Journal of Institute of Control, Robotics and Systems (2013) 19(1):10-14
http://dx.doi.org/10.5302/J.ICROS.2013.19.1.010 ISSN:1976-5622 eISSN:2233-4335

볼나사 구동 리니어 스테이지의 마그네틱 센서 위치결정 실험

The Position Decision Experiment of Magnetic Sensor in Ball-screw Driven Linear Stage

차 영 엽*
(Young-Youp Cha[1])
[1]Wonkwang University

Abstract: High precision machining technology has become one of the important parts in the development of a precision machine. Such a machine requires high precision positioning as well as high speed on a large workspace. For machining systems having a high precision positioning with a long stroke, it is necessary to examine the repeatability of reference position decision. Though ball-screw driven linear stages equipped linear scale have high precision feed drivers and a long stroke, they have some limitations for reference position decision if they have not equipped the accurate home sensor. This study is performed to experimentally examine the repeatability for home position decision of a magnetic sensor as a home switch of ball-screw driven linear stage by using capacitance probe.

Keywords: magnetic sensor, position decision

I. 서론

위치 제어 시스템은 반도체 공정장비, 공작 기계, 계측기기, 광산업, 가전기기 분야에 널리 쓰이고 있다. 특히 볼나사 구동 스테이지의 경우, 높은 강성과 상대적으로 낮은 가격으로 인해 위치 제어 시스템에 많이 쓰이고 있다. 그러나 볼나사의 비선형성과 위치에 따라 변하는 마찰특성, 구동부의 위치 피드백을 위한 센서 분해능, 홈센서의 정밀도 등으로 인해 위치 정밀도를 높이는데 한계가 있다[1,2]. 이들 대부분의 항목은 많은 연구가 이루어져 왔지만, 볼나사 구동 스테이지의 정밀도 관점에서 홈센서의 정밀도에 관한 연구는 아직 미미한 실정이다.

리미트 센서와 홈센서는 직동과 회전 테이블, 이동장치, 크레인 및 트랜스퍼 장치 등 기구의 이동한계 또는 구동시점 등을 지정하여 신호를 출력하는 스위치 장치이다[3]. 이러한 리미트 센서와 홈센서는 크게 접촉식과 비접촉식으로 구분할 수 있다. 접촉식은 기구의 상한 한계 지정용으로 사용되는 중추식, 상한과 하한 한계 지정과 구동장치 한계 설정용으로 사용되는 워엄 기어식, 그리고 주행장치의 좌우한계와 중앙위치 지정용으로 사용되는 레버식 등이 있고 이를 좁은 의미의 리미트 스위치라고 한다. 비접촉식은 근접센서, 포토 마이크로센서 등이 있다.

비접촉식이 접촉식 보다는 응답속도도 빠르고 지향성도 좋고 먼지가 많은 환경에 영향을 받지 않으며 스위칭 횟수가 무한대이고 수명이 거의 영구적이다. 그러나 단점은 접촉식보다 큰 전류를 낼 수 없고 노이즈에 약하며 온도 영향이 크고 기구장치가 단순하지 않다는 것이다.

근접센서에는 크게 인덕티브(inductive) 센서, 정전용량 센서, 마그네틱(magnetic) 센서 등이 있고 이들을 갭(gap) 센서라고도 한다. 인덕티브 센서는 자성체나 비자성체 금속 검출의 고주파 발진형 센서로 충돌, 마모 혹은 부식성 용액 및 액체 등 위험에 노출되고 높은 견고성을 요구하는 공작기계 혹은 금속 가공 등 응용분야에서 사용된다. 정전용량 센서는 인덕티브 센서와 마찬가지로 측정목표물과 물리적 접촉이 없이 작동되는데 전도성 및 비전도성 물질을 모두 감지할 수 있지만, 보통 플라스틱, 액체, 분말 및 알갱이 모양의 재료를 감지하는데 사용된다. 정전용량 센서의 민감도는 측정목표물체의 재료 특징에 의존한다. 금속, 플라스틱 및 액체의 재료 특성은 정전용량 센서의 감지 범위 및 출력에 영향을 준다. 마그네틱 센서는 영구자석에 코일을 감아 도체에 가까이 가져가면 전압이 발생하는 자기유도작용의 원리를 이용한 것이다[4-6].

본 논문에서는 위치제어 시스템으로 사용되는 볼나사 구동 스테이지의 리미트(limit) 센서와 홈(home) 센서로 많이 사용되는 마그네틱 센서의 위치 정밀도에 대한 것으로, 서브 미크론의 분해능을 가진 커패시티브 프루브(capacitive prove)를 이용한 결과를 보여준다.

II. 마그네틱 센서의 홀효과

1879년 미국의 홀(E. H. Hall)은 자기장내에 놓여 있는 도선에 전류가 흐를 때 도선 속에 작용하는 자기력이 도선 자체에 작용하는 것인지 아니면 단지 도선 내에서 이동하

* 책임저자(Corresponding Author)
논문접수: 2012. 11. 24., 수정: 2012. 12. 7., 채택확정: 2012. 12. 26.
차영엽: 원광대학교 기계자동차공학부, 공업기술개발연구소 연구위원
(ggypcha@wonkwang.ac.kr)
※ 본 논문은 2011학년도 원광대학교 교비지원에 의하여 연구하였음.
※ 본 논문은 2012년 ICROS 전북제주지부 학술대회에서 초안이 발표되었음.

Copyright© ICROS 2013

는 전하에만 작용 하는지를 결정하고자 노력하였다. 그는 자기력은 이동하고 있는 전하에만 작용할 것으로 예상하고 만약 고정된 도체에서 전류가 자기력에 의해 힘을 받는다면 힘을 받는 방향이 도선에 수직하기 때문에 전류는 가장자리로 쏠려서 흐르게 되고 실제로 전류가 흐르는 단면적이 줄어드는 효과가 되기 때문에 저항이 증가할 것을 예상하였다[7].

그러나 실제 실험에서 저항의 증가를 관찰할 수 없었고 대신에 전류가 흐르는 직각방향으로 전위차가 생기는 것을 알아내었다. 이로부터 금속내부에 움직일 수 있는 전하는 바로 전자(자유전자)이고 그 자유전자의 밀도를 계산할 수 있었다. 이를 홀 효과라 하고 오늘날에도 금속이나 반도체에서 전하운반자의 부호와 전하밀도를 측정하는 데에 기여하고 있다. (n형 반도체의 경우와 금속의 경우에는 전자가 전하를 운반하는 역할을 하지만 p형 반도체의 경우 양전하를 띄는 정공(hole)이 전하를 운반하는 역할을 한다는 것을 밝힐 수 있었다).

그림 1은 홀 효과를 보여주고 있다. 두께 d의 반도체나 금속의 박편에 전압이 걸려있어 전류가 흐르고 자기장이 수직으로 지나고 있다. 자기장은 금속의 표면으로부터 나오는 z방향이고, 전류가 흐르는 방향은 x축, 그리고 홀 기전력이 생기는 방향은 y축이다. 이 그림처럼 전류가 네모난 시료의 왼편에서 오른편으로 흐르고 있고 시료에 수직으로 자기장 B가 걸려 있다. 시료 내에 전류로 흐를 수 있는 전하로서 단위체적당 n개의 단위전하가 있다고 하자(단위전하의 전하량 q는 ±1.602 x 10-19Coulomb). 자기장에 의하여 전하는 로렌쯔 힘(Lorentz force)을 받아 아랫방향으로 점점 몰리게 되고 이 때문에 y축 방향으로 형성되는 전기장은 점점 커지게 된다. 이 전기장에 의한 힘과 로렌쯔 힘이 비길 때까지 전하는 아랫방향으로 몰려 평형 상태를 이루게 된다.

시료내부에 전하가 몰림으로서 형성된 y방향으로의 전기장 E_y가 전하 q에 작용하는 힘은

$$F_y = qE_y \tag{1}$$

z방향으로의 자기장 B가 시료내부를 x축 방향으로 속도 v로 움직이는 전하에 작용하는 로렌쯔 힘은

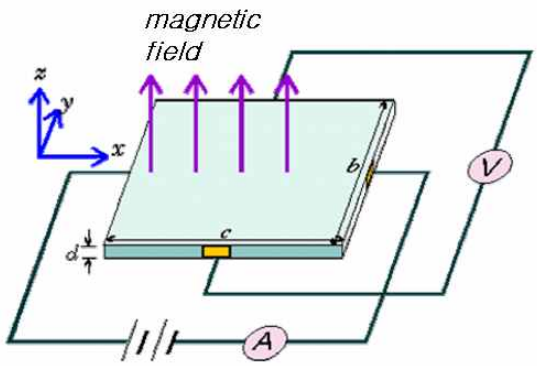


그림 1. 홀 효과.
Fig. 1. Hall effect.

$$F_y = -qvB \tag{2}$$

식 (1)과 식 (2)의 두 힘이 평형을 이루므로

$$qE_y = qvB \tag{3}$$

한편 시료의 두께를 d, 폭을 b 그리고 길이를 c라고 하면 전류 I는 다음과 같다.

$$I = nqvdb \tag{4}$$

전압계에 걸리는 전압 V = E_yb 이므로 측정된 I, B, V로부터 n을 구할 수 있다. 또한 V = vBb 이므로 이를 식 (4)에 대입, v를 소거하여 n을 구하면 다음과 같다.

$$n = \frac{IB}{qdV} \tag{5}$$

여기서 n은 양의 값이어야 하므로, 이로부터 q의 부호를 결정할 수 있으며, V는 시료의 윗면을 기준으로 하여 아래면에 걸리는 전압이다. 식 (5)로부터 홀 계수를 얻을 수 있으며,

$$R_H = \frac{dV}{IB} = \frac{1}{nq} \tag{6}$$

이러한 R_H는 전하운반자의 종류 판별에 이용된다. 한편 홀 소자의 전압강하 V_x를 측정하면 비저항 ρ를 계산한다.

$$\rho = \frac{V_x db}{Ic} \tag{7}$$

비저항의 역수가 전하운반자의 전기전도도 σ이므로 전하운반자의 이동도 μ를 구할 수 있다.

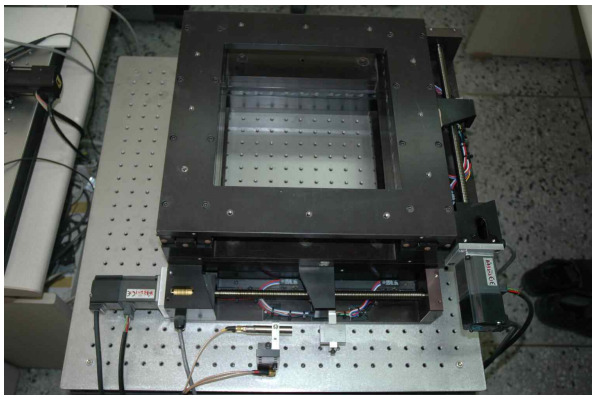
$$\mu = R_H \sigma \tag{8}$$

III. 리니어 스테이지 위치결정 실험

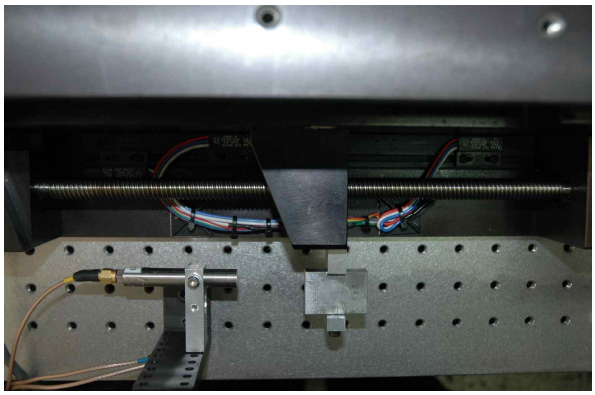
일반적인 볼나사 구동 스테이지는 볼나사 양 끝단에 리미트 센서 2개와 그 사이에 홈센서 1개를 장착한다. 양 끝단에 장착한 리미트 센서는 2가지 역할을 수행한다. 첫째는 스테이지를 초기화할 때 스테이지의 초기위치 즉 홈 위치를 지정하기 위하여 홈 센서의 보조센서로 사용하는 것이고, 두 번째는 스테이지가 이동 중에 기구적인 한계를 벗어나는 경우에 전원을 off시키거나 알람신호를 발생시켜 스테이지의 기구적인 파손을 방지하는 역할을 한다.

볼 나사구동 스테이지의 홈 위치 결정은 이동부와 직결된 볼 너트에 장착된 마그네트가 서보모터에서 가장 멀리 있는 홀 효과를 응용한 리미트 센서까지 이동하고 난 후에 다시 모터 방향으로 빠른 속도로 접근하다가 홈센서 위치에서 정지한 후에 반대방향으로 일정거리만큼 이동한 후 천천히 다시 홈센서로 접근하여 홈센서를 인식하게 되면 그 위치를 홈으로 결정하거나 거기에서 일정거리만큼 떨어진 위치를 홈으로 결정하는 방식이다.

이때 홈센서 쪽으로 2회에 걸쳐서 접근하는 것은 구동모터 반대편의 리미트 센서와 홈센서 사이의 거리가 긴 경우에 홈센서 인식을 위하여 저속으로 이동하는 경우에 스테이지 초기화 시간이 길게 걸리는 단점을 해결하기 위한



(a) 2-axes ball-screw driven stage.



(b) Home and limit switches, and gap sensor.

그림 2. 실험장치.

Fig. 2. Experimental setup.

것으로 초기에는 빠른 속도로 접근하고 두 번째에는 저속으로 홈센서에 접근하여 홈 위치를 정밀하게 인식하기 위함이다.

그림 2(a)는 마그네틱 센서가 부착된 스테이지의 위치결정을 위한 실험에 사용되는 2축 볼나사 구동 스테이지를 보여주고 있다. 실험에 사용되는 볼나사 구동 스테이지는 Parker Hannifin Co.[8]의 315082ATMS-20E-LH로서 테이블 넓이는 가로 세로 모두 375mm, 최대 이동거리는 200mm, 볼나사의 리드는 0.2in이다. 그림 2(b)는 볼나사 구동 스테이지의 실험 장치를 자세히 보여주고 있다. 한 축에 장착된 2개의 리미트 센서로 사용되는 마그네틱 센서가 보여지고 있고, 그 중간에 사진에서는 보이지 않지만 홈 센서로 사용되는 1개의 마그네틱 센서가 장착되어 있다. 마그네틱 센서 구동을 위한 마그네트는 볼나사와 연결된 볼너트 기구에 장착되어 있고(사진에서는 사다리꼴 기구의 아래에 부착) 여기에 갭 센서 구동을 위한 블록이 함께 장착되어 있다.

그림 3은 이러한 스테이지에 부착된 마그네틱 센서로서 Hamlin Co.[9]의 59135-030으로 최대 측정범위는 29.21mm이고 SPDT 근접센서이다. 입력은 마그네틱이고 최대접근전류는 1.5A이고 접근 저항은 0.2ohm, 접근 케퍼시턴스는 0.3pF이다. 그리고 센서 크기는 길이 28.57mm 폭 19.05mm 그리고 높이 6.35 mm이다. 홈센서의 위치결정 정밀도를 실험하기 위한 갭센서는 Mti Instruments [10]의 ASP-20-CTA

그림 3. 홈과 한계 스위치로 사용되는 마그네틱 센서.

Fig. 3. The magnetic sensor which is used in home and limit switches.

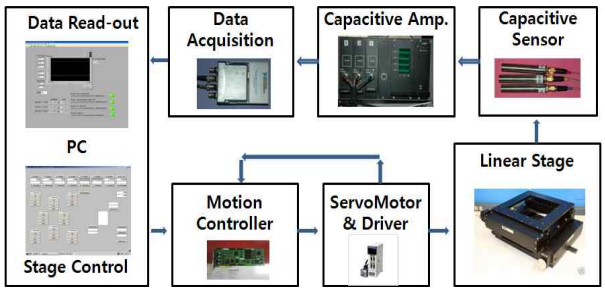


그림 4. 볼 나사 구동 선형 스테이지에서 마그네틱 센서의 위치결정 실험을 위한 신호 흐름도.

Fig. 4. An signal flow for position decision experiment of magnetic sensor in ball-screw driven linear stage.

Capacitance Probe로 측정범위가 0-0.508mm, 분해능은 0.02um이다. 사용된 갭센서 증폭기는 AS-1563-PA Capacitance Amplifier이고, 선형성은 0.05%, 대역폭은 100Hz, 출력은 0-10V, 출력 안정도는 0.002%FS이다.

그림 4는 볼나사 구동 리니어 스테이지의 위치 결정을 위한 신호흐름을 보여주고 있다. 먼저 스테이지 제어용 컴퓨터의 Visual C++로 작성된 스테이지 제어화면에서 이동명령이 주어지면 컴퓨터의 PCI 슬롯에 장착된 삼성로크웰사의 MMC-BDPV81PNA 모션 컨트롤러를 통하여 미쓰비시사의 MR-J2S-10A AC 서보모터 드라이브와 HC-MFS13 AC 서보모터가 동작하고 여기에 플렉시블 커플링으로 연결된 볼나사가 회전운동을 직선운동으로 변환하여 스테이지가 한 축 방향으로 직선 구동된다.

리니어 스테이지의 위치결정 실험을 위하여 볼너트에 함께 장착된 블록과 capacitive sensor 사이의 간극에 해당하는 전압이 capacitive amplifier를 거쳐서 출력신호를 만든다. 이 출력 신호는 National Instrument의 USB-9162 Hi-speed USB carrier와 NI 9215 with BNC 장치를 사용한 데이터 수집장치를 통과하여 Labview를 이용하여 선형화와 캘리브레이션에 의하여 최종 데이터를 얻는다. 그림 5는 스테이지 제어용 컴퓨터의 Visual C++로 작성된 스테이지 제어화면을 보여주고, 그림 6은 Labview를 이용하여 작성한 capacitive sensor의 출력 데이터 획득을 위한 화면을 보여주고 있다.

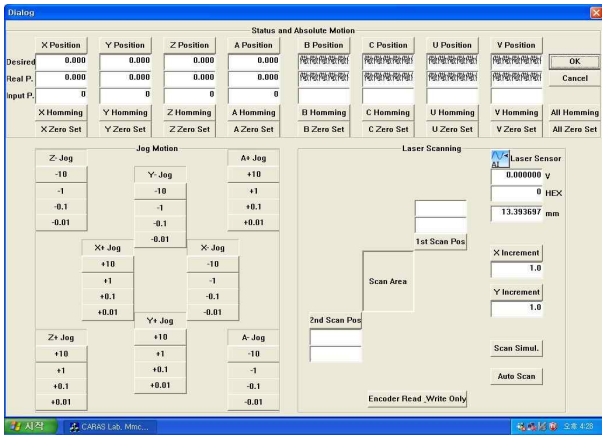


그림 5. 선형 스테이지에서 위치결정 실험을 위한 Visual C++을 사용한 제어 패널.

Fig. 5. Control panel using Visual C++ for position decision experiment in linear stage.

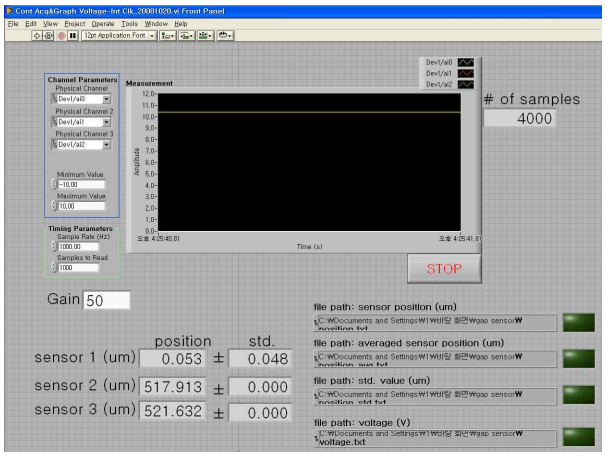


그림 6. 커패시티브 센서로부터 거리측정을 위한 Labview를 사용한 데이터 획득 패널.

Fig. 6. Data acquisition panel using Labview for distance measurement from capacitive sensor.

IV. 실험결과

그림 7은 볼 나사구동 스테이지의 홈 위치 결정에서 capacitance probe에서 획득한 신호를 보여주고 있다. capacitance probe는 홈센서에서 AC구동 서보모터 쪽으로 약간의 간격을 갖도록 설치하였다. 홈 위치결정의 특성상 초기에는 홈센서 쪽으로 빠른 속도로 접근하여 홈센서를 인식하고 정지하면서 그래프의 첫 번째 capacitance probe의 신호가 검출되고, 다시 일정거리만큼 반대방향으로 이동한 후 홈센서 쪽으로 느리게 접근하면서 홈센서를 인식하고 정지하면서 두 번째 신호가 검출된 것이다. 그 후로 홈 위치에서 일정거리만큼 떨어진 곳에 홈 위치가 설정된다. 따라서 두 번째의 홈센서 쪽으로 접근에서 홈센서의 정확한 인식은 볼나사 구동 스테이지의 초기화에서 중요한 인자이다. 첫 번째 신호가 두 번째 신호에 비해 capacitance probe와의 거리가 짧게 된 것은 홈센서에 접근하는 이동속도의 차이에 따른 스테이지의 정지거리 변화 때문으로 보인다.

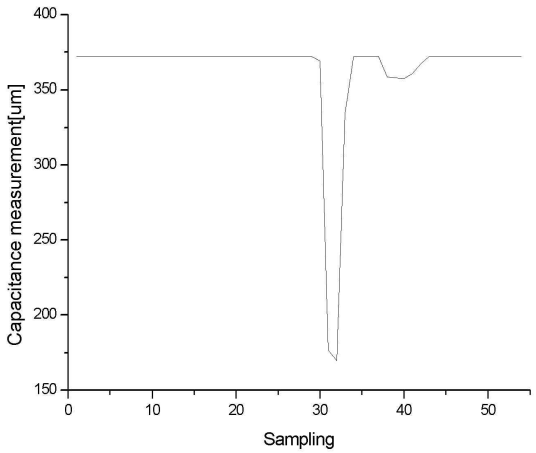
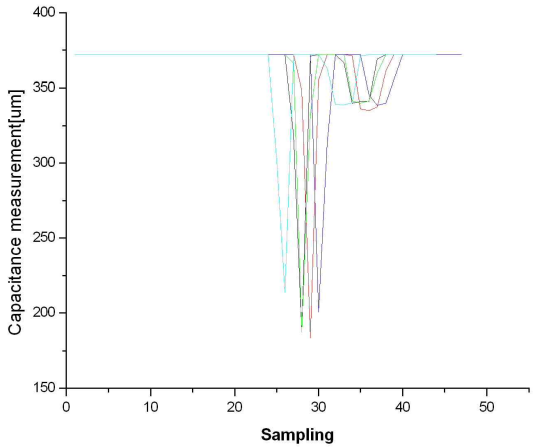
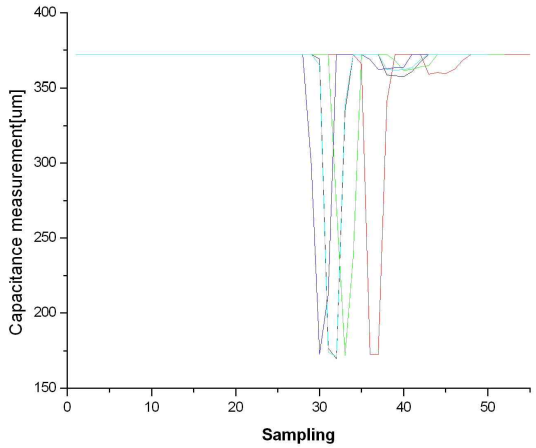


그림 7. 볼 나사 구동 선형 스테이지에서 홈 위치결정의 실험 결과.

Fig. 7. An experimental result of home positioning in ball-screw driven linear stage.



(a) The case without pause at reverse motion for the first approaching.



(b) The case with pause at reverse motion for the first approaching.

그림 8. 볼 나사 구동 선형 스테이지에서 위치결정 실험 결과.

Fig. 8. Experimental results of position decision in ball-screw driven linear stage.

그림 8(a)는 그림 7 과정을 5회 반복한 것을 보여주고 있다. 매 회에서 그래프가 수평방향으로 조금씩 이동하는 것은 데이터를 수집하는 시작위치가 다르기 때문이고, 최종 홈 위치선정에서는 약 ±5 μm의 정밀도를 가지는 것을 알 수 있다. 이 결과에서 보면 빠르게 홈센서 쪽으로 접근하면서 홈센서를 인식한 후에 홈센서 반대방향으로 이동하는 명령 사이에 휴지기가 없기 때문에 정지위치가 매회 다른 것을 알 수 있는데 그 차이가 약 ±14 μm의 정밀도를 가진다.

그림 8(b)는 그림 8(a) 과정에서 빠르게 홈센서 쪽으로 접근하면서 홈센서를 인식한 후에 홈센서 반대방향으로 이동하는 명령 사이에 휴지기가 없기 때문에 정지위치가 매회 다른 것에 착안하여 휴지기를 1sec로 주어진 것을 5회 반복한 것을 보여주고 있다. 매 회에서 그래프가 수평방향으로 조금씩 이동하는 것은 그림 8(a)와 같은 이유이고, 빠르게 홈센서 쪽으로 접근하면서 홈센서를 인식한 후에 다시 홈센서 반대방향으로 이동하는 명령 사이에 휴지기가 있기 때문에 정지위치가 매회 약간의 차이는 있지만 거의 같은 것을 알 수 있다. 최종 홈 위치선정에서는 휴지기를 주지 않은 그림 8(a)와 비교해서 거의 같은 약 ±5 μm의 정밀도를 가지는 것을 알 수 있다.

결과적으로 홈센서 방향으로의 빠른 속도의 1차접근시 휴지기의 유무와 관계없이 홈 위치 선정에는 별 차이가 없다는 것을 알 수 있다. 여기서 볼나사 구동 홈 위치 결정에서 ±5 μm의 정밀도보다 낮은 정도를 얻기 위한 노력은 볼나사 자체의 유격 등의 기구적인 요인과 AC 서보모터의 엔코더 분해능 등의 전자 제어부 영향을 고려하면 불필요한 것으로 보인다.

그림 9는 실험에서 사용된 스테이지를 이용하여 50 μm씩 3회의 증분이동 명령을 주어 이동하도록 한 결과를 보여주고 있다. capacitive probe에서 멀어지는 방향으로 명령을 주었으며 각각의 명령 위치에 도달하기 위하여 진행방향과 반대방향으로 각각 1회씩 오버슈트가 생기는 것을 보여준다.

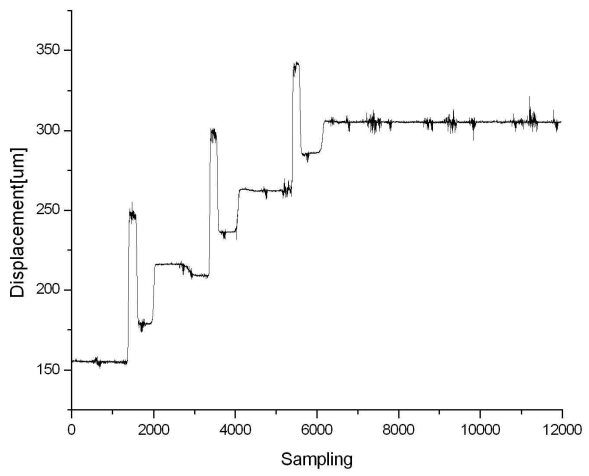


그림 9. 볼 나사 구동 선형 스테이지에서 증분 이동 실험 결과.
Fig. 9. Experimental result of incremental movement in ball-screw driven linear stage.

V. 결론

본 논문에서는 위치제어 시스템으로 사용되는 볼나사 구동 스테이지의 리미트 센서와 홈센서로 많이 사용되는 마그네틱 센서의 위치 정밀도에 대한 것으로, 서브 미크론의 분해능을 가진 capacitive prove를 이용한 실험을 하였고, 최종 홈 위치선정에서는 약 ±5 μm의 정밀도를 가지는 것을 알 수 있었다. 또한 첫 번째 홈센서로 빠르게 접근하는 동작에서 홈센서를 인식했을 때 휴지기를 주지 않는 경우와 주는 경우의 비교에서 홈센서 위치결정에는 큰 차이가 없음을 보여주었다.

참고문헌

[1] J. S. Chen, K. C. Chen, Z. C. Lai, and Y. K, Huang, “Friction characterization and compensation of a linear motor rolling guide stage,” *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, vol. 43, pp. 905-915, 2003.

[2] C. Hsieh and Y. C. Pan, “Dynamic behavior and modeling of the pre-sliding static friction,” *Wear*, vol. 242, pp. 1-17, 2000.

[3] Omron Korea Homepage, http://www.ia.omron.co.kr

[4] “Position sensor and proximity switch update,” *Chilton's I & C S : the industrial and process control magazine*, vol. 57, no. 7, pp. 22-28, 1984.

[5] B. Chen, G. Lu, and R. Hao, “Intelligent speed and mileage measurement system for vehicles based on hall sensor,” *Education Technology and Computer Science, 2009. ETCS '09. First International Workshop*, vol. 2, pp. 272-274, 2009.

[6] Y. Y. Cha, “The position decision experiment of magnetic sensor in ball-screw driven linear stage by using gap sensor,” *2012 ICROS Jeonbuk and Jeju Regional conference (in Korean)*, vol. 1, pp. 175-177, 2012.

[7] E. H. Hall, “On a new action of the magnet on electric currents,” *American Journal of Mathematics*, vol. 2 no. 3, pp. 287-292, 1879.

[8] Parker Hannifin Co. Homepage, http://www.parker.com

[9] Hamlin Co. Homepage, http://www.hamlin.com

[10] Mti Instruments Homepage, http://www.mtiinstruments.com

차 영 엽

1984년 부산대 기계공학과 졸업. 1987년 한국과학기술원 생산공학과 석사. 1995년 한국과학기술원 정밀공학과 박사. 1995년~현재 원광대학교 기계자동차공학부 교수. 관심분야는 로봇과 영상처리.