

영구자석 배열에 따른 Tubular형 직선 왕복 액추에이터의 특성해석

장석명, 최장영, 이성호, 조성국, 유대준
충남대학교

Characteristic Analysis of Tubular Type Linear Oscillating Actuator According to Permanent Magnet Array

S. M. Jang, J. Y. Choi, S. H. Lee, S. K. Cho, D. J. Yoo
Chungnam National University

Abstract - Recently, many linear motion generators and motors are rapidly finding applications that ranges from short stroke linear motion vibrators, such as dynamic con type loud speakers to stirling engine driven linear reciprocating alternators, compressors, textile machines etc. In this paper, we analyze the characteristics of tubular linear motor with Halbach and radial magnet array respectively. We already derived magnetic field solutions due to the PMs and to the currents and Motor thrust. On the basis of analytical field solutions, this paper deals with flux linkages and back emf. The results are validated extensively by comparison with finite element analyses. Then, this parer also presents thrust characteristics according to design parameters for each model.

1. 서 론

산업이 발전함에 따라 짧은 스트로크의 선형왕복운동이 요구되는 스티어링 엔진, 공작기기 콤프레서, 섬유기기, 능동제어, 조정밀 위치제어에 직선형 모터가 광범위하게 응용되고 있다. 그러나 지금까지는 유압이나 가스 터빈에 의한 실린더, 회전형 모터와 기계적 변환 보조구에 의해 직선형 왕복시스템이 응용 개발되어왔다. 따라서, 많은 부품이 필요하고 시스템이 복잡하여 중량이나 부피가 커지므로 차지하는 공간이 커지고 생산비나 유지관리비 등 경제성 측면에서 매우 불리하다. 이러한 점을 극복할 수 있는 가장 효과적인 방안이 전자기력 직선형 왕복 액추에이터를 응용하는 것이다. 전자기력 직선형 왕복 액추에이터는 가동체의 재질에 따라 가동코일형, 가동 철심형, 가동자석형 등이 있다 [1]. 본 논문에서 해석하려는 왕복 액추에이터는 가동자석형으로 가동자로 Halbach자화와 반경방향 자화 영구자석을 갖는다. 우리는 이미 Halbach자화와 반경방향 자화 영구자석 배열을 갖는 Tubular 모터의 자체특성식을 2차원 원통좌표계를 이용한 해석적인 방법을 통하여 도출하고, 힘 특성식을 유도했다 [2]. 따라서, 본 논문은 Halbach 자화와 반경방향 자화 영구자석의 자체특성식을 이용해 쇄교자속 그리고 역기전력 특성식을 유도하고, 해석결과에 유한 요소법을 통해 비교 검토한다. 또한, 각 모델에 대해 설계변수에 따른 힘 특성을 제시하고자 한다.

2. 설계모델 및 특성해석

2.1 Tubular 직선형 모터의 구조

그림 1은 본 논문에서 해석하고자 하는 직선형 Tubular 모터를 보여준다. 자석 내부의 iron은 모터의 shaft 역할을 하고, 반경방향 자화 영구자석을 갖는 모

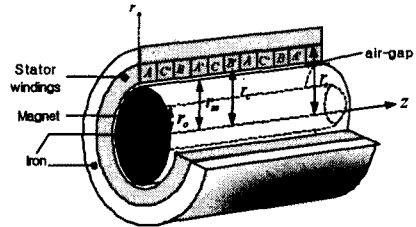


그림. 1 Tubular 직선형 모터의 구조

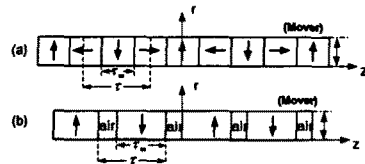


그림 2. 가동자 자석 모델: (a) Halbach 자화 모델, (b) 수직방향 자화 모델

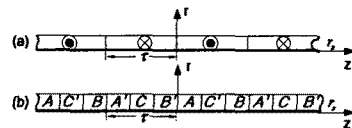


그림. 3 전류밀도 분포: (a) 단상권선, (b) 삼상권선

터의 경우 자속경로를 정해 준다. 그림 2 (a)와 (b)는 그림 1에 제시된 Tubular 직선형 모터 모델의 자석영역에 대해 각각 Halbach 자화된 영구자석과 수직방향 자화된 영구자석배열의 모델링을 보여준다. 그림3 (a)와 (b)는 각각 단상권선과 삼상권선의 전류분포를 나타내는데, 전류분포가 $r=r_s$ 에 등가 면전류로 분포해 있다고 가정한다.

2.2 쇄교자속 및 역기전력

2.2.1 쇄교자속 특성식

각 상의 쇄교자속은 식 (1)로부터 구할 수 있다 [3].

$$\lambda = - \int_{z_1}^{z_2} \frac{N}{\tau} \int_x^{x+r} 2\pi r_s B_r(z) dz dz \quad (1)$$

여기서 N 은 극당 턴수, r 은 극간격이며, z_1 와 z_2 는 각각 상의 처음위치와 마지막 위치이다. $B_r(z)$ 은 Halbach자화와 반경방향 자화 모델의 공극 자속밀도 이다.

$N=N_s$, $z_s=-\tau$ 와 $z_r=0$ 인 단상 권선 분포를 갖는 그림 3(a)의 해석모델에 대하여, 영구자석에 의한 쇄교 자속은 식 (1)에 의해 식 (2)로 표현된다.

$$\lambda^{PM} = \frac{8N_s\pi r_s[A_n^I I_1(k_n r_s) + B_n^I K_1(k_n r_s)] \sin(k_n z)}{k_n \tau} \quad (2)$$

또한, $N=3N_f$, $z_s=-\tau$ 와 $z_r=0$ 인 삼상 권선 분포를 갖는 그림 3(b)의 해석모델에 대하여, 영구자석에 의한 쇄교 자속은 식 (1)에 의해 식 (3)으로 표현된다.

$$\lambda^{PM} = \frac{2AN_f\pi r_s[A_n^I I_1(k_n r_s) + B_n^I K_1(k_n r_s)] \sin(k_n z)}{k_n \tau} \times \cos\left(\frac{n\pi}{3}\right) \quad (3)$$

여기서, N_s 는 단상권선의 극당 턴수, N_f 는 삼상코일의 극당 상당 턴수이고, $I_1(k_n r)$ 과 $K_1(k_n r)$ 은 각각 수정된 1차 제 1종 및 제 2종 Bessel 함수이다. k_n 은 n 차의 공간 고조파로 $n\pi/\tau$ 로 주어진다. 식 (2)와 식 (3)은 Halbach 자화 모델과 반경방향 자화모델 모두의 경우에 해당하며 다만, 계수 A_n^I , B_n^I 만이 달라진다. 그림 4는 Halbach 자화 모델과 반경방향 자화모델의 쇄교자속을 단상과 삼상 권선에 대해 해석 값과 유한요소 결과의 비교를 보여준다. 각 자화 모델에 대해 단상이 삼상보다 쇄교자속이 더 크다.

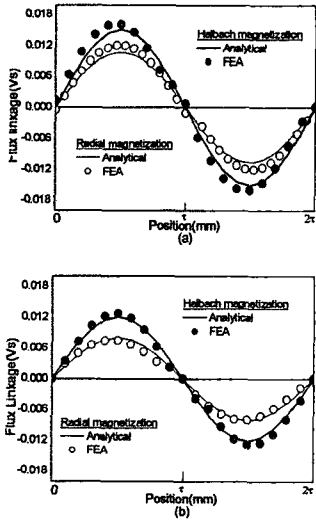


그림 4. Halbach 자화 모델과 반경방향 자화모델의 쇄교자속 특성: (a) 단상권선 및 (b) 삼상권선

2.2.2 역기전력 특성

영구자석이 z 방향으로 직선 운동함에 따라 코일에 유도되는 역기전력은 식 (4)의 관계에 의해 계산된다(4).

$$V_{emf} = \frac{d\lambda}{dt} = \frac{dz}{dt} \frac{d\lambda}{dz} = v \frac{d\lambda}{dz} \quad (4)$$

여기서 λ 는 쇄교자속 이고, v 는 가동자 영구자석의 속도이다. 따라서, 단상 코일과 삼상 코일에 유기되는 역기전력은 식 (4)에 의해 각각 식 (2)와 식(3)을 z 방향

에 대해 미분한 것에 가동자 영구자석의 속도를 곱함으로써 얻을 수 있다. 결과적으로, 단상 코일과 삼상 코일에 유기되는 역 기전력은 각각 식 (5)와 식 (6)으로 주어진다.

$$V_{emf} = \frac{8\pi r_s N_s v}{\tau} [A_n^I I_1(k_n r_s) + B_n^I K_1(k_n r_s)] \times \cos(k_n z) \quad (5)$$

$$V_{emf} = \frac{2A\pi r_s N_f v}{\tau} [A_n^I I_1(k_n r_s) + B_n^I K_1(k_n r_s)] \times \cos(k_n z) \cos\left(\frac{n\pi}{3}\right) \quad (6)$$

그림 5는 Halbach 자화 모델과 반경방향 자화모델의 역 기전력을 단상과 삼상 코일에 대해 해석 값과 유한요소 해석 결과와의 비교를 보여준다. 역 기전력이 쇄교 자속으로부터 유도되어 진 것이므로, 쇄교 자속과 마찬가지로 각 자화 모델에 대해 단상권선인 경우가 삼상권선인 경우보다 역 기전력이 더 크다.

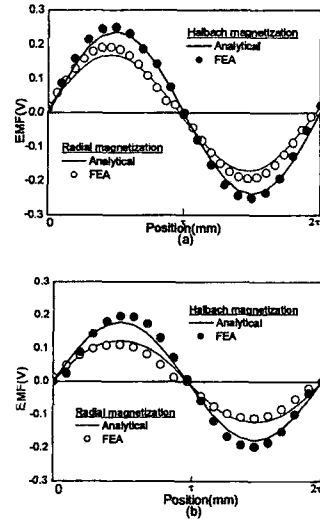


그림 5. Halbach 자화 모델과 반경방향 자화모델의 역 기전력 특성: (a) 단상권선 및 (b) 삼상권선

2.3 설계 변수에 따른 힘 특성

그림 6은 설계 변수에 따른 힘 특성을 해석하기 위해 그림 1에 제시된 Tubular 모터의 해석 모델을 보여준다.

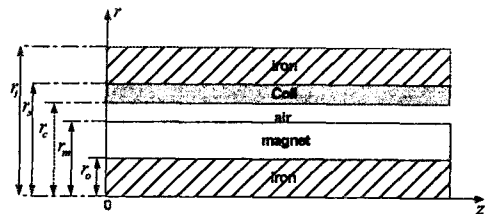


Fig. 6 Tubular모터의 단면도

표1 공극 길이에 따른 추력특성 해석을 위한 설계 변수들

Parameters	Radial-1phase	Radial-3phase	Halbach-1phase	Halbach-3phase
τ	20(mm)			
τ_m	15(mm)		10(mm)	
r_o	10(mm)			
$r_s - r_c$	5(mm)			
$r_i - r_s$	10(mm)			

2.3.1 공극 길이에 따른 영구자석 추력 특성

표 1은 공극 길이에 따른 영구자석 추력 특성을 해석하기 위한 고정된 설계 변수들을 보여준다. 그림 7과 8은 각각 Halbach자화와 반경방향 자화 영구자석을 갖는 모델에 대해 고정된 극 간격 τ 에 대한 r_m/r 변화 및 공극 길이 $r_c - r_m$ 의 변화에 대한 추력 최대 값의 변화를 보여준다. 공극길이가 증가할수록 추력은 지수 함수적으로 감소하며, 자석 높이가 증가할수록 추력이 커짐을 알 수 있다.

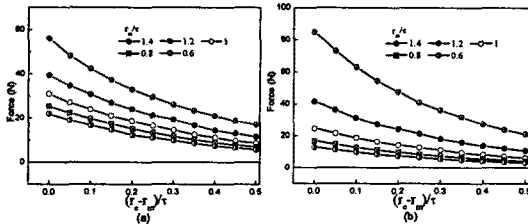


그림. 7 Halbach자화 모델에 대한 추력 최대 값 vs. $(r_c - r_m)/\tau$: (a) 단상전류 $i = 2(A)$ 및 (b) 삼상전류 $i_a = 2(A), i_b = i_c = -1(A)$

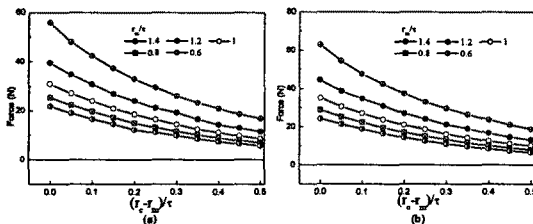


그림. 8 반경방향 자화 모델에 대한 추력 최대 값 vs. $(r_c - r_m)/\tau$: (a) 단상전류 $i = 2(A)$ 및 (b) 삼상전류 $i_a = 2(A), i_b = i_c = -1(A)$

2.3.2 자석 두께에 따른 영구자석 추력 특성

표 2는 자석 두께에 따른 영구자석 추력 특성을 해석하기 위한 고정된 설계 변수들을 보여준다. 그림 9와 10은 각각 Halbach자화와 반경방향 자화 영구자석을 갖는 모델에 대해 고정된 공극길이 $r_c - r_m$ 에 대한 $\tau/r_c - r_m$ 를 변수로 공극길이에 대한 추력 최대 값의 변화를 도시한 것이다. 자석 높이가 증가할수록 추력이 비 선형적으로 증가하며, 극 간격이 증가할수록 추력 증가의 폭이 서서히 둔화됨을 알 수 있다. 특히, Halbach 자화모델의 $\tau/(r_c - r_m)$ 이 10인 경우가 20인 경우보다 오히려 최대추력이 더 큰데, 이로부터, 공극길이가 일정할 때 효율적으로 자석 높이와 극 간격을 결정할 수 있다.

표2 자석 두께에 따른 추력특성 해석을 위한 설계 변수들

Parameters	Radial-1phase	Radial-3phase	Halbach-1phase	Halbach-3phase
$r_c - r_m$			4(mm)	
r_o			10(mm)	
$r_s - r_c$			4(mm)	
$r_i - r_s$			10(mm)	

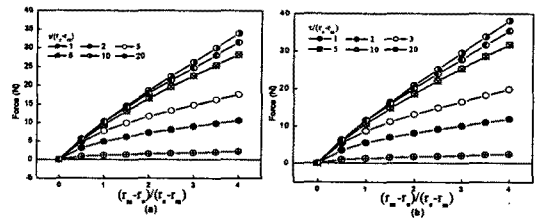


그림. 9 Halbach자화 모델에 대한 추력 최대 값 vs. $(r_m - r_o)/(r_c - r_m)$: (a) 단상전류 $i = 2(A)$ 및 (b) 삼상전류 $i_a = 2(A), i_b = i_c = -1(A)$

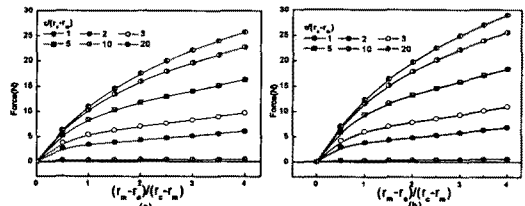


그림. 10 반경방향 자화 모델에 대한 추력 최대 값 vs. $(r_m - r_o)/(r_c - r_m)$: (a) 단상전류 $i = 2(A)$ 및 (b) 삼상전류 $i_a = 2(A), i_b = i_c = -1(A)$

3. 결 론

본 논문에서는 Halbach자화와 반경방향 자화 영구자석을 갖는 Tubular모터 모델의 영구자석에 의한 쇄교 자속, 역 기전력 특성식이 제시되었고, 해석 결과는 유한요소 해석과 잘 일치함을 확인했다. 또한, 설계변수에 따른 힘 특성을 제시함으로써 모터 설계에 있어 최적 설계 변수를 예측할 수 있었다. 본 논문에서 해석한 Tubular 모터 모델은 슬롯/슬롯리스 모두에 적용 가능하다.

[참 고 문 헌]

- [1] 정상섭, 장석명 "질량/스프링계를 고려한 리니어 왕복 액츄에이터 시스템의 동특성 해석", 전기학회 논문지 제 51-B 권 7호, 51B-7-6, pp.370-378, 2002.7
- [2] 장석명, 최장영, 이성호, 이승원, "Halbach/수직 자화 영구자석을 갖는 Tubular 모터의 특성해석", KIEE, EMECS, 춘계 학술대회 논문집, pp.119-121, April 2003.
- [3] Nicola Bianchi, "Analytical Computation of Magnetic Fields and Thrusts in a Tubular PM Linear Servo Motor", IEEE, Trans. Magn., vol.1, pp.21-28, 2000
- [4] Duane C. Hanselman, "Brushless Permanent Magnet Motor Design", McGraw-Hill, pp.70-71, 1994.