

저진동, 고속특성을 가지는 개선된 5 차 모션 프로파일의 설계

Development of Improved 5th Order Motion Profile for Low Vibration and High Speed

소병관¹, 태원형¹, 김정환^{1,✉}

Byeong Kwan So¹, Won Hyeong Tae¹, and Jung Han Kim^{1,✉}

¹ 서울과학기술대학교 기계시스템디자인공학과 (Department of Mechanical System Design Eng., Seoul National Univ. of Sci. & Tech.)

✉ Corresponding author: hankim@seoultech.ac.kr, Tel: 02-970-6397

Manuscript received: 2012.1.3 / Accepted: 2012.6.6

In this study, for reducing the residual vibration in high speed motion control stage, an improved 5th order polynomial motion profile was developed. When a stage is moving, the current through the motor coils has the same profile of input motion profile of acceleration, therefore the characteristics of the acceleration input profile directly affect on the performance of the amplifier that includes the current control loop. Commonly low cost amplifier and motor has a narrow current control bandwidth, therefore the proposed algorithm was designed based on this practical constraint. Simulation and experimental results showed that the proposed algorithm clearly has low residual vibration characteristics than conventional 5th order polynomial motion profile on the same drive condition.

Key Words: 5th Order Motion Profile (5 차 구동프로파일), Precision Tracking Control (정밀 트랙킹 제어), Jerk Profile (저크프로파일), Current Control Loop (전류 제어 루프)

기호설명

m_1 = mass of the moving stage

m_2 = mass of the tool tip on the moving stage

b_1 = damping coefficient of moving stage

b_2 = damping coefficient between tip and stage

k = spring constant between tip and stage

$u(t)$ = input force

1. 서론

최근의 치열한 제조업의 경쟁과 발전은 생산용 장비 및 설비의 고속화와 고성능화에 대한 요구를 가속화하고 있다. 반도체 장비나 디스플레이 생산용 설비에서 구동시 발생하는 진동은 장비의 성능과 생산성에 많은 영향을 주는데, 이는 모션제어

의 품질이 해당 제품의 단위시간당 생산량(UPH) 및 원가구조에 직접적인 영향을 주기 때문이다. 따라서 관련 산업계에서는 스테이지 구동시 진동을 줄이는 문제를 여러 가지 각도에서 연구를 해왔는데, 스테이지 구동시 발생하는 진동을 해결하기 위한 여러 가지 기술 중 가장 주목 받고 많은 연구는, 제어기의 위치 입력 레퍼런스로 사용되는 구동 프로파일에 대한 연구이다.

구동 프로파일의 최적설계는, 위치 프로파일의 2 차 도함수인 가속도 프로파일이 트랙킹 제어기의 입력 전류 명령이라는 점에서 매우 중요하다. 또한 구동 프로파일의 개선작업은 제어 대상체의 설계 변경 없이도 소프트웨어 작업만으로 성능을 향상시킬 수 있다는 점에서 실용적으로도 높은 중요성을 가진다.

구동 프로파일의 분류는, 크게 파형의 도함수 요소들이 직선으로 이루어진 삼각법에 의한 설계, 그 구성 요소가 다항식으로 이루어진 고차식 프로파일, 비선형 요소를 사용한 프로파일¹ 및 비대칭 프로파일 등 다양한 방법의 분류가 가능하다.

다양한 모션 프로파일 중 진동 감소를 목적으로 하는 프로파일은 주로 비대칭 프로파일^{2,3}이나 고차식 프로파일^{4,7}로 나뉘어 지는데, 비대칭 저진동 프로파일은 가속보다 감속을 더 길게 끌어 줌으로써 잔류 진동을 저감하는 방식이며, 반면에 고차식 프로파일을 이용한 진동 저감 프로파일은 프로파일의 구성요소를 더욱 부드러운 고차식 요소를 사용함으로써 전체적으로 저크량을 감소시키는 방식이다.

비선형 진동 저감 프로파일에 대한 연구를 보다 자세히 살펴보면, 펀칭기계의 X-Y 테이블 구동에 대한 연구를 진행한 Tasy,² 대칭적 2 단계 S-커브 프로파일을 하나의 비선형 진동 저감 프로파일로 대체하는 연구를 진행한 Rew³가 있다.

또 다른 진동 저감 방식인 대칭적 진동 저감 프로파일을 이용하여 물체의 고유진동수에 따른 프로파일 최적화를 연구한 Meckl,⁴ 산업용 X-Y 테이블의 임펄스 기반의 입력과 진동 저감 프로파일의 입력에 대한 비교를 연구한 Dijkstra⁵가 있다. 이 밖에 진동 저감 프로파일을 더 개선한 Li⁹ 과 고차 다항식 프로파일을 이용한 진동 저감 프로파일을 설계해 시간 최적화에 대한 연구를 진행한 Kim⁷ 타원형 궤적을 이용해 Pick & Place 로봇의 진동 저감 프로파일을 연구한 Masey⁶가 있다.

현재 반도체, 디스플레이 산업에서 많이 사용하고 있는 구동 프로파일은 주로 3 차, 5 차 및 7 차식의 방정식을 활용한 구동 프로파일로 이를 설계하기 위해 기본적인 이론 및 중요 요소는 Kim⁸의 저서에서 참조하였다. 이와 같은 고차 방정식을 이용한 프로파일은 차수가 높아질수록 부드러운 구동이 가능하나, 구동시간이 길어진다는 단점이 있다.

본 논문에서는 상기한 고차 다항식을 이용한 구동 프로파일에서, 현재 가장 많이 사용하는 5 차 다항식을 이용한 프로파일을 사용하고, 현실적인 제한조건을 가진 전류제어장치를 고려한 개선된 진동저감용 5 차 구동 프로파일을 설계하고 그 성능을 실험하였다. 설계된 진동 저감 프로파일은 Pick & Place 장비나 다이본더의 헤드 등에 사용하기 적절하며, 낮은 성능의 모터 및 앰프(전류제

어기)에서도 좋은 성능의 구동이 가능하도록 설계하였다.

2. 전체 시스템 개요

2.1 실험 장치의 모델링

Fig. 1 에서 보여지는 구조물은 반도체 생산공정 중 다이본더나 Pick & Placement 에서 많이 사용되는 X-Z Stage 의 구조를 도시한 것이다.

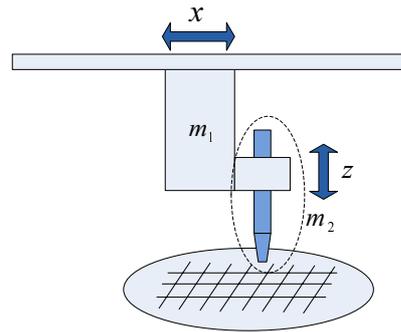


Fig. 1 Pick and placement system

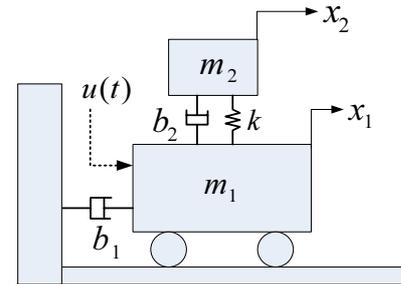


Fig. 2 System modeling

고속으로 작동하는 스테이지에서 일정 질량과 강성을 가진 기구부의 톨팁 끝 단은 Fig. 2 와 같이 서로 다른 질량을 가진 스프링 - 댐퍼 시스템으로 모델링 된다. 여기서 장비의 성능에 직접적인 영향을 주는 파라미터는 구동부 끝 단의 상대 진동인 $x_2 - x_1$ 가 되며, x_1 및 x_2 에 대하여 운동 방정식을 풀어보면 다음과 같은 식(1) 과 (2)로 표현된다.

$$m_1 \ddot{x}_1 = -b_1 \dot{x}_1 - b_2 (\dot{x}_1 - \dot{x}_2) - k(x_1 - x_2) + u(t) \quad (1)$$

$$m_2 \ddot{x}_2 = -b_2 (\dot{x}_2 - \dot{x}_1) - k(x_2 - x_1) \quad (2)$$

여기서 m_1 에 가해지는 외부힘 $u(t)$ 에 의한 x_2 (토탈팁의 끝단)에 대한 전달함수를 구하기 위해 식(3)과 식(4)로 변환한 뒤 x_2 에 대해 정리하면 식(5)와 같은 전달함수를 구할 수 있다.

$$(m_1s^2 + (b_1 + b_2)s + k)X_1(s) = (b_2s + k)X_2(s) + U(s) \quad (3)$$

$$(m_2s^2 + b_2s + k)X_2(s) = (b_1s + k)X_1(s) \quad (4)$$

$$\frac{X_2(s)}{U(s)} = \frac{b_2s + k}{(m_1s^2 + (b_1 + b_2)s + k)(m_2s^2 + b_2s + k) - (b_2s + k)^2} \quad (5)$$

상기 모델에서의 m_1 , m_2 의 값은 측정을 통하여 얻어내었으며, b_1 및 b_2 값은 실험을 통하여 유추하였다. 구체적인 값은 3.3 절에 도시하였다.

2.2 저크 프로파일

모션 프로파일은 보통 위치, 속도, 가속도, 저크 프로파일이 하나의 세트를 이루게 되는데, 고차 다항식 프로파일은 구동시간이 사다리꼴 프로파일에 비해 길지만 가속도의 변화율이 적고 이때 발생하는 시스템의 진동이 작아 트래킹 제어시 발생하는 동적인 위치오차 및 잔류진동의 발생을 최소화 할 수 있는 특징이 있다. 하지만 고차 다항식 프로파일로 갈수록 동일한 조건에서의 구동시간이 길어지므로 진동은 줄어들지만 UPH가 감소하게 되므로 현실적으로 많은 경우에 5차 다항식 혹은 여기에 대응되는 프로파일을 사용한다.

모션 프로파일의 요소 중, 스테이지 상단에 고정되어 있는 기구물을 가진시키는 직접적인 요인은 여러 가지가 있는데, 높은 감가속도값, 시간을 고려한 가속도 변화의 양(저크의 면적) 및 가속도의 갑작스런 변화값(저크값) 등으로 요약할 수 있다. Fig. 3은 등속구간이 없는 경우의 3차, 5차 및 7차식 구동 프로파일의 저크값의 변화를 시뮬레이션하여 도시한 것이다.

짧은 구동 시간에서의 높은 가속도 값은 그 입력 자체가 기구적으로 충격의 의미가 있기 때문에 큰 가속도 및 넓은 저크 특성은 동적 위치오차와 잔류진동 둘 다 좋지 않은 영향을 미치며, 잔류진동이 커질수록 정착시간이 길어져서 UPH가 감소하게 된다. 따라서 고속의 생산시스템으로 갈수록 가속도 및 저크 특성의 제어는 기구물의 방진과 제어하고자 하는 대상의 정밀도에 많은 영향을 미치게 된다.

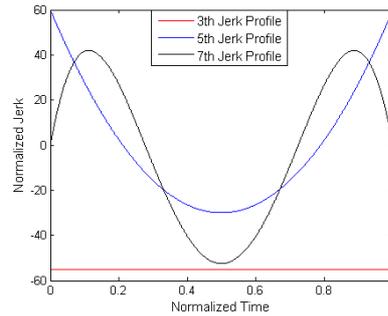


Fig. 3 Examples of polynomial jerk profile

이러한 관점에서 볼 때 Fig. 3과 같이 3차 프로파일은 시작과 끝점에서 저크의 변화가 매우 크고, 저크 면적이 넓으므로 매우 큰 기구물의 강성과 넓은 전류제어 밴드 폭을 요구한다.

반면 5차와 7차 프로파일은 사다리꼴 및 3차 프로파일과는 다르게 부드러운 저크 프로파일이 구현되는데, 프로파일이 연속적으로 부드럽다고 해도 너무 높은 저크값과 저크 면적이 요구되게 되면, 역시 해당 프로파일의 추종시 넓은 전류제어 밴드폭을 가지는 고가의 모터와 앰프가 필요하게 된다.

2.3 모션제어 서보 시스템의 구조

다음의 Fig. 4는 반도체 장비 및 설비에서 주로 사용되는 고속 위치제어 시스템의 블럭선도이다. 속도 및 위치제어기의 출력값과 피드포워드 제어기의 값이 합쳐져서 전류제어기의 입력인 토크 명령 값이 되며 모터의 앰프안에 내장된 전류제어기가 이를 추종하며 제어해 주는 구조로 이루어져 있다.

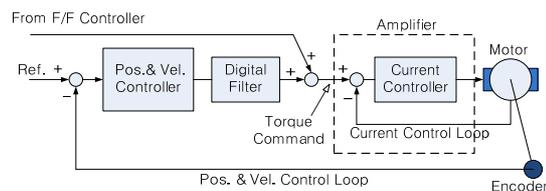


Fig. 4 Position servo system

따라서 모터 앰프의 입력값이 되는 토크 명령값의 주파수 특성이 매우 중요한데, 구동 프로파일에서 가속도 프로파일의 변화율, 즉 저크 특성이 중요한 이유가 바로 뒷단의 모터 및 앰프가 한정된 제어 밴드폭을 가지고 있기 때문이다. 따라

서 구동 프로파일의 설계시 모터 및 앰프의 한정된 전류제어 밴드폭을 고려하여 프로파일을 설계한다면, 해당시스템에 최적화된 구동 프로파일을 설계할 수 있다.

3. 진동저감 프로파일의 설계

3.1 진동 저감 프로파일

모션프로파일에서 위치 궤적이 결정되면 Feed-Forward 제어기안에서는 위치궤적을 두 번 미분하여 가속도 프로파일을 생성하고, 이에 설정된 계인을 곱해서 이 값을 Fig. 4 에서 도시한 것처럼 피드백 제어기의 출력과 합해서 전류제어기의 토크 명령 입력으로 사용하게 된다.

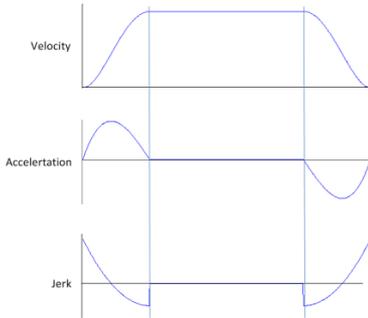


Fig. 5 5th order polynomial profile

위의 Fig. 5 에서와 같이 등속 구간 삽입 5 차 구동 프로파일의 경우, 변속지점에서의 부드러운 특징으로 인해 충격이 사다리꼴 구동에 비해 감소되며, 구동속도 또한 어느 정도 유지할 수 있기 때문에 현재 반도체용 장비의 모션제어기에서 많이 사용되고 있다.

모터와 앰프의 조합은 실제로 제한된 전류 제어 밴드폭을 가지고 있는데, 일반적으로 소형 보이스 코일 모터의 경우 10 kHz, 중형 0.5 kW 급 정도에서는 5 kHz 이하의 제한된 전류제어 밴드폭을 가지고 있기 때문에, 만약 상기한 토크 입력 명령이 너무 높은 주파수 및 크기 성분을 포함하면 목표 전류의 추종이 어려워지면서 외부적으로는 동적 위치오차와 진동이 커지고, 동시에 스테이지 상단에 부착된 기구물에 가해지는 충격과 위치 오차성분 또한 커지게 된다.

실제로 모터 앰프의 출력단에 부착된 FET 등의 실제적인 특성이 약한 전류를 출력할 때의

밴드폭과 최대 출력 전류를 출력할 때의 밴드폭이 현저히 달라지기 때문에 모션 프로파일의 가속도 및 저크의 크기 및 면적의 증가는 고스란히 모터와 앰프로 이루어진 전류제어 시스템에서의 부담으로 돌아오게 된다.

따라서 제어기의 최대 출력전류 값이 커지고 또 저크의 면적이 넓어지면 상단의 구조물을 가진하는 효과와 전류제어기의 주파수 특성이 실제적으로 현저하게 나빠지는 현상이 발생하므로, 본 연구에서는 이에 주목하여 최대 전류 특성 값을 제한하고, 등가속도 구간이 삽입된 개선된 5 차식 모션 프로파일을 제안하였다.

상기한 현실적인 제한 조건인 최대전류 부근에서의 주파수 특성저감 및 구조물에서의 저크량에 따른 가진 현상을 고려하여 본 논문에서 제안하는 진동 저감 프로파일은 Fig. 6 과 같이 기존 5 차식의 프로파일에 피크 가속도에 도달하기 전에 등가속도 구간을 삽입하여 최대 전류 값을 낮추어주고, 진동에 영향을 주는 저크가 지속되는 면적을 줄여준다. 이를 통하여 스테이지 상단의 기구부의 가진을 억제하며 AC 서보 모터의 용량이 충분하지 않을 경우에도 적절한 가속도를 일정시간 유지하여 최대 속도에 무리 없이 도달할 수 있는 장점을 가지게 된다.

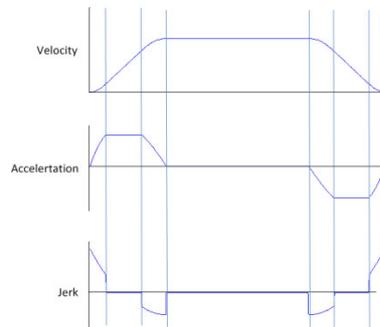


Fig. 6 Improved 5th order polynomial profile

3.2 진동 저감 5 차 프로파일의 설계

5 차 진동 저감 프로파일을 설계하기 위해서는 다음 식(6)~(11)과 같은 등속 구간이 삽입된 기본 5 차 프로파일이 설계되어 있어야 한다.

$$V(t) = \left(30 - \left(\frac{60 \times t}{T_p} \right) + \left(\frac{30 \times t^2}{T_p^2} \right) \right) \times \left(\frac{S_p \times t^2}{T_p^3} \right) \quad 0 \leq t < \frac{T_p}{2} \quad (6)$$

$$V(t) = V_m \quad \frac{T_p}{2} \leq t < T_w - \frac{T_p}{2} \quad (7)$$

$$V(t) = \left(30 - \left(\frac{60 \times (t - T_w + T_p)}{T_p} \right) + \left(\frac{30 \times (t - T_w + T_p)^2}{T_p^2} \right) \right) \times \left(\frac{S_p \times (t - T_w + T_p)^2}{T_p^3} \right) \quad T_w - \frac{T_p}{2} \leq t < T_w \quad (8)$$

$$A(t) = \left(60 - \left(\frac{180 \times t}{T_p} \right) + \left(\frac{120 \times t^2}{T_p^2} \right) \right) \times \left(\frac{S_p \times t}{T_p^3} \right) \quad 0 \leq t < \frac{T_p}{2} \quad (9)$$

$$A(t) = 0 \quad \frac{T_p}{2} \leq t < T_w - \frac{T_p}{2} \quad (10)$$

$$A(t) = \left(60 - \left(\frac{180 \times (t - T_w + T_p)}{T_p} \right) + \left(\frac{120 \times (t - T_w + T_p)^2}{T_p^2} \right) \right) \times \left(\frac{S_p \times (t - T_w + T_p)}{T_p^3} \right) \quad T_w - \frac{T_p}{2} \leq t < T_w \quad (11)$$

여기서 S_p 는 등속구간이 삽입되는 한계점 거리, T_p 는 한계점 거리에 도달하는 시간, T_w 는 전체 이동 거리에 대한 시간이다.

설계에 필요한 시 구간을 나누기 위해 Fig. 7 과 같이 최대 가속도 이하 A_c 에 도달하는 시간 t_1 , 최대가속도에 도달했다가 다시 A_c 에 도달하는 시간 t_2 를 구한다. 감속구간도 동일하게 $-A_c$ 에 도달하는 시간 t_3 , 최소 가속도에 도달했다가 다시 $-A_c$ 에 도달하는 시간 t_4 를 구해준다.

진동 저감 프로파일을 설계하면 다음과 같다. A_c 에 도달하는 시간 t_1 까지는 식(9)와 같은 기본 5 차 프로파일을 적용한다.

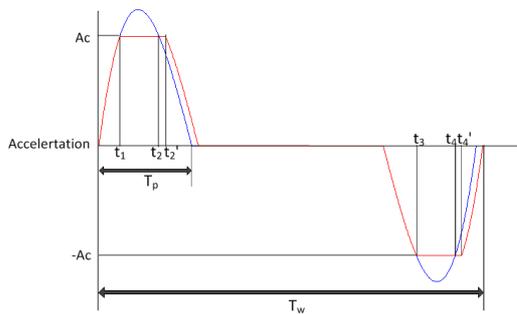


Fig. 7 Improved 5th order polynomial profile design

$$A'(t) = \left(60 - \left(\frac{180 \times t}{T_p} \right) + \left(\frac{120 \times t^2}{T_p^2} \right) \right) \times \left(\frac{S_p \times t}{T_p^3} \right) \quad 0 \leq t < t_1 \quad (12)$$

여기서 $A(t)$ 와 $V(t)$ 는 진동 저감 프로파일의 가속도 프로파일과 속도 프로파일을 뜻한다. t_1 에서부터 기본 5 차 프로파일의 t_2 에서의 속도와 가장 근사해지는 시간 t_2' 까지 식(15)와 같이 A_c 의 크기로 등가속 구간을 삽입한다.

$$V'(t) = V'(t_1) + A_c t \quad (13)$$

$$V(t_2) \cong V(t_2') \quad (14)$$

$$A'(t) = A_c \quad t_1 \leq t < t_2' \quad (15)$$

최대 가속도에 도달하지 않았기 때문에 발생하는 지연시간 t_{m1} 을 고려하여 나머지 가속 구간을 식(17)과 같은 기본 5 차 프로파일을 적용한다.

$$t_{m1} = t_2' - t_2 \quad (16)$$

$$A(t) = \left(60 - \left(\frac{180 \times (t - t_{m1})}{T_p} \right) + \left(\frac{120 \times (t - t_{m1})^2}{T_p^2} \right) \right) \times \left(\frac{S_p \times (t - t_{m1})}{T_p^3} \right) \quad t_2' \leq t < \frac{T_p}{2} + t_{m1} \quad (17)$$

등속구간은 가속도 값이 0 이 되며, 감속구간에서는 감속이 시작되는 지점에서부터 t_3 까지 식(11)와 같은 기본 5 차 프로파일을 적용한다.

$$A'(t) = 0 \quad \frac{T_p}{2} + t_{m1} \leq t < T_w - \frac{T_p}{2} \quad (18)$$

$$A'(t) = \left(60 - \left(\frac{180 \times (t - T_w + T_p)}{T_p} \right) + \left(\frac{120 \times (t - T_w + T_p)^2}{T_p^2} \right) \right) \times \left(\frac{S_p \times (t - T_w + T_p)}{T_p^3} \right) \quad T_w - \frac{T_p}{2} \leq t < t_3 \quad (19)$$

t_3 에서부터 기본 5 차 프로파일의 t_4 에서의 속도와 가장 근사해지는 시간 t_4' 까지 식(22)와 같은 $-A_c$ 의 크기로 등가속구간을 삽입한다.

$$V'(t) = V'(t_3) - A_c t \quad (20)$$

$$V(t_4) \cong V'(t_4') \quad (21)$$

$$A'(t) = -A_c \quad t_3 \leq t < t_4' \quad (22)$$

t_4' 부터 나머지 감속구간은 최대 가속도에 도달하지 않았기 때문에 발생하는 지연시간 t_{m2} 를 고려하여 식 (24)와 같은 기본 5 차 프로파일을 적용한다.

$$t_{m2} = t_4' - t_4 \quad (23)$$

$$A'(t) = \begin{cases} 60 - \left(\frac{180 \times (t - T_w + T_p - t_{m2})}{T_p} \right) & t_4' \leq t < T_w + t_{m2} \\ \left(\frac{120 \times (t - T_w + T_p - t_{m2})^2}{T_p^2} \right) \times \left(\frac{S_p \times (t - T_w + T_p - t_{m2})}{T_p^3} \right) & \end{cases} \quad (24)$$

3.3 시뮬레이션 결과

본 연구에서 제안한 진동 저감 프로파일과 일반 다항식을 이용한 고차식 프로파일이 진동에 주는 영향을 비교 하기 위해 MATLAB 을 이용하여 개선된 5 차 프로파일을 비롯한 다양한 프로파일에 대하여 시뮬레이션을 수행하였다.

시뮬레이션에 사용된 프로파일은 일반 사다리꼴, 5 차식 및 본 연구에서 제안된 개선된 5 차식에 대하여 수행하였으며, 공정한 비교를 위하여 최대 속도를 제외한 구동 거리, 최대 가속도, 구동시간을 모두 동일하게 설정하였다.

- Distance = 500 mm
- Maximum acceleration = 0.01 mm/ms²
- Operating time = 650 ms

실제 실험 장치를 모델링한 식(5)에 다음과 같은 파라미터를 적용하여 Fig. 8, 9 와 같이 3 가지의 가속도 프로파일을 사용하여 구동했을 때의 시뮬레이션을 수행하였다.

- M₁: 5 kg
- M₂: 0.025 kg
- b₁: 0.1 kg/sec
- b₂: 0.7325 kg/sec
- k: 50 kg/sec²

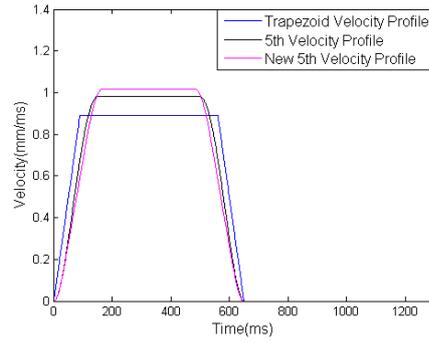


Fig. 8 Velocity profiles

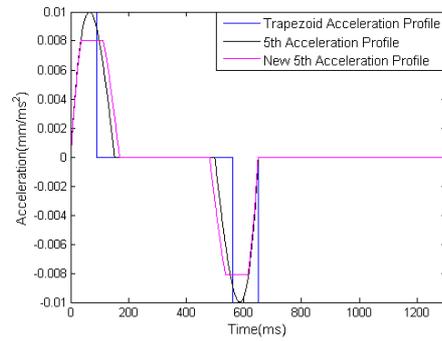


Fig. 9 Acceleration profiles

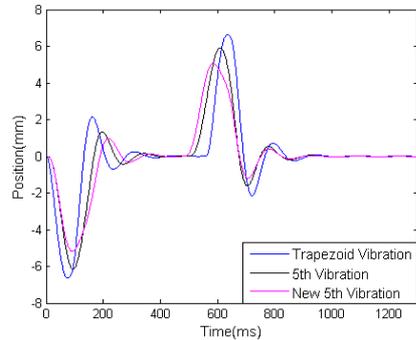


Fig. 10 System vibration ($x_2 - x_1$)

앞 절의 Fig. 2 에 도시된 것처럼 스테이지가 운동할 때 스테이지 상단의 기구물과 스테이지 사이의 상대진동 $x_2 - x_1$ 이 가장 중요하므로 식(1)-(5) 등을 사용하여 각 모션 프로파일에 의해서 발생하는 상대진동 $x_2 - x_1$ 을 Fig. 10 에 도시하였다.

대부분의 장비 및 프로세스에서 가장 문제가 되는 것은 구동이 끝난 후에, 상단 구조물과 베이스 사이의 상대적인 잔류 진동이므로, 시뮬레이션에서도 목표점인 0 mm 의 +0.2% ~ -0.2% 안에 들어

을 때까지의 시간을 정착 시간으로 정의하고, 구동이 끝난 후부터 정착 시간까지의 위치를 누적 적분하여 Table 1 에 기록하였다.

Table 1 Comparison of simulation result

| Profiles | 정착 시간 | 누적 진동크기 |
|--------------------------------|---------|---------|
| Trapezoid | 1189 ms | 295.59 |
| 5 th Polynomial | 1165 ms | 154.97 |
| New 5 th Polynomial | 1107 ms | 119.70 |

Table 1 에서 볼 수 있듯이 누적된 진동량이 가장 큰 것은 사다리꼴 프로파일이며, 본 연구에서 제안한 개선된 5 차식의 경우의 진동의 누적크기가 가장 작게 계산되었다. 또한 구동거리의 0.2% 안으로 수렴하는 정착시간에서도 가장 빠른 성능을 보여 주었다. 본 논문에서 제안한 진동 저감 프로파일에 의한 누적 진동량은 일반적인 5 차 다항식을 이용한 프로파일보다 약 23% 정도 감소했으며, 정착시간의 면에서도 약 5% 정도 더 빠른 정착시간을 기록하였다.

5 차 다항식의 프로파일은 7 차식 등의 고차식의 프로파일과 비교하여 빠른 구동시간과 상당한 가진 제한특성으로 많이 사용되고 있는 검증된 프로파일인데, 본 연구에서 제안한 개선된 5 차식 프로파일은 그 특성을 유지하면서도 뛰어난 가진 제한 특성을 보여주어 상당히 효율적인 프로파일임을 확인하였다.

4. 실험

4.1 실험 기구 및 실험 방법

전체 구동 시스템 구성은 Fig. 11 과 같으며 구동부는 Yaskawa 사의 SIGMA(Σ)-V SGMJ 모터와 SIGMA(Σ)-V SGD V 서보팩 및 볼스크류를 사용하여 리니어 스테이지를 구성하였다.

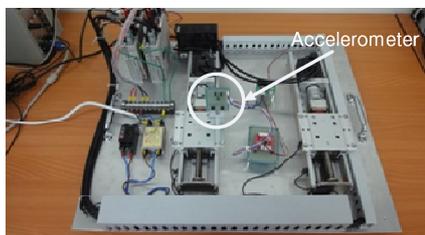


Fig. 11 Experimental apparatus

스테이지 상단에 진동의 측정 실험 장치는 구동부 위에 Fig. 11 과 같이 가속도 센서가 부착된 PCB 모듈을 나사로 고정하여, 구동부가 프로파일을 따라 작동 후 멈추었을 때 구동부 위에 고정되어 있는 PCB 모듈에 발생하는 진동의 변화를 측정 할 수 있도록 하였고 이 가속도의 변화를 Atmega128 의 A/D 변환 기능 및 시리얼 통신기능을 사용하여 프로파일에 따른 진동을 측정 하였다.

실험의 수행은 비교 대상인 일반 5 차식과 개선된 5 차식 두 가지 프로파일에 대하여 수행하였으며, 각각의 경우에 발생하는 진동을 비교하는 실험을 하였다. 실험 조건은 일반 5 차 프로파일의 경우는 이동거리는 40 mm, 최대 속도 0.32 mm/ms, 최대 가속도 0.015 mm/ms² 로 적용하였고 진동 저감 5 차 프로파일의 경우는 이동거리 40 mm, 최대 속도 0.35 mm/ms, 최대 가속도 0.015 mm/ms² 으로 적용하여 이동시간과 거리를 동일하게 설정해서 비교하였다.

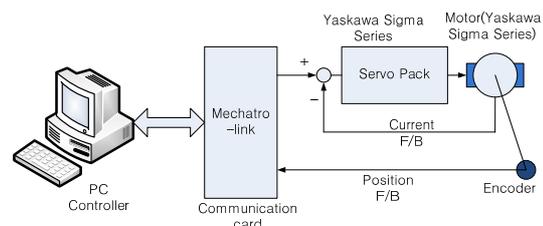


Fig. 12 Block diagram of the driving system

4.2 실험 결과

도시한 Fig. 13 의 파랑색 그래프는 일반 5 차 프로파일이 적용 되었을 경우의 속도 및 위치 그래프이고, 붉은색 그래프는 진동 저감 5 차 프로파

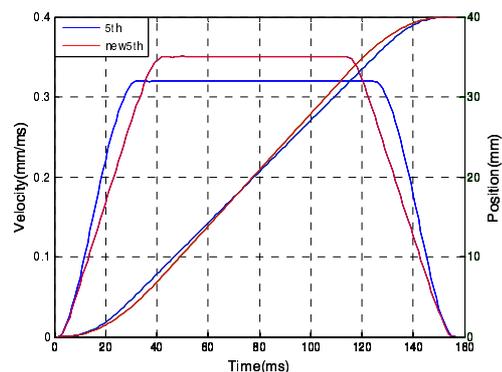


Fig. 13 Comparison of velocity profile

일이 적용 되었을 때 속도 및 위치 그래프이며, Fig. 14 의 (a)와 (b)는 각각의 프로파일에 대한 실제 토크 명령 (Torque command) 그래프를 도시한 것이다. 이를 비교해 보면 두 가지의 토크 명령 프로파일들의 최대값이 확연히 차이가 나는 것을 확인 할 수 있다.

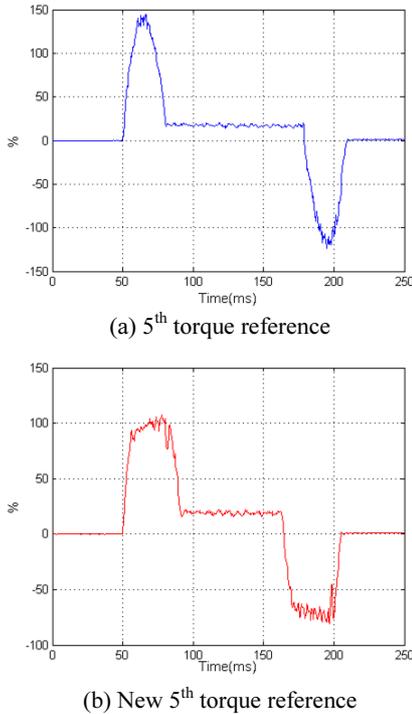


Fig. 14 Comparison of torque reference; (a) conventional 5 order profile, (b) improved 5 order profile

각각의 프로파일을 사용하여 스테이지를 구동한 후 스테이지 상단의 구조물에 발생한 잔류진동 결과를 Fig. 15 에 도시하였다. 측정된 결과는 일반 5 차 프로파일을 적용했을 경우보다 본 연구에서 제시한 진동 저감 프로파일을 적용하였을 경우 진동의 크기와 진동 시간이 동시에 현격하게 줄어든 것을 확인 할 수 있다.

자세한 비교를 위해 시뮬레이션에서와 같이 그래프에 표시된 양을 수치 적분하여 값을 정리해보면 Table 2 와 같이 된다. 여기서 진동의 크기는 시뮬레이션과 같이 그래프의 모든 값을 양수로 변환하여 더한 값이고 진동 시간은 목표점인 0 mm 의 +0.2 ~ -0.2% 사이 안에 들어올 때까지의 시간이다. 실험결과, 정착시간은 대략 29% 정도 경감되었

으며, 누적 진동량도 39% 가량 줄어든 것을 확인할 수 있다. 여기서 시뮬레이션 결과와 비교해 보면, 실제 상황에서는 제안된 프로파일의 효과가 상당히 더 좋은 것을 알 수 있으며, 이는 스테이지 윗면의 기구부를 단일 질량으로 단순 모델링한 시뮬레이션 결과에 비하여, 실제 기구부는 다수개의 공진주파수와 비모델링된 부분의 변수가 작용했으리라고 추측된다.

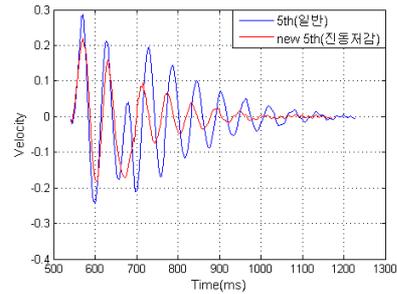


Fig. 15 Experiment result

Table 2 Comparison of experiment result

| Profiles | 정착 시간 | 누적 진동크기 |
|-----------------------------|--------|---------|
| 5 th profile | 638 ms | 22.06 |
| New 5 th profile | 453 ms | 13.38 |

5. 결론

본 논문에서는 스테이지 상단의 구조물의 가동을 억제하고 구동부의 잔류 진동을 줄여서 정착시간을 감소하기 위한 진동 저감 프로파일에 대해 연구하였다. 제안된 프로파일은 일반적인 5 차 프로파일에 비하여, 동일한 구동시간을 유지하면서 스테이지 상단의 진동을 크게 경감시키는 장점이 있다.

시뮬레이션과 실험을 통하여 제안된 프로파일이 기존의 일반적인 5 차 프로파일에 비해 전체적인 진동의 크기와 정착 시간을 크게 줄여준다는 것을 확인했으며, 고안된 프로파일의 이러한 특징은 현실적으로 제한된 전류 제어 밴드를 가진 앰프에서 보다 빠른 정착 시간과 잔류진동의 제거로 인하여 UPH의 향상에 도움이 되는 것을 확인하였다.

후 기

이 연구는 서울과학기술대학교 교내 학술연구비

지원으로 수행되었습니다.

참고문헌

1. Rhim, S. and Park, J. H., "Residual Vibration Control of High Speed Take-out Robot Used for Handling of Injection Mold Plastic Part," J. of the KSPE, Vol. 28, No. 9, pp. 1025-1031, 2011.
2. Tasy, D. M. and Lin, C. F., "Asymmetrical inputs for minimizing residual response," IEEE International Conference on Mechatronics, pp. 235-240, 2005.
3. Rew, K. H. and Kim, K. S., "Using Asymmetric S-Curve Profile for Fast and Vibrationless Motion," International Conference on Control, Automation, and Systems, pp. 500-504, 2007.
4. Meckl, P. H., Arestides, P. B., and Woods, M. C., "Optimized S-Curve Motion Profiles for Minimum Residual Vibration," American Control Conference, pp. 2627-2631, 1998.
5. Dijkstra, B. G., Rambaratsingh, N. J., Scherer, C., Bosgra, O. H., Steinbuch, M., and Kerssemakers, S., "Input design for optimal discrete time Point-to-Point motion of an industrial XY-positioning table," IEEE Conference on Decision and Control, pp. 901-906, 2000.
6. Masey, R. J. M., Gray, J. O., Dodd, T. J., and Caldwell, D. G., "Elliptical Point to Point Trajectory Planning using Electronic Cam Motion Profile for High Speed Industrial Pick and Place Robots," IEEE Conference on Emerging Technologies & Factory Automation, 2009.
7. Kim, D. N., 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.
8. Kim, J. H., "Control of Linear Motor using DSP," Dong-II Pub., 2003.
9. Li, H., Le, M. D., Gong, Z. M., 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.
10. Lim, J. G., Yoon, W. S., Beom, H. R., and Hong, S. W., "A Study on Suppression of Lateral Vibration for Axially Deploying Beams under Gravity," J. of the KSPE, Vol. 28, No. 8, pp. 959-965, 2011.