

영구자석 직류전동기의 회전자 치(齒) Parameter에 따른 특성해석

°김철호° 배상한° 오철수°
*경북대학교 전기공학과 **한국IG모터(주)

Characteristic Analysis on Teeth Parameter of Permanent Magnet DC Motor

°Chul-Ho Kim° Sang-Han Bae° Chul-Soo Oh°
* Dept. of Electrical Eng. Kyungpook Nat. Univ. ** Korea IG Motor Co., Ltd.

Abstract

This paper deals with the effect of teeth number variation in Permanent Magnet DC motor. As teeth number varies, both flux density distribution and winding pitch are influenced, which is closely related to torque-speed characteristics, output power, and efficiency.

In this study, motor design carried out using finite element method, and prototype motors were manufactured to test their performance analysis.

In spite of torque ripple due to cogging effect, better characteristic of machine using small teeth number was recorded than the motors with large number of rotor teeth. One of that reasons is caused by adopting large coil-length due to large number of teeth, i. e. large coil-pitch.

1. 서 론

영구자석 직류전동기는 자동차, 발전제품, 항공기 부품 등 그 사용범위가 다양하고, 속도 토크 특성 면에서 선형성을 가지므로 제어용으로 널리 이용되어, 이에 따라 효율의 향상, 소형화 등이 꾸준히 연구되어 왔다.

본 연구에서는 20W급 정도의 소형 영구자석 직류전동기의 설계시 선결과제로 부각하는 회전자의 치(齒) 수의 선정을 위해 여러종류의 치 수 모델을 택해 유한요소 해석을 도입해 보았다.

치(齒) 수에 따라 공극의 자속 분포 및 권선 피치 등이 다양화 될 수 있고 이에 따라 전동기의 가장 중요한 특성인 출력과 토크에 영향을 미치는 전기장하(Electric Loading)와 자기장하(Magnetic Loading)의 비가 변화되며, 이는 전동기 효율과도 밀접한 관계에 있다.^{[1][2]} 따라서 본 논문에서는 동일한 전기자 및 영구자석 치수(D²L)에 대해 전기자의 치(齒)를 변화시켜 유한요소 해석을 수행한

뒤 설계하였으며, Prototype 전동기 4개를 제작하여 특성을 측정하여 비교 검토하였다.

2. 유한요소해석

정자장에서 지배방정식을 도출하기위한 맥스웰 방정식은 다음과 같다.

$$\nabla \times H = J \quad (1)$$

$$\nabla \cdot B = 0 \quad (2)$$

$$B = \mu H \quad (3)$$

여기서 H는 자계의 세기, B는 자속밀도, J는 전류밀도, μ 는 투자율이다.

자속밀도와 벡터자기포텐셜과의 관계는 다음과 같다.

$$B = \nabla \times A \quad (4)$$

영구자석의 자화의 세기를 M이라하면 영구자석내부에서는 다음식이 성립한다.

$$B = \mu_0 H + M \quad (5)$$

$$\nabla \times \frac{1}{\mu_0} (B - M) = J_0 \quad (6)$$

여기서 J_0 강제전류밀도이고 진공중의 자기저항율과 벡터 포텐셜 A를 이용하여 다음과 같이 나타나며, 특히 (8)식의 오른쪽 두번째 항은 동가자화전류밀도이다.

$$\nabla \times \nu_0 (\nabla \times A - M) - J_0 = 0 \quad (7)$$

$$\nu_0 \nabla \times \nabla \times A = J_0 + \nu_0 \nabla \times M \quad (8)$$

$$J_m = \nu_0 \nabla \times M \quad (9)$$

$$\nabla \times (\nu_0 \nabla \times A) = J_0 + J_m \quad (10)$$

$$\nu_0 \frac{\partial^2 A}{\partial x^2} + \nu_0 \frac{\partial^2 A}{\partial y^2} + (J_0 + J_m) = 0 \quad (11)$$

위 (11)식은 영구자석부분의 Poisson 방정식으로 알려져 있으며, (3)식을 이용해 영구자석에 인접한 철심 영역의 식을 구할 수 있다.

토크식은 맥스웰 응력법을 이용하면 다음과 같이 폐곡면에 대한 면적분으로 구할 수 있고, 그 식은 다음과 같다.^{[3][4][5]}

$$T = \frac{1}{\mu_0} \int \int [(r \times B)(B \cdot n) - \frac{1}{2} B^2 (r \times n)] dS \quad (12)$$

여기서 r 은 회전자 중심에서의 반지름 방향벡터이며, dS 는 표면의 수직벡터이다.

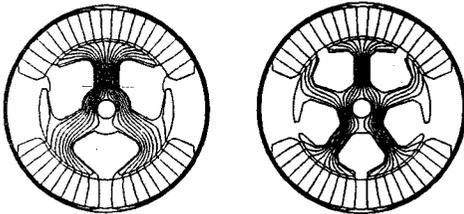
2차원 해석에서는 면적분을 선적분으로 바꿀 수 있다.

$$T = \frac{1}{\mu_0} \oint_c r B_t B_n dC \cdot L \quad (12)$$

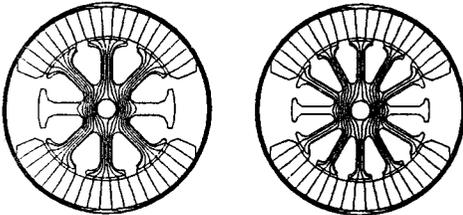
여기서 B_t 와 B_n 은 적분방향에서의 자속밀도의 접선성분과 수직성분이고, L 은 축방향길이이다.

시뮬레이션은 유한요소 상용 프로그램인 MagNet 5.1를 이용하였으며, 해석한 자속분포는 그림 1과 같다.

그림 2는 부하시의 그림이며, 이때 자속의 경로변경을 알 수 있고, 그 대표축의 이동을 판측할 수 있다.

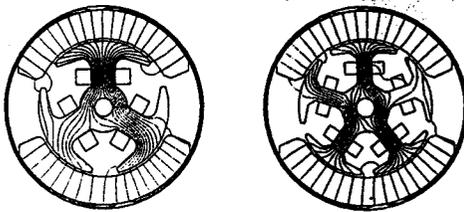


a) 치(齒)수 3의 자속분포 b) 치(齒)수 5의 자속분포

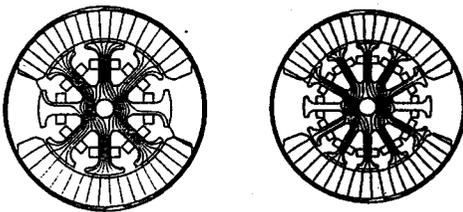


c) 치(齒)수 8의 자속분포 d) 치(齒)수 12의 자속분포

그림 1. 치(齒)수에 따른 자속분포도 (무부하시)



a) 치(齒)수 3의 자속분포 b) 치(齒)수 5의 자속분포



c) 치(齒)수 8의 자속분포 d) 치(齒)수 12의 자속분포

그림 2. 치(齒)수에 따른 자속분포도 (부하시)

3. 전동기제작 및 실험

제작한 영구자석 직류전동기는 2극, 정격전압 12V, 정격 출력20W급으로, 영구자석 재질로는 잔류자속밀도가 다소 낮으나 보자력이 큰 페라이트 영구자석 중에 스트론튬 계열의 ANSI 규격 Ceramic 7급을 이용하였다.

전기장하와 자기장하는 독립된 양이 아니므로 자기장하에 비해 전기장하를 증가시키기 위해 슬롯폭을 증가시켰으며⁶⁾, 4 가지 다른 형태의 치 수에 대해 동일한 코일 및 도체수로 권선하였다. 특성의 정량적 비교를 위해서 전동기의 자로 구성상 평균 치(齒) 단면적을 균일하게 설계하였다. 치(齒) 수는 3, 5, 8, 12의 샘플을 Prototype으로 취하고 이에 대한 공통사항은 표 1과 같다.

표 1. 전기자와 영구자석의 사양

전기자		영구자석	
직경	23mm	내경	24 mm
축방향길이	21mm	두께	5 mm
재질	SPC	잔류자속	3736 G
도체수	600	보자력	2694 Oe

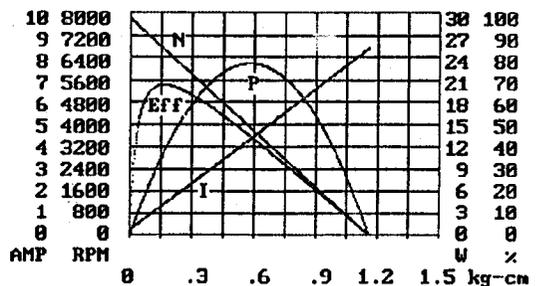
영구자석 전동기는 자기장하 측면에서 유효자속의 양이 특히 중요한데 Prototype 전동기에서 Search Coil방법으로 측정된 유효자속을 표 2에 나타내었다.

표 2. 치(齒)수에 따른 모터의 유효자속수

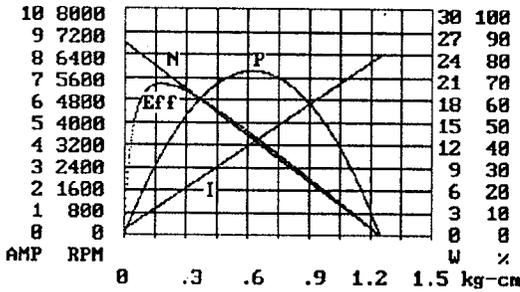
치(齒)수	코일피치	자속수(Mx)
3	1	7500
5	2	8633
8	3	8308
12	5	8816

제작된 전동기에 정격전압을 인가하고 토크미터로 토크를 변화시키며 속도와 전기자 전류를 측정하였다.

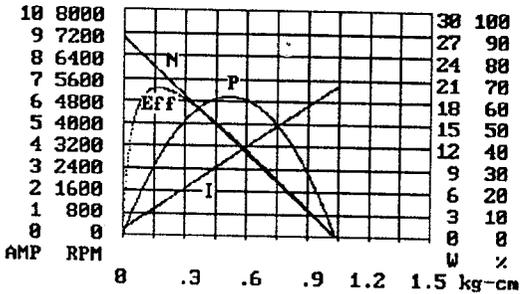
이 실험 결과를 그림 3에 나타냈으며, 최대효율과 최대 출력을 비교해보면 그림 a)는 치 수 3의 경우 효율 68%, 출력23.1W, b)는 치 수 5의 경우 효율 66.9%, 출력 21.8W, c)는 치 수 8의 경우 효율 65.4%, 출력 18.6W, d)는 치 수 12의 경우 효율 62.3%, 출력 18.4W이다. 특성이 치(齒)수에 거의 반비례하는 것을 알 수 있다.



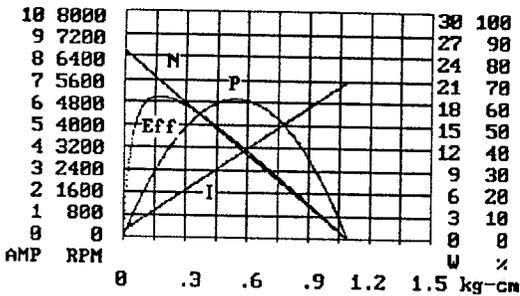
a) 치(齒)수 3의 특성곡선



b) 치(齒)수 5의 특성곡선



c) 치(齒)수 8의 특성곡선



d) 치(齒)수 12의 특성곡선

그림 3. Prototype 전동기의 특성곡선

4. 결과 및 검토

영구자석 직류전동기를 치(齒) 수에 따라 유한요소 해석하여 설계하였고, 실제 제작하여 효율 측면에서 만족할 만한 특성을 얻었다.

일반적으로 전기자 치(齒) 수가 증가하면 정류작용이 원활하여 특성이 개선되는 것으로 알려져 있으나, 이 논문의 실험결과 소형기에서는 오히려 치 수가 적은 쪽이 코강현상에 의한 토크 리플의 증가라는 불리한 점에도 불구하고, 최대 출력, 효율 측면에서 다소 유리한 것으로 나타났다. 이는 치 수가 증가함에 따라 영구자석에 대한 코일 이용율을 증가시킬 목적으로 코일 피치를 증가시켰고, 그 결과 코일의 전체길이도 증가되어 열손실이 크게 된 요인으로 사료된다.

본 연구에서는 영구자석 직류전동기의 치변수 변화에 따른 제한된 특성, 즉 동일한 자기장하에 대해 특성연구를 하였는데, 영구자석재질이 달라짐에 따라 장하비를 달리할 경우의 검토 및 최대효율이 되기 위한 최적조건을 구하는 것을 앞으로 심도있게 연구하여야 할 것으로 사료된다.

참고문헌

- [1] David A. Staton, Malcolm I. McGilp, and Timothy J. Miller, "Interactive Computer Aided Design of Permanent Magnet DC Motors", IEEE Transactions on Industry Applications, Vol. 31, No. 4, pp. 933-940, 1995.
- [2] T. Kenjo, S. Nagamori, "Permanent Magnet and Brushless DC Motors", Sogo Electronics Publishing Company, Tokyo.
- [3] E. S. Hamdi, "Design of Small Electrical Machines", John Wiley & Sons, 1994.
- [4] Ovidiu Craiu, Nicolae Dan, Eugene A. Badaea, "Numerical Analysis of Permanent Magnet DC Motor Performances", IEEE Transactions on Magnetics, Vol. 31, No. 6, 1995.
- [5] Peter Campbell, "Permanent Magnet Materials and their Application", Cambridge University Press, 1994.
- [6] 大川光吉, "永久磁石回轉機 設計와 應用", 總台電子, 1985.