

잔류진동 저감을 위한 비대칭 S-curve 프로파일의 영점 배치법

Zero Placement of the Asymmetric S-curve Profile to Minimize the Residual Vibration

하창완, 류근호, 김경수*, 김수현
(Chang-Wan Ha¹, Keun-Ho Rew², Kyung-Soo Kim¹, and Soo-Hyun Kim¹)

¹Department of Mechanical Engineering, KAIST, Korea

²Department of Robotics Engineering, Hoseo University, Korea

Abstract: Robust tuning rules of the motion profile are proposed to minimize the residual vibration. For asymmetric S-curve profile, tuning rules are analytically formulated using Laplace-domain approach. When the system modeling is known exactly, by placing a single zero of the motion profile on the pole of the system, the residual vibration can be perfectly eliminated under undamped system. However, if there are some amounts of the modeling errors, the residual vibration significantly increases. To track this issue, the robust tuning rules against modeling error are discussed. One of the proposed robust tuning rules is placing the multiple zeros of the motion profile on the pole of the system, and the other is placing the zeros of the motion profile around the pole of the system. Thanks to the proposed robust tuning rules, motion profile becomes more robust to modeling errors while minimizing the residual vibration. By simulation, the effectiveness of the proposed robust tuning rules is verified.

Keywords: motion profile, asymmetric S-curve, residual vibration, robustness, sensitivity

I. 서론

초고속, 초정밀, 저진동의 특징을 갖는 이송제어기술은 지난 수세기 동안 제어공학에 중요한 이슈가 되어 왔다. 개발의 핵심은 빠른 정착시간과 움직임이 끝난 후 미세하게 떨리는 잔류진동의 최소화라는 상충적인 두 개의 목표를 최적화하는데 있다. 특히 승강기와 같이 승객이 탑승하는 시스템에서는 승차감과 직결되며, 이송장비의 경우 기계의 수명과 안정된 동작을 보장할 뿐만 아니라 제품의 질과 생산성에 직결된다. 또한, 초정밀 운동이나 접촉 운동과 같이 잔류진동이 지극히 적어야 하는 상황에서는 잔류진동 저감기술이 필수적이다[1-3].

이런 기계의 부드러운 움직임은 기준입력(reference signal)에 해당하는 모션 프로파일(motion profile)에 크게 영향을 받는다. 따라서 모션 프로파일 설계는 제어 성능을 결정짓는 중요한 인자이다. 예를 들면, 사다리꼴 프로파일은 S-curve 프로파일에 비해 궤적을 따라 움직이는 운동시간이 짧지만 가속도가 급변하여 도착 후 잔존하는 잔류진동(residual vibration)이 크게 발생하므로 안정화되는데 필요한 정착시간(setting time)이 길어져 S-curve 프로파일에 비해 비효율적이다[4-7].

최근에는 S-curve의 성능한계를 극복하기 위해 가속구간과 감속구간의 대칭성을 깨뜨린 비대칭 S-curve(asymmetric S-curve)가 개발되었다[8]. 비대칭 S-curve는 출발할 때에는 빠른 속도, 가속도, 저크(jerk)를 허용하고, 도착할 때는 느린 속도,

가속도 및 저크가 되도록 하여 출발할 때는 고속성을 피하고 도착할 때에는 저크를 임의로 낮춰 잔류진동을 크게 줄일 수 있을 뿐 아니라 시간적 효율성을 동시에 얻을 수 있다는 장점이 있다[9].

기존 연구를 살펴보면, 부드러운 모션 프로파일을 생성하기 위해 여러 설계 방법론들은 많이 연구 되었지만, 잔류진동을 저감하기 위한 모션 프로파일 튜닝 방법론에 대해서는 연구가 미진하다[10-12]. 특히, 시스템의 모델링 에러에 따른 잔류진동 크기 변화 및 민감도에 대해서는 기존 연구에서 언급이 되지 않고 있다. 본 논문에서는 잔류진동을 저감하기 위한 비대칭 S-curve의 튜닝 방법을 Laplace domain 상에서 해석적으로 유도하고 물리적인 의미를 고찰한다. 또한, 모델링 에러가 필연적으로 존재하는 실제 환경에 적합하도록 모델링 에러에 둔감한 튜닝 방법론을 제안하고 이를 시뮬레이션을 통해 실효성을 검증한다.

II. 비대칭 S-curve 모션 프로파일

최근 연구를 살펴보면, 비대칭 S-curve 설계에 대한 완벽한 해가 구해졌으며[8], 튜닝 인자와 잔류진동 간의 관계에 대한 연구가 진행되고 있다[9]. 비대칭 S-curve는 사다리꼴 프로파일과 S-curve 프로파일을 포함하는 상위개념의 모션 프로파일로 부드러운 정도를 나타내는 튜닝 인자, β 와 가속구간과 감속구간의 비대칭 정도를 나타내는 튜닝 인자, γ 를 가지고 있다. 그림 1과 그림 2는 비대칭 S-curve 프로파일과 튜닝 인자(β, γ)에 따른 모션 프로파일 변화를 보여준다.

모션프로파일의 부드러운 정도를 나타내는 β 는 0에서 1까지 변할 수 있는 튜닝 인자로 모션 프로파일에서 사용되는 저크의 크기를 결정한다.

$$J = \frac{A_{\max}}{\beta\tau_m} \quad (1)$$

* 책임저자(Corresponding Author)

논문접수: 2011. 12. 18., 수정: 2011. 12. 23., 채택확정: 2012. 1. 10.

하창완, 김경수, 김수현: KAIST 기계공학과

(hawan@kaist.ac.kr/kyungsookim@kaist.ac.kr/soohyun@kaist.ac.kr)

류근호: 호서대학교 기계공학부 로봇자동화 전공(khrew@hoseo.edu)

※ 본 연구는 지식경제부와 한국산업기술진흥원의 전략기술인력양성 사업 및 교육과학기술부 BK21 지원으로 연구되었음.

※ 본 논문은 2011년 ICROS 대전충청지부 학술대회에서 초안이 발표되었음.

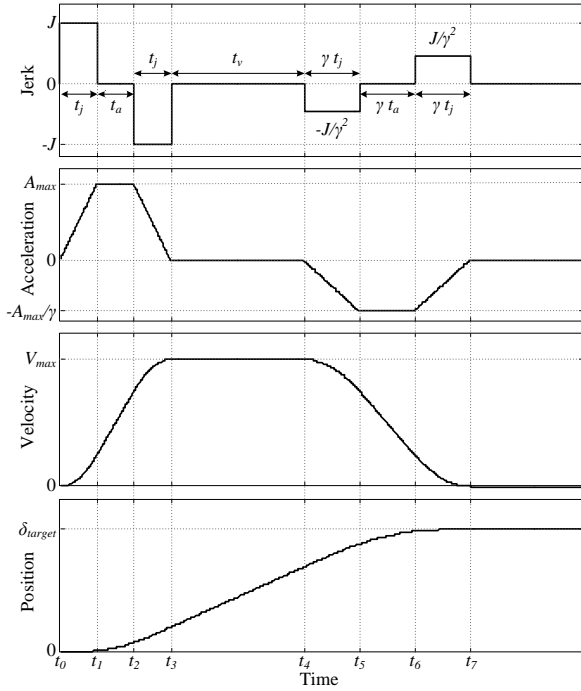


그림 1. 비대칭 S-curve 모션 프로파일[12].

Fig. 1. Asymmetric S-curve profile.

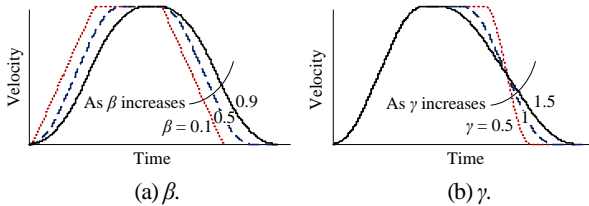


그림 2. 비대칭 S-curve 튜닝 인자의 영향[12].

Fig. 2. Effect of the tuning parameters of AS-curve.

τ_m 은 V_{max}/A_{max} 로 정의한다. 그림 2(a)에서 볼 수 있듯이 β 가 0으로 접근할수록 사용되는 저크의 크기는 커지고 가속도는 급변하며 속도 프로파일의 형상은 사다리꼴에 근접하는 특징이 있다. 반대로, β 가 1에 접근할수록 저크의 크기는 작아지고 가속도는 느리게 변하며 속도 프로파일은 종모양에 근접한다.

다른 튜닝인자 γ 는 모션 프로파일의 가속구간과 감속구간의 비대칭성을 표현하는 인자로 $\gamma=1$ 일 때에는 가속구간과 감속구간이 대칭적인 형상을 띄며, 기존의 S-curve과 같아진다. 반대로, $\gamma \neq 1$ 일 때에는 가속구간과 감속구간의 대칭성이 깨져 빠른 출발과 느린 도착이 가능하다.

비대칭 S-curve 프로파일에서 이동거리(δ_{target})가 수식 (2)를 만족하면

$$\delta_{target} \geq \delta_l = \frac{(1+\beta)(1+\gamma)\tau_m V_{max}}{2} \quad (2)$$

long distance case로 분류된다. 이 때의 모션 프로파일은 그림 1과 같이 속도 프로파일과 가속도 프로파일이 구동기의 최대 속도와 최대 가속도에 도달할 수 있게 되고 모션 파라미터들은 다음과 같이 결정된다[8].

$$\begin{cases} t_j = \beta\tau_m \\ t_a = (1-\beta)\tau_m \\ t_v = (\delta_{target} - \delta_l)/V_{max} \end{cases} \quad (3)$$

t_j, t_a, t_v 는 등저크, 등가속도, 등속도 구간의 시간을 나타낸다. 본 논문에서는 수식 (2)를 만족하는 long distance case 경우에 대해서만 다룬다. 나머지 구간에 대해서는 추후 연구로 남긴다.

또한 수식의 복잡성을 피하기 위해 감쇠비(ζ)가 작아 무시할 수 있다고 가정한다. 이는 감쇠비가 작은 시스템($\zeta < 0.05$)에서 잔류진동 문제가 특히 중요하기 때문이다. 감쇠비가 작은 경우 도착 후 잔존하는 잔류진동이 자연 감쇠하는데 걸리는 시간이 길어져서 정착시간(settling time)에 크게 영향을 주기 때문이다.

III. 잔류진동 저감을 위한 비대칭 S-curve의 튜닝 방법

우리가 관심을 갖는 시스템은 그림 3과 같이 간략하게 표현할 수 있다. Base에 붙은 second mass는 로봇 매니퓰레이터 끝 단의 진동모드를 모사한 것이다. Base와 second mass 간의 운동방정식은 다음과 같다.

$$\frac{X_2}{X_1} = \frac{-s^2}{s^2 + \omega_n^2} \quad (4)$$

X_1 과 X_2 는 base의 절대움직임과 second mass의 상대움직임을 나타낸다. 만약 base가 지정해준 모션 프로파일을 잘 추정할 경우 base의 움직임은 다음과 같이 표현할 수 있다[13].

$$s^2 X_1(s) = -\frac{A_{max}}{\beta\gamma^2\tau_m} \frac{(1-e^{-\beta\gamma\tau_m s})(1-e^{-\gamma\tau_m s})}{s^2} \quad (5)$$

이 때 second mass에 발생하는 잔류진동은 수식 (4)와 수식 (5)를 이용하여 다음과 같이 유도된다[13].

$$s^2 X_2(s) = -\frac{A_{max}}{\beta\gamma^2\tau_m} \frac{(1-e^{-\beta\gamma\tau_m s})(1-e^{-\gamma\tau_m s})}{s^2 + \omega_n^2}$$

즉, 도착 후 잔존하는 잔류진동의 크기는 시스템의 고유한 특징을 나타내는 한 쌍의 극점과 비대칭 S-curve 프로파일에 의해 생성되는 두 개의 영점 집합에 의해 결정되는 것을 확인할 수 있다.

$$s_p = \pm j\omega_n \quad (6)$$

$$\begin{cases} s_{z1} = \pm j \frac{2\pi k}{\beta\gamma\tau_m}; & k=0,1,2,\dots \\ s_{z2} = \pm j \frac{2\pi m}{\gamma\tau_m}; & m=0,1,2,\dots \end{cases} \quad (7)$$

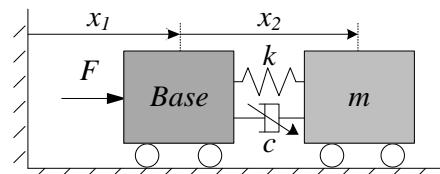


그림 3. 시스템 모델링[12].

Fig. 3. Modeling of flexible system.

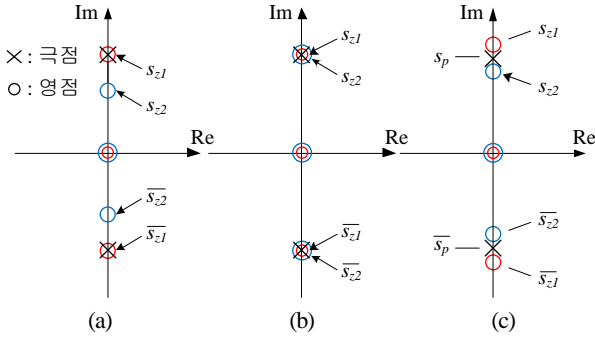


그림 4. 다양한 영점 배치법: (a) 하나의 영점을 이용한 극점 상쇄, (b) 두 개의 영점을 이용한 극점 상쇄, (c) 극점 주변에 영점 배치[14].

Fig. 4. Zero placement: (a) pole-zero cancellation with a single zero, (b) pole-zero cancellation with double zeros, and (c) placement of zeros around the pole.

따라서 튜닝인자를 적절히 선정하여 영점을 조절하면 잔류진동의 특성을 나타내는 극점의 영향을 최소화할 수 있다.

본 논문에서는 잔류진동 저감을 위해 극-영점상쇄(pole-zero cancellation) 원리를 이용하였다. 그림 4(a)는 하나의 영점을 이용하여 극점을 상쇄시키는 경우를 나타내며, 그림 4(b)는 두 개의 영점을 이용하여 극점을 상쇄시키는 것을 나타낸다. 하나의 영점을 이용하여 극점을 상쇄시키는 경우, 수식 (8)과 같이 모델링을 정확히 알고 있을 때에는 영점을 이용하여 극점을 완벽히 상쇄시킬 있기 때문에 잔류진동을 효과적으로 줄일 수 있다.

$$s^2 X_1(s) \Big|_{s=s_p} = 0 \tag{8}$$

하지만 모델링 에러(Δs)가 존재할 때에는 완벽한 극-영점 상쇄가 일어나지 않기 때문에 잔류진동이 크게 커지는 특징이 있다.

반면에 두 개의 영점을 이용하여 극점을 상쇄시키는 경우에는 수식 (9)와 같이 적은 모델링 에러(Δs)가 존재하더라도 잔류진동을 효과적으로 줄일 수 있다.

$$s^2 X_1(s + \Delta s) \Big|_{s=s_p} \cong s^2 X_1(s) \Big|_{s=s_p} + \frac{d}{ds} \{s^2 X_1(s)\} \Big|_{s=s_p} \Delta s = 0 \tag{9}$$

즉, 하나의 영점을 이용하여 극점을 상쇄시키는 경우에 비해 두 개의 영점을 이용하여 극점을 상쇄시키는 방법이 모델링 에러에 둔감한 특성을 보임을 확인 할 수 있다.

모델링 에러가 존재할 때 실제 극점의 위치는 모델링했던 극점 위치에서 벗어나는 특징이 있다. 이 특징을 이용하여 그림 4(c)와 같이 영점을 극점 주위에 배치시키는 영점 배치법을 제안한다. 제안한 영점 배치법은 입력성형기(input shaping technique) 중 EI shaper의 설계 방법과 물리적인 의미에서 비슷한 특징이 있다[15]. 이 방법은 영점을 극점 주위에 배치시킴으로써 넓은 범위의 모델링 에러에 대해 잔류진동을 효과적으로 저감할 수 있게 해준다. 이 때의 영점 배치는 극점을 중심으로 위와 아래에 대칭적으로 배치되며, 튜닝 인자(β, γ)는 수식 (10)과 수식 (11)에 의해 결정된다. 먼저 허용

잔류진동크기(\ddot{x}_{tol} : 도착 후 잔존하는 잔류진동 크기의 허용치)를 선택하고 수식 (10)을 만족하는 가장 작은 양수 α 값을 찾는다.

$$\left| \frac{2(1-\alpha)(1+\alpha)f_n\tau_m A_{max} \sin\left(\frac{k\pi}{1+\alpha}\right) \sin\left(\frac{m\pi}{1-\alpha}\right)}{km\pi} \right| = \ddot{x}_{tol} \tag{10}$$

$\alpha \in [0, 1]$ 는 영점이 극점에서 떨어진 정도를 나타내며, α 가 0에 접근할수록 두 개의 영점이 극점을 중심으로 모여들고, α 가 커질수록 영점이 극점을 중심으로 대칭적으로 멀어지는 것을 의미한다. 수식 (10)을 이용하여 구한 α 를 이용하여 튜닝 인자(β, γ)들은 수식 (11)을 이용하여 구할 수 있다.

$$\begin{cases} \beta = \frac{k}{m} \cdot \frac{1-\alpha}{1+\alpha} \\ \gamma = \frac{m}{(1-\alpha)f_n\tau_m} \end{cases} \tag{11}$$

모델링 에러에 둔감한 제안된 설계방법, (i) 두 개의 영점을 극점에 배치시키는 방법과 (ii) 영점을 극점 주변에 배치시키는 방법, 은 모델링 에러가 필연적으로 존재하는 실제환경에서 모델링 에러에 둔감한 모션 프로파일을 만드는데 유용하게 사용될 수 있으리라 판단된다.

IV. 시뮬레이션

제안한 방법의 실효성을 검증하기 위해 표 1에 정리된 파라미터를 이용하여 시뮬레이션을 수행하였다. 비대칭 S-curve의 튜닝 인자들은 표 2와 같이 설정하였다. Case A는 그림 4(a)와 같이 영점 하나를 이용하여 극점을 상쇄시키는 경우이며, Case B는 그림 4(b)와 같이 영점 두 개를 이용하여 극점을 상쇄시키는 경우이다. Case C는 허용잔류진동크기가 0.05 m/s² (i.e., 최대가속도의 5%)을 만족하는 조건하에서 영점이 극점 주위에 배치되도록 비대칭 S-curve의 튜닝 인자들을 선정하였다. 이 때의 극-영점 배치는 그림 4와 같다.

그림 5, 6, 7는 Case A, B, C 일 때의 모션 프로파일과 second mass에 발생하는 잔류진동이다. 과란 실선은 모델링 에러가

표 1. 시뮬레이션에 사용된 파라미터.

Table 1. The parameters for simulation.

Properties		Values
f_n	Natural frequency	15 Hz → 16.5 Hz (10% modeling error)
ζ	Damping ratio	0.04
V_{max}	Maximum velocity	1.0 m/s
A_{max}	Maximum acceleration	0.1 m/s ²
δ_{target}	Target distance	0.2 m

표 2. 비대칭 S-curve의 튜닝 인자 선정.

Table 2. The tuning parameters of asymmetric S-curve profile.

	β	γ
Case A Pole-zero cancellation with a single zero	0.6667	1
Case B Pole-zero cancellation with the double zeros	0.5	1.3333
Case C Placement of the zeros around the pole	0.4305	1.4410

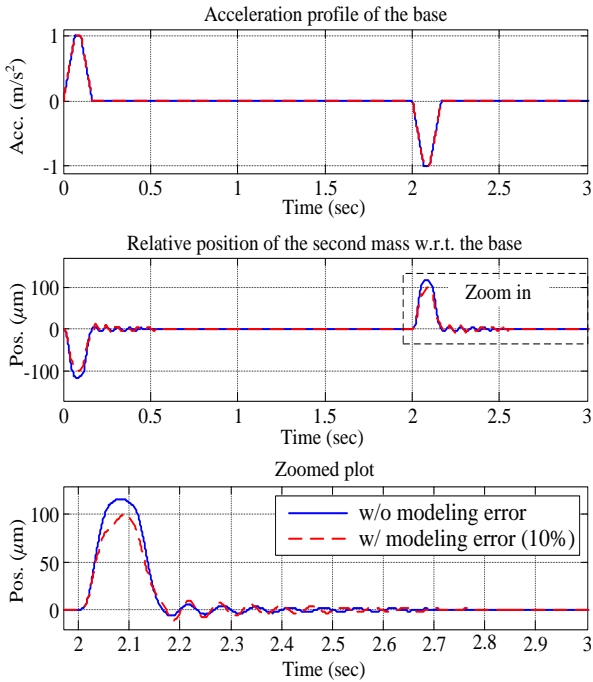


그림 5. Case A: 모션 프로파일과 second mass에서 발생하는 잔류진동 (파란실선: 모델링 에러가 없는 경우/ 빨간 점선: 10% 모델링 에러가 존재하는 경우).

Fig. 5. Case A: motion profile and the induced vibration of the second mass (blue line: without modeling error/ red dot line: with 10 % modeling error).

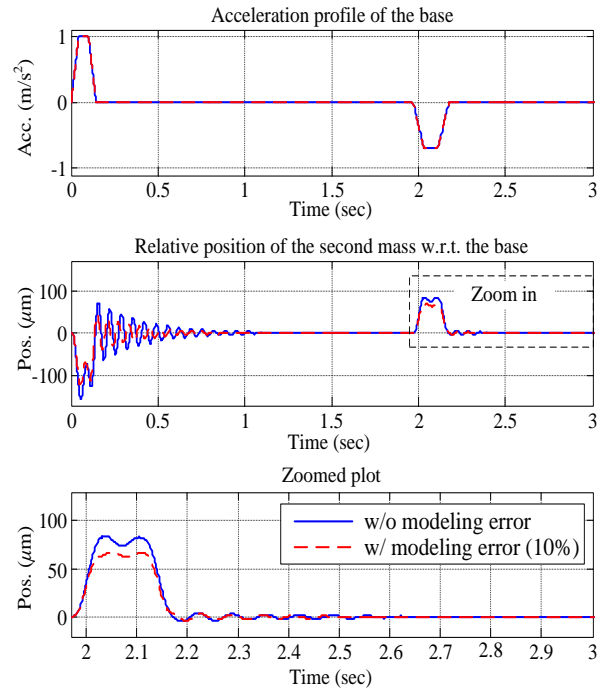


그림 7. Case C: 모션 프로파일과 second mass에서 발생하는 잔류진동 (파란실선: 모델링 에러가 없는 경우/ 빨간 점선: 10% 모델링 에러가 존재하는 경우).

Fig. 7. Case C: motion profile and the induced vibration of the second mass (blue line: without modeling error/ red dot line: with 10 % modeling error).

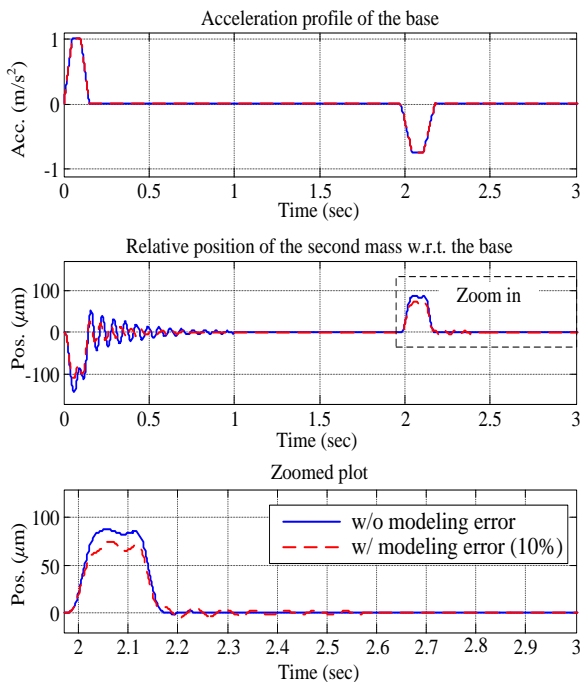


그림 6. Case B: 모션 프로파일과 second mass에서 발생하는 잔류진동 (파란실선: 모델링 에러가 없는 경우/ 빨간 점선: 10% 모델링 에러가 존재하는 경우).

Fig. 6. Case B: motion profile and the induced vibration of the second mass (blue line: without modeling error/ red dot line: with 10 % modeling error).

표 3. 정착시간 비교.

Table 3. Comparison of settling times.

	Case A	Case B	Case C
t_s w/o modeling error	2.222 sec	2.162 sec	2.165 sec
t_s w/ modeling error	2.370 sec	2.206 sec	2.166 sec
dt_s/t_s	6.68%	2.02%	0.06%

없을 때의 시뮬레이션 결과이며, 빨간 점선은 10%의 모델링 오차가 존재할 때의 시뮬레이션 결과이다. 모델링 에러가 존재하지 않을 때에는 세 경우 모두 잔류진동을 효과적으로 저감하는 것을 확인 할 수 있다. 모델링 에러가 존재할 때에는 세 경우 모두 잔류진동이 커진다. 하지만 커지는 정도는 Case A가 가장 크며, 그 뒤로 Case B, Case C가 되는 것을 확인 할 수 있다. 모델링 에러가 존재할 때 잔류진동이 커지는 정도를 정량적으로 비교하기 위해 잔류진동이 허용범위 ($5\mu\text{m}$) 이내로 감쇠하는데 필요한 정착시간(settling time)을 정의하고 표 3에 정리하였다. Case A의 경우 10%의 모델링 에러가 발생함에 따라 정착시간이 6.68% 증가한 반면 Case B의 경우 2.02% 증가하였다. 즉, 극영점상쇄 원리를 이용할 경우, 영점 하나를 이용하는 것 보다 다수 개의 영점을 이용하여 극점을 상쇄하는 것이 모델링 에러에 대한 둔감도 측면에서 효율적임을 확인 할 수 있다. Case C의 경우는 모델링 에러가 존재함에도 불구하고 정착시간에 거의 변화가 없었

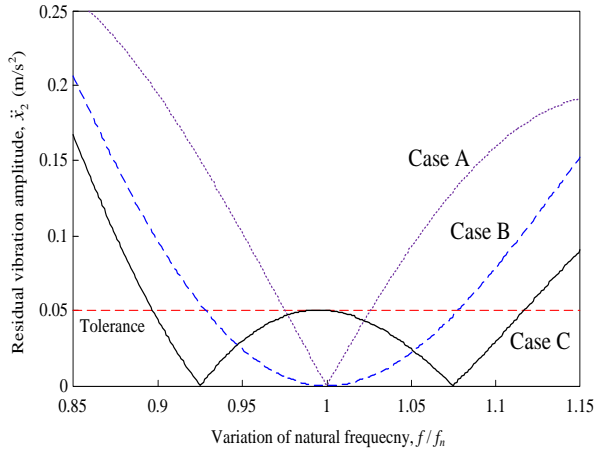


그림 8. 모델링 에러에 따른 잔류진동크기 변화.

Fig. 8. Residual vibration amplitude with respect to the variation of the natural frequency.

다(0.06 %).

모델링 에러 변화에 따른 잔류진동 변화를 면밀하게 파악하기 위해 모델링 에러가 -15 %에서 15 %까지 변화할 때의 잔류진동 크기 변화를 시뮬레이션을 통해 확인해보았다. 그림 8은 모델링 에러 변화에 따른 잔류진동크기 거동을 나타낸다. 앞 절에서 설명했듯이 모델링 에러가 없을 때($f/f_n = 1$)에는 세 경우 모두 잔류진동을 효과적으로 저감한다. 특이한 점은 Case C의 경우 영점을 극점 주변에 배치한다는 특성 때문에 모델링 에러가 없을 때에도 잔류진동이 완벽하게 제거하지 못하는 것을 확인 할 수 있다. 세 경우 모델링 에러가 커짐에 따라 잔류진동이 커지게 되는데 커지는 정도는 서로 다르다. 예상했듯이 Case B와 C가 모델링 에러에 대해 둔감한 특성을 보이며, Case A는 모델링 에러에 민감한 특성을 보임을 확인 할 수 있다. 따라서 모델링 에러가 필연적으로 존재하는 환경에서는 Case B와 C 같은 모델링 에러가 둔감한 튜닝 조건을 이용하여 비대칭 S-curve 프로파일을 설계하는 것이 바람직하다고 판단된다. 제안한 방법은 비대칭 S-curve 모션 프로파일을 설계하는데 해석적인 가이드라인을 제시할 수 있으리라 사료된다. 특히, 모델링 에러에 둔감한 실용적인 설계 방법이라 판단된다.

V. 결론

본 논문에서는 모델링 에러에 둔감하면서 잔류진동을 저감할 수 있는 비대칭 S-curve 설계 방법을 제시하였다. 모션 프로파일에 의해 만들어지는 영점을 이용하여 시스템의 진동 특성을 나타내는 극점을 상쇄시킬 때 영점 하나를 이용하는 것보다 영점 두 개를 이용하는 것이 모델링 에러에 대한 둔감도 측면에서 효율적임을 확인하였다. 또한 모델링 에러에 대한 둔감성을 향상시키기 위해 영점을 극점 주변에 배치하는 설계 방법을 제시하였고 해석적인 해를 유도하였으며 이를 시뮬레이션을 통해 실효성을 검증하였다. 제안된 설계 방법은 잔류진동을 저감하면서 모델링 에러에 둔감한 모션 프로파일을 설계하는데 실용적인 가이드라인을 제시할 수 있으리라 판단된다.

참고문헌

- [1] K.-S. Jung, J.-K. Park, and H.-J. Kim, "Improvement of dynamic characteristic of large-area planar stage using induction principle," *Journal of Institute of Control, Robotics and Systems*, vol. 15, no. 7, pp. 675-682, Jul. 2009.
- [2] J. R. Ryoo and T.-Y. Doh, "Enhanced track jump stability in optical disc drives," *Journal of Institute of Control, Robotics and Systems*, vol. 15, no. 7, pp. 683-687, Jul. 2009.
- [3] Y. J. Shin, K.-S. Kim, and S.-H. Kim, "Precise control law design of robot finger embedding distributed actuation mechanism," *Journal of Institute of Control, Robotics and Systems*, vol. 16, no. 9, pp. 846-851, Sep. 2010.
- [4] K. D. Nguyen, I. M. Chen, and T. C. Ng, "Planning algorithms for S-curve trajectories," *Proc. of IEEE/ASME International Conference on Advanced Intelligent Mechatronics*, Zurich, Switzerland, pp. 1-6, Sep. 2007.
- [5] R. C. Hong and Y. F. Chang, "Parametric curve machining of a CNC milling EDM," *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, vol. 45, no. 7-8, pp. 941-948, Jun. 2005.
- [6] C. G. L. Bianco and R. Zanasi, "Smooth profile generation for a tile printing machine," *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, vol. 50, no. 3, pp. 471-477, Jun. 2003.
- [7] H. Li, M. D. Le, Z. M. Gong, and W. Lin, "Motion profile design to reduce residual vibration of high-speed positioning stages," *IEEE/ASME Transactions on Mechatronics*, vol. 14, no. 2, pp. 264-269, Apr. 2009.
- [8] K.-H. Rew and K.-S. Kim, "A closed-form solution to asymmetric motion profile allowing acceleration manipulation," *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, vol. 57, no. 7, pp. 2499-2506, Jul. 2010.
- [9] C.-W. Ha, K.-H. Rew, and K.-S. Kim, "A complete solution to asymmetric S-curve motion profile: theory & experiments," *Proc. of International Conference on Control, Automation and Systems*, Seoul, Republic of Korea, pp. 2845-2849, Oct. 2008.
- [10] P. H. Meckl and P. B. Arestides, "Optimized S-curve motion profiles for minimum residual vibration," *Proc. of American Control Conference*, Philadelphia, USA, pp. 2627-2631, Jun. 1998.
- [11] 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 Tool and Manufacture*, vol. 49, no. 7-8, pp. 678-682, Jun. 2009.
- [12] C.-W. Ha, K.-H. Rew, and K.-S. Kim, "Formulating a Laplace domain approach for tuning motion profile," *Proc. of IEEE/ASME International Conference on Advanced Intelligent Mechatronics*, Budapest, Hungary, pp. 356-360, Jul. 2011.
- [13] 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*, Under Review.
- [14] C.-W. Ha, K.-H. Rew, K.-S. Kim, and S.-H. Kim, "Design the asymmetric S-curve profile to minimize the residual vibration," *Proc. of 2011 ICROS (Institute of Control, Robotics and Systems) Daejeon Chungcheong Branch Conference (in Korean)*, pp. 128-131, Dec. 2011.
- [15] W. Singhose, W. Seering, and N. Singer, "Residual vibration reduction using vector diagrams to generate shaped inputs," *Journal of Mechanical Design*, vol. 116, no. 2, pp. 654-659, Jun. 1994.



하창완

2008년 한동대학교 기계제어공학부(공학사). 2010년 KAIST 기계공학과(공학석사). 2010년~현재 동 대학원 박사과정 재학 중. 관심분야는 모션프로파일을 이용한 잔류진동제어, 입력성형기(Input shaping), 초음파분당.



류근호

1994년 KAIST 기계공학과(공학사). 1996년 동 대학원(공학석사). 2001년 동 대학원(공학박사). 1998년~2003년 미래산업. 2003년~2005년 파인디앤씨. 2005년~현재 호서대학교 기계공학부 로봇자동화 전공 교수. 관심분야는 잔류진동제어, 온도제어, 생체신호처리, 반도체/디스플레이 장비 개발.



김경수

1993년 KAIST 기계공학과(공학사). 1995년 동 대학원(공학석사). 1999년 동 대학원(공학박사). 1999년~2003년 (주)LG전자, 디지털미디어 연구소 책임연구원. 2003년~2005년 STMicroelectronics Co. Ltd. Multimedia Technology Center R&D

Manager. 2005년~2007년 한국산업기술대학교 기계공학과 교수. 2007년~현재 KAIST 기계공학과 교수. 관심분야는 Robust control, Sliding mode control, Robot manipulator, Actuator and Sensor Design, 잔류진동제어.



김수현

1978년 서울대학교 기계공학과(공학사). 1980년 KAIST 기계공학과(공학석사). 1991년 Imperial College, Univ. of London 기계공학과(공학박사). 1991년~현재 KAIST 기계공학과 교수. 관심분야는 로봇 메커니즘 설계 및 제어, 국방 로봇, Spectroscopy.