

영구자석 직류전동기의 치폭에 따른 특성해석

전 규 혁\* 서영택\*\* 배상한\*\*\* 오철수\*  
 \*경북대학교 전기공학과 \*\*구미1대학 전기전공 \*\*\*유니텍 (주)

Characteristics Analysis on Teeth Width of Permanent Magnet DC Motor

Kyu-Hyuk Chun\* Young-Taek Seo\*\* Sang-Han Bae\*\*\* Chul-Soo Oh\*  
 \* Dept. of Electrical Eng. Kyungpook Nat. Univ. \*\*Kumi College \*\*\*Unitec.

**Abstract** - This paper deals with the effect of teeth width variation in Permanent Magnet DC motor. As teeth width varies, effective flux density is influenced, which is closely related to torque-speed characteristics, output power, and efficiency of the motor. In this study, motor design was carried out using finite element method with various teeth width. Prototype motors under constraints of same armature diameter, material and axial length were made and their performances were tested.

1. 서 론

영구자석 직류전동기는 자동차, 공장 자동화 시스템, 의료장치, 가전제품등 그 사용범위가 다양하고 자동차 산업의 발달과 제어기기 산업의 발달로 수요가 커지고 있다. 이에 따라 효율의 향상, 소형 경량화, 고성능화 등이 지속적으로 연구되어 왔다. 본 논문에서는 영구자석 직류전동기의 최적설계를 위한 장하분배 특성을 전기자 치폭을 변수로 하여 특성해석을 하였다. 치폭의 변화에 따라 유효 자속량이 변할 것이며 또한 전기자에 감을 수 있는 최대 권선수도 변한다. 이에따라 전동기의 출력과 토크특성에 영향을 미치는 전기장하(Electric Loading)와 자기장하(Magnetic Loading)의 비가 변화되며, 이는 전동기 효율과도 밀접한 관계가 있다. 권선을 많이 감으면 전기장하가 커져 전동기의 특성이 좋아지겠지만 공간적인 제한으로 무한정 많이 감을 수 없다. 치폭을 변화시켜 최적조건을 찾음으로서 전동기의 특성을 개선시킬 수 있을 것이다. 따라서 본 논문에서는 권선수 40회의 동일한 전기자권선 및 계자 영구자석에 대해 전기자의 치폭을 변화시켜 유한요소 해석을 수행한 뒤, 3가지 prototype 전동기 모델을 제작하여 실험에 의한 특성을 비교 검토하였다.

2. 본 론

2.1 전동기 특성식

영구자석 직류전동기의 유기기전력과 토크식은 권선계 사형 직류전동기와 동일하며 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$E_a = k\omega\phi \quad (1)$$

$$T = k\phi I_a \quad (2)$$

$$k = \frac{Zp}{2\pi a} \quad (3)$$

- $E_a$  : 유기기전력                      Z : 도체수
- $\phi$  : 한극당 자속                      a : 병렬회로수
- $I_a$  : 전기자 전류                      p : 극수

전동기의 전기자회로 전압평형식은 식 (4)과 같이 주

어지며, 발생토크와 부하와의 관계식은 식 (5)와 같다.

$$V = E_a + I_a R_a + V_b \quad (4)$$

$$T = J \frac{d\omega}{dt} + D\omega + T_L \quad (5)$$

- V : 인가전압                               $R_a$  : 전기자 저항
- $V_b$  : 브러시 전압강하
- J : 관성모멘트                              D : 댐핑계수
- $\omega$  : 기계적 각속도                       $T_L$  : 부하토크

직류기의 설계에서는 철심 각부에서의 자속 밀도의 포화를 고려하여야 하며, 이러한 포화현상 자기회로는 전기자 철심 치부 및 자석계자 요크부가 대상이 된다. 치부의 자속밀도는 자속분포가 정현파이면 식 (6)과 같이 나타낼 수 있다.

$$B_t = \frac{\pi p \phi}{S_n t_w l_i} \quad (6)$$

- $S_n$  : 슬롯수                                       $t_w$  : 치폭
- $l_i$  : 유효 회전자 길이

치폭은 이러한 치부의 자속밀도를 허용할 수 있는 크기로 결정되어야 한다. 즉, 치폭은

$$t_w \geq \frac{\pi p \phi}{S_n l_i B_t} \quad (7)$$

를 만족하여야 한다.

2.2 유한요소 해석

정자장에서 지배방정식을 도출하기 위한 맥스웰 방정식은 다음과 같다.

$$\nabla \times H = J \quad (8)$$

$$\nabla \cdot B = 0 \quad (9)$$

$$B = \mu H \quad (10)$$

여기서 H는 자계의 세기, B는 자속밀도, J는 전류밀도,  $\mu$ 는 투자율이다. 자속밀도와 벡터자기포텐셜과의 관계는 다음과 같다.

$$B = \nabla \times A \quad (11)$$

영구자석의 자화의 세기를 M이라 하면 영구자석 내부에서는 다음식이 성립한다.

$$B = \mu_0 H + M \quad (12)$$

토크식은 맥스웰 응력법을 이용하면 다음과 같이 폐곡면에 대한 면적분으로 구할 수 있고, 그 식은 다음과 같다.

$$T = \frac{1}{\mu_0} \int_s \int [ (r \times B)(B \cdot n) - \frac{1}{2} B^2 (r \times n) ] dS \quad (13)$$

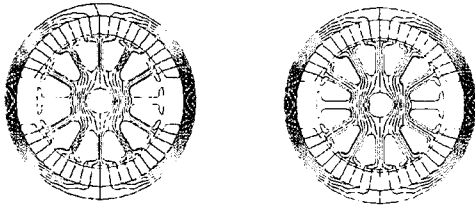
여기서 r은 회전자 중심에서의 반지름 방향벡터이며, dS는 표면의 수직벡터이다.

2차원 해석에서는 면적분을 선적분으로 바꿀 수 있다.

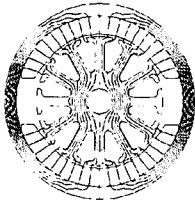
$$T = \frac{1}{\mu_0} \oint_c r B_t B_n dC \cdot L \quad (14)$$

여기서  $B_r$ 과  $B_t$ 는 적분방향에서의 자속밀도의 접선

성분과 수직성분이고,  $L$ 은 축방향 길이이다. 시뮬레이션은 유한요소 상용 프로그램인 Maxwell를 이용하였으며, 해석한 자속분포는 그림과 같다.

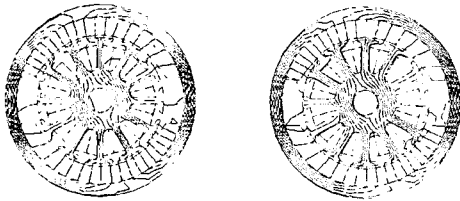


a) 치폭 2mm의 자속분포      b) 치폭 2.7mm의 자속분포

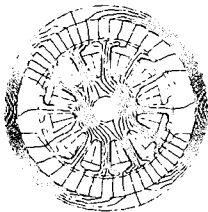


c) 치폭 3mm의 자속분포

그림1. 치폭에 따른 자속분포도(무부하시)



a) 치폭 2mm의 자속분포      b) 치폭 2.7mm의 자속분포



c) 치폭 3mm의 자속분포

그림2. 치폭에 따른 자속분포도(부하시)

위 그림에서 알 수 있듯이 영구자석으로부터 나온 자속선은 철심을 통해 대부분 흐름을 알 수 있고, 부하시에는 자속의 경로변경과 그 대표축의 이동을 관찰할 수 있다.

### 2.3 실험 및 결과 고찰

제작한 영구자석 직류전동기는 2극, 정격전압 48V, 정격출력 100W급으로, 영구자석 재료로는 페라이트 자석재료를 사용하였고, 철심재료로는 S23을 사용하였다. 각 영구자석 직류전동기의 정량적 비교를 위해 치폭을 제외한 다른 조건들은 모두 동일하게 하였다. 따라서 각 전동기의 전기장하는 슬롯폭과 권선수가 같은 조건이므로 모두 동일하지만 자기장하는 치폭에 따라 달라지며

이것이 속도, 토크 특성 및 효율에 영향을 끼치며 이를 실험을 통하여 관찰할 수 있었다. 치폭은 2mm, 2.7mm, 3mm의 샘플을 prototype으로 취하고 이에 대한 공통 사항은 표1과 같다.

표1. 전기자와 영구자석의 사양

전기자		영구자석	
직경	40mm	두께	5.6mm
축방향길이	23mm	잔류자속	0.4T
재질	S23	보자력	270kA/m

철심재질 S23의 자화곡선은 다음과 같다.

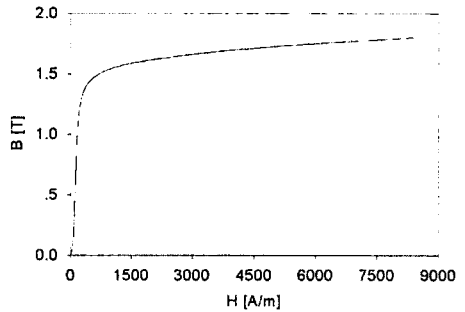
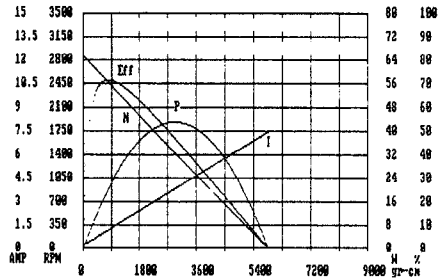
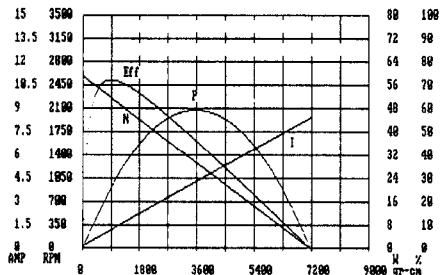


그림3. 철심의 자화곡선

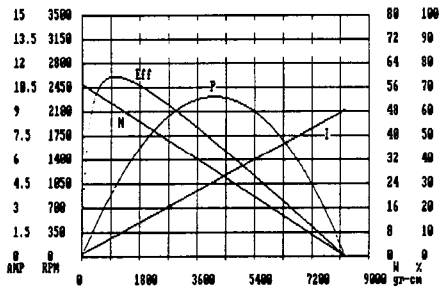
제작된 전동기에 12V에서 72V 까지의 범위로 인가전압을 가변시켜 전동기의 속도와 전기자 전류를 무부하시와 부하시(1000g·cm)에 대해 각각 측정하였다. 제작한 전동기는 권선수가 40회 이므로 높은 전압까지 견딜 수 있다. 24V와 48V 인가시 실험결과를 각각 그림 4, 5에 나타냈다.



a) 치폭 2mm의 특성곡선

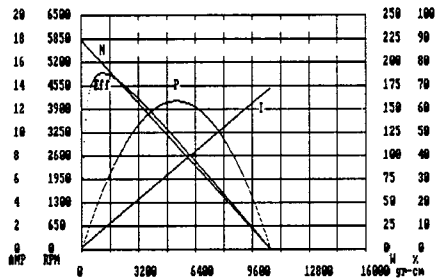


b) 치폭 2.7mm의 특성곡선

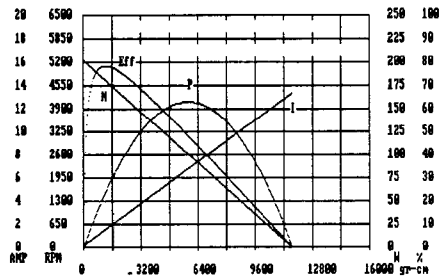


c) 치폭 3mm의 특성곡선

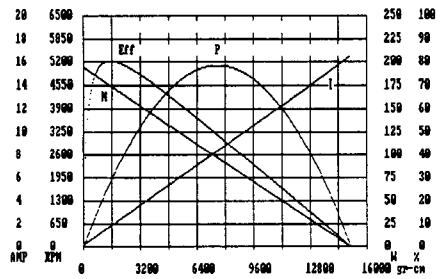
그림4. Prototype 전동기의 특성곡선(24V 인가시)



a) 치폭 2mm의 특성곡선



b) 치폭 2.7mm의 특성곡선



c) 치폭 3mm의 특성곡선

그림5. Prototype 전동기의 특성곡선(48V 인가시)

실험결과, 최대효율은 24V 인가시는 치폭에 관계없이 부하토크 1000g·cm 부근에서 나타나고 있으나, 48V 인가시에는 치폭이 증가함에 따라 더 높은 부하토크에서 나타남을 알 수 있다. 이러한 현상은 24V 인가시에는 전기장강도가 작으므로 자기장강도의 함수인 치폭의 변화가

속도,토크 특성등에 미치는 영향이 적으나, 48V 인가시에는 전기장강도의 증가로 인해 선정된 3모델의 치폭 변화에 대한 장하분배의 불균형이 발생하여 속도, 토크 특성등에 영향을 많이 미치는 현상이 일어남을 알 수 있다. 이는 치폭의 증가와 함께 누설자속이 감소하고 유효자속량이 증가하는데 기인하고, 이로 인해 발생토크는 증가하고, 회전속도는 줄어든다. 그림6은 인가전압에 대한 효율의 변화를 나타냈다. 그림에서 알 수 있듯이 인가전압에 대해 각각의 치폭의 경우 효율이 증가하다가 어느 전압 이상이 되면 감소함을 알 수 있다.

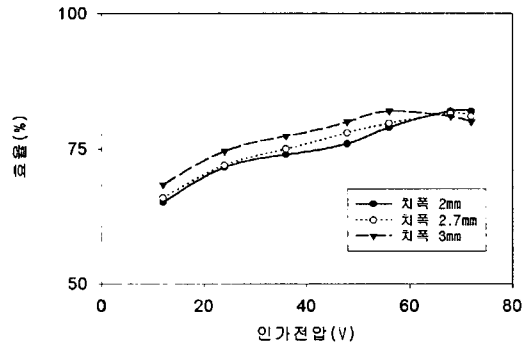


그림6. 인가전압에 따른 효율의 변화

전동기의 효율은 전압이 많이 높아지면 전동기의 정격전압을 넘어서 열손실이 늘어나므로 효율이 떨어지게 된다. 2mm와 2.7mm의 경우 68V인 경우 효율이 제일 높고, 3mm의 경우는 56V에서 제일 높고 인가전압이 더 높아지면 효율은 떨어진다.

### 3. 결론

영구자석 직류전동기를 치폭에 따라 유한요소법으로 해석하고 전동기의 prototype을 제작함으로써 치폭의 변화에 따른 전동기의 특성을 관찰할 수 있었다. 실험결과에 의해 치폭이 증가함에 따라 전동기의 특성이 좋아짐을 알 수 있었고, 제작한 prototype 전동기에 대해서는 치폭이 3mm인 경우가 특성이 제일 좋은 것으로 나타났다. 이는 동일한 조건하에 자기장강도가 증가함으로써 출력과 효율이 증가하기 때문이다. 치폭을 더 크게 하면 이론적으로는 특성이 더 좋아지겠지만 실제적으로 권선의 취부면적이 나오지 않으므로 전기장강도가 줄어들게 되어 특성이 개선되지 않는다.

### (참 고 문 헌)

- [1] T. Kenjo, S. Nagamori, "Permanent Magnet and Brushless DC Motors", Sogo Electronic Publishing Company, Tokyo.
- [2] E. S. Hamdi, "Design of Small Electrical Machine -s", John Wiley & Sons, 1994
- [3] Nady Boules, "Design Optimization of Permanent Magnet DCMotors", IEEE Transactions on Industry Applications, Vol. 26, No. 4, 1990
- [4] Peter Cmpbell, "Permanent Magnet Materials and their Application", Cambridge University Press, 1994
- [5] Kay Hameyer and Ronnie J. m. Belmans, "Permanent Magnet Excited Brushed DC Motors", IEEE Transactions on Industrial Electronics, Vol. 43 No. 2, 1996
- [6] 김철호, 배상한, 오철수, "영구자석 직류전동기의 회전자치 Parameter에 따른 특성해석", 대한전기학회 논문집, pp133~135, 1996