

선형 브러시리스 DC 모터의 정밀 위치제어에 관한 연구

論 文
50D-9-2

A Study on the Precision Position Control for the Linear BLDC Motor

全瑩煥* · 金志元** · 全鎭洪*** · 全廷佑[§] · 姜道鉉^{§§}
(Yeong-Han Chun · Ji-Won Kim · Jin-Hong Jeon · Jeong-Woo Jeon · Do-Hyun Kang)

Abstract - The brushless DC motor(BLDCM) is widely used in many applications. One of the application of the BLDCM is the stage which is one of process in the semiconductor manufacturing processes. Very high performance is required in the stage process. In this paper, the 1 degree of freedom positioning system for the basic technology of the stage is studied. The linearization method is proposed to make the controller design procedures easy by measuring the thrust force ripple using the strain gauge. And through the experiments, it is proved that the inner velocity control loop is necessary to make more precise positioning control system.

Key Words : BLDCM, Position control, stage process, linearization, thrust force ripple

1. 서 론

산업이 발달함에 따라 단순 반복이나 여러 약조건의 일 등은 인간을 대신하여 기계가 수행하게 되었다. 이에 따라 구동부에는 안정하고 되도록 소형이면서 토크가 상대적으로 큰 전동기가 요구되고 있다. 여러 가지 형태의 전동기 중에서 영구자석형 브러시리스 DC 모터는 제어의 간편성 때문에 고성능을 요구하는 시스템에 많이 사용되고 있다[1]. 다양한 브러시리스 DC 모터의 응용범위 중의 하나로 반도체 제조 공정에 사용되는 stage가 포함된다. 반도체 제조를 위한 공정은 매우 복잡하고 다양한 공정들로 구성되는데, 그 중에서도 미리 준비된 회로의 패턴을 웨이퍼상에 구현하기 위한 lithography 공정은 매우 높은 정밀도를 요구하고 있다[2]. Lithography 공정은 웨이퍼가 놓이게 되는 stage 부분과 필름이 장착되는 reticle 부분으로 구분할 수 있다. 이 중에서 stage 부분은 웨이퍼에 회로 패턴을 기입할 수 있도록 웨이퍼를 미리 지정된 위치로 정밀하게 이송하는 부분으로 x, y, z축의 제어와 각 축에 대한 회전까지 포함하는 6축 제어를 정밀하게 수행할 수 있어야 한다. 그러나 BLDC 모터는 영구자석의 위치에 따라서 자속밀도가 변하고 이에 따라서 추력(thrust force) 리플이 발생하게 된다. 따라서 이러한 추력 리플을 보상하는 것이 BLDC 전동기

의 정확한 제어를 위해서는 필수적이다. 기존의 많은 연구를 통하여 이러한 추력 리플을 보상하는 방법들이 제시되었다 [3,4]. 기존의 연구에서 제시된 추력 리플 보상 방법은 BLDC 전동기의 역기전력을 측정하여 이를 보상하는 방법이나 BLDC 구동 신호의 시퀀스를 조정하여 추력 리플을 보상하는 방법 등이 있다. 본 논문에서는 반도체 제조 공정에 사용되는 stage에 대한 정밀제어의 기반기술로서 1축 선형 브러시리스 DC 모터에 대한 정밀 위치 제어를 수행하기 위하여 모델링에서 비선형적인 요소로 작용하는 추력 리플을 보상하기 위해 스트레인 게이지를 이용하여 모터의 위치에 대한 출력 추력을 측정하고 이를 이용하여 추력 리플을 보상함으로써 제어기 설계시 선형 모델에 대한 설계를 할 수 있도록 하는 방법을 제안하였다. 또한 위치제어 루프 구성시 전류제어 루프의 바깥쪽에 위치제어 루프만을 사용하는 경우와 위치제어 루프 및 속도제어 루프를 동시에 사용하는 경우를 비교하여 위치 및 속도 제어루프를 동시에 사용하는 것이 더욱 정밀한 위치제어를 할 수 있음을 보였다. 본 논문에서는 최종적으로 1[μm]의 해상도를 갖는 증분형 광학 엔코더를 이용하여 5[μm]의 정밀도로 1축 선형 브러시리스 DC 모터의 위치 제어를 수행하였다.

2. BLDC 전동기의 위치제어 시스템

2.1 시스템 구성

반도체 제조 공정용 stage는 6축 시스템이지만 본 논문에서는 1축 제어에 대해서만 다루었다. 본 논문에서 구성한 시스템의 구성도를 그림 2.1에 나타내었다.

* 正 會 員 : 韓國電氣研究院 先任研究員
** 正 會 員 : 韓國電氣研究院 先任研究員
*** 正 會 員 : 韓國電氣研究院 研究員
§ 正 會 員 : 韓國電氣研究院 研究員
§§ 正 會 員 : 韓國電氣研究院 責任研究員
接受日字 : 2001年 7月 14日
最終完了 : 2001年 8月 29日

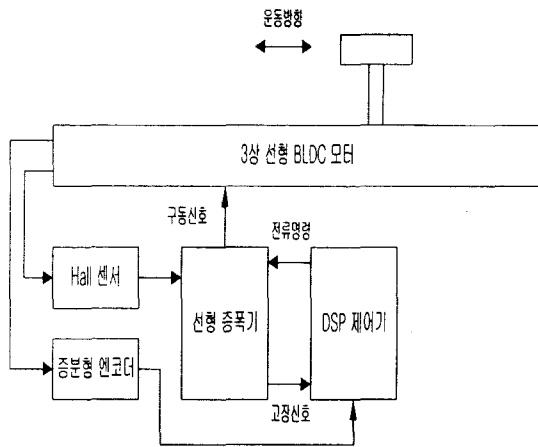


그림 2.1 시스템 구성도

그림 2.1의 구성도에서 직선운동을 하는 3상 선형 브러시리스 모터는 영구자석이 각각 30 [mm] 간격으로 배치되어 있으며, 각 coil은 195 [turn]으로 구성되어 있다. 모터가 움직이는 경우 각 영구자석의 상대위치를 검출하기 위하여 Hall 센서가 설치되어 있고 모터의 위치 및 속도를 검출하기 위한 선형 증분형 엔코더가 설치되어 있다. 선형 증분형 엔코더는 4[μm]의 해상도를 갖는데, 본 논문에서는 이를 4배 배하여 1[μm]의 해상도로 사용하였다. 본 논문에서 사용한 3상 브러시리스 모터의 사양은 표 2.1과 같다.

표 2.1 선형 브러시리스 모터의 사양

파라미터	값
저항[Ω]	12
인덕턴스[mH]	5.81
상호 인덕턴스[mH]	0.285
극수	1
공극[m]	0.001
코일 턴수	195
가동부 질량[kg]	0.93
마찰계수	0.012
영구자석 자속밀도[T]	1.2

다음으로 본 논문에서는 좀더 정밀한 위치제어를 위하여 선형 브러시리스 모터의 드라이버로 PWM 컨버터를 대신하여 선형 증폭기를 사용하였다. 본 논문에서 사용한 선형 증폭기는 AEROTECH 社의 BAL-10-40-B 모델이다. 이 모델은 $\pm 40 V_{DC}$ 의 전압을 출력할 수 있으며, 최대 출력전류는 10A이고 정격 출력 전류는 5A이다. 이 선형 증폭기는 내부에 전류 제어 루프를 포함하고 있으며, 외부와는 25 pin "D" type 커넥터를 통하여 인터페이스 할 수 있다. 본 논문에서 사용한 선형 증폭기의 사양은 표 2.2와 같다.

표 2.2 선형 증폭기의 사양

파라미터	값
출력전압[V_{DC}]	± 40
정격전류[A]	5
최대전류[A]	10
인터페이스 방법	25-pin "D"-type
구동모드	전류제어

DSP 제어기와 선형 증폭기간에는 shutdown 신호와 전류 컴맨드 그리고 고장 신호가 인터페이스 되도록 하였으며, 전류 컴맨드는 DSP 제어기의 DA 컨버터 출력을 사용하였다. DSP 제어기는 주 CPU로 TI 社의 TMS320C32-60 DSP를 사용하였고, 전류 컴맨드 출력을 이용하여 Analog Device 社의 AD667 12-bit DA 컨버터를 사용하였다. 선형 증폭기와 엔코더 신호 수신을 위해서는 8Mhz 대역폭을 갖는 광소자를 적용하였다. 또한 ALTERA 社의 EPM9560RC240-20 EPLD를 사용하여 DSP 제어기 내부 어드레스 디코딩이나 기타 디지털 회로를 구현하였다. 또한 EPLD 내부에는 그림 2.2와 같은 회로를 구현하여 증분형 엔코더로부터 오차없이 정확한 위치 검출을 할 수 있도록 하였다. 그림 2.2의 회로는 증분형 엔코더의 2개의 정방향 신호를 상태로 정의하고 방향이 변화하는 경우의 8가지 패턴에 대해서 항상 오차없이 방향 변화를 검출할 수 있도록 구성된 회로이다.

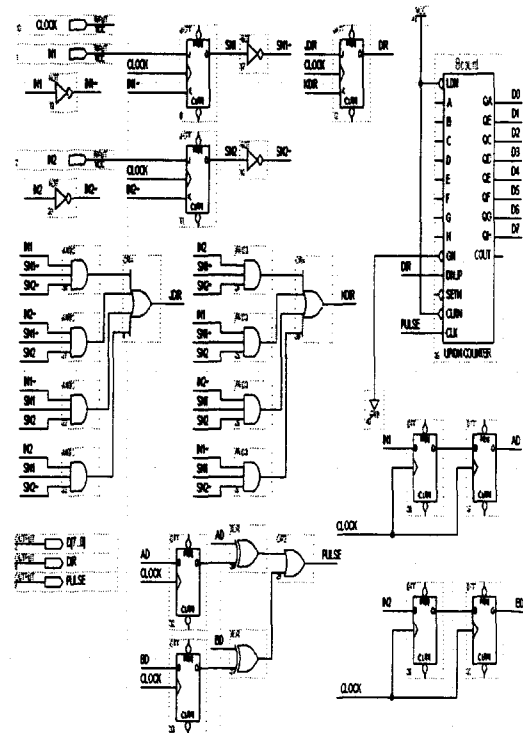


그림 2.2 오차없는 위치검출을 위한 회로

그림 2.3에는 본 논문에서 사용한 실험장치의 사진을 나타내었다.



그림 2.3 실험장치 사진

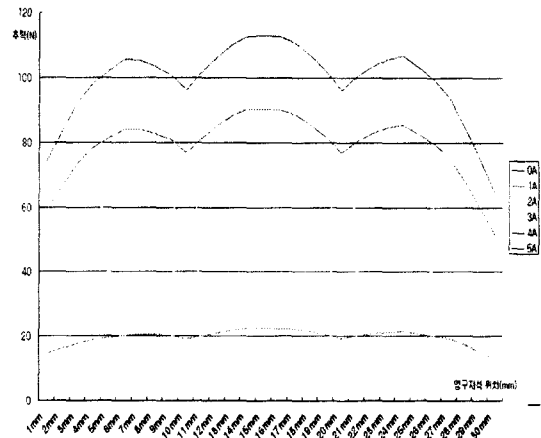


그림 2.5 선형 브러시리스 모터의 전류별 출력 추력

2.2 제어기 설계

일반적으로 브러시리스 모터에서는 회전 또는 직선 운동을 하는 동안 자속밀도(flux density)의 변화로 인하여 추력(thrust force) 리플이 발생한다. 이러한 추력 리플은 브러시리스 모터의 제어에 있어서 비선형성으로 나타나게 되고, 가청 노이즈의 발생원이 되기도 한다[4]. 따라서 브러시리스 모터의 제어에 있어서 이러한 추력 리플을 최대한 보상해주는 것이 중요하다. 본 논문에서는 전류에 따른 선형 브러시리스 모터의 추력 리플을 측정하고 이를 이용하여 추력 리플을 보상하는 알고리즘을 제안하였다. 먼저 본 논문에서 사용한 브러시리스 모터에 대해 그림 2.4과 같이 전압을 인가하여 각 전류 변화에 따른 선형 브러시리스 모터의 추력을 측정하였다.

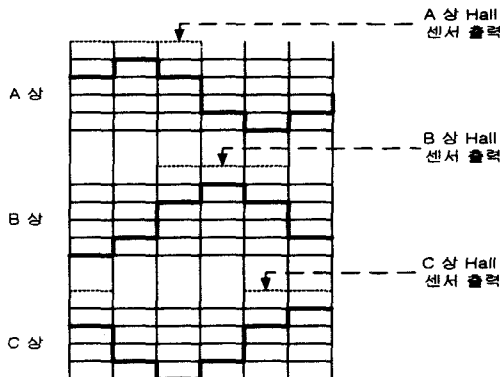


그림 2.4 선형 브러시리스 모터에 인가되는 전압 Sequence

그림 2.4에서 보는바와 같이 각 상이 60°와 120° 사이와 240°와 300°에서 인가되는 전압이 각각 +V와 -V이고 나머지 위치에서는 ±V/2가 되도록 하였다. 이와 같은 방법을 이용하여 얻은 선형 브러시리스 모터의 전류 별 출력 추력은 그림 2.5와 같다.

여기서 각 전류 사이의 구간을 선형화 시켜서 생각하면 그림 2.6과 같이 추력, 각 상의 상대위치 및 전류를 각각 하나의 축으로 하여 공간상에서의 데이터가 존재하는 범위를 얻을 수 있다.

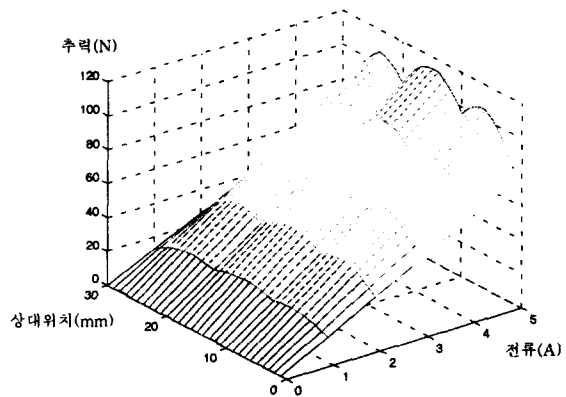


그림 2.6 공간상의 데이터 존재 범위

여기서 간단한 프로그램에 의해 입력된 상대위치로부터 그림 2.5의 table에 존재하는 가장 가까운 양쪽 위치 값을 검출할 수 있고 이를 각각 x_1 과 x_2 라고 한다. 마찬가지로 입력된 추력 킴맨드와 x_1, x_2 로부터 그림 2.5의 table에 존재하는 가장 가까운 힘의 값을 검출할 수 있고 이를 각각 f_1, f_2, f_2, f_2 그리고 f_2 라고 한다. 이것은 결국 추력 킴맨드와 상대위치를 이용하여 그림 2.6내에서 전류가 존재하는 그림 2.7과 같은 하나의 평면을 구한 것이 되고 평면의 네 꼭지점은 각각 $A(x_1, f_1, i_1), B(x_1, f_2, i_1), C(x_2, f_2, i_2)$ 그리고 $D(x_2, f_2, i_2)$ 가 된다.

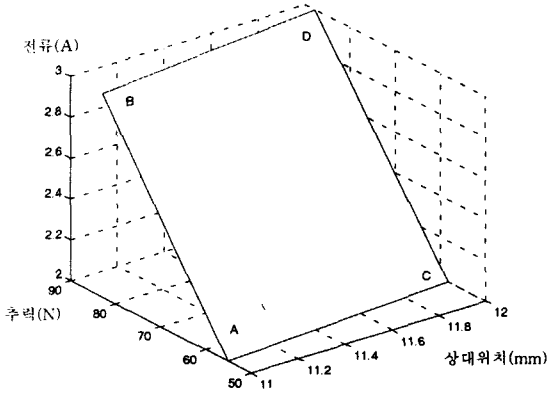


그림 2.7 출력 전류가 존재하는 공간상의 평면

공간상의 평면의 방정식은 평면내의 세 점 A, B, C를 알면 다음과 같이 구할 수 있다. 먼저 A 점을 기준으로 하는 벡터 AB와 벡터 AC는 다음 식과 같다.

$$\text{벡터 AB} : (x_2 - x_1, f_2 - f_1, i_2 - i_1) = (a_1, b_1, c_1)$$

$$\text{벡터 AC} : (x_3 - x_1, f_3 - f_1, i_3 - i_1) = (a_2, b_2, c_2)$$

벡터 AB와 벡터 AC의 외적으로부터 A, B, C 점을 포함하는 평면(A,B,C)에 대한 법선 벡터를 다음 식과 같이 구할 수 있다.

$$\text{평면(A,B,C)에 대한 법선벡터} : \text{AB} \times \text{AC} = n$$

평면의 방정식 공식으로부터 각 축에 대한 계수는 다음과 같이 구할 수 있다.

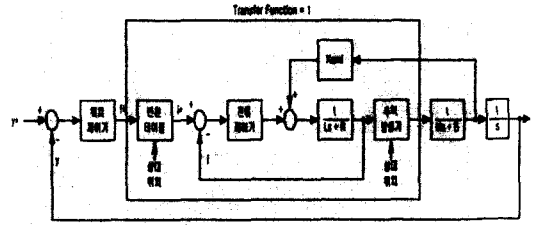
$$O : (b_1 * c_2 - b_2 * c_1, c_1 * a_2 - c_2 * a_1, a_1 * b_2 - a_2 * b_1) = (l, n, m)$$

따라서 평면(A,B,C)의 방정식은, 다음 식과 같이 표시할 수 있으며, 여기서 x_1, f_{11}, i_{11} 은 각각 공간상에서의 A 점의 위치를 나타낸다.

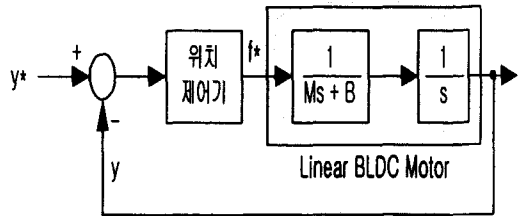
$$l * (x - x_1) + m * (y - f_{11}) + n * (z - i_{11}) = 0$$

따라서 제어루프상에서 추력 커맨드와 각 상의 상대위치를 알 수 있다면 위와 같은 방법으로 구한 평면의 방정식으로부터 추력 리플에 의해 발생하는 비선형 부분을 없앨 수 있도록 하는 전류 커맨드를 구할 수 있다. 따라서 모터 내부의 전기적인 루프를 고려하지 않고 모터의 관성과 마찰계수만을 고려하는 선형시스템에 대하여 제어를 설계하는 것이 가능하다. 본 논문에서는 선형 브러시리스 모터의 위치 제어를 위하여 위치 제어루프만 구성한 경우와 위치제어 루프

와 속도제어 루프를 동시에 구성한 경우에 대해서 실험을 수행하였다. 본 논문에서 구성한 제어루프를 그림 2.8과 2.9에 나타내었다.

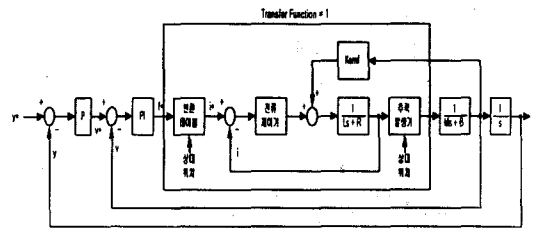


(a) 전체적인 제어루프 구성도

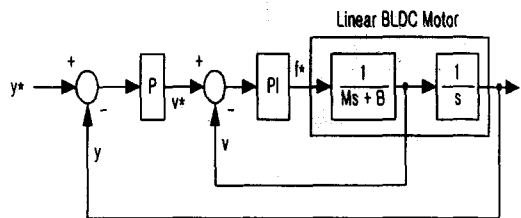


(b) 간략화된 제어루프 구성도

그림 2.8 위치제어 루프만 구성한 경우 제어 블록도



(a) 전체적인 제어루프 구성도



(b) 간략화된 제어루프 구성도

그림 2.9 위치제어 루프와 속도제어 루프를 함께 구성한 경우의 제어 블록도

그림 2.8(a)와 2.9(a)의 제어 블록도에서 전류제어기 부분은 선형 증폭기에서 담당하고 있으며 앞에서 제안한 방법에 의하여 추력 리플을 보상함으로써 가운데의 전기적 부분에 해당되는 전달함수를 1로 가정할 수 있다. 따라서 그림 2.8(b) 및 2.9(b)와 같이 간략한 제어 블록도를 얻을 수 있다.

2.3 실험 결과

2.3.1 위치제어루프만 구성한 경우

위치 제어루프만 구성한 경우 위치 제어기로는 PI 제어기를 이용하였다. 그림 2.8 (b)의 블록도를 이용하여 실험한 결과를 그림 2.10에 나타내었다.

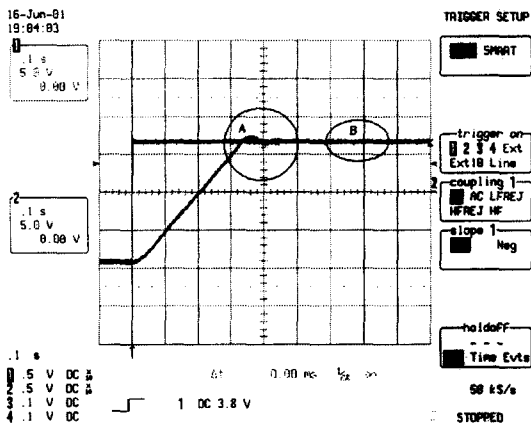


그림 2.10 위치제어 루프만 구성한 경우 위치 제어 결과

그림 2.10의 결과에서 steady-state의 오차를 알아보기 위하여 그림 2.10의 B부분을 확대하여 그림 2.11에 나타내었다.

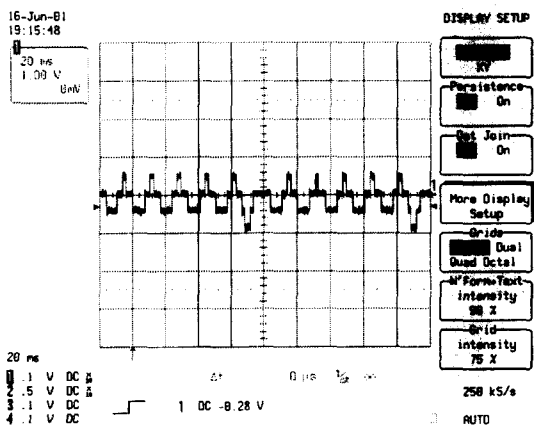


그림 2.11 그림 2.10의 B 부분 확대

그림 2.11에서 보이는 1개의 펄스는 1 [mm]의 오차를 나타낸다. 그림 2.10과 2.11의 결과에서 보듯이 위치제어 루프만을 이용한 경우 확대된 응답에서는 컴맨드를 잘 추종하는 듯이 보이지만 실제적으로는 정상상태에서 약 $\pm 1\sim 3$ [mm] 정도의 오차가 발생하는 것을 알 수 있다.

2.3.2 위치 제어루프와 속도제어 루프를 구성한 경우

여기서는 그림 2.9와 같이 위치 제어 루프와 속도제어 루프를 함께 구성하여 실험을 수행하였다. 여기서 위치 제어기로

는 P 제어기를 이용하였고 속도제어기로는 PI 제어기를 이용하였다. 그림 2.9(b)의 블록도를 이용하여 실험한 결과를 그림 2.12에 나타내었다.

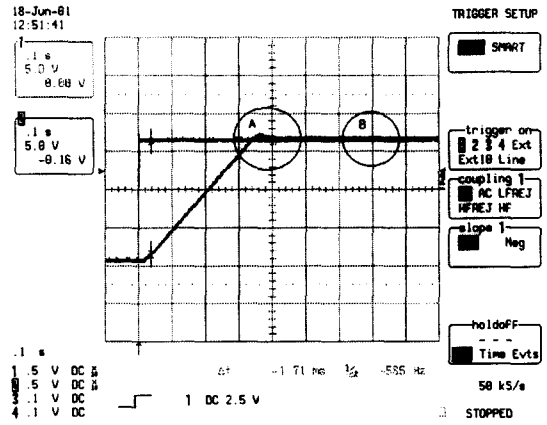


그림 2.12 위치제어 루프와 속도제어 루프를 함께 구성한 경우 위치 제어 결과

여기서도 그림 2.12의 결과에서 정상상태의 오차를 알아보기 위하여 그림 2.12의 B부분을 확대하여 그림 2.13에 나타내었다.

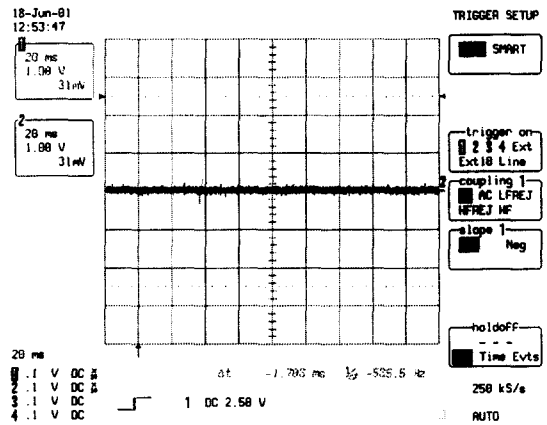


그림 2.13 그림 2.12의 B 부분 확대

그림 2.13에서는 $5[\mu\text{m}]/\text{div}$ 의 해상도로 나타내었는데, 정상상태의 오차가 0인 것을 확인할 수 있었다. 실제적으로 $1[\mu\text{m}]/\text{div}$ 의 해상도로 확인할 경우 약 $\pm 1\sim 3[\mu\text{m}]$ 정도의 오차가 발생하는 것을 확인하였다. 그림 2.11과 2.13에서 보듯이 추력 리플 보상을 수행하고 위치 제어루프와 속도제어 루프를 함께 구성하여 제어하는 것이 훨씬 뛰어난 제어 성능을 보이는 것을 알 수 있었다.

3. 결 론

본 논문에서는 선형 브러시리스 모터의 추력(thrust force)을 전류에 따라 측정하고 이를 바탕으로 공간도형 상에서 평면의 방정식을 유도하여 추력 리플을 보상하는 알고리즘을 제안하였다. 또한 이를 바탕으로 하여 위치 제어 루

프를 구성하고 실험을 통하여 5[μm] 정밀도의 위치제어 추종 성능을 검증하였다. 본 논문에서는 30 mm 간격의 영구자석에 대하여 1 mm 간격으로 전류에 따른 힘을 측정하고 1 mm 간격사이를 선형화 하여 사용하였는데 이를 좀 더 세밀하게 측정할 수 있다면 좀 더 정확한 추력 리플의 보상이 가능할 것으로 생각된다. 또한 모터의 위치제어를 수행하는 경우 일반적으로 위치 제어 루프만을 구성하여 제어하는 것보다 위치 제어 루프내에 속도 제어 루프를 추가하여 제어하는 것이 제어 성능에서 좀 더 우수하다는 것을 알 수 있었다. 본 논문에서는 최대 1[μm]의 해상도를 갖는 엔코더를 사용하였는데 추후 좀 더 해상도가 높은 엔코더를 사용하고 advanced control theory를 적용하여 수십 [nm]급 정밀도를 갖는 stage를 개발할 예정이다.

참 고 문 헌

[1] S. J. Park, H. W. Park, M. H. Lee, F. Harashima, "A New Approach for Minimum-Torque-Ripple Maximum-Efficiency Control of BLDC Motor", IEEE Trans. on IE, Vol.47, No. 1, FEB, 2000

[2] 전정우, 강도현, 김지원, 전진홍, 전영환, "반도체 제조 장비용 Stage 정밀제어 기술개발", 대한전기학회춘계학술대회 논문집, pp 229-231, 2000

[3] M.F. Rahman, K.S. Low, K.W. Lim, "Approaches to the Control of Torque and Current in a Brushless DC Drive". 6th International Conference on Electrical Machines and Drives, pp.594-599, 1993

[4] PRAGASEN PILLAY, RAMU KRISHNAN, "Modeling, Simulation, and Analysis of Permanent - Magnet Motor Drives, Part II: The Brushless DC Motor Drive", IEEE Transaction on Industry Applications, VOL.25, NO.2, pp.274-279, MARCH/APRIL 1989.

[5] C. T. Choi, K. S. Hong, J. W. Kim, J. S. Kim, "Control of Linear Motor Machine Tool Feed Drives for End Milling:Robust MIMO Approach", KSME International Journal, Vol. 13, No. 10, pp 727-737, 1999

[6] 고종선, 조광열, 윤명중, "외란에 둔감한 브러쉬없는 직류 전동기(BLDC Motor)의 디지털 위치제어", 전기학회논문지, 39권, 1호, 1990년 1월

[7] 전자부품연구원, "Punching Machine용 리니어 모터의 자기회로 해석 및 설계 파라미터 추출", 공업기반기술 개발사업 최종보고서, pp. 60-75, 1999년 8월

[8] 황주호, 최대봉, 이후상, 김중천, "리니어모터 이송계의 고속 위치결정", 한국정밀공학회 춘계학술대회논문집, pp 341-345, 1999

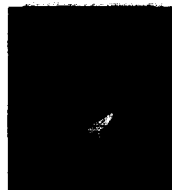
저 자 소 개



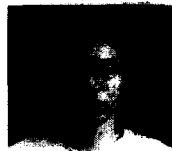
전 영 환 (全 瑩 煥)
 1961년 2월 8일 생. 1983년 서울대 전기공학과 졸업. 1985년 동 대학원 전기공학과 졸업(석사). 1996년 동경대 대학원 공학부 졸업(공학). 1986년 한국전기연구소 입소. 1996년~1998년 동경대 공학부 조수. 현재 한국전기연구원 FACTS & PQ 연구그룹 그룹장(선임연구원).
 Tel : 055-280-1312, Fax : 055-280-1390
 E-mail : yhchun@keri.re.kr



김 지원 (金 志 元)
 1971년 9월 20일 생. 1994년 서울시립대 제어계측공학과 졸업. 1996년 광운대 대학원 제어계측공학과 졸업(석사). 1996년 2월 한국전기연구소 입소, 현재 한국전기연구원 FACTS & PQ 연구그룹 선임연구원
 Tel : 055-280-1335, Fax : 055-280-1390
 E-mail : jwkim@keri.re.kr



전 진 홍 (全 鎭 洪)
 1972년 12월 16일 생. 1995년 성균관대 전기공학과 졸업. 1997년 동 대학원 전기공학과 졸업(석사). 1997년 한국전기연구소 입소. 현재 한국전기연구원 FACTS & PQ 연구그룹 연구원
 Tel : 055-280-1355, Fax : 055-280-1390
 E-mail : jhjeon@keri.re.kr



전 정 우 (全 廷 佑)
 1971년 11월 27일 생. 1994년 영남대 전기공학과 졸업. 1996년 동 대학원 전기공학과 졸업(석사). 1996년 9월 한국전기연구소 입소, 현재 한국전기연구원 Mechatronics 연구그룹 연구원
 Tel : 055-280-1542, Fax : 055-280-1547
 E-mail : jwjeon@keri.re.kr



강 도 현 (姜 道 鉉)
 1958년 9월 21일 생. 1981년 한양대 전기공학과 졸업. 1989년 동 대학원 전기공학과 졸업(석사). 1996년 Braunschweig 대학 전기공학과 졸업(공학). 1981~1987년 현대건설 근무. 1989년 한국전기연구소 입소. 현재 한국전기연구원 Mechatronics 연구그룹 그룹장(책임연구원).
 Tel : 055-280-1480, Fax : 055-280-1547
 E-mail : dhakng@keri.re.kr