

마이크로 스텝핑 평판 스테이지의 외란 예측기의 개발

김정한*

(논문접수일 2005. 1. 4, 심사완료일 2005. 4. 1)

Development of the disturbance observer for micro-stepping X-Y stage

Kim Jung-Han*

Abstract

The purpose of this study is to design a disturbance observer for a micro-stepping stage to eliminate the disturbances from cables, friction, mass unbalance of the moving part, etc. The disturbance observer is designed for air-floating X-Y precision micro-stepping X-Y stage which widely used in stepper machine or semiconductor manufacturing systems. The micro-stepping X-Y stage has a weak point of the variation of characteristics with position locations, which caused by various disturbances. In this study, it will be described that a simple and high throughput disturbance observer algorithm improves the dynamic error and settling time of the micro-stepping stage.

Key Words : Disturbance observer, Micro stepping, Sawyer motor

1. 서론

마이크로 스텝핑(Micro-stepping) 기술은 가동자의 코일에 흐르는 전류를 정현파로 정밀하게 제어하여 미세 해상도의 정지위치를 가능하게 해 주는 기술이다. 마이크로 스텝핑 기술은 회전형 스텝모터에도 적용가능하며 리니어 타입의 펄스 모터에도 많이 응용되는데, 특히 공기 베어링(Air bearing)을 채택한 평판형 리니어 스테이지에 적용할 경우 고정밀 제어 및 경제적인 구성에 적합하여, 반도체와 디스플레이 생산 및 검사 공정에서 노광기 및 검사장비의 플랫폼

폼으로 많이 이용된다. 이러한 공기 베어링 타입의 평판형 리니어 스테이지는 공기 베어링에 의해 부양되어 동작하므로, 기계적인 접촉 및 스틱-슬립(Stick Slip)과 같은 현상이 거의 없는 반면에, 탈조, 치차 불균일 및 공진현상의 발생 등의 한계가 있고^(1,2), 특히 여러 가지 외란에 취약한 구조를 가지고 있다.

이러한 구조의 스테이지는 공기 베어링으로 약 8~20 μ m 정도 부양되어 동작되며, 다축 구조상 구동부의 질량중심과 추력중심 간의 오프셋(Offset)이 존재하는데, 이러한 무게중심에 의하여 가감속시 회전 모멘트가 발생하게 되며 이

* 서울산업대학교 기계설계자동화공학부, 정밀기계기술연구소 (hankim@snut.ac.kr)
주소: 139-743 서울시 노원구 공릉2동 172

러한 회전 모멘트는 제어 시스템에 하나의 큰 외란으로 작용하게 된다. 또한 구동부에 부착된 케이블의 탄성 및 치차 가공의 불균일성에서 발생하는 외란은 가동자의 위치와 상태에 따라 변화하는 특징을 가지고 있으며, 또 모델링하기 어려운 공통점을 가지고 있다.

예를 들어 케이블의 탄성에 의한 외란 같은 경우, 가동자의 위치에 따라 연속적으로 값이 달라지며, 동적 특성을 가지며, 또 기계의 조립 상태에 따라 값이 크게 달라지므로 이러한 외란을 모델링하는 것은 매우 어렵고, 또 모델링 되어도 그만큼의 불확실성이 존재하게 된다.

마이크로 스텝핑 스테이지의 고속 구동에서는 구동 프로파일에 대한 소모 전류를 미리 계산하여 피드 포워드 제어기에 반영하는데, 무게중심 움직임을 비롯한 상기한 여러 가지 외란들은 구동시 필요한 전류의 사전 계산에 많은 오차를 유발하므로, 상기한 여러 가지 외란들은 궤적 제어시 동적 오차를 증가시키며, 또한 정착 시간(Settling time)에도 상당한 악영향을 미친다.

외란에 의한 성능저하를 개선하기 위한 외란 예측기는 그 적용대상 마다 작용하는 외란이 제각기 다양하므로, 일반적으로 외란 예측 알고리즘은 시스템의 모델링에 의존해야 하는 특징이 있다. 최근에는 정밀 궤적 제어에 대한 관심이 높아지면서 직접구동(Direct drive) 모터에 대한 전류 목표치와 현재 위치변수를 입력으로 사용한 가속도의 정밀 제어에 대한 연구도 진행되었으며^(3,4), 하드 디스크 등에서 발생하는 주기적인 외란을 효과적으로 제거하기 위한 연구도 진행되었다⁽⁵⁾. 또한 디지털제어기에서 명령추종능력과 외란제거능력의 최적설정을 위하여 감도 조절 함수에 의한 속도루프의 개선 설계에 대한 연구도 검토되었다⁽⁶⁾.

외란 예측기에 대한 이러한 일련의 연구들의 중요한 특징 중 하나는, 알고리즘이 제어 대상 시스템에 최적화되는 구조를 가지고 있다는 것인데, 이는 외란예측기 자체가 시스템의 모델링에 많이 의존해야 한다는 사실과 밀접한 관련이 있으며, 따라서 플랜트마다 알고리즘의 구조가 조금씩 달라지며 이에 따른 최적화 작업이 필요하다.

본 연구에서는 공기 베어링 타입의 마이크로 스텝핑 평판형 스테이지의 고속구동에서의 구동 오차 특성과 정착(Settling) 특성을 개선하기 위한 외란 예측기의 설계를 다루고자 한다. 예측기의 입력으로는 위치 및 속도의 레퍼런스와 실제값, 제어기의 토크 명령 등을 이용하였으며, 특히 마이크로 스텝핑 스테이지의 무게 중심의 움직임을 이용하여 알고리즘을 구성하여, 구동시 X-Y축 간에 연동되어 발생하는 회전 모멘트에 대한 외란을 효과적으로 상쇄하였다.

제안된 외란 예측기는 마이크로 스텝핑 스테이지의 특성에 맞는 댐핑, 역기전력⁽⁷⁾, 케이블 탄성 및 회전 모멘트 등에 의한 외란을 보상하며, 제어기로 사용되는 저가형 DSP에 장착할 수 있도록 계산량이 작은 효율적인 알고리즘으로 구성된다.

2. 마이크로 스텝핑 스테이지의 원리

마이크로 스텝핑 리니어 스테이지는 자기회로의 구성에 따라 영구자석형(Permanent Magnet), 가변릴럭턴스형(Variable Reluctance), 하이브리드형(Hybrid type)의 세 가지로 크게 나눌 수 있다. 이중 하이브리드형은 영구자석이 자속의 일부를 담당하므로 소비전력이 작고, 바이폴라 구동이 가능하여 많이 사용된다⁽⁸⁾. 본 연구에서는 와이어 본더용으로 응용된 소형, 고속용의 2상 하이브리드 타입의 마이크로 스텝핑 리니어 스테이지를 대상으로 한다. Fig. 1은 일반적으로 Sawyer 모터라고도 불리는 마이크로 스텝핑 리니어 스테이지의 작동원리를 나타낸다.

일반 스텝 모터를 펼쳐놓은 듯한 구조를 가지고 있는 마이크로 스텝핑 리니어 스테이지는 치차로 구성된 고정된 스테이터(Stator)와 움직이는 부분인 가동자(Mover)를 가지고 있으며, 스테이터의 치차 간격과 가동자의 치차 간격은 같지 않고, 일정량만큼 차이가 나게 설계되어 있는데, 이는 나누고자 하는 스테이지의 해상도에 따라 결정된다. Fig. 1에서는 간단

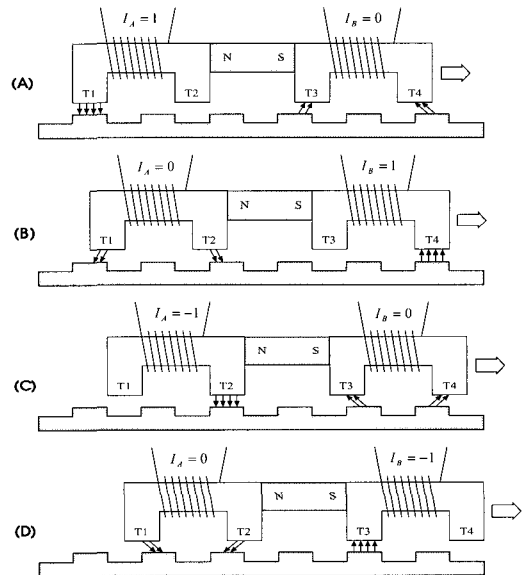


Fig. 1 Movement of micro-stepping stage

하계 4 사이클의 평형상태만을 도시하였다. A상과 B상의 코일에는 90도의 위상차를 이루는 정현파 전류가 입력되는데, 이때 위상 신호는 치차의 진행에 따라 자동적으로 여자(Commutation)되고 이때 가동자에서 발생하는 발생 힘의 크기는 전류의 크기로 제어 한다. Fig. 1에서와 같이 가동자의 진행이 4사이클이 끝나면 스테이터의 치차 한 주기만큼 가동자가 전진하게 된다. Fig. 1은 4사이클로 도시되었지만 실제로는 코일에 계단형 정현파를 사용함으로써 여러 단계의 정지 평형점을 가지게 되고 세밀한 위치제어가 가능하게 된다.

3. 외란 예측기의 설계

Fig. 2는 본 연구에서 사용된 와이어 본더용 리니어 평판 스테이지이다. 케이블이 연결된 부분이 실제 움직이는 가동자 부분이며, 이 가동자의 위에 Z축 구동 기구부, 비전 카메라 및 광학계 등이 장착되게 된다. 가동자에는 위에서 보아 아래쪽에 X축의 구동 모터가 장착되어 있고, Y축은 회전(Yawing) 제어를 위하여 Y1, Y2 2개의 모터가 장착되어 있으며, 각 축마다 0.156 μ m의 최종해상도의 엔코더를 장착하였다.

Fig. 2의 앞쪽으로 돌출된 케이블은 코일로 연결되는 전원선, 엔코더 신호선 및 기타 센서 연결용 전선이며, 여기에 Z축의 기구부 및 비전 카메라 및 히터 등이 추가로 장착되며, 따라서 케이블의 굵기도 현저히 증가하게 된다. 이러한 케이블은 가동자의 위치에 따라 케이블 장력(Tension)에 의하여 가해지는 힘이 달라지며, 위에 장착되는 Z축 관련 각종 기구부 또한 무게중심을 이동하게 하여, 이의 움직임에 따라 가감속 시 회전 모멘트를 발생시키게 된다.

상기의 리니어 평판 스테이지는 X, Y1 및 Y2의 3축으로

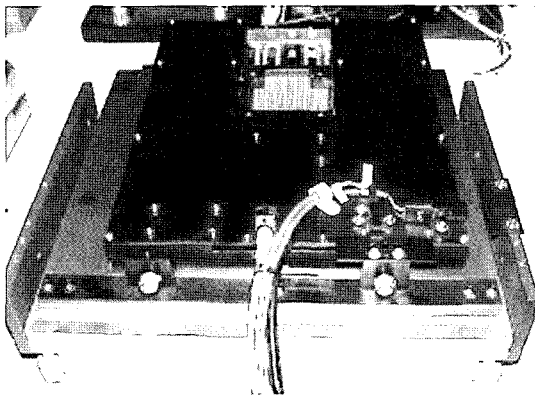


Fig. 2 Air-levitated micro stepping stage

구성되어 있으며, 각 축 당 2개의 코일로 구성된다. 따라서 축별 각 상(Phase) 에서 발생하는 추력 F_A 및 F_B 는 다음과 같이 구해진다^(1,9).

$$F_A = -K_f i_A \sin\left(\frac{2\pi x}{T}\right) \quad (1)$$

$$F_B = -K_f i_B \sin\left(\frac{2\pi x}{T}\right) \quad (2)$$

여기서 K_f 는 모터상수이며, i_A, i_B 는 각상의 코일에 흐르는 전류, 그리고 T 는 스테이터의 치차의 크기, 그리고 x 는 진행방향의 이동 위치를 나타낸다. 가동자(Mover)의 질량을 m , 부하를 M 이라고 놓았을 때 시스템의 단축 방향만 고려한 운동방정식은 식 (3)과 같이 구해진다.

$$\begin{aligned} & -K_f \sin\left(\frac{2\pi x}{T}\right)(i_A + i_B) \\ & = (M + m) \frac{d^2 x}{dt^2} + (c_f + e_b) \frac{dx}{dt} + s_c x \end{aligned} \quad (3)$$

여기서 c_f 는 공기 베어링 및 시스템의 댐핑 계수이며, e_b 는 역기전력에 의한 외란, s_c 는 케이블에 의한 외란 계수를 의미한다. 식 (3)에서 댐핑에 의한 마찰력과 역기전력은 이동 속도에 어느 정도 비례하지만, 케이블에 의한 외란 계수 s_c 는 위치에 따라, 또 플랜트의 개개의 제품의 조립상태에 따라 상당히 변화하는 특성을 가진다.

식 (3)은 시스템의 가동자를 집중 질량 시스템으로 놓고 모델링 한 것이며, 공기 베어링 타입의 스테이지를 고 가속도로 가속하거나 감속할 때 실제로 발생하는 중요한 문제 중 하나는 작동 평면상에서 추력 발생의 중심선과, 부하를 포함한 가동자의 무게중심의 불일치에서 발생하는 모멘트이다. 이러한 모멘트는 저가속도로 운전 시에는 큰 문제가 되지 않으나, 2G 이상의 고가속도로 제어할 때는 동적 오차를 증가시키며, 정지시 안정된 상태까지 이르는 정착 시간을 증가시킨다. 이러한 회전 모멘트에 따른 항은 부하의 고정 형상에 따라 달라지며, 특히 위에서 보아 무게중심이 많이 편심된 경우 Y축의 회전 제어에 큰 외란으로 작용한다.

Fig. 3은 X, Y1, Y2 세개의 모터가 장착된 스테이지에서, 부하를 포함한 가동자의 무게 중심과 실제 추력이 발생하는 추력 발생 부분과의 상대적인 형상을 도시한 것이다. 여기서 만약 가동자가 X축 오른쪽 방향으로 급가속하면 무게중심이 추력 중심선의 아래에 있으므로 가속시 시계방향의 모멘트가 발생하며, 감속시에는 반대방향의 모멘트가 발생하여, 전체 시스템의 성능에 영향을 주게 된다. 따라서 이러한 회전력을

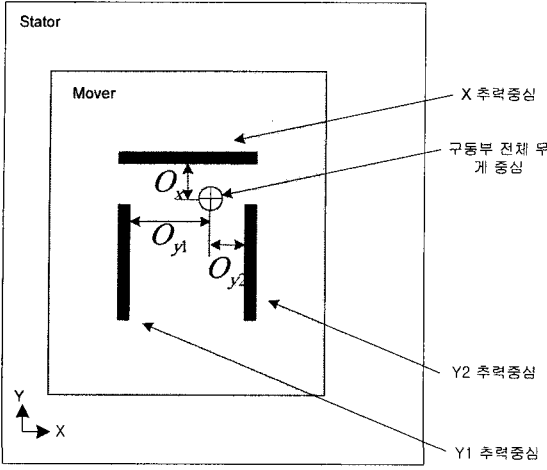


Fig. 3 Deployment of X, Y1 and Y2 motor(Top View)

상쇄시키기 위해서 Y1, Y2에 추가적으로 필요한 힘 ΔF_{y1} , ΔF_{y2} 는 힘-평형 방정식에서,

$$\Delta F_{y2} \times O_{y2} = \frac{1}{2} F_x O_x \quad (4)$$

$$-\Delta F_{y1} \times O_{y1} = \frac{1}{2} F_x O_x \quad (5)$$

으로 계산된다. 여기서 O_x , O_{y1} , O_{y2} 는 각각 Fig. 3에 표시된 구동부 무게 중심부터 질량중심간의 오프셋(Offset)이며, F_x 는 X축 구동시 발생된 힘이다. X축의 구동에 따라 (4),(5)에서 계산한 값을 Y축에 각각 보상해 주면 회전모멘트의 발생에 따른 성능저하를 개선할 수 있다. 정리하면 Fig. 3과 같은 구조의 스테이지에서, X축의 외란 예측기는 식 (3)의 우변 두번째 및 세번째 항만을 고려하며, Y축의 외란 예측기는 식 (3)에서 계산한 외란항에 무게 중심 오프셋에 의한 회전력 감쇄항 ΔF_{y1} , ΔF_{y2} 를 추가로 고려하며 설계하여야 한다.

외란을 포함한 리니어 평판 스테이지의 상태 방정식 표현은 다음과 같다.

$$\dot{x} = Ax + Bu + Fx_d \quad (6)$$

여기서 x 는 상태벡터, A 는 시스템 행렬, B 는 입력 행렬, u 는 입력, F 는 외란 행렬, x_d 는 외란벡터를 나타낸다. 오차상태를 다음과 같이 정의하면,

$$e = x - x_r \quad (7)$$

여기서 x_r 은 추종하고자 하는 목표치(reference) 상태 벡터이고, 식 (8)와 같은 방정식을 만족한다고 가정하면⁽¹⁰⁾,

$$\dot{x}_r = Ax_r \quad (8)$$

오차의 미분 방정식은 (9)와 같이 구해진다.

$$\begin{aligned} \dot{e} &= \dot{x} - \dot{x}_r = Ax + Bu + Fx_d - Ax_r \\ &= Ae + Bu + Fx_d \end{aligned} \quad (9)$$

공기 베어링을 포함한 리니어 평판 스테이지는 공기압에 의하여 부양되어 기구적인 마찰이 거의 없으므로, 관성항이 중요한 역할을 하는 이중 적분기(Double integrator)로 모델링 될 수 있다. 다음의 식 (10)은 이산 상태공간에서의 리니어 평판 스테이지의 오차에 대한 방정식을 나타낸다.

$$\begin{bmatrix} e_{k+1}^p \\ e_{k+1}^v \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & h \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} e_k^p \\ e_k^v \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0.5h^2 \\ h \end{bmatrix} u_k + \begin{bmatrix} d_k^p \\ d_k^v \end{bmatrix} \quad (10)$$

여기서 e^p 는 위치에 대한 오차, e^v 는 속도에 대한 오차를 나타내며, h 는 제어기 출력이 발생하는 인터럽트 시간, u 는 전류에 의한 발생 힘이며, 밀집자 k 는 시간에 따른 이산 스텝을 표시한다. 마지막의 d_k^p 와 d_k^v 는 식 (3)의 우변 두, 세번째 항에 해당되는 위치 및 속도 상태에 대한 외란항이다. 식 (10)을 전개하면,

$$e_{k+1}^p = e_k^p + he_k^v + 0.5h^2u_k + d_k^p \quad (11)$$

$$d_k^v = e_{k+1}^v - e_k^v - he_k^v - 0.5h^2u_k \quad (12)$$

$$e_{k+1}^v = e_k^v + hu_k + d_k^v \quad (13)$$

$$d_k^p = e_{k+1}^p - e_k^p - hu_k \quad (14)$$

여기서 제어 주파수가 외란의 주파수 보다 훨씬 빠르다고 가정하면, 현재 스텝 k 에서의 x 축 외란 예측기는, 각각 식 (11), (13)으로부터 다음과 같이 구해진다.

$$\widehat{d}_k^p = e_k^p - e_{k-1}^p - he_{k-1}^v - 0.5h^2u_{k-1} \quad (15)$$

$$\widehat{d}_k^v = e_k^v - e_{k-1}^v - hu_{k-1} \quad (16)$$

식 (15), (16)은 식 (3)에서 언급된 시스템 맵핑, 역기전력, 케이블 탄성 등의 항을 포함한다. 그리고 Y1 및 Y2축의 경우 식 (4), (5)에서 언급된 회전관성 모멘트에 의한 외란을 포함하므로 Y1축의 경우 최종적으로 다음과 같은 외란 예측기가 구성된다.

Y1축의 경우:

$$\hat{d}_k^p = e_k^p - e_{k-1}^p - h e_{k-1}^v - 0.5h^2 \left(u_{k-1}^{y1} - \frac{O_x}{2O_{y1}} u_{k-1}^x \right) \quad (17)$$

$$\hat{d}_k^v = e_k^v - e_{k-1}^v - h u_{k-1}^{y1} + h \frac{O_x}{2O_{y1}} u_{k-1}^x \quad (18)$$

식 (17), (18)에서의 오차 상태 e_k^p 및 e_k^v 는 Y1축에 대한 것이고, u_{k-1}^x 은 k-1시점에 X축의 모터에 가해진 입력이며, u_{k-1}^{y1} 의 경우는 Y1축 모터에 가해진 입력이다. 마찬가지로 Y2축에 대한 외란 예측기는 (19), (20)과 같이 설계 된다.

Y2축의 경우:

$$\hat{d}_k^p = e_k^p - e_{k-1}^p - h e_{k-1}^v - 0.5h^2 \left(u_{k-1}^{y2} + \frac{O_x}{2O_{y2}} u_{k-1}^x \right) \quad (19)$$

$$\hat{d}_k^v = e_k^v - e_{k-1}^v - h u_{k-1}^{y2} - h \frac{O_x}{2O_{y2}} u_{k-1}^x \quad (20)$$

여기서 (19), (20)에서의 e_k^p 및 e_k^v 는 Y2에 해당하는 오차 상태이다.

제한된 외란 예측기는 제어 루프 안에서 위치 오차 및 속도 오차 그리고 이전 단계(k-1)의 입력 값등을 사용하며, 제어기 출력의 값에 보상되도록 설계하였다. 다음의 Fig. 4는 외란 예측기를 포함한 평한 리니어 스테이지 제어기의 전체 블럭 선도이다.

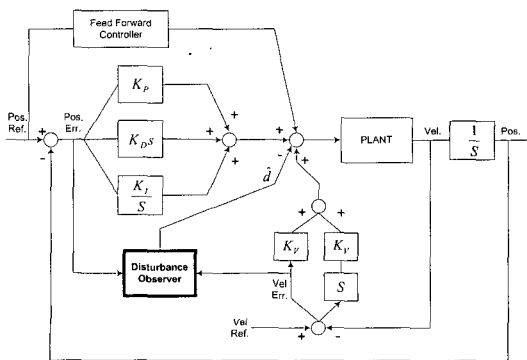


Fig. 4 Block diagram including disturbance observer

4. 여자 및 코일 전류제어

공기 베어링 마이크로 스텝핑 리니어 스테이지는 여자를 위하여 가동자의 위치를 실시간 파악하여 Fig. 5와 같은 계단형 정현파를 코일에 흘려주어야 한다. 본 연구에서는 식 (17)~(20)까지 각 축의 모터별로 설계된 외란 예측기의 출력값의 반영이 용이하도록, 롬(ROM) 테이블에 의한 여자 방식과, 여기에 아나로그 곱셈기를 이용하여 2상의 코일에서 발생하는 토크제어(Torque control)를 보상하는 방식의 구동용 증폭기(Amplifier)를 구성하였다. Fig. 6은 본 연구에서 구성한 마이크로 스텝핑 스테이지의 여자 방식에 대한 구조를 보여 준다.

비교기(Comparator)에 의하여 발생된 상위 비트 엔코더 펄스는 상위 비트 용 카운터로 입력되고 여기서 자동으로 현재의 위치에 따른 롬 테이블을 참조하여 정현파의 위상을 결정

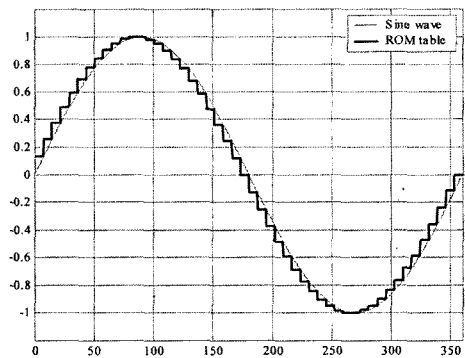


Fig. 5 Discretized sin wave signal for coil current

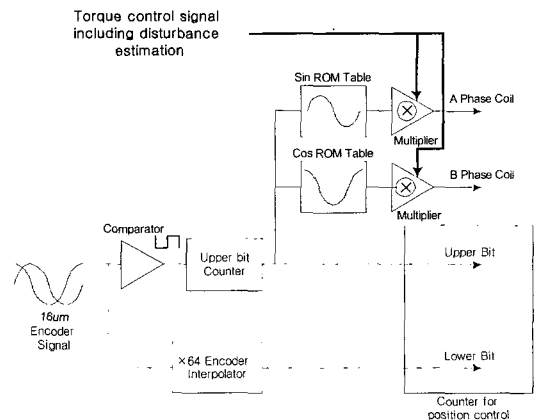


Fig. 6 Torque compensation diagram

정하고, 여기에 제어기와 외란 예측기에서 계산된 출력을 곱해서 실제 코일에 전류값이 출력되는 방식의 효율적인 회로를 구성하였다.

5. 구동 실험 결과 및 고찰

설계된 알고리즘을 DSP 제어기에 장착하여 실제 구동테스트를 시행하였다. 스테이지의 가동자위에 Z축 구동부, 비전 카메라, 광학계등을 부착하여 약 5kg의 부하가 존재하는 상태에서의 실험을 행하였으며, 최대 가속도는 2.5G, 최대속도는 250mm/s의 고속 구동 프로파일을 사용하였다. 구동 프로파일은 S자 형태의, 3차 방정식에 의한 구동 프로파일을 사용하였다. 실험에 사용된 와이어본더용 마이크로 스텝핑 스테이지는 스트로크가 짧으면서 고가속도의 사양을 요구하므로 짧은 구동 거리에서는 등속구간이 나타나지 않는 것이 특징이다.

Fig. 7에서는 구동에 사용된 속도 프로파일과 동시에 측정된 궤적오차를 예시한 것이며, 여기서 가로축은 시간(20ms/칸), 세로축은 오차(16 μ m/칸)를 나타낸다. 좀 더 자세히 설명하면, Fig. 7의 위쪽 신호는 구동시 사용된 목표 속도 프로파일을 도시한 것이며, Fig. 7의 아래쪽의 신호는 실제 스테이지의 구동시 발생한 목표 궤적에 따른 각 시간대에서의 위치 오차를 측정하는 것이다. 따라서 세로의 2선 사이의 오차는 구동중 발생한 오차이며, 두번째 세로줄 오른쪽의 에러는 구동이 끝난 후 정착 기간에 발생한 오차이다.

다음의 Fig. 8부터 Fig. 15는 와이어본딩 작업의 대표적인 구동거리인 2.5mm와 4mm에 대하여 실험한 결과이다. 각 그림의 중앙부 신호는 구동에 따른 궤적 오차를 도시한 것이

며, 그림의 세로축에서 박스형태로 표시된 1칸이 16 μ m 오차에 해당하며, 가로축의 한 칸은 20ms에 해당한다. 각 그림의 위쪽에 있는 신호는 구동 시작을 표시하는 트리거 신호이다. 그리고 Y축의 경우 Y1과 Y2는 거의 유사한 특성을 보이므로, Y1의 데이터를 대표로 도시하였다. 각 구동은 양의 방향으로 구동한 후 약 80ms 후에 다시 음의 방향으로 구동하여 양방향 궤적 오차를 측정하는 것이다. 구동 실험 기준 및 비교는 외란 예측기 (DOB: Disturbance Observer)가 없을 경우의 최적 튜닝상태의 구동 특성과 비교하여 실험하였다.

Fig. 8에서 Fig. 11까지의 실험 데이터는 2.5mm를 구동했을 때의 오차 프로파일을 측정하는 것이다. X축의 경우, 구동중 발생하는 최대 위치 오차는 외란 예측기가 있는 경우와 없는 경우가 비슷하였지만, Y축의 경우에는 짧은 구동거리인 2.5mm에서도 회전 모멘트를 보정해주어 확실하게 최대

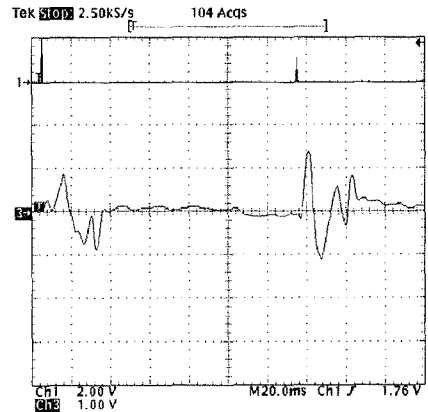


Fig. 8 2.5mm Running without DOB(X axis)

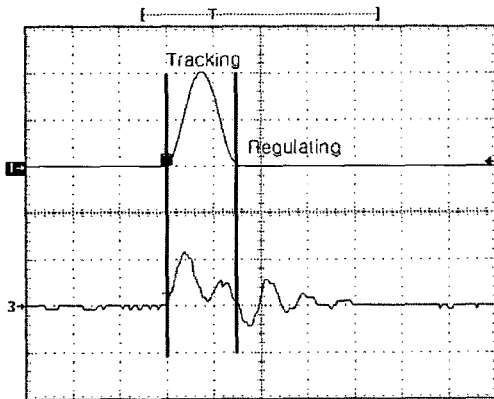


Fig. 7 Velocity profile and position error

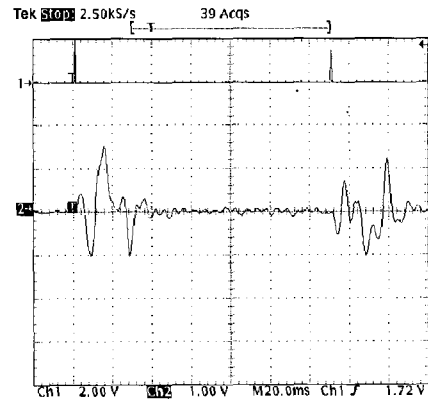


Fig. 9 2.5mm Running with DOB(X axis)

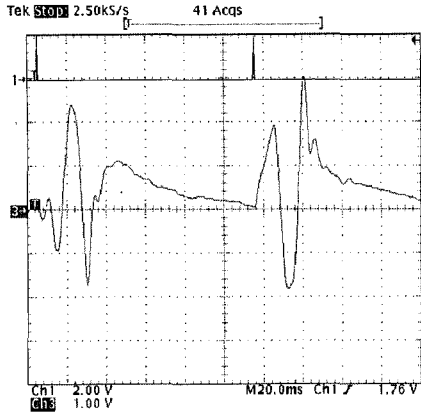


Fig. 10 2.5mm Running without DOB(Y1 axis)

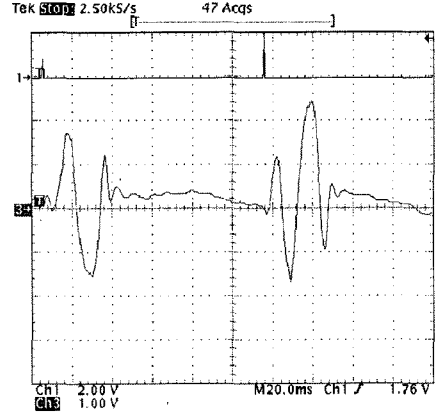


Fig. 12 4mm Running without DOB(X axis)

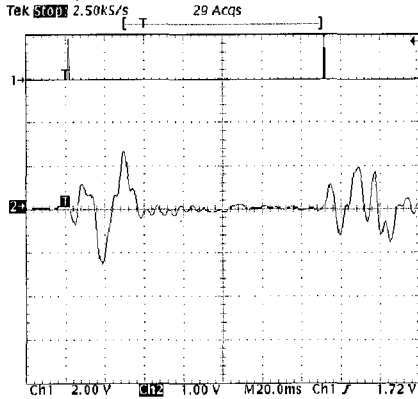


Fig. 11 2.5mm Running with DOB(Y1 axis)

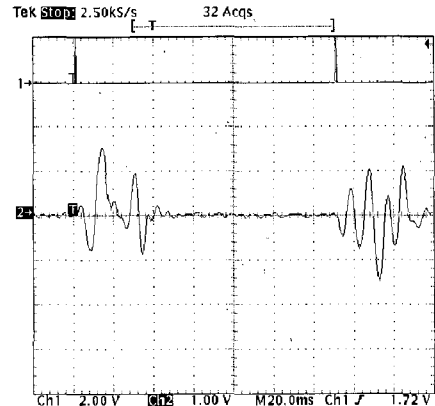


Fig. 13 4mm Running with DOB(X axis)

오차를 감소시킴을 볼 수 있다. 또한 정상 상태 위치 오차는 X축과 Y축 모두에서 약 15%이상의 성능향상(리플(Ripple) 감소)을 보여 주었다.

Fig. 12부터 Fig. 15까지는 4mm의 구동거리를 움직였을 때의 위치 오차 프로파일을 측정된 데이터이다. 2.5mm 구동과 마찬가지로 양으로 한번 구동한 후 음으로 구동하였다. 2.5mm 거리의 경우와는 달리, 4mm 구동에서는 X축의 경우에도 외란 예측기가 있는 경우가 월등한 성능을 나타내었으며, Y축 또한 확실한 최대 오차의 감소를 보여 주었다. 결과 데이터를 정리하면 구동거리가 길어질수록 외란 예측기를 포함한 제어 방법이 궤적 오차와 정착 시간이 짧아지는 것을 확인할 수 있었고, Y축의 경우는 그 개선정도가 더 뚜렷하며, 4mm 구동의 경우 50% 가까이 최대 궤적 오차가 줄어드는 것으로 측정되었다.

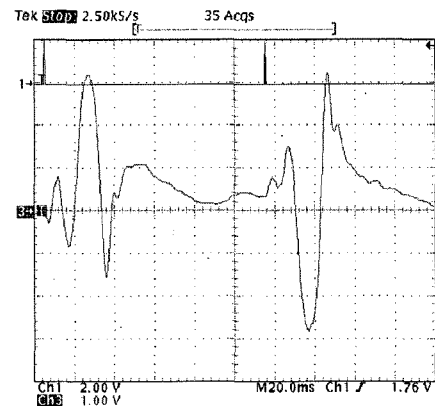


Fig. 14 4mm Running without DOB(Y1 axis)

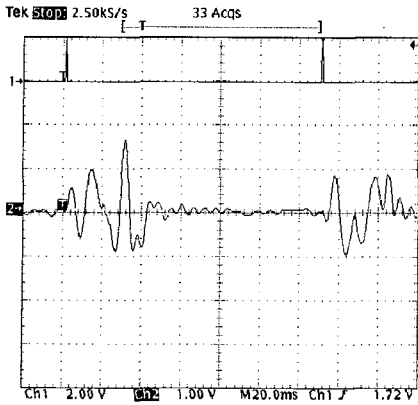


Fig. 15 4mm Running with DOB(Y1 axis)

Table 1, Table 2는 구동거리가 각각 1mm, 2.5mm, 4mm, 8mm 일 경우의 최대 궤적 오차와 3um 정착 시간을 외란 예측기(DOB)가 있을 경우와 없을 경우를 측정하여 정리한 것이다. 참고로 구동 프로파일의 레퍼런스의 시간은 1mm구동이 16ms 소요되며, 2.5mm가 24ms, 4mm가 41ms, 마지막으로 8mm구동이 67ms 정도가 소요된다.

Table 1에 정리된 바와 같이, Y축의 경우는 긴 구동 거리 뿐 아니라 전 영역에서 오차의 개선효과가 뚜렷한 결과를 보였다. X축의 궤적 최대 오차 같은 경우, 짧은 거리에서는 외란 예측기가 큰 효과를 보지 못하지만, 구동 거리가 늘어날수록 외란 예측기를 사용하지 않았을 때 보다 큰 개선 효과를 나타내었다. 이는 본 실험 시스템의 경우 X축은 무게중심의 편심량(α_x)이 Y1, Y2보다 작아서, X축의 짧은 구동 거리의 경우에는 Y1, Y2의 위치 제어기(Position regulating control)가

레귤레이팅 범위내에서 어느정도 잘 동작하면서 무게중심의 편심효과를 제어해 주지만, 구동 거리가 늘어나면 역시 무게 중심 편심에 의한 효과가 Y 축과 마찬가지로 커지면서 외란 예측기에 대한 효과가 커지는 것으로 해석된다.

마이크로 스텝핑은 구조상 토크 명령어 입력에서 실제 추력이 발생하는 데까지의 상지연(Phase delay)이 비교적 큰 편인데, 따라서 이를 피드 포워드(Feed-forward)와 유사한 구조로 외란을 예측, 보상해 주는 경우 구동 중 발생하는 최대 오차도 매우 감소하는 것으로 분석된다.

구동후 정착시간에 면에서도 뚜렷한 성능향상을 측정할 수 있었다. 와이어 본딩 작업에서는 XY 스테이지의 정착 시간이 매우 중요한데, 이는 정착 시간이 생산성 및 정확성과 밀접한 관련이 있기 때문이다. 본 연구에서는 정착 시간의 기준을 스테이지의 오차가 3 μ m 이내로 들어와서 1ms 이상 유지되는 시간을 정착 시간으로 정의하고 측정 결과를 Table 2에 정리하였다. 정착 시간의 경우에는 전 영역에 걸쳐서 개선 효과가 뚜렷했으며, 이는 가동자의 감속 후 회전 모멘트에 의한 진동이 외란 예측기에 의하여 크게 감소한 바에 의한 것으로 분석된다.

6. 결론

본 연구에서는 공기 베어링 타입의 마이크로 스텝핑 스테이지에서의 해당 구조에 적합한 외란 예측기를 설계하고 실제로 구현하였다. 본 연구에서 제시된 외란 예측기는 추력중심과 무게중심의 옴셋에 의하여 X-Y 축간의 상호 연동되어 발생하는 외란을 상쇄시키고, 맵핑 및 마이크로 스텝핑에서의 역기전력에 의한 성능저하, 케이블등에 의한 외란등을 효과적으로 상쇄하여, 궤적 오차를 감소시키고, 정착 시간을 개선하였다. 정착 시간의 경우 측정된 구간에서 평균적으로 원래 시간의 약 30% 정도로 크게 감소하였다.

마이크로 스텝핑 스테이지는 진동이 발생하기 매우 쉬운 구조로 되어있어서, 제어 밴드폭을 올리기가 매우 어려운 시스템인데, 이러한 경우 본 연구에서 제안한 알고리즘은 효율적으로 정착 시간과 최대 궤적 오차를 감소시킬 수 있음을 보여 주었다.

Table 1 Maximum position error

		1mm	2.5mm	4mm	8mm
Without DOB	X	24 μ m	20 μ m	35 μ m	47 μ m
	Y1	34 μ m	35 μ m	45 μ m	45 μ m
With DOB	X	28 μ m	20 μ m	23 μ m	16 μ m
	Y1	18 μ m	20 μ m	26 μ m	14 μ m

Table 2 Settling time(3um reference)

		1mm	2.5mm	4mm	8mm
Without DOB	X	12ms	17ms	51ms	61ms
	Y1	42ms	52ms	43ms	73ms
With DOB	X	9ms	9ms	7ms	6ms
	Y1	24ms	12ms	8ms	11ms

참고 문헌

- (1) Oh, H. S., Kim, D. H., and Lee, S. H., 2000, "A Study on Micro-Step of 2-phase Hybrid Type Linear Stepping Motor," *Trans. of KIEE*, Vol. 49B, No. 5, pp. 358~363.

- (2) Lee, K. W., Jang, W. S., Park, J. B., Yeo, H. G., and Yoo, J. Y., 1997, "Development of high performance Microstepping Driver," *KIPE*, Vol. 2, No. 3, pp. 37~43.
- (3) Komada, S., Ishida, M., Ohnishi, K., and Hori, T., 1991, "Disturbance Observer-Based Motion Control of Direct Drive Motors," *IEEE Trans. Energy Conversion*, Vol. 6, No. 3, pp. 553~559.
- (4) Yamada, K., Komada, S., Ishida, M., and Hori, T., 1996, "Characteristics of servo system using high order disturbance observer," *Proceedings of CDC*, Kobe, pp. 3252~3257.
- (5) Yong, B. J., 2000, "An advanced disturbance rejection control for repeatable runout in disk drive systems," *Journal of Korean Society of Machine Tool Engineers*, Vol. 9, No. 1, pp. 60~67.
- (6) Tesfaye, A., Lee, H. S., and Tomizuka, M., 2000, "A sensitivity optimization approach to design of a disturbance observer in digital motion control system," *IEEE/ASME Trans. Mechatronics*, Vol. 5, No. 1, pp. 32~38.
- (7) Yamada, H., Mizuno, T., Izumi, Y., Wakiwaka, H., Kataoka, Y., Karita, M., Maeda, M., and Kikuchi, Y., 1998, "Motion control of linear pulse motor for artificial heart," *Proceedings ICPE*, Seoul, pp. 101~106.
- (8) Kim, S. H., and Lee, E. W., 1999, "New technology trend of Linear Pulse Motors," *Proceedings of KIEE*, Vol. 48, No. 2, pp. 48~53.
- (9) Kim, S. H., Lee, E. W., Lee, D. J., and Koo, T. M., 1999, "Microstep Drive of 2 Phase 8 Pole HB Type Linear Pulse Motor for Precise Position Control," *Trans. KIEE*, Vol. 48B, No. 12, pp. 671~678.
- (10) Friedland, B., 1987, *Control System Design*, McGraw-Hill, pp. 216~218.