

공심슬롯 원통형 선형 BLDC 전동기의 설계 및 특성 고찰

論 文

57-4-10

Design and Characteristics Investigation of Air-core Tubular Linear BLDC Motor

文智虞* · 曹允鉉†
(Ji-Woo Moon · Yun-Hyun Cho)

Abstract - Slotless linear brushless DC motor are widely used in precision machine applications because of their advantages such as low of detent force, negligible iron loss. But they have a disadvantage such as low thrust density, thrust ripple, and excessive use of permanent magnet materials. These lead to undesirable performance and high production cost. In this paper, we deal with the design and characteristics investigation of a air-core tubular linear brushless DC (TLBLDC) motor with air-core stator and permanent magnet mover. And to investigate the static and dynamic characteristics of air-core TLBLDC motor, the prototype machine is manufactured and analyzed by F.E.M. and Matlab simulink simulations. Especially, dynamic characteristics of air-core TLBLDC motor driven with 6 step inverter are simulated by F.E.M.coupling with external circuit and Matlab simulink program, and measured for the prototype motor. The simulation results are compared to the experimental results such as current waves, thrust and speed curve.

Key Words : Dynamic characteristics, Coupling analysis, air-core TLBLDC motor, Tubular BLDC motor

1. 서 론

직선형 전동기는 회전형 전동기에 비해서 직선왕복 구동 시스템에 동력장치로 사용하는 경우에 동력전달장치가 필요 없이 직접구동이 가능함으로써 낮은 마찰력 손실과 높은 가감속제어가 가능하다. 특히 기어 및 벨트 등의 동력 변환장치를 사용하지 않고 직접 구동함으로써 백 래쉬(back lash), 등이 발생하지 않는다. 그러나 고 추력을 발생하기 위해서 기존의 회전형 전동기와 같이 고정자 코어 자성체 슬롯을 사용할 경우는 고정밀 위치제어 시에 영구자석에 의한 디텐트력 등이 위치 오차를 발생케 함으로서 이에 대한 저감대책이 문제시 되고 있다. 디텐트력 등의 추력리플 저감방법으로는 고정자 코어와 영구자석의 스류방법, 더미 슬롯, 분할 영구자석 설계, 공심슬롯, 전류보상제어 등의 여러 방법이 연구되고 있다[1].

본 연구에서는 짧은 이동거리에 직선왕복운동이 가능하며, 구조가 간단하고, 운전 중에 추력리플이 최소화 할 수 있는 구조의 공심슬롯 TLBLDC전동기에 대하여 연구하였다.[2] 특히 단위 체적당 추력 밀도를 증가할 수 있으며, 기하학적 형상에 따른 디텐트력을 최소화 할 수 있는 공심코어에 권선코일을 권선하는 공심슬롯 TLBLDC 전동기의 설계

및 특성 해석방법을 제안하였다[3],[4]. 설계된 치수에 대한 특성을 고찰하기 위하여서는 장 1차, 단 2차의 8극 이동자 구조의 시작기를 설계, 제작하고 기동시의 동특성을 유한요소법과 Matlab를 이용한 해석 방법을 제안하였다[5]. 또한 설계 및 해석의 타당성을 검증하기 위해서 정특성과 기동시의 추력과 속도 등에 대한 실험값과 FEM 해석값, 시뮬레이션 값을 비교, 분석하였다.

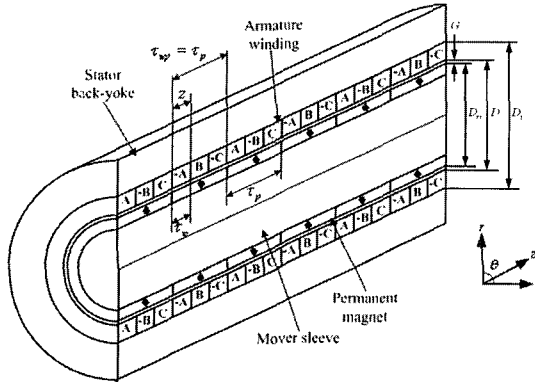
2. 공심슬롯 TLBLDC전동기의 구조 및 자기회로설계

2.1 공심슬롯 TLBLDC 전동기의 구조

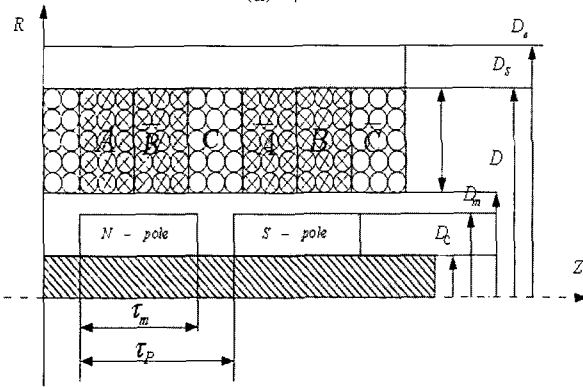
그림 1은 본 연구의 공심슬롯 고정자와 영구자석 이동자를 갖는 슬롯레스 원통형 TLBLDC 전동기의 구조를 나타낸다. 그림 1에서와 같이 고정자 권선은 고정자 백요크 내측의 공심슬롯에 3상 권선코일이 감겨져 있으며, 이동자는 축 중심의 자성체 코어에 표면 영구자석이 부착된 구조이다. 또한, 이동자에 부착된 영구자석의 길이가 고정자에 권선된 코일의 길이보다 짧은 단 2차 이동자의 공심슬롯 원통형 TLBLDC 전동기이다. 그림 1(b)는 공심슬롯의 권선코일의 코일과 이동자 영구자석의 상세 구조를 나타낸다. 권선 코일의 배열은 $\overline{ABC}\overline{ABC}$ 로 되어 있다.

† 교신저자, 終身會員 : 東亞大學校 電氣工學科 教授 · 工博
E-mail : yhcho@dau.ac.kr

* 正會員 : 東亞大學校 工大 電氣工學科 碩士課程
接受日字 : 2008年 2月 16日
最終完了 : 2008年 2月 28日



(a) 구조도



(b) 상세 치수 구조

그림 1 공심슬롯 TLBLDC 전동기의 구조
Fig. 1 Configuration of air-core slot TLBLDC motor

2.2 자기회로 설계

무부하시의 공심슬롯 원통형 TLBLDC 전동기의 공극 자속 밀도는 그림 2와 같이 영구자석의 자기장만을 고려한 등가 자기회로 해석을 통하여 공극 자속밀도를 간단하게 계산할 수 있다. 고정자와 이동자 사이의 자로는 그림 2와 같이 모델링된다. 그림 2에서 코일권선부분과 회로류 영구자석 부분의 투자율은 공기중의 투자율과 같다고 가정하면, 등가회로는 그림 2(b)와 같이 나타낼 수 있다.

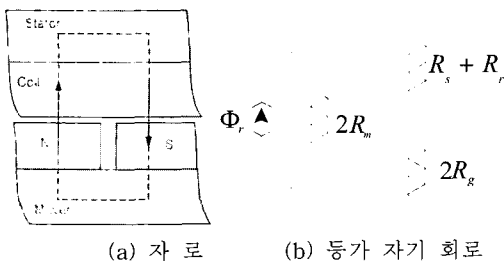


그림 2 등가 자기 회로
Fig. 2 Equivalent magnetic circuit

여기서, R_m 은 영구 자석의 자기 저항, R_g 는 공극의 자기 저항, R_n 는 고정자의 자기 저항, R_r 은 Mover의 자기 저항이다. 그림 3에서 나타난 자기 등가 회로내의 각 자기 저항

의 계산식은 다음과 같다.

$$R_m = \frac{t_m}{\mu_0 \mu_{rec} \pi \frac{(D_m + D_c)}{2} \tau_m} \quad (1)$$

$$R_g = \frac{g_{ac}}{\mu_0 \pi D_s \tau_m} \quad (2)$$

$$R_s = \frac{4\tau}{\mu_0 \mu_r \pi (D_e + D)(D_e - D)} \quad (3)$$

$$R_r = \frac{4\tau}{\mu_0 \mu_r \pi D_c^2} \quad (4)$$

여기서, $D_s = D + t_w + g$, $t_m = (D_m - D_c)/2$, $g_{ac} = (D_s - D_m)/2$ 이다. 따라서 영구자속의 잔류자속 Φ_{rem} 을 다음 식 (5)과 같이 정의하면

$$\Phi_{rem} = B_{rem} \pi \frac{(D_m + D_c)}{2} \tau_m \quad (5)$$

이고, 이동자와 고정자의 투자율을 무한대로 가정하면 공극 자속밀도의 크기는

$$B_g = B_{rem} \left(1 - \frac{2g_{ac}}{D} - \frac{t_m}{D}\right) \times \left[1 / \left(1 + \frac{\mu_{rec} g_{ac}}{t_m} \left(1 - \frac{2g_{ac}}{D} - \frac{t_m}{D}\right)\right)\right] \quad (6)$$

이 된다. 그림 3과 같이 영구자석에 자극 형상에 따른 공극 내의 자속밀도 분포를 푸리에 급수로 표현할 수 있다. 이때 공극의 자속밀도는 식 (7)과 같이 쓸 수 있다.

$$B_g(z) = \sum_{n=1,3,5,\dots}^{\infty} \frac{4B_g \tau_p}{n^2 \pi^2 \alpha} \cdot \sin\left(\frac{n\pi \alpha}{\tau_p}\right) \cdot \sin\left(\frac{n\pi z}{\tau_p}\right) \quad (7)$$

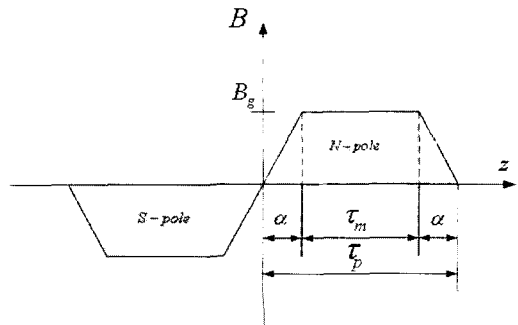


그림 3 영구 자석에 의한 공극 자속 밀도 파형
Fig. 3 Airgap flux density waveform by permanent magnet

전기자 권선의 전류분포는 그림 4와 같이 면전류밀도로 표현할 수 있다. 1상의 슬롯당 기자력은 $N_s I$ 로 고정자 권선 내경 R_y 에서 1상 권선코일에 해당하는 슬롯 폭 τ_{sw} 에 분포된 면전류전류 $N_s I / \tau_{sw}$ 로 같이 놓을 수 있다. 그림 1(a)의

면전류를 $J(z)$ 로 한주기에 대해 푸리에 급수로 표현하면,

$$J_s(z) = \sum_{n=1,2,\dots}^{\infty} J_n \sin\left(\frac{n\pi}{\tau_p}z\right) \quad (8)$$

여기서, $J_n = \frac{2N_c I}{\tau_p} K_{dn} K_{pn}$, K_{dn} : 단절계수, K_{pn} : 분포계수이다.

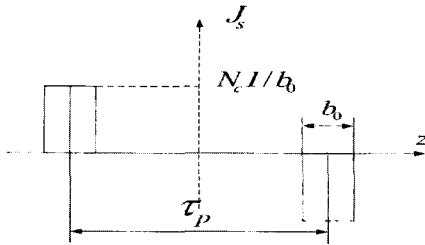


그림 4 고정자 권선의 전류 밀도 분포
Fig. 4 Current density distribution of the stator winding

추력은 권선 코일의 전류밀도와 영구자석에 의해 만든 공극 자속 사이에 플레밍의 왼손법칙에 의해 발생하며, 평균 추력은 전류밀도의 실효값에 공극자속밀도를 곱한 다음 식으로 얻을 수 있다.

$$F_z = 2p\pi(D + D_s)J_{rms}B_g \sin\left(\frac{\pi}{2} \frac{\tau_m}{\tau_p}\right) \quad (9)$$

여기서, p 는 쌍극수이며, τ_p 는 극피치, τ_m 는 영구자석의 자극 폭이다. 식 (9)의 추력 식에서 선형 전동기의 전류 밀도는 내부 온도 상승의 범위 내에서 결정된다. 따라서 공심슬롯 원통형 TLBLCDC 전동기의 내부 온도 상승은 거의 권선의 저항손과 방열량에 의해 결정되며, 방열량은 다음 식 (10) 과 같이 지배된다.

$$h\theta_w \pi D_e 2\tau_p = \frac{\pi}{4}(D_s^2 - D^2)2\tau_p k_{fill} \rho_{cu} J_{rms}^2 \quad (10)$$

여기서, θ_w 는 권선의 온도증가분, h 는 열효율계수, ρ_{cu} 는 코일의 저항률, k_{fill} 는 코일권선의 점적율이다.

식 (10)에서 실효치 전류밀도는 다음 식으로 주어진다.

$$J_{rms} = \sqrt{\frac{4h\theta_w D_e}{k_{fill} \rho_{cu} (D_s - D)(D_s + D)}} \quad (11)$$

TLBLCDC 전동기의 설계과정에서 고정자 내경과 외경의 비 D/D_e 를 조절하여 최대 추력을 얻을 수 있다. 최적의 비를 얻기 위해서는 식 (11)을 식 (9)에 대입하고, 공극자속 밀도를 일정하게 두고 D 에 대하여 미분을 취한 추력이 영(zero) 값인 D 를 구하면 된다. 본 연구에서는 열효율 $h = 24.3(W/^\circ C \cdot m^2)$, 구리 저항률 $\rho_{cu} = 2e^{-8}(\Omega m)$, 상승

온도 $\theta_w = 115(^\circ C)$, 공극자속밀도 0.5(T)의 설계 제약조건 하에 표 1과 같이 기본 설계치수를 선정하였다.

표 1 공심슬롯 원통형 TLBLCDC 전동기의 기본 설계치수
Table 1 Basic design dimensions of Air-core TLBLCDC motor

D_e	D_s	D	D_m	D_r	τ_p	τ_m
30	26	18	16	10	16	12

3. 공심슬롯 TLBLCDC전동기의 전압 방정식 모델링

공심 슬롯 TLBLCDC 전동기의 동특성을 고찰하기 위해서는 전동기의 전압 방정식과 기계적 운동방정식을 구해야 한다. 시작기의 TLBLCDC 전동기의 전압 방정식은 식 (12)과 같은 전압방정식을 얻을 수 있다.

$$\begin{aligned} V_a &= R i_a + \frac{3}{2}L \frac{di_a}{dt} - N_s \frac{\pi}{\tau_p} \Phi_m \sin\left(\frac{\pi}{\tau_p}z\right) \frac{dz}{dt} \\ V_b &= R i_b + \frac{3}{2}L \frac{di_b}{dt} - N_s \frac{\pi}{\tau_p} \Phi_m \sin\left(\frac{\pi}{\tau_p}z - \frac{2}{3}\pi\right) \frac{dz}{dt} \\ V_c &= R i_c + \frac{3}{2}L \frac{di_c}{dt} - N_s \frac{\pi}{\tau_p} \Phi_m \sin\left(\frac{\pi}{\tau_p}z - \frac{4}{3}\pi\right) \frac{dz}{dt} \end{aligned} \quad (12)$$

여기서, V_a, V_b 및 V_c 는 상전압이며, i_a, i_b 및 i_c 는 상전류이다. R 은 상 저항, N_s 은 상당 권선수이며, Φ_m 은 각상 코일과 쇄교하는 1상분의 최대 쇄교 자속이다. 식 (12)에서 우측 셋째항은 이동자가 z 축으로 이동할 때 발생하는 역기전력으로 자기적 포화현상을 무시하면 추력 발생성분에 해당한다. 합성 추력은 다음과 같이 계산 할 수 있다.

$$\begin{aligned} F &= \frac{P_m}{v} = \frac{(e_a \cdot i_a + e_b \cdot i_b + e_c \cdot i_c)}{v} \\ &= \frac{3}{2} \frac{\pi}{\tau_p} N_s \Phi_{pm} i \cos \phi \end{aligned} \quad (13)$$

기계적 운동방정식은 다음 식 (14)으로 주어진다.

$$F = k_f i = M \frac{dv}{dt} + Dv + F_i \quad (14)$$

여기서, $k_f = 3\pi N_s \Phi_{pm} \cos \phi / 2\tau_p$ 는 추력 계수이며, 무부하시의 유한요소법에 의한 계산값은 0.218로 얻었다.

동특성을 고찰하기 위해서는 식 (12)의 전압방정식과 식 (14)의 기계 운동방정식에 대한 상태방정식을 해석하여야 한다. 상태 방정식을 시뮬레이션하기 위해서는 본 연구에서는 Matlab Simulink 프로그램을 이용하여 그림 5와 같이 구성하였다.

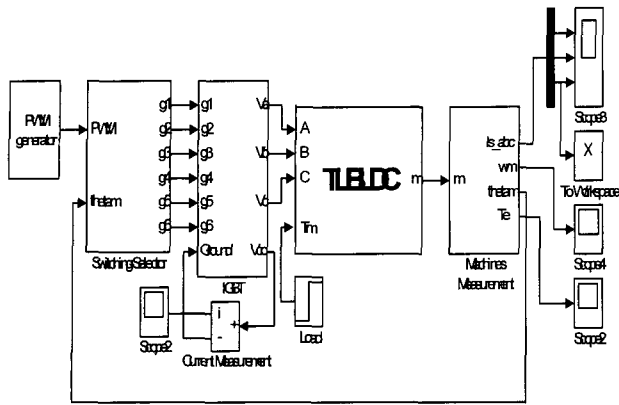


그림 5 Matlab/Simulink의 시뮬레이션 블록다이어그램
Fig. 5 Simulation Block diagram by Matlab/Simulink

4. 공심슬롯 TLBLDC 전동기의 특성 고찰

본 연구의 시작기 전동기에 대한 상세 설계 치수 산정과정 성능 특성을 고찰하기 위하여서는 그림 6과 같이 연구하였다. 기본 설계 치수는 설계 이론을 기초로 선정하고, 자기적 특성, 파라메타 계산은 2차원 유한요소법을 사용하였다. 또한, 인버터 구동의 동특성을 고찰하기 위해서는 Matlab Simulink를 이용하여 해석하였다.

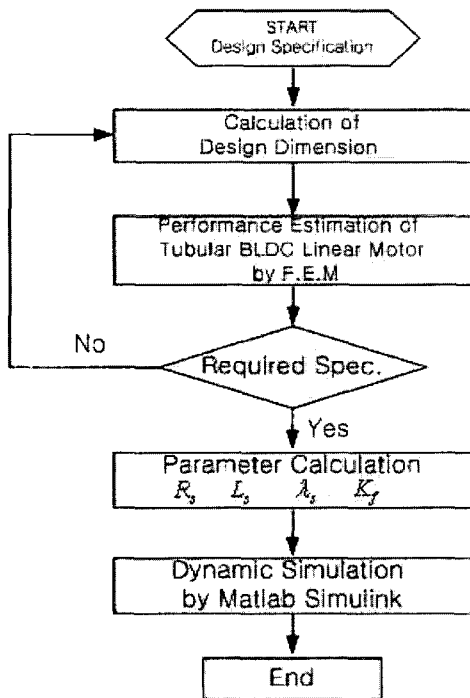


그림 6 특성 해석 순서도
Fig. 6 Flowchart for the characteristic analysis

표 2는 설계된 공심슬롯 TLBLDC 전동기의 설계 치수 제원을 나타낸다. 이동자의 왕복 이동거리는 300(mm)이며, 고정자의 길이는 1000(mm)이다.

표 2 공심슬롯 TLBLDC 전동기 제원

Table 2 The design specifications of air-core TLBLDC motor

항 목		제 원
정 격	전 압 [V]	24
	전 류 [A]	6
	추 력 [N]	30[N]
고정자	코일 수	42
	재 질	S45C
	길 이 [mm]	540
이동자	극 수	8
	재 질	S45C
	길 이 [mm]	1,000
권 선	턴수/코일	40
	코일직경	φ0.8
영구 자석	B_r [T] (20°)	1.1
	재 질	NdFeB
	보자력[kA/m]	850
	두께[mm]	3
공극 길이 [mm]		1

4.1 시작기의 실험장치 구성

그림 7은 공심슬롯 원통형 TLBLDC전동기의 시작기를 나타낸다. 고정자는 백 요크(back yoke) 내측에 3상 권선 코일을 설치하고, 양측에 슬리브 베어링을 설치하여 이동자가 직선운동이 가능하도록 하였다. 그리고 이동자는 고정자 내측에 자유왕복운동이 가능한 구조로 자성체 축에 8극의 영구자석을 일렬로 배열하였다. 또한, 브레시레스 직류전압 구동이 가능하기 위해서는 이동자의 위치센서가 가능하도록 고정자 한쪽 끝단에 홀센서를 설치하여 위치 검출이 가능한 구조로 개발하였다. 이동자의 최대이동구간의 안정장치로 무접점 근접센서를 설치하여 왕복운동이 가능하도록 하였다.

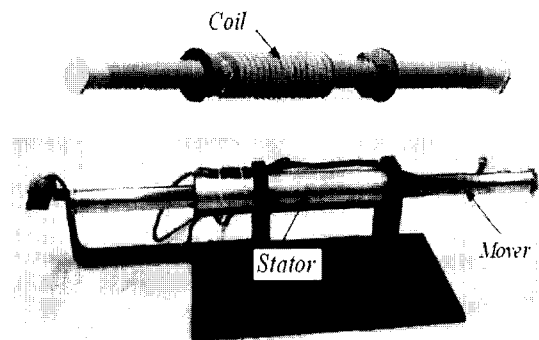


그림 7 시작기 공심슬롯 원통형 선형 BLDC 선형전동기
Fig. 7 Prototype air-core TLBLDC motor

그림 8은 시작기의 구동 제어시스템의 블록도를 나타낸다. 본 연구에서 사용한 마이크로프로세서는 소형 8비트 ATMEGA8를 사용하였으며, 원통형 TLBLDC전동기의 운전은 PWM 구동 제어 방식을 사용하였다.

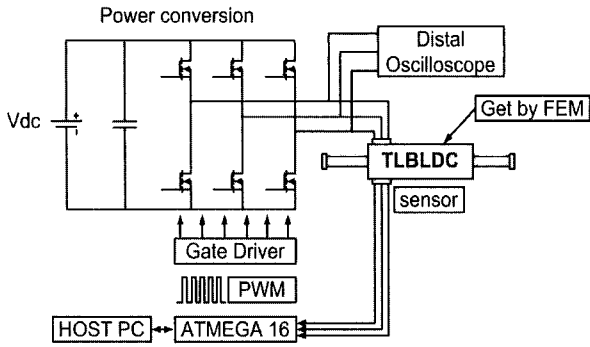


그림 8 구동 제어회로의 구성도
 Fig. 8 Controller block diagram of TLBLDC motor

4.2 정특성 해석 결과

그림 9은 유한요소법을 이용한 무부하시 영구자석의 자화 자속에 대한 자속 밀도분포도를 나타낸다. 본 연구에서의 영구자석은 표 1의 제원과 같이 회도류로 자류자속이 1.1[T]이며, 이동자의 자극이 8극이다. 그림 10은 공극내의 자속밀도 곡선을 나타낸다. 그림 10(a)에서 축방향의 공극 자속밀도의 최대 크기는 약 0.43(T)정도이며, 8극의 자극이 형성됨을 알 수 있다. 그림 10(b)는 반경방향의 자속밀도와 자속밀도의 크기를 나타낸다. 최대 공극자속밀도의 크기는 약 0.6(T)로 나타내며, 양단부에서 누설자속이 중앙보다 크므로 약간의 자속밀도가 감소함을 보임을 알 수 있다.

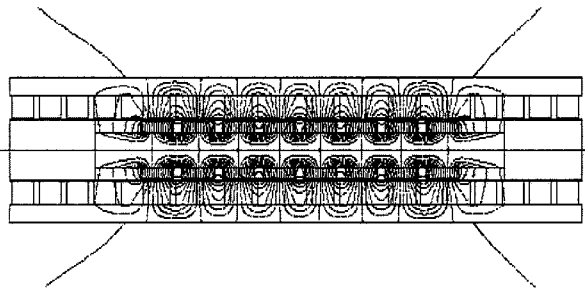
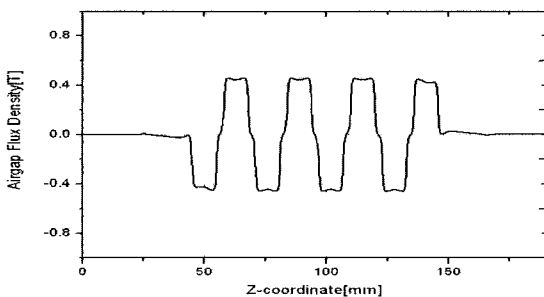
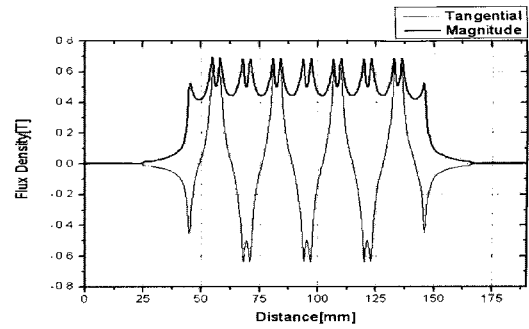


그림 9 영구자석에 의한 자속분포도
 Fig. 9 The flux distribution by permanent magnet



(a) 축 방향 성분



(b) 자속밀도 크기와 반경방향성분

그림 10 영구자석에 의한 자속 밀도 곡선
 Fig. 10 The flux density curve by permanent magnet

그림 11은 시작기의 역기전력 전압파형을 나타낸다. 역기력 전압 파형이 고조파가 포함된 정현파로 고조파 기자력에 의한 추력 리플을 발생함을 알 수 있다. 이와 같이 기동시에 높은 추력리플이 발생하므로 전류보상법에 의한 추력 리플제어방법이 요구된다. 그림 12는 입력전류변화에 따른 최대 추력 곡선으로 유한요소법에 의한 해석 결과값과 실험값을 비교하였다. 추력 계수 $k_f(N/A)$ 는 해석값이 0.2186이며, 실험치가 0.1821로 약간의 차이를 보이고 있다. 이것은 시작기 전동기의 제작에 따른 오차, 2차원 유한요소법에 의한 시뮬레이션 및 실험계측 상에서 발생한 오차로 기안하는 것으로 생각됩니다.

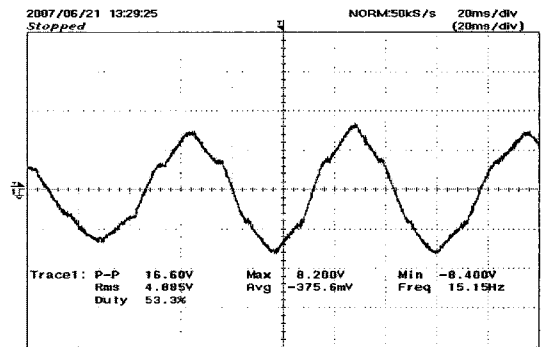


그림 11 역기전력 파형 (20ms/div, 5V/div)
 Fig. 11 EMF waveform (20ms/div, 5V/div)

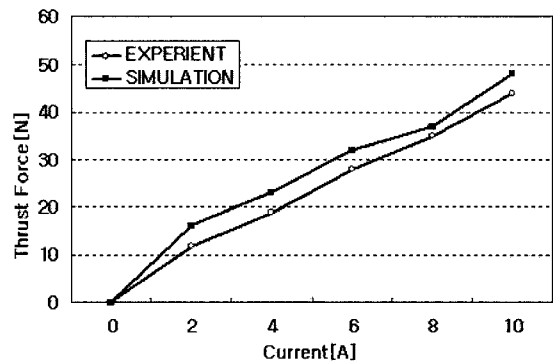


그림 12 입력 전류에 따른 추력 곡선
 Fig. 12 Thrust curve as a function fo input current

4.3 동특성 고찰

본 연구에서는 무부하 기동시의 공심슬롯 TLBLDC전동기의 추력 리플과 시정수 특성을 고찰하기 위하여 개루프 제어방식의 운전 특성을 고찰하였다. 그림 13은 기동시의 입력 전압을 직류 5(V)로 6스텝 인버터로 구동했을 때의 각상의 전류 파형을 나타낸다. 입력전류의 최대치는 약 1(A)로 120°의 위상 차이로 운전하며, 찔두치 전류가 크게 발생함을 나타낸다. 개루프 제어시 전동기의 추력 리플이 상당히 크게 발생함을 알 수 있으며, 추력 리플 저감을 하기 위해서는 여러 가지 제어방식이 연구되어야 한다.

그림 14와 그림 15는 무부하시의 5(V) 전압을 인가했을 때 시작시 선형전동기에서 발생하는 추력 특성과 속도특성을 나타낸다. 정상속도 약 0.47(m/s)에 도달하는데 걸리는 시간은 약 250(ms)이며 기계적 시정수는 68(ms)로 시뮬레이션과 실험치가 비슷한 결과를 나타냄을 알 수 있다. 그림 16은 정상상태에서의 a상 전류파형의 시뮬레이션 값과 실험값을 나타낸다.

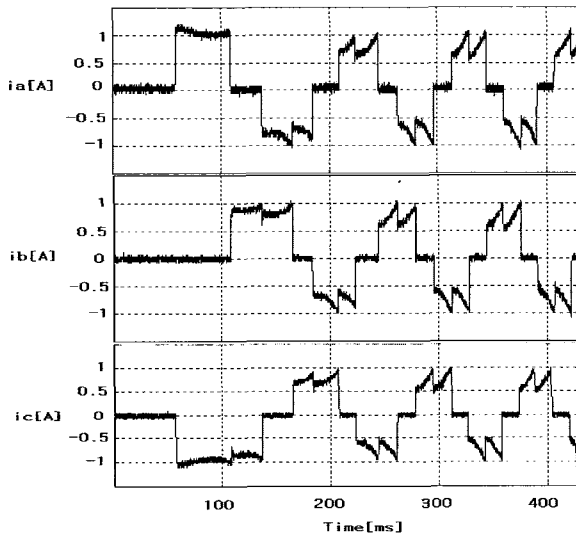


그림 13 기동시 각상의 전류파형 (무부하)
Fig. 13 Current waveforms at the starting state (no load)

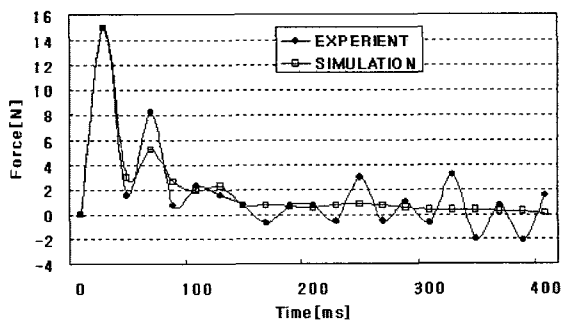


그림 14 기동시의 추력 특성 곡선 (무부하)
Fig. 14 Thrust curve at starting state (no load)

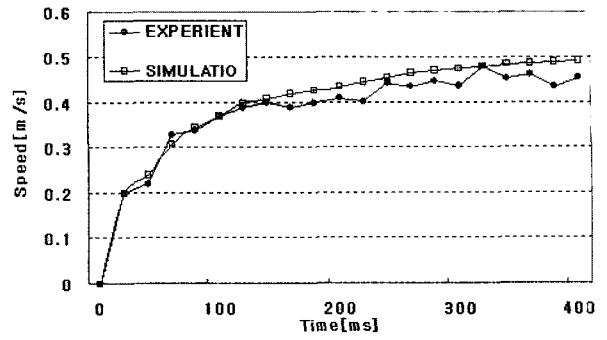
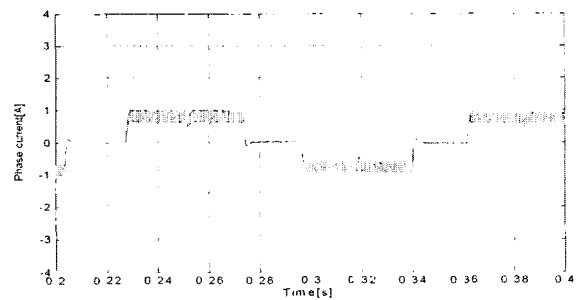
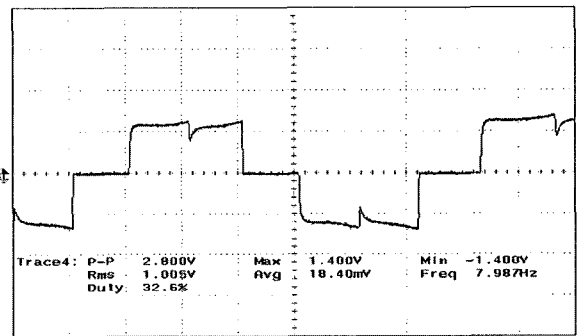


그림 15 기동시의 속도 곡선 (무부하)
Fig. 15 Speed curve at the starting state (no load)



(a) 시뮬레이션



(b) 실험

그림 16 정상상태에서 a상의 전류 파형 (무부하)
Fig. 16 a-phase current waveforms at the steady state (no load)

5. 결 론

본 연구에서는 이동거리가 짧은 직접 직선왕복운동이 가능하며, 운전 중에 추력리플이 최소화 할 수 있는 구조의 공심슬롯 TLBLDC 전동기에 대한 설계 및 해석방법에 대하여 연구하였다. 특히 단위 체적당 추력 밀도를 증가 할 수 있는 원통형구조로 영구자석과 자성체의 기학적 형상에 따른 디텐력을 최소화할 수 있는 공심코아에 권선코일을 권선하는 공심슬롯 TLBLDC 전동기의 설계 및 특성 해석방법을 제시하였다. 공심슬롯 TLBLDC 전동기의 기본 설계 이론으로 등가 자기회로법을 이용한 추력 계산 방법과 최적 직경 선정 방법을 제안하였다. 제안된 설계 및 해석 방법의 타당

성을 입증하기 위해서는 고정자 길이 760(mm)인 장 1차, 이 동거리 150(mm)인 단 2차의 8극 공심슬롯 TLBLDC 전동기의 시작품을 개발하였다.

설계 및 해석 방법의 타당성을 검증하기 위해서는 설계된 시작기에 대해 정특성과 기동시의 동특성을 유한요소법과 Matlab를 이용한 해석값과 실험값을 비교, 검증하였다.

그 결과로서 제시한 설계사양에 비추어 요구하는 특성 결과를 얻을 수 있었다. 이상의 본 연구 결과를 토대로 공심슬롯 원통형 TLBLDC 전동기의 개발 시에 기초자료로 활용이 가능하리라 판단한다.

감사의 글

이 논문은 2005 학년도 동아대학교 학술연구비 공모과제에 의하여 연구되었음.

참 고 문 헌

- [1] Jiabin Wang, David Howe, "Tubular Modular Permanent-Magnet Machines Equipped With Quasi-Halbach Magnetized Magnets-Part 1: Magnetic Field Distribution, EMF, and Thrust Force" IEEE TRANSSACTION ON MAGNETIC, NO. 9
- [2] W.J. Kim, M. T. Berhan, D.L. Trumper and J.H.Lang, "Analysis and Implementation of a Tubular Motor with Halbach magnet array", IEEE Trans. Magn., vol. 1, pp.471-478, Oct. 1996
- [3] Jiabin Wang; Jewell, G.W.; Howe, D.; "A general framework for the analysis and design of tubular linear permanent magnet machines" Magnetics, IEEE Transactions on Volume 35, Issue 3, Part 2, May 1999 Page(s):1986 - 2000
- [4] Wang, J.; Jewell, G.W.; Howe, D, Jiabin Wang; Howe, D.; Jewell, G.W. "Analysis and design optimization of an improved axially magnetized tubular permanent-magnet machine" Energy Conversion, IEEE Transactions on Volume 19, Issue 2, June 2004 Page(s):289 - 295
- [5] C. Rusu, I. Birou, "Matlab Graphical Interface for the DSK243 system used to control a BLDC Motor" Automation, Quality and Testing, Robotics, 2006 IEEE International Conference on Volume 1, May 2006 Page(s):452 - 456
- [6] Yu-wu Zhu, Yun-hyun Cho, "Thrust Ripple Suppression of Permanent Linear Synchronous Motor", IEEE Transactions on Magnetics, June 2007 Page(s):2537-2539

저 자 소 개



문 지 우 (文智虞)

2006년 2월 동아대 공대 전기공학과 졸업. 2008년 동 대학원 전기공학과 졸업(석사) 2008년 ~ 현재 한국전기연구원 산업전기연구단 전동력 그룹 연구원

Tel : 051-200-6952

Fax : 051-200-7742

E-mail : hoopman@donga.ac.kr



조 윤 현 (曹允鉉)

1984년 한양대 공대 전기공학과 졸업. 1986년 동 대학원 전기공학과 졸업(석사). 1986~1987년 삼성종합기술원 전자기기연구소 연구원. 1991년 한양대 대학원 전기공학과 졸업(박사). 1990~1995년 한국전기연구원 선임연구원. 1995~현재 동아대 공대 전기공학과 교수

Tel : 051-200-7742

Fax : 051-200-7742

E-mail : yhcho@dau.ac.kr