

# 내재된 입력성형기: 사다리꼴 프로파일과 S-커브 프로파일의 차이

## Embedded Input Shaper: Difference between Trapezoidal Profile and S-curve Profile

하 창 완, 이 동 옥, 윤 병 호, 류 근 호, 김 경 수\*  
(Chang-Wan Ha<sup>1</sup>, Dongwook Lee<sup>2</sup>, Byungho Yoon<sup>2</sup>, Keun-Ho Rew<sup>3</sup>, and Kyung-Soo Kim<sup>2\*</sup>)

<sup>1</sup>Department of Magnetic Levitation and Linear Drive, Korea Institute of Machinery & Materials

<sup>2</sup>Department of Mechanical Engineering, Korea Advanced Institute of Science and Technology

<sup>3</sup>Department of Robotics Engineering, Hoseo University

**Abstract:** In this paper, we discuss the relation between the motion profile and pre-filter. As previously reported in various literatures [1-3], a tuned motion profile can effectively reduce residual vibration by placing inherent zeros of the motion profile at the vibratory pole of systems similar to the role of the input shaping technique. From the results, we factorize the motion profile into a basis function and an input shaper. In contrast to the previously reported impulse-sequence-based input shapers, the input shaper extracted from the motion profile has unique characteristics. Thanks to the characteristics of the input shaper extracted from the motion profile, it has advantages to reduce the vibrations caused by not only the modeled vibratory mode but also unmodeled dynamics which exist in higher frequency ranges.

**Keywords:** motion control, motion profile, pre-filter, input shaping technique, S-curve profile, trapezoidal velocity profile

### I. 서론

초고속, 초정밀, 저진동의 특성을 갖는 모션제어기술은 지난 수세기 동안 제어공학에서 중요한 이슈가 되어 왔다. 개발의 핵심은 빠른 정착시간과 움직임에 의해 발생하는 진동의 최소화라는 상충되는 두 개의 목표를 최적화하는데 있다. 특히, 승강기와 같이 승객이 탑승하는 시스템에서는 승차감에 직결되며, 이송장비의 경우 기계의 수명과 안정적인 동작을 보장할 뿐만 아니라 생산성과 직결된다. 또한 초정밀 운동이나 접촉운동과 같이 진동이 지극히 적어야 하는 상황에서는 이러한 모션제어기술이 필수적이다[4-6].

이런 모션제어기술은 크게 세가지로 나뉠 수 있다. 첫째는 되먹임 신호를 이용하는 피드백제어, 둘째는 구동기의 성능과 이동거리 등의 제한조건 하에서 시간대별 궤적(기준입력)을 생성하는 모션 프로파일(motion profile), 그리고 생성된 기준입력을 피드백 전단에서 성형하는 프리필터(pre-filter) 방법이 있다. 본 연구에서는 피드백제어는 잘 설계되었다는 가정하에 기준입력에 의한 진동저감 효과를 집중적으로 다루고자 한다.

기존 연구를 살펴보면, 모션 프로파일과 프리필터가 고속

주행과 진동저감을 피하는 기준입력을 만드는 데에는 동일한 목적을 가지고 있지만 서로 통합하여 시너지를 내는 것이 아니라 마치 별개의 학문인 것처럼 개별적으로 연구가 진행되어 왔다. 각각의 연구 역사를 살펴보면 다음과 같다.

가장 대표적인 프리필터는 입력성형기로 1950년경 Smith가 제안한 *posicast control*에서 그 원조를 찾을 수 있다. Smith는 이송부를 목적지까지 한번에 이동시키는 것이 아니라 기준입력을 적절하게 쪼개서 이동시킬 때 야기되는 잔류진동을 크게 줄일 수 있다고 주장하였다. 이런 아이디어는 1989년 Singhose에 의해 일반화되었고, 임의의 입력을 쪼개서 진동을 없앨 수 있는 임펄스 열 기반의 프리필터, ZV (Zero Vibration) shaper가 제안되게 된다[7]. 이 아이디어의 핵심은 ZV shaper에 의해 만들어지는 영점을 이용하여 시스템의 진동특성을 나타내는 극점을 상쇄함으로써 잔류진동을 저감한다는 내용이다. 그 이후 1990년부터 현재까지 다양한 형태의 임펄스 열 기반의 입력성형기들이 제안되었다[8,9].

모션 프로파일 역사를 간략히 살펴보면 다음과 같다. 이송부가 실제로 이동할 때에는 구동기의 성능한계(최대가속도, 최대속도)에 의해 스텝 함수와 같은 형태의 궤적을 따라 움직일 수 없다. 따라서 이송부가 구동기의 성능한계 내에서 따라 움직일 수 있는 시간대별 궤적을 생성해줘야 하는데 이것이 모션 프로파일이다. 가장 간단한 모션 프로파일은 등가속/등속/등감속 구간으로 이루어진 사다리꼴 프로파일이다. 사다리꼴 프로파일은 수식이 간단하여 생성하기 쉽고 빠른 이동이 가능하지만 가속도가 급변하는 특징 때문에 큰 진동이 발생하여 안정화되는데 필요한 정착시간 측면에서는 그리 효율적이지 않다. 1994년 Lewin은 가속도를 점진적으로

\* Corresponding Author

Manuscript received July 7, 2014 / revised September 10, 2014 / accepted September 15, 2014

하창완: 한국기계연구원 자기부상연구실(hawan@kaist.ac.kr)

이동옥, 윤병호, 김경수: KAIST 기계항공시스템학부

(lego0410@kaist.ac.kr/totott@kaist.ac.kr/kyungsookim@kaist.ac.kr)

류근호: 호서대학교 기계공학부(khrew@hoseo.edu)

\* 본 논문은 2014 제 29회 ICROS 학술대회에 초안이 발표되었음[17].

\* 본 논문은 국토교통부 철도기술연구사업 연구비 지원(14PRTD-B061485-04)에 의해 수행되었음.

변화시키는 S-커브 프로파일을 이용한 방직기계 성능향상을 예로 들며 ‘부드러운 움직임이 고속주행 시 발생하는 기구부의 진동을 줄이는데 핵심이다’ 라고 주장한 이후 정밀제어를 요구하는 산업현장에서는 보다 더 부드러운 모션 프로파일을 지속적으로 요구해 왔다[10]. 이런 요구 때문에 2000년 중반부터 고차다항식 혹은 삼각함수 기반의 모션 프로파일들이 개발되어왔고, 개발된 다양한 모션 프로파일들의 성능이 비교 분석되고 있다[11-14].

이에 본 연구에서는 개별적으로 이루어지고 있는 두 연구를 통합 분석하여 그 관계를 이해하고자 한다. 그 첫 단계로 본 논문에서는 가장 대표적인 사다리꼴 프로파일과 S-커브 프로파일을 잘 정형화된 프리필터 해석 방법을 이용하여 그 특징들을 재조명하고자 한다.

**II. 사다리꼴 프로파일과 S-커브 프로파일**

가장 간단한 모션 프로파일은 사다리꼴 프로파일이다. 그림 1과 같이 속도함수가 사다리꼴 형상을 띤 것이 특징이며, 일정한 크기의 가속도로 가/감속한다. 이동거리가 충분히 길 때에는 등가속/등속/등감속 구간으로 분류 할 수 있으며, 각 구간의 시간 간격은 아래와 같이 정해진다.

$$t_a = \frac{V_{max}}{A_{max}}, \quad t_a + t_v = \frac{\delta_{target}}{V_{max}} \quad (1)$$

$t_a$ ,  $t_v$  는 등가속과 등속 구간의 시간 간격을 의미하며,  $\delta_{target}$ ,  $A_{max}$ ,  $V_{max}$  는 이동거리, 최대가속도, 최대속도를 의미한다. 사다리꼴 프로파일의 저크함수(위치함수를 시간으로 3 번 미분한 것)는 임펄스 열 형태로 표현되며, 라플라스 변환을 이용하면 아래와 같이 표현할 수 있다.

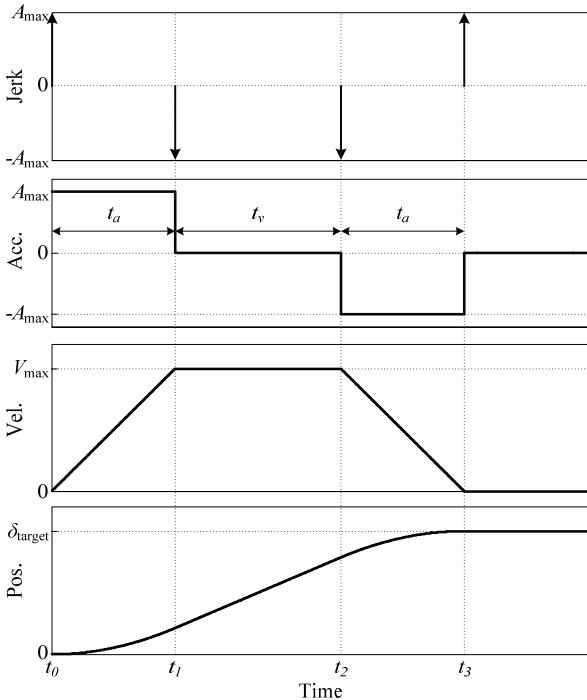


그림 1. 사다리꼴 프로파일.  
Fig. 1. Trapezoidal profile.

$$s^3 X(s) = A_{max}(1 - e^{-t_a s} - e^{-(t_a+t_v)s} + e^{-(2t_a+t_v)s}) = A_{max}(1 - e^{-t_a s})(1 - e^{-(t_a+t_v)s}) \quad (2)$$

$X(s) = \mathcal{L}\{x(t)\}$  는 모션 프로파일의 위치함수를 라플라스 변환한 것이며,  $s^n X(s) = \mathcal{L}\{d^n x(t)/dt^n\}$  는 시간에 대해 n번 미분한 위치함수를 라플라스 변환한 것이다.

따라서, 수식 (1)-(2)를 이용하면 사다리꼴 프로파일의 위치함수를 아래와 같이 정리할 수 있다.

$$X(s) = \frac{A_{max}(1 - e^{-V_{max}/A_{max} s})(1 - e^{-\delta_{target}/V_{max} s})}{s^3} \quad (3)$$

S-커브 프로파일은 가속도가 급변하는 사다리꼴 프로파일을 보완하기 위해 만들어진 모션 프로파일로 유한한 크기의 저크(가속도 변화량)를 갖는 것이 특징이다. S-커브 프로파일에서 사용되는 저크는 아래의 수식에 의해 결정된다[14].

$$J = \frac{A_{max}^2}{\beta V_{max}}, \quad 0 < \beta \leq 1 \quad (4)$$

$\beta$  는 저크의 크기를 결정짓는 튜닝인자로 0에서 1까지 변할 수 있다.  $\beta$  가 0에 접근할수록 저크의 크기는 점차 커지고 가속도는 급변하여 그림 3과 같이 속도함수가 사다리꼴 형상에 근접하게 된다. 반대로  $\beta$  가 1에 접근할수록 저크의 크기는 점차 작아지고 가속도는 느리게 변하며 그림 3과 같이 속도함수가 종모양에 근접한다.

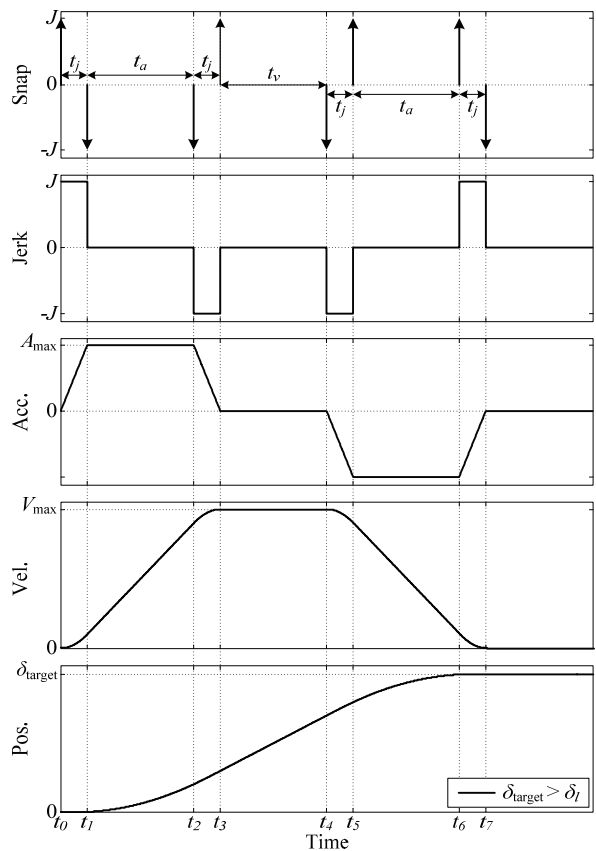


그림 2. S-커브 프로파일.  
Fig. 2. S-curve profile.

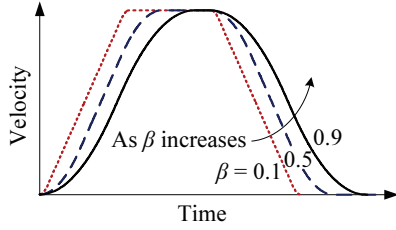


그림 3. S-커브 프로파일의 튜닝인자 영향.  
Fig. 3. Effect of the tuning parameter of S-curve profile.

S-커브 프로파일은 이동거리가 충분히 길 때에 그림 2와 같이 7개 구간으로 분류되며, 각 구간의 시간 간격은 아래와 같이 정해진다.

$$t_j = \frac{\beta V_{\max}}{A_{\max}}, \quad t_j + t_a = \frac{V_{\max}}{A_{\max}}, \quad 2t_j + t_a + t_v = \frac{\delta_{\text{target}}}{V_{\max}} \quad (5)$$

$t_j, t_a, t_v$  는 등저크/등가속도/등속도 구간의 시간 간격을 의미한다. S-커브 프로파일의 스냅함수(위치함수를 시간으로 4번 미분한 것)은 임펄스 열 형태로 표현되며, 라플라스 변환을 이용하면 아래와 같이 표현할 수 있다.

$$s^4 X(s) = J(1 - e^{-t_j s})(1 - e^{-(t_j + t_a)s})(1 - e^{-(2t_j + t_a + t_v)s}) \quad (6)$$

따라서 수식 (4)-(6)을 이용하면 S-커브 프로파일의 위치함수를 아래와 같이 정리할 수 있다.

$$X(s) = \underbrace{\frac{A_{\max} (1 - e^{-V_{\max}/A_{\max}s})(1 - e^{-\delta_{\text{target}}/V_{\max}s})}{s^3}}_{\text{사다리꼴 속도 프로파일}} \cdot \underbrace{\frac{1 - e^{-t_j s}}{t_j s}}_{F_s(s)} \quad (7)$$

### III. S-커브 프로파일에 내재되어 있는 프리필터

수식 (7)에서 볼 수 있듯이, S-커브 프로파일은 사다리꼴 프로파일과 다음과 같은 프리필터로 인수분해 할 수 있다.

$$F_s(s) = \frac{1 - e^{-t_j s}}{t_j s} \quad (8)$$

다시 말하면, S-커브 프로파일은 그림 4와 같이 사다리꼴 프로파일을 수식 (8)의  $F_s(s)$  라는 프리필터로 성형했다고 할 수 있다. 따라서, 사다리꼴 프로파일과 S-커브 프로파일의 차이점은  $F_s(s)$  의 특징을 분석하면 명확해진다.

$F_s(s)$  를 라플라스 역변환을 이용하여 시간영역상에서 살펴보면 다음과 같다.

$$f_s(t) = \frac{1(t) - 1(t - t_j)}{t_j} \quad (9)$$

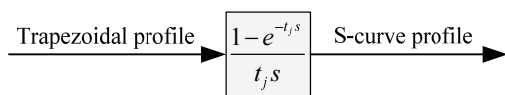


그림 4. 블록 다이어그램: 사다리꼴 프로파일과 S-커브 프로파일의 관계.  
Fig. 4. Block diagram: relation between trapezoidal profile and S-curve profile.

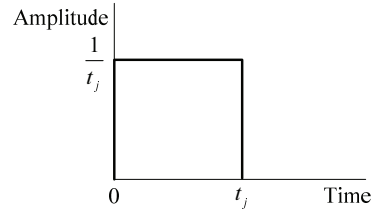


그림 5. S-커브 프로파일에 내재되어 있는 프리필터.  
Fig. 5. Embedded pre-filter in the S-curve profile.

$1(t)$  은 단위 계단 함수이다. 이는 S-커브 프로파일에 내재되어 있는 프리필터가 기존의 임펄스 열 기반의 입력성형기와는 다르게 그림 5와 같이 구형함수 형태를 띠을 알 수 있다.

복소평면 상에서  $F_s(s)$  를 살펴보면 기존의 임펄스 열 기반의 입력성형기와는 다르게 수식 (8)에서 볼 수 있듯이 적분기( $1/s$ )가 포함되어 있는 것을 알 수 있다. 그리고  $F_s(s) = 0$  을 이용하면 다음과 같은 영점들이  $F_s(s)$  에 포함되어 있는 것을 알 수 있다.

$$s_i = j \frac{2\pi n}{t_j}, \quad \text{where } n = 0, \pm 1, \pm 2, \dots, \quad (10)$$

$j$  는 허수이고,  $n$  은 임의의 정수이다. S-커브 프로파일을 이용하여 잔류진동을 저감하는 기존의 연구들을 살펴보면, 모션 프로파일의 영점이 시스템의 진동모드를 나타내는 극점과 가장 근접할 때, 발생하는 진동이 최소가 된다고 알려져 있다 [2]. 이는 극-영점상쇄(pole-zero cancellation) 효과로 인해 진동모드를 가진 시키는 주파수 성분의 에너지가 모션 프로파일에 적게 포함되기 때문이다. 따라서, 진동저감 측면에서 수식 (10)에 나타난 모션 프로파일의 영점이 시스템의 극점에 가장 근접하도록  $t_j$  는 아래와 같이 설정하는 것이 바람직하다.

$$t_j = T_d \quad (11)$$

$T_d = 1/f_d$  는 진동주기이다.

$t_j$  를 수식 (11)과 같이 설정한 이후,  $F_s(s)$  의 특징을 분석하기 위해  $F_s(s)$  의 민감도 곡선(sensitivity curve)을 그림 6과 같이 그려보았다. 민감도 곡선은 주파수 변화에 따라 잔류진

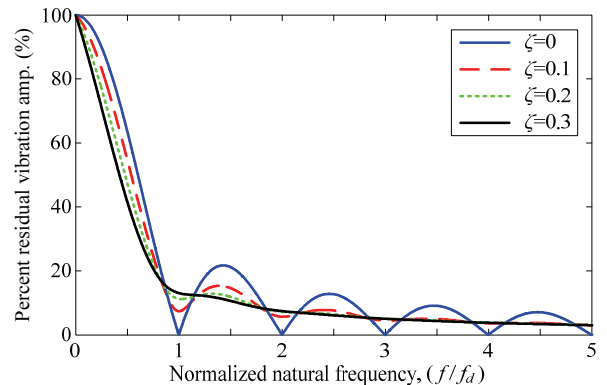


그림 6.  $F_s(s)$  의 민감도 곡선.  
Fig. 6. Sensitivity curves for  $F_s(s)$ .

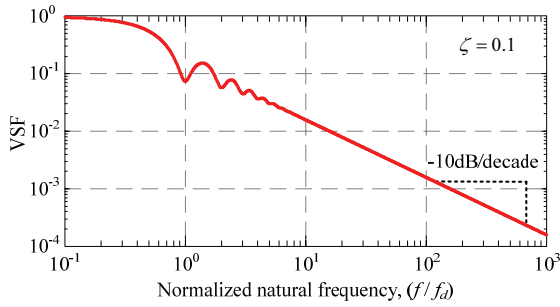


그림 7.  $F_s(s)$  의 민감도 곡선 (로그-로그 스케일).  
Fig. 7. Sensitivity curves for  $F_s(s)$  (in log-log scale).

동의 크기비가 어떻게 변하는지 나타내는 선도이다. 선도의 가로축은 고유진동수 대비 주파수 변화를 나타내며, 세로축은 프리필터 적용하기 전 대비 잔류진동 크기 비를 나타낸다. 그림 6에 서 볼 수 있듯이 주파수 변화가 고유진동수의 정수 배 ( $f = m f_d$ , where  $m=1,2,3,\dots$ ) 가 될 때, 진동이 저감됨을 확인 할 수 있다. 이는 수식 (10)에서 알 수 있듯이,  $F_s(s)$  의 영점이 허수 축 상에 등 간격으로 존재하기 때문이다. 그리고 기존의 임펄스 열 기반의 입력성형기와는 다르게 고주파수 영역의 진동을 저감하는 특징도 있다는 것을 그림 6을 통해 확인할 수 있다. 이는 수식 (8)에 있는 적분기(1/s)가 저역 통과필터와 같은 역할을 하기 때문이다. 그림 7은 감쇠비가 0.1일 때,  $F_s(s)$  의 민감도 곡선을 로그-로그 스케일로 변환한 그래프로 고주파수 대역에서 수식 (8)에 포함된 적분기 (1/s)가 마치 1차 저역통과필터 역할을 함을 분명히 보여주고 있다. 실제 실험환경에서는 모든 진동모드를 모델링 할 수 없기 때문에 이런 특징은 고주파수 대역에 존재하는 모델링 되지 않은 진동모드(unmodeled dynamics)에 의해 야기되는 진동을 저감하는데 큰 이점으로 작용하리라 예상된다.

IV. 시뮬레이션

제안한 방법의 효율성을 검증하기 위해 그림 8와 같은 크레인 시스템을 이용하여 시뮬레이션을 수행한다. 일반적으로 크레인 시스템은 단진자로 모델링하여 제어하고 있지만 1998년과 2010년 연구결과를 보면 후크(hook) 단에 의해 크레인의 실제거동은 그림 8의 오른쪽 그림과 같이 이중진자에 가깝다라고 알려져 있다[15,16]. 그림 8과 같이 트롤리에 붙어 있는 이중진자의 운동방정식의 다음과 같다.

$$\begin{aligned}
 m_1 \ddot{y}_1 &= \frac{m_2 g}{l_2} (y_2 - y_1) - \frac{(m_1 + m_2) g}{l_1} (y_1 - x) \\
 m_2 \ddot{y}_2 &= -\frac{m_2 g}{l_2} (y_2 - y_1)
 \end{aligned}
 \tag{11}$$

$x$  는 트롤리의 거동이며,  $y_1$  과  $y_2$  는 후크단과 진자 끝 단의 움직임을 의미한다.

간단한 시뮬레이션을 위해 시뮬레이션 파라미터는 표 1과 같이 설정한 후 사다리꼴 프로파일과 S-커브 프로파일 따라 트롤리가 움직일 때, 진자 끝 단에 발생하는 진동 ( $\ddot{y}_2$ ) 을 관찰한다. 주어진 조건하에서 이중진자의 진동특성을 분석해 보면, 0.38Hz와 0.92Hz에 진동모드가 각각 존재하는 것을 알

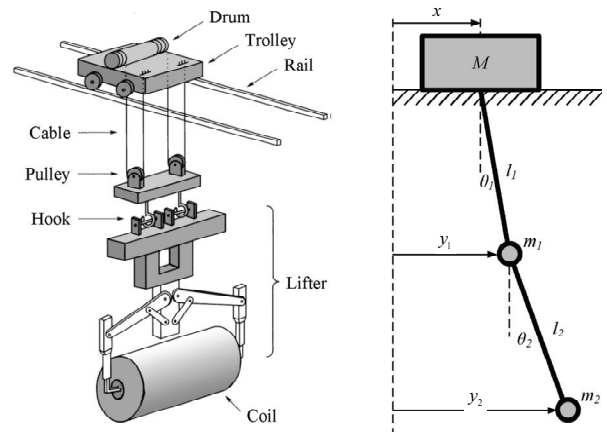


그림 8. 크레인 시스템과 간략화된 모델 [15].  
Fig. 8. A crane-lift system and its simplified model [15].

표 1. 시뮬레이션 파라미터.  
Table 1. Simulation parameters.

	$\delta_{target}$	$V_{max}$	$A_{max}$	$m_1$	$m_2$	$l_1$	$l_2$
Values	30m	4m/s	1m/s <sup>2</sup>	1kg		1m	

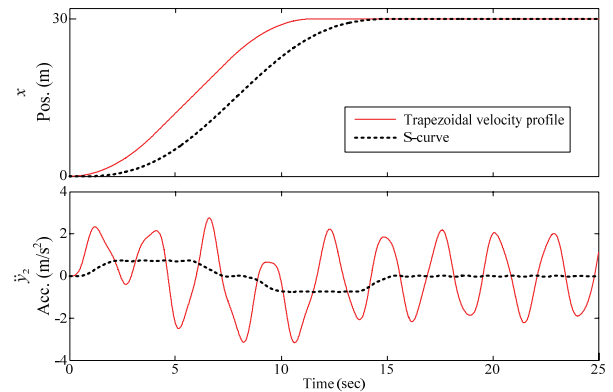


그림 9. 시뮬레이션 결과 (빨간 실선: 사다리꼴 프로파일, 검은 점선: S-커브 프로파일).  
Fig. 9. Simulation results (red solid line: trapezoidal profile, black dot line: S-curve profile).

수 있다. 본 시뮬레이션에서는 두 번째 진동모드(0.92Hz)는 unmodeled dynamics로 가정하고, S-커브 프로파일을 설계할 때 첫 번째 진동모드(0.38Hz)만을 고려하여 설계한다. S-커브 프로파일은 III 장에서 설명한 것과 같이  $t_j = T_d = 1/0.38$  가 되도록  $\beta = 0.66$  으로 설정한다. 그림 9는 시뮬레이션 결과로 빨간 실선과 검은 점선은 트롤리가 사다리꼴 프로파일과 S-커브 프로파일을 따라 움직일 때, 진자 끝 단에 발생하는 진동들을 보여주고 있다. 그림 10은 트롤리의 움직임이 끝난 후 진자 끝 단에 잔존하는 잔류진동을 진동모드 별로 크기를 계산한 값이다. III 장에서 언급했듯이  $t_j = T_d$  가 되도록 S-커브 프로파일을 설계하면, 설계 시 반영된 진동모드(첫 번째 진동모드)에 의해 발생하는 진동을 크게 줄일 수 있다는 것을 확인 할 수 있다. 또한 S-커브 프로파일은  $F_s(s)$ 에 내재되어 있는 적분기 성질 때문에 고주파수 대역에 존재하는



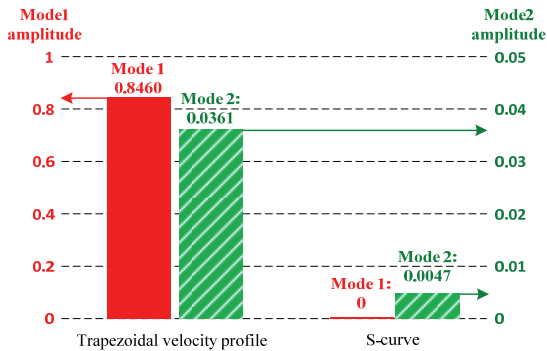


그림 10. 시뮬레이션 결과분석: 1차 진동모드와 2차 진동모드의 크기.

Fig. 10. Comparison of simulation results in magnitude of single-side amplitude spectrum at the first and second vibratory modes.

unmodeled dynamics에 의해 발생하는 진동도 억압하는 능력이 있다는 것을 그림 10의 두 번째 진동모드 크기 비교를 통해 확인할 수 있다. 특히, 고주파수 진동모드가 존재하지만 정확한 모델링이 쉽지 않은 예제(e.g., 인공위성에서 사용되는 태양 전지판)에서는 이런 특징들이 더 빛을 발하리라 기대된다.

V. 결론

본 논문에서는 사다리꼴 프로파일과 S-커브 프로파일을 프리필터 관점에서 재해석하였다. 이를 통해 S-커브 프로파일에 내재되어 있는 새로운 형태의 프리필터를 소개하였다. S-커브 프로파일에 내재되어 있던 프리필터는 기존의 임펄스 열 기반의 입력성형기와는 다르게 구형함수 형태를 띠는 것이 특징이다. 진동저감 측면에서는 S-커브 프로파일 설계 시 반영된 진동모드에 의해 발생하는 진동을 억압하는 특성 외에도 고주파수 영역에 존재하는 unmodeled dynamics에 의해 발생하는 진동도 저감하는 특성이 있다는 것을 확인할 수 있었다. 이런 특징은 고주파수 영역에 진동모드가 다량으로 존재하지만 정확한 모델링이 쉽지 않은 예제에서 unmodeled dynamics에 의해 발생하는 진동을 저감하는데 매우 효과적이라 기대된다.

REFERENCES

[1] C.-W. Ha, K.-H. Rew, and K.-S. Kim, "Zero placement of the asymmetric S-curve profile to minimize the residual vibration," *Journal of Institute of Control, Robotics and Systems (in Korean)*, vol. 18, no. 4, pp. 308-313, 2012.

[2] C.-W. Ha, K.-H. Rew, and K.-S. Kim, "Robust zero placement for motion control of lightly damped systems," *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, vol. 60, no. 9, pp. 3857-3864, Sep. 2013.

[3] K.-H. Rew, C.-W. Ha, and K.-S. Kim, "A practically efficient method for motion control based on asymmetric velocity profile," *International Journal of Machine Tools & Manufacture*, vol. 49, no. 7-8, pp. 678-682, Jun. 2009.

[4] S. K Yun, P. H. Chang, and Juyi Park, "Development of negative input shaping technique for MIMO system," *Journal of Institute of Control, Robotics and Systems (in Korean)*, vol. 6, no. 12, pp. 1045-1052, 2000.

[5] S. Park, K. K Kim, W. K Chung, and Y. Youm, "Residual vibration suppression of a beam-mass-cart system by input preshaping with a robust internal-loop compensator," *Journal of Institute of Control, Robotics and Systems (in Korean)*, vol. 7, no. 3, pp. 198-208, 2001.

[6] J.-D. Kim, C.-S. Cho, H.-J. Lee, C.-B. Shin, and C.-H. Park, "A study on the motion analysis and lead-filter design for high speed/accuracy movement of gantry robot," *Journal of Institute of Control, Robotics and Systems (in Korean)*, vol. 17, no. 1, pp. 31-37, 2011.

[7] N. C. Singer and W. P. Seering, "Preshaping command inputs to reduce system vibration," *Journal of Dynamic Systems, Measurement, and Control*, vol. 112, no. 1, pp. 76-82, 1990.

[8] J. Vaughan, A. Yano, and W. E. Singhose, "Comparison of robust input shapers," *Journal of Sound and Vibration*, vol. 315, no. 4-5, pp. 797-815, Sep. 2008.

[9] K.-H. Rew, C.-W. Ha, and K.-S. Kim, "An impulse-time perturbation approach for enhancing the robustness of extrinsic insensitive input shapers," *Automatica*, vol. 49, no. 11, pp. 3425-3431, Nov. 2013.

[10] C. Lewin, "Motion control gets gradually better," *Machine Design*, vol. 7, no. 21, pp. 90-94, Nov. 1994.

[11] K. D. Nguyen, T. C. Ng, and I. M. Chen, "On algorithms for planning s-curve motion profiles," *International Journal of Advanced Robotic Systems*, vol. 5, no. 1, pp. 99-106, 2008.

[12] H. Li, M. D. Le, Z. M. Gong, and W. Lin, "Motion profile design to reduce residual vibration of high-speed positioning stages," *IEEE Transactions on Mechatronics*, vol. 14, no. 2, pp. 264-269, Apr. 2009.

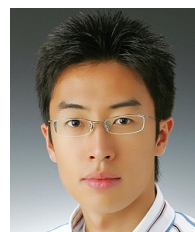
[13] K.-H. Rew, J.-T. Kwon, K. Park, "Antisymmetric S-curve profile for fast and vibrationless motion," *Journal of Institute of Control, Robotics and Systems (in Korean)*, vol. 12, no. 10, pp. 1012-1017, 2006.

[14] K.-H. Rew and K.-S. Kim, "A closed-form solution to asymmetric motion profile allowing acceleration manipulation," *IEEE T. Ind. Electron.*, vol. 57, no. 7, pp. 2499-2506, Jul. 2010.

[15] S. Tanaka and S. Kouno, "Automatic measurement and control of the attitude of crane lifters: Lifter-attitude measurement and control," *Control Engineering Practice*, vol. 6, no. 9, pp. 1099-1107, 1998.

[16] R. Kumar and T. Singh, "Design of input shapers using modal cost for multi-mode systems," *Automatica*, vol. 46, no. 3, pp. 598-604, 2010.

[17] C.-W. Ha, K.-H. Rew, K.-S. Kim, "Embedded input shapers in the motion profiles," *Proc. of 2014 29th ICROS Annual Conference (ICROS 2014) (in Korean)*, pp. 342-343, Daegu, Korea, 2014.



하 창 완

1985년 10월 19일생. 2008년 한동대학교 기계제어공학부(공학사). 2010년 KAIST 기계공학과(공학석사). 2014년 동 대학원(공학박사). 2014년 KAIST 기계기술 연구원 Post-Doc. 2014년~현재 한국기계 연구원(KIMM) 선임연구원. 관심분야

모션제어, 입력성형기, 반도체/디스플레이 장비 개발, 자기부상시스템.



### 이 동 욱

1989년 4월 10일생. 2012년 KAIST 기계공학과(공학사). 2014년 KAIST 기계공학과(공학석사). 2014년~현재 동 대학원 박사과정. 관심분야는 모션제어 및 자동차 제어.



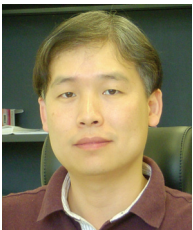
### 윤 병 호

1981년 7월 9일생. 2007년 성균관대학교 기계공학부(공학사). 2009년 KAIST 로봇공학학제(공학석사). 2009년~2010년 한국융합로봇연구원 주임연구원. 2011년~현재 KAIST 기계공학과 박사과정. 관심분야는 모션제어, 로봇 설계 및 제어.



### 류 근 호

1971년 1월 30일생. 1994년 KAIST 기계공학과(공학사). 1996년 동 대학원(공학석사). 2001년 동 대학원(공학박사). 1998년~2003년 미래산업. 2003년~2005년 파인디앤씨. 2005년~현재 호서대학교 기계공학과 교수. 관심분야는 잔류진동제어, 생체신호처리, 반도체/디스플레이 장비 개발.



### 김 경 수

1973년 3월 30일생. 1993년 KAIST 기계공학과(공학사). 1995년 동 대학원(공학석사). 1999년 동 대학원(공학박사). 1999년~2003년 ㈜LG전자, 디지털미디어 연구소 책임연구원. 2003년~2005년 ST-Microelectronics Co. Ltd. Multimedia Technology Center R&D Manager. 2005년~2007년 한국산업기술대학교 기계공학과 교수. 2007년~현재 KAIST 기계공학과 교수. 관심분야는 강인제어, 최적제어, 외란추종기, 로봇 매니퓰레이터 설계 및 제어, 센서 및 구동기 설계 및 제어, 모션제어.