

보이스코일 액츄에이터를 기반으로 한 고정밀 직선이송 시스템의 위치결정 Positioning of the high precision linear motion system based on the voice coil actuator

이 준 우*
Lee, Jun-Woo

김 병 희**
Kim, Byeong-Hee

장 인 배**
Chang, In-Bae

Abstract

The voice coil actuator uses the Lorentz force between the magnetic field of the permanent magnets and the electromagnets to the motions and positioning. The small size, light weight and fast dynamic response of the these type actuators lead to admit them in the micro-positioning apparatus of the micro-machining systems. In this paper, the linear motion voice coil actuator is developed for the driving and positioning the rotating electrode of the electric discharge machine (EDM). The analyzed and measured results for the actuator are compared and discussed.

키워드 : 보이스코일, 액츄에이터, 직선이송, 로렌즈 력, PID 제어

Keywords : voice coil, actuator, linear motion, Lorentz force, PID control

1. 서론

모터의 회전운동으로부터 직선운동을 구현하는 직선이송 서보 시스템은 위치측정에 로타리 엔코더와 같은 회전형 측정장치를 사용하기 때문에 이송 메커니즘 상에 존재하는 마찰, 기계적 변형 및 백래시 등에 기인한 정적 및 동적인 오차를 포함한다. 이를 개선하기 위하여 회전형 액츄에이터와 리니어 스케일을 조합하여 사용하는 서보 시스템을 구축하기도 하는데 일반적으로 이러한 조합형 시스템은 응답특성이 나빠기 때문에 고속으로 시스템을 구동하기 어렵다는 단점을 갖는다. 직선 이송형 모터와 리니어 스케일을 사용하는 직선이송 시스템은 구동 및 측정을 동일한 좌표계 내에서 수행하기 때문에 정적 및 동적인 오차의 최소화가 가능하며 빠른 응답특성을 보장 받을 수 있다. 이러한 직선운동 시스템은 높은 위치결정 정밀도와 고속 운전을 필요로 하는 반도체 제조설비에서 우선적으로 적용되기 시작하였다[1].

보이스 코일 액츄에이터(voice coil actuator)는 비교적 짧은 이송거리를 필요로 하는 정밀 직선운동 시스템을 구동하기에 적합한 직선 이송형 작동기로, 영구자석에 의한 정적인 자기장 내에서 코일의 유도자기력이 생성하는 로렌즈 력(Lorentz force)을 운동 에너지로 사용한다. 이러

한 보이스 코일 액츄에이터는 하드 디스크나 광 디스크 내에서 픽업 헤드의 이송과 같은 초정밀 직선이송 시스템에 사용되면서 그 사용분야가 비약적으로 증가하였다. 근래에 들어 미세가공 기술에 대한 관심이 높아지면서 소형 직선운동 요소들을 사용한 위치결정 시스템들이 미세 가공용 테이블 및 가공용 헤드의 이송 기구에 채용되기 시작하였다[2, 3]. 보이스코일 액츄에이터는 크기가 작고 무게가 가벼우며, 비교적 간단한 구동원리를 가지고 있으며, 이전의 다양한 적용사례로부터 구동 알고리즘을 받아들일 수 있기 때문에 많은 미세가공 시스템에서 보이스 코일 액츄에이터를 주 이송요소로 채용하고 있다. 미세 구멍 가공용 방전가공은 수백 마이크로 이하의 직경을 갖는 구멍을 가공하는 기술로[4], 다양한 노즐의 제작에 사용된다. 미세 구멍을 가공하기 위해서는 PWM 고주파 펄스가 흐르는 미세 직경의 전극을 고속으로 회전시키면서 가공 시편에 대해 수직으로 전극을 이송해야만 한다. 그런데, 방전 가공시 전극을 고속으로 회전시키는 이유는 방전가공에 의해 절삭된 칩들이 방전 가공액의 유동을 통해 원활하게 배출되도록 하기 위해서이나, 많은 경우, 칩이 전극과 시편 사이의 좁은 틈새에 끼면서 전기적인 단락 현상이 발생하게 된다. 이러한 단락 현상은 정상적인 방전가공 현상을 방해하며, 국부적인 발열현상을 일으켜 전극의 급격한 마모와, 가공면의 국부적인 패임 및 용융 등을 유발한다. 이러한 단락 현상을 방지하기 위해서는 방전 가공

* 강원대학교 기계메카트로닉스공학부 석사과정

** 강원대학교 기계메카트로닉스공학부 조교수

시 전극을 흐르는 전류량을 계속적으로 모니터링 하다가 전극과 시편 사이의 단락 현상에 의한 PWM 전류의 변화 현상을 감지하는 순간에 급격하게 전극을 후진시켜 칩을 배출시켜야만 한다. 이를 위한 헤드 이송 시스템은 높은 응답 특성을 필요로 한다. 이를 위해 본 논문에서는 고속 이송이 가능한 직선 이송용 보이스코일 액츄에이터를 개발하였으며 그 작동특성에 대해 이론적, 실험적으로 검증하였다.

2. 보이스코일 액츄에이터 (Voice Coil Actuator)의 설계

2.1 보이스코일 액츄에이터의 작동 원리

본 논문에서 설계한 보이스코일 액츄에이터는 하드 디스크나 광 디스크의 픽업 헤드 구동용 작동기들과 유사한 구조를 가지고 있다. 액츄에이터는 영구자석에 의해 형성된 정적인 자기장 내에서 전자석 코일이 형성한 정적/동적인 유도자기력이 형성하는 로렌즈(Lorentz)력을 운동의 기본 에너지로 사용한다. Fig. 1은 코일에 흐르는 전류 i 와 자속밀도 B 및 로렌즈력 F 사이의 상관관계를 나타내고 있다.

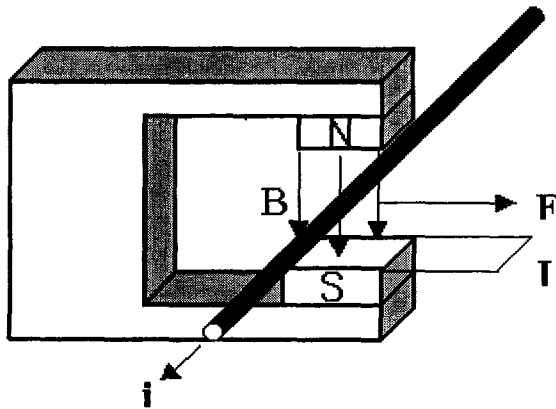


Fig. 1 Force acting on a current-carrying conductor

$$F = l \cdot (i \times B) \quad (1)$$

F : force vector
 i : current vector
 B : magnetic flux density vector
 l : conductor length in the magnetic field

보이스코일 액츄에이터는 영구자석 자계의 자속밀도와 코일에 흐르는 전류에 비례하는 힘이 자장 및 전류에 직각 방향으로 발생하는데, 이 힘은 플레밍(Fleming)의 왼손 법칙으로 설명된다. 또한, 이 힘은 코일의 권선 수에 비례하므로, 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$F = N B i l \quad [N] \quad (2)$$

N : coil winding turns

여기서, 코일과 영구자석 사이의 서로 마주보고 있는 부분의 길이를 l_1 , 영구자석의 각 극의 자속수를 ϕ [Wb], 계자 자석의 극수를 p 라고 하면

$$\phi = \frac{l_1}{p} \cdot B \cdot l \quad (3)$$

식(2)와 (3)을 정리하면

$$F = N \cdot \phi \cdot \frac{p}{l_1} \cdot i \quad (4)$$

식 (4)에서 알 수 있듯이 발생하는 힘 F 는 전류 i 에 비례한다. 이때에 발생하는 힘은 "Fleming의 오른손 법칙"에 의거하며, 인가된 전압 V 에 따른 전류 i 가 흐르고 이로 인해 기전력이 발생한다. 또한 도체 내부에서는 이 전류 i 의 흐름을 방해 하려는 역기전력이 발생하는데 이는 "Kirchhoff의 전류법칙"으로부터 다음과 같이 식을 정리할 수 있다.

$$V = i \cdot R + E \quad (5)$$

$$E = V - i \cdot R$$

V : potential difference for coil [Volt]

i : current for coil [A]

R : Resistance for coil [Ω]

E : back electromotive force [Volt]

이때 전기자의 전류 i 는

$$i = \frac{V - E}{R} \quad (6)$$

역기전력 E 는 속도에 비례하게 되므로

$$E = N \cdot B \cdot l \cdot v \quad (7)$$

따라서, 이송 속도 v 는

$$v = \frac{V - i \cdot R}{N \cdot B \cdot l} \quad [m/s] \quad (8)$$

이를 전류에 관한 식으로 변환하면

$$i = \frac{V - N \cdot B \cdot l \cdot v}{R} \quad (9)$$

식 (9)를 사용하면 보이스코일 액츄에이터의 이송 속도와 코일에 흐르는 전류 사이의 상관관계를 얻을 수 있다.

2.2 보이스코일 액츄에이터의 설계

본 논문에서 설계한 보이스코일 액츄에이터는 Fig. 2에서와 같이 서로 마주보는 두 개의 E

형 강제 코어 내측에 각각 두 개의 영구자석을 설치하여 정적인 자기장을 형성한다[6]. 영구자석의 자기장 전향 경로 상에 설치된 철심이 자기장을 흡수하여 폐경로를 형성하기 때문에 자기장의 경로 중 공극의 위치에 있는 전자석 코일은 로렌즈력을 생성할 수 있는 조건을 갖추게 된다. 코일이 감겨져 있는 알루미늄으로 제작된 코어는 직선이송 요소인 LM 가이드 상에 설치되므로 보이스코일은 직선상에서만 운동이 허용된다. 두 코일에 동일한 방향으로 전류가 가해지면 코일 조립체는 특정 방향으로 움직이며, 두 코일에 서로 상반된 방향으로 전류가 흐르면, 두 코일에 흐르는 전류의 차이에 해당하는 만큼의 위치강성을 생성하게 된다.

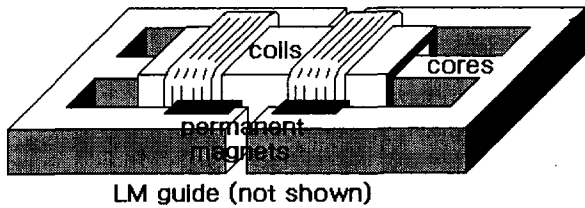


Fig. 2 Configurations of the Voice Coil Actuator

액츄에이터 이송 거리의 한계는 E형 코어의 크기와 이송부의 코일 크기, 그리고 계자 내부에 부착된 영구자석의 크기에 의해 결정이 된다. 본 논문에서는 최대 이송거리를 15mm로 설계하였으며, 위치 피드백을 위한 리니어 스케일의 분해능은 50nm 이고, 이송부인 사각 권선형 코일은 단면이 25×25 mm 인 사각형 알루미늄 코일에 각각, 길이 20 mm 의 영역 내에 ϕ 0.35 mm 인 에나멜 코팅 동선을 300 회씩 감아 성형하였다. 이 두 코일은 구동시 전기적인 직렬로 연결되어 작동하게 된다.

2.3 액츄에이터의 모델링

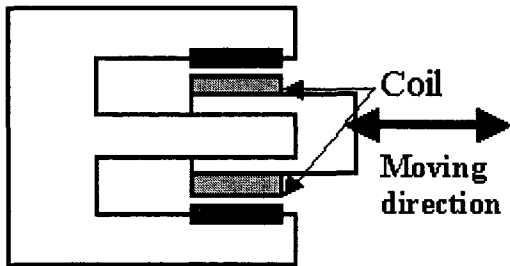


Fig. 3 The dynamic model of voice coil actuator

Fig. 3 에 의거하여 보이스코일 액츄에이터 조립체의 운동방정식을 구하면 다음과 같다.

$$m\ddot{x} + b\dot{x} + kx = F \quad (10)$$

여기서 k , b 는 각각 보이스코일 액츄에이터의 개루프 위치 강성과 댐핑 계수를 나타낸다.

이 식의 우변을 코일에 흐르는 전류의 항인 식 (4)로 나타낼 수 있다. 식 (4) 를 회로방정식으로 정리하여 나타내면 다음과 같다[4].

$$L \frac{di}{dt} + Ri = V - K_b \cdot \ddot{x} \quad (11)$$

$$K_b = N \cdot B \cdot l$$

이 때, L 은 코일의 인덕턴스이다. 식 (10) 과 (11)을 정리하면 다음과 같이 하나의 식으로 나타낼 수 있다.

$$a_1 \cdot \ddot{\ddot{x}} + a_2 \cdot \ddot{x} + a_3 \cdot \dot{x} + a_4 \cdot x = V \quad (12)$$

$$a_1 = \frac{L \cdot m}{K_s}$$

$$a_2 = \frac{L \cdot b}{K_s} + \frac{R \cdot m}{K_s}$$

$$a_3 = \frac{L \cdot k}{K_s} + \frac{R \cdot b}{K_s} + K_s$$

$$a_4 = \frac{R \cdot k}{K_s}$$

위 식에 대한 라플라스 변환을 수행한 후 입력 전압과 변위에 대한 개루프 전달함수를 구하면 다음과 같은 3 차 시스템으로 정리된다.

$$G(s) = \frac{X(s)}{V_r(s)}$$

$$= \frac{1}{a_1 s^3 + a_2 s^2 + a_3 s + a_4} \quad (13)$$

2.4 계수들의 선정

보이스코일 액츄에이터의 질량이나 코일에 가해지는 전압과 같은 값은 측정에 의해 쉽게 구할 수 있지만 코일의 인덕턴스와 영구자석의 자속 밀도는 몇 가지 과정에 거쳐 그 값을 알아낼 수 있다[5].

먼저 자속 밀도 B_m 은 Fig. 4 와 같은 구조하에서 다음과 같은 관계를 갖는다.

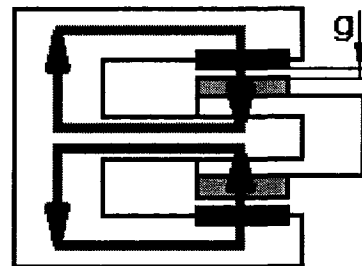


Fig. 4 The flux paths of the permanent magnets

$$B_m = B_r + \mu_r \mu_o H_m \quad (14)$$

H_m : field intensity of magnet
 B_m : flux density of magnet
 B_r : residual flux density
 μ_r : relative permeability of the material
 μ_o : relative permeability of the air

자속의 연속성에 따르면,

$$\Phi = B_m A_m = B_g A_g \quad (15)$$

(14)와 (15) 식을 고려하여 공극에서의 자속 밀도 B_g 를 구하면 다음과 같다.

$$B_g = \frac{B_r}{\left(\frac{A_g}{A_m} + \mu_r \frac{g}{l_m}\right)} \quad (16)$$

영구자석의 자속을 $B_r = 1.2$ [Tesla] 로 가정했을 때, 공극 내에서의 자속 밀도 B_g 는 0.378 [Tesla] 임을 알 수 있다. 자속밀도 측정기인 가우스 메터로 측정한 결과 코일 위치에서 0.32 ~ 0.4 [Tesla] 정도의 자속밀도가 측정되어 계산값과 거의 일치함을 알 수 있었다.

코일의 인덕턴스는 Fig. 5 와 같은 등가 RL 회로에 대하여 다음 식으로부터 구할 수 있다. 우선, 식 (11) 에서 속도 $v = 0$ 으로, 즉, 코일을 일정 위치에 고정된 후 코일에 전류를 흘려주면 다음 식이 성립된다.

$$L \frac{di}{dt} + Ri = V \quad (18)$$

여기서 일정한 전압을 공급해 주면 전류는 다음과 같은 지수함수로 표시된다.

$$i(t) = \frac{V}{R} \left(1 - e^{-\frac{R}{L}t}\right) \quad (19)$$

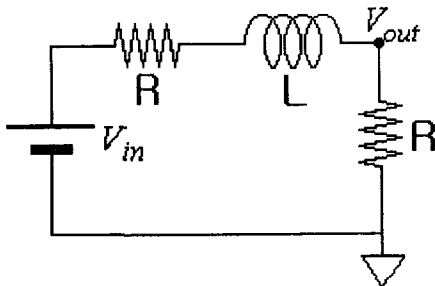


Fig. 5 Equivalent RL circuit for coil

이 특성을 고려하여 코일에 걸린 직렬 저항과 코일의 양단 사이의 전압을 측정하여 전류 값을 얻을 수 있다. 서보 구동기의 스위칭 주파수를 고려하여 인덕턴스 값을 계산한 결과 $L = 0.15$ [mH] 임을 알 수 있었다.

시스템은 LM 가이드의 구름접촉으로 지지되므로 점성감쇠계수는 매우 작다고 가정할 수 있으므로 본 논문에서는 무시하기로 한다. 또한 이 시스템에서 발생하는 와동 전류는 극히 작은 값으로 추정되므로 이 또한 본 논문에서는 무시하기로 한다.

2.5 액츄에이터 모델의 재해석

보이스코일 액츄에이터의 시스템을 구성하는 여러 가지 계수들 중 시스템의 동력학적인 특성에 거의 영향을 끼치지 못하는 인자들인 점성감쇠계수 b 와 액츄에이터의 개루프 위치강성 k 는 매우 작은 값이므로, 이들을 무시하고 시스템의 전달함수를 재구성하면

$$I(s) = \frac{ms^2}{K_b} \cdot X(s) \quad (20)$$

또한, (11) 식으로부터

$$\begin{aligned}
 (Ls + R) \frac{ms^2}{K} X(s) &= E_o(s) - E_s(s) \quad (21) \\
 E_o(s) &= K \cdot s \cdot X(s) \\
 E_s(s) &= K_s \cdot s \cdot X(s)
 \end{aligned}$$

여기서 $E_o(s)$ 는 코일에 인가된 전압이며, $E_s(s)$ 는 코일에서 발생된 역기전력이다. 이에 따라 시스템의 개루프 전달함수는 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$G(s) = \frac{X(s)}{E_o(s)} = \frac{6105 \cdot K}{Lms^3 + mRs^2 + KK_s s} \quad (22)$$

이때, 분자의 상수 6105 는 리니어 스케일의 이득상수이다.

3. PID 제어기 설계

제어기는 일반적으로 주어진 플랜트에 대해 원하는 성능을 얻을 수 있는 제어 시스템으로 설계하는데 그 목적이 있다. 여러 가지 제어 기법이 있지만 본 논문에서는 다루는 시스템은 단일 입출력의 경우 이므로 PID 제어기를 선정하게 되었다. PID 제어기의 기본 구조는 Fig. 6 과 같다.

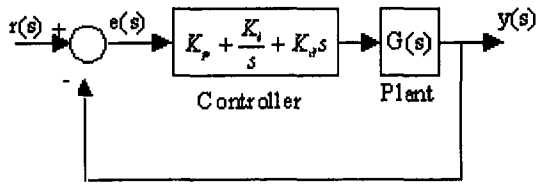


Fig. 6 Block diagram of PID Controller

PID 이득을 구하는 여러 가지 방식 중에 Ziegler-Nichols 조정 방법을 사용하여 제어기의 이득값을 선정하였다. Ziegler-Nichols 조정 방법은 25%의 감쇠비를 기본으로 하여 보상기 변수를 선정하는 방법과 안정한계 (marginally stable) 상태에서 측정된 비레이득과 주기를 이용하여 보상기의 변수를 선정하는 방법이 있다. 우선, 제어시스템을 안정한계에 도달하여 계가 진동을 시작할 때 까지 비례 이득을 증가 시킨다. 그때 비레이득 K_p 를 임계이득 (critical gain) K_c 라고 하고 그때의 진동 주기를 임계주기(critical period) P_c 라고 한다. 이러한 임계이득과 임계 주기로 구성된 PID 제어기는 다음과 같이 정리할 수 있다.

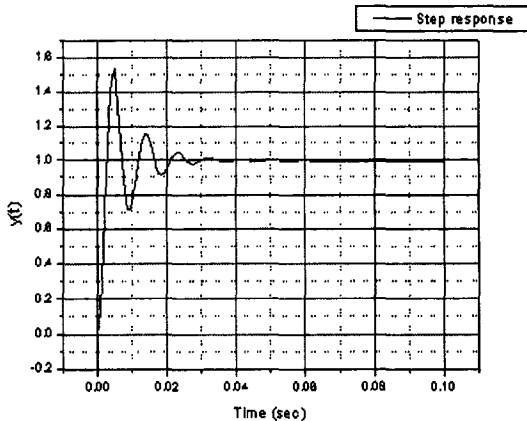


Fig. 7 Step response of the PID controlled voice coil actuator (SIMULINK)

Routh 안정성 판별법을 이용하여 임계 이득값을 찾아낸 결과 $K_c = 0.0507$ 임을 알 수 있었다. 이에 따라, 임계 주기 P_c 는 0.2 (sec) 이 된다. 일반적인 PID 제어기에서 K_p , T_i 및 T_d 와 K_c 및 P_c 사이에는 $K_p = 0.6 K_c$, $T_i = 0.5 P_c$, $T_d = 0.125 P_c$ 의 관계가 주어지므로, $K_p = 0.0376$, $T_i = 0.1$, $T_d =$

0.025 이다. 이를 토대로 PID 제어기의 이득을 계산하면 $K_p = 0.0376$, $K_i = 0.376$, $K_d = 0.00094$ 임을 알 수 있다. 이를 SIMULINK로 단위 스텝 응답에 대하여 검증한 결과가 Fig. 7에 도시되어 있다. 그림에 따르면, 계는 외란인 단위 스텝 입력에 대하여 고유치 $\omega_n = 1.98$ [rad/s], 감쇠계수 $\zeta = 0.01448$ 이며, 응답이 5% 이내로 안정되는 정착시간은 20 ms로 비교적 빠른 응답 특성을 보임을 알 수 있다.

4. 작동성능 검증

보이스코일 액츄에이터를 사용하여 Fig. 8에서와 같이 1축 위치결정 시스템을 구성하였다. 액츄에이터의 제어를 위하여 Motion Engineering, Inc.의 DSP-series 운동제어기를 사용하였고, 제어신호에 대한 코일에 흐르는 전류의 증폭을 위하여 Advanced Motion Controls사의 12A8 Servo Amplifier를 사용하였다. 액츄에이터의 위치를 측정하기 위하여 Heidenhain사의 MSA6703 리니어 스케일을 장착하였다. 운동제어기의 구동을 위한 PID 제어 프로그램은 Boland C로 프로그래밍하였다.

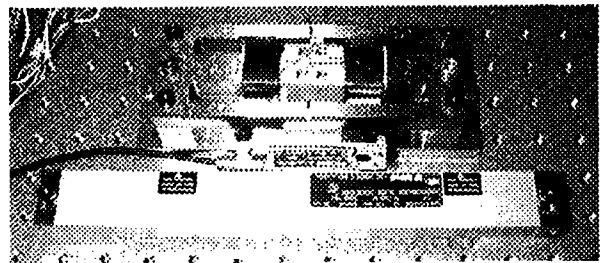
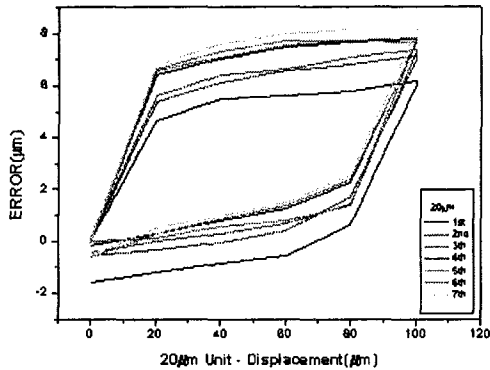


Fig. 8 Linear positioning system with voice coil actuator

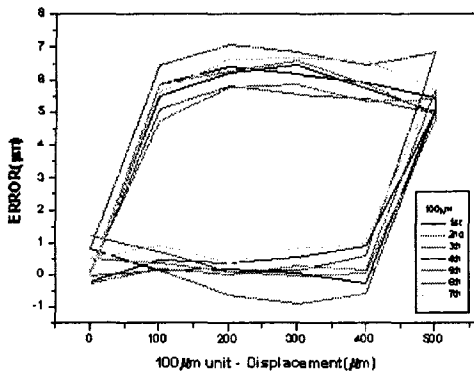
보이스 코일 액츄에이터를 사용한 위치결정 시스템의 직선 이송에 대한 성능을 검증하기 위하여 액츄에이터를 이송 시키면서 Renishaw 레이저 간섭계를 이용하여 각 위치별 위치 정밀도와 반복정밀도를 측정하였다. 이송은 20 μm 과 100 μm 의 2가지 단위의 입력으로 5구간을 단계적으로 이송 시켰다가 다시 복귀시키는 이송운동은 반복적으로 7회씩 수행하면서 위치값을 측정하였다. 측정 결과 각 위치별 위치결정 오차는 Fig. 9에 도시되어 있다.

Fig. 9에 따르면 본 논문에서 개발된 위치결정 시스템은 약 7 μm 내외의 백래시를 가지고 있음을 알 수 있다. 이는 액츄에이터를 지지하고 있는 LM 시스템이 일반적인 4점 지지형이 아닌 2점 지지형 LM 시스템이기 때문에 발생하는 리니어 스케일과의 아베(abwe) 오차임을 예측

할 수 있다. 실제로 리니어 스케일의 측정결과 만으로는 50nm 의 정밀도 범위 내에서 정확히 목표값을 추종하는 것으로 나타난다. 또한 시스템의 반복 정밀도는 약 2 μm 정도 이내에서 안정적으로 작동함을 알 수 있다. 그러므로, 직선이송 시스템의 이송 정밀도를 향상시킨다면 본 연구에서 개발된 액츄에이터 시스템의 위치 결정 정밀도를 더욱 향상시킬 수 있음을 예측할 수 있다.



(a) 20 μm feed, 5 steps and 7 times repeat



(b) 100 μm feed, 5 steps and 7 times repeat

Fig. 9 Repeatability of the linear positioning system with voice coil actuators

5. 결론

본 연구에서는 보이스코일 액츄에이터를 사용한 단거리 고정밀 위치결정 시스템을 구현하였다. 영구자석에 의한 정적인 자기장 내에서 코일에 가해지는 로렌즈력을 선형운동의 동력으로 사용하였으며, 액츄에이터의 직선변위를 측정하기 위하여 리니어 스케일을 설치하였다.

운동 제어를 사용한 디지털 PID 제어 알고리즘을 사용하여 제어 함으로서, 15 mm 스트로크 내에서 반복정밀도 2 μm 의 수준으로 선형 위치결정을 수행할 수 있었다.

6. 참고문헌

1. Susumu Makinouchi, Yutaka Hayashi and Saburo Kamiya, 'New stage system for step-and-repeat scanning stepper,' JSPE, Vol. 61, pp. 1676-1680, 1995
2. Young-bong Bang, Toshiro Higuchi, 'Development of Micro Drilling Machine Using Voice Coil Motor', Journal Japan Soc precision engineering, June, 1998.
3. Young-bong Bang, Toshiro Higuchi, 'Drill Breakage Detection and Measurement of Distance to the Drilling Surface on the Micro Drilling Machine Using Voice Coil Motor', Journal Japan Soc precision engineering, March, 1999.
4. 백형창, '미세구멍 가공용 방전 가공기 개발 및 시험', 공학석사 학위논문, 강원대학교, 1999.
5. 김종식 외 4인, '피드백 제어 시스템', 반도출판사, 1991
6. 이우중, '공기베어링과 Linear DC-Motor 로 이루어진 정밀 직선구동 시스템에 관한 연구', 석사 학위논문, 한국과학기술원, 1995,
7. Gordon R. Slemon, 'Electric machines and drives', Addison-Wesley Publishing Co. Inc., 1992
8. B. Sprenger, 'Planar high speed linear direct drive with submicron precision', Paper for the degree of Doctor of Technical Science, Swiss Federal Institute Technology ETH, Zurich, 1999.