

횡자속 선형전동기 구동을 위한 자기센서를 이용한 선형위치 검출

논 문
59-3-12

Linear Position Detection using Magnetic Sensors for Transverse Flux Linear Motor Drive

김 지 원* · 원 진 국* · 이 지 영* · 강 도 현* · 김 장 목** · 장 정 환†
(Ji-Won Kim · Jin-Kuk Won · Ji-Young Lee · Do-Hyun Kang · Jang-Mok Kim · Jung-Hwan Chang)

Abstract - In this paper, a low cost magnetic position sensor for linear position detection is proposed. The proposed magnetic sensor can be applied to the linear motor which has stator with periodical teeth, such as transverse flux linear motor(TFLM). Sine and cosine waves can be generated from the unit sensor module as the linear motor moves, and the outputs can be converted to the position data by interpolation IC. To reduce the speed ripple caused by the position error, the Luenberg observer is introduced. The validity of the proposed magnetic position sensor is verified by experiment with a 750N three-phase TFLM.

Key Words : Magnetic Sensor, Transverse Flux Motor, Observer, Position Sensor

1. 서 론

최근 들어, 자동이송 시스템이나 공정장비 등의 공장자동화 시스템에서 선형 위치를 제어하기 위해 사용되었던 기어와 결합된 회전형 전동기가 백래쉬나 부피 증가 등의 단점을 보완하기 위하여 선형 전동기로 대체되는 추세에 있다. 선형전동기를 적용할 경우 주요한 장점은 기어와 결합된 회전기를 사용하는 시스템에 비해 고속 및 고정밀 시스템 구현이 가능하다는 것이다. 하지만 비용의 상승이 큰 단점으로 지적되고 있다. 비용이 증가하는 이유는 선형전동기 자체가 회전기에 비해 비싸다는 점도 있지만 또 다른 큰 이유 중 하나는 위치 검출을 위한 선형 엔코더의 가격이 비싸다는 점을 들 수 있다. 선형전동기의 이동거리가 길어질수록 선형 엔코더의 가격이 증가하여 전체 시스템 비용을 상승시키게 된다. LCD 제조 공장의 경우 이동거리가 수 km에 달하는 시스템이 존재하고 이러한 시스템에 선형 엔코더를 적용할 경우 상당한 시스템 비용의 상승을 초래하게 된다. 따라서 비용면에서 유리하고 선형전동기의 이동거리와 비용이 비례하지 않는 새로운 위치 검출 센서의 필요성이 대두되고 있다.

선형전동기의 종류는 일정자계를 형성하는 계자의 형태에 따라 선형 영구자석 동기 전동기, 선형 유도전동기 그리고 특수 선형전동기 등으로 구분할 수 있다. 선형 영구자석 동기 전동기의 경우 우수한 동적 성능을 나타내고 있지만 고

정자와 이동자에 각각 계자인 영구자석 또는 전기자인 상권선을 배치해야 하기 때문에 이동거리가 길어짐에 따라 비용의 상승과 유지보수가 힘들어지는 문제점이 있어서 장거리 이송시스템에 적합하지 않다. 선형 유도전동기의 경우 이동자에 전기자 상권선을 배치하고, 고정자를 도체판으로만 구성하면 비용은 저렴하나 영구자석을 이용한 전동기에 비해 부피가 커지는 단점이 있다. 따라서 이러한 단점들을 보완한 특수 선형전동기의 형태가 고정자는 치-슬롯 구조로만 형성하고 이동자에 계자와 전기자를 모두 구성하는 것이다. 이러한 구조를 가지는 특수 선형전동기는 자속 발생 형태에 따라 종자속 특수전동기와 횡자속 특수 전동기로 나눌 수 있는데, 본 논문에서는 링형태의 간단한 코일을 사용함으로써 이동자를 보다 소형 경량으로 설계할 수 있는 횡자속 특수 전동기를 대상으로 한다(이하 본 논문에서 대상 전동기인 횡자속 특수 전동기는 편의 상 횡자속 선형전동기라 명한다).

본 논문에서는, 횡자속 선형전동기의 이동자가 치 슬롯 구조의 고정자를 따라 이동할 때 사인과 코사인 파형을 발생시키고, 이를 보간 IC를 이용하여 위치 정보로 변환하는 자기센서를 제안한다. 또한 자기센서와 이동자 사이의 공극 변화가 발생하는 경우 이를 보상할 수 있도록 하는 자기센서의 배치방법을 제안하고, 컴퓨터 시뮬레이션과 실험을 통하여 제안한 방법의 유효성을 검증한다.

2. 본 론

2.1 횡자속 선형전동기

2.1.1 횡자속 선형전동기 개요

횡자속 전동기는 21세기 초반에 독일 Braunschweig 대학

* 정 회 원 : 한국전기연구원 산업전기연구단
** 정 회 원 : 부산대학교 전기공학과 부교수
† 교신저자, 정회원 : 동아대학교 전기공학과 조교수
E-mail : cjhwan@dau.ac.kr
접수일자 : 2010년 1월 7일
최종완료 : 2010년 2월 19일

의 Web 교수에 의해 본격적으로 연구되었다. 횡자속 전동기의 주요한 장점은 출력밀도가 다른 전동기에 비해 크다는 점인데, 각 상이 독립되어 있고 링 형태의 권선을 사용하여 자기적 특성에 불필요한 엔드코일 부분이 없으므로 분포권이나 집중권을 사용하는 종자속 기기에 비해 동일 출력당 부피를 줄일 수 있다. 따라서 전동기의 무게 제한이 중요한 요구조건이 되는 응용분야에서는 매우 유용한 전동기가 될 수 있다. 종자속 기기에서와 같이 횡자속 기기에서도 자기적 구동원리에 의해 릴럭턴스 전동기, 유도기, 영구자석 여자 동기 전동기 등으로 분류가 된다. 이 중 힘 밀도를 가장 높일 수 있는 것은 영구자석 여자 동기 전동기 형태이다. 영구자석을 사용하는 형태 중에서도 이동자에 계자와 전기자를 모두 구성한 특수 선형전동기 형태가 비용적인 측면에서 장거리 이송에 가장 적합한데, 그림 1은 이러한 형태로 한국전기연구원에서 개발하고 있는 횡자속 선형전동기를 보여주고 있다. 이 그림은 고정자와 1상의 이동자 구조를 나타내고 있는데, 이동자는 전기자 권선, 영구자석 및 코어로 구성되며, 하나의 영구자석과 코어가 한 극 간격을 구성하게 된다. 전류는 이동자의 이동방향과 같은 방향으로 흐르게 되며, 이때 자속의 방향은 이동 방향과 수직이 된다. 이러한 형태의 전동기는 추력 발생에 있어서 한 주기당 2개의 dead point가 존재하게 되며, 최소 2개 이상의 상이 존재해야 완벽한 동작을 수행할 수 있게 된다.

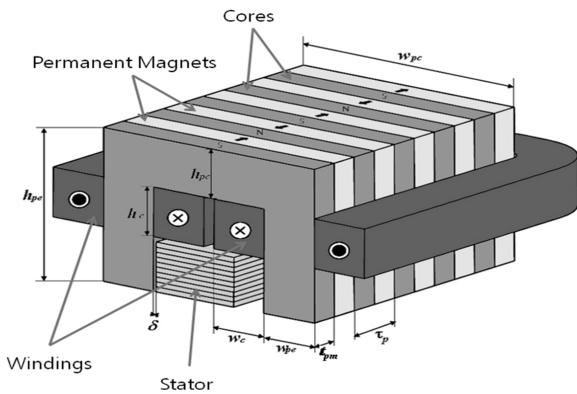


그림 1 한상의 횡자속 선형전동기 이동자 구조
Fig. 1 Mover structure of one phase transverse flux linear motor

2.1.2 횡자속 선형전동기의 고정자 형태

그림 2에서는 그림 1의 횡자속 선형전동기의 고정자 구조를 자세히 보여주주고 있다. $2\tau_p$ 의 주기적인 치 슬롯 구조를 가지고 있는데, 이동자 부분에서 계자에 해당하는 영구자석과 전기자에 해당하는 상권선을 모두 가지고 있으므로 고정자는 코어로만 구성될 수 있다.

본 논문에서 제안하는 자기센서를 이용하여 그림 2의 한 주기에 대해 주기적으로 사인과 코사인 파형을 얻을 수 있으며, 위치 정보는 두 파형 비율의 arc-tan 계산에 의해 얻을 수 있다.

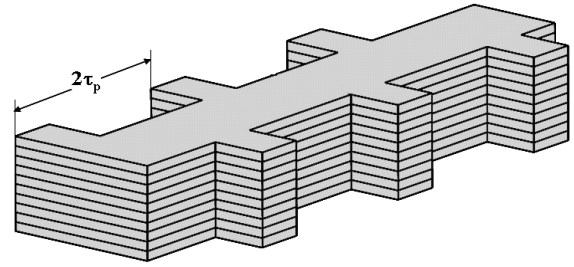


그림 2 횡자속 선형전동기 고정자 구조
Fig. 2 Stator structure of transverse flux linear motor

2.2 자기 위치 센서

2.2.1 단위센서 모듈

그림 3에서 본 논문에서 제안한 단위 센서 모듈을 나타낸다. 그림 3에서 보듯이 단위 센서 모듈은 영구자석, 코어 및 선형 홀 센서로 구성된다. 이 센서 모듈은 그림 4에서 나타낸 바와 같이 전동기 고정자의 치를 바라보도록 설치되어, 이동자가 움직임에 따라 같이 움직이며, 사인과 코사인 파형을 발생하게 된다. 그림 4에서 보듯이, 두 개의 센서를 전기적으로 90도 만큼 떨어지도록, 즉 기계적으로 $2\tau_p \cdot n + 0.5\tau_p$ 가 되도록 설치하면 이동자의 이동에 따라 사인과 코사인 파형을 얻을 수 있다. 그림 3의 단위 센서 모듈에서 철심 코어를 적용하여 왜곡이 비교적 작은 정현 파형을 얻을 수 있다.

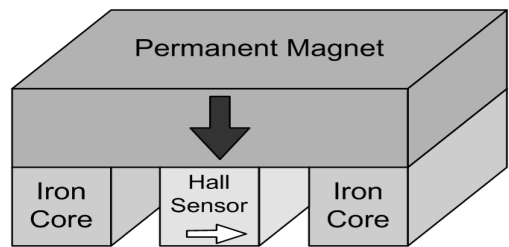


그림 3 단위 센서 모듈의 구조
Fig. 3 Structure of unit sensor module

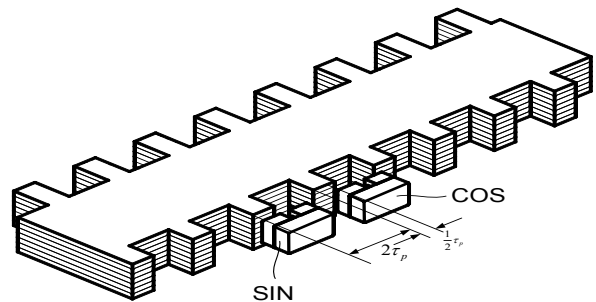
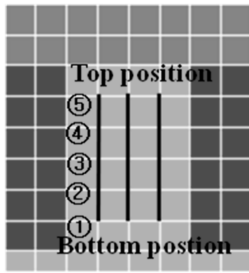
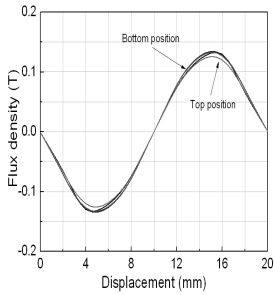


그림 4 두 개의 단위센서 모듈의 기본 배치 방법
Fig. 4 Basic arrangement method of two unit sensor modules



(a) 홀 센서 위치



(b) 자속 밀도 출력

그림 5 홀센서 위치에 따른 단위센서 모듈의 자속밀도 출력
Fig. 5 Flux density of unit sensor module with the position of hall sensor

그림 5에서는 선형 홀센서의 설치 위치에 따른 출력 파형의 왜곡율을 분석하기 위하여 홀 센서의 설치 위치와 그에 따른 1주기 출력 파형을 나타내었다. 그림 5에서의 결과를 FFT를 이용하여 total harmonic distortion(THD)을 구해보면, 그림 5의 (a)에서 위치 ⑤에 홀 센서가 위치하는 경우 THD는 3.1%로 가장 양호한 것으로 나타났다.

2.2.2 제안된 단위센서 모듈 배치 방법

그림 6에 본 논문에서 제안하는 단위 센서 모듈의 배치도를 나타내었다. 사인과 코사인 파형을 얻기 위해 고정자 양쪽에서 사인과 코사인 파형을 얻을 수 있도록 4개의 단위 센서 모듈을 사용한다. 서로 마주보는 센서의 출력은 180도의 위상차를 갖도록 설치한다. 이와 같이 배치된 구조에서는 전동기 이동자가 이동하면서 공극 변화가 발생하는 경우에도 적절한 연산을 통하여 항상 일정한 크기의 파형을 얻을 수 있게 되며, 단위 센서 모듈 제작상에서 발생할 수 있는 센서 출력의 오프셋을 제거할 수 있게 된다.

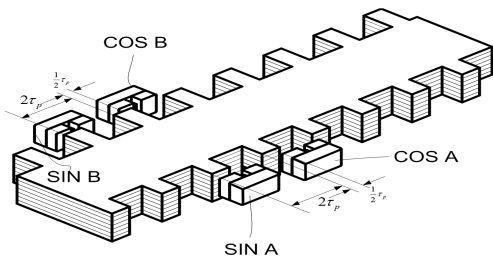


그림 6 제안된 4개 단위센서 모듈의 배치 방법
Fig. 6 Proposed arrangement method for 4 unit sensor modules

그림 7에 위에서 설명한 바와 같은 기능을 할 수 있는 OP-AMP로 구성된 회로를 나타내었다. 그림 7의 회로는 서로 180도의 위상차를 갖는 두 파형을 입력으로 하여 두 파형의 평균 크기의 단일 파형을 출력하는 기능을 하며, 두 파형에 동일한 오프셋이 존재하는 경우 이를 제거할 수 있는 기능을 한다. 예를 들어, 그림 6에서 SIN A와 SIN B를 각각 식 (1)과 (2)로 가정한다.

$$\text{SIN A} = A_1\sin(\omega t) + V_{\text{off}} \quad (1)$$

$$\text{SIN B} = A_2\sin(\omega t + \pi) + V_{\text{off}} \quad (2)$$

식(1)과 식 (2)의 차를 구하면, 오프셋은 제거되고 식 (3)을 얻을 수 있다.

$$\begin{aligned} \text{SIN A} - \text{SIN B} &= A_1\sin(\omega t) - A_2\sin(\omega t + \pi) \\ &= (A_1 + A_2)\sin(\omega t) \end{aligned} \quad (3)$$

식(3)을 2로 나누면, SIN A와 SIN B 크기의 평균값을 가지고 오프셋이 제거된 파형을 얻을 수 있다. 그림 6과 같은 배치 구조와 그림 7의 회로의 타당성을 검증하기 위하여, 그림 8과 같은 고정자 구조에 대해서 실험을 수행하였다. 그림 8에서는 일정한 길이를 갖는 고정자 모듈을 연결하는 경우 기계적 오차에 의해 공극이 0.5mm정도 변하게 되는 상황을 모의하였다.

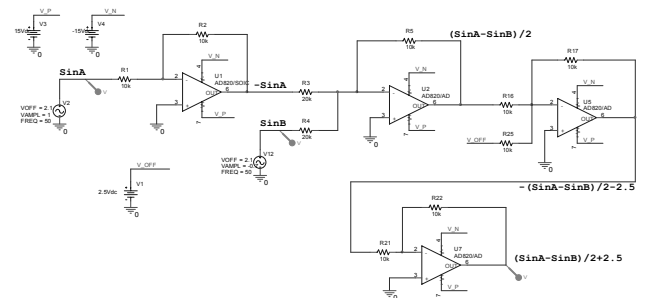


그림 7 평균값 및 오프셋 보상을 위한 회로
Fig. 7 Circuit for average value and offset compensation

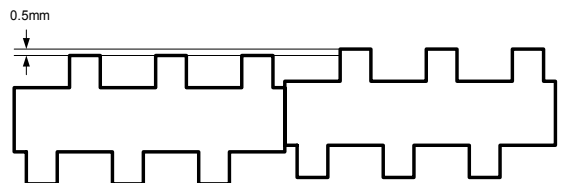
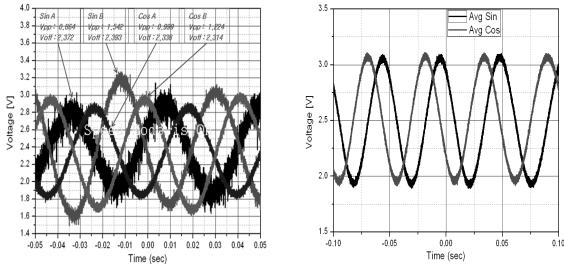


그림 8 기계적 오차를 갖는 연결된 고정자 모듈
Fig. 8 Connected stator modules with mechanical error

이렇게 되면 센서 모듈이 고정자 연결 부위를 지나는 경우 출력 파형의 크기가 변화하게 되고, 그림 7의 회로를 통하여 일정한 크기의 파형을 얻을 수 있음을 그림 9에 나타내었다. 그림 (9)의 (a)는 센서 모듈이 고정자 연결부위를 지나면서 파형의 크기가 변하는 부분을 나타내었고, 그림 9의 (b)에서는 이러한 파형을 입력으로 한 그림 7 회로의 출

력을 나타내었다. 그림 9에서 보듯이 공극 변화에 의해 센서 모듈의 출력 크기가 변화하는 경우에도 거의 일정한 크기의 최종 파형을 출력하는 것을 알 수 있다.



(a) 단위 모듈 센서 출력 파형 (b) 보상 처리 후 사인 및 코사인파형

그림 9 단위모듈 센서 출력 및 보상 파형
Fig. 9 Output of unit sensor modules and compensated waveform

2.2.3 보간 IC

앞에서의 사인과 코사인 신호를 AD 변환하여 마이크로 프로세서에서 알고리즘적으로 처리할 수 있지만, 본 논문에서는 상용 IC를 사용하였다. 본 논문에서 사용한 IC는 ICHAUS사의 IC-NQ로 그림 10에서 나타낸 바와 같이 사인과 코사인 파형을 입력으로 하여 위치 정보를 증분 펄스 (incremental pulse) 형태로 출력 하는 기능을 한다.

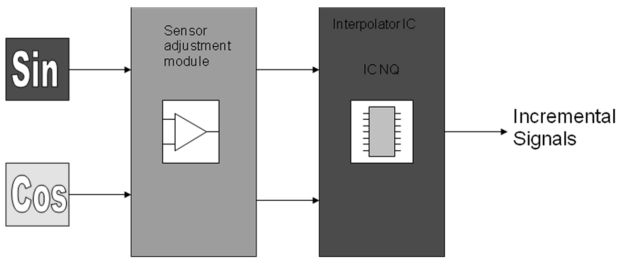


그림 10 IC-NQ의 기능
Fig. 10 Function of IC-NQ

그림 11에는 IC-NQ의 내부 구성을 나타내었다. IC-NQ는 내부적으로 입력되는 사인과 코사인 파형에 대해 오프셋과 위상차를 조정할 수 있는 모듈을 포함하고 있으며, 입력되는 한주기 사인파형에 대해 최대 8192 등분을 할 수 있는 높은 해상도를 갖는다. IC-NQ의 출력 방식은 BiSS이나 SSI와 같은 통신 방법이 가능하고 증분형 펄스 출력도 가능하다. 본 논문에서는 증분 펄스 출력 방식을 사용하였다. 내부 파형 조정 모듈을 이용하여 최종적으로 만들어낸 사인 및 코사인 파형과 이를 이용한 리사쥬(Lissajous) 파형을 그림 12에 나타내었다.

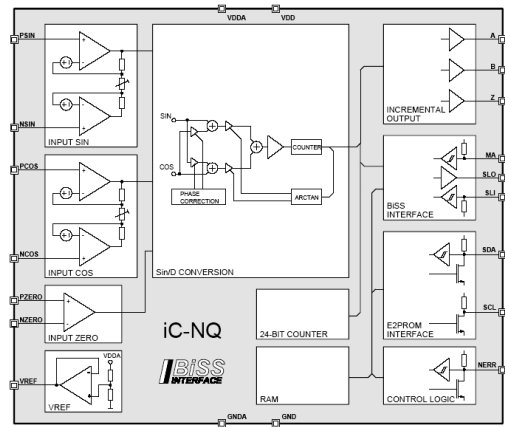


그림 11 IC-NQ의 내부 구조 블록 다이어그램
Fig. 11 Block diagram of internal structure of IC-NQ

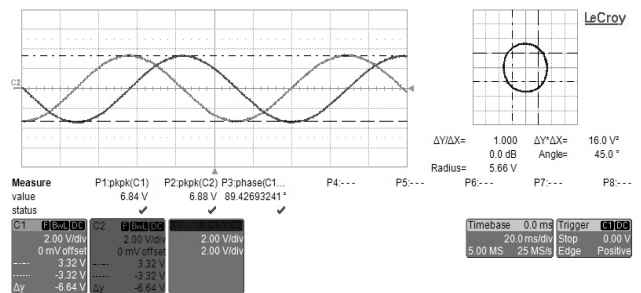


그림 12 최종 조정된 사인 및 코사인 파형과 리사쥬 파형
Fig. 12 Final adjusted sin/cos and Lissajous waveform

2.3 속도 정보 측정을 위한 관측기

앞서 언급한 바와 같이 본 논문에서 제안한 센서 모듈에 의해 출력되는 사인이나 코사인 파형의 THD는 가장 좋은 경우에도 약 3% 이상이 되고 이러한 파형의 왜곡은 위치 정보에서 리플 형태로 나타나게 된다. 전동기 구동 제어를 위해서는 위치 정보로부터 속도 정보를 계산하게 되는데, 위치 정보에서의 작은 리플 성분은 위치 정보의 미분 형태인 속도에서 더욱 증폭되어 나타나게 되고, 이는 전동기 구동에 있어서 악영향을 미치게 된다. 본 논문에서는 이러한 속도 정보에 반영되는 리플 성분을 줄이기 위해서 위치 정보로부터 속도를 계산하는데 있어서 기존의 미분형태가 아닌 reduced order observer를 적용하였다. 그림 13에 observer를 이용하여 속도를 검출하는 시뮬레이션 회로를 나타내었다. 그림 13의 시뮬레이션 회로에서는 임의로 위치 정보에 리플을 부가하고, 기존의 방법에 의한 속도 검출 결과와 observer를 이용한 속도 검출 결과를 비교하였다. 시뮬레이션 결과는 그림 14에 나타내었다. 그림 14의 결과에서 보듯이 위치 정보에 리플 성분이 포함되는 경우 기존의 방법에 의해 검출된 속도는 매우 큰 리플 성분을 포함하고 있으며, observer를 이용한 검출 결과에서는 이러한 리플 성분들이 대부분 제거된 것을 알 수 있다. 그림 14에서 LPF는 저역통과 필터(Low Pass Filter)를 나타내고 있으며, estimated speed는 관측기를 이용하여 얻은 속도 정보를 의미한다.

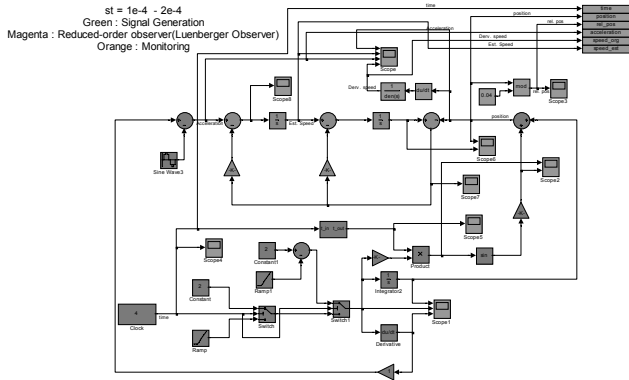


그림 13 속도 계산을 위한 관측기 시뮬레이션 모델
 Fig. 13 Simulation model of observer for speed calculation

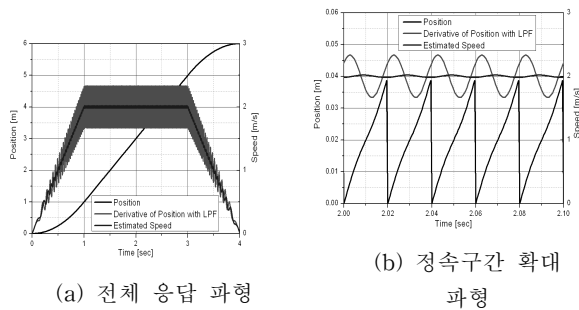


그림 14 속도 계산 시뮬레이션 결과
 Fig. 14 Simulation result of speed calculation

2.4 실험장치 및 결과

그림 15에 본 논문에서 사용한 실험 장치의 사진을 나타내었다.

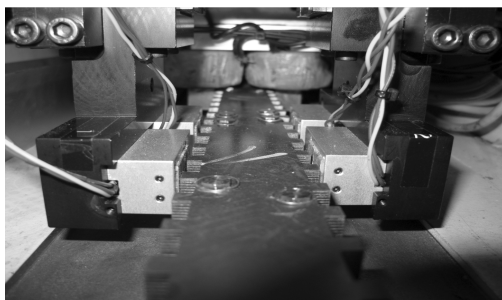


그림 15 실험장치 사진
 Fig. 15 Photograph of experimental setup

그림 15의 실험 장치는 3상으로 구성된 750N급 횡자속 선형전동기(Transverse Flux Linear Motor, TFLM)에 본 논문에서 제안한 센서를 설치한 것이다. 먼저 앞에서 설명한 최종 센서 모듈 출력의 왜곡을 검토하기 위하여, 사인파와 코사인 파형을 FFT 분석을 통해 THD를 검토하였다.

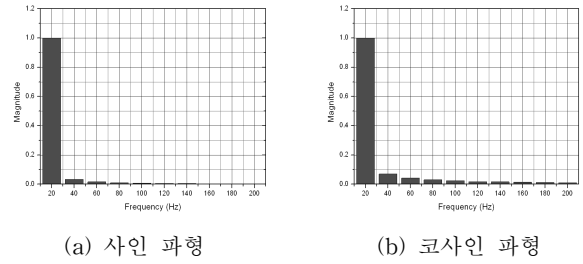


그림 16 사인 및 코사인 파형의 FFT 결과
 Fig. 16 FFT result of sine/cosine waveform

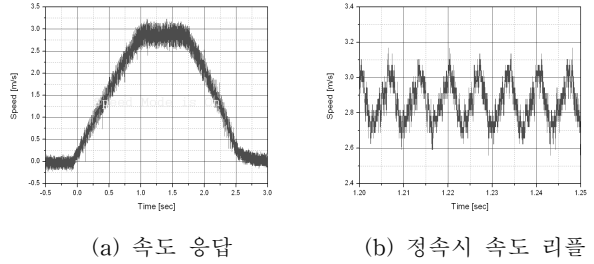


그림 17 자기위치 센서 이용하고 기존 속도 검출 방법을 이용한 실험결과
 Fig. 17 Experimental result with conventional speed calculating method using magnet position sensor

그림 16에 FFT 분석 결과를 나타내었다. FFT 분석 결과는 사인파형의 THD는 약 4.1%이고, 코사인 파형의 THD는 약 9.6%가 되는 것으로 나타났다. 이러한 THD는 해석상으로 기대했던 값보다는 더 큰 값으로, 실제 센서 모듈 제작상의 문제에 기인한 것으로 생각되며, 이러한 THD는 실제 위치 정보에서 오차로 나타날 것으로 생각된다. 그림 17의 (a)에서는 본 논문에서 제시한 센서를 이용하고 기존 위치를 미분하여 속도를 계산하는 방식으로 전동기를 구동한 결과를 나타내었다. 속도 명령은 가속도 $3m/s^2$ 이고, 속도가 $3m/s^2$ 가 되도록 하였다. 그림 17의 (b)에는 정속구간의 속도 리플을 나타내었는데, 이 경우 속도 리플율은 약 13% 정도로 나타났다. 그림 17의 (b)에는 정속구간의 속도 리플을 나타내었는데, 이 경우 속도 리플율은 약 13% 정도로 나타났다. 그림 18에서는 자기센서와 관측기를 이용하여 구한 속도를 나타내었고, 이 경우 속도 리플율은 약 6% 정도가 되는 것으로

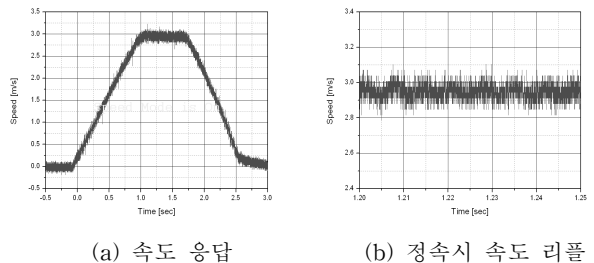


그림 18 자기위치 센서 이용하고 관측기 속도 검출 방법을 이용한 실험결과
 Fig. 18 Experimental result with observer based speed calculating method using magnet position sensor

로 나타났다. 그림 19에서는 자기센서의 특성을 비교하기 위해 리니어 엔코더를 이용하여 구한 속도를 나타내었다. 속도 정보에 있어서 약간의 차이는 존재하지만 리니어 스케일을 이용하여 얻은 정보와 자기센서와 관측기를 이용하여 얻은 정보는 유사한 응답을 나타내는 것을 알 수 있었다.

그림 20의 (a)에서는 단일 고정자 모듈 내에서 반복 운동에 따른 위치 정밀도 측정 결과를 나타내었고, 그림 20의 (b)에서는 고정자 2 모듈간을 이동하는 경우를 나타내었다. 두 가지 경우 모두 $\pm 0.6\text{mm}$ 정도의 오차 범위를 갖는 것으로 나타났다.

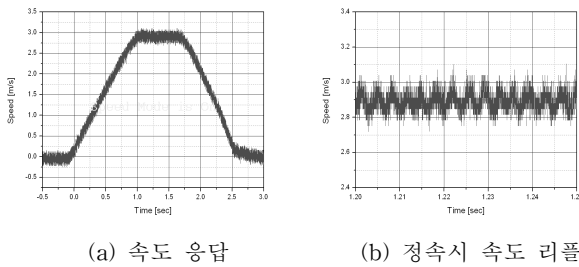


그림 19 선형엔코더 이용하고 기존 속도 검출 방법을 이용한 실험결과

Fig. 19 Experimental result with conventional speed calculating method using linear encoder

그림 20에서는 자기센서를 이용하여 단거리 이동시 반복 정밀도를 측정된 결과를 나타내었다. 리니어 스케일로부터 얻은 위치 정보와 자기센서로부터 얻은 위치 정보를 비교하였다.

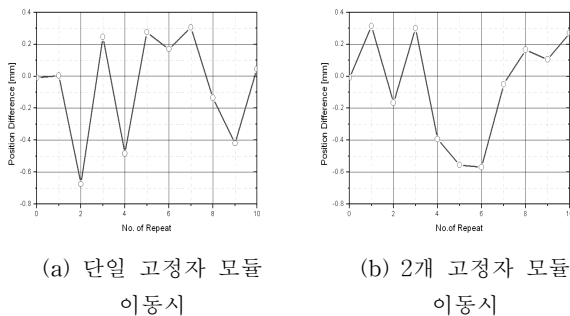


그림 20 단거리 이동시 반복 위치 정밀도 측정 결과

Fig. 20 Test result of repetitive precision for short distance

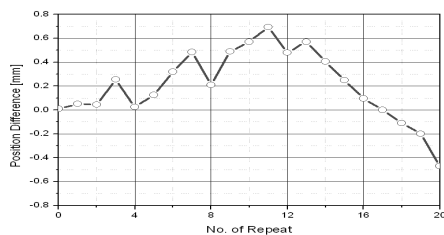


그림 21 장거리 이동시 반복 위치 정밀도 측정 결과

Fig. 21 Test result of repetitive precision for long distance

그림 21에는 장거리 이동시 반복정밀도를 나타내었다. 5m의 거리를 이동 후 리니어 스케일과의 위치정보를 비교하였다. 측정 결과 여러 개의 고정자 모듈을 이동하는 경우에도 반복정밀도는 약 $\pm 0.6\text{mm}$ 정도를 유지하는 것을 확인하였다.

3. 결 론

본 논문에서는 주기적인 치차 구조를 갖는 선형 전동기의 고정자에 대해서 정현파형을 출력하도록 하는 단일 센서 모듈을 제안하고, 적절한 배치 및 연산을 통하여 고정자와 센서 모듈간의 공극 변화 시에도 일정한 크기의 파형을 출력하고, 동일한 크기의 오프셋을 제거하도록 하는 방법을 제안하였다. 이 출력 파형과 상용 보간 IC인 IC-NQ를 이용하여 위치 정보를 검출하도록 하였으며, 이 위치 정보를 이용하여 속도 검출시 리플 저감을 위해 관측기를 구성하였다. 750N급 3상 횡자속 전동기에 이 자기 센서를 적용하고, 리니어 스케일과의 비교를 통하여 실제 전동기 구동에 센서로서의 사용 가능성을 확인하였다. 추후 센서 출력의 THD 저감을 통한 반복위치 정밀도를 보완한다면 좀 더 정밀급의 센서로 사용이 가능할 것으로 생각된다. 이러한 센서의 개발은 선형전동기를 이용한 시스템의 가격을 낮출 수 있어서 선형전동기 사용의 증가를 가져올 것으로 기대된다.

참 고 문 헌

- [1] Dolabdjian, C., Qasimi, A., Cordier, C., "Applied magnetic sensing: a long way", Sensors, 2003. Proceedings of IEEE, Vol.1, 22-24 Oct. 2003, pp 477 - 482
- [2] Asaoka, A., Ueda, S., "An experimental study of a magnetic sensor in an automated highway system", Intelligent Vehicles Symposium, 1996., Proceedings of the 1996 IEEE, 19-20 Sept. 1996, pp 373 - 378
- [3] Mohri, K., "Sensormagnetics", Magnetics in Japan, IEEE Translation Journal on, Vol.7, Issue 8, Aug. 1992, pp 654 - 664
- [4] Lenz, J., Edelstein, S., "Magnetic sensors and their applications", Sensors Journal, IEEE, Vol.6, Issue 3, June 2006, pp 631 - 649
- [5] Chao Hu, Meng, M.Q.-H., Mandal, M., "A Linear Algorithm for Tracing Magnet Position and Orientation by Using Three-Axis Magnetic Sensors", Magnetics, IEEE Transactions on, Vol.43, Issue 12, Dec. 2007, pp 4096 - 4101
- [6] Hua Yang, Gao Jianhua, Wen Xuhui, "The application of magnetic encoders in induction motor vector control", Electrical Machines and Systems, 2003. ICEMS 2003. Sixth International Conference on, Vol.2, 9-11 Nov. 2003, pp 544 - 547
- [7] Nakano, K., Takahashi, T., Kawahito, S., "A CMOS rotary encoder using magnetic sensor arrays", Sensors Journal, IEEE, Vol.5, Issue 5, Oct. 2005,

pp 889 - 894

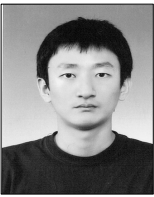
[8] Yufei You, Huixing Zhou, Peng Sun, Shulin Hou, "Precision detection technique for permanent magnet linear synchronous motors", Mechatronics and Machine Vision in Practice, 2007.M2VIP 2007. 14th International Conference on, 4-6 Dec. 2007, pp 73-77

저 자 소 개



김 지원 (金 志 元)

1971년 9월 20일 생. 1994년 서울시립대학교 제어계측공학과 졸업. 1996년 광운대학교 대학원 제어계측공학과 졸업(석사). 2005년 부산대 대학원 전기공학과 박사과정 수료. 1996년-현재 한국전기연구원 산업전기연구본부 선임연구원



원 진 국 (元 溱 國)

1981년 6월 30일 생. 2007년 동아대학교 전기공학과 졸업. 2009년 동 대학원 전기공학과 졸업(석사). 2006년-2007년 DMT 기술연구소 근무. 2009년-현재 한국전기연구원 산업전기연구본부 연구원



이 지 영 (李 旨 榮)

1977년 5월 26일 생. 2000년 창원대 전기공학과 졸업. 2002년 동 대학원 전기공학과 졸업(석사). 2006년 동 대학원 전기공학부 졸업(공학박). 2006년-현재 한국전기연구원 산업전기연구본부 선임연구원



강 도 현

1958년 9월 21일 생. 1981년 한양대 전기공학과 졸업. 1989년 동 대학원 전기공학과 졸업(석사). 1996년 독일 Braunschweig대 졸업(공학박). 1989년-현재 한국전기연구원 산업전기연구본부 본부장



김 장 목 (金 長 睦)

1961년 8월 6일 생. 1988년 부산대 전기공학과 졸업. 1991년 서울대 대학원 전기공학과 졸업(석사). 1996년 동 대학원 전기공학부 졸업(공학박). 1997년-2001년 한국전력 전력연구원 선임연구원. 2002년-현재 부산대 전기공학과 부교수



장 정 환 (張 正 煥)

1968년 생. 1994년 한양대 전기공학과 졸업. 1997년 동 대학원 전기공학과 졸업(석사). 2001년 동 대학원 정밀기계공학과 졸업(공학박). 2001년-2002년 한양대학교 BK 기계사업단 post-doc. 2002년-2003년 U.C.Berkeley 기계공학부 Research Fellow. 2004년-2008년 한국전기연구원 선임연구원. 2009년-현재 동아대학교 전기공학과 조교수