

Feedforward와 Snap을 적용한 유연구조 피에조 스테이지의 성능 향상에 대한 연구

Study on Performance Improvement at Flexure Piezo Stage Using Feedforward and Snap

홍태화^{1,*}, 이진호^{2,*}, 김효영³, 김기현^{1,#}
Taehwa Hong^{1,*}, Jinho Lee^{1,*}, Hyoyoung Kim³, and Kihyun Kim^{1,#}

¹ 한국산업기술대학교 메카트로닉스공학과 (Department of Mechatronics Engineering, Korea Polytechnic University)

² 아주대학교 기계공학과 (Department of Mechanical Engineering, Ajou University)

³ 한국생산기술연구원 (Manufacturing System R&D Group, Korea Institute of Industrial Technology)

Corresponding Author / E-mail: khkim12@kpu.ac.kr, TEL: +82-31-8041-0460

ORCID: 0000-0002-2077-3647

*TaeHwa Hong and JinHo Lee share equally first authorship

KEYWORDS: Motion profile (모션프로파일), Flexure Piezo stage (유연 피에조 스테이지), Tracking error (추종오차), Feedback control (피드백 제어), Feedforward control (피드포워드 제어), Snap (스냅)

Recently, instrument stages using flexure guide mechanisms and piezo actuators have been widely used for an ultra-precision positioning system in various industries. Research into ultra-precision position control aiming at nanoscale position errors during stage driving is being actively conducted, as well as various studies on the motion profile adjusting the reference input. In this study, we suggested a motion profile with snap and feedforward for use with a high speed nano scanning system, as compared and analyzed with the position tracking error through feedback control, and also compared to the related feed with the forward control noted as minimized at the position error to 14.19 nm. As a result, a tracking error when applying the fourth profile with snaps to the piezoelectric stage, is obtained with an error reduction effect of about 15%, as compared to when the second profile is applied.

Manuscript received: February 21, 2020 / Revised: April 10, 2020 / Accepted: April 23, 2020

NOMENCLATURE

x = Distance

v = Velocity

a = Acceleration

j = Jerk

d = Derivate of jerk

M = Mass

C = Damper

K = Spring

1. 서론

최근 반도체 공정, AFM, STM, LCD 장비 등의 초정밀 위치 결정 기구에 대한 필요성이 대두되고 있다. 초정밀 위치 결정 기구에 사용되는 다양한 메커니즘 중 피에조(Piezo Actuator)와 유연 기구(Flexure)로 구성된 시스템이 있다. 피에조는 빠른 응답 속도를 가지고 있으며, 재현성이 좋고 큰 힘을 낼 수 있다는 장점이 있으므로 초정밀 시스템 구현에 적합하다. 피에조를 사용한 초정밀 시스템 구현 시 위치오차가 나노 스케일을 갖는 정밀한 시스템의 구현을 위하여 위치오차에 대한 보상이 필요하다. 위치오차가 발생하는 원인에는 온도의 의한 오차, 기구학적 오차, 정·동강성에 의한 오차, 스테이지 구동 시에 발생하는

진동에 의한 오차 등 여러가지 요인들이 있다. 스테이지에서 발생하는 진동을 줄이기 위한 다양한 연구를 보면, 고속으로 구동 시에 스테이지의 잔류진동을 줄이기 위한 스냅이 적용된 모션 프로파일을 설계한 Li,¹ 하드 디스크 드라이브(HDD) 시스템의 고속 및 고정밀 위치제어를 위한 궤적 설계를 한 Chang,² 로봇 모션 시 발생하는 진동을 줄이기 위해 Cubic Spline을 사용하여 Minimum Jerk 궤적을 찾은 Piazzzi,³ 프로파일의 가속 감속 시간 최적화에 대한 연구를 진행한 Meck,⁴ 도착 시간에 저크 값을 조절하여 감속을 효과적으로 줄이는 비대칭 모션 프로파일에 대한 연구를 한 Rew,⁵ 삼각법 모델을 사용하여 최적의 시간을 고려한 S-프로파일을 연구한 Kim,⁶ 상업용 모션 컨트롤러를 이용하여 위치결정 작업 중 가속 구간과 감속 구간에서 발생하는 진동 특성을 파악하여 개선된 입력성형기법을 적용하여 잔류진동을 제거하는 방법을 제안한 Jang,⁷ PZT 기반 굽힘 힌지 스테이지의 최적 설계를 연구한 Hwang⁸ 등 다양한 분야에서 스테이지 구동 시 발생하는 진동을 줄이기 위한 연구를 진행해 왔다.

본 논문에서는 스테이지 구동 시 발생하는 진동에 의한 오차를 최소화하기 위하여, 제어기의 레퍼런스 입력을 조절하는 모션 프로파일에 대한 연구를 진행하였다.

스테이지 구동 시 입력으로 들어가는 프로파일은 다항식의 차수에 의해 달라지며, 그 중 위치오차는 가속도 프로파일의 형태에 의존적이다. 고차다항식으로 갈수록 가속도 프로파일의 불연속점이 사라져 진동이 감소되어 유연한 형태를 띠는 프로파일을 설계하여 입력으로 줄 수 있기 때문이다. 일반적으로 가장 많이 사용되는 모션 프로파일은 사다리꼴 형태의 속도함수를 갖는 2차 프로파일이다. 2차 프로파일은 사용이 용이하여 쉽고 간단하게 사용할 수 있지만, 시스템에 입력으로 주게 되면 무한한 저크 값을 가지게 되어 큰 진동을 유발한다. 본 논문에서는 유연 구조 스테이지에서 발생하는 진동을 최소화하기 위하여 저크의 미분 값인 스냅을 갖는 4차 모션 프로파일을 설계하였다. 설계된 프로파일을 피에조 스테이지에 입력으로 주어 구동시키고 피드백과 피드포워드 제어를 사용하여 추종오차(Tracking Error)의 변화를 비교 분석하였다. 설계된 프로파일에 대한 스테이지의 응답은 시뮬레이션을 통해 결과를 예측하고 예측 결과는 실험을 통해 검증하였다.

본 논문의 구성은 다음과 같다. 2장에서는 고강성 피에조 스테이지의 성능에 대하여 기술하였고, 3장에서는 피에조 스테이지에 적용될 모션 프로파일이 제안되고, 4장에서는 시뮬레이션 결과를 비교 분석하여 스냅을 적용한 프로파일의 효과를 검증했고, 5장에서는 피에조 스테이지에 설계된 모션 프로파일을 인가했을 때 피드백 제어와 피드포워드 제어를 적용한 결과를 나타냈다. 마지막으로 6장에서는 본 논문의 결론을 제시한다.

2. 시스템 구성

2.1 피에조 스테이지

피에조 스테이지는 Al-7075소재로 Fig. 1과 같이 설계되었다.

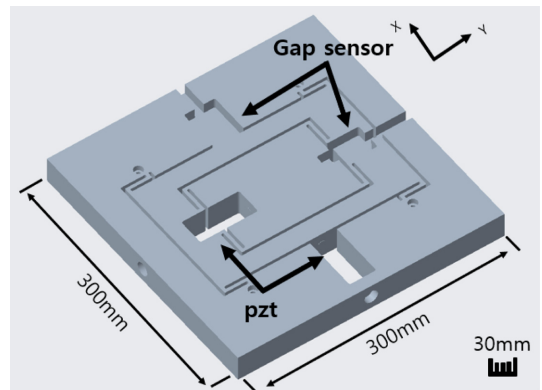


Fig. 1 2-Axis piezo stage

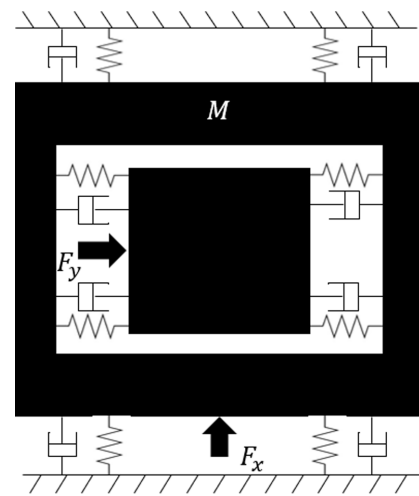


Fig. 2 Piezo stage modeling

식(1)과 식(2)에서 시뮬레이션을 수행하기 위한 피에조 스테이지의 모델링을 2차 시스템으로 간략하게 표현하였다. Fig. 2에 2차 시스템의 구조를 도식화하였고, 설계된 피에조 스테이지를 Fig. 3에서 FEM 시뮬레이션을 사용하여 설계 검증을 하였다.

피에조 스테이지의 모델링은 식(1)과 같이 단순화하여 2차 시스템의 형태로 표현 될 수 있다.

$$(Ms^2 + Cs + K)x(s) = F(s) \tag{1}$$

M 은 피에조 스테이지의 질량, C 는 감쇠 상수, K 는 시스템의 강성, F 는 피에조에 인가된 전압에 따른 힘이다. 스테이지의 질량, 감쇠 상수, 강성 값을 구하기 위해 CREO Parametric를 사용하여 실험적으로 구해 내었고, 스테이지의 강성 값은 식(2)와 같이 외팔보 공식으로부터 표현될 수 있다.

$$K = 4 \times \frac{Ebd^3}{L^3} \tag{2}$$

E 는 영 계수(7.2×10^{10} N/m²), b 는 스프링의 폭, d 는 스프링의 높이, L 은 스프링의 길이 값이다. 피에조 스테이지는 다음 논문을 참고하여 설계하였다.^{8,10-20}

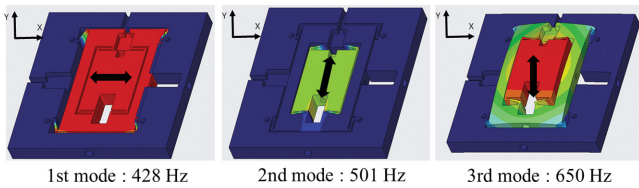


Fig. 3 FEM simulation-modal analysis

Table 1 Specification of the 2-axis piezo stage

Item	X axis	Y axis
<i>m</i> (Mass) [kg]	3	7
<i>c</i> (Damping) [N*s/m]	0.1	0.1
<i>k</i> (Stiffness) [kN/M]	18014	46228
ω_n (Natural frequency) [Hz]	428	501
Moving range [um]	20	20

3. 모션 프로파일 설계

본 장에서는 유연 구조 스테이지의 구동을 위하여 피에조 구동기에 입력으로 가해지는 모션 프로파일은 일반적으로 사용되는 사다리꼴 형태를 띠는 2차 프로파일, 저크를 고려한 3차 프로파일, 그리고 스냅을 고려한 4차 프로파일까지 총 3가지의 경우로 설계하였다.

사다리꼴 프로파일이라 불리는 2차 프로파일은 가속도 함수의 프로파일을 보면 단위 계단 함수 형태의 모양을 띠는 무한한 저크 값을 가지고 있어서 실제 시스템에 입력으로 인가하였을 때 큰 진동을 유발한다.⁹ 저크를 고려한 3차 프로파일은 유한한 저크 값을 가지고 있지만, 가속도 함수의 프로파일에 불연속점이 존재하기 때문에 추종오차가 크다. 스냅을 고려한 4차 프로파일의 경우 가속도 함수의 프로파일이 불연속점을 포함하고 있지 않아 2차, 3차 프로파일에 비해 스테이지에서 발생하는 진동이 확연히 줄어들고, 그로 인해 피에조 구동 시 추종오차가 2차, 3차 프로파일에 비해서 감소한다.

스냅을 고려한 4차 프로파일에 대한 수식을 식(3)부터 식(7)에 표기하였고, Fig. 4에는 피에조 스테이지에 적용하기 위해 설계한 4차 프로파일을 도시하였다.

$$d(t) = d_0 \tag{3}$$

$$j(t) = d_0 t + j_0 \tag{4}$$

$$a(t) = \frac{1}{2} d_0 t^2 + j_0 t + a_0 \tag{5}$$

$$v(t) = \frac{1}{6} d_0 t^3 + \frac{1}{2} j_0 t^2 + a_0 t + v_0 \tag{6}$$

$$x(t) = \frac{1}{24} d_0 t^4 + \frac{1}{6} j_0 t^3 + \frac{1}{2} a_0 t^2 + v_0 t + x_0 \tag{7}$$

모션 프로파일 설계 시 함수의 차수를 증가시킬수록 더 유연한

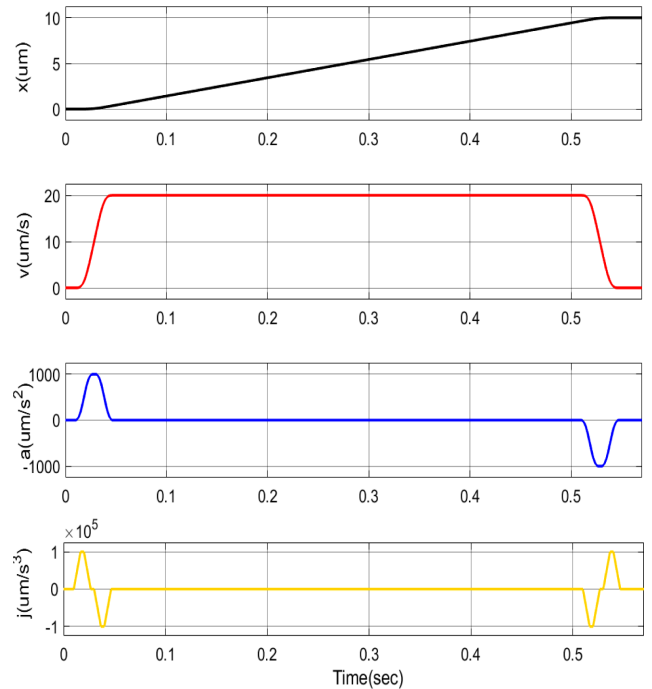


Fig. 4 Trajectory profiles with snap

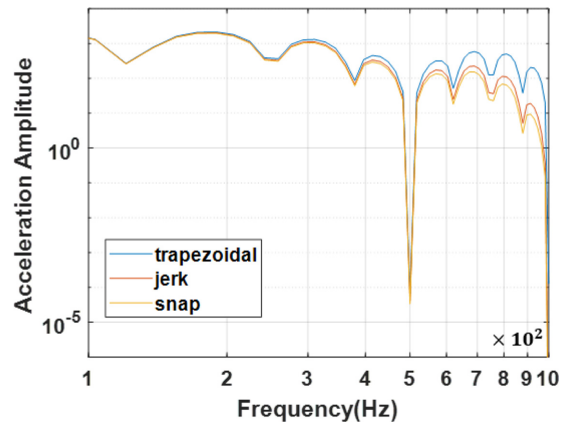


Fig. 5 Frequency analysis according to input

프로파일을 설계할 수 있지만, 고차항의 프로파일을 설계할수록 고사양의 실험 환경이 요구됨으로, 적절한 프로파일을 설계하여 적용하여야 한다.

Fig. 5에 도시한 사다리꼴, 저크, 스냅이 적용된 프로파일의 주파수 분석에 따르면 100 Hz 이상에서 스냅을 적용한 경우가 추종오차를 발생시키는 가진 크기의 감소에 가장 효과적임을 파악할 수 있다. 특히 고주파로 갈수록 효과가 확연히 나타나고 본 논문의 스테이지는 1차 모드가 428 Hz에서 나타나는 고강성 스테이지이므로 해당 모션 프로파일을 적용함으로써 추종오차에 대한 성능을 향상시킬 수 있다.

$$F = M\ddot{x} + kx \tag{8}$$

Fig. 6과 같이 차수가 증가할수록 더 유연한 가속도 프로파일을 인가할 수 있지만, 식(8)에서 확인할 수 있듯이 프로파일의

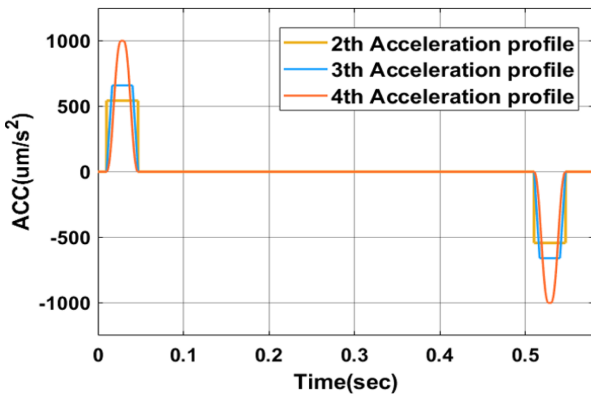


Fig. 6 Acceleration profiles

차수에 따라 요구되는 힘과 피에조에 인가해야 하는 전압의 크기가 커져야 한다. 따라서 본 논문에서는 사용한 피에조 앰프의 최대전압의 한계로 인하여 스냅이 고려된 프로파일까지 고강성 및 고정밀 스테이지에 적용하고자 한다.

4. 시뮬레이션 결과

3장에서 설명한 스냅을 적용한 4차 프로파일과 스냅을 적용하지 않은 2차, 3차 프로파일의 성능을 비교하기 위해 PID 제어기를 이용한 피드백 제어와 피드포워드 제어의 시뮬레이션을 수행하였다.

시뮬레이션은 MATLAB & Simulink를 사용하여 진행하였다. 설계한 4차 프로파일의 파라미터 값은 다음 Table 2와 같다.

4.1 피드백 제어 시뮬레이션

Fig. 7에 피드백 제어의 블록선도를 도시하였고 식(8)에 일반적인 PID 제어기의 수식을 나타냈다.

$$C(s) = K_p + K_i \frac{1}{s} + K_d s \tag{9}$$

K_p 는 비례 게인, K_i 는 적분 게인, K_d 는 미분 게인을 나타낸다. $R(s)$ 는 레퍼런스 입력, $C(s)$ 는 PID 제어기, $G(s)$ 는 모델링된 시스템의 전달함수, $Y(s)$ 는 시스템의 출력을 나타낸다. Fig. 8에는 2장에서 모델링된 식(1)에 스냅을 적용한 프로파일과 적용하지 않은 프로파일을 인가하였을 때 추종오차를 도식화하였고, 정확한 수치를 Table 3에 표기하였다.

시뮬레이션을 통해 2차 프로파일을 입력으로 주었을 경우와 3차, 4차 프로파일을 입력으로 주었을 경우를 비교 분석 해본 결과, Fig. 8에서 볼 수 있듯이 가속 구간과 감속 구간에서 추종 오차가 발생하는 것을 볼 수 있다.

결과적으로 2차 프로파일을 입력으로 주었을 때에 비해 4차 프로파일을 입력으로 주게 되면 약 19%의 추종오차 감소 효과를 볼 수 있었다

Table 2 Profile parameter

Parameter	Data
Distance [um]	10
Max velocity [um/s]	20
Max acceleration [um/s ²]	1000
Max jerk [um/s ³]	100000
Max snap [um/s ⁴]	15000000

Table 3 Tracking error with feedback control

	2th profile	3th profile	4th profile
Tracking error [nm]	27.46	26.28	22.22

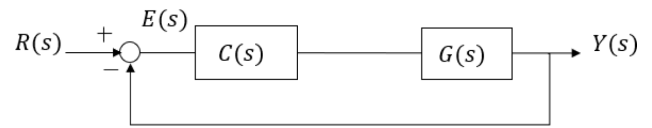


Fig. 7 Feedback control block diagram

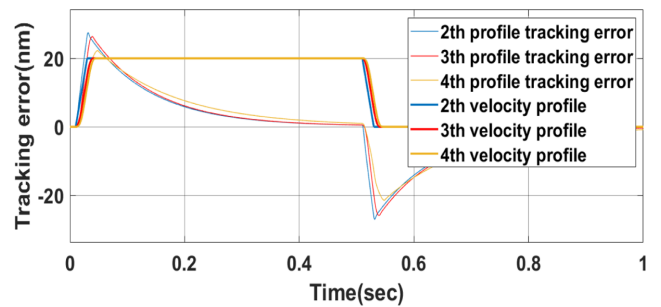


Fig. 8 Simulation for feedback control tracking error

4.2 피드포워드 제어 시뮬레이션

4.1장에 나타낸 스냅을 적용한 프로파일의 성능을 시뮬레이션을 통해 검증 후 추종오차를 최소화하기 위하여 피드포워드 제어기법을 적용하였다. 피드포워드 제어기법은 프로파일 구동기에서 입력 명령을 인가할 때 그 위치에 해당하는 피드포워드 명령 값을 미리 넣어주도록 구성되어있다.

Fig. 9에는 Fig. 7에 피드포워드 제어 블록을 추가한 블록선도를 도시하였다. Fig. 10에는 피드포워드 제어를 적용한 후의 추종오차를 나타냈고, Table 4에 추종오차의 수치를 표기하였다. $C_2(s)$ 는 피드포워드 제어기를 나타내며, 피드포워드 제어를 적용한 블록선도의 수식을 식(10)과 식(11)에 나타냈다.

$$\frac{Y_1}{R(s)} = \frac{GC}{1+GC}, \frac{Y_2}{R(s)} = \frac{C_2G}{1+GC} \tag{10}$$

$$\frac{Y(s)}{R(s)} = \frac{Y_1+Y_2}{R(s)} = \frac{GC+C_2G}{1+GC} \tag{11}$$

시뮬레이션 결과 피드포워드 제어를 적용했을 시, 2차 프로파일을 인가했을 때보다 4차 프로파일을 인가하였을 때의 추종

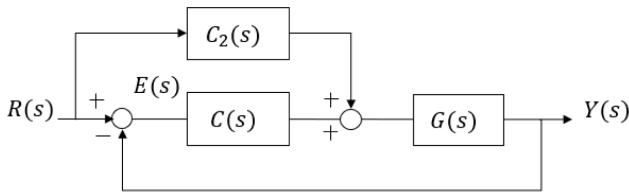


Fig. 9 Feedforward control block diagram

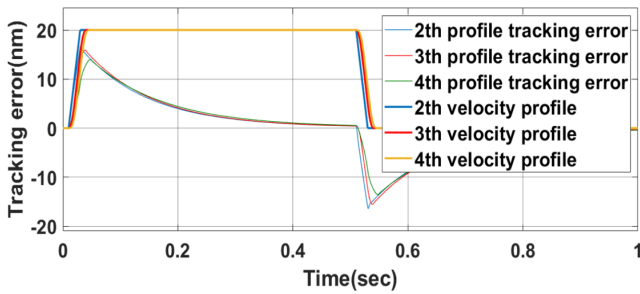


Fig. 10 Simulation for feedforward control tracking error

Table 4 Tracking error with feedforward control

	2th profile	3th profile	4th profile
Tracking error [nm]	16.78	15.91	14.31

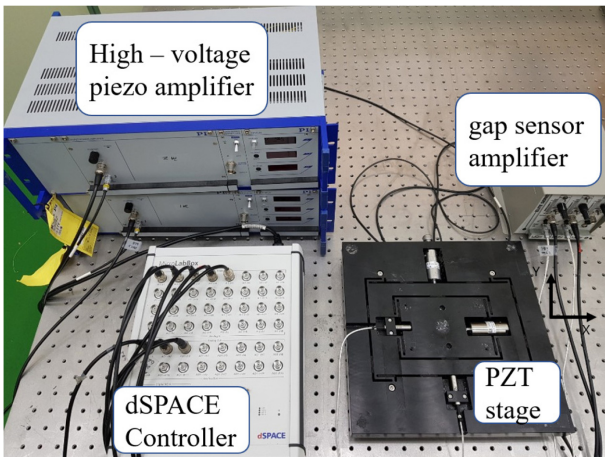


Fig. 11 Configuration of experimental system

오차가 약 17%의 감소 효과를 볼 수 있었으며 피드백 제어만 적용했을 때보다 피드포워드 제어를 적용하였을 때 추종오차가 약 37% 감소되었음을 확인할 수 있었다.

5. 실험 결과

5.1 실험 환경 구성

전체 실험 환경 구성은 Fig. 11과 같고, 실험은 피에조 스테이지의 x축만을 수행하여 제어가능성을 확인하였다. 제어기는 dSPACE사의 Micro Lab-Box를 사용하였고, 피에조는 PI사의

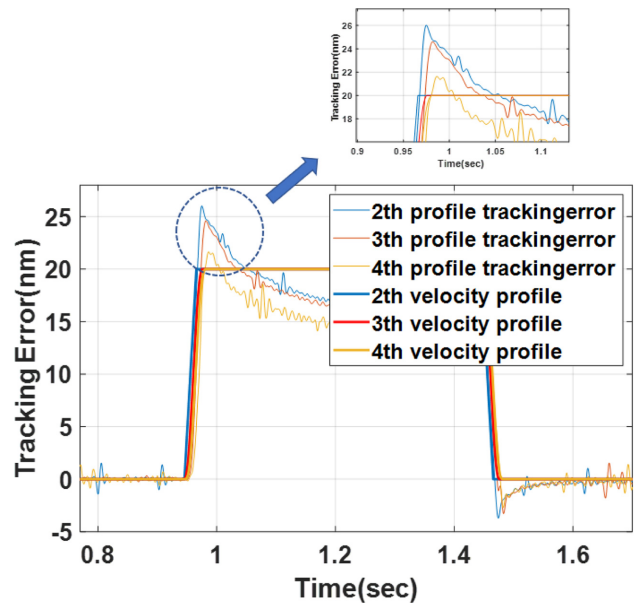


Fig. 12 Tracking error without feedforward

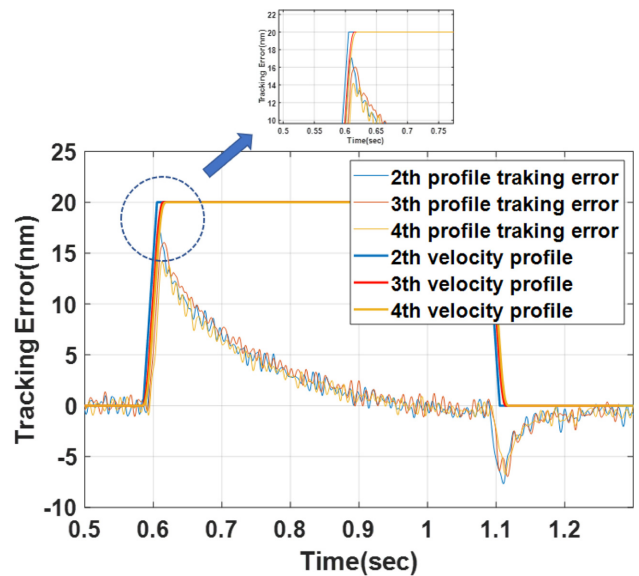


Fig. 13 Tracking error with feedforward

P-216.s 2개를 사용하였으며 피드백 제어를 위한 센서는 LION PRECISION CPL-290 변위센서 2개를 사용하였다. 실험에서 사용된 프로파일은 시뮬레이션에서 사용된 프로파일과 같은 조건의 프로파일을 인가하여 비교하였다.

5.2 피에조 스테이지의 제어

피에조 스테이지는 고유 진동수가 428 Hz인 고주파 대역에서 발생하는 고강성 스테이지이다. 따라서 샘플링 타임 선정 시에 나이퀴스트 주파수 이론에 의거하여 샘플링 타임을 10 kHz로 선정하여 실행하였다.

피에조 스테이지에 입력으로 앞서 설계한 프로파일을 인가한

Table 5 Feedback control error & Feedforward control error

	2th profile	3th profile	4th profile
Feedback error [nm]	26.01	24.59	21.64
Feedforward error [nm]	17.1	16.03	14.19

후, 피드백 제어와 피드포워드 제어를 적용했을 때의 추종오차를 Figs. 12와 13에 도시하였다. 피드백 제어와 피드포워드 제어를 각각 적용했을 시의 추종오차는 Table 5에 표기하였다.

Table 5의 결과로 보았을 때 2차 프로파일에 비해 스냅을 적용한 4차 프로파일의 추종오차가 약 16%정도 감소되었음을 확인하였다. 또한 피드백 제어를 사용하였을 때보다 피드포워드 제어를 사용했을 때 2차, 3차, 4차 프로파일의 추종오차가 모두 약 34%의 감소율을 보였다.

6. 결론

본 논문에서는 피에조 스테이지를 구동 시, 발생하는 진동으로 인해 생기는 추종오차를 최소화하기 위하여 제어기의 레퍼런스 입력을 조절하는 모션 프로파일에 대한 연구를 진행하였다. 일반적으로 사용하는 사다리꼴 프로파일과 저크를 적용한 프로파일, 그리고 스냅을 적용한 프로파일을 주파수 분석을 통하여 프로파일의 차수가 증가함에 따른 효과를 나타내었고, 피에조 스테이지에 입력으로 주어 결과를 비교 분석하였다. 시뮬레이션과 실험 결과를 보면 가속도 구간 함수에 불연속점이 존재하는 2차 프로파일과 3차 프로파일에 비해서 스냅을 적용하여 불연속점이 사라진 4차 프로파일을 입력으로 피에조 스테이지에 주게 되면 추종오차가 모두 15% 이상 감소한다는 것을 확인하였다. 또한 추종오차를 최소화시키기 위하여 피드백 제어와 피드포워드 제어를 모두 사용해 비교 분석한 결과, 피드백 제어만을 적용하였을 때보다 피드포워드 제어를 적용함으로써 추종오차를 약 37% 감소하는 것을 확인할 수 있었다. 이로써 나노 스케일을 요구하는 초정밀 제어 시스템에 사용되는 피에조 스테이지에 모션 프로파일 설계를 통한 추종오차 감소법이 적용 가능하다는 것을 확인하였으며 피드 포워드 제어를 적용하여 오차를 최소화시켰다.

ACKNOWLEDGEMENT

이 논문은 2020년도 정부(산업통상자원부)의 재원으로 한국 산업기술진흥원의 지원을 받아 수행된 연구임(No. P0008458, 2020년 산업혁신인재성장지원사업).

REFERENCES

- Li, H., Le, M., Gong, Z., and Lin, W., "Motion Profile Design to Reduce Residual Vibration of High-Speed Positioning Stages," IEEE/ASME Transactions on Mechatronics, Vol. 14, No. 2, pp. 264-269, 2009.
- Chang, B. H. and Hori, Y., "High Speed Positioning Trajectory Design for TDOF Controller of Hard Disk Drives with Mechanical Vibration," Proc. of the 8th IEEE International Workshop on Advanced Motion Control, pp. 317-322, 2004.
- Piazzoli, A. and Visioli, A., "Global Minimum-Jerk Trajectory Planning of Robot Manipulators," IEEE Transactions on Industrial Electronics, Vol. 47, No. 1, pp. 140-149, 2000.
- Meckl, P. H. and Arestides, P. B., "Optimized S-Curve Motion Profiles for Minimum Residual Vibration," Proc. of the American Control Conference, pp. 2627-2631, 1998.
- Rew, K. H. and Kim, K. S., "A Closed-Form Solution to Asymmetric Motion Profile Allowing Acceleration Manipulation," IEEE Transactions on Industrial Electronics, Vol. 57, No. 7, pp. 2499-2506, 2009.
- Nguyen, K. D., Ng, T. C., and Chen, I. M., "On Algorithms for Planning S-Curve Motion Profiles," International Journal of Advanced Robotic Systems, Vol. 5, No. 1, pp. 99-106, 2008.
- Jang, J. W., Park, S. W., and Hong, S. W., "Command Generation Method for High-Speed and Precise Positioning of Positioning Stage," Journal of the Korean Society for Precision Engineering, Vol. 25, No. 10, pp. 122-129, 2008.
- Hwang, D. H., Park, J. H., Jeong, J. W., and Lee, M. G., "Optimal Design of a Flexure Guided Stage with Piezo Electric Transducers," Proc. of the KSPE Spring Conference, pp. 393-394, 2008.
- So, B. K., Tae, W. H., and Kim, J. H., "Development of Improved 5th Order Motion Profile for Low Vibration and High Speed," Journal of the Korean Society for Precision Engineering, Vol. 29, No. 10, pp. 1110-1118, 2012.
- Park, J. S. and Jeong, K. W., "A Study on the Design and Control of a Ultra-Precision Stage," Transactions of the Korean Society of Machine Tool Engineers, Vol. 15, No. 3, pp. 111-119, 2006.
- Kim, I. S., Kim, Y. S., and Hwang, Y. S., "Motion Control of the Precise Stage Using Piezoelectric Actuator," Journal of the Korean Society of Manufacturing Process Engineers, Vol. 10, No. 4, pp. 102-108, 2011.
- Choi, K. B. and Han, C. S., "Optimal Design and Performance Evaluation of PZT-Driven Stage Using Min-Max Algorithm," Journal of the Korean Society for Precision Engineering, Vol. 22, No. 9, pp. 130-136, 2005.
- Ha, C. W. and Lee, D., "Analysis of Embedded Prefilters in Motion Profiles," IEEE Transactions on Industrial Electronics, Vol. 65, No. 2, pp. 1481-1489, 2017.

14. Gu, G. Y., Zhu, L. M., Su, C. Y., and Ding, H., "Motion Control of Piezoelectric Positioning Stages: Modeling, Controller Design, and Experimental Evaluation," IEEE/ASME Transactions on Mechatronics, Vol. 18, No. 5, pp. 1459-1471, 2012.
15. Ronkanen, P., Kallio, P., Vilkkö, M., and Koivo, H. N., "Displacement Control of Piezoelectric Actuators Using Current and Voltage," IEEE/ASME Transactions on Mechatronics, Vol. 16, No. 1, pp. 160-166, 2010.
16. Ge, P. and Jouaneh, M., "Tracking Control of a Piezoceramic Actuator," IEEE Transactions on Control Systems Technology, Vol. 4, No. 3, pp. 209-216, 1996.
17. Mrad, R. B. and Hu, H., "A Model for Voltage-to-Displacement Dynamics in Piezoceramic Actuators Subject to Dynamic-Voltage Excitations," IEEE/ASME Transactions on Mechatronics, Vol. 7, No. 4, pp. 479-489, 2002.
18. Leang, K. K., Zou, Q., and Devasia, S., "Feedforward Control of Piezoactuators in Atomic Force Microscope Systems," IEEE Control Systems Magazine, Vol. 29, No. 1, pp. 70-82, 2009.
19. Bhagat, U., Shirinzadeh, B., Tian, Y., and Zhang, D., "Experimental Analysis of Laser Interferometry-Based Robust Motion Tracking Control of a Flexure-Based Mechanism," IEEE Transactions on Automation Science and Engineering, Vol. 10, No. 2, pp. 267-275, 2012.
20. Ryu, J. W., "6-Axis Ultraprecision Positioning Mechanism Design and Positioning Control," Ph. D. Thesis, Korea Advanced Institute of Science and Technology, 1997.



Hyoyoung Kim

Principal Researcher in Korea Institute of Industrial Technology

His research interest is Machine.

E-mail: kimhy02@kitech.re.kr



Kihyun Kim

Assistant Professor in the department of mechatronics engineering, Korea Polytechnic University. His research interests include the design of a high-performance mechatronics system.

E-mail: khkim12@kpu.ac.kr



Taehwa Hong

M.Sc. candidate in the department of mechatronics engineering, Korea Polytechnic University.

His research interest is Machine.

E-mail: barnet@kpu.ac.kr



Jinho Lee

Ph.D. candidate in the Department of Mechanical Engineering, Ajou University

His research interest is Machine.

E-mail: jino123@ajou.ac.kr