

HB형 선형 펄스모터의 추력 계산법의 비교 및 측정장치 설계

*배동관, *김광현, **박현수
*전남대학교 전기공학과, **(주)넥스타테크놀로지

Design of Measurement System and Thrust Force Analysis Method for HB-Type Linear Pulse Motor

*D.K. Bae, *K.H. Kim, and **H.S. Park

*Dept. of Elec. Eng. and RRC/HECS, Chonnam National Univ., **Nexstar Technology Co.

ABSTRACT

The linear motor available for linear transition motion, because of its advantages, the motor design and its application have gradually increased, but the quantitative measurement system of thrust force has not been generalized. So, this paper proposes the modeling, computation method, and measurement system of linear thrust force in HB-type linear pulse motor. As the computation method of thrust force in linear motor is presented and the measurement system is designed, and manufactured, it would be verified that reliability of measurement method and measurement system, considering on and comparing the results of mathematical modeling with measured values of static thrust force and dynamic one.

1. 서 론

전력용 스위칭소자의 개발 진전에 따라 90년대 초반에 들어서 직접 구동방식인 선형모터에 대해 미국, 일본, 영국 등의 선진국에서 많은 연구가 진행되어 수많은 논문발표의 성과가 있었으나, 국내에서는 90년 중반 이후부터 기초적인 설계 및 제작에 참여하여 지금은 가시적으로 국산화에 성공하여 현장에 적용되고 있다. 그러나 모터의 제작품에 대한 추력 성능을 정량적으로 알 수 있는 추력 측정장치에 대한 기술이나 이에 관한 보고는 극히 미비하여 간이측정법이 현장에서 주로 이용되고 있다.

이에 선형 모터의 추력 특성해석과 측정법, 측정장치 설계에 대하여 본 연구에서는 HB형 선형 펄스 모터에 적용하였다. 이 모터는 가동자 내부의 각 극에 대해 선형으로 코일이 배치되어 있고, 영구자석은 구조적으로 이송모드 특성과 강한 추력을 얻을 수 있기 때문에 가동자 중간에 삽입되어 있다. 선형으로 배치된 코일과 자석의 전기적인 흡인력과 반발력을 구동원으로 하여 직선 추력을 얻는 직접 구동모터이다. 따라서 응용분야가 다양하고

기구학적으로 많은 잇점이 있기 때문에 이러한 선형모터의 설계 및 제작과 구동장치, 그리고 여러 형태의 선형 모터에 관하여 많은 관심과 연구가 진행되고 있다.

본 연구에 적용한 모터는 추력이 크고, 비교적 긴 스트로크를 가지며, 미세가공 공정과 초정밀 조립공정 등에 이용되고 있다. 적용분야에 따라 약간의 차이가 있으나, 이송 성능면에서 부드럽고 빠른 속도특성과 균일하고 강한 추력, 그리고 정확한 위치제어가 가능하기 때문에, 이런 성능이 요구되는 분야인 프린터나 X-Y 플로터를 포함한 OA, 그리고 선형 콤퓨레샤, 로봇과 이송기기, NC 등의 FA, 인공심장 액츄에이터, 반도체 조립·검사 장비 등에 그 응용범위가 점차 늘어나고 있는 추세이다.

최근까지 구동방식이나 치형상에 따른 추력해석법에 대한 연구가 일부 대학·연구소에서 이루어져 왔지만^{[1]-[3]}, 선형모터 구동장치의 개발과 제작에만 집중되어 왔다. 모터의 성능을 평가할 수 있는 척도인 추력에 대한 다양한 평가방법에 대한 연구가 필요하리라 생각된다.

따라서, 선형 펄스 모터의 성능을 평가하기 위하여 수치적인 방법과 실험적인 방법을 통하여 그 특성을 분석하고 신뢰성을 검증하는 방법을 제시하고자 한다. 이러한 특성을 측정하기 위해서 측정장치를 직접 설계하여 제작하였고, 정확한 계측을 위해 윈도우즈 프로그램으로 구성하여 편리하게 계측결과를 얻을 수 있도록 하였다. 추력 측정결과에 대하여 수학적 해석과 시뮬레이션에 의한 각 수치적인 계산결과와 비교하여, 그 정확성과 신뢰성을 입증하고자 한다.

2. 추력해석

2.1 해석 모델의 기본구조

그림 1은 본 논문에서 연구대상인 HB형 선형 펄스 모터로서 영구자석을 부착한 가동자의 코일 형상과 고정자의 단면 구조를 나타내었다. 가동자

내에 부착한 두 개의 영구자석은 동작 특성상 상호 반대방향이며, 1 모듈내에는 극당 4개의 치가 있고, 각 극은 고정자와 같은 간격의 치피치를 가진다. 극간 정렬상태는 (극1-극1')는 일치, (극3-극3')는 1/2 치피치 불일치, (극2-극2')는 (극1-극1')에 비해 1/4 치피치 불일치, (극4-극4')는 3/4 치피치 불일치한 거리를 갖는다. 상면에 모듈 A상, B상이 4개씩 2열로 배치되어 있고, 측면에는 각각 2개씩으로 구성하여 총 12개의 A-B 모듈로 높은 추력을 얻을 수 있도록 설계·제작되었으며, 구조적으로 원통형이나 양측식으로의 확장이 용이하다.

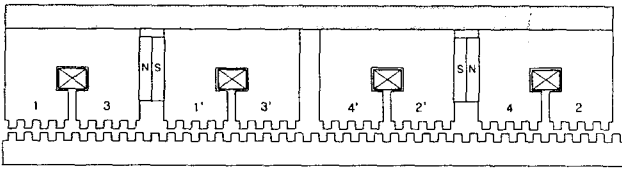


Fig. 1 Structure of HB Linear Pulse Motor

그림 2와 같이 'ㄱ'형태로 가동자를 서로 상면, 측면으로 90° 지지되어 상측-편측, 편측-상측으로 이탈되지 않으며, 가동자와 고정자는 공압 5.5kg/cm²으로 20μm의 공극을 유지하여 LM가이드 대신에 에어베어링 구조로 지지하고 있다.

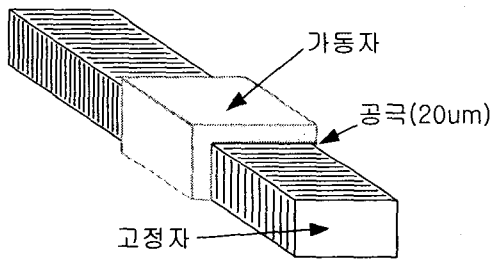


Fig. 2 Appearance and Air Bearing of LPM

선형 펄스 모터의 구동원리는 회전형 스테핑 모터와 유사하며, 가동자와 고정자의 공극 퍼미언스의 변화에 따라 전류의 자기저항이 작으면 흡인력인 추력이 발생하여 선형으로 이동하게 된다. 정현과 전류의 90° 위상차를 갖는 2상 전류를 인가하면 추력이 발생하여 이동하는데 여기에는 영구자석에 의한 추력성분과 코일전류에 의한 전자석 추력성분이 위치에 따라 합성되어 나타난 추력으로 이동하게 된다.

2.2 추력특성 분석

선형 추력을 해석하는 데는 여러방법이 시도되고 있지만, 소요 총 자속의 1/2 정도를 차지하는 영구자석을 가진 HB형에 대해서 자기 회로가 복잡하기 때문에 자기회로에서 에너지 분포의 작은 오차가 추력의 계산결과에서는 대단히 큰 오차로 나타나게

된다. 따라서 가동자의 변위에 따라 공극을 포함하는 자기 회로 전체의 변화를 정확히 계산할 필요가 있으며, 영구자석과 여자코일에 의해 여자되는 모든 극이 만드는 추력을 계산해야 한다.

선형 펄스 모터의 추력은 가동자와 고정자의 상대적인 위치에 따른 공극 퍼미언스 값 변화로 얻어지므로, 자속밀도의 정확한 분포를 얻기 위해서 공극 퍼미언스를 구할 필요가 있다. 자기회로의 해석에 필요한 공극에서의 자속밀도[B]를 구하는 방법에는 다음과 같은 방법이 있다.

- ① 퍼미언스 모델법: 가상 자속 흐름로를 직선과 원호로 구성된 퍼미언스식을 유도하여 해석하는 방법
- ② 수치해석법(유한요소법 등): 일정 해석영역에서의 자기 포텐셜을 이용하는 수치해석법
- ③ 속도기전력법 : 가동자의 변위에 따른 권선의 속도기전력으로부터 자속분포식을 찾는 방법

위와 같이 자속밀도의 자계가 구해지면 추력이나 수직력을 구할 수가 있다.

추력 특성을 분석하는 방법으로는 Lorentz 추력 계산법, 자기수반에너지법, Maxwell 응력법 등이 있으며, 모터의 구조적 특성에 따라 장단점이 있어서, 해석 대상의 기계적 형상을 고려하여 해석방법을 적용하고 있다.

모터가 단순한 구조이며, 자석과 코일사이의 공극자속밀도가 균일하다고 가정할 경우, 다음 Lorentz 추력 계산법을 이용할 수 있다.

[1] 로렌츠 힘 계산법

자속밀도 B[Wb]인 자계 내에 전류 i[A]가 흐르는 길이 l[m]의 도체가 있다면 이 도체에 작용하는 힘은 플레밍의 왼손법칙에 의해 식 (1)과 같이 계산할 수 있다.

$$f = n \cdot z \cdot B \cdot l \cdot I \quad (1)$$

여기서, n은 코일단면내의 코일턴수, z는 코일단면수, B는 자속밀도, l은 코일유효길이, I는 코일최대전류이다.

2차원 자장에서는 여자전류에 의해 가동자에 발생하는 자계의 방향이 x, y 성분으로 나뉘어졌을 때, 이 자계에 의해 고정자에 발생하는 와전류는 z 성분뿐이라면 자속밀도 \vec{B} 와 전류밀도 \vec{J} 사이에 발생하는 로렌츠 힘(Lorentz Force)는

$$\vec{F} = \vec{J} \times \vec{B} = -J_z B_y \vec{i} + J_z B_x \vec{j} \quad (2)$$

로 발생하는 식이나 주로 가동자 표면에 슬롯이 없는 평활한 구조의 모터 해석에 주로 쓰인다.

추력을 좀더 상세하게 해석하기 위해서는 위치에 따른 자속밀도의 변화와 코일에 흐르는 전류에 의하여 쇄교되는 자속밀도를 고려하여 해석영역을 미소체적에서 나누어 구하는 Maxwell 응력법이 있

다. 다음 식(3)은 유한요소법을 이용한 미소체적들의 응력의 합으로 추력을 계산하는 식이다.

$$F = \int_V J \times B dV = \frac{1}{\mu} \int_V \text{div} T dV = \frac{1}{\mu} \int_S T dS \quad (3)$$

여기서, J 는 전류밀도, T 는 Maxwell 응력(자기적 응력)이며, μ 는 투자율이다.

[2] 자기수반에너지법

“입력된 전기에너지는 저장된 자기에너지와 열로 소비되는 에너지의 합과 같다”는 에너지 보존법칙에 근거하여 해석하는 방법으로, 열로 소비된 저항이나 마찰 그리고 댐핑손실, 히스테리시스손, 와류손 등을 에너지보존계의 밖으로 가정하면, 다음 그림 3과 같이 쇄교자속 λ 와 변위 x 의 함수로 구성된 자기에너지 W_e , 인가전류 I 와 변위 x 의 함수로 구성된 자기수반에너지 W_c 만 남게 된다.

$$F = \frac{dW_c}{dx} = - \frac{dW_e}{dx} \quad (4)$$

(단, $W_c = \int_0^I \lambda dI$; 자기수반에너지)

$$W_{CA} = \int_0^I \lambda dI = \frac{1}{2} N_A I_A (\Phi_1 - \Phi_3) \quad (5)$$

$$W_{CB} = \int_0^I \lambda dI = \frac{1}{2} N_B I_B (\Phi_2 - \Phi_4)$$

여기서, λ : 쇄교자속,

$N_A I_A, N_B I_B$: 극당기자력[N/A]이다.

식 (5)으로 부터 A상, B상의 추력은 거리에 대한 편미분의 형태로 자기수반 에너지의 변화이므로 다음과 같이 정의할 수 있다.

$$F_A = \frac{dW_{CA}}{dx} = - K_f i_A \sin \frac{2\pi}{\tau} x \quad (6)$$

$$F_B = \frac{dW_{CB}}{dx} = K_f i_B \cos \frac{2\pi}{\tau} x$$

식 (6)에 의해서 전체 추력식은 식 (7)과 같이 나타낼 수 있다.

$$F_e(i_A, i_B, x) = F_A + F_B \quad (7)$$

저장에너지는 쇄교자속과 변위의 함수 $W_e(\lambda, x)$ 이며, 자기수반 에너지는 전류와 변위의 함수 $W_c(I, x)$ 이므로, 변위에 따른 추력을 계산하기 위해 저장에너지를 이용할 경우, 가동자의 위치에 따라 자기회로의 퍼미언스값이 비선형적으로 변화하며, 동시에 쇄교자속도 변화하므로 퍼미언스 변화분을 보상할 수 있도록 여자전류를 변화시켜야 하는 어려움이 있다. 그러나 자기수반에너지를 이용한다면 전류를 일정하게 유지하기는 쉬우므로 자기수반에너지를 이용한 해석방법이 주로 이용되고 있다.

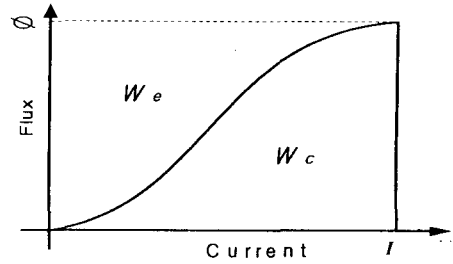


Fig. 3 Curve of Magnetic Co-Energy

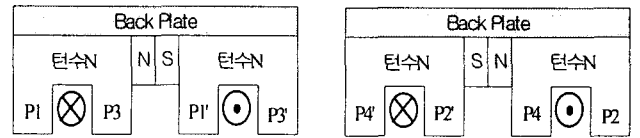


Fig. 4 Analysis model of Mover

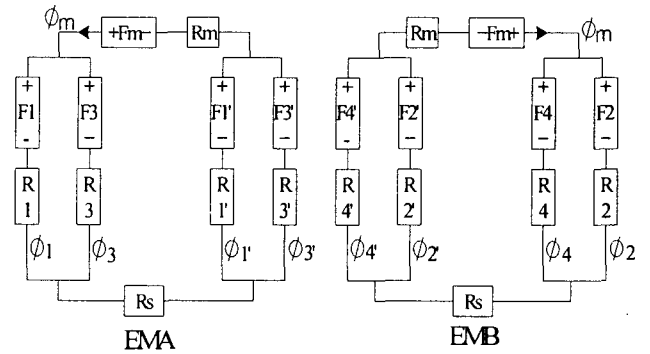


Fig. 5 Magnetic equivalent circuit of LPM

그림 4의 해석모델로부터 여자권선으로부터 보면, A상, B상의 상호 자기적인 영향을 무시할 수 있고, 와전류를 고려하면 그림 5를 토대로 A상, B상의 등가자기회로는 식 (8)~(9)처럼 각 극의 기자력 차의 합으로 표현할 수 있다.

$$\begin{pmatrix} F_1 = -F_3 & F_1' = -F_3' \\ F_1 = -F_1' & F_3 = -F_3' \end{pmatrix} F_A = NI \quad (8)$$

$$\begin{pmatrix} F_2 = -F_4 & F_2' = -F_4' \\ F_2 = -F_2' & F_4 = -F_4' \end{pmatrix} F_B = NI \quad (9)$$

이를 기초로 한 전압방정식 및 자속식은 식 (10)으로 정리할 수 있다.

$$V_k = R_k i_k + \frac{d\psi_k}{dt}; \psi_k = \sum_p L_{kp} i_p; k=1, \dots, m$$

$$\ddot{x} = \frac{1}{M} \left[\frac{1}{2} \sum_p \sum_q i_p i_q \frac{dL_{pq}}{dx} - \sum F_d - \sum F_l \right] \quad (10)$$

여기서, m 은 상수, M 은 가반중량, $\sum F_d$ 는 소오 추력, $\sum F_l$ 는 부하추력이다.

발생자속은 코일자속과 영구자석 자속의 합으로 요약할 수 있다. 따라서 각 상에 발생하는 모터 추

력은 Magnetic Coenergy의 가동자의 변위에 따른 권선의 속도 기전력으로 부터 자속분포식을 찾는 방법으로 추력식을 정형화 할 수 있다.

$$\begin{aligned}
 F_r(\text{전체추력}) &= \dots\dots\dots(12) \\
 &= -\frac{1}{2} \sum_{i=1}^4 \phi_i^2 \frac{\partial R_i}{\partial x} - \frac{1}{2} \sum_{i=1}^4 \phi_i'^2 \frac{\partial R_i'}{\partial x} \\
 &= \frac{1}{2} \sum_{i=1}^4 \frac{\phi_i^2}{P_i^2} \frac{\partial P_i}{\partial x} + \frac{1}{2} \sum_{i=1}^4 \frac{\phi_i'^2}{P_i'^2} \frac{\partial P_i'}{\partial x} \\
 &= \frac{1}{2} \frac{2\pi N_r}{\tau} \sum_{i=1}^4 \frac{\phi_i^2}{P_i^2} \frac{\partial P_i}{\partial \theta} + \frac{1}{2} \frac{2\pi N_r}{\tau} \sum_{i=1}^4 \frac{\phi_i'^2}{P_i'^2} \frac{\partial P_i'}{\partial \theta}
 \end{aligned}$$

단, $\theta = N_r \theta_m$: 전기각

$\theta_m = 2 \frac{\pi}{\tau} x$: 기계각

N_r : 가동자 전체에 포함되는 고정자 치 갯수

[3] 유한요소 계산법

본 연구에서는 수치적인 유한요소해석을 하지 않고, Ansoft(사)의 Maxwell EMpulse Tools을 이용하여 2D로 Design하여 실측거리에 해당하는 모듈1개에 대해 선형 추력을 시뮬레이션하였다. 상면 8개와 측면 4개의 모듈이 있어 12 배수화하여 전체 추력값과 각종 파라미터의 값을 획득하여 실험결과에 제시하였다.

3. 추력 측정장치 구성

3.1 추력 측정원리

선형 추력은 기존 회전형 토크 측정법과는 달리 정지시에 기준 위치에 대한 상대적인 정추력과 동작시의 동추력으로 구별하여 측정하고 있다. 선형 모터 제조회사에서는 모터 용량별로 제품에 맞는 추력 측정장치를 구비해 놓기가 그리 쉽지 않은 편이다. 그림 6은 고정자를 기준으로 상대적으로 가동자에 추력이 가해질 때, 가동자가 복귀될 때의 스프링 탄성을 추력값으로 취하며, 간이계측기를 사용할 경우, 가동자를 로드셀로 밀어서 이탈하는 순간을 모터의 최대 추력값으로 얻고 있다. 추력의 세밀한 패턴을 알기 쉽지 않으며, 오직 제어기의 성능에만 의존하고 있다.

스프링, 질량, 완충·제동장치의 추력측정 모델은 그림 6과 같이 기본모델로부터 마찰력을 무시하여 상태방정식을 세우면 식 (13)으로 나타낼 수가 있다.

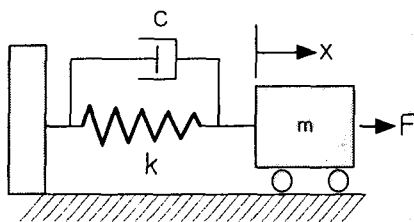


Fig. 6 Measurement model of Thrust Force

$$m \ddot{x} + c \dot{x} + kx = F \quad (13)$$

여기서, m 은 가동자 질량, c 는 제동상수, k 는 스프링상수, x 는 위치이동, F 는 추력이다. 만약, 제동특성과 스프링특성을 무시하여 추력을 측정하고자 할 경우, $F = m \ddot{x} = m a$ 로 간략화되어 가동자를 구동시켜 최대가속도를 얻으면 동추력값을 얻을 수 있다.

3.2 실험장치 구성

본 연구의 추력 측정대상인 HB형 2상 4극 선형 펄스 모터의 사양은 표 1과 같다. 추력 측정장치는 수치적인 계산과 MAXWELL에서 나온 데이터를 토대로 로드셀을 선정하였고, 변위센서는 분해능 1 μ m, 측정구간 2.5mm의 Mitutoyo의 Digital Indicator를 이용하였다. 그림 과 같이 위치변위 따른 로드셀의 휘스톤 브리지의 불평형값이 Load Indicator에 디지털 데이터로 변환되어 Serial 통신으로 컴퓨터에 송신된다. 추력측정의 사용자 GUI 환경은 RS-232C의 Com Port 2개를 동시에 Open하여 위치 신호와 추력 데이터를 동기시켜 정확한 계측이 이루어 지도록 하였다.

표 1. HB형 선형 펄스 모터의 사양

Stroke	1000[mm]	Exciting Phase	2
Tooth Pitch	1.28[mm]	Current/phase	6A
Air Gap	20 μ m	Resistor/phase	1.3[Ω]
Air Pressor	5.5[kg/cm ²]	Inductance/phase	4.7[mH]

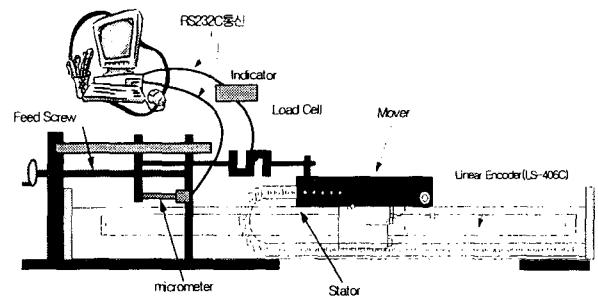


Fig. 7 Configuration of Measurement System for Thrust Force

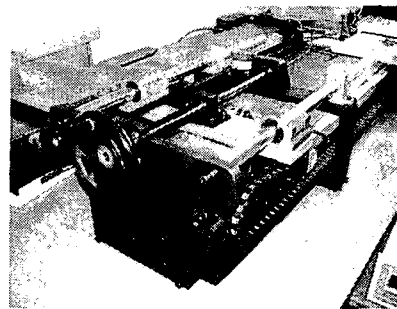


Fig. 8 Manufactured Measurement System of Thrust Force

4. 결과 및 고찰

4.1 추력측정 및 계산

여러 가지 방법으로 추력을 계산한 후, 각 방법의 효율을 비교실험하기 위해, 직접 정확한 추력을 측정하였다. 측정모터의 여자시의 최대 수평추력은 약 70[kg.f]이고, 이를 다음 방법들의 결과에 대한 기준치로 설정하였다. Lorentz추력을 계산하기 위해서는 영구자석과 코일사이의 공극에서 자속밀도 분포를 먼저 구해야 하며, 공극자속밀도는 영구자석성분과 코일성분으로 구분되나 코일성분은 상대적으로 적어 이를 무시하여 계산하였다. 코일이 없는 고정자에 대하여 1 치피치 이동구간 내에 영구자석에 의한 자속밀도가 가동자의 위치에 따라 변화하는 것과 코일에 의한 자속밀도와 영구자석에 의한 자속밀도의 중첩효과를 고려하기 위하여 유한요소법을 이용한 Maxwell 응력법의 수치해석을 수행하여 그림 9~그림 12와 같은 결과를 얻었다.

그림 13은 제작된 추력 측정장치에서 로드셀의 Indicator와 Micrometer로부터 각각 RS232C 직렬 통신을 이용하여 정추력 중에서 Detent Force 30[kg.f]를 측정하는 사용자 계측화면이며 Text File로 저장하여 Excel로 Data화 할 수 있도록 하였다.

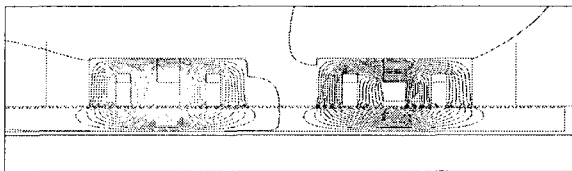


Fig. 9 2D Flux Density of Mover

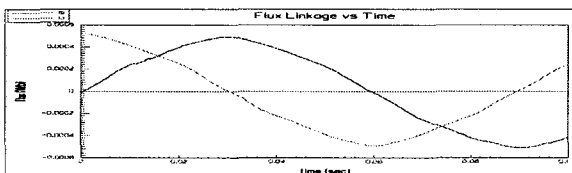


Fig. 10 Flux Density

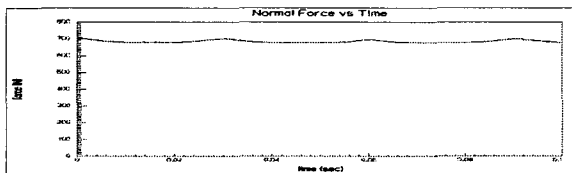


Fig. 11 Normal Force

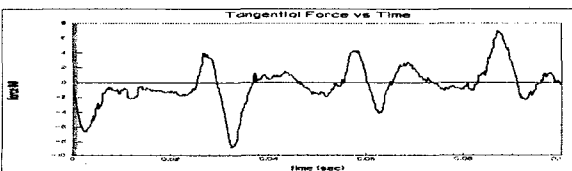


Fig. 12 Tangential Force

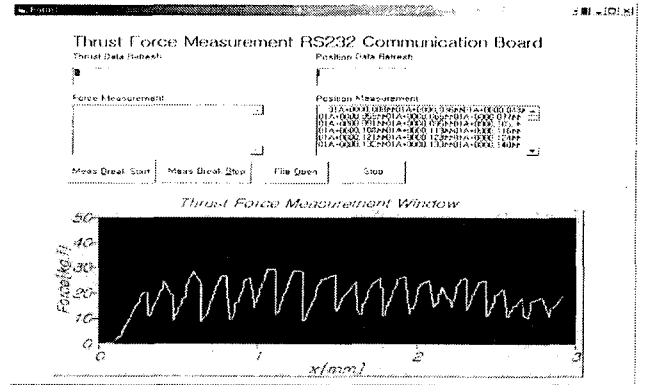


Fig. 13 User Interface of Measurement for Thrust Force

4.2 추력 측정 고찰

본 연구에서 사용한 추력계산방법의 추력값과 추력측정장치를 설계·제작하여 가동자의 코일에 여자전류를 인가하여 정추력을 측정하였다. 추력측정값과 Maxwell Tools을 이용한 가상치와 비교한 결과, 대체로 약 68[kg.f]의 값을 얻을 수가 있었다. 또한 여자전류의 크기에 따라 추력의 최대값과 추력곡선이 조금씩 다음을 알 수 있었으며, 동추력을 얻고자 할때는 선형밸트형이나 병렬로 모터를 설치하여 절대 기준위치를 변화시키면서 측정하는 장치를 구성해야 정확한 수치를 얻을 수 있을 것이라 생각된다.

5. 결론

본 논문에서 HB형 리니어 펄스모터의 추력을 해석하고 측정장치를 설계하여 측정법의 비교 분석하였다. 특성을 평가하기 위해 위치에 따른 추력을 직접 측정하여 수치해석에 의한 추력값과 비교분석하여 설계 및 성능평가에 알맞은 방법을 제시하였다.

이 논문은 한국과학재단 지정 전남대학교 고품질 전기전자부품 및 시스템 연구센터의 연구비 지원에 의해 연구되었음.

참고 문헌

- [1] 김성현, 이은용, 김일중, 이동주, "2상 8극 HB형 LPM의 구동방식에 따른 추력의 고조파 해석", 전기학회 하계학술대회, pp. 228-231, 1996.
- [2] 김성중, 이은용, 김성현, 이동주, 오영웅, "리니어 펄스 모터의 치형상에 따른 수직력 및 진동특성 해석", '99 대한전기학회 하계학술대회 논문집, pp. 151~153, July 1999.
- [3] 조운현, 구대현, 이재봉, "서보 액츄에이터용 Hybrid형 LPM의 정추력 및 수직력 계산", '94 대한전기학회 하계학술대회 논문집, pp. 43~45, July 1994.