

# 영구자석 여자 횡축형 선형전동기의 추력맥동 저감 제어기법

論文

53B-1-3

## Control Method for Minimizing Thrust Ripple of PM Excited Transverse Flux Linear Motor

安鍾普\*·姜道鉉\*·金志元\*·鄭壽鎭\*\*·林太潤\*\*·朴俊顯\*\*\*

(Jong-Bo Ahn, Do-Hyun Kang, Ji-Won Kim, Soo-Jin Jung, Tae-Yun Lim, June-Ho Park)

**Abstract** - Permanent magnet-excited transverse flux linear motor(TFLM) is known to have more excellent ratio of force to weight than any other linear motors. But, thrust generated by phase current is non-linear with regard to current and relative position like switched reluctance motor. This makes current and speed controller design difficult. This paper presents a method on minimization of thrust ripple of permanent magnet-excited transverse flux linear motor. Using genetic algorithm(GA), optimal current waveform can be found under the constraint conditions such as current limit, minimum of ohmic loss and limited rate of change of current etc. The effectiveness is verified through computer simulation and experimental test results.

**Key Words** : Permanent magnet-excited transverse flux linear motor, Speed control, Thrust ripple, Genetic algorithm, Optimization technique, Thrust

### 1. 서 론

영구자석여자 횡축형 선형전동기(permanent magnet excited transverse flux linear motor, 이하 TFLM)는 기존의 종축형 전동기(longitudinal flux machine)와는 달리 가동자의 이동방향이 전류의 방향과 동일하고 자속과는 횡방향인 하이브리드형 동기전동기의 일종이다. 구조적으로는 전기회로와 자기회로가 분리되며 고정자나 가동자의 한쪽에 링형태의 전기자권선을 사용하므로 엔드 와인딩(end winding)을 제거할 수 있어 전동기의 체적을 줄일 수 있다. 또한 영구자석을 사용하고 있으므로 10[kW]급 전동기의 경우 다른 형태의 전동기에 비해 중량 대비 출력비가 3배 정도 높으며 효율이 10[%] 이상 높고 운전 역률도 높은 장점이 있는 전동기이다.[1-3] 이러한 TFLM은 이송장치, 교통분야에 적용이 가능한 전동기이며 상을 서로 분리하여 설치함으로써 자기간섭이 없고 위치에 따른 자로의 길이 변화가 적어 소음 및 진동이 낮은 특징도 갖고 있다.

그러나 TFLM은 스위치드 릴럭턴스전동기(switched reluctance motor, 이하 SRM)나 혹은 하이브리드형 리니어 펄스전동기(linear pulse motor)와 같이 발생하는 추력의 특성이 고정자와 이동자의 상대적 위치 및 전류의 크기에 따라 비선형적인 특성을 가지므로 높은 출력 밀도에도 불구하고 추력의 맥동이 커서 서보형 전동기로서의 적용에는 어려

움이 있다. SRM은 이중 돌극 구조 때문에 내재하는 토크 맥동을 가지고 있으며 각 상은 서로 분리되어 설치되고 자기적인 결합이 작기 때문에 여타의 다른 교류전동기처럼 기준좌표계 변환을 통한 일정 자속의 제어가 불가능하며 TFLM도 이와 비슷한 특성을 가진다.[4, 5]

본 논문은 SRM 등 비선형적 특성을 갖는 전동기 등의 제어에 일반적으로 사용되고 있는 토크 맥동 저감 제어방법을 TFLM에 적용하기 위한 연구로서 그 목적은 TFLM의 추력맥동을 최소화하여 서보전동기로서의 성능을 갖게 하는 것이다. 기본적인 접근 방법은 토크분배함수(torque sharing function, TSF)의 개념을 사용하는 것이다.[6, 7] 2상 TFLM의 경우 각 상이 발생하는 추력은 비선형적이거나 2상의 합성 추력을 일정하게 제어함으로써 전체적인 출력 추력을 일정하게 할 수 있으며 따라서 속도제어의 성능을 개선하고 가계적인 진동이나 이에 수반하는 소음을 최소화하는 것이다. 본 논문에서는 토크분배함수의 최적화를 위해서 유전알고리즘(genetic algorithm)을 사용하며 목적함수는 합성추력을 일정하게 하는 조건에서 소비전력을 최소화하는 조건과 전류제어를 용이하게 하기 위해 전류의 변화율을 최소화 하는 조건을 복합적으로 사용하였다.[8, 9] 기존의 속도제어기-전류제어기의 구조를 속도제어기와 전류제어기 사이에 추력최적화 전류발생기를 삽입하는 구조로 변경하였다. 따라서 속도제어기의 출력인 추력명령은 최적전류발생기에서 추력과 위상을 파라미터로 미리 결정된 테이블로부터 전류패턴을 발생시키게 되고 이를 전류제어기의 입력 즉, 전류기준으로 사용하게 된다. 이러한 과정을 통하여 추력은 속도제어기가 출력한 명령을 추종하게 된다.

본 논문에서는 컴퓨터 시뮬레이션과 실험을 통하여 제안한 제어기법의 유용함을 검증하였다.

\* 正 會 員 : 한국전기연구원 Mechatronics 연구그룹

\*\* 正 會 員 : 嶺南大學校 電氣工學科 博士課程

\*\*\* 正 會 員 : 釜山大學校 電氣工學科 工學博士·教授

接受日字 : 2003년 5월 13일

最終完了 : 2003년 11월 11일

## 2. 영구자석 여자 횡축형 선형전동기

영구자석 여자 TFLM의 구조가 그림 1에 나타나 있다. 그림에서 보는 바와 같이 이동자는 한 쌍의 영구자석을 서로 마주보게 하여 동일 자극방향으로 하여 여러 쌍을 피치 간격인  $2\tau_p$  구간마다 이동방향으로 배치되어 있는 구조이며 고정자는  $2\tau_p$  간격으로 자극을 배치하고 이동방향으로 고정자권선이 감겨져 있으며 반대편에는 자극이  $\tau_p$ 만큼 엇갈리게 배치하고 권선은 반대방향으로 감겨져 있다. 따라서 직렬 연결된 권선에 전류를 흘리면 이동자의 좌측과 우측은 항상 반대 방향의 자극을 갖게 된다. 이러한 구조에서 보면 전류의 방향은 이동자의 이동방향과 동일하며 자속은 이동방향과는 수직인 횡방향이 된다. 즉, 양쪽 측면의 고정자 자속이 이동방향과는 횡방향으로 영구자석의 자속과 합쳐지게 되고 이는 공극에서의 자속밀도를 증가할 수 있게 된다. 따라서 이러한 구조의 TFLM은 전기회로와 자기회로를 분리할 수 있고 출력밀도를 증가할 수 있는 장점이 있다. 표 1에 시작품의 사양이 나타나 있다.

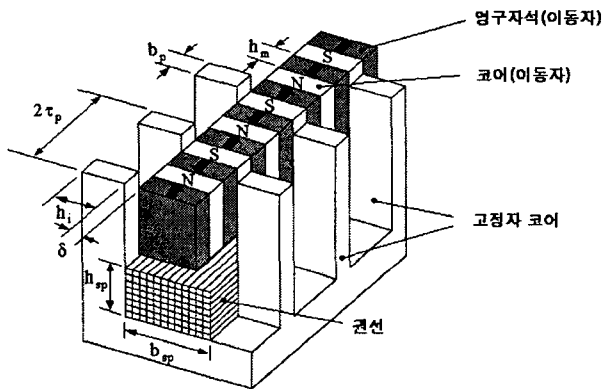


그림 1. 내부이동자형 영구자석여자 횡자속 선형전동기  
 Fig. 1. PM-excited transverse flux linear motor with inner mover

표 1 시작품의 사양

Table 1 Specification of the prototype TFLM

구분	사양	비고
극(공δ)	0.7mm	-
극간격( $\tau_p$ )	20mm	-
영구자석 두께( $h_m$ )	10mm	$h_m/\tau_p=0.5$
Pole폭( $b_p$ )	14mm	$b_p/\tau_p=0.7$
극길이( $h_i$ )	20mm	-
권선창 높이( $h_{sp}$ )	20mm	-
권선창 폭( $b_{sp}$ )	30mm	-
1차(고정자) 치수	70mm×65mm×800mm	-
2차(이동자) 치수	28mm×20mm×150mm	-
권선 치수	1mm×3mm	-
권선수	140회	-

그림 2는 2상 TFLM의 각상 전류의 방향과 이동자의 상대위치에 따른 발생 추력이 나타나 있다. 그림 3은 한상에 대해서 전류를  $-20[A]$ ~ $+20[A]$ 까지 5[A]씩 증가시키면서 인가했을 때 상대위치에 따른 발생추력의 크기가 표시되어 있다. 한상의 권선에 전류를 흘리면 좌측과 우측에 각각 S, N 극이 생기고 이는 이동자에 설치된 영구자석에 의해 현재의 위치에서는 정방향과 부방향의 추력이 균형을 이루고 있다. 그러나 약간 위치가 이동하면 고정자의 자극과 영구자석의 자극이 정방향의 추력을 발생하여  $\tau_p$  만큼 이동하게 된다. 이 상태에서 전류의 극성이 바뀌지 않으면 부의 추력을 발생하게 된다. 즉, 1상의 TFLM은 정렬된 위치에서는 추력이 0이 되어 기동할 수가 없으며 반피치를 기준으로 부의 추력을 발생하게 된다. 따라서 일반적으로는 다상으로 제작하게 되며 상대적인 위치에 따라 전류의 방향을 반대로 해주어야 원하는 방향의 추력을 얻을 수 있다. 따라서 정 혹은 부의 추력을 얻기 위해서는 전류의 방향을 바꾸어주어야 한다. 이는 SRM과는 달리 양극형 전력변환장치 즉, 풀브리지 인버터로 구동되어야 함을 의미한다.

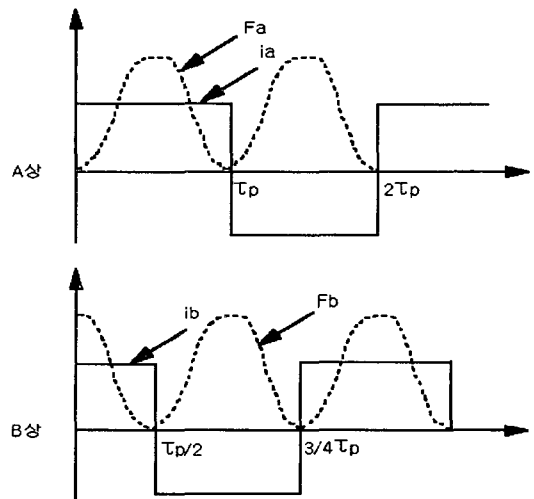


그림 2. 여자전류와 발생추력의 관계  
 Fig. 2. Relation between excited current and thrust

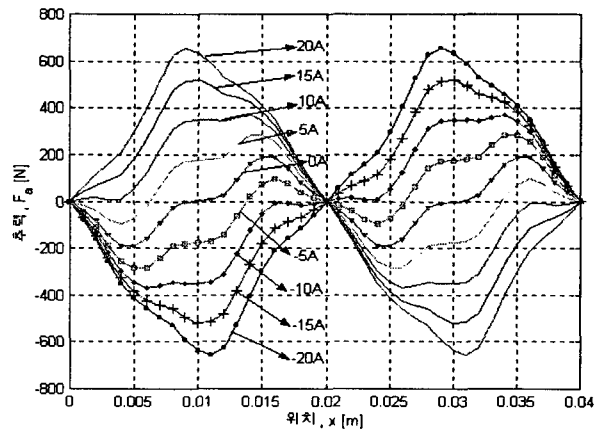


그림 3. TFLM의 정추력 특성  
 Fig. 3. Static thrust characteristics of TFLM

### 3. 영구자석여자 횡축형 선형전동기의 모델

다상 TFLM은 단상 모듈을 이동방향 쪽이나 혹은 평행하게 설치하여 기계적으로 이동자를 연결하되  $\tau_p$ 만큼 엇갈리게 설치하므로 상간의 자기적인 간섭이 없다. 따라서 단상 TFLM 모델로 전압방정식 및 토오크 방정식의 유도가 가능하다. 단상 TFLM의 전압 방정식은 아래의 식 (1)과 같다.

$$v = R_s i + \frac{d\lambda(i, \theta)}{dt} \quad (1)$$

여기서,  $v$ 는 상의 인가전압,  $i$ 는 전류,  $R_s$ 는 상저항,

$\lambda(i, \theta)$ 는 쇄교자속,  $\theta = \frac{x}{\tau_p} \cdot \pi$  ( $x$ 는 위치)의 관계이다. 쇄교자속은 상권선의 기자력에 의한 성분과 영구자석에 의한 성분의 합으로 표시할 수 있으므로 이를 식으로 표시하면 아래의 식(2)와 같다.

$$\lambda(i, \theta) = L(i, \theta)i + \lambda_{pm}(\theta) \quad (2)$$

여기서  $\lambda_{pm}(\theta)$ 는 영구자석에 의한 자속이며  $L(i, \theta)$ 는 상 인덕턴스함수이다.

식(2)를 식(1)에 대입하고 정리하면

$$\begin{aligned} v &= R_s i + \frac{d(L(i, \theta)i + \lambda_{pm})}{dt} = R_s i + \frac{d(L(i, \theta)i)}{dt} + \frac{d\lambda_{pm}}{dt} \\ &= R_s i + L(i, \theta) \frac{di}{dt} + \frac{dL(i, \theta)}{d\theta} \frac{d\theta}{dt} + \frac{d\lambda_{pm}}{d\theta} \frac{d\theta}{dt} \\ &= R_s i + L(i, \theta) \frac{di}{dt} + \left\{ \frac{dL(i, \theta)}{d\theta} + \frac{d\lambda_{pm}}{d\theta} \right\} \frac{d\theta}{dt} \end{aligned} \quad (3)$$

으로 표시할 수 있다. 여기서 우변의 각항은 저항강하분, 인덕턴스 강하분 및 역기전력이다.

또 발생하는 상당 추력은 일정 전류 상태에서 코에너지(coenergy)의 위치변화분으로 정의되므로

$$F_{ph}(i, \theta) = \frac{\partial}{\partial \theta} W'(i, \theta) \Big|_{i=constant} \quad (4)$$

여기서 코에너지는  $W'(i, \theta) = \int_0^i \lambda(i, \theta) di$ 로 주어진다.[4] 식(2)를 여기에 대입하여 식(4)를 전개하면 추력은 다음의 식으로 주어진다.

$$F_{ph}(i, \theta) = \left\{ \frac{d\lambda_{pm}}{d\theta} + \frac{1}{2} \frac{dL(i, \theta)}{d\theta} \right\} \cdot i \quad (5)$$

따라서 TFLM의 추력은 영구자석에 의한 추력 성분과 가변 자기저항에 의한 추력 성분의 합으로 표시된다. [11]

### 4. 영구자석여자 횡축형 선형전동기의 제어기 설계

위의 그림 3에 나타난 것처럼 TFLM의 제어는 반피치를 기준으로 추력이 반전되므로 이를 정 혹은 역 한 방향 추력으로 하기 위해서는 전류의 극성을 바꾸어주어야 하므로 양극성의 전류제어가 필요하게 된다. 장방형 전류를 흘릴 때의 전류와 각상의 추력 및 합성 추력이 아래의 그림 4에 나타나 있으며 전류의 방향만을 전환하는 형태의 속도 및 전류제어기의 일반적인 구조가 그림 5에 나타나 있다.

아래 그림 4에 나타난 바와 같이 18[A]의 장방형 전류인 가시의 2상의 합성추력은 200[N] 이상의 추력 맥동이 나타

나는 것을 볼 수 있다. 이러한 추력의 맥동에 의해 발생하는 속도의 맥동 혹은 오차를 속도제어기가 보상하는 것은 속도제어기의 주파수 특성 및 전체 기계계의 동특성으로 인해 제한이 따른다. 따라서 속도제어기의 출력인 추력 명령을 적절한 전류명령으로 변환해주는 추력제어기가 필요하게 된다.

가장 일반적으로 사용되는 추력제어기법 중의 하나가 토오크분담함수(Torque Sharing Function, TSF) 기법이다. 이 방법은 다상 전동기의 경우에만 적용되며 직선전동기에도 적용 가능하다. 기본 원리는 각상의 추력을 적당히 배분하여 합산되는 추력이 일정하게 되도록 전류를 제어하는 것이다. 아래 그림 6에 나타나 있는 것처럼 원하는 추력  $\tau_d$ 를 얻기 위하여 각상에 추력을 분배하여 이 추력을 발생할 수 있는 전류를 계산하여 이것을 전류명령으로 하여 전류제어하는 방법이다.[4-6] 전기각으로  $\pi/2$ 떨어진 2상 전동기의 경우 추력은  $\pi/2$ 를 주기로 반복적으로 발생하므로 이 구간에 대해서만 미리 계산하면 된다. 이를 수식으로 나타내면

$$\tau_d(i, \theta) = h_1(i_a, \theta) + h_2(i_b, \theta + \pi/2) \quad (6)$$

의 형태로 되며  $h_1, h_2$ 는 각상으로 분배되는 추력의 크기이며 전류, 전압제한조건 등을 고려해도 무수히 많은 조합으로 결정될 수 있다. 따라서 추력의 분배에 있어 특정 제한조건을 두어 최적화기법으로 분배할 수 있다.

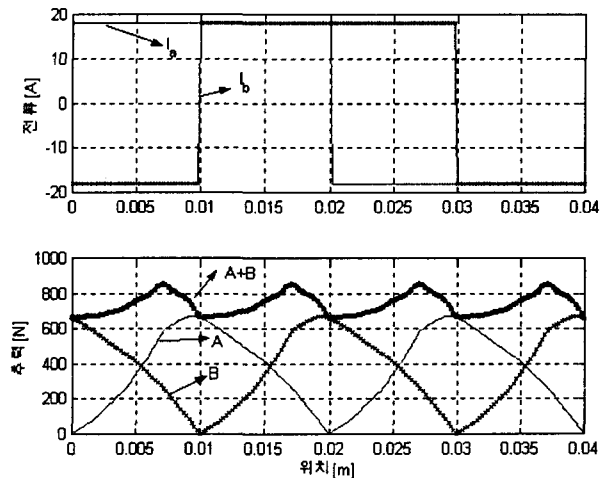


그림 4. 장방형 전류 인가시의 각상 추력 및 합성 추력 (위 : 전류, 아래 : 추력, 실선 : A상, 점선 : B상)

Fig. 4. Thrust per phase and summed thrust when square wave current applied

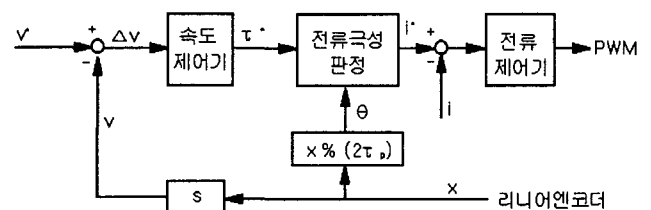


그림 5. 속도 및 전류제어기

Fig. 5. Speed and Current Controller

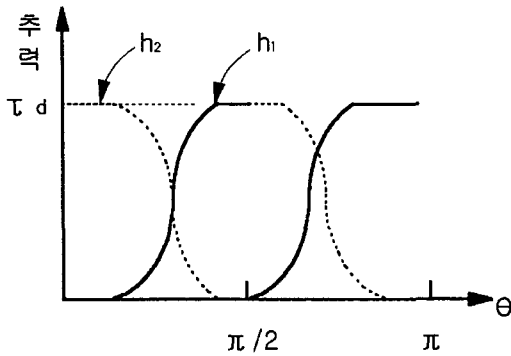


그림 6. 토크 분배 함수  
Fig. 6. Torque Sharing Function

가장 간단한 TSF는 각상의 합성추력에 대하여 각상의 전류를 동일하게 분배하는 방식이다. 합성된 추력에 대하여 정규화된 추력을 얻기 위한 전류의 크기를 구하고 이를 각상에 동일하게 적용하되 이동자의 상대적인 위치에 따라 전류의 방향만을 바꿔주는 방식이다. 이 경우 분배된 추력은 정규화된 추력의 크기에 완벽히 일치하나 다음과 같은 두 가지 문제점을 가지게 된다. 첫째, 일정한 전류에 대해서 이동자의 상대적인 위치에 따라 발생하는 추력의 크기가 다르며 도 불구하고 동일한 크기의 전류를 흘리므로 효율이 감소한다는 점이다. 즉, 정렬(aligned) 위치 부근에서는 발생하는 추력은 이 보다 90° 뒤지거나 앞선 위치에 비해서 매우 작을에도 불구하고 동일한 전류를 흘리도록 분배함에 따라 이 부근에서의 손실이 증가하는 것이다. 둘째, 전류파형이 이동자의 상대적인 위치가 변화에 따라 전류의 극성이 스텝으로 급격하게 변화에 따라 전류제어기의 응답성을 떨어뜨리고 이에 따른 발생 추력의 감소는 결국 추력 맥동으로 나타나게 된다는 점이다.

이러한 문제를 해결하기 위해서는 다양한 최적화기법들을 이용하여 최적의 TSF를 찾는 것이 가능하나 본 논문에서는 미분 가능한 조건이 불필요하고 광범위한 검색이 가능한 유전알고리즘을 사용하여 이 최적화 문제에 접근하였다.[8, 9]

분배함수인  $h_1, h_2$ 의 형태는 특징하게 한정할 수 없고 이 조건으로는 유전알고리즘을 적용할 수 없기 때문에  $[0, \pi/2]$  구간을 아래와 같이 5개의 대응좌표로 설정하고 이를 최소자승법으로 아래와 같은 5차함수로 근사하였다.

$$[\theta, \tau] = [(\theta_0, \tau_0), (\theta_1, \tau_1), (\theta_2, \tau_2), (\theta_3, \tau_3), (\theta_4, \tau_4)]$$

$$(\tau) Fit(\theta) = x_1 + x_2\theta + x_3\theta^2 + x_4\theta^3 + x_5\theta^4$$

여기서  $\theta_x(x=0 \dots 4)$ 는  $[0, \pi/2]$  구간 내의 임의의 위치이고  $\tau_x(x=0 \dots 4)$ 는 그 위치에서의 목표치 추력이 된다. 5개의 변수 중에서  $\tau_0, \tau_4$ 는 각각 0과  $\pi/2$ 에서의 추력 값이므로 각각 0[N]과 정규화된 추력인  $\tau_d$ [N]이므로 나머지 3개의 변수만으로  $[0, \pi/2]$  구간에서의 추력을 표현할 수 있다. 아래 그림 7에  $\tau_d = 700$ [N]인 경우의 한 세대 내에서의 개체군과 이들의 근사함수가 나타나 있다.

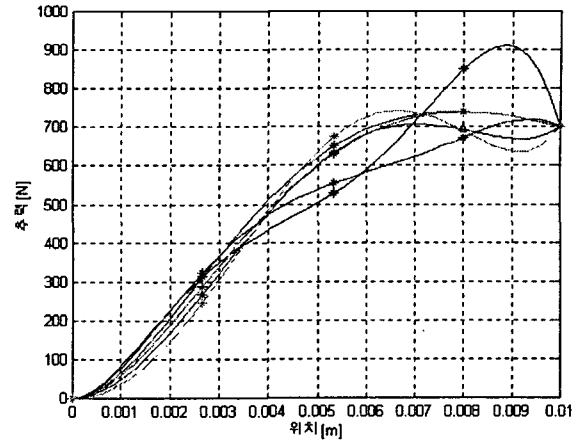


그림 7. 추력 할당 예 ( $\tau_d = 700$ [N])  
Fig. 7. Example of Torque Sharing Function ( $\tau_d = 700$ [N])

유전알고리즘은 적합도함수(fitness function)를 이용하여 최적화 문제를 푸는 방식으로서 TSF의 최적화에서 적합도함수는 아래와 같이 전류의 변화율과 전력손실을 최소로 하는 것으로 설정하였다.

$$f_i = \lambda_1(\Delta i / \Delta \theta)^2 + \lambda_2 i^2 \quad (8)$$

여기서  $\lambda_1, \lambda_2$ 는 0과 1사이의 값이며  $\lambda_1 + \lambda_2 = 1$ 인 관계이다. 이러한 적합도함수는 전류제어기가 잘 추종하기 위한 전류기준의 발생과 전력손실을 최소로 하는 것을 동시에 고려한 것이다. 아래의 그림 8에 각각의 정규화된 추력, [0, 200, 400, 600, 700][N]에 대한 최적화된 전류파형이 나타나 있다. 전류의 변화율이 급격하게 변화하는 것이 없어 전류제어기의 추종이 용이하며 0,  $\pi, 2\pi$  부근에서 전류의 방향이 전환될 때도 낮은 전류 대역에서 극성이 반전되게 되었다. 그림 9에는 600[N]인 경우의 각상의 추력과 합성 추력이 나타나 있다. 위의 그림 4에 비해 추력의 맥동이 현격하게 감소함을 볼 수 있다.

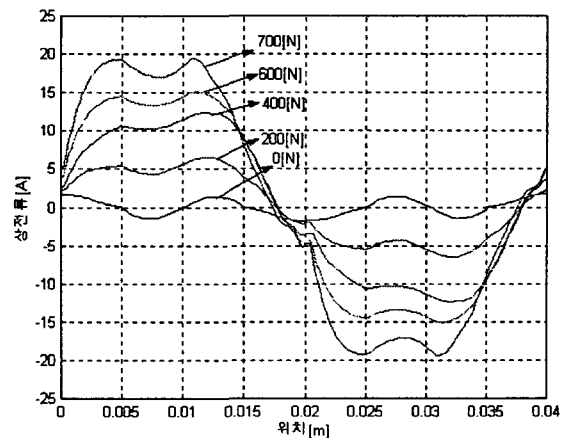


그림 8. 최적화된 전류 명령  
Fig. 8. Optimized Current Reference

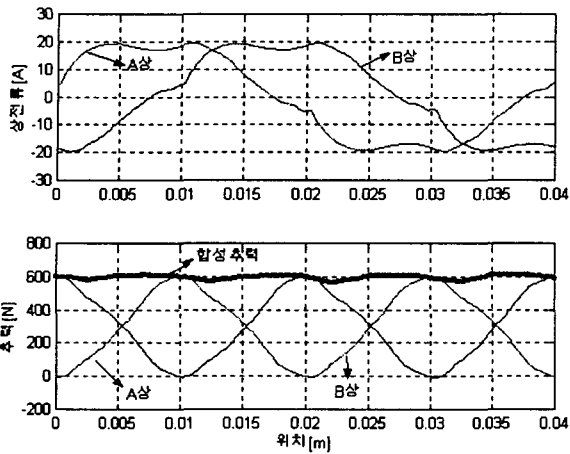


그림 9. 600[N] 시의 전류 및 추력 파형  
Fig. 9. Waveform of Current and Thrust at 600[N]

5. 모의시험 및 실험 결과

설계된 시제품 전동기와 제어기의 성능을 검증하기 위한 모의실험은 Matlab을 이용하여 구현하였다. 모의실험 모델은 크게 제어기, 전동기 모델, 기계방정식모델로 구분되어 있으며 제어기는 속도기준 발생기, 속도제어기, 전류제어기 및 전력변환장치 모델로 구성되어 있고 전동기 모델은 유효요소법으로 구한 정추력 특성곡선과 자속곡선을 이용하여 인덕턴스 및 역기전력을 먼저 구하고 이들과 전력변환기의 출력전압으로부터 전압방정식을 풀어 전류를 결정하게 된다. 각상이 발생한 추력은 합해져서 기계방정식의 입력이 되고 여기에서 속도와 위치가 출력된다. 아래 그림 10에 전체적인 모의실험 블록도가 나타나 있다.

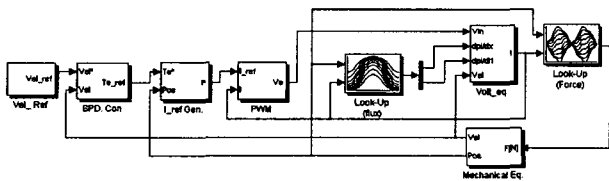


그림 10. 전체 모의시험 블록도  
Fig. 10. Overall block diagram for simulation

다음에 주요 블록의 기능에 대해 설명하기로 한다. 그림 11은 속도제어기 모델로서 비례-적분형 제어기를 사용하였으며 출력에 추력제한기를 두었다. 그림 12는 전류기준발생기와 전류제어기 모델을 보여준다. 전류기준발생기는 속도 제어기의 출력인 추력 명령을 전류명령으로 바꿔주는 것으로서 그 입력은 속도제어기의 출력과 이동자의 위치가 된다. 위의 것은 위치에 따라 정현파 전류명령으로 단순히 변환해주는 것이고 아래의 것은 본 논문에서 제안하는 추력제어기의 모델이다. 이 전류명령은 좌측의 전류제어기에서 전동기 단자전압으로 변환된다. 전류제어기는 아래 그림 13에서 보는 것처럼 히스테리시스형을 사용하였다.

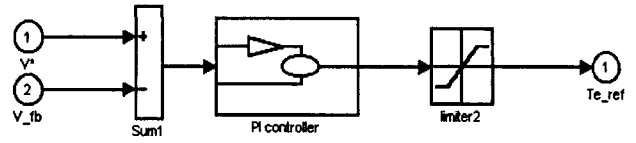


그림 11. 속도제어기 모델  
Fig. 11. Model of speed controller

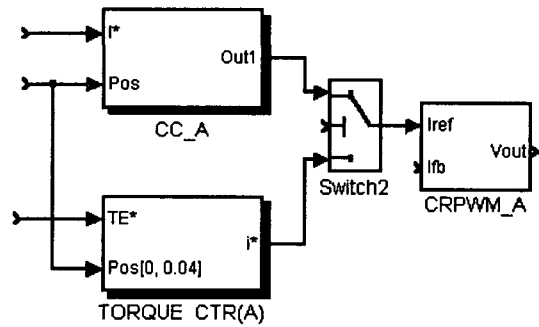


그림 12. 전류제어기 모델  
Fig. 12. Model of Current Controller

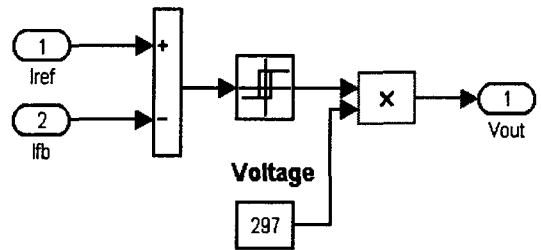


그림 13. 전력변환기 모델  
Fig. 13. Model of power amplifier

그림 14는 전압방정식 모델로서 식(3)을 푸는 과정이다. 즉, 전동기 인가전압, 저항강하분, 리액턴스강하분, 역기전력으로부터 전류를 구하는 것이다. 리액턴스강하분 및 역기전력은 아래 그림 15에 나타난 것처럼 쇄교자속 테이블로부터 각각의 정의대로 전류변화분에 대한 자속변화분, 위치변화분에 대한 자속변화분으로 구하였다. 전류가 결정되면 이전의 이동자 위치 정보와 함께 그림 16의 추력 테이블에서 발생 추력을 얻게 되고 각상에서 구해진 추력의 합은 기계방정식의 입력이 되어 이것으로부터 이동자의 위치 및 이를 적분한 속도를 구하게 된다.

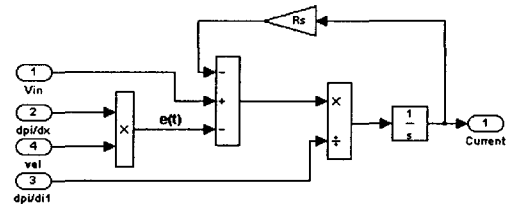


그림 14. 전압방정식 모델  
Fig. 14. Model of voltage equation

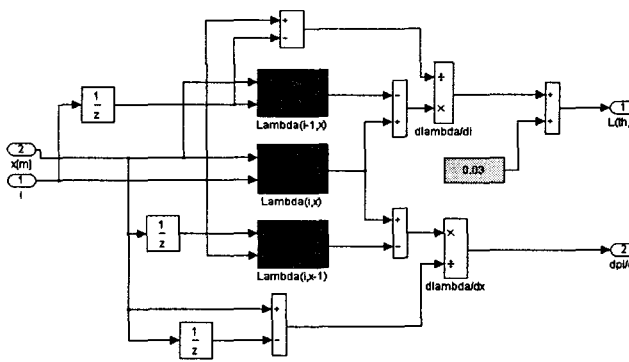


그림 15. 인덕턴스 및 역기전력 계수 모델  
Fig. 15. Model of inductance and coefficient of back EMF

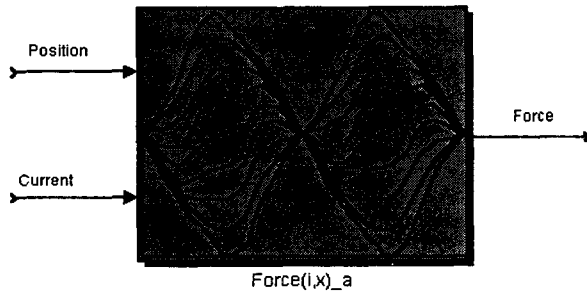
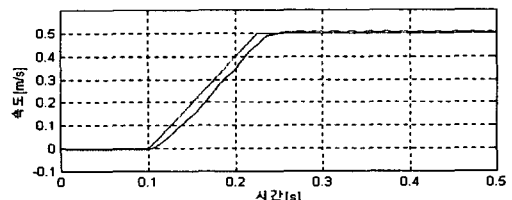
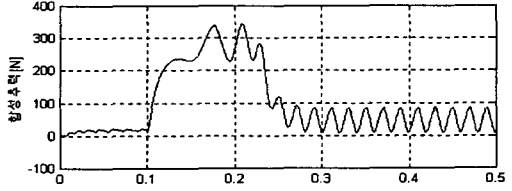
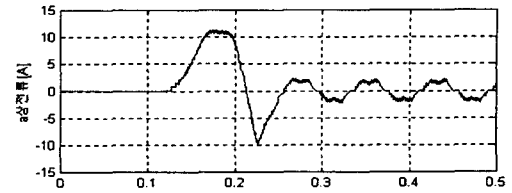


그림 16. 발생추력 모델  
Fig. 16. Model of generated thrust

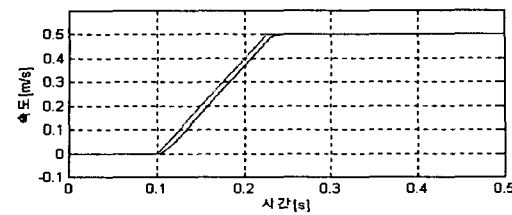
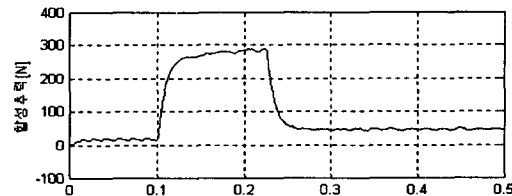
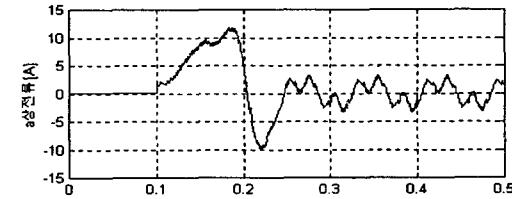
그림 17은 다음의 운전조건에서 기존 제어방식과 추력보상 제어기법의 성능을 비교하기 위한 모의실험의 결과이다.

- 하중 : 60[kg]
- 가속도 : 4[m/s<sup>2</sup>]
- 속도명령 : 0.5[m/s]
- 속도제어기 이득 :  $K_p = 0.2, K_i = 0.5$
- 전류제한치 : 20[A]

그림 (a)는 기존의 제어방식으로 운전했을 때의 한상 전류, 합성추력, 속도기준 및 실제속도를 표시하고 있다. 보는 것처럼 가속 상태 및 정상상태에서 발생 추력에 큰 맥동이 나타나고 그 결과로서 가속 및 정속 운전시 속도 맥동이 나타난 것을 볼 수 있다. 그림 (b)는 추력보상제어기를 적용했을 때 가속 및 정속 운전 구간에서 추력의 리플이 완전히 감소되었고 따라서 정상상태 속도의 맥동도 없음을 보여주고 있다. 본 모의실험은 동일한 제어기 이득 조건에서 기존의 방식인 속도제어기의 출력을 직접 전류제어기의 입력, 즉 전류명령으로 한 제어기법과 속도제어기로부터의 명령을 추력명령으로 변환하여 이 추력을 내기 위해 미리 구한 최적 전류파형으로 변환한 보상제어기법과 전류파형 및 정상상태 추력 맥동의 비교이다. 보는 것처럼 전류 파형의 변화에 의해 가속 및 정속 운전상태에서 평균추력은 비슷하나 추력의 맥동의 차이가 현저함을 볼 수 있다.



(a)기존제어기법



(b)토크 보상제어

그림 17. 동적 운전 특성 비교

(상:상전류 [5A/칸], 중:발생추력[100N/칸], 하:속도 : [0.1m/s/칸])

Fig. 17. Comparison of operating characteristics

모의실험 결과를 검증하기 위한 실험 장치가 아래의 그림 18에 나타나 있다. 제어기는 DSP(TMS320C32) 보드로 구현되었으며 전력변환장치는 50[A]급 IGBT 인버터를 사용하였다. 위치의 측정은 5[μm]급 리니어 엔코더(linear encoder)를 사용하였으며 속도 및 가속도는 각각 위치 및 속도의 미분 및 필터링을 이용하여 연산하였다. 12[kHz]의 정현파 PWM를 사용하였으며 전류, 속도, 추력 제어주기 역시 동일한 샘플링주파수를 사용하였다.

아래 그림 19는 소프트웨어로 구현된 추력보상제어기의 블록도이다. 속도제어기의 출력에 추력계수,  $K_t$ 를 곱하여 이를 추력명령으로 하고 이때의 상대위치 입력에 대해서 미리 구해진 그림 8의 최적화된 전류곡선 룩업테이블로부터 보간법으로 전류명령을 찾게 되며 이것이 전류제어기의 입력 기준전류가 된다. 전류제어기는 비례-적분형을 사용하였다.

본 논문에서 제안한 기법을 실제로 적용하여 그 성능을 비교하기 위해서는 동적인 추력의 측정이 가능해야 하나 선형전동기의 경우 이것이 매우 어려우므로 대신에 이동방향에 가속도계를 설치하여 추력의 맥동으로 인한 가속도 성분을 측정하는 방식으로 간접적으로 기존의 방법과의 성능을 비교 검토하였다.

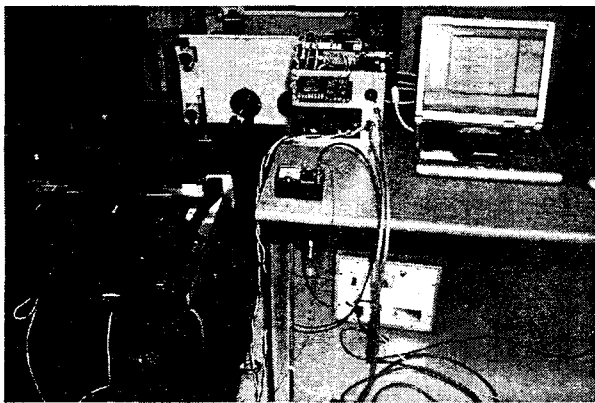


그림 18. TFLM 실험장치  
Fig. 18. Test set-up for TFLM

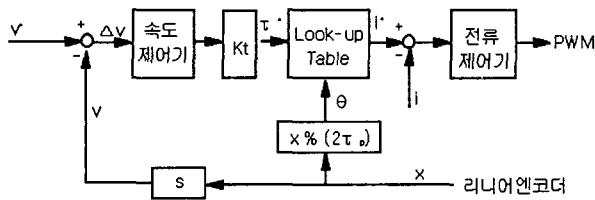
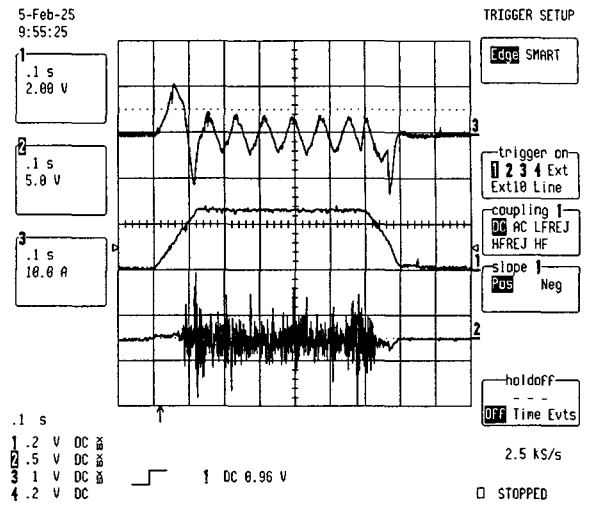


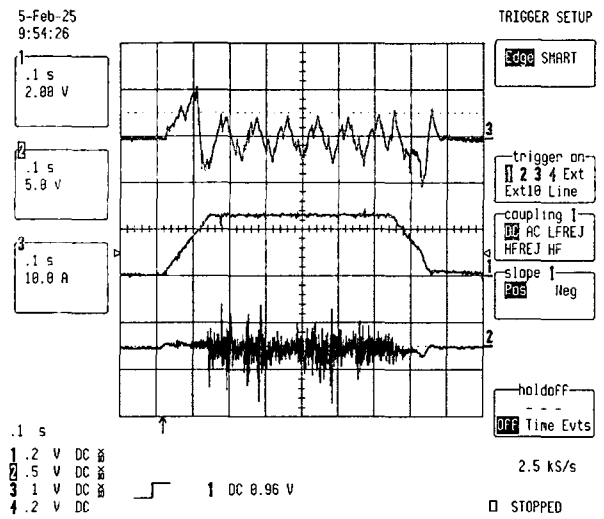
그림 19. 추력보상제어기  
Fig. 19. Thrust compensating controller

그림 20은 위의 모의실험 조건과 동일한 조건에서 운전했을 때의 결과가 나타나 있다. 그림 (a)는 기존의 제어방식으로 속도제어기의 출력에  $\sin\theta$ 을 곱한 것을 전류명령으로 한 제어기로 운전할 때의 전류, 속도, 가속도계의 출력 파형이고 그림 (b)는 추력보상제어기법을 적용한 경우이다. 각 그림의 가속도계의 출력파형에서 보는 바와 같이 이동방향의 진동이 현저히 감소함을 볼 수 있고 이는 이 추력보상제어기법이 추력의 맥동을 줄일 수 있음을 보여준다.

추력의 맥동이 완전히 제거되지 않는 요인은 추력 특성이 해석 결과를 사용했기 때문에 실제 제작된 TFLM의 추력 특성과는 오차가 있을 수 있으며 또한 전류제어기가 전류명령을 완벽하게 추종하지 못하는데 기인한 것으로 예상할 수 있다.



(a)기존제어방식



(b)추력보상제어기법

그림 20. 가속도계를 이용한 추력특성 실험 결과  
(상 : 전류, 중 : 속도, 하 : 가속도계 출력)

Fig. 20. Test result using accelerometer  
(top: current, middle: speed, bottom: output of accelerometer)

### 3. 결론

본 논문에서는 영구자석여자 횡축형 선형전동기를 설계하고 FEM 해석기법으로 추력 및 자속 특성을 구하여 이를 이용한 동적시뮬레이션모델을 제시하였다. 또한 추력의 맥동을 최소화하기 위해 유전알고리즘을 이용한 최적전류파형을 도출하고 이를 적용하여 추력보상제어기를 적용함으로써 모의실험과 실제 적용시험에서 추력의 맥동을 현저히 저감할 수 있음을 검증하였다. 본 결과는 횡축형 선형전동기의 중량 대비 출력의 장점을 활용하여 정밀한 위치제어 등 서보제어계로의 적용 가능성을 보여주었다. 추후의 연구 과제는 보다 정밀한 추력의 보상을 위하여 비례-적분형 전류제어기보다 전류 추종성이 우수한 전류제어기의 설계가 필요하며 실제 전동기의 추력 특성과 해석치와의 오차를 줄이는 것이 필요할 것이다.

참 고 문 헌

- [1] 임태운, 강도현, 김종무, 김동희, "영구자석 여자 횡축형 선형 전동기(TFLM)를 이용한 가진기 제어", 전력전자학회 논문지, vol. 7, no. 3, pp. 281-288, 2002.
- [2] 강도현, 정연호, "고출력 횡축형 선형전동기의 원리와 응용", Proceeding of KIEE, vol 43, no. 10, Oct. 1999.
- [3] 임태운, 김동희, 김종무, 정연호, 강도현, "횡축형 전동기의 속도제어를 위한 PWM 구동 드라이브의 구현", 대한전기학회 하계학술대회 논문집, pp. 1221-1223, 2000.
- [4] I. Husain, "Minimization of Torque Ripple in SRM drives", IEEE Trans. on industrial electronics, vol. 49, no. 1, pp. 28-39, Feb. 2002
- [5] I. Husain, and M. Ehsani, "Torque ripple minimization in Switched Reluctance Motor Drives by PWM Current Control", IEEE Trans. on Power Electronics, vol. 11, no. 1, pp. 83-88, Jan. 1996.
- [6] K. Russa, I. Husain, M. E. and E. Elbuluk, "Torque-Ripple Minimization in Switched Reluctance Machines over a Wide Speed Range", IEEE Trans. on Industrial Application, vol. 34, no. 5, pp 1105 -1112, sep. 1998.
- [7] 김윤현, 토크 리플 저감을 위한 SRM 최적 설계 및 직접 토크제어, 한양대학교 박사학위 논문, 2002.
- [8] 안종보, 황기현, 박준호, "유전알고리즘을 이용한 HVDC 용 퍼지제어기의 설계", 대한전기학회 논문지, vol. 52A, no. 1, pp 36-43, 2003.
- [9] Peter Vas, Artificial Intelligent-based Electrical Machines and Drives, Application of Fuzzy, Neural, Fuzzy-Neural and Genetic-Algorithm-Based Techniques, Oxford Univ. Press, 1999.
- [10] I. Boldea and S.A. Nasar, *Electric Drives*, CRC Press, 1999.
- [11] S. H. Chu and I. J. Ha, "Control of hybrid step motors via a simplified linearization technique", International Journal of Control, vol. 61, no. 5, pp. 1143-1167, 1995.

저 자 소 개



안 종 보(安鍾普)

1961년 8월 16일생. 1986년 서울대학교 전기공학과 졸업. 1995년 한국과학기술원 제어 및 자동화 설계공학과 졸업(석사). 1986년~1996년 이천전기공업(주) 중앙연구소 근무. 1996년~현재 한국전기연구원 산업전기연구단 메카트로닉스연구그룹(선임연구원).

Tel : 055-280-1478, Fax :055-280-1547  
E-mail : jbahn@keri.re.kr



강도현(姜道鉉)

1958년 9월 21일생. 1981년 한양대학교 전기공학과 졸업. 1989년 한양대 대학원 전기공학과 졸업(석사). 1996년 독일 Braunschweig대 졸업(박사). 1989년~현재 한국전기연구원 책임연구원(메카트로닉스 연구 그룹장)

Tel : 055-280-1480, Fax : 055-280-1547  
E-mail : dhkang@keri.re.kr



김지원(金志元)

1971년 9월 20일생. 1994년 서울시립대학교 제어계측공학과 졸업. 1996년 광운대학교 대학원 제어계측공학과 졸업(공학석사). 1996년~현재 한국전기연구원 선임연구원, Tel : 055-280-1335

Fax : 055-280-1547  
E-mail : jwkim@keri.re.kr



정순준(鄭壽鎭)

1974년 9월 25일생. 2003년 영남대학교 전기공학과 졸업(석사). 2003년~현재 영남대 대학원 전기공학과 박사과정. 2003년 현재 한국전기연구원 메카트로닉스 연구 그룹 위촉연구원.

Tel : 055-280-1487, Fax: 055-280-1547  
E-mail : jsj1105@hanmail.net



임태운(林太潤)

1973년 6월 10일생. 1999년 영남대학교 전기공학과 졸업(석사). 2002년 영남대 대학원 전기공학과 박사수료. 2000~2002 한국전기연구원 메카트로닉스 연구 그룹 위촉연구원. 2003년 현재 LG전자 DAC 세탁기사업부 연구실 주임연구원.

Tel : 055-269-3736, Fax : 055-263-6544  
E-mail : limy2yg@lge.com



박준호(朴俊濼)

1955년 9월 17일생. 1978년 서울대 공대 전기공학과 졸업. 1980년 동 대학원 전기공학과 졸업(석사). 1987년 동 대학원 졸업(박사). 1978~1981년 한국전기연구소 연구원. 1981년~1984년 충남대학교 전기공학과 전임강사 및 조교수. 1984년~현재 부산대학교 전기공학과 교수.

Tel : 051-510-2370, Fax :051-513-0212  
E-mail : parkjh@pusan.ac.kr