

## 브러시리스 DC 선형 모터에서 역기전력 측정을 통한 추력 특성 분석

이춘호<sup>0</sup>, 최문석<sup>\*\*</sup>, 이상락<sup>\*\*</sup>, 김용일<sup>\*\*</sup>, 현동석<sup>\*</sup>

<sup>\*</sup>한양대학교 전기공학과 <sup>\*\*</sup>한국과학기술연구원 정보전자연구부

### The analysis of the thrust characteristics by a measurement of the back-EMF in a brushless DC linear motor

Chun-ho Lee<sup>\*</sup>, Moon-Suk Choi<sup>\*\*</sup>, Sang-Lak Lee<sup>\*\*</sup>, Yong-Yil Kim<sup>\*\*</sup>, Dong-Seok Hyun<sup>\*</sup>  
<sup>\*</sup>Hanyang Univ. <sup>\*\*</sup>Korea Institute of Science and Technology

#### Abstract

For a given brushless DC linear motor, we analyze the thrust characteristics. We measure the back-EMF and then calculate the thrust with it. To compare the thrust, we measure it direct with force-torque meter and we calculate it from Lorentz equation. As the thrust and the back-EMF vary linearly according to the current and the velocity respectively, we define the thrust constant and the back-EMF constant. To match the motor to its controller, we calculate the thrust constant and the back-EMF constant. The result calculated with the back-EMF differs from that of the measurement by only 4.4%.

#### 1. 서론

본 논문에서는 브러시리스 DC 선형 모터에서의 추력과 역기전력을 측정하고 추력 상수와 역기전력 상수를 구하였다. 실험 결과를 바탕으로 전류와 속도가 추력과 역기전력에 미치는 영향을 평가하였다. 또한 역기전력 측정을 이용한 선형 모터의 추력 계산 방법을 검증하였다.

기존의 선형 시스템이 볼스크류나 래피니온 등 회전운동을 직선운동을 변환시키는 별도의 장치를 추가 장착하는데 반하여 DC 선형 모터는 코일과 자석의 전자기적인 성질에 의하여 모터 자체에서 직접 직선운동을 얻을 수 있다. 이러한 모터는 추력 대 질량비가 크고, 위치나 속도 제어시 제어 성능이 우수하여 전자기관조립, 자동포장작업 등의 생산 자동화 라인뿐 아니라 고성능, 고정밀도를 요구하는 반도체 장비, 레코더 등의 분야에 적용이 확산되고 있고, 이에 따라 연구도 활발하게 진행되고 있다.

Wakiwaka 등[1]은 Pen Recorder를 제작하기 위해 고속응답을 갖는 DC 선형 모터를 설계하였다. 이러한 모터에 대해서 유한 요소 분석 방법을 이용하여 2.67

N/A의 추력 상수를 구하였다.

Basak 등[2]은 두 개의 철심과 7개의 영구자석을 이용하여 선형 구동 모터를 제작하였다. 이와 같은 구동 방식의 선형 구동 모터는 에너지가 매우 많은 영구자석을 이용하여 큰 추력을 얻을 수 있다.

Seiki 등[3]은 높은 정밀도와 큰 가속도의 특징을 가지는 선형 모터를 제작하였다. 영구자석, U자형 고정자와 3상 코일을 이용하였고, 이의 추력을 계산하고 특성을 분석하였다.

앞에서 나온 선형 모터들은 유한 요소 분석과 수치적인 계산에 의한 방법을 이용하여 제작하였다. 이러한 방법에 의해 제작된 모터는 설계 당시 고려한 최대 추력값에 어느 정도 부합되는지 실험을 통하여 검증할 필요가 있다. 또한 모터와 제어를 일치시키고 제어기의 이득으로 사용하기 위하여 추력 상수와 역기전력 상수를 계산한다[4].

#### 2. 추력 상수와 역기전력 상수

선형 모터의 추력은 공극자속밀도와 코일의 권선 분포 및 입력 전류에 따라 변한다. 공극자속밀도는 모터의 영구자석의 특성이고, 권선 분포도 코일 배치의 특성이다. 입력전류만이 제작된 선형모터의 추력에 영향을 미치며, 일정한 입력전류의 범위에서는 전류에 대하여 추력이 선형적으로 변한다. 따라서, 입력전류에 대한 선형 모터의 추력은 모터의 특성이므로 이를 추력 상수라고 정의하고 다음과 같이 계산한다.

$$k_f = \frac{F}{I} \quad (1)$$

여기서, 추력 상수의 단위는 kg/A이고, F는 최대 추력이며, I는 이동자의 선전류이다.

역기전력 또한 공극자속밀도, 코일의 권선 분포, 이동자의 속도에 따라 변하게 된다. 위와 같이 이동자의 속도만이 제작된 선형 모터의 역기전력에 영향을 미치게 된다. 속도를 변화시키면 역기전력의 피크값은 어떠한 상수에 비례하여 변하게 된다. 따라서 이동자의 속도에 대한 한 상에서의 역기전력의 피크값은 모터의

특성이므로 역기전력 상수라 정의하고 식 (2)와 같이 쓸 수 있다.

$$k_e = \frac{e_{ph}}{v_m} \quad (2)$$

여기서, 역기전력 상수의 단위는  $V \cdot s/m$ 이고,  $e_{ph}$ 는 하나의 상에서 유기된 기전력의 피크값이며,  $v_m$ 은 이동자의 속도이다.

### 3. 실험모델

추력과 역기전력을 측정하기 위한 실험장치는 그림 1과 같이 구성되며, 대표적인 요소는 다음과 같다.

Brushless Linear Motor, DC Regulated Power Supply(1.5kw), Oscilloscope, Force-torque Meter, Current Probe Amplifier, Motor Driver.

여기서 Motor Driver는 Brushless Servo PWM Amplifier와 NetUs<sup>(1)</sup>사의 Justek Controller로 구성된다[5].

추력을 측정하기 위해 힘-토크 측정기를 고정시키고 이동자와 접하게 놓는다. 오실로스코프의 파형을 보면서 원하는 전류값이 되도록 Power Supply의 전압을

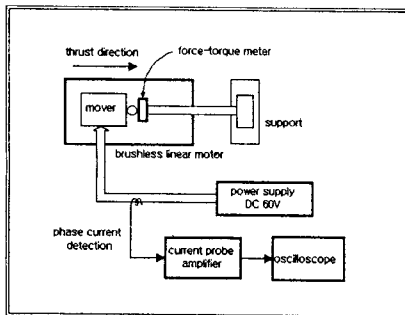
조절하여 추력을 측정한다.

역기전력을 측정하기 위한 방법은 이동자 1을 원하는 속도로 이동시키고 이동자 2에서 발생된 역기전력을 측정하는 것이다. 이 때 이동자 2는 발전기로 구동되며 전류가 흐르지 않는 개방 회로의 역기전력을 측정하게 되고, 이를 이용하여 이동자 1의 추력을 계산한다.

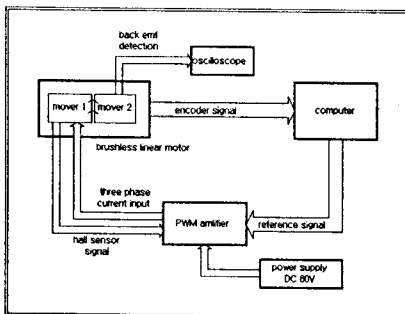
추력 및 역기전력에 영향을 미치는 매개변수를 표 1과 같이 선정하고 이를 변화시키면서 각각을 측정하였다. 추력을 측정할 때 코일의 허용 전류가 6A이므로, 입력 전류를 6A로 한정하였다. 또한 역기전력을 측정할 때 인코더의 분해능을 고려하여 1m/s로 한정하였다.

Table 1. Range and step of parameters

To measure the thrust		
Parameter	Range	Step
Current(A)	0.5 ~ 6	0.5
To measure the back-EMF		
Parameter	Range	Step
Velocity(m/s)	0.1 ~ 1	0.1



(a) Model to measure the thrust



(b) Model to measure the back-EMF

Fig. 1. Schematic diagrams of test models to measure the thrust and the back electric motive force

### 4. 결과 및 고찰

#### 4.1 힘 상수 ( $k_f$ )

선형 모터의 추력 상수를 구하기 위하여 전류를 변화시키면서 추력의 변화를 측정하였고 이를 그림 2에 도시하였다. 추력 상수는 0.5A에서 1.0A까지는 비선형적이거나, 1.0A에서 6A까지는 선형성을 나타낸다. 비선형적인 구간은 이동자의 무게로 인한 정지마찰력과 운동마찰력의 차이로 인한 것이다. 입력전류가 6A일 때 추력은  $13.5 \text{ kg}_f/A$ 이고, 추력 상수는  $2.25 \text{ kg}_f/A$ 이다.

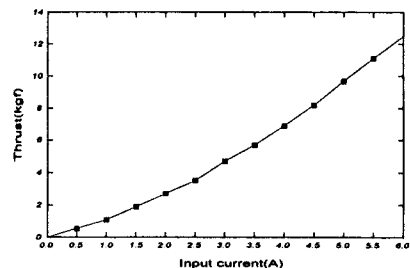


Fig. 2. The variation of the thrust according to the input current

#### 4.2 역기전력 상수 ( $k_e$ )

그림 3(a)는 이동자의 속도가  $0.1 \text{ m/s}$ 일 때, 3상의 코일에서 각 상에 대한 역기전력을 파형을 나타낸 것이

1) NetUs is the registered trademark of the Netus co.

고, 그림 3(b)는 속도가 1m/s인 경우 한 상의 역기전력 파형을 나타낸 것이다. 그림 4는 이동자의 속도 변화에 대한 최대 역기전력의 변화를 도시한 것이다. 역기전력 파형은 공급자속밀도에 의하여 발생하는 것이므로 영구자석의 주기와 같은 주기를 가진다. 그리고 입력 전류가 증가하면 역기전력이 선형적으로 증가한다. 따라서 일정한 역기전력 상수를 가지며, 이러한 값은  $9.3 \text{ V} \cdot \text{s}/\text{m}$ 이다. 그림 3(a)에서는 역기전력 신호에 노이즈 신호가 매우 많이 포함되어 있다. 이러한 파형에서 역기전력 상수를 구하기 위해서는 노이즈가 제외된 신호의 피크값을 선택한다.

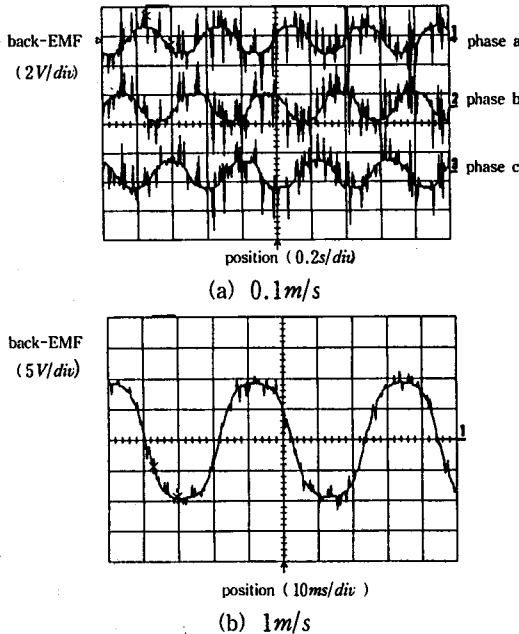


Fig. 3. Experimental back-EMF waveform for the several velocities

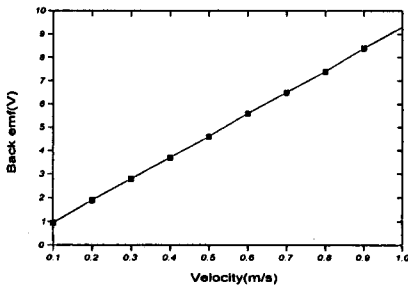


Fig. 4. Variation of the back-EMF according to the mover velocity

#### 4.3 최대 추력 비교

추정한 역기전력을 이용하여 계산한 추력을 기준으로 실험에 의해 측정된 추력과 Lorentz의 식을 이용하

여 계산된 추력을 비교하였을 때 각각에 대한 오차는 4.2%, 5.4%이다. 역기전력을 이용하여 계산된 추력의 타당성은 이러한 결과로부터 검증할 수 있다.

표1은 전류가 6A일 때 실험으로 측정된 최대 추력을 기준으로 Lorentz의 식을 이용하여 계산한 결과와 측정된 역기전력을 이용하여 계산한 결과를 비교하였다. Lorentz의 식을 이용하여 추력을 계산하였을 때 10%정도의 오차가 나타났다. 이것은 위치에 따른 자속밀도와 코일에 의한 쇄자속을 고려하지 않았기 때문이다. 측정된 역기전력을 이용한 경우에는 실험값과의 오차가 4.4%로 거의 일치하였고 이러한 방법은 Lorentz의 식을 이용한 추력 계산 방법보다 훨씬 더 정확하다.

Table. 2. Maximum thrusts and errors for several methods at a 6A

Method	Maximum thrust	Error
Force-torque meter	6.35	—
Lorentz equation	6.99	10.08 %
Back-EMF	6.63	4.4 %

#### 결론

브러시리스 DC 선형 모터의 추력과 역기전력을 측정하였고 모터와 제어를 일치시키기 위한 추력 상수와 역기전력 상수를 계산하였다. 힘-토크 측정기로 측정된 추력과 역기전력과 Lorentz 식으로 계산된 각각의 추력과 비교하였다. 역기전력을 이용하여 추력을 계산하는 방법은 측정하기 편리하고 실험값과 비교하여 오차가 4.4%로 거의 정확하였다.

#### 참고문헌

1. H. Wakiwaka, H. Yajima, H. Yamada, J. Oda, "Design and evaluation of linear DC motor for pen recorder", IEEE trans. on Magnetics, Vol. 31, No. 6, part 2 Nov 1995.
2. A. Basak, A. F. Flores Filho, "The design and analysis of a novel brushless dc linear motor", J. Magn. Magn. Mater., pp. 640~643, 1994.
3. T. Seiki, O. Kouchi, U. Teruo, S. Osamu, A. Hirokazu, and T. Massaki, "Development of high acceleration linear motor with precise positioning accuracy", Trans. IEE Japan, Vol. 113-A, No. 7, pp.535~539, 1993.
4. J. R. Hendershot Jr and TJE Miller "Design of brushless permanent-magnet motors", Magna Physics Publishing and Clarendon Press · Oxford, 1994.
5. "Justek Controller JTC 4-32" Netus corp. 1997.