

# 선형 브러시리스 DC 모터의 역기전력과 추력 측정 및 분석

이 춘 호\*, 김 용 일\*\*, 현 동 석\*

## Measurement and Analysis of Back-EMF and Thrust of a Linear Brushless DC Motor

Chun-Ho Lee\*, Yong-Yil Kim\*\*, Dong-Seok Hyun\*

### ABSTRACT

In this paper, we measure the back-EMF and the thrust of a linear brushless DC motor along the relative position between coils and magnets in various speed environments in order to obtain the back-EMF and the thrust as a function of a motor position. The measured back-EMF function and thrust function of the position differ from the analytical ones within 5%. The measured back-EMF and thrust function can, then, be employed in controlling the thrust ripple of the linear motor. Furthermore, to minimize the torque ripple of the linear motor, we suggest the design method to shape the back-EMF and thrust function of the linear motor.

**Key Words** : Linear Brushless DC Motor(선형 브러시리스 DC 모터), Airgap Flux-Density(공극자속밀도), Back-EMF(역기전력), Back-EMF Constant(역기전력 상수), Thrust(추력), Thrust Constant(추력 상수), Thrust Ripple(추력 리플)

### 1. 서 론

선형 브러시리스 DC 모터는 구조가 비교적 간단하고, 질량 대 추력 비가 크므로 고속 동작이 가능하며, 위치 제어 성능이 좋아서 직선 운동이 필요한 시스템에서 보용 전동기로서 그 용도가 점차 증가되고 있다. 이러한 고정도의 위치 제어와 속도 제어를 요구하는 시스템을 실현하기 위해 추력 특성의 분석이 요구된다. 또한 모터

와 제어를 일치시키고, 제어기의 이득으로 사용하기 위해 추력과 역기전력을 측정하여 각각의 상수를 계산하여야 한다<sup>(1)</sup>.

본 연구는 최근에 널리 사용되기 시작한 선형 브러시리스 DC 모터의 제어기 설계의 기본 변수인 역기전력 상수(Back-EMF Constant,  $k_b$ )와 추력 상수(Thrust Constant,  $k_t$ )를 구하기 위하여, 기 제작된 모터에 대해 역기전력과 추력을 실험적으로 측정하는 방법을 제시한다. 또

\* 한양대학교 전기공학과  
\*\* 한국과학기술연구원 정보전자연구부

한 역기전력 파형의 모양이 이론과는 다르게 이동자의 이동 속도에 따라라도 변화를 하는가에 대해서도 측정한다. 이상의 변수를 고려하여 역기전력 상수 및 추력 상수를 측정하여 실제 모터 제어에 사용할 수 있도록 하고, 추력 리플을 분석하여 최소화시키는 방법을 제시한다.

Mizuno등<sup>(2)</sup>과 Akmesse등<sup>(3)</sup>은 코일의 전류에 의한 유도 자력과 영구자석을 이용한 선형 동기 모터를 제작하고, 실험과 수치해석결과를 비교하여 정확도를 검증하였다. Wakiwaka등<sup>(4)</sup>은 Pen Recorder를 제작하기 위해 고속응답을 갖는 선형 DC 모터를 설계하였다. 이러한 모터에 대해서 유한 요소 분석 방법을 이용하여 2.67N/A의 추력 상수를 구하였다. Basak등<sup>(5)</sup>은 2개의 철심과 7개의 영구자석을 이용한 선형 모터를 제작하였다. 이 선형 모터는 에너지가 매우 큰 영구자석의 자력을 이용함으로써 보다 큰 추력을 얻을 수 있었으나, 안정된 추력을 얻지는 못하였다. 또한 Basak등<sup>(6)</sup>은 영구자석을 서로 마주보게 일렬로 배치하고, 영구자석 사이에 코일을 배치한 구조의 선형 모터를 설계하였다. 이 경우 양측에 위치한 영구자석이 발생하는 장력을 전달 수 있도록 U자형 스프링장치를 고안하여 고정자를 지지하도록 제작하였다. Seiki등<sup>(7)</sup>은 영구자석, U자형 고정자와 3상 코일을 이용하여 높은 정밀도와 큰 가속도의 특징을 가지는 선형 모터를 제작하였으며, 이의 추력을 계산하고 특성을 분석하였다.

앞에서 나온 선형 모터들은 수치적인 방법을 이용하여 모터 특성을 분석하였고, 그 특성에 맞게 설계 및 제작을 하였다. 이러한 방법에 의해 제작된 모터는 설계 당시 고려한 추력값에 어느 정도 부합되며, 추력의 리플이 어느 정도 발생하는지 실험을 통하여 검증할 필요가 있다. 또한 와이어본더(Wire Bonder)나 인버티드펜듈럼(Inverted Pendulum)등 많은 응용 분야에서는 추력 리플이 적은 선형 모터가 요구되므로, 이러한 리플을 제거하기 위하여 역기전력을 테이블로 만들어 이상적이지 못한 역기전력을 보상하여 제어하는 방법을 사용하기도 한다. 따라서 제작한 모터의 성능 특성 분석이나 추력 리플을 제거하기 위하여 역기전력과 추력을 직접 측정하고, 이의 특성을 분석하여야 한다.

## 2. 선형 브러시리스 DC 모터 시스템

PMAC(Permanent Magnet AC) 모터는 질량 대 추력 비가 크고, 전기적인 효율이 좋기 때문에 고성능 응용

을 위해 많이 이용된다. PMAC 모터 드라이브는 역기전력 파형의 모양에 따라 두 가지 형태로 나뉜다. Fig. 1은 사인파형 PMAC 드라이브와 브러시리스 DC 드라이브로 모터를 구동시킬 때, 이상적인 경우의 각 상의 역기전력 파형과 전류 파형을 나타낸다.  $i_a, i_b, i_c$ 는 각각 a상, b상, c상으로 도통되는 전류이고,  $e_a, e_b, e_c$ 는 각각 a상, b상, c상에 유겨된 기전력이다.

사인파형 PMAC 모터 드라이브는 리플 없는 추력을 발생시키기 위해 Fig. 1(a)와 같은 역기전력 파형에 대하여 사인파형의 상 전류를 도통시킨다. 사인파형의 역기전력을 발생시키기 위해 코일은 사인파형으로 분포되어야 하고, 영구자석에 의해 발생된 자속밀도는 공극을 따라 사인파형으로 변화하여야 한다.

브러시리스 DC 드라이브로 알려진 사다리꼴 모양의 PMAC 모터 드라이브는 리플 없는 추력을 발생시키기 위해, 사다리꼴형 역기전력 파형에 대하여 Fig. 1(b)와 같이 준구형파 전류를 도통시킨다. 사다리꼴형 역기전력

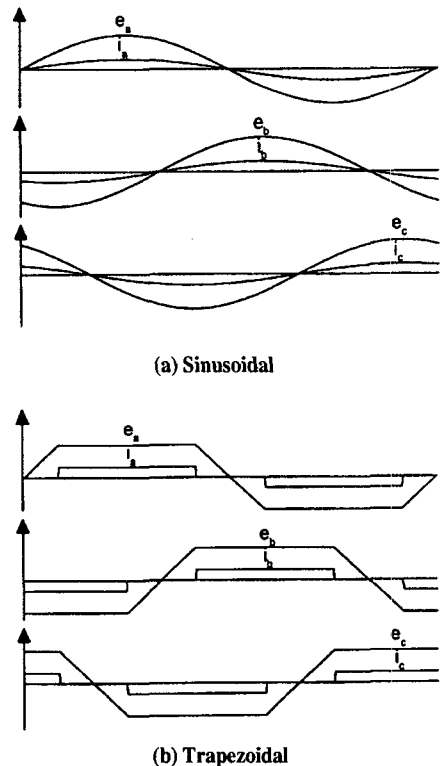


Fig. 1 The idealized phase excitation waveforms for the two major classes of PMAC machines

을 발생시키기 위해 자속은 구형파형이 되도록 자화시키고, 권선은 사인파형 PMAC 모터에서 사용되는 분포권선과는 대조적으로 집중권선을 사용한다. 제작된 선형 모터는 브러시리스 DC 드라이브로 구동되고 있지만, 사인파형 PMAC 드라이브로도 구동이 가능하다.

추력과 역기전력을 측정하고, 이의 특성을 분석하기 위하여 선정된 선형 모터를 Fig. 2에 도시하였다. 선형 모터는 영구자석과 3상 코일을 이용하여 철심이 없는 형태로 제작된 것으로, 한 개의 고정자와 두 개의 이동자로 구성된다. 고정자는 희토류계(Nd-Fe-B) 자석이 일렬로 배치된 구조이며, 이동자는 120°의 전기각만큼 서로 위상차를 가진 3상 코일로 구성되고, 코일들은 다른 코일로부터 전기적으로 절연되어 있다. 고정자의 극성에 따라 이동자를 원활하게 구동시키기 위하여 이동자 내부에 홀센서가 부착된다.

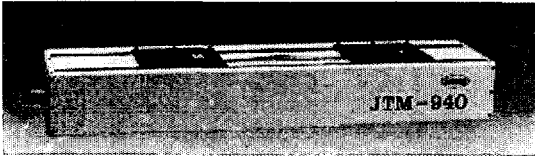


Fig. 2 The photograph of the 3-phase linear brushless DC motor

2.1 수학적 모델

선정된 선형 모터는 브러시리스 DC 모터 드라이브에 의해 구동되며, 이러한 드라이브는 60V의 DC 전원으로 부터 3상 인버터 브리지 회로의 적절한 스위칭에 의해 3상 코일에 준구형파 전류를 도통시킨다. 선형 브러시리스 DC 모터 시스템 모델의 등가회로를 Fig. 3에 도시하였다.  $v_a, v_b, v_c$ 는 각각 모터 a상, b상, c상의 상전압을

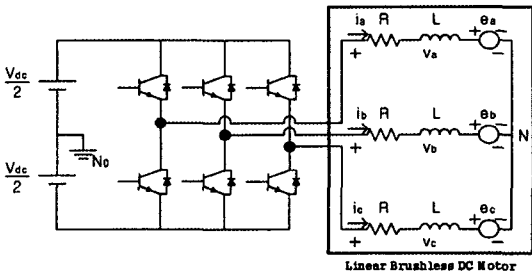


Fig. 3 The equivalent circuit of a linear brushless DC motor system

나타내며,  $R, L, V_{dc}, N_o, N$ 은 각각 상당 저항, 상당 인덕턴스, DC단의 전압, DC단의 중성점, 모터 권선의 중성점을 나타낸다.

선형 모터의 전압 방정식은 식(1)과 같이 나타낼 수 있다.

$$\begin{bmatrix} v_a \\ v_b \\ v_c \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} R & 0 & 0 \\ 0 & R & 0 \\ 0 & 0 & R \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_a \\ i_b \\ i_c \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} L & 0 & 0 \\ 0 & L & 0 \\ 0 & 0 & L \end{bmatrix} \frac{d}{dt} \begin{bmatrix} i_a \\ i_b \\ i_c \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} e_a \\ e_b \\ e_c \end{bmatrix} \quad (1)$$

이동자가 일정한 속도로 이동할 때, 역기전력과 전류를 이용하여 다음과 같이 추력  $F$ 를 나타낼 수 있다.

$$F = \frac{e_a i_a + e_b i_b + e_c i_c}{v_m} \quad (2)$$

여기서, 추력의 단위는 N이고,  $v_m$ 은 이동자의 속도의 크기이다.

역기전력은 공극자속밀도, 코일분포, 이동자의 속도에 따라 변하게 된다. 따라서 하나의 도체에서 유기된 기전력  $e$ 는 다음과 같이 자속변화에 의한 유도기전력과 운동에 의한 유도기전력의 합으로 나타낼 수 있다.

$$\begin{aligned} e &= -\frac{d\Phi}{dt} \\ &= -\int_s \frac{\partial B}{\partial t} \cdot dS + \oint_c (\mathbf{v} \times \mathbf{B}) \cdot d\mathbf{l} \end{aligned} \quad (3)$$

여기서,  $\Phi$ 는 도체를 통과하는 자속,  $B$ 는 공극자속밀도,  $v$ 는 도체의 이동 속도를 나타낸다. 선정된 선형 모터는 자속이 시간에 따라 변하지 않는 영구자석인 고정자로 구성되어 있기 때문에, 역기전력은 운동유도기전력에 의해서만 발생한다. 따라서 도체의 수가  $K$ 개일 때, 역기전력은 식(4)와 같이 나타낼 수 있다.

$$e = \oint_c (\mathbf{v} \times \mathbf{B}) \cdot d\mathbf{l} = \sum_{k=1}^K B_k l v \quad (4)$$

여기서,  $B_k$ 는  $k$ 번째 도체를 통과하는 자속밀도를 나타내고,  $l$ 은 자속이 통과하는 도체의 유효 길이를 나타내며,  $v$ 는 도체의 이동 속도의 크기를 나타낸다. 이동자의 속도를 변화시킬지라도, 역기전력의 피크값은 어떠한 상수에 비례하여 변하게 된다. 따라서 이동자의 속도에 대한 한 상에서의 역기전력의 피크값을 역기전력 상수로 정의하면, 식(5)와 같이 쓸 수 있다.

$$k_e = \frac{\hat{e}_{ph}}{v_m} \quad (5)$$

여기서, 역기전력 상수의 단위는  $V \cdot s/m$ 이고,  $\hat{e}_{ph}$ 는 한 상에서 유기된 기전력의 피크값이다.

준구형파나 사인파 전류가 코일에 도통될 때, 역기전력을 이용하여 모터의 추력 및 추력 리플의 계산이 가능하다. 이동자의 속도에 대한 역기전력을 측정하여, 역기전력 함수  $n_a, n_b, n_c$ 로 나타낼 수 있고, 이를 이용하여 다음과 같이 추력을 계산한다.

$$F = n_a i_a + n_b i_b + n_c i_c \quad (6)$$

$$n_a = \frac{e_a}{v_m} \quad (7)$$

$$n_b = \frac{e_b}{v_m} \quad (8)$$

$$n_c = \frac{e_c}{v_m} \quad (9)$$

이동자가 일정한 위치에 있을 때, 입력 전류의 증가에 따라서 추력은 선형적으로 비례하여 증가하게 된다. 따라서 입력전류에 대한 선형 모터의 추력을 추력 상수로 정의하고 다음과 같이 계산하였다.

$$k_f = \frac{F}{I} \quad (10)$$

여기서, 추력 상수의 단위는  $N/A$ 이고,  $I$ 는 이동자의 선 전류를 나타낸다. 실제 추력은 이상적인 경우와는 다르게, 이동자의 위치에 따라 변화되어 리플을 발생시킨다. 이러한 추력 리플  $\epsilon_{ripple}$ 을 정량적으로 해석하기 위하여 다음과 같이 정의한다.

$$\epsilon_{ripple} = \frac{F_{max} - F_{min}}{F_{av}} \quad (11)$$

여기서,  $F_{max}, F_{min}, F_{av}$ 는 각각 자석의 한 주기 동안, 추력의 최대값, 최소값, 평균값을 나타낸다.

이러한 수학적 모델을 바탕으로 하여 선형 모터의 공극 자속밀도 및 역기전력, 그리고 추력을 측정하고, 이의 특성을 분석한다.

## 2.2 구동 원리

이동자의 위치에 따른 추력을 측정하기 위해서는 선형

모터의 구동 원리에 대한 이해가 필수적이다. 이동자에 위치한 홀센서의 신호와 전류 제어기에 의해 인버터 스위치인 전력용 소자가 동작한다. 이와 같이 자석과 코일의 상대 위치와 전류 지령치에 따라, 각 상에 전류가 변화되어 흐르게 된다. 따라서 이동자는 6가지 모드 of 홀센서 출력 신호에 의하여 전류(Commutation) 순서에 따라 이동하게 된다. Fig. 4는 홀센서에 의한 6가지 모드 상태에 따른 이동자의 위치를 나타낸 단면도이다. 홀센서  $H_1, H_2, H_3$ 는  $120^\circ$ 의 전기각 차이를 가지고 이동자에 부착되어 있다. 그리고 A, B, C는 각 상을 나타내고, A', B', C'는 Fig. 3에 나타난 것과 같이 중성점 N으로 연결되어 Y결선 되어 있으며,  $\odot$ 는 전류가 흐르지 않는 코일,  $\ominus$ 는 전류가 지면 밖으로 흐르는 코일,  $\otimes$ 는 전류가 지면 속으로 흐르는 코일을 나타낸다. 또한  $d$ 는 자석 한 주기의 길이를 나타내고, 이동 방향과 이동 거리를 나타내는  $x$ 는 홀센서  $H_3$ 의 중심을 원점( $x=0$ )으로 한다. 홀센서의 신호가 Mode 1에 해당될 때 전류는  $a$ 상에서  $b$ 상으로 도통하게 되고, 이 때 이동자는  $x$ 방향으로 이동하게 된다.

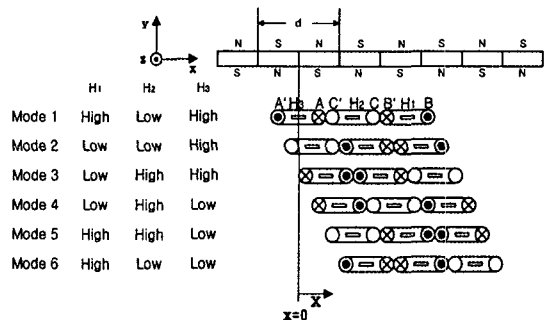


Fig. 4 The phase commutation sequence for the six step mode

## 2.3 실험 모델

선정된 선형 모터의 수학적 모델과 구동 원리를 바탕으로 역기전력과 추력의 특성을 실험적으로 측정하고자, 다음과 같이 실험 모델을 선정하였다. 또한 측정된 역기전력 파형을 이용하여 역기전력 상수를 계산하고, 코일과 자석의 상대 위치에 따라 측정된 추력을 이용하여 추력 상수와 추력 리플을 계산하고자 한다. 역기전력과 추력을 측정하기 위하여 실험 대상으로 제작된 선형 모터의 사양은 Table 1과 같다.

**Table 1** The specifications of the experimental motor

Maximum speed [m/s]	2
Rated power [W]	180
DC supply voltage [V]	60
Magnet material	Nd-Fe-B
Number of phase	3
Winding resistance per phase [ $\Omega$ ]	3.68
Winding inductance per phase [mH]	1.68
Phase connection	Y

역기전력과 추력을 측정하기 위한 대표적인 요소는 다음과 같다.

- |                                |                          |
|--------------------------------|--------------------------|
| Linear Brushless DC Motor,     | Oscilloscope,            |
| DC Regulated Power Supply,     | Controller,              |
| Force-Torque Meter,            | Current Probe Amplifier, |
| Brushless PWM Servo Amplifier, | Hall Sensor Tester       |

여기서, 홀센서 검출기(Hall Sensor Tester)는 이동자에 부착된 홀센서의 출력 신호를 검출하기 위하여 간단한 회로로 구성되며, 추력을 측정할 때 이동자를 정확한 위치에 고정시키기 위하여 사용된다. 역기전력과 추력을 측정할 때, 이동자의 정확한 위치제어와 속도 제어를 위하여 NetUs<sup>1)</sup> 사의 Justek Controller<sup>(6)</sup>를 사용하였다.

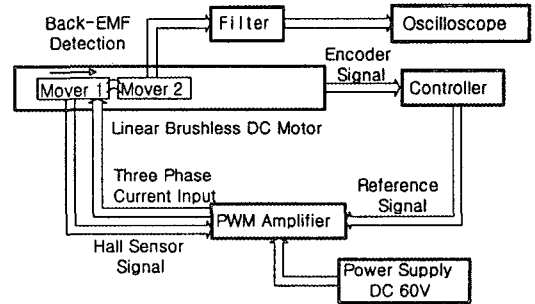
추력 및 역기전력에 영향을 미치는 매개변수를 Table 2와 같이 선정하고, 이를 변화시키면서 각각을 측정하였다. 추력을 측정할 때, 입력 전류를 코일의 허용 전류인 3A로 한정하였다. 또한 역기전력을 측정할 때, 이동자의 실제 이동 거리를 고려하여 1.2m/s로 한정하였다.

**Table 2** The range and the step of parameters

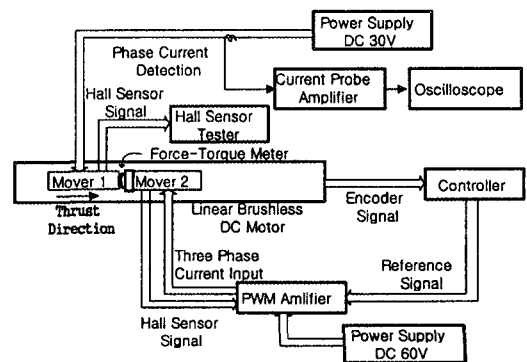
To measure the back-EMF		
Parameter	Range	Step
Velocity [m/s]	0.1 ~ 1.2	0.1
To measure the thrust		
Parameter	Range	Step
Current [A]	0.5 ~ 3	0.5

역기전력을 측정하기 위한 실험 방식을 Fig. 5에 도시하였다. 먼저 이동자 1과 이동자 2가 전기적으로 절연된 상태로, 이동자 2를 이동자 1에 고정시킨다. 이동자 1을 일정한 속도로 이동시키면, 이동자 2도 동일한 속도로 이동하게 된다. 이 때 이동자 2의 a상, b상, c상에서 각각 발생된 역기전력을 측정한다. 측정된 역기전력 신호는 노이즈 성분을 포함하기 때문에, 신호의 진폭과 위상에 영향을 미치지 않도록 대역폭을 고려한 필터를 사용하여 이를 제거한다. 선형 모터는 회전 모터와는 달리 유한한 이동 거리를 가지기 때문에, 연속적으로 일정한 속도를 제어하는 것이 어렵다. 따라서 이동자를 이동거리 내에서 충분히 가속시킨 후, 이동자가 일정한 속도로 이동할 때 오실로스코프로 역기전력을 관측한다.

추력을 측정하기 위한 실험 방법을 Fig. 6에 도시하였다. 힘-토크 측정기(Force-Torque Meter)를 이동자 2에 고정시킨다. 힘-토크 측정기를 이동자 1과 접하게 놓



**Fig. 5** The block diagram of the test model to measure the back-EMF



**Fig. 6** The block diagram of the test model to measure the thrust

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

고, 위치 제어가 가능하도록 구성한 이동자 2와 홀센서 검출기를 사용하여 이동자 1을 Fig. 4의  $x=0$ 가 되는 위치에 이동시킨다. 오실로스코프의 파형을 보면서 원하는 전류값이 되도록, DC Regulated Power Supply(30V)에서 전압을 조절하여 이동자 1의 추력을 측정한다. 자석 한 주기 동안의 추력을 측정하기 위하여, 이동자 1을 측정 간격( $\Delta x$ )만큼씩 이동시켜 Fig. 4의  $d$  간격 동안 앞의 과정을 반복한다. 전류는 홀센서 검출기의 신호를 이용하여 이동자 1이 해당되는 위치에 놓일 때 도통시킨다. 예를 들어, 이동자 1이 Fig. 4의 Mode 1을 나타내는 위치에 놓여있을 때, 일정한 전류를  $a$ 상에서  $b$ 상으로 도통시킨다.

### 3. 결과 및 고찰

선형 브러시리스 DC 모터 시스템의 실험 모델을 바탕으로 역기전력과 추력을 측정하고, 이의 특성을 각각 분석하였다. 역기전력 상수를 계산하기 위해 이동자의 속도에 따라 역기전력을 측정하였으며, 푸리에 분석 방법을 이용하여 역기전력의 고조파 성분을 분석하였다. 또한, 가우스 측정기(Gauss Meter)로 측정한 공극자속밀도와 코일분포를 이용하여 역기전력을 계산하였고, 이를 측정된 역기전력과 비교하였다. 코일에 준구형파 전류와 사인파 전류를 도통시켰을 때, 측정된 역기전력을 이용하여 추력을 계산하였으며, 정지된 상태에서 코일에 일정한 전류를 도통시켰을 때, 힘-토크 측정기로 추력을 측정하여 추력 상수와 추력 리플을 계산하였다.

#### 3.1 역기전력

제어기의 이득으로 사용하기 위하여 역기전력 상수를 계산하여야 하며, 추력 리플을 감소시키기 위해서는 측정된 역기전력을 테이블로 만들어 이상적이지 못한 역기전력을 보상하여 제어하여야 한다. 이를 위하여 측정된 역기전력의 특성을 분석하여야 한다.

이동자 1의 속도가 0.1m/s일 때, 이동자 2의  $a, b, c$ 상에서 발생된 역기전력이 필터를 통과하지 않은 경우와 필터를 통과한 경우의 파형을 각각 Fig. 7(a)와 7(b)에 도시하였다. 이 때 사용된 필터의 차단 주파수(Cutoff Frequency)는 2.34kHz이다.  $a, b, c$ 상의 역기전력 파형은 각각  $120^\circ$ 의 위상차를 가지고 있으며, 필터를 통과하지 않았을 경우에는 상당히 많은 노이즈가 포함되어 있음을 알 수 있다.

이동자 1을 여러 가지 속도에 대하여 이동시켰을 때, 이동자 2의  $a$ 상에서 발생된 역기전력 파형을 Fig. 8에 도

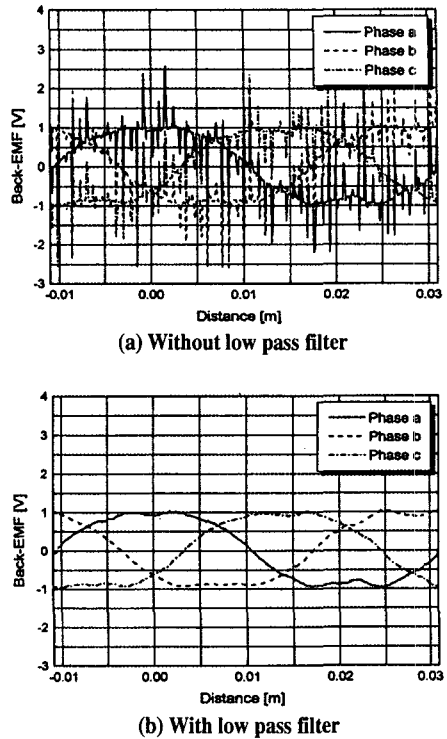


Fig. 7 The experimental back-EMF waveforms at 0.1m/s of the mover velocity

시하였다. 역기전력 파형은 공극자속밀도에 의하여 발생되는 것이므로, 영구자석의 주기와 동일한 주기를 가진다. Fig. 8과 같이 이동자의 속도가 증가하면 역기전력의 피크값은 선형적으로 증가하므로, 역기전력 상수의 정의에 의하여  $9.4V \cdot s/m$ 의 값을 갖는다.

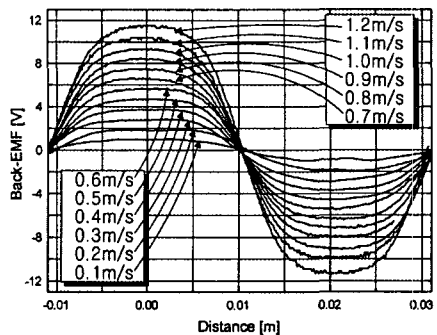


Fig. 8 The experimental back-EMF waveforms for the several velocities

이동자 1의 속도가 1m/s일 때, 이동자 2의 역기전력 파형과 구형파형을 고속 푸리에 변환(Fast Fourier Transform)한 정규화된 파형을 Fig. 9에 도시하였다. 구형파의 고조파는 차수에 반비례하여 진폭이 감소하는 반면에, 선정된 선형 모터의 역기전력 파형은 제3차 고조파와 제5차 고조파가 대부분을 차지하므로 사인파와 구형파의 중간형태를 갖는다.

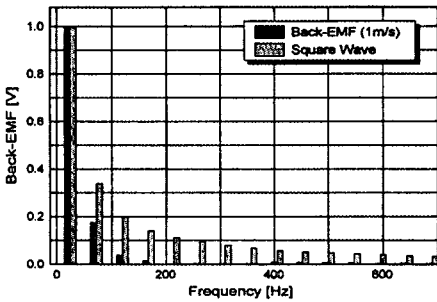


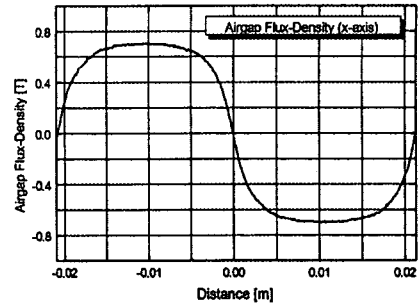
Fig. 9 The normalized Fourier transform of the back-EMF waveform at 1m/s of the mover velocity

### 3.2 측정된 공극자속밀도를 이용한 역기전력 계산

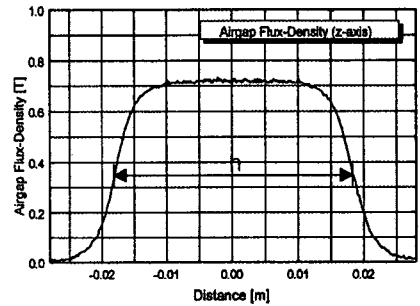
측정한 역기전력 파형을 검증하기 위하여, 가우스 측정기로 측정된 공극자속밀도와 코일분포를 고려하여 역기전력을 계산하였고, 이를 측정된 역기전력과 비교하였다. 이동자가 일정한 속도로 이동할 경우, Fig. 4의 x축 방향과 z축 방향으로 측정된 공극자속밀도 파형을 Fig. 10에 도시하였다. 최대 공극자속밀도는 0.705T이고, h는 z축 방향의 영구자석의 길이를 나타낸다.

역기전력은 공극자속밀도와 코일분포에 의존하기 때문에, 이를 고려한 식(4)를 이용하여 역기전력을 계산하였다. 식(4)의 유효 도체 길이( $l$ )의 선정에 따라 역기전력의 크기는 변화하게 된다. 이동자가 1m/s로 이동할 때, 공극자속밀도와 코일분포를 이용하여 계산한 역기전력 파형을  $l$ 값의 변화에 따라 Fig. 11에 도시하였다. 코일과 쇠코어하지 못하는 누설자속으로 인하여,  $l$ 값을  $h$ 값의 95%로 선정하였을 때, 측정된 역기전력 파형과 동일하였다.

측정된 공극자속밀도와 코일분포 및 턴수는 모터를 사양에 맞게 설계하는데 가장 기본이 되며, 이러한 매개변수의 값을 알면, 쉽게 역기전력과 추력의 특성을 분석할 수 있다. 또한 역기전력 파형의 모양에 따라 모터를 구동시키는 드라이브의 선정이 가능하다. 역기전력과 추력의



(a) x-axis direction



(b) z-axis direction

Fig. 10 The waveforms of the airgap flux-density

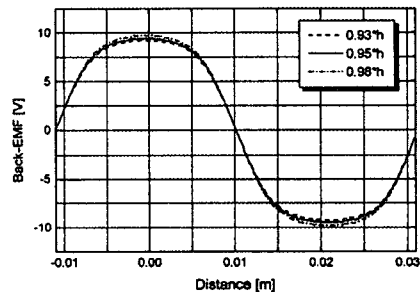


Fig. 11 The back-EMF waveforms according to the variation of the effective coil length

특성을 분석할 때, 저렴한 가우스 측정기로 측정된 공극자속밀도를 이용하기 때문에, 오실로스코프나 힘-토크 측정기를 이용하는 것보다 더욱 경제적이다. 역기전력과 추력의 측정함으로써 구조적으로 완성된 모터의 특성을 정확히 분석할 수 있는 데 비하여, 가우스 측정기로 측정된 공극자속밀도와 코일 배치를 고려하여 모터의 특성을 분석하면, 시제품 모터의 특성을 미리 예측할 수 있고, 모터 제작시 시행착오를 줄일 수 있다.

### 3.3 측정된 역기전력을 이용한 추력 계산

사인파형 PMAC 드라이브와 브러시리스 DC 드라이브로 모터를 구동시켰을 경우, 측정된 역기전력을 이용하여 추력 특성을 조사하였다. 사인파형 PMAC 모터 드라이브와 브러시리스 DC 드라이브에 의해 도통되는 전류는 전류 제어기에 의해 이상적이라고 가정한다.

이동자의 속도가 0.1m/s와 1m/s로 이동할 때, 가우스 측정기로 측정된 공극자속밀도 파형과 역기전력 파형을 정규화하여 Fig. 12에 도시하였다. 공극자속밀도는 이동자의 속도 변화에 따라 거의 변하지 않는 것을 알 수 있다. 그러나 이동자의 속도가 0.4m/s 이상일 때는 측정된 역기전력은 이동자의 속도가 1m/s일 경우와 비슷하였고, 0.3m/s 이하일 때는 이동자의 속도에 따라 조금씩 다르게 측정되었다. 이론적으로 역기전력 파형의 모양은 이동자의 속도와는 무관하고 공극자속밀도와 코일분포에 지배되지만, 실제 측정된 역기전력 파형의 모양은 이동자의 속도가 저속일 때 조금 다른 양상을 띄는 것을 알 수 있다. 선형 모터의 속도나 위치 제어를 위해 사용되는 인코더의 분해능은 5 $\mu$ m이고, 이동자가 0.1m/s로 이동할 때 속도에 대한 오차는 약 0.1%이다. 저속과 정격 속도로

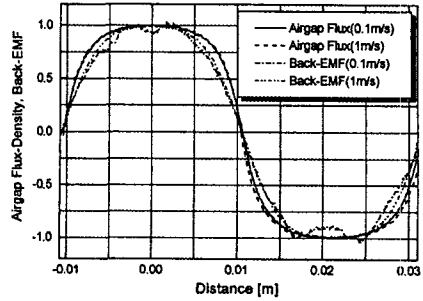


Fig. 12 The normalized waveforms of the airgap flux-density and the back-EMF

이동할 때, 역기전력 함수와 추력과의 관계를 비교하기 위하여 이동자의 속도를 0.1m/s와 1m/s로 선정하였다.

입력 전류가 피크치 1A인 준구형파와 사인파 전류를 도통시켰을 때, 추력을 비교하기 위하여 Fig. 13에 도시하였다. 인버터의 용량은 전류의 피크치에 의해 결정되기 때문에, 이를 기준으로 입력 전류를 실효치가 아닌 피크치로 선정하여 비교하였다.

준구형파와 사인파 전류를 코일에 도통시켰을 경우, 이동자가 0.1m/s와 1m/s로 이동할 때의 역기전력 함수를

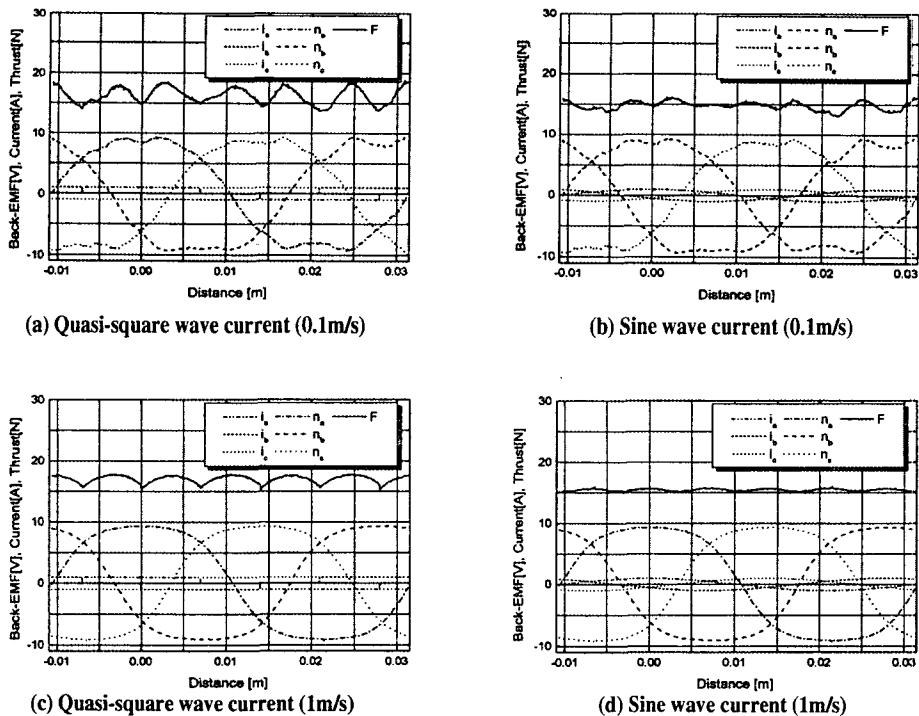


Fig. 13 The thrust calculation by a back-EMF function and a current



이용하여 추력 특성을 비교한 것을 Table 3에 나타내었다. 역기전력 파형이 사인파형에 더 가깝기 때문에, 추력 리플은 사인파형 PMAC 드라이브로 모터를 구동시켰을 경우가 브러시리스 DC 드라이브로 구동시켰을 경우보다 더 작다. 따라서, 추력 리플을 감소시키기 위해서는 코일에 사인파 전류를 도통시켜야 한다. 하지만 측정된 역기전력 파형은 이상적인 사인파형이나 사다리꼴형이 아니기 때문에, 추력 리플을 최소화시키기 위해서는 역기전력 파형을 푸리에 분석하여 적절한 전류 고조파를 주입하거나, 역기전력을 테이블로 만들어 제어하는 등 다른 방법을 선택하여야 한다. 또한, 이동자의 속도가 감소함에 따라, 추력 리플이 더 증가하는 특성을 보였다.

Table 3 The average thrust and the thrust ripple for several cases

Current waveform (Back-EMF function)	Average thrust [N]	Thrust ripple [%]
Square wave (0.1m/s)	16.27	30.41
Sine wave (0.1m/s)	14.78	21.25
Square wave (1m/s)	17	14.11
Sine wave (1m/s)	15.45	5.96

### 3.4 추력

제어기의 이득으로 사용하기 위하여 추력 상수를 계산하였고, 역기전력 함수를 이용하여 계산한 추력과 비교하기 위하여 정지된 상태에서 추력을 측정하였다. 선정된 선형 모터의 추력은 공극자속밀도와 코일분포 및 입력 전류에 따라 변한다. 이동자를 고정시켜 추력을 측정하였고, 이동시 마찰력은 매우 작아서 무시할 수 있기 때문에, 식(12)을 이용하여 측정 추력과 시동 추력(Starting Thrust)<sup>(9)</sup>의 합으로 실제 추력을 계산하였다.

$$F = F_m + F_u \quad (12)$$

여기서,  $F$ ,  $F_m$ ,  $F_u$ 는 각각 실제 추력, 측정 추력, 시동 추력을 나타낸다. 시동 추력은 권선에 1.05A를 도통시켰을 때 14.17N이다.

이동자 1이  $x=0$ 인 위치에 놓여 있을 때, 전류의 변화에 따라 힘-토크 측정기로 측정된 추력과 동일한 위치에서 이동자가 0.1m/s와 1m/s로 이동할 때, 역기전력 함수를 이용하여 계산한 추력을 Fig. 14에 도시하였다. 이동자의 질량과 베어링의 마찰 계수를 고려하였기 때문에, 측정된 추력은 시동 추력 이상에서만 발생하였다. 힘-토크 측정기로 측정하였을 경우의 추력 상수와 이동자가

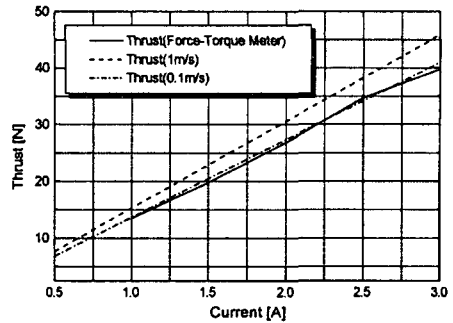


Fig. 14 The variation of the thrust according to the input current ( $x = 0$ )

0.1m/s, 1m/s로 이동할 때의 역기전력 함수를 이용하였을 경우의 추력 상수는 각각 13.4N/A, 13.7N/A, 15.3N/A의 값을 갖는다.

입력 전류가 3A인 경우,  $x=0$ 인 위치에서 측정된 최대 추력을 기준으로, 동일한 위치에서 역기전력 함수를 이용하여 계산한 결과와 비교하여 Table 4에 나타내었다. 힘-토크 측정기로 측정된 추력은 이동자가 정지된 상태에서 측정하였기 때문에, 이동자가 0.1m/s로 이동할 때의 역기전력 함수를 이용하여 계산한 추력과는 오차가 3%로 매우 근사함을 알 수 있다.

Table 4 The maximum thrust and the error for several methods( $x=0$ )

Method	Thrust [N] ( $I = 3A$ )	Error [%]
Force-Torque Meter	39.8	—
Back-EMF (0.1m/s)	41.0	3.0
Back-EMF (1m/s)	45.8	15.1

2A의 전류를 도통시켰을 때, 자석의 한 주기 동안 측정된 추력과 역기전력 함수를 이용하여 계산한 추력을 Fig. 15에 도시하였다. 정지된 상태에서 측정된 추력의 리플은 34%이며, 이것은 이동자가 0.1m/s로 이동할 때의 역기전력 함수를 이용하여 계산한 추력보다 더 큰 값을 나타낸다. 준구형파 전류를 도통시켰을 때, 정지된 상태에서 측정된 추력 리플이 가장 크고, 정격 속도에 더 가까운 역기전력 함수를 이용하여 추력을 계산할 경우 더 적은 추력 리플이 발생하였다. 추력 리플을 감소시키기 위하여 측정된 역기전력을 테이블로 이용할 경우, 모터가 구동하는 전체 속도 범위에서 역기전력을 측정하고 이것을 테이블로 만들어 이상적이지 못한 역기전력을 보상하여 제어하여야 한다.

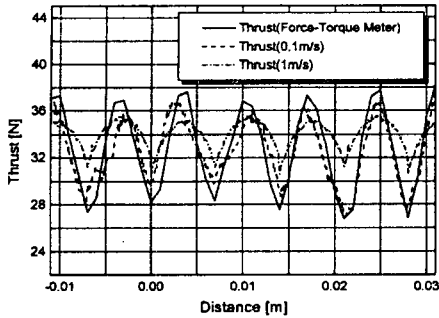


Fig. 15 The thrust characteristics( $I=2A$ )

#### 4. 결 론

선정된 선형 모터의 역기전력과 추력을 측정하였고, 이로부터 추력 상수, 역기전력 상수를 계산하였다. 가우스 측정기로 측정한 공극자속밀도와 코일분포를 고려하여 역기전력을 계산하였고, 이를 측정한 역기전력과 비교하였다. 또한 추력 특성을 분석하기 위하여 이동자가 정지된 상태에서 추력을 직접 측정하고, 이를 역기전력을 이용하여 계산한 추력과 비교하였다. 제시된 방법으로, 선정된 브러시리스 DC 모터를 분석한 결과는 다음과 같다.

1. 역기전력 파형의 모양은 이동자의 속도와는 무관하고 공극자속밀도와 코일분포에 의존하지만, 이론과는 달리 선정된 선형모터에서 측정된 역기전력은 이동자가 저속일 때 조금 다른 모양으로 측정되었다.
2. 측정한 공극자속밀도와 코일 배치를 고려하여 모터의 특성을 분석하면, 그 특성을 미리 예측할 수 있으므로, 모터 제작시 시행착오를 줄일 수 있다. 선정된 선형 모터의 경우, 측정한 공극자속밀도를 이용하여 계산한 역기전력은 측정된 역기전력에 비하여 5%의 오차가 발생하였다.
3. 이동자가 정지된 상태에서, 힘-토크 측정기로 측정한 추력은 저속일 때의 역기전력 함수를 이용하여 계산한 추력에 더 근사하였다.
4. 선정된 선형 모터에서와 같이 역기전력 파형이 사인 파형에 더 가까운 경우, 추력 리플을 감소시키기 위해서는 사인파형 PMAC 드라이브로 구동시켜야 한다.
5. 리플 없는 추력을 위해 역기전력 테이블을 이용할 경우, 모터가 구동하는 전체 속도 범위에서 역기전력을 측정하고, 이것을 테이블로 만들어 이상적이지 못한 역기전력을 보상하여 제어하여야 한다.

선형 브러시리스 DC 모터의 역기전력과 추력을 측정하고, 이의 특성을 분석함으로써 실제 시스템의 구현과 성능 향상이 가능할 것으로 사료된다.

#### 참 고 문 헌

1. J. R. Hendershot Jr and TJE Miller, *Design of brushless permanent-magnet motors*, Magna Physics Publishing and Clarendon Press · Oxford, pp. 7-1~7-16, 1994.
2. T. Mizuno and H. Yamada, "Magnetic circuit analysis of a linear synchronous motor with permanent magnets," *IEEE Trans. Magn.*, Vol. 28, No. 5, pp. 3027~3029, 1992.
3. R. Akmese and J. F. Eastham, "Design of permanent magnet flat linear motors for stanstill applications," *IEEE Trans. Magn.*, Vol. 28, No. 5, pp. 3042~3044, 1992.
4. H. Wakiwaka, H. Yajima, H. Yamada, and J. Oda, "Design and evaluation of linear DC motor for pen recorder," *IEEE Trans. Magn.*, Vol. 31, No. 6, part 2, pp. 3053~3055, 1995.
5. A. Basak and A. F. Flores Filho, "The design and analysis of a novel brushless dc linear motor," *J. Magn. Magn. Mater.*, Vol. 133, No. 1-3, pp. 640~643, 1994.
6. A. Basak, A. Matsumura, J. Kaczmarek, and G. Lloyd, "Computation of flux and force in an SmCo5 dc linear motor with U-spring supports," *J. Magn. Magn. Mater.*, Vol. 133, No. 1-3, pp. 583~586, 1994.
7. 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.
8. 이상락, *Justek Controller JTC 4-32*, Netus corp., 1997.
9. 박용, *리니어 모터 응용 핸드북*, 도서출판 세화, pp. 5~6, 1988.