

계단 승월용 이동로봇의 구동모터 제작을 위한 TFM의 3D 시뮬레이션

문상석*, 김승호**, 최창환**, 김철수*, 박기환*
*광주과학기술원, **한국원자력연구소

TFM 3D Simulation to design an actuator for Mobile Robot climbing stairs

Sangseok Yun*, Seungho Kim**, Changhwan Choi**, Chulsoo Kim*, Kyi-hwan Park*
*Kwangju Institute of Science and Technology, **Korea Atomic Energy Research Institute

Abstract. - Mobile Robot climbing stairs needs high power and high efficiency. one of the high power type motor is Transverse Flux Motor (TFM). Moreover, TFM is a high force density per volume.

We analyzed a characteristic for the TFM and simulated the parametric research of the TFM by using 3D FEM solutions.

It presents to design the basis of the TFM. design parameters are Radius of outer rotor, pole height, pole depth, pole depth, airgap, and Magnetomotive force.

1. 서 론

이동로봇이 경사면이나 계단을 승월하는 경우에는 일반 주행모터보다 큰 힘을 요구하게 되고 이러한 힘을 발생시키기 위해서는 필연적으로 모터의 체적과 무게가 증가하게 된다. 이에 부가적인 장치 탑재를 고려한다면 상대적으로 적은 중량의 모터설계가 중요한 변수로 작용할 것이다. 횡자속 전동기는 홀극형 구조를 가지는 릴럭턴스 전동기로서 횡방향 권선 체결 및 극 간격의 크기를 적게 설계 가능하여 높은 출력 밀도를 얻을 수 있다. 특히 적은 전동기 중량이 요구되는 전기기기, 자동차, 이동로봇 등 이동수단의 추력장치로 적합하다[1,2].

본 연구에서는 이동로봇의 기구학적 해석을 통해 얻어진 요구성능해석을 바탕으로 제작하고자 모터의 중량을 선정하였으며 모터 제작 시 고려해야 할 회전자 외경, 고정자 및 회전자의 치(齒) 길이, 치 두께와 같은 집중변수 모델의 특성을 상용프로그램 툴인 ANSYS를 이용하여 분석하였다.

2. 본 론

2.1 횡자속 전동기 이론

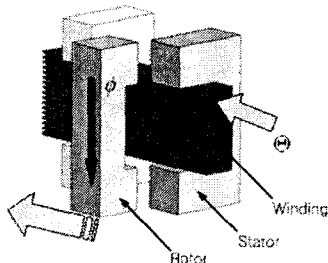


그림 1. 횡자속 전동기 기본형태

그림 1은 횡자속 전동기의 기본형태로 전류의 방향과 회전자(Rotor)의 이동방향이 동일하다. 횡방향 권선으로 인하여 기존의 종방향 타입보다 권선에 따른 설계의 제약을 덜 받게 되며 자기회로와 전기회로의 분리로 인하여 높은 효율을 얻을 수 있다.

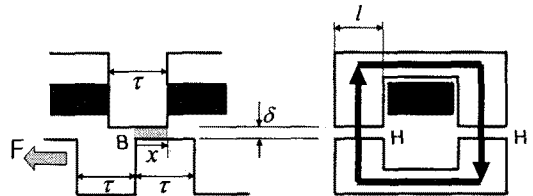


그림 2. 횡자속 전동기의 해석모델

횡자속 전동기의 힘 발생원리는 그림 2와 같이 전기적인 힘에 의해 기자력 θ 를 가했을때 자속 ϕ 가 발생하며 비정렬 상태의 회전자가 자기저항을 최소로 위해 고정자와 일치할 때까지 힘을 가지는 것이다. 해석모델에서 τ 는 치 길이, δ 는 공극, B는 자속밀도를 나타낸다. 해석모델을 살펴보면 우선 자기장 시스템에서의 수식은 다음과 같다[3].

$$\oint H \cdot dl = \int J_f \cdot nda \quad (1)$$

$$H \cdot \delta + H \cdot \delta = NI \quad (2)$$

여기에서 구해진 자기력 H와 자속밀도 B는

$$H = \frac{NI}{2\delta} \quad (3)$$

$$B = \mu_0 H = \frac{\mu_0 NI}{2\delta} \quad (4)$$

투자율이 무한대인 철심을 가정하여 자기회로에 저장되는 자기 에너지와 자기수반 에너지는 다음 식 (5), 식 (6)과 같다.

$$W_m = \int_v \int_0^B H(B)dBdV \quad (5)$$

$$W_{co} = \int_v \int_0^H B(H)dHdV \quad (6)$$

그림 2로부터 구해진 자기 수반 에너지 W_{co} 로 기자력이 일정할 때 발생하는 추진력 F_x 를 구하면

$$F_x(\theta_{\delta}, x) = \left[-\frac{\partial W_{co}}{\partial x} \right] = \frac{\mu_0}{2\delta} \theta_{\delta}^2 l \quad (7)$$

여기서 θ_s 는 자극면이 접하는 공극당 기자력, l 은 해석 모델에서의 z방향의 길이를 나타낸다.

식 (7)을 살펴보면 기자력(θ_s)과 치 두께(d)가 추력에 비례하여 영향을 미치고 있음을 알 수 있다.

해석 모델에서 발생하는 평균 힘은 돌출유무에 따른 전 원인가의 반복으로 인하여 식 (7)의 절반값에 해당되며 단위면적당 발생하는 힘 밀도 F_{Ax} 는 다음과 같다[4].

$$F_{xmi} = \frac{1}{2} F_x = \frac{\mu_0}{4\delta} \theta_s^2 l \quad (8)$$

$$F_{xd} = \frac{F_{xmi}}{2\tau l} = \frac{\mu_0}{32\delta\tau} \theta_s^2 2\delta \quad (9)$$

식 (9)는 횡축형 전동기 힘 발생 밀도로 전동기 설계 시 기본식으로 이용되고 있다.

2.2 모터 설계

주어진 요구성능을 만족시키기 위해서 그림 3과 같은 설계 순서를 가지고서 모터를 설계하였다.

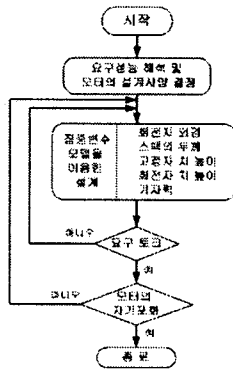


그림 3. 설계 순서

2.3 이동로봇용 TFM의 요구성능

이동로봇의 메카니즘은 대개 바퀴형과 궤도형으로 나뉘어진다. 특히 궤도형의 경우에는 바퀴형에 비해 구조적인 안정성을 유지할 수 있다.

그림 4는 계단 승월을 위한 이동로봇의 구조적인 메카니즘이다. 전륜부와 후륜부가 트랙으로 구성된 궤도형이다.

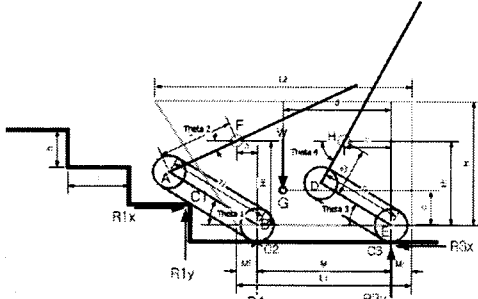


그림 4. 이동로봇의 구조적 메카니즘

계단의 경계조건을 설정한 후 이동로봇의 구조적인 메카니즘을 바탕으로 모터의 요구성능을 구하는 식은 다음과 같다.

$$\sum F_x = -\mu R_{3y} + W \sin \gamma = 0 \quad (10)$$

$$\sum F_y = R_1 + R_2 + R_{3y} - W \cos \gamma = 0 \quad (11)$$

$$\sum M_{O_2} = -R_1 l h + R_{3y} l h - W \sin \gamma (c + \frac{D_r}{2}) - W \cos \gamma (2l h - d - \frac{D_r}{2} \sin \gamma) = 0 \quad (12)$$

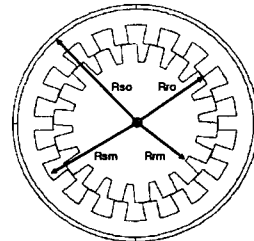
$$T = \frac{D_r}{2} * F \quad (13)$$

식 (10)-(13)을 이용하여 구해진 모터의 요구토크는 대략 12.7[Nm]이다.

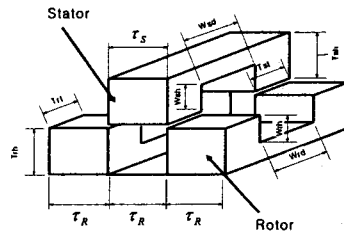
2.4 집중 설계변수

요구성능 해석을 통해 도출된 토크에 적합한 모터를 설계하기 위해서는 여러 가지 설계변수를 고려해야 한다.

그림 5의 a)와 b)는 모터 설계에 필요한 설계변수를 나타낸 것이다.



a) 단면도



b) 부분 세면도

그림 5. TFM 설계변수

횡자속 전동기 이론식을 통하여 알아본 모터의 집중 설계 변수로는 기자력(θ)과 그에 따르는 공극(δ), 치 두께(T_{rt} , T_{st})가 있으며 모터의 자기포화에 영향을 미칠 수 있는 고정자(W_{sh})와 회전자(W_{rh})의 치높이, 모터 출력 및 증량과 관계되는 회전자의 반경(R_{ro})이다.

요구성능을 만족시키는 집중 설계 변수값을 도출하기 위하여 상용프로그램인 ANSYS(ver 7.0)을 사용하였다.

2.5 시뮬레이션

보다 정확한 시뮬레이션 결과를 위해 모터 재질인 규소강의 B-H Curve로 자기적 비선형성을 고려하였다. 재질 특성은 최대자속 전동기 대략 2[T]일때 자속의 포화상태에 이르게 된다. 초기 설계시 공극의 경우는 조밀할수록 큰 토크를 생성하지만 실제적인 가공 가능한 정도를 고려하여 0.4mm로 설정하였고 단상 18개의 돌출부를 가지는 횡자속형 전동기의 3차원 설계를 수행하였다. 해석 프로그램 특성상 3차원 토크값 도출이 불가능하여 각 노드를 MST(Maxwell Stress Tensor)방법[5]을 이용하여 힘 Fmag를 구하였고 회전자 내 각 노드와 회전축 중심과의 거리에 힘 성분을 Cross Product 하여 횡자속 전동기의 토크값을 도출하였다[6].

집중 설계변수로 우선 모터의 체적과 직접 연관이 있는 회전자의 회전반경을 설정하고 다른 변수와의 관계를 살펴보았다.

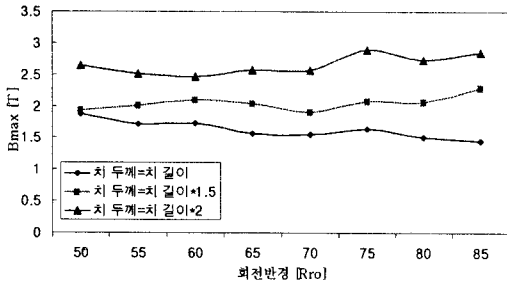


그림 6. 회전반경에 따른 최대 자속밀도 특성

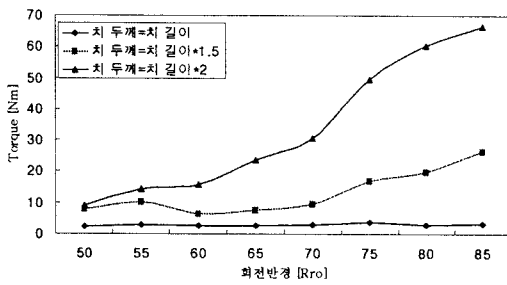


그림 7. 회전반경에 따른 토크 특성

그림 6과 7는 회전자 반경이 증가함에 따른 모터의 최대 자속밀도와 토크값을 나타낸 것이다.

전기회로의 권선면적[100turn]을 고려하여 설계하였으며 기자력은 2000[AT], 치 길이(r)는 회전자의 반경에 비례한 값, 그리고 치 두께(W_{sh} , Tr_h)는 치 길이에 비례하여 모터의 자속밀도와 토크값을 구하였다.

치 두께가 치 길이에 비해 상대적으로 길어지게 되면 토크값이 증가하게 됨을 볼 수 있다. 하지만 자속 밀도 또한 높아져 포화자속을 넘지 않는 범위 내에서의 적절한 토크값을 설정하여야 한다. 대략적으로 치 두께의 경우에는 치 길이의 1.5배 정도 비례하여 설계하면 포화 자속을 넘어서지 않는 범위 내에서 최대의 토크값을 얻을 수 있다.

그림 8, 9는 55, 65, 75mm의 회전자 반경에 대해 치 두께(T_{sh} , Tr_h)에 따른 모터의 최대 자속밀도와 토크값을 나타낸 것이다.

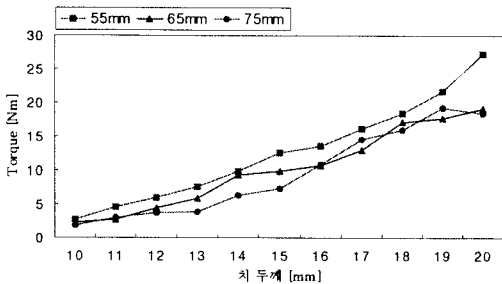


그림 8. 치 두께에 따른 토크 특성

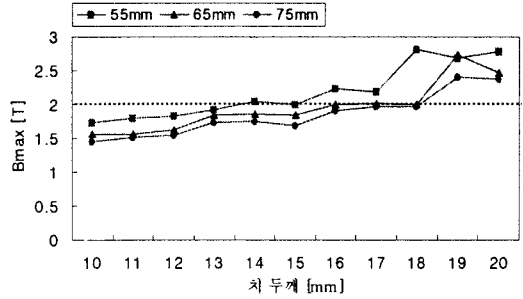


그림 9. 치 두께에 따른 최대 자속밀도 특성

Rro [mm]	τ [mm]	$T_{sh_{opt}}$ [mm]	$\frac{\tau}{T_{sh}}$	Torque [Nm]
55	9.5	14	0.67	9
65	11.3	16	0.71	11
75	13	18	0.72	15

표 1. 집중 설계 변수

표 1을 살펴보면 치 길이에 대한 치 두께의 비율이 대략 0.7 정도 일때 실제 단상 모터에 최대 토크를 획득할 수 있음을 보인다.

그림 10과 11은 회전자 반경이 75mm일때 ($\tau = 13$ mm) 고정자 치 높이와 회전자 치 높이에 대한 모터의 특성을 나타내었다.

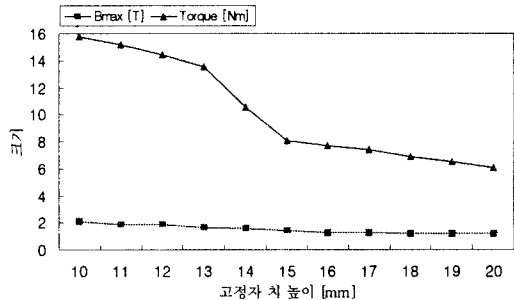


그림 10. 고정자 치 높이에 따른 모터 특성

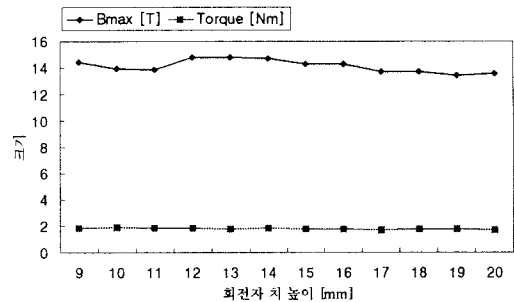


그림 11. 회전자 치 높이에 따른 모터 특성 특성

고정자의 치 높이는 작을수록 고 토크를 얻을 수 있지만 권선 면적을 고려하면 대략 치 길이와 같이 설계했을 때 만족스러운 토크값을 얻을 수 있으며 회전자의 치 높이는 큰 변화량을 보이지 않고 있지만 자속 포화를 고려하여 1.5배 이상의 높이로 설계하면 된다.

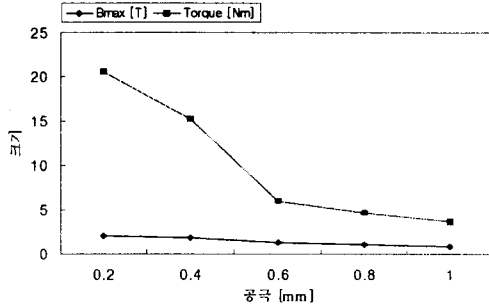


그림 12. 회전반경(75mm)내 공극 변화에 따른 모터 특성

그림 12의 경우는 이론식을 통해 살펴본 바와 같이 선정된 집중 설계 변수값에 공극의 변화를 주었을 경우에 반비례하여 자속밀도와 토크값이 변화함을 보여주고 있다.

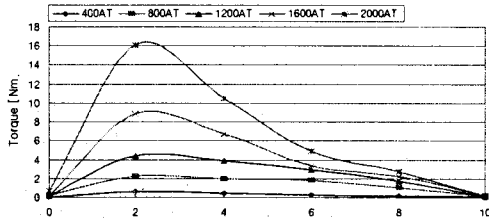


그림 13. 토크 프로파일

그림 13은 시뮬레이션을 통해 선정된 집중 설계변수 값을 가지고 회전각의 변화에 따른 토크값을 나타낸 것이다.

3. 결 론

본 논문에서는 이동로봇에 적합한 횡방향 전동기의 변수에 대한 특성을 FEM Solution을 통하여 살펴보았다.

모터 재료의 B-H Curve 특성을 이용하여 집중 설계 변수들간의 영향 및 모터의 성능을 검토해 보았으며 이를 바탕으로 실제 모터 제작에 필요한 요구성능 및 설계 변수의 상관관계를 정립하였다.

앞으로 본 시뮬레이션을 통하여 설정된 집중 설계변수를 이용하여 실제 제작모터에서의 자속밀도, 토크, 효율 등의 성능을 검증할 예정이다.

본 논문은 원자력 연구개발사업의 지원에 의하여 원자력연구소 주관으로 수행된 과제임.

[참 고 문 헌]

[1] 강도현, Herbert Weh, "철도 차량용 고풍력 횡축형 전동기 설계에 관한 연구", Trans. KIEE, 48권, 6호, 1999
 [2] G. Henneberger, M.Bork, "Development of a new transverse flux motor", IEE,Savoy Place, London WC 2R 0BL,UK, 1997
 [3] Herbert H. Woodson, "Electromechanical Dynamics", John Wiley & Sons, Inc., 1968
 [4] Y.H.Jeong, D.H.Kang J.M.Kim, "A design of transverse flux motor with permanent magnet shield", ISI E 2001, Vol II, 2001
 [5] A.Benhama, A.C.Williamson and A.B.J.Reece, "Computation of Electromagnetic Force from Finite Element Field Solutions", Computation in Electromagnetics,