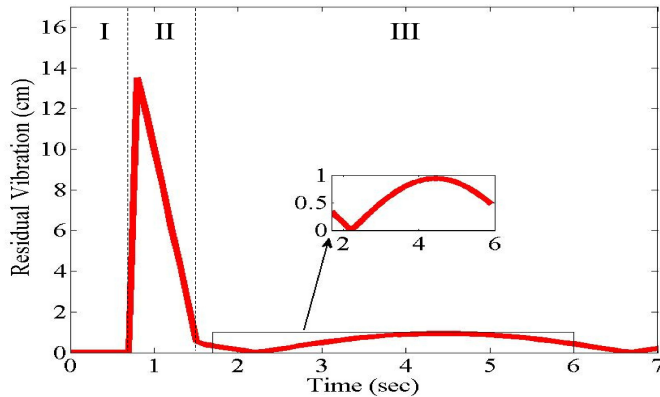


Fig. 3-3 Residual Vibration of UMZV to  $t_p$

Fig.3-3 는  $t_p$ 에 따라 UMZV의 잔류변위를 나타내었다. 그림에서 보는바와 같이 그래프상에서 3가지의 구간으로 구분된다. 먼저 I구간 은 short command 구간으로 실제 잔류변위가 발생하지 않고 있다. II구간은 Interference command 구간으로 커맨드가 잔류변위가 크게 발생되고 있다. III는 약간의 변위가 발생되고 있으며 다른 구간과 달리  $t_p$ 에 따라 주기적인 특성을 보인다는 것이 특징이다.

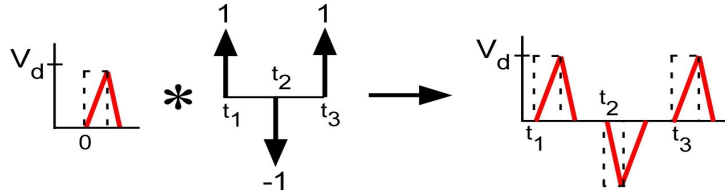


Fig. 3-4 Deconvolution of UMZV Short Command

Fig. 3-4 는 UMZV의 short command를 나타내고 있다. UMZV short command는 펄스입력과 임펄스 시퀀스의 convolution을 통해 생성되며 세 개의 펄스 형태로 구성된다. 이와 같은 short command가 사용되기 위해서는  $t_p$ 가 다음과 같은 조건을 만족해야한다.

$$t_p \leq t_2 - \frac{V_d}{\kappa_d} \quad \text{and} \quad t_p \leq t_3 - t_2 - \frac{V_d}{\kappa_a} \quad (3.10)$$

UMZV interference command는  $t_p$ 가 short command와 long command 사이에 위치할 경우 발생된다. 따라서 UMZV interference command가 사용되기 위해서는  $t_p$ 가 다음과 같은 조건을 만족해야한다.

$$t_p \geq t_2 - \frac{V_d}{\kappa_d} \quad \text{and} \quad t_p \geq t_3 - t_2 - \frac{V_d}{\kappa_a} \quad \text{and} \quad t_p \leq t_3 + \frac{V_d}{\kappa_a} \quad (3.11)$$

UMZV interference command는 커맨드가 정상상태에 도달하지 않기 때문에 실제 약간의 잔류 변위를 발생시킨다.

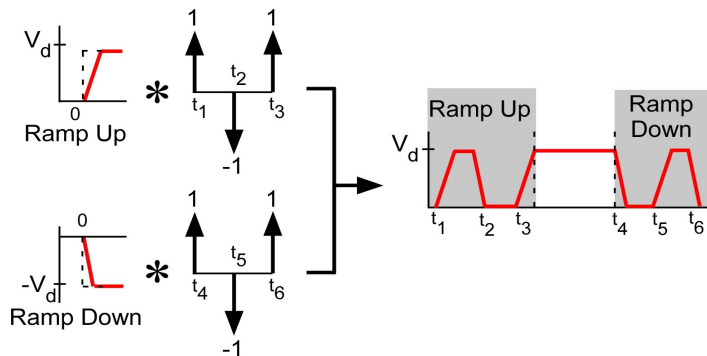


Fig. 3-5 Deconvolution of UMZV Long Command

Fig. 3-5 는 UMZV의 long command를 나타내고 있다. UMZV long command는 ramp up과 ramp down 에 따라 각기 다른 펄스입력과 임펄스 시퀀스의 convolution을 통해 생성된다. 이와 같은 long command가 사용되기 위해서는  $t_p$ 가 다음과 같은 조건을 만족해야한다.

$$t_p \geq t_3 + \frac{V_d}{\kappa_a} \quad (3.12)$$

### 3.3.1 ALUMZV shaper의 개발

이번 장에서는 on-off 시스템의 솔루션인 UMZV shaper형태의 가속도 제한 솔루션인 ALUMZV shaper을 구하기 위해 2절에서 계산된 가속도제한의 phasor vector를 vector diagram approach를 이용하여 exact shaper를 계산한다. 기존의 UMZV shaper를 가속도 제한이 고려된 solution으로 계산한다. Fig. 3-6은 기존의 UMZV shaper가 가속도 제한으로 인하여 속도 커맨드가 ramp 형태로 변하게 되어 응답에서 잔류변위가 발생하는 것을 보여준다. 앞서 계산된 시스템의 잔류변위에 대한 phasor 벡터를 이용한다. 여기서 우리는  $t_1$ 을 0,  $A_1$ ,  $A_2$ 와  $A_3$ 를 각각 1,-1,1로 가정한다.

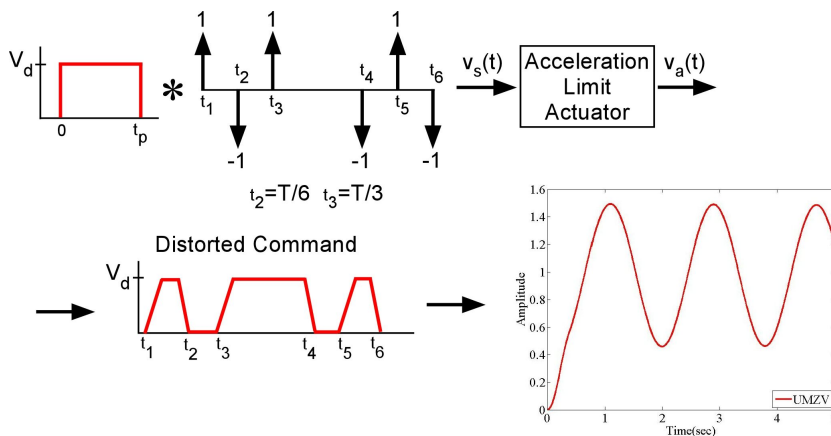
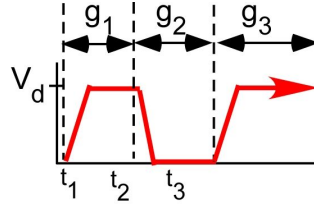
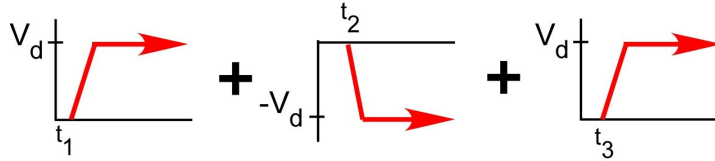


Fig. 3-6 Distorted Command of UMZV Shaper





(a) Range Division



(b) Segmented Profiles

Fig. 3-7 Separation of Velocity of ALUMZV Shaper

Fig. 3-7 (a)의 실제 속도명령어를 임펄스 시간에 따라 개별적으로 나누면 Fig. 3-7 (b)와 같다. 따라서 식 (3.9)를 이용하여 각각의 임펄스  $A_1$ 과  $A_2$ 에 대한 벡터  $\vec{V}_1, \vec{V}_2, \vec{V}_3$ 는 다음과 같이 표현 된다.

$$\vec{V}_1 = \left| \frac{2\kappa_a \sin\left(\frac{1}{2} \frac{\omega_n V_d}{\kappa_a}\right)}{m_1 \omega_n^2} \right| \angle \left[ \omega_n t_1 + \frac{1}{2} \frac{\omega_n V_d}{\kappa_a} \right] \quad (3.13)$$

$$\vec{V}_2 = \left| \frac{2\kappa_d \sin\left(\frac{-1}{2} \frac{\omega_n V_d}{\kappa_d}\right)}{m_1 \omega_n^2} \right| \angle \left[ \omega_n t_2 - \frac{1}{2} \frac{\omega_n V_d}{\kappa_d} \right] \quad (3.14)$$

$$\vec{V}_3 = \left| \frac{2\kappa_a \sin\left(\frac{1}{2} \frac{\omega_n V_d}{\kappa_a}\right)}{m_1 \omega_n^2} \right| \angle \left[ \omega_n t_3 + \frac{1}{2} \frac{\omega_n V_d}{\kappa_a} \right] \quad (3.15)$$

위의 벡터  $\vec{V}_1, \vec{V}_2, \vec{V}_3$ 의 크기와 위상각을 각각  $|\vec{V}_i|$ 로 나누어주고  $\angle \vec{V}_1$ 로 빼주어 정리하면 다음과 같다.

$$\vec{V}_1 = |1| \angle [0] \quad (3.16)$$

$$\vec{V}_2 = \frac{\left| \sin\left(\frac{-1}{2} \frac{\omega_n V_d A_2}{\kappa_d}\right) \right|}{\left| \sin\left(\frac{1}{2} \frac{\omega_n V_d A_1}{\kappa_a}\right) \right|} \angle \left[ \omega_n t_2 - \frac{\omega_n V_d}{2} \left( \frac{1}{\kappa_d} - \frac{1}{\kappa_a} \right) \right] \quad (3.17)$$

$$\vec{V}_3 = |1| \angle [\omega t_3] \quad (3.18)$$

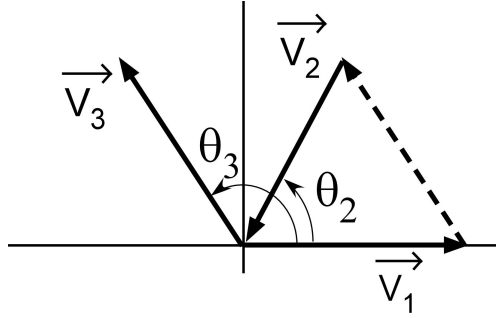


Fig. 3-8 Vector Diagram of ALUMZV Shaper

위의 세 벡터를 이용하여 임펄스의 시간  $t_2$ 와  $t_3$ 를 계산하기 위하여 Fig. 3-8의 vector diagram approach를 활용하여 ALUMZV shaper의 임펄스의 시간을 결정할 수 있다.  $a_2 = \angle \vec{V}_2$  와  $a_3 = \angle \vec{V}_3$  같다. 여기에 cosines law를 이용하여 임펄스의 시간인 식(3.19)과 식(3.20)을 얻는다.

$$\text{cosines law : } |\vec{V}_3|^2 = |\vec{V}_1|^2 + |\vec{V}_2|^2 - 2|\vec{V}_1|^2 |\vec{V}_2|^2 \cos \theta_2$$

$$t_2 = \frac{1}{\omega_n} \left\{ \cos^{-1} \left( \frac{\beta}{2} \right) - \frac{\omega_n V_d}{2} \left( \frac{1}{\kappa_d} - \frac{1}{\kappa_a} \right) \right\} \quad (3.19)$$

$$t_3 = \frac{1}{\omega_n} \left\{ \cos^{-1} \left( \frac{\beta^2}{2} - 1 \right) \right\} \quad (3.20)$$

$$\beta = \frac{\kappa_d \sin\left(\frac{\omega_n V_d}{2\kappa_d}\right)}{\kappa_a \sin\left(\frac{\omega_n V_d}{2\kappa_a}\right)}$$

식(3.19)과 (3.20)에  $\cos^{-1}$  term은 반드시 -1과 1사이에 있어야 한다. 그래야만  $\cos^{-1}$  term이 실수로 계산이 되어  $t_2, t_3$ 를 얻을 수 있다.

ALUMZV shaper를 활용한 유연시스템의 stop motion을 갖춘 ALUMZV shaper의 나머지 switching times은 start motion의 과정과 같은 방법으로 계산 하면 된다. 계산된 임펄스의 시간  $t_5$ 와  $t_6$ 는 다음과 같다.

$$t_5 = t_4 + \frac{1}{\omega_n} \left\{ \cos^{-1}\left(\frac{1}{2\beta}\right) - \frac{\omega_n V_f}{2} \left(\frac{1}{\tau_2} - \frac{1}{\tau_1}\right) \right\} \quad (3.21)$$

$$t_6 = t_4 + \frac{1}{\omega_n} \left\{ \cos^{-1}\left(\left(\frac{1}{2\beta}\right)^2 - 1\right) \right\} \quad (3.22)$$

stop motion의 시작 시간은  $t_p$ 에 의해 결정되며 따라서 구동기 드라이브를 고려한 zero residual vibration 솔루션인 ALUMZV shaper의 전체 임펄스 시퀀스는 식(3.19), 식(3.20), 식(3.21)과 식(3.22)로 표시된다.

ALUMZV shaper의 경우  $t_i$ 가 항상  $t_i$ 가 항상 실수값을 가져야 한다.[31] 따라서  $\cos^{-1}$ 의 항의 괄호가 -1~1사이의 값을 가져야 한다. 또한 임펄스의 간격이 원하는 속도에서 가속도(속도 감소시에는 감속도)로 나눈 값보다 커야된다. 그이유는 이조건을 만족하지 못할 경우 속도프로파일이 원하는 속도까지 도달하지 못하여 커맨드가 정상상태에 도달하지 못한다.[17] 따라서 다음의 조건식을 만족 해야 한다.

$$t_{i+1} - t_i \geq \frac{V_d A_i}{\kappa_i} \quad (\kappa_i \text{는 } A_i \text{가 양수일때 } \kappa_a \text{음수일때 } \kappa_d) \quad (3.25)$$

위의 입력성형기의 설계 시 설계자는 식(3.24)과 식(3.25)를 사용하고자 하는 시스템의 변수값을 이용하여 사용가능한 범위를 확인하고 사용해야한다. 만약 위의 조건을 만족하지 못할때는 입력성형기의 잔류진동 저감 성능의 감소를 가져온다.

### 3.4 ALUMZV 입력성형기의 평가

이번 장에서는 MATLAB<sup>®</sup>을 이용하여 앞에서 개발한 각각의 shaper에 대하여 numerical simulation을 진행 한다. 기존의 UMZV와 ALUMZV shapers의 성능 비교를 한다. 시뮬레이션의 기본적인 변수들의 값은 다음과 같이 설정 하였다.

Table 3-1. System Parameters of ALUMZV Shaper

변수	L	$\kappa_a$	$\kappa_d$	$V_d$	$t_p$
값	0.8m	0.5m/sec <sup>2</sup>	1m/sec <sup>2</sup>	0.2m/sec	3.5sec

위의 설정된 값은  $\kappa_a$ 와  $\kappa_d$ 의 경우 값이 같을 경우 ideal 솔루션과 같은 결과를 가지게 되므로 가속도와 감속도의 값을 서로 다른 값으로 설정 하였으며 일반적으로 가속도 보다 감속도가 크기 때문에  $\kappa_d$ 를  $\kappa_a$ 보다 작게 나타내었으며 실제 모터의 가속도와 감속도는 최대 속도의 2배 이상의 값을 가진다. 이 값을 이용한 simulation은  $\kappa_a$ ,  $\kappa_d$ ,  $t_p$ 에 대하여 잔류변위 저감 성능과 설계변수  $\kappa_a$ ,  $\kappa_d$ , L에 대한 강건성을 기존의 linear 기반의 shaper와 비교하였다.

3절에서 개발한 ALUMZV shaper의 numerical simulation을 진행 한다. 시뮬레이션에 사용된 변수 값은 Table 3-1과 같이  $\kappa_a=0.5m/s^2$ ,  $\kappa_d=1m/s^2$ ,  $t_p = 3.5sec$ ,  $L = 0.8m$ ,  $V_d = 0.2m/s$ 로 설정하였으며 실험에 따라 L,  $t_p$ ,  $\kappa_a$ 를 변경하면서 실험을 진행 하였다.

Fig. 3-9은  $\kappa_a$ 와  $\kappa_d$ 에 대하여 UMZV와 ALUMZV shapers의 잔류 변위의 저감 성능을 비교한 그림이다. 변수 설정은 Table 3-1과 동일 하며  $\kappa_a$ 와  $\kappa_d$ 의 범위를 0.3~5의 영역에서 진행 하였다. ALUMZV shaper의 경우 전체 적인 영역에서의 잔류 변위가 0이지만 UMZV shaper의 경우 잔류변위가 그래프 상에서 0~6cm정도의 변위가 발생한다. 하지만 ALUMZV shaper의 경우 zero변위를 보이고 있다.  $\kappa_a$ 와  $\kappa_d$ 가 같은 값을 가질 경우 UMZV shaper의 잔류변위가 없어지고 있다. 이는  $\kappa_a$ 와  $\kappa_d$ 가 같은 경우 ALUMZV shaper의 임펄스의 시간 값이 UMZV shaper의 임펄스의 시간 값과 동일해 진다. 이는  $\kappa_a$ 와  $\kappa_d$ 가 같은 경우 UMZV와 ALUMZV shapers가 같은 임펄스의 시간값을 갖는다는 의미이다.

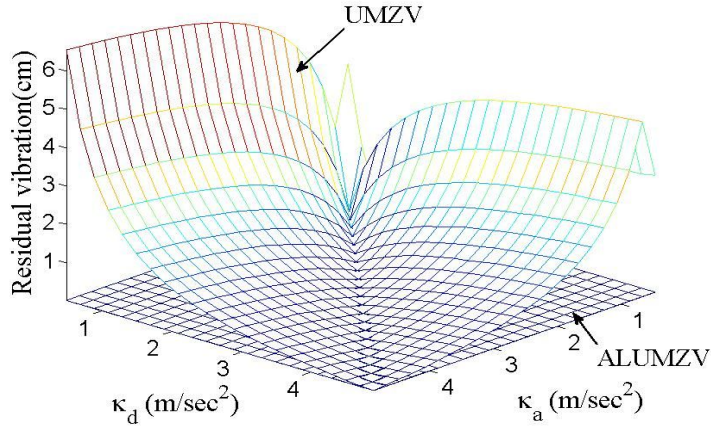


Fig. 3-9 Residual Vibration of ALUMZV Shaper to  $\kappa_a$  and  $\kappa_d$

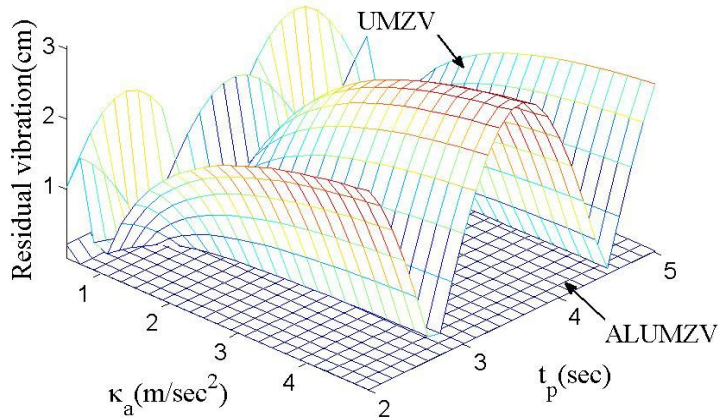


Fig. 3-10 Residual Vibration of ALUMZV Shaper to  $\kappa_a$  and  $t_p$

위의 Fig. 3-10는  $\kappa_a$ 와  $t_p$ 에 대하여 ALUMZV와 UMZV shapers의 잔류 변위의 크기를 나타내고 있다. 변수 설정은 Table 3-1과 동일 하며  $\kappa_a$  범위를 0.3~5,  $t_p$ 의 범위를 2~5(sec)로 설정하여 진행 하였다. ALUMZV shaper의 경우 전체 적인 영역에서의 잔류 변위가 0이지만 UMZV shaper의 경우 잔류 변위가 그래프 상에서 약 0~3cm 정도의 변위가 발생한다.  $t_p$ 에 따라 UMZV shaper의 변위가 주기적으로 반복 되고 있다. 이는 stop motion의 시작 지점의 초기 변위값이 0이 아니므로  $t_p$ 값에 따라 잔류 변위의 크기가 주기적인 특성을 보인다.

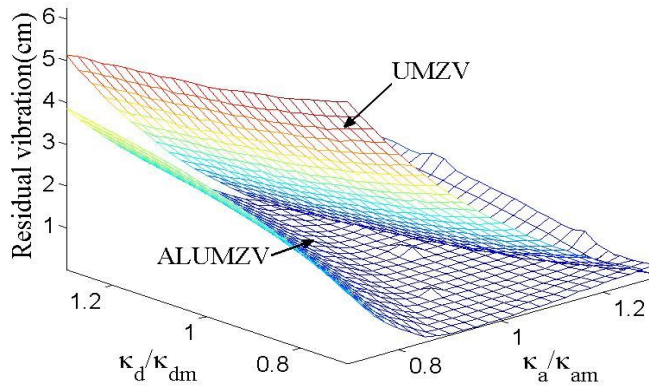


Fig. 3-11 Sensitivity of ALUMZV Shaper to  $\kappa_a$  and  $\kappa_d$

위의 Fig. 3-11은  $\kappa_a$ 와  $\kappa_d$ 에 대하여 ALUMZV와 UMZV shapers의 강건성을 나타내고 있다. 변수 설정은 Table 3-1과 동일 하며  $\kappa_{am}$ 을 0.5,  $\kappa_{dm}$ 을 1로 설정하고 진행 하였다. ALUMZV shaper의 경우 전체 적인 영역에서의 잔류 변위가 UMZV shaper보다 낮게 나타나고 있다. 또한  $\kappa_a/\kappa_{am}$ 와  $\kappa_d/\kappa_{dm}$ 의 값이 1일 때 잔류 변위의 크기가 0으로 낮게 나타나고 있다. 이는 UMZV shaper보다 ALUMZV shaper가  $\kappa_a$ 에 대해서 보다 강건함을 보인다는 의미이다.

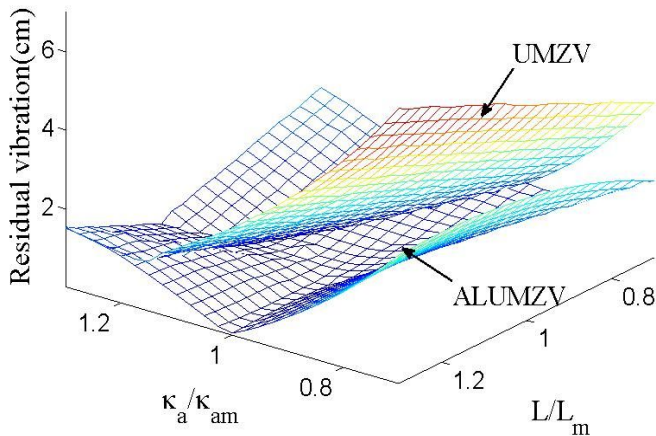


Fig. 3-12 Sensitivity of ALUMZV Shaper to  $\kappa_a$  and L

위의 Fig. 3-12 는  $\kappa_a$ 와 줄 길이 L에 대하여 ALUMZV와 UMZV shapers의 강건성을 나타내고 있다. 변수 설정은 Table 3-1과 동일하며  $\kappa_{am}$ 을 0.5, L을 0.8로 설정하고 진행 하였다. ALUMZV shaper의 경우 전체 적인 영역에서의 잔류 변위가 UMZV shaper보다 낮게 나타나고 있다. 또한  $\kappa_a/\kappa_{am}$ 와  $\kappa_d/\kappa_{dm}$ 의 값이 1일 때 잔류 변위의 크기가 0으로 낮게 나타나고 있다.

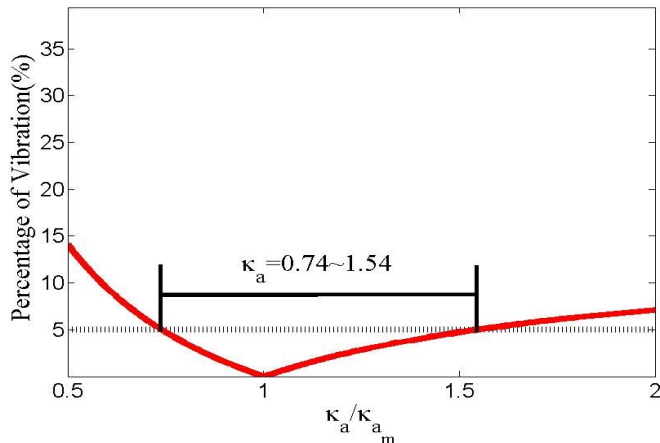


Fig. 3-13 Sensitivity of ALUMZV Shaper to  $\kappa_a/\kappa_{am}$

위의 Fig. 3-13 는 줄 길이  $\kappa_a$ 에 대하여 ALUMZV의 가속도의 경사의 각도에 따라 unshape 일때의 잔류변위의 백분율을 나타낸 것이다. 허용 잔류변위를 5%로 가정했을 때 기울기  $45^\circ$ ( $\kappa_a=1m/sec^2$ )을 기준으로  $\kappa_a/\kappa_{am}$ 의 값이 0.74~1.54의 값을 가질 때 5%의 잔류진동이 발생 했으며 이거을 기울기로 환산하면  $36.5^\circ \sim 57^\circ$ 의 기울기 범위 안에서 입력성형제어기를 작동할 경우 잔류 변위의 5%이내의 값을 얻을 수 있다.

Simulation을 통해 잔류변위의 크기와 각각의 변수들의 강건성을 평가한결과 기존의 ideal shaper와 비교하여 잔류변위가 줄어들고 제어가 가능해 졌으며 강건성 역시 증가함을 보인다. 따라서 새로개발한 ALUMZV shaper가 UMZV shaper보다 가속도제한의 경우에 성능이 향상되었다.

### 3.5 ALUMZV 입력성형기의 검증

#### 3.5.1 실험장치 설정

본 연구에서 개발된 입력성형제어기의 과도변위 제한 및 잔류변위 저감 성능을 실험적으로 검증하기 위해 Fig. 3-14의 실험 장치를 사용했다. mini-bridge crane 은 Siemens PLC (programmable logic controller)로 구성되어있고, 이론 검증을 위해 시스템 구동을 위한 pendant와 실험 data의 입출력할 수 있게 프로그램을 개발 하였다. 실험장치의 구동에는 절대 엔코더를 사용하는 3개의 servo motor를 사용했고 payload의 흔들림을 측정하기 위해 Siemens VS720x 계열의 intelligent vision sensor를 사용하였다.

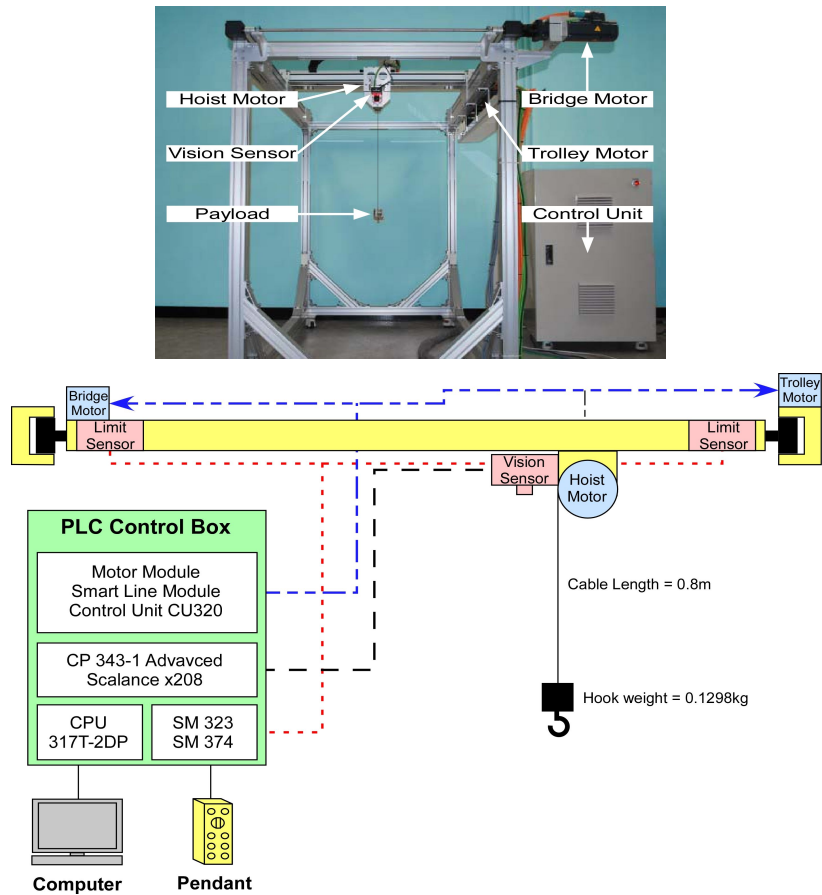


Fig. 3-14 Mini-Bridge Crane for Testbed



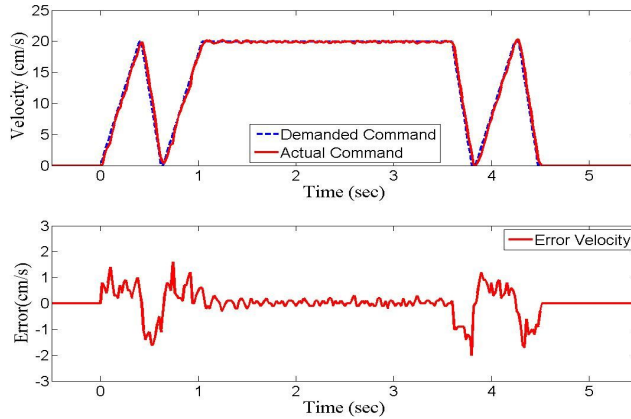


Fig. 3-15 Experiment of Velocity Error

가속도 제한이 고려된 velocity profile을 upload를 통해 실험을 하였으며, upload 하는 속도프로파일은 ramp 함수를 이용하여 만들고, 이를 motion control 할 수 있는 실험 장치의 모터드라이버의 세팅을 모터의 가속도와 감속도를 실험장치의 최대값인  $3.6 \times 10^8 \text{ rad/sec}$ 로 모터 세팅을하여 생성된 프로파일을 잘 추적할수 있도록 하였다. Fig. 3-15 는 실제 UMZV shaper를 이용한 가속도제한 속도프로파일을 입력한 후 입력한 속도 프로파일과 실제 모터의 속도값을 비교하였다. 실제 나타난 error plot의 경우와 같이 최대  $\pm 2 \text{ cm/sec}^2$ 의 오차는 있으나 명령된 속도 프로파일을 허용범위 안에서 추적하고 있다. intelligent vision sensor를 통해 payload 변위 측정을 하였고, MATLAB® software을 통해 측정된 변위를 분석했다. 실험은  $\kappa_a = 0.5 \text{ m/s}^2$ ,  $\kappa_d = 1 \text{ m/s}^2$ ,  $t_p = 3.5 \text{ sec}$ ,  $L = 0.8 \text{ m}$  그리고  $V_d = 0.2 \text{ m/s}$ 로 설정하였으며 start-stop motion을 통해 cable length 또는  $t_p$ 을 바꿔가며 잔류변위를 검증 했다.

### 3.5.2 실험 결과

ramp 형태의 속도 프로파일을 생성하여 mini-bridge crane을 활용해 실험을 진행했다. 진행시의 변수 값은 시뮬레이션과 동일하게  $\kappa_a = 0.5 \text{ m/s}^2$ ,  $\kappa_d = 1 \text{ m/s}^2$ ,  $t_p = 3.5 \text{ sec}$ ,  $L = 0.8 \text{ m}$  그리고  $V_d = 0.2 \text{ m/s}$ 로 설정하였으며 실험에 따라  $L$ ,  $t_p$ , 그리고  $\kappa_a$ 를 변경하면서 실험을 진행 하였다.

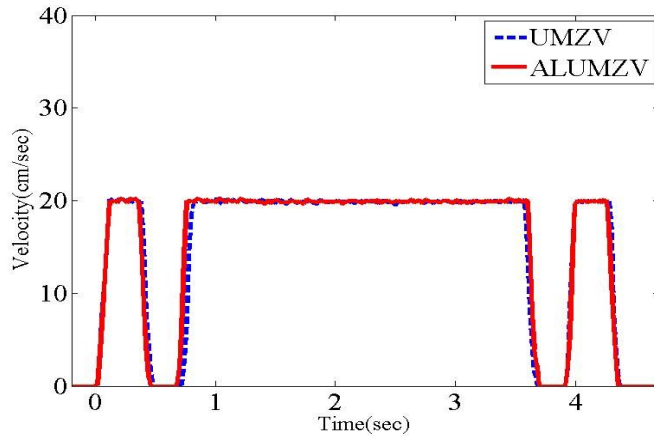


Fig. 3-16 Velocity Command of UMZV and ALUMZV Shapers

Fig. 3-16는 실험에 사용된 속도프로파일을 나타내고 있다. 실제적으로 커맨드의 임펄스의 크기는 같지만 시간의 차이만 나타난다. 실제 모터의 속도를 나타내기 때문에 이론적인 속도와 비교하여 약간의 오차가 있지만 이론적인 속도의  $\pm 2\text{cm/sec}^2$  이내이다.

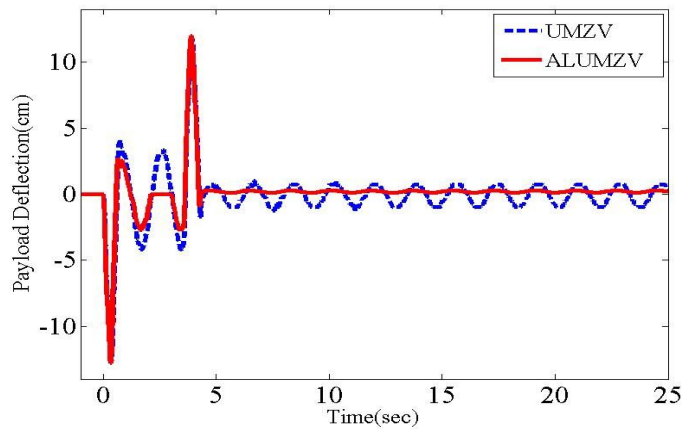


Fig. 3-17 Deflection Response of UMZV and ALUMZV Shapers

Fig. 3-17은 실험을 통해 얻은 Deflection Response를 나타내고 있다. 과도 변위의 크기 변화는 거의 차이는 없으나 잔류변위의 경우 UMZV shaper가 약 2cm 정도의 크기를 보이고 ALUMZV shaper의 경우 거의 변위가 발생하지 않고 있다.

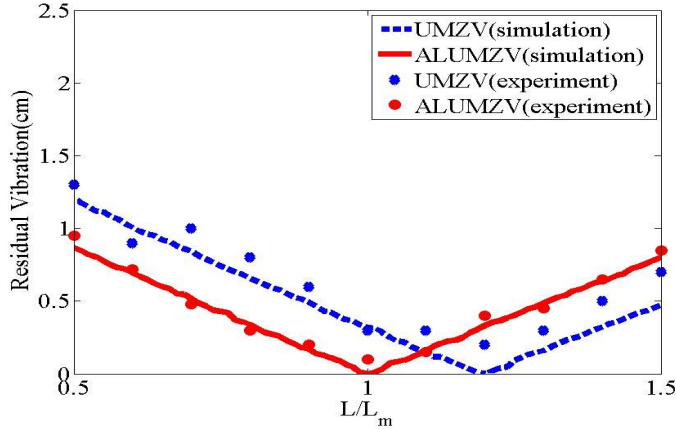


Fig. 3-18 Sensitivity of ALUMZV Shaper to  $L/L_m$

위의 Fig. 3-18은 줄길이  $L$ 에 대한 Modeling error 에 대한 sensitivity curve 이다. 실험변수 값은  $\kappa_a=0.5\text{m/s}^2$ ,  $\kappa_d=1\text{m/s}^2$ ,  $t_p = 3.5\text{sec}$ ,  $L = 0.8\text{m}$ ,  $V_d = 0.2\text{m/s}$ 로 설정하였다.  $L/L_m$ 이 1일 때 다시말해 고유주파수 값의 추정이 정확했을 때 기존의 UMZV shaper의 경우 잔류변위가 발생하고 ALUMZV shaper의 경우 잔류변위를 0으로 만들고 있다. 따라서 ALUMZV shaper가 UMZV shaper보다 시스템주파수에 대하여 보다 강건하다.

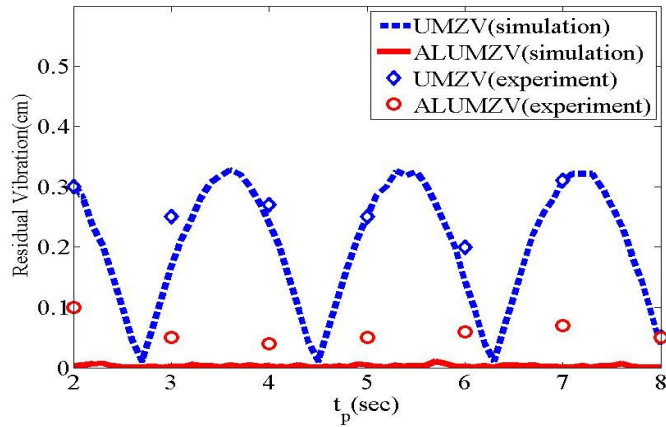


Fig. 3-19 Residual Vibration of ALUMZV Shaper to  $t_p$

위의 Fig. 3-19는 pulse duration  $t_p$ 에 대한 잔류변위를 나타낸다. 실험변수 값은  $\kappa_a=0.5\text{m/s}^2$ ,  $\kappa_d=1\text{m/s}^2$ ,  $L = 0.8\text{m}$ ,  $V_d = 0.2\text{m/s}$ 로 설정하였다. 기존의 UMZV

shaper의 경우 변위가 발생 되고 있으며 ALUMZV shaper의 경우 잔류변위를 0으로 나타나고 있다. 또한 UMZV shaper의 경우 잔류변위가 발생하기 때문에 기존의 입력성형기와 마찬가지로 주기적인 변위 특성을 보이고 있다.

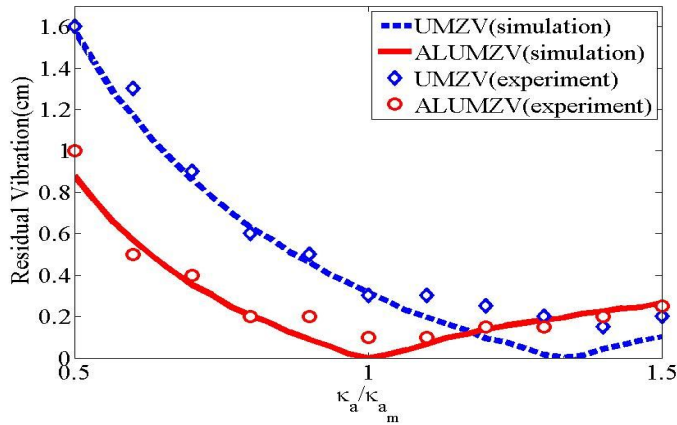


Fig. 3-20 Sensitivity of ALUMZV Shaper to  $\kappa_a/\kappa_{am}$

위의 Fig. 3-20은 가속도제한의 중요 변수중 하나인  $\kappa_a$ 에 대한 modeling error에 대하여 강건성을 나타낸 것이다. 실험변수 값은  $\kappa_a=0.5m/s^2$ ,  $\kappa_d=1m/s^2$ ,  $t_p = 3.5sec$ ,  $L = 0.8m$ ,  $V_d = 0.2m/s$ 로 설정하였다. UMZV shaper의 경우 잔류 변위를 저감 하지 못하고 있으며 ALUMZV shaper의 경우는  $\kappa_a/\kappa_{am}$ 이 1인 경우 잔류 변위가 0임을 보이고 있다. 이는 실제 상황에서 입력성형기 설계시 변수추정이 정확 했을 때 ( $\kappa_a/\kappa_{am}$ 이 1인 경우) UMZV shaper의 경우 잔류변위가 발생하고 ALUMZV shaper의 경우 잔류변위가 없다는 것을 의미한다.

### 3.6 결론

본 논문에서는 산업현장에서 일반적으로 사용하고 있는 on-off 형태의 구동기 드라이브의 가속도 제한에 의한 잔류변위저감 성능을 저하를 고려한 exact 형태의 ALUMZV shaper를 제시하였다. 제시한 shaper는 가속도 제한시 발생하는 ramp step에 대한 응답을 phasor form 형태로 나타내고 이것을 vector diagram approach를 활용하여 exact solution 형태로 개발 되었다. 제어기의 성능 평가를 위해 설계 변수에 대한 잔류변위의 크기와 modeling error에 대한 sensitivity를 기존의 shaper와 비교 하였으며 성능 비교에서 성능 향상을 보였으면 sensitivity역시

보다 modeling error에 강건함을 보였다. 이를 검증하기 위하여 실제 pendulum system 실험장비인 mini-bridge crane에 적용하여 주파수에 대한 modeling error,  $t_p$ 에 따른 잔류변위를 실험을 통해 검증 하였다.

## 4 가속도가 제한된 유연시스템을 위한 과도변위저감 입력성형제어기

본 논문은 구동기 드라이브로 인한 가속도제한을 갖는 flexible system의 과도변위 저감을 위한 입력성형제어방법을 제시한다. 우주구조물 혹은 스페이스 셔틀 또는 유연시스템은 과도 변위에 의하여 위치제어의 부정확성과 장비의 수명 감소등이 문제시 되고 있다. 일반적으로 구동기 드라이브에 의해 최대 가속도가 고정되어 있기 때문에 ramp형태의 속도 프로파일을 가지게 되어 rest-to-rest 기동시에 잔류 변위를 발생시키고 과도변위 저감 성능이 저하된다. 따라서 본 논문에서 기존의 linear 기반의 입력성형방법을 가속도 제한 형태의 속도 프로파일을 갖는 shaper개발을 위하여 가속도제한에 대한 응답을 근사화 하여 phasor form 형태의 벡터로 나타내고 이를 vector diagram approach을 이용하여 exact solution을 제시했다. 제시한 입력성형제어기를 이용하여 잔류변위크기, 강건성을 numerical simulation을 통해 평가 및 검증한다. 제시한 입력성형방법은 mini-bridge crane을 이용한 실험을 통해 sensitivity 및 잔류변위저감 성능을 검증 했다.

### 4.1 서론

우주구조물 혹은 스페이스 셔틀 또는 유연시스템이 운동을 할 때 구조물의 양 끝단에서는 운동후 잔류변위와 더불어 운동중에는 큰 과도변위가 발생된다. 특히 과도 변위는 위치제어와 장비의 수명 감소등에 영향을 주고 있다. 이러한 잔류 변위 및 과도변위를 해결하기 위한 방법중 입력성형기술은은 큰 시스템 변화 없이 활용 할수 있는 효과적인 방법 중에 하나이다. 하지만 구동기 드라이브에 의해 최대 가속도가 고정되어 있기 때문에 ramp형태의 속도 프로파일을 가지게 되어 linear system에 기반한 square 형태의 속도프로파일을 이용한 입력성형방법의 경우 속도 프로파일 형태의 차이로 인하여 잔류변위가 발생하고 정밀한 제어가 어려워지기 때문에 입력 성형시에 시스템의 따른 제약 조건과 가속도 제한을 고려한 입력성형방법이 요구된다.

시스템의 과도 변위를 줄이기 위한 입력 성형 방법에 대한 연구들이 진행 되어져 왔다. Singhose, Seering 및 Banerjee[24]는 우주 유연구조물의 slew시에 발생되

는 transient deflection을 저감과 fuel efficiency를 discrete time에서 optimization 방법을 이용하여 input shaper를 제시하였다. 하지만 가속도 제한을 고려한 방법은 아니기 때문에 과도변위와 잔류변위저감 성능이 감소 한다. Robertson과 Singhose의 deflection vector diagram[25]을 이용하여 closed form 형태로 나타내었다. 여기서는 deflection의 저감을 벡터 다이어그램을 이용한 방법으로 제시하였지만 이역시도 가속도 제한은 고려되지 않았다. Singhose, Banerjee와 seering[26]의 robustness, deflecting limiting, fuel efficiency 세가지를 고려한 방법등이 있었지만 모두 optimization 방법으로 제시되었다. 하지만 optimization이기 때문에 실제 산업 현장에서 사용하기에는 제약이 있으며 가속도 제한시에 성능 감소가 일어난다. Robertson과 Singhose[27]는 임펄스의 크기 조절을 통한 closed-form 형태의 deflection limiting 방법을 제시 했다. 이방법은 간단한 방법으로 과도변위를 저감할수 있는 방법이지만 가속도 제한 시스템에서는 성능 감소가 일어난다. 이후, Sung과 Singhose[28]가 deflection limiting과 velocity limiting을 고려한 closed form 형태의 deflection-velocity-limiting(DVL)을 개발 하였다. 이방법역시 linear system기반의 솔루션이다.

그밖에 다른 관련 input shaping[29,30] 기술 역시 linear system theory를 기반하고 있어 가속도가 제한 시스템에 활용 되기에는 어렵고 잔류 변위 저감 성능이 떨어진다.

비선형유연시스템의 잔류변위를 저감에 활용하기 위한 연구가 초기단계에 있다. Sorenson[12]은 saturation, backlash, rate limiting, dead zone의 비선형성으로 인한 shaper에 성능감소에 대하여 deconvolution 방법을 이용한 shaper의 성능분석방법을 제시하였다.

구동기와 관련한 비선형성 연구들이 제안되었다. Lawrence[16]는 선형 입력성형 제어기에 비선형 구동기의 영향으로 발생하는 가속도 및 감속도에 의한 시간지연을 고려하여 잔류변위저감 성능을 개선한 on-off 형태의 비선형 입력성형제어기를 개발 하였다. 이 경우 1st-order형태의 구동기의 비선형을 고려 했으며 산업 현장의 비선형 구동기의 동적특성을 고려한 입력성형제어기 설계에 필요한 정확한 변수가 필요하다. Danielson[17]은 구동기의 가속도 제한을 고려하여 optimization 방법을 하였다. 하지만 또한 on-off 시스템은 고려하지 않았으며 optimization방법이기 때문에 계산 과정이 필요하므로 실제 산업 현장에 적용하기에는 다소 어려움이 있다. 그밖에 다른 비선형을 고려한 input shaping[13,14,15]관련 기술 역시 linear system

theory를 기반으로 있어 가속도가 제한 시스템에 활용 되기에는 어렵고 잔류 변위 저감 성능이 떨어진다.

현재 가속도제한을 고려하면서 on-off형태의 솔루션은 아직까지 한번도 다루어지지 않았다. 따라서 본 논문에서는 구동기의 동특성 중 가속도제한을 고려하여 on-off 형태의 exact 입력성형제어기를 제시한다.

2절에서는 2mass-spring system을 통해 응답식을 통해 phasor 형태의 벡터로 나타낸다. 3절에서는 앞절에서 계산한 phasor vector를 vector diagram approach[2]을 활용하여 Acceleration Limits Modified Unit Magnitude Zero Vibration(ALMUMZV) shaper와 Acceleration High-speed Limits Zero Vibration(AHDLZV) shaper를 개발한다. 4절에서는 MATLAB®을 이용한 numerical simulation을 통해 shaper들의 과도변위, 잔류변위, 강건성을 성능 평가를 한다. 5절에서는 shaper들을 mini-bridge crane을 통한 sensitivity, residual vibration 실험 결과를 통해 성능 검증을 한다.

## 4.2 가속도가 제한된 시스템의 Phasor Vector

이번 2절에서 Fig. 4-1과 같은 기본적인 Benchmark System의 운동방정식을 이용하여 정상상태 응답을 구하고 응답을 phasor vector의 형태로 나타내어 잔류변위에 대한 변위 벡터를 나타낸다. 이 벡터는 3절에서 입력성형제어기의 설계시에 사용된다.

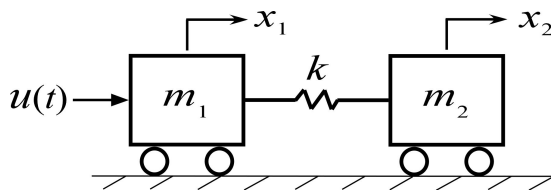


Fig. 4-1 Benchmark System

Fig. 4-1과 같은 일반적인 Benchmark System의 운동방정식은 식(4.1)과 식(4.2)와 같다.

$$m_1 \ddot{x}_1 + kx_1 - kx_2 = u \quad (4.1)$$

$$m_2 \ddot{x}_2 + kx_2 - kx_1 = 0 \quad (4.2)$$



위의 시스템 응답을 구하기 위해 라플라스 변환하여  $Y(s) = X_2(s) - X_1(s)$ 에 대하여 위의 두식을 정리하여  $\omega_n^2 = (m_1 + m_2)k/m_1m_2$ 로 치환하여주면 식(4.4)와 같다.

$$Y(s) = -\frac{1}{m_1} \frac{s V(s)}{s^2 + \omega_n^2} \quad (4.4)$$

여기서 여기서 가속도 입력  $u(t)$ 는 속도 입력  $\dot{V}_t(t)$ 로 나타나며 라플라스 변환시  $s V(s)$ 로 치환된다.

응답  $Y(s)$ 는 식 (4.5)와 같이 시스템입력  $C(s)$ 와 sine input으로 표현된다.

$$Y(s) = -\underbrace{\frac{v_a(s) \cdot s}{m_1 \omega_n}}_{C(s)} \cdot \underbrace{\frac{\omega_n}{s^2 + \omega_n^2}}_{\text{Sine input}} \quad (4.5)$$

이를 이용하여 steady state response 으로 나타내면 식 (4.6)로 나타낼 수 있다.

$$Y_{ss}(t) = \frac{|v_a(j\omega_n)|}{m_1} \sin(\omega_n t - \frac{\pi}{2} + \angle v_a(j\omega_n)) \quad (4.6)$$

여기서  $v_t(j\omega_n)$ 는  $j\omega_n$ 만의 함수가 아니고  $A_i$   $t_i$ 등 여러변수의 함수지만 간략화 해서  $v_t(j\omega)$ 로 표시한다.

벡터의 amplitude 와 phase로 나타내면, 식(4.7)으로 나타난다.

$$\vec{v} = \frac{|v_t(j\omega_n)|}{m_1} \angle \left[ -\frac{\pi}{2} + \angle v_a(j\omega_n) \right] \quad (4.7)$$

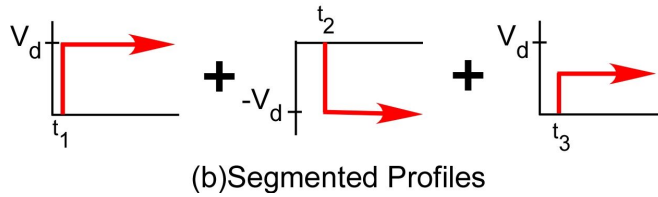
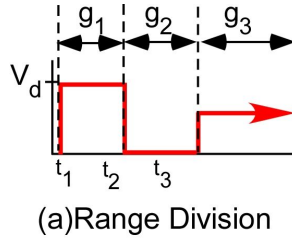


Fig. 4-2 Separation of Velocity of MUMZV 2haper

Fig. 4-2 (a)의 실제 속도명령어를 임펄스 시간에 따라 개별적으로 나누면 Fig. 4-2 (b)와 같다. 따라서 실제 속도명령어를 임펄스 시간에 따라 개별적으로 나누면 전체 속도명령어에 대한 함수는 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$v_a(t) = \sum_{i=1}^n g_i(t) * \delta(t - t_i) \quad (4.8)$$

여기서  $g_i(t)$ 는 shaped 입력을 Fig.4-2와 같이 나누었을때의 각 부분의 속도의 함수를 의미한다.

가속도 제한 형태인 ramp함수의 전달 함수는 식(4.9)과 같이 나타낼수 있다.

$$g_i(t) = \kappa_i t - \left( \kappa_i \left( t - \frac{V_d}{\kappa_i} \right) \cdot \delta \left( t - \frac{V_d}{\kappa_i} \right) \right) \quad (4.9)$$

여기서  $\kappa_i$ 는 감속도 또는 가속도로 양의 임펄스 일때는  $\kappa_a$  음의 임펄스 일때는  $\kappa_d$  이다,

식 (4.7)과 식 (4.9)을 이용하여 Laplace transform 하여 벡터의 amplitude와 phase로 나타내면 식 (4.10)과 같다.

$$\vec{V}_i = \left| \frac{2\kappa_i \sin\left(\frac{1}{2} \frac{\omega_n V_d A_i}{\kappa_i}\right)}{m_1 \omega_n^2} \right| \angle \left[ \omega_n t_i + \frac{1}{2} \frac{\omega_n V_d A_i}{\kappa_i} \right] \quad (4.10)$$

이 벡터는 임펄스로 인한 pendulum에 정상상태응답에 대한 변위의 크기와 위상각을 나타낸다. 3절에서 개발시에 식(4.10)을 이용하여 vector diagram approach를 이용하여 ALMUMZV와 AHDLZV shapers를 제시한다.

### 4.3 가속도제한 과도변위 저감 입력성형제어기 개발

#### 4.3.1 가속도 제한을 고려한 MUMZV 입력성형기

이번 절에서는 과도 변위 제한을 위한 MUMZV shaper 형태의 가속도 제한 솔루션인 ALMUMZV shaper를 구한다. 이를 위하여 2장에서 계산된 가속도제한의 phasor vector를 vector diagram approach를 이용하여 exact shaper를 계산한다.

입력성형기의 명령 일반적으로 임펄스 시퀀스와 step입력의 convolution을 통해 생성된다. 하지만 이 명령은 pulse duration( $t_p$ )에 따라 short과 long 그리고 interference command 세가지로 분류된다.

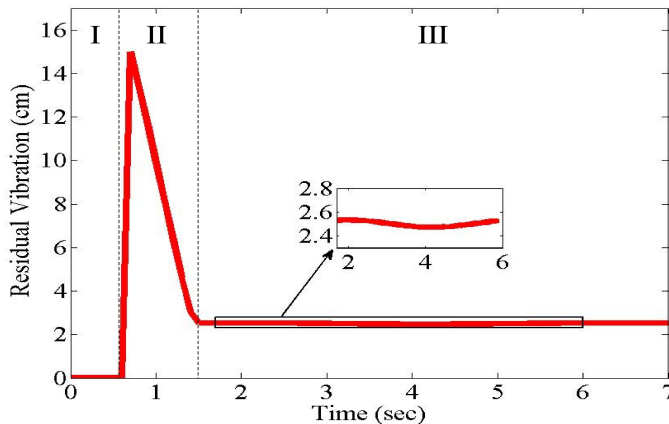


Fig. 4-3 Residual Vibration of MUMZV to  $t_p$

Fig.4-3 는  $t_p$ 에 따라 MUMZV의 잔류변위를 나타내었다. 그림에서 보는바와 같이 그래프상에서 3가지의 구간으로 구분된다. 먼저 I구간 은 short command 구간으로

실제 잔류변위가 발생하지 않고 있다. II구간은 Interference command 구간으로 커맨드가 잔류변위가 크게 발생되고 있다. III는 약간의 변위가 발생되고 있으며 다른 구간과 달리  $t_p$ 에 따라 주기적인 특성을 보인다는 것이 특징이다.

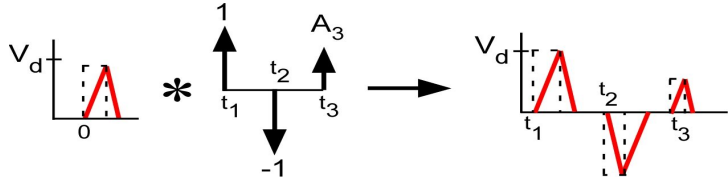


Fig. 4-4 Deconvolution of MUMZV Short Command

Fig. 4-4은 MUMZV의 short command를 나타내고 있다. MUMZV short command는 펄스입력과 임펄스 시퀀스의 convolution을 통해 생성되며 세 개의 펄스 형태로 구성된다. 이와 같은 short command가 사용되기 위해서는  $t_p$ 가 다음과 같은 조건을 만족해야한다.

$$t_p \leq t_2 - \frac{V_d A_1}{\kappa_d} \quad \text{and} \quad t_p \leq t_3 - t_2 - \frac{V_d A_2}{\kappa_a} \tag{4.11}$$

MUMZV interference command는  $t_p$ 가 short command와 long command 사이에 위치할 경우 발생된다. MUMZV interference command는 커맨드가 정상상태에 도달하지 않기 때문에 실제 약간의 잔류 변위를 발생시킨다.

$$t_p \geq t_2 - \frac{V_d A_1}{\kappa_d} \quad \text{and} \quad t_p \geq t_3 - t_2 - \frac{V_d A_2}{\kappa_a} \quad \text{and} \quad t_p \leq t_3 + \frac{V_d A_3}{\kappa_a} \tag{4.12}$$

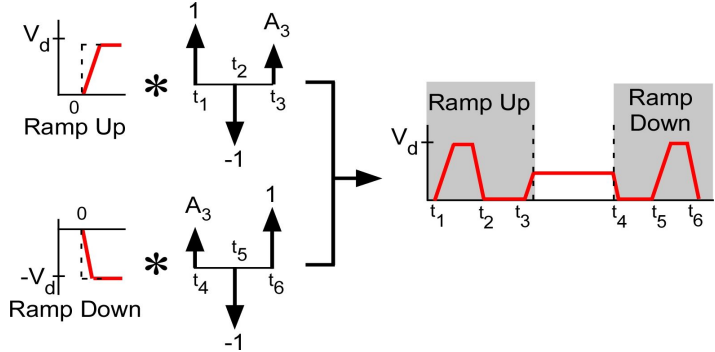


Fig. 4-5 Deconvolution of MUMZV Long Command

Fig. 4-5 는 MUMZV의 long command를 나타내고 있다. MUMZV long command는 ramp up과 ramp down 에 따라 각기 다른 펄스입력과 임펄스 시퀀스의 convolution을 통해 생성된다. 이와 같은 long command가 사용되기 위해서는  $t_p$ 가 다음과 같은 조건을 만족해야한다.

$$t_p \geq t_3 + \frac{V_d A_3}{\kappa_a} \quad (4.13)$$

### 4.3.1.a ALMUMZV shaper의 개발

입력성형기가 short command는 잔류변위가 0이지만 가장  $t_p$ 의 범위가 넓은 long command를 사용시에 잔류변위가 발생하고 있기 때문에 long command에 대한 새로운 입력성형기가 필요하다. 따라서 MUMZV의 가속도를 고려한 ALMUMZV를 개발하여 과도변위 제한과 더불어 잔류변위를 제한하는 솔루션을 찾는다.

기존의 MUMZV shaper를 가속도 제한이 고려된 solution으로 계산한다. Fig. 4-6은 MUMZV shaper가 가속도 제한으로 인하여 속도 커맨드가 ramp 형태로 변하게되어 응답에서 잔류변위가 발생하는 것을 보여준다. 앞서 계산된 시스템의 잔류변위에 대한 phasor 벡터를 이용한다. 여기서 우리는  $t_1$ 을 0,  $A_1$ ,  $A_2$ 와  $A_3$ 를 각각 1,-1 그리고  $A_3$ 로 가정한다.

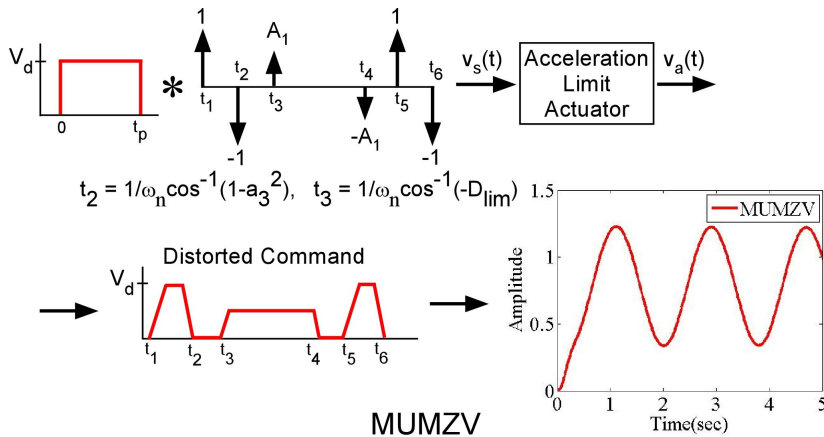
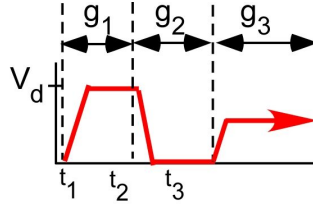
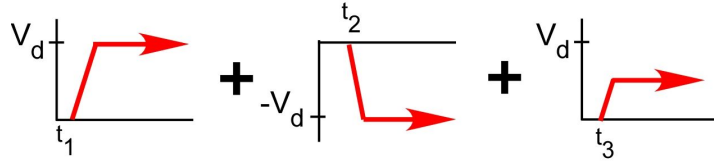


Fig. 4-6 Distorted Command of MUMZV Shaper



(a)Range Division



(b)Segmented Profiles

Fig. 4-7 Separation of Velocity of ALMUMZV Shaper

Fig. 4-7 (a)의 실제 속도명령어를 임펄스 시간에 따라 개별적으로 나누면 Fig. 4-7 (b)와 같다. 따라서 식 (4.10)를 이용하여 각각의 임펄스  $A_1$ 과  $A_2$  그리고  $A_3$ 에 대한 벡터  $\vec{V}_1$ ,  $\vec{V}_2$  그리고  $\vec{V}_3$ 는 다음과 같이 표현 된다.

$$\vec{V}_1 = \left| \frac{2\kappa_a \sin\left(\frac{1}{2} \frac{\omega_n V_d}{\kappa_a}\right)}{m_1 \omega_n^2} \right| \angle \left[ \omega_n t_1 + \frac{1}{2} \frac{\omega_n V_d}{\kappa_a} \right] \quad (4.14)$$

$$\vec{V}_2 = \left| \frac{2\kappa_d \sin\left(\frac{-1}{2} \frac{\omega_n V_d}{\kappa_d}\right)}{m_1 \omega_n^2} \right| \angle \left[ \omega_n t_2 - \frac{1}{2} \frac{\omega_n V_d}{\kappa_d} \right] \quad (4.15)$$

$$\vec{V}_3 = \left| \frac{2\kappa_a \sin\left(\frac{1}{2} \frac{\omega_n A_3 V_d}{\kappa_a}\right)}{m_1 \omega_n^2} \right| \angle \left[ \omega_n t_3 + \frac{1}{2} \frac{\omega_n A_3 V_d}{\kappa_a} \right] \quad (4.16)$$

위의 벡터  $\vec{V}_1$ ,  $\vec{V}_2$ ,  $\vec{V}_3$ 의 크기와 위상각을 각각  $|\vec{V}_i|$ 로 나누어주고  $\angle \vec{V}_i$ 로 빼주어 정리하면 다음과 같다.

$$\vec{V}_1 = |1| \angle [0] \quad (4.17)$$

$$\vec{V}_2 = \frac{\left| \sin\left(\frac{-1}{2} \frac{\omega_n V_d A_2}{\kappa_d}\right) \right|}{\left| \sin\left(\frac{1}{2} \frac{\omega_n V_d A_1}{\kappa_a}\right) \right|} \angle \left[ \omega_n t_2 - \frac{\omega_n V_d}{2} \left( \frac{1}{\kappa_d} - \frac{1}{\kappa_a} \right) \right] \quad (4.18)$$

$$\vec{V}_3 = \frac{\left| \sin\left(\frac{1}{2} \frac{\omega_n V_d A_3}{\kappa_a}\right) \right|}{\left| \sin\left(\frac{1}{2} \frac{\omega_n V_d A_1}{\kappa_a}\right) \right|} \angle \left[ \omega_n t_3 - \frac{\omega_n V_d}{2\kappa_a} (A_3 - A_1) \right] \quad (4.19)$$

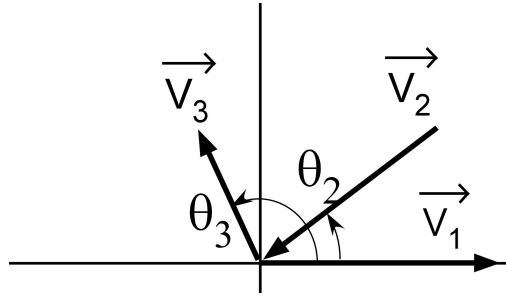


Fig. 4-8. Vector Diagram of ALMUMZV shaper

위의 세 벡터를 이용하여 임펄스의 시간  $t_2$ 와  $t_3$ 를 계산하기 위하여 Fig. 4-8의 vector diagram approach를 활용하여 ALMUMZV shaper의 임펄스의 시간을 결정할 수 있다.  $a_2 = \angle \vec{V}_2$  와  $a_3 = \angle \vec{V}_3$  같다. 여기에 cosines law를 이용하여 식 (4.20)과 식(4.21)을 얻는다.

$$\text{cosines law : } |\vec{V}_3|^2 = |\vec{V}_1|^2 + |\vec{V}_2|^2 - 2|\vec{V}_1|^2 * |\vec{V}_2|^2 \cos\theta_2$$

$$t_2 = \frac{1}{\omega_n} \left[ \cos^{-1} \left\{ \frac{1}{2\gamma_{11}} \left( 1 + \frac{\kappa_d^2}{\kappa_a^2} \gamma_{11}^2 - \beta_{11}^2 \right) \right\} - \frac{\omega_n V_d}{2} \left( \frac{1}{\kappa_d} - \frac{1}{\kappa_a} \right) \right] \quad (4.20)$$

$$t_3 = \frac{1}{\omega_n} \left[ \cos^{-1} \left\{ -\frac{1}{2\beta_{11}} \left( 1 + \beta_{11}^2 - \frac{\kappa_b^2}{\kappa_a^2} \gamma_{11} \right) \right\} - \frac{\omega_n V_d}{2\kappa_a} (A_3 - A_1) \right] \quad (4.21)$$

$$\beta_{11} = \frac{\sin\left(\frac{\omega_n V_d A_3}{2\kappa_a}\right)}{\sin\left(\frac{\omega_n V_d}{2\kappa_a}\right)} \quad \gamma_{11} = \frac{\sin\left(\frac{\omega_n V_d}{2\kappa_d}\right)}{\sin\left(\frac{\omega_n V_d}{2\kappa_a}\right)}$$

ALMUMZV shaper를 활용한 유연시스템의 stop motion을 갖춘 ALMUMZV shaper의 나머지 switching times은 start motion의 과정과 같은 방법으로 계산 하면 된다. 계산된  $t_5$ 와  $t_6$ 는 다음과 같다.

$$t_5 = \frac{1}{\omega_n} \left[ \cos^{-1} \left\{ \frac{1}{2\gamma_{21}} \left( 1 + \frac{\kappa_d^2}{\kappa_a^2} \gamma_{21}^2 - \beta_{21}^2 \right) \right\} - \frac{\omega_n V_d}{2} \left( \frac{1}{\kappa_a} - \frac{A_3}{\kappa_d} \right) \right] \quad (4.22)$$

$$t_6 = t_4 + \frac{1}{\omega_n} \left[ \cos^{-1} \left\{ -\frac{\kappa_a}{2\kappa_b} \left( 1 + \beta_{21}^2 - \frac{\kappa_a^2 \gamma_2}{\kappa_d^2} \right) \frac{1}{\beta_{21}} \right\} - \frac{\omega_n V_d}{2\kappa_d} (1 - A_3) \right] \quad (4.23)$$

$$\beta_{21} = \frac{\sin\left(\frac{\omega_n V_d}{2\kappa_d}\right)}{\sin\left(\frac{\omega_n V_d A_3}{2\kappa_d}\right)} \quad \gamma_{21} = \frac{\sin\left(\frac{\omega_n V_d}{2\kappa_a}\right)}{\sin\left(\frac{\omega_n V_d A_3}{2\kappa_d}\right)}$$

stop motion의 시작 시간은  $t_p$ (Pulse duration)에 의해 결정되며 따라서 구동기 드라이브를 고려한 zero residual vibration 솔루션인 ALMUMZV shaper의 전체 시퀀스는 식(4.20), 식(4.21), 식(4.22)와 식(4.23)으로 표시된다. 식(4.20)과 (4.21), 식(4.22)와 식(4.23)에  $\cos^{-1}$  term은 반드시 -1과 1사이에 있어야 한다. 그래야만  $\cos^{-1}$  term이 실수로 계산이 되어, 시간 값을 얻을 수 있다.

ALMUMZV shaper의 경우  $t_i$ 가 항상  $t_i$ 가 항상 실수값을 가져야 한다.[31] 또한 임펄스의 간격이 원하는속도에서 가속도(속도 감소시에는 감속도)로 나눈 값보다 커야된다. 그이유는 이조건을 만족하지 못할 경우 속도프로파일이 원하는 속도까지 도달하지 못하여 커맨드가 정상상태에 도달하지 못한다.[17] 따라서 다음의 조건식을 만족 해야 한다.



$$t_{i+1} - t_i \geq \frac{V_d A_i}{\kappa_i} \quad (\kappa_i \text{는 } A_i \text{가 양수일 때 } \kappa_a \text{ 음수일 때 } \kappa_d) \quad (4.25)$$

위의 입력성형기의 설계 시 식(4.25)를 만족하지 못할때는 longcommand가 제대로 생성되지 않기 때문에 진동이 발생한다.

### 4.3.1.b ALMUMZV shaper의 과도변위 제약조건

ALMUMZV의  $A_3$ 의 값을 이용하여 과도변위를 제한하기 위해 시스템 모델과 원하는 과도변위보다 작거나 같아야 한다는 조건을 이용하여  $A_3$ 값에 대한 제약조건을 계산한다. 식 (4.3)의 시스템 모델 과 가속도 프로파일식을 이용하여 과도 변위의 값을 계산한다.

가속도 프로파일의 식 (4.9)를 라플라스 변환하여 식 (4.3)에 대입하면 다음과 같다.

$$D(s) = -\frac{1}{m_1} \left\{ \frac{\kappa_a}{s} \left( 1 - e^{-\frac{V_d}{\kappa_a} s} \right) \right\} \frac{1}{s^2 + \omega_n^2} \quad (4.26)$$

위의 식을 역 라플라스변환을 위해 풀어서 다시 쓰면 다음과 같다.

$$D(s) = -\frac{\kappa_a}{m_1} \frac{1}{s(s^2 + \omega_n^2)} + \frac{\kappa_a}{m_1} \frac{e^{-\frac{V_d}{\kappa_a} s}}{s(s^2 + \omega_n^2)} \quad (4.27)$$

위의 D(s)를 시간영역의 D(t)를 만들기 위해 역라플라스 변환을 하면 다음과 같다.

$$D(t) = \frac{\kappa_a}{m_1 \omega_n^2} (\cos(\omega_n t) - 1) + \left[ 1 - \cos \left\{ \omega_n \left( t - \frac{V_d}{\kappa_a} \right) \right\} \right] H \left( t - \frac{V_d}{\kappa_a} \right) \quad (4.28)$$

여기서 H는 헤비사이드 함수이다.

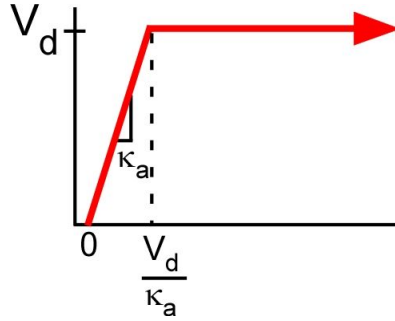


Fig. 4-9 Unshape Acceleration Limits Command

우선 Fig 4-9과 같은 unshape 일때의 과도변위 계산하기위해 한가지의 가정을 한다. 본 논문에서 잔류변위를 0으로 만들기 위해 활용된 것은 정상상태의 응답을 이용한 벡터이다. 따라서 위의 제약조건을 포함하여 unshape일 때 deflection을 계산하면 다음과 같다.

$$D_{un}(t) = \frac{2\kappa_a}{m_1\omega^2} \sin\left(\frac{V_d\omega}{2\kappa_a}\right) \sin\left\{\omega\left(t - \frac{V_d}{2\kappa_a}\right)\right\} \quad (4.29)$$

따라서 unshape 일때의 deflection의 최대 값은

$$D_{\max} = \frac{2\kappa_a}{m_1\omega^2} \sin\left(\frac{V_d\omega}{2\kappa_a}\right) \quad (4.30)$$

이어서 Fig.4-10 shaped된 속도 프로파일의 deflection의 최대값을 계산한다.

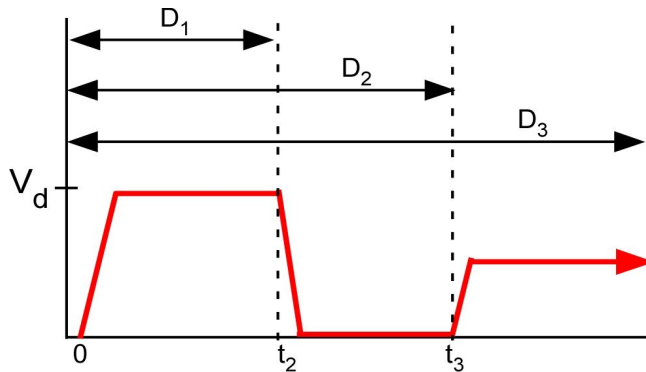


Fig. 4-10 Shaped Acceleration Limits Command

따라서  $D_i$ 에 대해 deflection의 식을 일반화 하여 나타내면 다음과 같다.

$$D_i(t) = \sum_{i=1}^n \frac{2\kappa_i}{m_1\omega^2} \sin\left(\frac{V_d A_i \omega}{2\kappa_i}\right) \sin\left\{\omega\left(t - t_i - \frac{V_d A_i}{2\kappa_i}\right)\right\} \quad (i = 1 \dots 3) \quad (4.34)$$

여기서  $\kappa_i$ 는  $A_i$ 가 양수일때는  $\kappa_a$  음수일때는  $\kappa_d$ 이다.

위의 수식으로부터 shaped command가 가질수 있는 최대의 deflection 값은 다음과 같다.

$$D_{ShapMax}(t) = \sum_{i=1}^n \frac{2\kappa_i}{m_1\omega^2} \sin\left(\frac{V_d A_i \omega}{2\kappa_i}\right) \quad (4.35)$$

과도 변위 제한을 위해 “임의의 원하는 deflection 값인  $D_d$ 값보다  $D_{shapmax}$ 값이 작거나 같다”는 조건건식을 도출하면 다음과 같다.

$$\sum_{i=1}^n \frac{2\kappa_i}{m_1\omega^2} \sin\left(\frac{V_d A_i \omega}{2\kappa_i}\right) \leq D_d \quad (4.36)$$

좌변과 우변을 unshap의 최대 deflection 값으로 나누어 deflection의 비율로 나타내면 다음과 같다.

$$\sum_{i=1}^n \frac{\kappa_i}{\kappa_a} \frac{\sin\left(\frac{V_d A_i \omega}{2\kappa_i}\right)}{\sin\left(\frac{V_d \omega}{2\kappa_a}\right)} \leq \frac{D_d}{D_{\max}} = D_{\lim} \quad (4.37)$$

위의 식을 이용하여  $A_3$ 를 계산하면 다음과 같다.

$$A_3 \leq \frac{2\kappa_a}{V_d \omega} \sin^{-1}\left\{\sin\left(\frac{V_d \omega}{2\kappa_a}\right)(D_{\lim} - 1) + \frac{\kappa_d}{\kappa_a} \sin\left(\frac{V_d \omega}{2\kappa_d}\right)\right\} \quad (4.38)$$

$A_3$ 는 항상 실수값을 가져야 하기 때문에  $\sin^{-1}$  항의 괄호 안의 값은 -1과 1사이가 되어야 한다.

### 4.3.2 가속도 제한을 고려한 HDLZV 입력성형기

입력성형기의 명령 일반적으로 임펄스 시퀀스와 step입력의 convolution을 통해 생성된다. 하지만 이 명령은 pulse duration( $t_p$ )에 따라 short과 long 그리고 interference command 세가지로 분류된다. 따라서 세가지의 커맨드를 구분하고 EI 형태의 shaper를 개발한다.

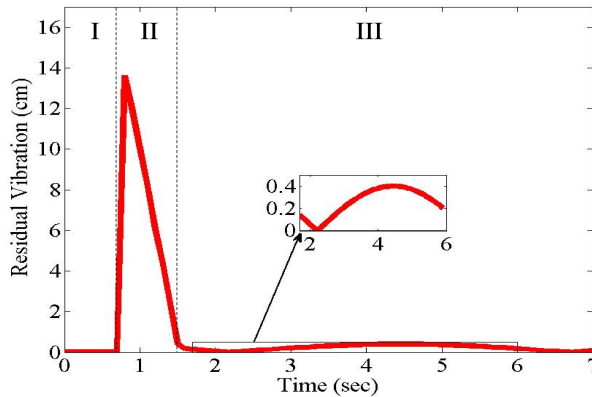


Fig. 4-11 Residual Vibration of HDLZV to  $t_p$

Fig.4-11 는  $t_p$ 에 따라 HDLZV의 잔류변위를 나타내었다. 그림에서 보는바와 같이 그래프상에서 3가지의 구간으로 구분된다. 먼저 I구간 은 short command 구간으로 실제 잔류변위가 발생하지 않고 있다. II구간은 Interference command 구간으로 커맨드가 잔류변위가 크게 발생되고 있다. III는 약간의 변위가 발생되고 있으며 다른 구간과 달리  $t_p$ 에 따라 주기적인 특성을 보인다는 것이 특징이다.

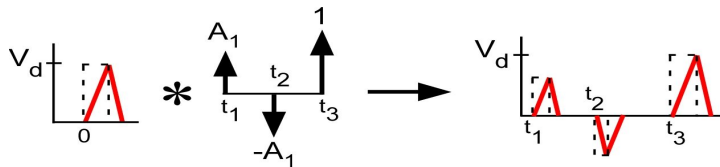


Fig. 4-12 Deconvolution of HDLZV Short Command

Fig. 4-12는 HDLZV의 short command를 나타내고 있다. HDLZV short command는 펄스입력과 임펄스 시퀀스의 convolution을 통해 생성되며 세 개의 펄스 형태로 구성된다. 이와 같은 short command가 사용되기 위해서는  $t_p$ 가 다음과 같은 조건을 만족해야한다.

$$t_p \leq t_2 - \frac{V_d A_1}{\kappa_d} \quad \text{and} \quad t_p \leq t_3 - t_2 - \frac{V_d A_2}{\kappa_a} \quad (4.39)$$

HDLZV interference command는  $t_p$ 가 short command와 long command 사이에 위치할 경우 발생된다. HDLZV interference command는 커맨드가 정상상태에 도달하지 않기 때문에 실제 약간의 잔류 변위가 발생된다.

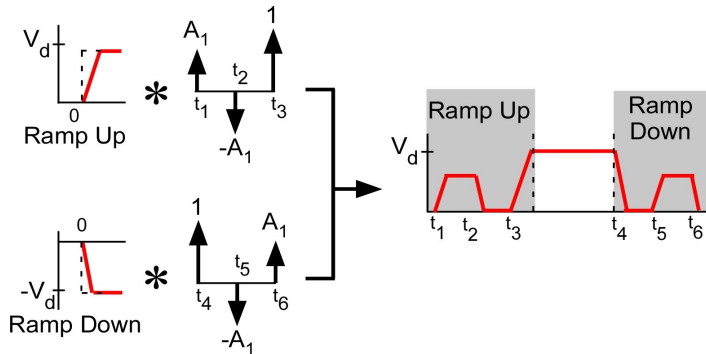


Fig. 4-13 Deconvolution of HDLZV Long Command

Fig. 4-13는 HDLZV의 long command를 나타내고 있다. HDLZV long command는 ramp up과 ramp down에 따라 각기 다른 펄스입력과 임펄스 시퀀스의 convolution을 통해 생성된다. 이와 같은 long command가 사용되기 위해서는  $t_p$ 가 다음과 같은 조건을 만족해야한다.

$$t_p \geq t_3 + \frac{V_d A_3}{\kappa_a} \quad (4.40)$$

### 4.3.2.a AHDLZV shaper의 개발

기존의 MUMZV shaper는  $A_3$ 에서의 속도가 낮아 원하는 위치까지의 이동시에 시간이 많이 걸린다는 단점이 있다. 이에 따라  $A_1$ ,  $A_2$ 의 값이  $A_3$ 보다 낮고  $A_3$ 가 1인 HDLZV shaper를 가속도를 포함하여 AHDLZV shaper를 개발한다. Fig. 4-14은 기존의 HDLZV shaper가 가속도 제한으로 인하여 속도 커맨드가 ramp 형태로 변화게되어 응답에서 잔류변위가 발생하는 것을 보여준다. 앞서 계산된 시스템의 잔류 변위에 대한 phasor 벡터를 이용한다. 여기서 우리는  $t_1$ 을 0,  $A_1$ ,  $A_2$ 와  $A_3$ 를 각각  $A_1$ ,  $-A_1$ 과 1로 가정한다. 여기서  $A_1$ 과  $A_2$ 는 크기는 같고 방향이 다른 임펄스이다.

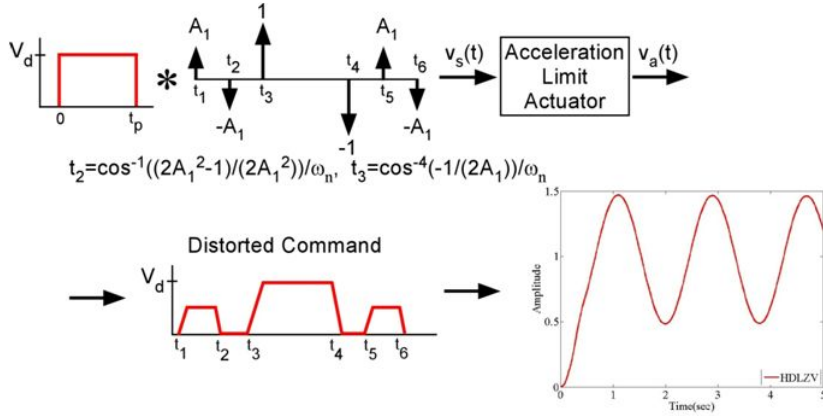


Fig. 4-14 Distorted Command of HDLZV Shaper

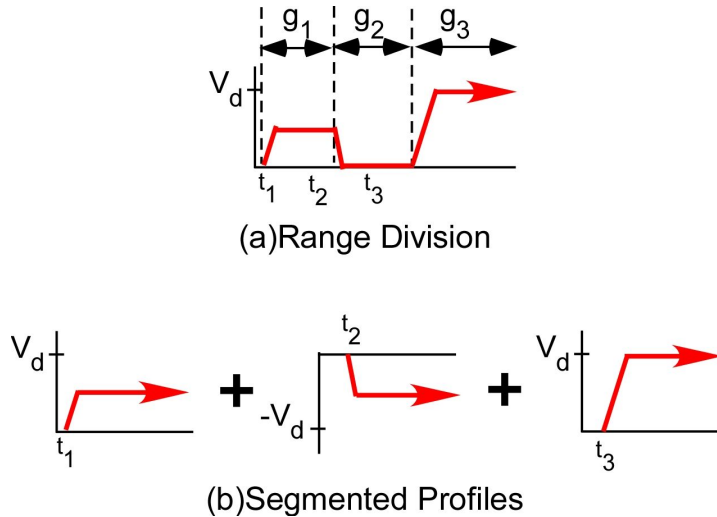


Fig. 4-15 Separation of Velocity of AHDLZV Shaper

Fig. 4-15 (a)의 실제 속도명령어를 임펄스 시간에 따라 개별적으로 나누면 Fig. 4-15 (b)와 같다. 따라서 식 (4.10)를 이용하여 각각의 임펄스  $A_1$ 과  $A_2$ 에 대한 벡터  $\vec{V}_1, \vec{V}_2, \vec{V}_3$ 는 다음과 같이 표현 된다.

$$\vec{V}_1 = \left| \frac{2\kappa_a \sin\left(\frac{1}{2} \frac{\omega_n A_1 V_d}{\kappa_a}\right)}{m_1 \omega_n^2} \right| \angle \left[ \omega_n t_1 + \frac{1}{2} \frac{\omega_n A_1 V_d}{\kappa_a} \right] \quad (4.41)$$

$$\vec{V}_2 = \left| \frac{2\kappa_d \sin\left(\frac{-1}{2} \frac{\omega_n A_1 V_d}{\kappa_d}\right)}{m_1 \omega_n^2} \right| \angle \left[ \omega_n t_2 - \frac{1}{2} \frac{\omega_n A_1 V_d}{\kappa_d} \right] \quad (4.42)$$

$$\vec{V}_3 = \left| \frac{2\kappa_a \sin\left(\frac{1}{2} \frac{\omega_n V_d}{\kappa_a}\right)}{m_1 \omega_n^2} \right| \angle \left[ \omega_n t_3 + \frac{1}{2} \frac{\omega_n V_d}{\kappa_a} \right] \quad (4.43)$$

위의 두 벡터  $\vec{V}_1, \vec{V}_2, \vec{V}_3$ 의 크기와 위상각을 정리하면 다음과 같다.

$$\vec{V}_1 = |1| \angle [0] \quad (4.44)$$

$$\vec{V}_2 = \left| \frac{\sin\left(\frac{-1}{2} \frac{\omega_n V_d A_2}{\kappa_d}\right)}{\sin\left(\frac{1}{2} \frac{\omega_n V_d A_1}{\kappa_a}\right)} \right| \angle \left[ \omega_n t_2 - \frac{\omega_n V_d}{2} \left( \frac{A_1}{\kappa_d} - \frac{A_1}{\kappa_a} \right) \right] \quad (4.45)$$

$$\vec{V}_3 = \left| \frac{\sin\left(\frac{1}{2} \frac{\omega_n V_d A_3}{\kappa_a}\right)}{\sin\left(\frac{1}{2} \frac{\omega_n V_d A_1}{\kappa_a}\right)} \right| \angle \left[ \omega_n t_3 - \frac{\omega_n V_d}{2\kappa_a} (A_1 - A_3) \right] \quad (4.46)$$

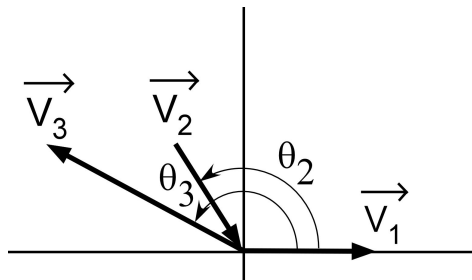


Fig. 4-16 Vector Diagram of AHDLZV shaper

위의 세 벡터를 이용하여 임펄스의 시간  $t_2$ 와  $t_3$ 를 계산하기 위하여 Fig. 4-16의 vector diagram approach를 활용하여 AHDLZV shaper의 임펄스의 시간을 결정할

수 있다.  $a_2 = \angle \vec{V}_2$  와  $a_3 = \angle \vec{V}_3$  같다. 여기에 cosines law를 이용하여 식(4.47)와 식(4.48)을 얻는다.

$$t_2 = \frac{1}{w_n} \left[ \cos^{-1} \left\{ \frac{1}{2} \left( \frac{\kappa_a S_1}{\kappa_d S_2} + \frac{\kappa_d S_2}{\kappa_a S_1} - \frac{\kappa_a S_3^2}{\kappa_d S_1 S_2} \right) \right\} - \frac{\omega_n A_1 V_d}{2} \left( \frac{1}{\kappa_d} - \frac{1}{\kappa_a} \right) \right] \quad (4.47)$$

$$t_3 = \frac{1}{w_n} \left[ \cos^{-1} \left\{ \frac{1}{2} \left( -\frac{S_1}{S_3} - \frac{S_3}{S_1} + \frac{\kappa_d S_2^2}{\kappa_a S_1 S_3} \right) \right\} - \frac{\omega_n V_d}{2} (1 - A_1) \right] \quad (4.48)$$

$$S_1 = \sin \left( \frac{\omega_n V_d A_1}{2\kappa_a} \right), \quad S_2 = \sin \left( \frac{\omega_n V_d A_1}{2\kappa_d} \right), \quad S_3 = \sin \left( \frac{\omega_n V_d}{2\kappa_a} \right)$$

식(4.49)와 (4.50)에  $\cos^{-1}$  term은 반드시 -1과 1사이에 있어야 한다. 그래야만  $\cos^{-1}$  term이 실수로 계산이 되어  $t_2, t_3$ 를 얻을 수 있다.

AHDLZV shaper를 활용한 유연시스템의 stop motion을 갖춘 AHDLZV shaper의 나머지 switching times은 start motion의 과정과 같은 방법으로 계산 하면 된다. 계산된  $t_5$ 와  $t_6$ 는 다음과 같다.

$$t_5 = \frac{1}{w_n} \left[ \cos^{-1} \left\{ \frac{1}{2} \left( \frac{\kappa_d S_4}{\kappa_a S_1} + \frac{\kappa_d S_2}{\kappa_a S_4} - \frac{\kappa_a S_2^2}{\kappa_d S_4 S_1} \right) \right\} - \frac{\omega_n V_d}{2} \left( \frac{A_1}{\kappa_a} - \frac{1}{\kappa_d} \right) \right] \quad (4.49)$$

$$t_6 = \frac{1}{w_n} \left[ \cos^{-1} \left\{ \frac{1}{2} \left( -\frac{S_4}{S_2} - \frac{S_2}{S_4} + \frac{\kappa_a S_1^2}{\kappa_d S_2 S_4} \right) \right\} - \frac{\omega_n V_d}{2\kappa_d} (A_1 - 1) \right] \quad (4.50)$$

$$S_4 = \sin \left( \frac{\omega_n V_d}{2\kappa_d} \right)$$

stop motion의 시작 시간은  $t_p$ 에 의해 결정되며 따라서 구동기 드라이브를 고려한 zero residual vibration 솔루션인 AHDLZV shaper의 전체 시퀀스는 식(4.47), 식(4.48), 식(4.49)와 식(4.50)으로 표시된다.

AHDLZV shaper의 경우  $t_i$ 가 항상 실수값을 가져야 한다.[31] 또한 임펄스의 간격



이 원하는속도에서 가속도(속도 감소시에는 감속도)로 나눈 값보다 커야된다. 그 이유는 이조건을 만족하지 못할 경우 속도프로파일이 원하는 속도까지 도달하지 못하여 커맨드가 정상상태에 도달하지 못한다.[17]

$$t_{i+1} - t_i \geq \frac{V_d A_i}{\kappa_i} \quad (\kappa_i \text{는 } A_i \text{가 양수일때 } \kappa_a \text{ 음수일때 } \kappa_d) \quad (4.51)$$

만약 위의 식(4.51)을 만족하지 못할때는 입력성형기의 잔류진동 저감 성능의 감소를 가져온다.

### 4.3.2.b AHDLZV shaper의 과도변위 제약조건

Fig.4-17 shaped된 AHDLZV의 속도입력을 이용하여 deflection의 최대값을 계산한다.

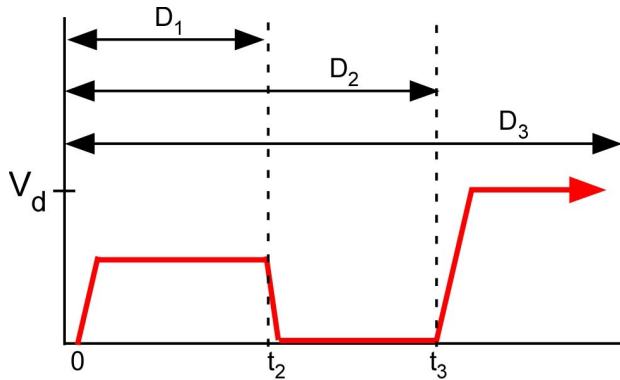


Fig. 4-17 Shaped Acceleration Limits Command

따라서 deflection의 식을 일반화 하여 summation 형태로 나타내면 다음과 같다.

$$D_i(t) = \sum_{i=1}^n \frac{2\kappa_i}{m_1 \omega_n^2} \sin\left(\frac{V_d A_i \omega_n}{2\kappa_i}\right) \sin\left\{\omega_n\left(t - t_i - \frac{V_d A_i}{2\kappa_i}\right)\right\} \quad (4.52)$$

여기서  $\kappa_i$ 는  $A_i$ 가 양수일때는  $\kappa_a$  음수일때는  $\kappa_d$ 이다.

위의 수식으로부터 shaped command가 가질수 있는 최대의 deflection 값은 다음과 같다.

$$D_{ShapMax}(t) = \sum_{i=1}^n \frac{2\kappa_i}{m_1 \omega_n^2} \sin\left(\frac{V_d A_i \omega_n}{2\kappa_i}\right) \quad (4.53)$$

과도 변위 제한을 위해 “임의의 원하는 deflection 값인  $D_d$  값보다  $D_{shapmax}$  값이 작거나 같다”는 조건식을 도출하면 다음과 같다.

$$\sum_{i=1}^n \frac{2\kappa_i}{m_1\omega_n^2} \sin\left(\frac{V_d A_i \omega_n}{2\kappa_i}\right) \leq D_d \quad (4.54)$$

좌변과 우변을 unshap의 최대 deflection 값으로 나누어 deflection의 비율로 나타내면 다음과 같다.

$$\sum_{i=1}^n \frac{\sin\left(\frac{V_d A_i \omega_n}{2\kappa_i}\right)}{\sin\left(\frac{V_d \omega_n}{2\kappa_a}\right)} \leq \frac{\kappa_i}{\kappa_a} \frac{D_d}{D_{max}} = \frac{\kappa_i}{\kappa_a} D_{lim} \quad (4.55)$$

여기서  $\kappa_i$ 는  $A_i$ 가 양수일때는  $\kappa_a$  음수일때는  $\kappa_d$ 이다.

위의 식을 이용하여  $A_1$  대한 값을 시스템 변수들을 대입하여 MATLAB®의 fsolve를 이용하여 계산하여 사용하였다.

#### 4.4 가속도제한 과도변위저감 입력성형제어기 평가

이번 절에서는 MATLAB®을 이용하여 앞에서 개발한 각각의 shaper에 대하여 numerical simulation을 진행 한다. 기존의 HDLZV와 AHDLZV shapers의 성능 비교를 한다. 시뮬레이션의 기본적인 변수들의 값은 다음과 같이 설정 하였다.

Table 4-1. System Parameter of AMUMZV and AHDLZV Shapers

변수	$m_1$	$m_2$	$k$	$\kappa_a$	$\kappa_d$	$V_d$	$t_p$
값	1kg	1kg	1N/m	1m/sec <sup>2</sup>	1.6m/sec <sup>2</sup>	0.2m/sec	3.5sec

위의 설정된 값은  $\kappa_a$ 와  $\kappa_d$ 의 경우 값이 같을 경우 linear 솔루션과 같은 결과를 가지게 되므로 가속도와 감속도의 값을 서로 다른 값으로 설정 하였으며 일반적으로 가속도 보다 감속도가 크기 때문에  $\kappa_d$ 를  $\kappa_a$ 보다 작게 나타내었으며 실제 모터의 가

속도와 감속도는 최대 속도의 2배 이상의 값을 가진다. 이 값을 이용한 simulation은  $\kappa_a$ ,  $\kappa_d$ , 그리고  $t_p$ 에 대하여 잔류변위 저감 성능과 설계변수  $\kappa_a$ 와  $\kappa_d$ 에 대한 강건성을 기존의 linear 기반의 shaper와 비교하였다.

#### 4.4.1 ALMUMZV shaper의 분석

3절에서 개발한 ALMUMZV shaper의 numerical simulation을 진행 한다. 시뮬레이션에 사용된 변수 값은 Table 4-1과 같이  $\kappa_a=1\text{m/s}^2$ ,  $\kappa_d=1.6\text{m/s}^2$ ,  $t_p = 3.5\text{sec}$  그리고  $V_d = 0.2\text{m/s}$ 로 설정하였으며 실험에 따라  $t_p$ ,  $\kappa_a$ , 그리고  $\kappa_d$ 를 변경하면서 실험을 진행 하였다.

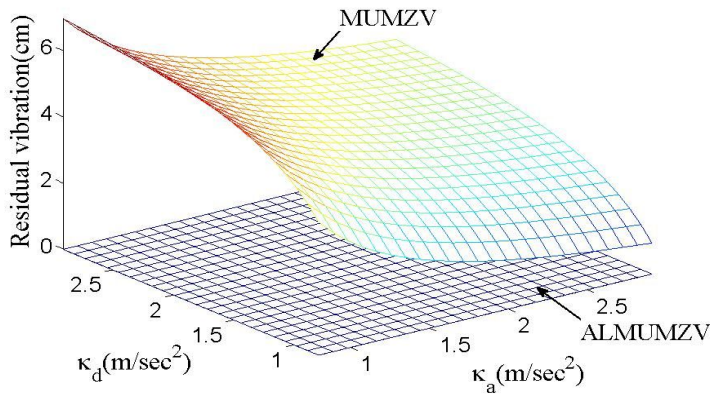


Fig. 4-18 Residual Vibration of ALMUMZV Shaper to  $\kappa_a$  and  $\kappa_d$

위의 Fig. 4-18은  $\kappa_a$ 와  $\kappa_d$ 에 대하여 MUMZV와 AMLUMZV shapers의 잔류 변위의 저감 성능을 비교한 그림이다. 변수 설정은 Table 4-1과 동일 하며  $\kappa_a$ 와  $\kappa_d$ 의 범위를 0.8~3의 영역에서 진행 하였다. ALUMZV shaper의 경우 전체 적인 영역에서의 잔류 변위가 0이지만 MUMZV shaper의 경우 잔류변위가 그래프 상에서 0~6cm정도의 변위가 발생한다. 하지만 ALMUMZV shaper의 경우 zero변위를 보이고 있다.

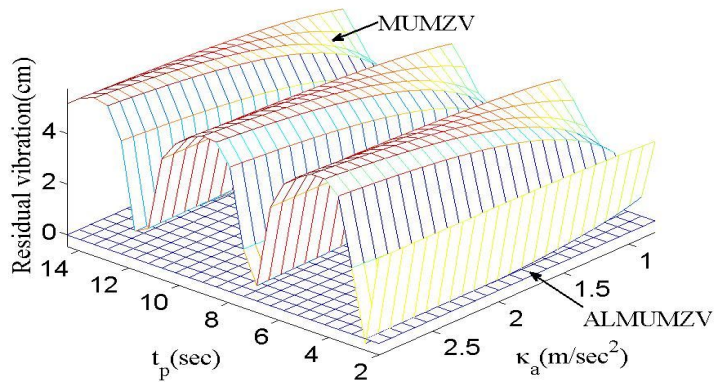


Fig. 4-19 Residual Vibration of ALMUMZV Shaper to  $\kappa_a$  and  $t_p$

위의 Fig. 4-19 는  $\kappa_a$ 와  $t_p$ 에 대하여 ALMUMZV와 MUMZV shapers의 잔류 변위의 크기를 나타내고 있다. 변수 설정은 Table 4-1과 동일하며  $\kappa_a$  범위를 0.1~3,  $t_p$ 의 범위를 2~15(sec)로 설정하여 진행 하였다. ALMUMZV shaper의 경우 전체적인 영역에서의 잔류 변위가 0이지만 MUMZV shaper의 경우 잔류변위가 그래프 상에서 약 0~20cm정도의 변위가 발생한다.  $t_p$ 에 따라 MUMZV shaper의 변위가 주기적으로 반복 되고 있다. 이는 stop motion의 시작 지점의 초기 변위값이 0이 아니므로  $t_p$ 값에 따라 잔류변위의 크기가 주기적인 특성을 보인다.

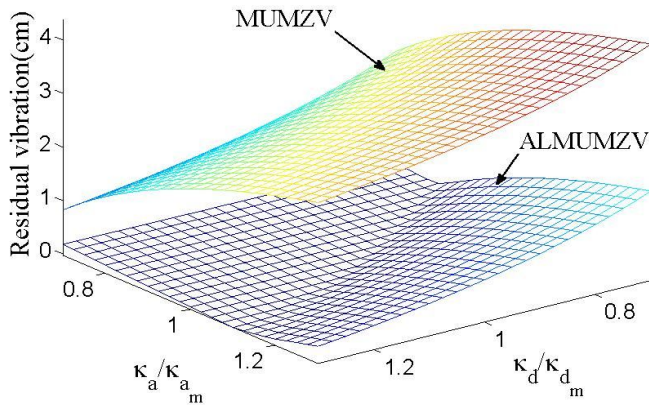


Fig. 4-20 Sensitivity of ALMUMZV Shaper to  $\kappa_a$  and  $\kappa_d$

위의 Fig. 4-20은  $\kappa_a$ 와  $\kappa_d$ 에 대하여 ALMUMZV와 MUMZV shapers의 강건성을 나타내고 있다. 변수 설정은 Table 4-1과 동일 하며  $\kappa_{am}$ 을 1,  $\kappa_{dm}$ 을 1.6로 설정하고

진행 하였다. ALMUMZV shaper의 경우 전체 적인 영역에서의 잔류 변위가 MUMZV보다 낮게 나타나고 있다. 또한  $\kappa_a/\kappa_{am}$ 와  $\kappa_d/\kappa_{dm}$ 의 값이 1일 때 잔류 변위의 크기가 0으로 낮게 나타나고 있다.

Simulation을 통해 잔류변위의 크기와 각각의 변수들의 강건성을 평가한 결과 새로 개발한 ALMUMZV shaper의 경우 기존의 MUMZV shaper와 비교하여 잔류 변위가 줄어들었으며 각 설계 변수에 대한 강건성 역시 증가함을 보인다.

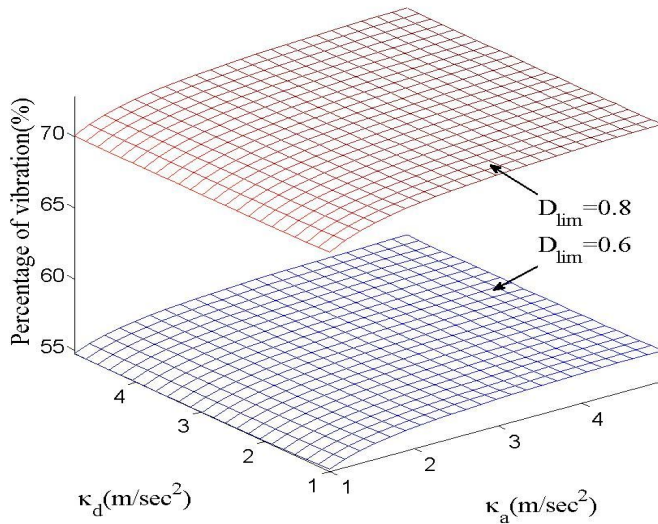


Fig. 4-21 Transient Deflection of ALMUMZV Shaper to  $\kappa_a$  and  $\kappa_d$

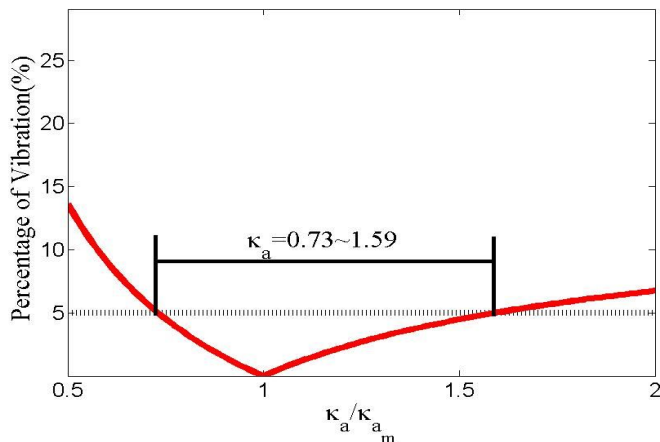


Fig. 4-22 Sensitivity of ALMUMZV Shaper to  $\kappa_a/\kappa_{am}$

위의 Fig. 4-21은  $\kappa_a$ 와  $\kappa_d$ 에 대하여 ALMUMZV shapers의 과도변위를 나타내고 있다. 변수 설정은 Table 4-1과 동일하게 설정하였다. ALMUMZV shaper의 경우 전체 적인 영역에서의 과도변위의 크기가  $D_{lim}$ 값에 의해 제어되고 있다. unshape의 과도변위의 80%를 제한했을 경우 80%보다 낮은 과도변위를 보이며 60%를 제한일 경우 역시 60%이하로 제어가 되고 있다. 이는 새로 개발된 입력성형기가 과도변위 저감을 제어하고 있음을 보여준다.

위의 Fig. 4-22 는 줄 길이  $\kappa_a$ 에 대하여 ALMUMZV의 가속도의 경사의 각도에 따라 unshape 일때의 잔류변위의 백분율을 나타낸 것이다. 허용 잔류변위를 5%로 가정했을 때 기울기  $45^\circ$ ( $\kappa_a=1\text{m/sec}^2$ )을 기준으로  $\kappa_a/\kappa_{am}$ 의 값이 0.73~1.59의 값을 가질 때 5%의 잔류진동이 발생 했으며 이거을 기울기로 환산하면  $36.1^\circ\sim 57.8^\circ$ 의 기울기 범위 안에서 입력성형제어기를 작동할 경우 잔류 변위의 5%이내의 값을 얻을수 있다.

#### 4.4.2 AHDLZV shaper의 분석

MATLAB<sup>®</sup>를 이용하여 3절에서 개발한 AHDLZV shaper의 simulation을 진행한다. 시뮬레이션에 사용된 변수 값은 Table 4-1과 같이  $\kappa_a=1\text{m/s}^2$ ,  $\kappa_d=1.6\text{m/s}^2$ ,  $t_p=3.5\text{sec}$  그리고  $V_d=0.2\text{m/s}$ 로 설정하였으며 실험에 따라  $t_p$ ,  $\kappa_a$  그리고  $\kappa_d$ 를 변경하면서 실험을 진행 하였다.

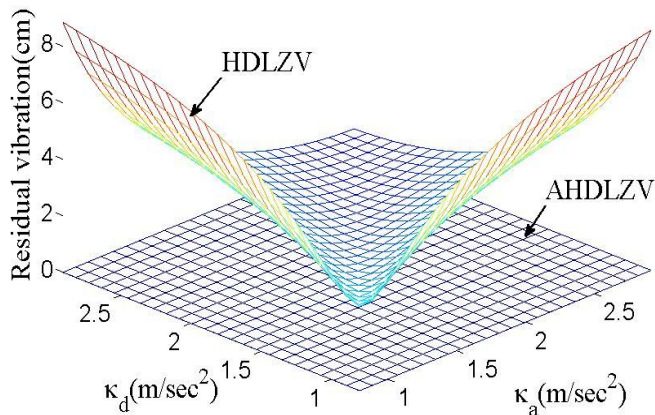


Fig. 4-23 Residual Vibration of AHDLZV Shaper to  $\kappa_a$  and  $\kappa_d$

위의 Fig. 4-23은  $\kappa_a$ 와  $\kappa_d$ 에 대하여 HDLZV와 AHDLZV shapers의 잔류 변위의 저감 성능을 비교한 그림이다. 변수 설정은 Table 4-1과 동일 하며  $\kappa_a$ 와  $\kappa_d$ 의 범위를 0.8~3의 영역에서 진행 하였다. AHDLZV shaper의 경우 전체 적인 영역에서의 잔류 변위가 0이지만 HDLZV shaper의 경우 잔류변위가 그래프 상에서 0~6cm 정도의 변위가 발생한다. 하지만 AHDLZV shaper의 경우 zero변위를 보이고 있다.

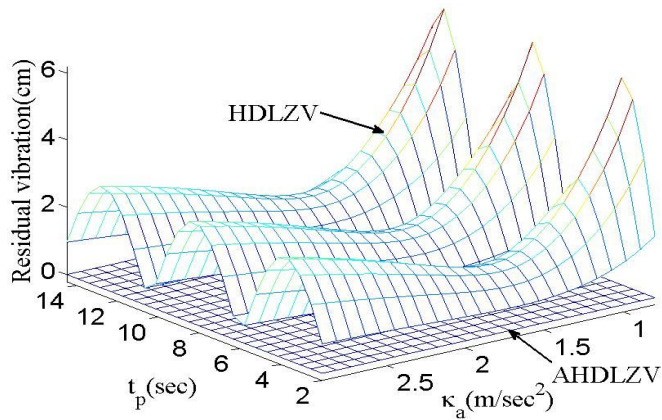


Fig. 4-24 Residual Vibration of ALHDLZV Shaper to  $\kappa_a$  and  $t_p$

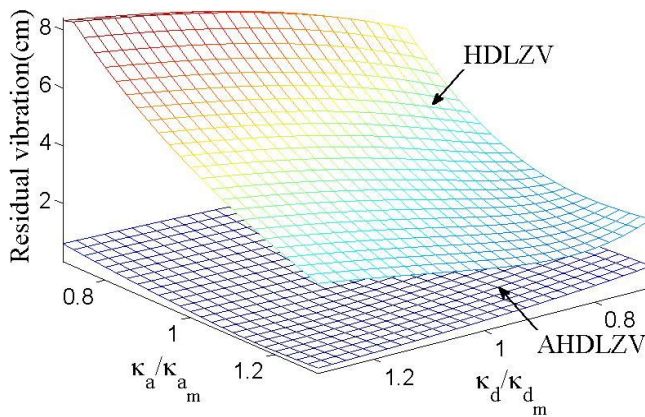


Fig. 4-25 Sensitivity of ALMUMZV Shaper to  $\kappa_a$  and  $\kappa_d$

위의 Fig. 4-24 는  $\kappa_a$ 와  $t_p$ 에 대하여 AHDLZV와 HDLZV shapers의 잔류 변위의 크기를 나타내고 있다. 변수 설정은 Table 4-1과 동일 하며  $\kappa_a$  범위를 0.1~3,  $t_p$ 의 범위를 2~15(sec)로 설정하여 진행 하였다. AHDLZV shaper의 경우 전체 적인 영

역에서의 잔류 변위가 0이지만 HDLZV shaper의 경우 잔류변위가 그래프 상에서 약 0~11cm 정도의 변위가 발생한다.  $t_p$ 에 따라 HDLZV shaper의 변위가 주기적으로 반복 되고 있다. 이는 stop motion의 시작 지점의 초기 변위값이 0이 아니므로  $t_p$ 값에 따라 잔류변위의 크기가 주기적인 특성을 보인다.

위의 Fig. 4-25은  $\kappa_a$ 와  $\kappa_d$ 에 대하여 AHDLZV와 HDLZV shapers의 강건성을 나타내고 있다. 변수 설정은 Table 4-1과 동일 하며  $\kappa_{am}$ 을 1,  $\kappa_{dm}$ 을 1.6로 설정하고 진행 하였다. ALUMZV shaper의 경우 전체 적인 영역에서의 잔류 변위가 MUMZV shaper보다 낮게 나타나고 있다. 또한  $\kappa_a/\kappa_{am}$ 와  $\kappa_d/\kappa_{dm}$ 의 값이 1일 때 잔류 변위의 크기가 0으로 낮게 나타나고 있다.

Simulation을 통해 잔류변위의 크기와 각각의 변수들의 강건성을 평가한결과 새로 개발한 AHDLZV shaper의 경우 기존의 HDLZV shaper와 비교하여 잔류변위가 줄어들었으며 각 설계 변수에 대한 강건성 역시 증가함을 보인다.

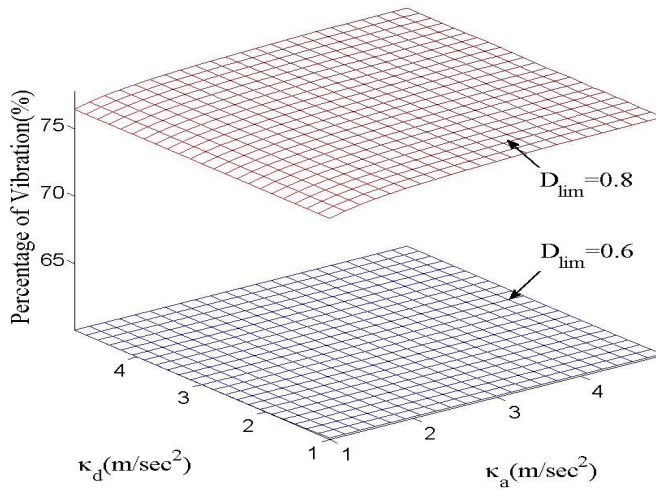


Fig. 4-26 Transient Deflection of AHDLZV Shaper to  $\kappa_a$  and  $\kappa_d$

위의 Fig. 4-26은  $\kappa_a$ 와  $\kappa_d$ 에 대하여 AHDLZV shapers의 과도변위를 나타내고 있다. 변수 설정은 Table 4-1과 동일하게 설정하였다. AHDLZV shaper의 경우 전체 적인 영역에서의 과도변위의 크기가  $D_{lim}$ 값에 의해 제어되고 있다. unshape의 과도변위의 80%를 제한했을 경우 80%보다 낮은 과도변위를 보이며 60%를 제한할 경우 역시 60%이하로 제어가 되고 있다. 이는 새로 개발된 입력성형기가 과도변위 저감을 제어하고 있음을 보여준다.



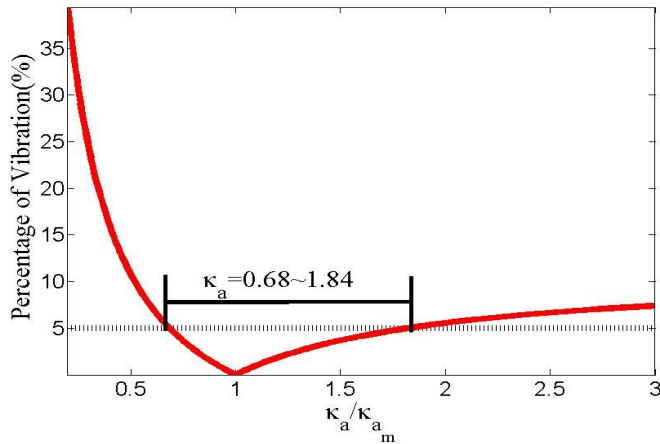


Fig. 4-27 Sensitivity of AHDLZV Shaper to  $\kappa_a/\kappa_{am}$

위의 Fig. 4-27 는 줄 길이  $\kappa_a$ 에 대하여 AHDLZV의 가속도의 경사의 각도에 따라 unshape 일때의 잔류변위의 백분율을 나타낸 것이다. 허용 잔류변위를 5%로 가정했을 때 기울기  $45^\circ$ ( $\kappa_a=1\text{m}/\text{sec}^2$ )을 기준으로  $\kappa_a/\kappa_{am}$ 의 값이 0.68~1.84의 값을 가질 때 5%의 잔류진동이 발생 했으며 이거을 기울기로 환산하면  $34.2^\circ \sim 61.4^\circ$ 의 기울기 범위 안에서 입력성형제어기를 작동할 경우 잔류 변위의 5%이내의 값을 얻을 수 있다.

## 4.5 가속도제한 과도변위저감 입력성형기의 검증

### 4.5.1 실험장치 설정

본 연구에서 개발된 입력성형제어기의 과도변위 제한 및 잔류변위 저감 성능을 실험적으로 검증하기 위해 Fig. 4-28의 실험 장치를 사용했다. mini-bridge crane 은 Siemens PLC (programmable logic controller)로 구성되어있고, 이론 검증을 위해 시스템 구동을 위한 pendant와 실험 data의 입출력할 수 있게 프로그램을 개발 하였다. 실험장치의 구동에는 절대 엔코더를 사용하는 3개의 servo motor를 사용했고 payload의 흔들림을 측정하기 위해 Siemens VS720x 계열의 intelligent vision sensor를 사용하였다.

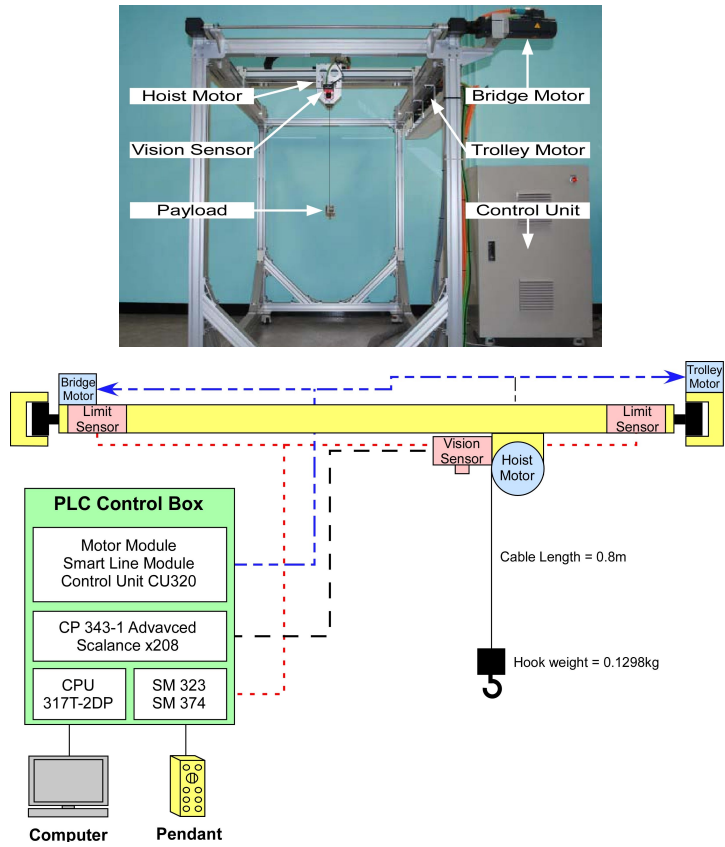


Fig. 4-28 Mini-Bridge Crane for Testbed

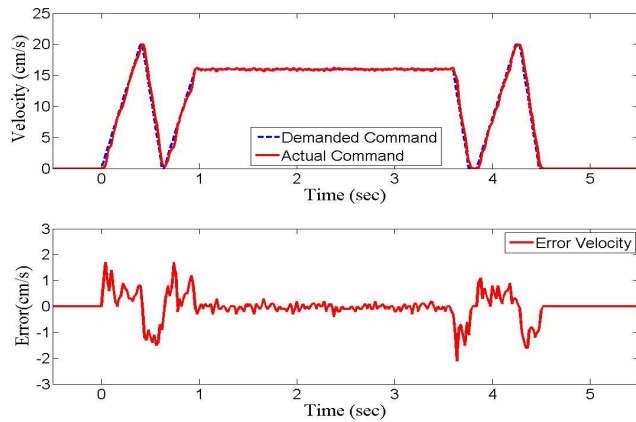
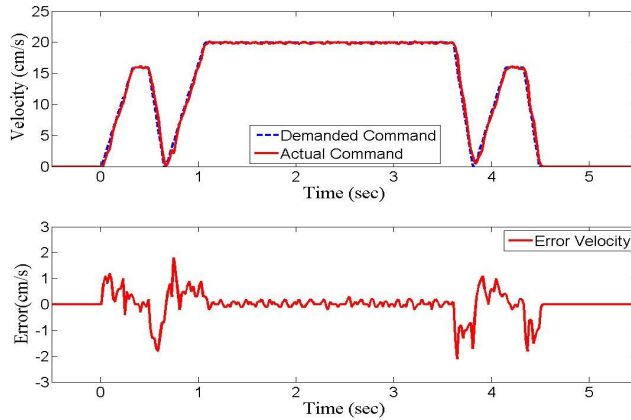


Fig. 4-29 Experiment of Velocity Error by MUMZV Shaper



**Fig. 4-30 Experiment of Velocity Error by HDLZV Shaper**

가속도 제한이 고려된 velocity profile을 upload를 통해 실험을 하였으며, upload 하는 속도프로파일은 ramp 함수를 이용하여 만들고, 이를 motion control 할 수 있는 실험 장치의 모터드라이버의 세팅을 모터의 가속도와 감속도를 실험장치의 최대값인  $3.6 \times 10^8 \text{ rad/sec}$ 로 모터 세팅을하여 생성된 프로파일을 잘 추적할수 있도록 하였다. Fig. 4-29, Fig.-30은 실제 ideal solution을 가속도제한 속도프로파일을 입력한 후 입력한 속도 프로파일과 실제 모터의 속도값을 비교하였다. 실제 나타난 error plot의 경우와 같이 최대  $\pm 2 \text{ cm/sec}^2$ 의 오차는 있으나 명령된 속도 프로파일을 허용범위 안에서 추적하고 있다. intelligent vision sensor를 통해 payload 변위측정을 하였고, MATLAB<sup>®</sup> software을 통해 측정된 변위를 분석했다. 실험은 Table 4-2 설정하였으며 start-stop motion을 통해 cable length 또는  $t_p$ 을 바꿔가며 잔류변위를 검증 했다.

**Table 4-2. System Parameter for Experiment**

변수	L	$\kappa_a$	$\kappa_d$	$V_d$	$t_p$
값	0.8m	1m/sec <sup>2</sup>	1.6m/sec <sup>2</sup>	0.2m/sec	3.5sec

## 4.5.2 실험 결과

ramp 형태의 속도 프로파일을 생성하여 mini-bridge crane을 활용해 실험을 진행했다. 진행시의 변수 값은 Table 4-2와 동일하게  $\kappa_a=1\text{m/s}^2$ ,  $\kappa_d=1.6\text{m/s}^2$ ,  $t_p = 3.5\text{sec}$ ,  $L = 0.8\text{m}$  그리고  $V_d = 0.2\text{m/s}$ 로 설정하였으며 실험에 따라  $L$ ,  $t_p$  그리고  $\kappa_a$ 를 변경하면서 실험을 진행 하였다.

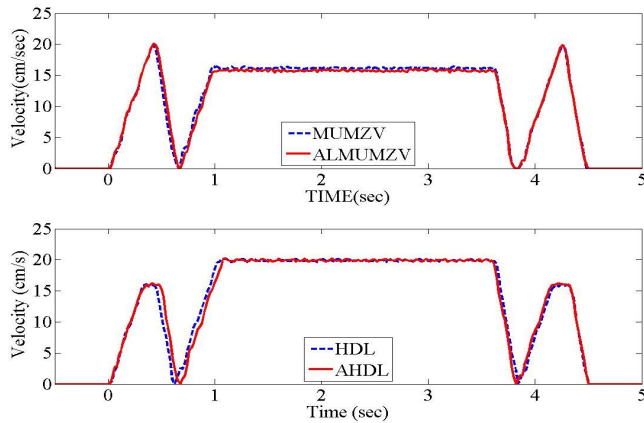


Fig. 4-31 Velocity Command of ALMUMZV and AHDLZV Shapers

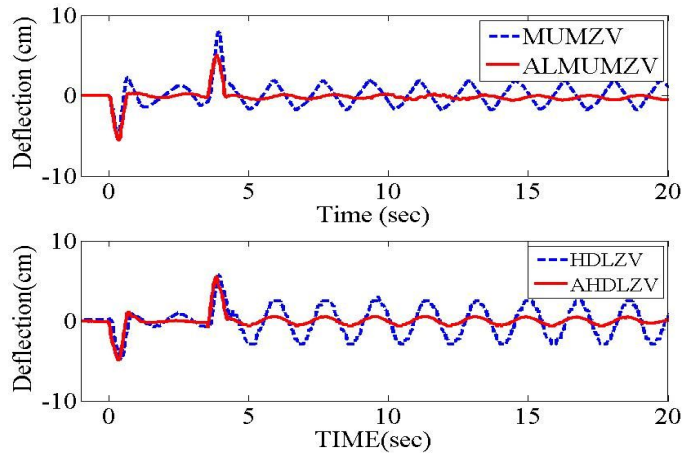


Fig. 4-32 Deflection Response of ALMUMZV and AHDLZV Shapers

Fig. 4-31는 실험에 사용된 속도 프로 파일을 나타내고 있다. 실제적으로 커맨드의 임펄스의 크기는 같지만 시간의 차이만 나타난다. 실제 모터의 속도를 나타내기 때문에 이론적인 속도와 비교하여 약간의 오차가 있지만 이론적인 속도의  $\pm 2\text{cm/sec}^2$  이내이다.

Fig. 4-32은 실험을 통해 얻은 Deflection Response를 나타내고 있다. 과도 변위의 크기 변화는 거의 차이는 없으나 잔류변위의 경우 MUMZV shaper가 약 3cm 정도의 크기를 보이고 ALMUMZV shaper의 경우 거의 변위가 발생하지 않고 있다. 그리고 HDLZV shaper도 약 3cm 정도의 크기를 보이고 AHDLZV shaper 보다 작은 변위가 발생하고 있다.

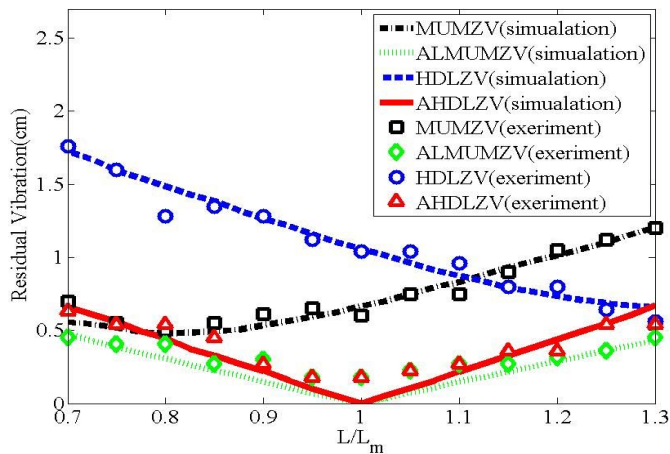


Fig. 4-33 Sensitivity of ALMUMZV and AHDLZV Shapers to  $L/L_m$

위의 Fig. 4-33은 줄길이  $L$ 에 대한 Modeling error에 대한 sensitivity curve 이다. 실험변수 값은  $\kappa_a=0.8\text{m/s}^2$ ,  $\kappa_d=1.6\text{m/s}^2$ ,  $t_p = 3.5\text{sec}$ ,  $L = 0.8\text{m}$  그리고  $V_d = 0.2\text{m/s}$ 로 설정하였다.  $L/L_m$ 이 1일 때 기존의 MUMZV와 HDLZV shapers의 경우 잔류변위가 발생하고 있다. 하지만 ALMUMZV와 AHDLZV shapers의 경우 잔류변위를 0으로 만들고 있다. 이는 ALMUMZV와 AHDLZV shapers가 보다 강건하는 것을 나타낸다.

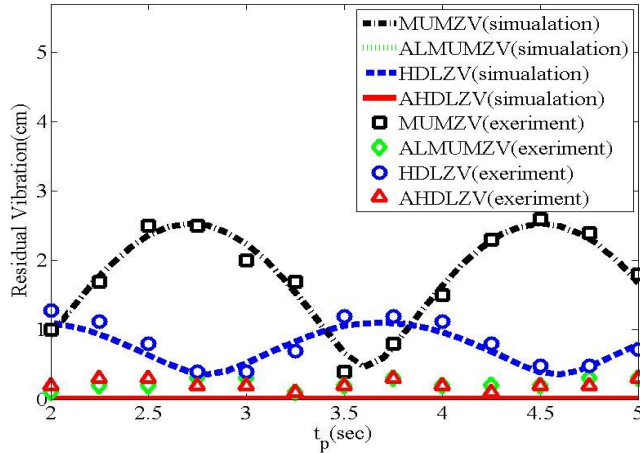


Fig. 4-34 Residual Vibration of ALMUMZV and AHDLZV Shapers to  $t_p$

위의 Fig. 4-34은 pulse duration  $t_p$ 에 대한 잔류변위를 나타낸다. 실험변수 값은  $\kappa_a=0.8m/s^2$ ,  $\kappa_d=1.6m/s^2$ ,  $L = 0.8m$  그리고  $V_d = 0.2m/s$ 로 설정하였다. 기존의 MUMZV와 HDLZV shapers의 경우 변위가 발생 되고 있으며 ALMUMZV와 AHDLZV shapers의 경우 잔류변위를 0으로 나타나고 있다. 또한 ideal solution의 경우 잔류변위가 발생하기 때문에 변위가 주기적인 특성을 보이고 있다.

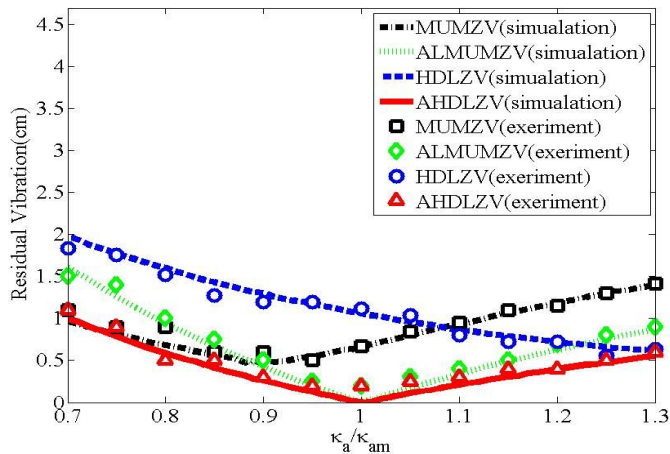


Fig. 4-35 Sensitivity of ALMUMZV and AHDLZV Shapers to  $\kappa_a/\kappa_{am}$

위의 Fig. 4-35은 가속도제한의 중요 변수중 하나인  $\kappa_a$ 에 대한 modeling error에 대하여 강건성을 나타낸 것이다. 실험변수 값은  $\kappa_a=0.8m/s^2$ ,  $\kappa_d=1.6m/s^2$ ,  $t_p =$

3.5sec,  $L = 0.8\text{m}$  그리고  $V_d = 0.2\text{m/s}$ 로 설정하였다. MUMZV와 HDLZV shapers의 경우 잔류 변위를 저감 하지 못하고 있으며 ALUMZV shaper의 경우는  $\kappa_a/\kappa_{am}$ 이 1인 경우 잔류 변위가 0임을 보이고 있다.

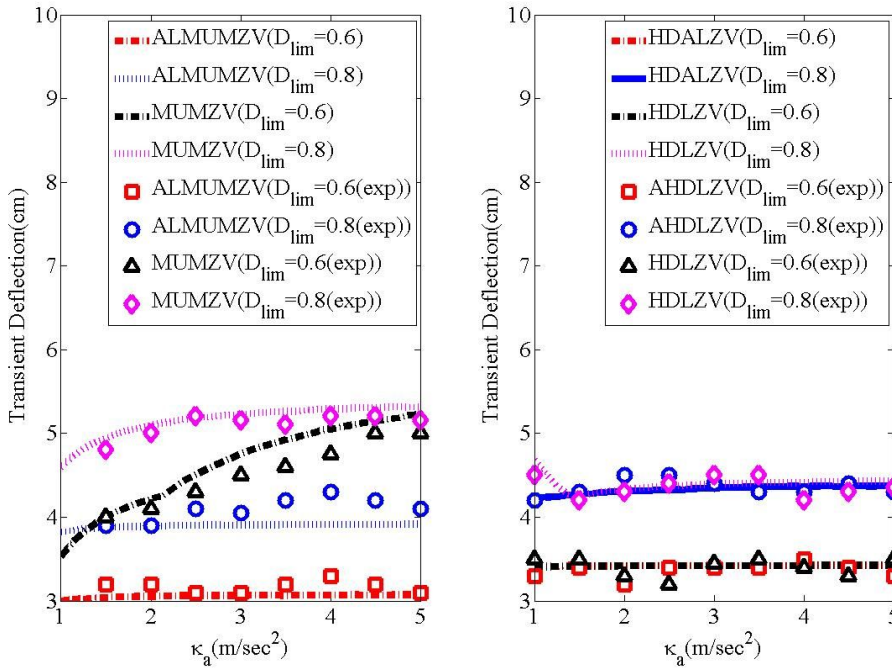


Fig. 4-36 Transient Deflection of ALMUMZV and AHDLZV Shapers to  $\kappa_a$

Fig. 4-36은 개발한 ALMUMZV,와 AHDLZV, MUMZV 그리고 HDLZV shapers의  $\kappa_a$ 에 대한 과도변위 저감 성능을 나타내고 있다. ideal shaper의 경우  $D_{lim}$ 의 값에 따라 과도변위 자체가 저감이 되어 보이지만 입력성형기의 본 목적중 하나인 잔류진동을 없애지 못하는 것을 앞부분에서의 실험과 시뮬레이션을 통해 나타내었으며  $D_{lim}$  값에 따른 속도입력의 크기가 변하기 때문에 그래프만을 볼 때 과도변위가 저감되어 보인다. HDLZV shaper의 경우  $\kappa_a$ 가 약 1~1.4사이와 MUMZV shaper의 경우  $D_{lim}$ 이 0.3일때의 그래프를 보면 과도변위가 계속 증가하고 있다. 즉 제대로 제어가 이루어지지 않고 있음을 이야기 하고 있다.

AHDLZV shaper의 경우  $D_{lim}=0.4$ 에서 ALUMZV shaper에 비해 많이 저감 하고 있지는 않지만 보다 낮은 저감 성능을 보이고 있으며 ALMUMZV shaper의 경우  $D_{lim}$ 의 값에 따라 비례적으로 과도 변위를 저감 하고 있다.

## 4.6 결론

본 논문에서는 산업현장에서 일반적으로 사용하고 있는 구동기 드라이브의 가속도 제한에 의한 잔류변위저감 및 과도변위 저감 고려한 exact 형태의 ALMUMZV와 AHDLZV shapers를 제시하였다. 제시한 shaper는 가속도 제한시 발생하는 ramp step에 대한 응답을 phasor form 형태로 나타내고 이것을 vector diagram approach를 활용하여 exact solution 형태로 개발 되었다. 제어기의 성능 평가를 위해 설계 변수에 대한 잔류변위의 크기와 과도변위, modeling error에 대한 sensitivity를 기존의 shaper와 비교 하였으며 성능 비교에서 성능 향상을 보였으면 sensitivity역시 보다 modeling error에 강건함을 보였다. 이를 검증하기 위하여 실제 pendulum system 실험장비인 mini-bridge crane에 적용하여 주파수에 대한 modeling error,  $t_p$ 에 따른 잔류변위를 실험을 통해 검증 하였다.



## 5 논문의 결론

본 논문에서는 산업현장에서 일반적으로 사용하고 있는 구동기 드라이브의 가속도 제한에 의한 잔류변위저감 및 과도변위 저감 고려한 exact 형태의 솔루션을 가속도제한에 대한 응답을 근사화 하여 phasor form 형태의 벡터로 나타내고 이를 vector diagram approach을 이용하여 exact solution을 제시 하였다.

1. 구동기의 가속도 제한과 modeling error의 강건성을 확보하기 위한 ALZVD 그리고 ALEI shapers를 제시하였다.
2. on-off 구동기와 가속도제한을 고려한 ALUMZV shaper를 제시하였다.
3. 구동기의 가속도 제한과 과도변위 저감을 위한 ALMUMZV와 AHDLZV shapers를 제시하였다.
4. 각각의 제시된 입력 성형기에 대하여 sensitivity, residual vibration 그리고 transient deflection을 이론적으로 기존의 입력성형기와 비교 및 평가하였다.
5. 실험실의 mini-bridge crane을 통하여 각각의 입력성형기의 실험적으로 검증을 진행 하였으며 기존의 입력성형방법보다. 우수한 성능을 나타냄을 보였다.

# APPENDIX A

## A.1 A Pendulum Model

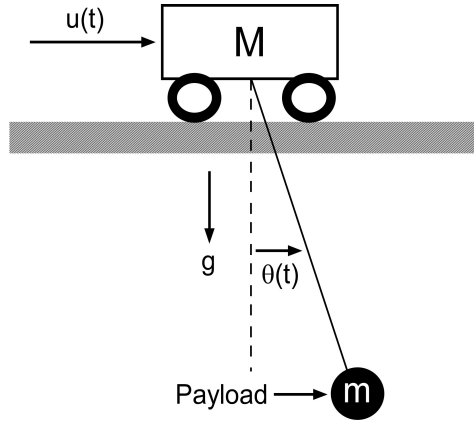


Fig. A-1 A Pendulum modeling

Fig.A-1과 같은 일반적인 pendulum의 모델에 대한 식을 Lagrange equation을 이용하여 라그랑지안 방정식  $L$ 을 계산하면

$$T = \frac{1}{2}M\dot{x}^2 + \frac{1}{2}m\dot{x}^2 + m\dot{x}L\dot{\theta}\cos(\theta) + \frac{1}{2}mL^2\dot{\theta}^2$$

$$V = -mgL\cos(\theta)$$

$$L = T - V = \frac{1}{2}(M+m)\dot{x}^2 + m\dot{x}L\dot{\theta}\cos(\theta) + \frac{1}{2}mL^2\dot{\theta}^2 + mgL\cos(\theta)$$

라그랑지안  $L$ 을 이용하여  $x$ 좌표와  $\theta$ 좌표에 대하여 각각 도함수를 계산하면 다음과 같다.

$$\frac{d}{dt} \frac{\partial L}{\partial \dot{x}} - \frac{\partial L}{\partial x} = (M+m)\ddot{x} + mL\dot{\theta}\cos(\theta) - mL\dot{\theta}^2\sin(\theta) = u(t)$$

$$\frac{d}{dt} \frac{\partial L}{\partial \dot{\theta}} - \frac{\partial L}{\partial \theta} = mL^2\ddot{\theta} + mgL\sin(\theta) - ML\cos(\theta)\ddot{x} = 0$$

여기서 우리는 payload의 변위에 대하여 모델링을 하기 때문에  $x$ 좌표에 대한 도함수식은 제외한다.  $\theta$ 에 대한 도함수 식에서  $M$ 과  $m$ 은  $x$ 와  $\theta$ 에 영향을 거의 주지 않기 때문에 소거한다. 그리고 양변에  $L$ 을 나누어주면 다음과 같다.

$$L\ddot{\phi} + g^* \sin(\phi) = \ddot{x} \cos(\phi)$$

위의 식을 비선형 상태 방정식 형태로 바꾸면

$$\dot{\vec{x}} = f(\vec{x}, \vec{u}),$$

여기에

$$\begin{aligned} \vec{x} &= [\phi \ \dot{\phi} \ x \ \dot{x}]^T, \\ \vec{u} &= [\ddot{x}] \end{aligned}$$

위의 두식을 이용하여 상태변수 방정식으로 풀이 하면

$$\begin{aligned} \dot{x}_1 &= x_2 \\ \dot{x}_2 &= -\frac{g}{L} \sin(x_1) + \frac{1}{L} u_1 \cos(x_1) \\ \dot{x}_3 &= x_4 \\ \dot{x}_4 &= u_1 \end{aligned}$$

시스템의 선형 모델을 얻기 위해서는  $x_1 \approx 0$  을 대입하여 다음의 선형 상태 방정식인 아래의 식을 얻는다.

$$\dot{\vec{x}} = A\vec{x} + B\vec{u}$$

여기에 A와 B는 다음과 같이 표현된다.

$$A = \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 & 0 \\ -g/L & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \quad B = \begin{bmatrix} 0 \\ 1/L \\ 0 \\ 1 \end{bmatrix}$$

payload의 위치는 다음과 같다.

$$x_{payload} = x_3 - L \sin(x_1)$$

## A.2 A Benchmark Model

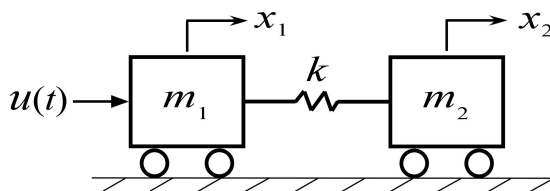


Fig. A-2 A Benchmark System

$$\begin{aligned} m_1 \ddot{x}_1 + kx_1 - kx_2 &= u \\ m_2 \ddot{x}_2 + kx_2 - kx_1 &= 0 \end{aligned}$$

위의 식을  $\ddot{x}_1, \ddot{x}_2$ 으로 정리하면

$$\begin{aligned} \ddot{x}_1 &= \frac{1}{m_1}u - \frac{k}{m_1}(x_1 - x_2) \\ \ddot{x}_2 &= \frac{k}{m_2}(x_1 - x_2) \end{aligned}$$

여기서

$$\vec{x} = [x_1 \quad \dot{x}_1 \quad x_2 \quad \dot{x}_2]^T$$

일 때 아래와 같은 상태 방정식을 얻을수 있다.

$$\dot{\vec{x}} = A\vec{x} + B\vec{u}$$

$$A = \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 & 0 \\ -k/m_1 & 0 & k/m_1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \\ k/m_2 & 0 & -k/m_2 & 0 \end{bmatrix} \quad B = \begin{bmatrix} 0 \\ 1/m_1 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix}$$

## APPENDIX B

### B.1 MUMZV shaper의 과도변위제한 조건식

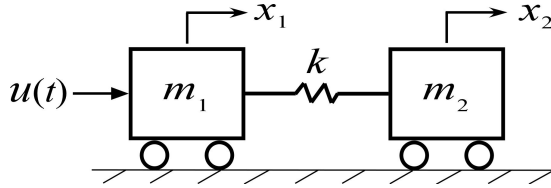


Fig. B-1 A Benchmark System

MUMZV의 과도변위 제한조건식을 유도하기 위하여 Fig.B-1과 같은 benchmark system 변위  $D(s)$ 를 계산하여 과도변위 제한의 조거식을 구한다. 시스템의 입력에 대한 변위  $D(s)$ 는  $x_2(s)-x_1(s)$ 이다. 따라서 식(4.4)을 이용하여 속도 입력일 경우  $sV(s)$ 를 대입하여 계산하면 식(B.1)과 같이 나타난다. 여기서  $V(t)=V_dH(t)$ 이므로  $V(s)=V_d/s$ 이다.  $H(t)$ 는 Heaviside function이다.

$$D(s) = -\frac{V_d}{m_1} \frac{1}{s^2 + \omega_n^2} \quad (B.1)$$

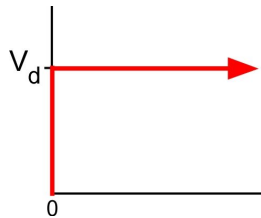


Fig. B-2 Unshaped Velocity Profile

식(B.1)을 라플라스 역변환을 이용하여  $D(t)$ 를 구하면 식(B.2)와 같이 계산된다.

$$D(t) = -\frac{V_d}{m_1\omega_n} \sin(\omega_n t) \quad (B.2)$$

여기서 Fig.B-2과 같은 입력인 unshaped 일때의 최대 변위값  $D_{\max}$ 를 계산하면 sine항이  $-1\sim 1$ 사이의 값이므로 다음과 같이 계산된다.

$$D_{\max} = \frac{V_d}{m_1\omega_n} \quad (\text{B.3})$$

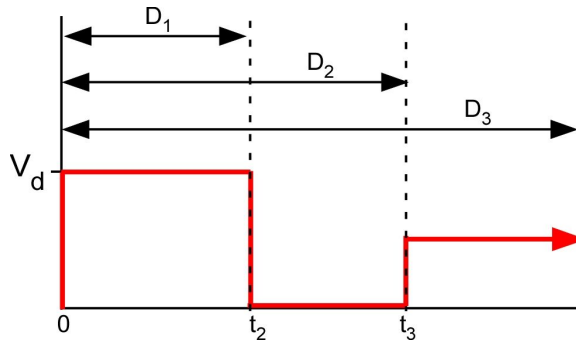


Fig. B-3 Shaped Velocity Profile of MUMZV

Fig.B-3의 shape 된 속도프로파일의  $D_1(t)$ 의 변위식을 계산하면 다음과 같다.

$$D_1(t) = -\frac{V_d}{m_1\omega_n} \sin(\omega_n t) \quad (\text{B.4})$$

위의 식에서 최대변위일때의 시간  $t_m$ 을 찾기위하여  $t$ 로 미분하여 0인시간  $t_m$ 을 구하면

$$\frac{dD_1(t)}{dt} = -\frac{V_d}{m_1} \cos(\omega_n t_m) = 0 \quad (\text{B.5})$$

$$t_m = \frac{\pi}{2\omega_n} \quad (\text{B.6})$$

여기서 두 번째 임펄스의 시간  $t_2$ 가  $t_m$ 보다 크면  $A_2$ 가 음의 임펄스이므로 과도구간의 최대변위는  $D_1(t_m)$ 가 된다. 반대로  $t_2$ 가  $t_m$ 보다 작으면 과도구간의 최대변위는  $D_1(t_2)$ 가 된다. 따라서  $t_2$ 가  $t_m$ 보다 클경우의 제약조건을 계산하면

$$\frac{\pi}{2\omega_n} \leq \frac{1}{\omega_n} \cos^{-1}\left(1 - \frac{A_3^2}{2}\right)$$

$$A_3 \geq \sqrt{2} \quad (\text{B.7})$$

$A_3$ 는 절대 1을 넘길 수 없다. 1을 넘길 경우 구동기의 최대 속도를 초과 하기 때문에 실제 상황에서는  $A_3$ 는 1보다 같거나 작아야된다. 따라서 MUMZV의 과도구간에서의 최대 크기는  $D_1(t_2)$ 가 된다. 따라서 과도구간의 최대 변위는 설계자가 원하는 과도변위  $D_d$  보다 같거나 낮아야 하므로 다음과 같이 표현된다.

$$\frac{V_d}{m_1 \omega_n} \sin(\omega_n t_2) \leq D_d \quad (B.8)$$

식 (B.8)에  $t_2$ 를 대입하여  $D_{\max}$ 로 나누어 unshape일때의 최대변위의 비율로 나타내면 다음과 같다.

$$\sin(\cos^{-1}(1 - \frac{A_3^2}{s})) \leq \frac{D_d}{D_{\max}} = D_{\lim} \quad (B.9)$$

식 (B.9)를  $A_3$ 에 대하여 계산하면 과도변위 제한을 위한  $A_3$ 의 제약 조건식을 얻을 수 있다.

$$A_3 = \sqrt{2 - 2\sqrt{1 - D_{\lim}^2}} \quad (B.10)$$

## B.2 HDLZV shaper의 과도변위제한 조건식

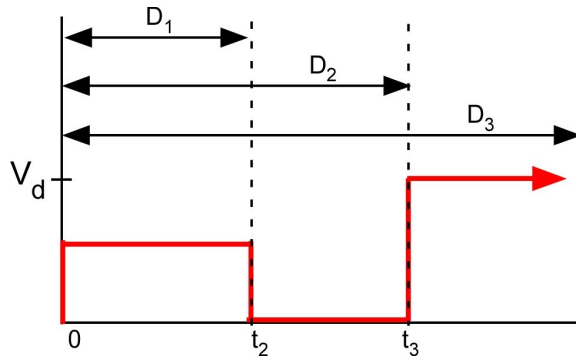


Fig. B-4 Shaped Velocity Profile of HDLZV

Fig.B-4의 shape 된 속도프로파일의  $D_1(t)$ 의 변위식을 계산하면 다음과 같다.



$$D_1(t) = -\frac{V_d A_1}{m_1 \omega_n} \sin(\omega_n t) \quad (\text{B.11})$$

위의 식에서 최대변위일때의 시간  $t_m$ 을 찾기위하여  $t$ 로 미분하여 0인시간  $t_m$ 을 구하면

$$\frac{dD_1(t)}{dt} = -\frac{V_d A_1}{m_1} \cos(\omega_n t_m) = 0 \quad (\text{B.12})$$

$$t_m = \frac{\pi}{2\omega_n} \quad (\text{B.13})$$

여기서 두 번째 임펄스의 시간  $t_2$ 가  $t_m$ 보다 크면  $A_2$ 가 음의 임펄스이므로 과도구간의 최대변위는  $D_1(t_m)$ 가 된다. 반대로  $t_2$ 가  $t_m$ 보다 작으면 과도구간의 최대변위는  $D_1(t_2)$ 가 된다. 하지만 실제  $D_1(t_2)$ 는  $D_1(t_m)$ 보다 작다. 왜냐하면  $A_2$ 가 음의 임펄스를 가지기 때문에  $A_2$ 로 인해 발생하는 임펄스는 변위의 크기를 줄이는 역할을 한다. 따라서 과도구간에서의 최대변위의 크기는  $D_1(t_m)$ 이 된다.

$$\frac{V_d A_1}{m_1 \omega_n} \sin(\omega_n t_m) \leq D_d \quad (\text{B.14})$$

식 (B.11)에 식(B.13)을 대입하여  $D_{\max}$ 로 나누어 unshape일때의 최대변위의 비율로 나타내면 다음과 같다.

$$A_1 \sin\left(\frac{\pi}{2}\right) \leq \frac{D_d}{D_{\max}} = D_{\text{lim}} \quad (\text{B.15})$$

식 (B.15)를  $A_1$ 에 대하여 계산하면 과도변위 제한을 위한  $A_1$ 의 제약 조건식을 얻을 수 있다.

$$A_1 \leq D_{\text{lim}} \quad (\text{B.16})$$

## Reference

- [1] 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
- [2] Singhose, W, "Shaping Input to Reduce Vibration : A vector diagram approach", A.I. Memo No. 122, March, 1990
- [3] 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.
- [4] Robertson, M. 2005, "Command Generation for Tethered Satellite Systems", Ph. D. Thesis, Georgia Institute of Technology, USA.
- [5] Jang, I, S, 2005, "Nonlinear deflection-limiting control for flexible system", MS. Thesis, Cho Sun Univ. Korea.
- [6] Singhose, W, Derezinski, S, Singer, N. "Extra-Insensitive Input Shapers for Controlling Flexible Spacecraft" JOURNAL OF GUIDANCE, CONTROL, AND DYNAMICS, Vol. 19, No. 2, March-April 1996
- [7] Singer, N. C. and Seering, W. P., ""Using Acausal Shaping Techniques to Reduce Robot Vibration,"" Proc. of the IEEE International Conference on Robotics and Automation, Vol. 3, pp. 1434-1439, 1988.
- [8] Sung, Y. G, Singhose, W, 2007, "Closed-Form Specified-Fuel Commands for Two-Mode Systems," IEEE. Control, and automation, pp.74~79.

[9] Sung, Y. G, Singhose, W, 2009, "Limited-state commands for systems with two flexible modes", *Mechatronics*, Vol.19, pp.780~787.

[10] Singer, N. C., "'Residual Vibration Reduction in Computer Controlled Machines,'" *Mechanical Engineering*, Ph. D. thesis, Massachusetts Institute of Technology, 1989.

[11] Sung, Y. G, Singhose, W, 2008, "Deflection-Limiting Commands to Slew Flexible Systems with Velocity Limits,", *IEEE ,Control, Automation and Systems*, pp.2234~2239.

[12] Sorensen, K., "Operational Performance Enhancement of Human Operaetd Flexible Systems", Ph.D. Thesis, Georgia Institute of Technology, August, 2008.

[13] Kinceler, R. and Meckl, P. H., "Input Shaping for nonlinear systems," in *American Control Conf.*, (Seattle, Washington), 1995, pp. 914-918.

[14] Gorinevsky, D. and Vukovich, G., "Nonlinear Input Shaping control of flexible spacecraft reorientation maneuver," *J. of Guidance, Control, and Dynamics*, vol. 21, no. 2, 1998, pp. 264-270.

[15] Jon Danielson, "Mobile Boom Cranes and Advanced Input Shaping Control", MS thesis, Georgia Institute of Technology, August, 2008.

[16] Lawrence, J., Singhose, W, and Hekman, K., "Command Shaping Under Nonsymmetrical Acceleration and Braking Dynamic,", *ASME J. of Vibration and Acoustics*, vol. 130, 2008.

[17] Danielson J, Lawrence J, Singhose W, "Command Shaping for Flexible Systems Subject to Constant Acceleration Limits," *Journal of Dynamic Systems, Measurement, and Control*, Vol. 130, September, 2008.

[18] Singhose W, "COMMAND GENERATION FOR FLEXIBLE SYSTEMS," Ph.D. Thesis, Massachusetts Institute of Technology , May, 1997.

[19] Singhose W, Mills. B, Seering W, "Closed-Form Methods for Generating On-Off Commands for Undamped Flexible Spacecraft", Journal of GUIDANCE, Vol. 22, No. 2, 1998

[20] Sorensen. K, Daftari. A, Singhose. W, Hekman. K, "Negative Input Shaping: Eliminating Overcurrenting and Maximizing the Command Space" ASME, Journal of Dynamic Systems, Measurement, and Control, November 2008, Vol. 130

[21]Sung, Y. G, 1999, "Adaptive robust vibration control with Input Shaping as a flexible maneuver strategy," KSME International journal, Vol.13, pp.807~817.

[22] Rogers K, Seering W, "Input ShapING FOR LIMITING LOADS AND VIBRATION IN SYSTEMS WITH ON-OFF ACTUATORS", AIAA Guidance Navigation, and Control Conference, Vol 3, 2008, pp.722-730.

[23] Singhose W, Singh T, Seering W, "On-Off Control With Specified Fuel Usage" Journal of Dynamic Systems, Measurement, and Control, Vol. 18, No. 6, 1995, pp.1225-1231.

[24]. Singhose, W., Seering, W. P, Banerjee, A. K., "Limiting deflection during the slewing of flexible spacecraft using deflection sampling." AIAA, Guidance, Navigation and Control Conference, San Diego, CA, July 29-31, 1996.

[25] Robertson, M. J., Singhose, W. "Deflection Vector Diagrams for a Mass Under PD Control" Proceedings of the American Control Conference Denver, Colorado June 4-6, 2003.

- [26] Singhose, W., Seering, W. P, Banerjee, A. K., "Slewing Flexible Spacecraft with Deflection-Limiting Input Shaping", Journal of Guidance, Control, and Dynamics, Vol. 20, No. 2, March-April 1997.
- [27] Robertson, M. J., Singhose, W., "Closed-Form Deflection-Limiting Commands", 2005 American Control Conference, Portland, OR USA, June 8-10, 2005 pp2104-2109.
- [28] Sung Y-G, and Singhose W, "Deflection-Limiting Commands to Slew Flexible Systems with Velocity Limits", International Conference on Control, Automation and Systems 2008, Seoul, Korea, Oct. 14-17, pp.2234-2239 .
- [29] Robertson, M. J., Singhose, W., "Specified-Deflection Command Shapers for Second-Order Position Input Systems", JOURNAL OF DYNAMIC SYSTEMS, MEASUREMENT, AND CONTROL., Vol. 129, NOVEMBER 2007
- [30] Kojima. H, Singhose, W., "Adaptive Deflection-Limiting Control for Slewing Flexible Space Structures", JOURNAL OF GUIDANCE, CONTROL, AND DYNAMICS, Vol. 30, No. 1, January-February 2007
- [31] Lawrence, J. 2006, "Crane Oscillation Control: Nonlinear Elements and Educational Improvements", PhD. Thesis, Georgia Institute of Technology, USA.