

휠체어 구동용 영구자석 직류전동기 설계

이상중* 김철호* 공정식** 이우석*** 오철수*
 경북대학교 전기공학과* 서라벌대학** 부산정보대학***

Design of Permanent Magnet DC Motor for Electric Wheelchair Driving

Sang-Jong Lee* Chul-Ho Kim* Jeong-Sik Kong** Woo-Suk Lee*** Chul-Soo Oh*
 Dep. Electrical Engineering, Kyungpook N. Univ.* Sorabol College** Pusan College of Info. Tech.

Abstract - Permanent magnet DC motor is widely used in electrical tools, automotive manufacturing systems, electric vehicles, OA system drives, aircrafts and home appliances. PM motors are suited for such an application, since they can be designed for high torque-to-speed ratio and efficiency.

This paper deals with permanent magnet DC motor which is used in an electrical wheelchair. The motor has 6 PMs and 25 slots, and is coupled to the wheel with gears. In this study, motor design was carried out using finite element method. This paper discusses the design and construction of the prototype system and reports experimental results achieved from laboratory tests.

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

- V : 인가전압 R_a : 전기자 저항
- V_b : 브러시 전압강하 D : 댐핑 계수
- J : 관성모멘트 T_L : 부하토크
- ω : 기계적 각속도

전동기 설계에서 최대의 효율을 낼 수 있는 전기장하와 자기장하를 선정하는 것이 바람직한데, 이는 손실에 따른 기기의 온도상승과 밀접한 관계가 있기 때문이다. 또한 허용온도의 최대값은 절연재료에 의해 결정되고 도체수의 변화는 슬롯의 면적에 비례하게 되며, 이는 치의 폭과 깊이에 의해 제한을 받는다. 이러한 관계를 고려한 총 전기장하 A_t 와 자기장하 A_a 의 관계식은 다음과 같다.

$$A_t = I_z Z \quad (6)$$

$$A_a = \frac{I_z Z}{\pi d} \quad (7)$$

- I_z : 도체전류 d : 전기자 직경

1. 서 론

EV에는 영구자석 여자형 전동기가 주류를 이루고 있는데, 그 이유는 영구자석 여자형 전동기가 권선계자형 일반전동기에 비하여 구조가 간단하고, 값이 싸며 우수한 속도-토크 특성을 가지고 있기 때문이다. 이러한 특성을 가지는 전동기의 EV로의 적용에 대한 많은 연구가 필요하다.

본 논문은 EV의 일종인 전동 휠체어의 주구동 장치를 구동하기 위한 6극 영구자석 직류전동기의 최적 설계와 여러 파라미터의 산정 및 특성해석에 대해 연구 고찰하였다. 특히 영구자석 직류전동기의 장하분배 특성을 회전자 치폭 및 치 간격을 변수로 하여 특성해석을 수행하였다. 또한 전동기와 감속기어를 이용하여 prototype 전동 휠체어를 제작하였으며, 제작한 전동 휠체어의 특성 해석 및 속도-토크를 실험하였다.

2. 본 론

2.1 전동기의 특성 방정식

영구자석 직류 전동기의 유기기전력과 토크식은 권선계자형 직류전동기와 동일하며 다음과 같이 나타낼 수 있다.

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

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

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

- E_a : 유기기전력 N : 전기자 권선수
- Φ : 한극당 자속 a : 병렬회로수
- I_a : 전기자 전류 p : 극수

전동기의 전기자회로 전압평형식은 식 (4)와 같이 주어지며, 발생토크와 부하와의 관계식은 식 (5)와 같다.

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

표 1. 전동기의 제원

구분	규격
정격 전압	24 V
극 수	6
회전자 슬롯 수	25
회전자 외경	91.4 mm
회전자 내경	60.5 mm
회전자 축방향길이	18.3 mm
권선 방식	이층권
전기자 저항	1.0 Ω
코일당 권선수	10 turn
영구자석 두께	7 mm
영구자석축방향길이	26.3 mm

자기장하는 자속밀도의 최대치가 포화영역에 들지 않도록 하며, 회전자 치표면에서 최대자속이 발생하게 설계되어야 한다. 누설자속을 무시할 수 있다고 가정했을 때, 공극을 지나는 자속선은 모두 전기자 치를 통과하기 때문에, 공극의 자속밀도와 전기자 치 자속 밀도의 관계를 식으로 나타낼 수 있으며, 소형기의 경우 일반적으로 2.5~3.25 이다. 총 자기장하 B_{av} 와 자기장하 B_{av} 의 관계식은 다음과 같이 나타난다.

$$B_t = p\Phi \quad (8)$$

$$B_{av} = \frac{p\Phi}{\pi dL} \quad (9)$$

$$\frac{B_t}{B_{av}} = \frac{\pi d}{W_t S} \quad (10)$$

$$B_{av} \pi dL = B_t W_t LS \quad (11)$$

L : 코어축 길이 S : 슬롯수
 W_t : 치폭

2.2 시뮬레이션

전동기 설계와 공극의 자속분포 및 자속밀도를 해석하기 위해 전동기를 모델링 하여 2D 유한요소해석법을 이용하였으며, 유한요소 상용 프로그램인 Maxwell을 이용하여 시뮬레이션하였다. 영구자석은 페라이트계 Ceramic 8이며 잔류자속 B_r 이 385mT이고 보자력 H_c 가 235kA/m이다. 그림 1은 삼각요소 분할의 일부를 나타낸다. 그림 2와 3은 전동기의 유한요소해석 결과로 전동기의 자속분포와 자속밀도를 나타낸다.

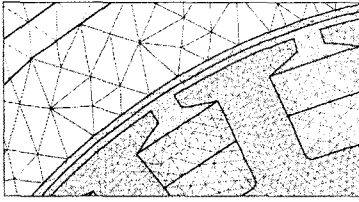


그림 1. 삼각요소 분할의 일부

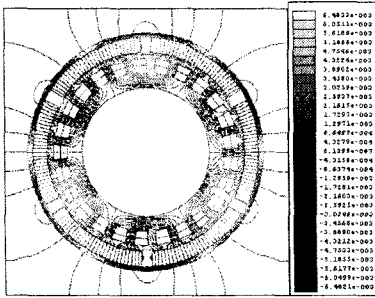


그림 2. 삼각요소 분할도와 자속분포

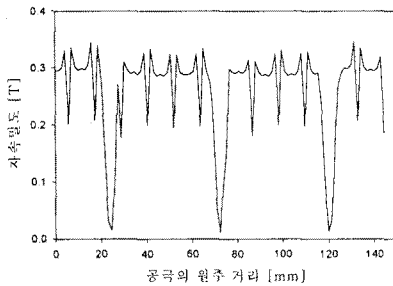


그림 3. 공극에서의 자속밀도

최적의 회전자 형상을 얻기 위해 공극과 공극의 투자율을 일정하게 두었으며, 회전자 치에서 포화가 일어나지 않고 공극에서 최대 자속밀도를 얻기 위해 회전자 치폭과 치 간격을 가변하여 시뮬레이션하였다.

치폭은 2.0mm에서 6.0mm까지 0.5mm씩 가변하여 시뮬레이션 하였으며, 치폭 4mm에서 최대 자속밀도를 얻을 수 있음을 알 수 있다(그림 4). 치 간격은 1.2mm에서 2.8mm까지 0.2mm씩 가변하여 시뮬레이션 하였으며, 2.0mm에서 최대 자속을 얻을 수 있음을 알 수 있다(그림 5). 그림 2와 3은 치폭 4mm, 치 간격 2.0mm일 때의 자속분포와 공극의 자속밀도를 나타낸 그림이다. 한주기 당 4개의 슬롯이 있으며, 공극에서의 한주기 당 총 자속량과 평균 자속밀도는 각각 8.737Wb/m², 0.228T임을 알 수 있다.

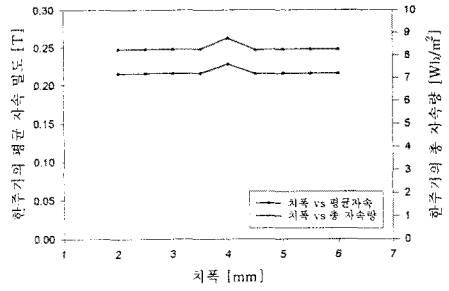


그림 4. 치폭 변화에 따른 자속밀도

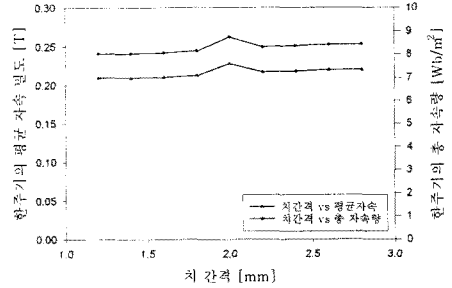


그림 5. 치 간격 변화에 따른 자속밀도

2.3 prototype 전동철체어 제작

영구자석 직류전동기를 휠체어 구동에 적합한 속도-토크를 얻기 위해서는 감속기어가 필요하다. 본 논문에서는 두 개의 기어를 사용하였는데, 첫 번째 기어는 감속비 1/6이며 두 번째 기어는 1/5이다. 기어에서 얻을 수 있는 총 감속비는 1/30이며, 이상적인 경우 전동기 출력 토크의 30배 토크를 얻을 수 있다.

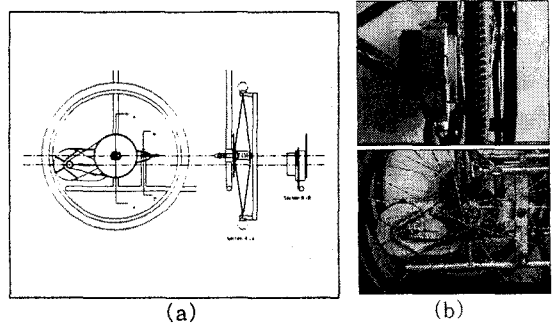


그림 6. 휠에 장착된 전동기 구성도

그림 6은 휠에 prototype 전동기를 장착, 전동 휠체어를 제작하는 구성도와 실제 제작된 사진을 나타낸다. 제작에 사용된 휠체어는 등받이 접이식 기능을 가지는 기본형 휠체어이며, 전동기의 축방향 길이를 조정하여 전동 휠체어 제작 후에도 이 기능을 가질 수 있도록 고려하였다. 또한 휠체어 전체 중량의 최소화에도 중점을 두었다.

2.4 실험 결과 및 고찰

제작된 영구자석 직류전동기의 출력은 60W급으로 설계하였다. 전동기의 유기기전력은 공극 자속밀도 및 회전자의 속도 그리고 기계적 상수에 의해 구해지며 발생 토크에 직접적인 영향을 미친다. 전동기의 유기기전력은 전동기 회전속도를 0rpm에서 3800rpm까지 변화시켜 가면서 그 크기를 측정하였다. 전동기의 부하특성 실험을 위하여 전동기와 토크 측정 장치인 다이내모미터를 커플링하여 인가전압을 16V에서 24V까지 2V씩 가변하면서 속도-토크 특성을 측정하였다.

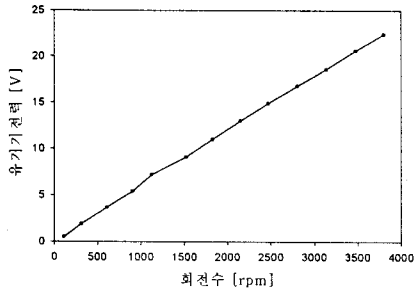


그림 7. 전동기의 유기전력-속도 특성

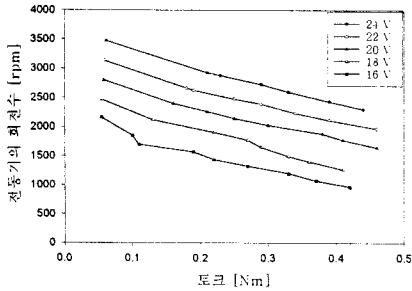


그림 8. 전동기의 속도-토크 특성

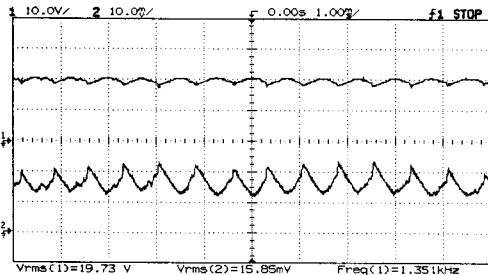


그림 9. 전동 휠체어의 전압, 전류 파형

그림 7은 전동기 회전수에 따른 유기전력을 나타내고 있으며, 3800rpm으로 회전시 약 22.9V가 나타남을 볼 수 있다. 그림 8은 전동기의 인가전압에 따른 부하특성을 나타낸 것이다.

그림 9는 전동기의 입력 전압과 전류 파형을 나타낸 것이며, 전류의 교류성분은 브러시와 정류자의 정류작용에 기인한 것으로 볼 수 있다. 그림 10과 11은 제작된 전동 휠체어의 부하특성을 나타낸 것이며, 그림 13은 부하변동에 따른 전동 휠체어의 효율을 나타내며, 이는 정격 부하를 100%로 환산해서 측정된 결과이다. 전류가 4.4A 흐를 경우, 토크 9.5 Nm, 효율 52%의 출력 특성이 나타남을 알 수 있다.

3. 결 론

본 논문은 휠체어 구동을 위한 6극 영구자석 직류전동기의 최적 설계를 위한 여러 파라미터의 산정과 특성 해석을 수행하였다. 유한요소 시뮬레이션을 통해 치폭과 치 간격을 변수로 하여 해석하였으며, 치폭 4mm, 치 간격 2.0mm 일 때 최적임을 알 수 있었다. 이러한 시뮬레이션 결과를 바탕으로 전동기를 제작하였으며, 유기전력 및 부하특성실험을 통해 전동기의 특성 해석을 수행하였다.

또한 전동기를 휠에 장착하는 방법을 전동 휠체어에 등반이 접이식 기능을 가지도록 제시하였으며, 이를 통해 적절한 기어를 이용하여, prototype 전동 휠체어를 제작하였고 그 기동특성을 실험하였다. 실험 결과, 정격

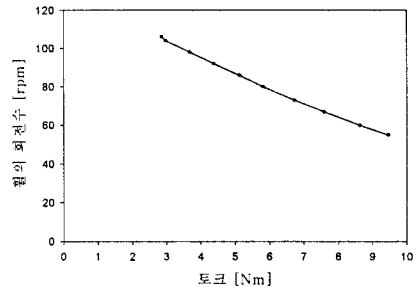


그림 11. 전동 휠체어의 속도-토크 특성

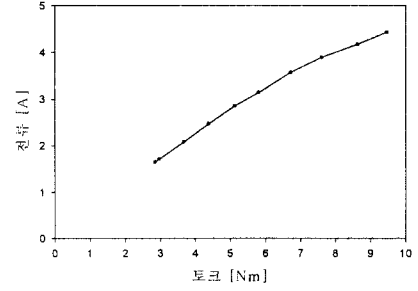


그림 12. 전동 휠체어의 전류-토크 특성

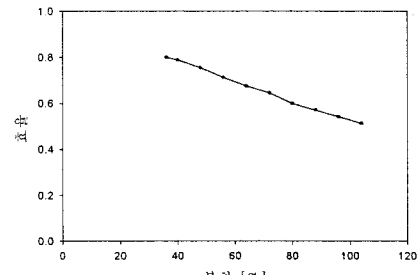


그림 13. 전동 휠체어의 부하변동에 따른 효율 특성

출력일 때, 휠의 속도는 약 6rad/s (휠체어 주행속도 7.1km/h), 토크 10 Nm를 얻었으며, 이는 휠체어 구동하기에 충분하리라 사료된다.

(참 고 문 헌)

- [1] T. Kenjo, S. Nagamori, "Permanent Magnet and Brushless DC Motors", Sogo Electronic Publishing Company, Tokyo, pp.18-38, 1985.
- [2] E. S. Hamdi, "Design of Small Electrical Machines", John Wiley & Sons, pp.51-67, 102-113, 1994.
- [3] Pederico Caricchi, "Design and Construction of a Wheel-Directly-Coupled Axial-Flux PM Motor Prototype for EVs", Conference on Industry Applications Society Annual Meeting, IEEE, Vol.1, pp.254-262, 1994.
- [4] Mulukutla S. Sarma, "Electric Machines - Steady State Theory and Dynamic Performance", PWS Publishing Company, pp.262-271, 1994.
- [5] Kay Hameyer, Ronnie J. M. Belmans, "Permanent Magnet Excited Brushed DC Motors", IEEE Transactions on Industrial Electronics, Vol.43, No.2, 1996.
- [6] Jacek F. Gieras, Mitchell Wing, "Permanent Magnet Motor Technology - Design and Applications", Marcel Dekker, Inc. pp.139-148, 1997.
- [7] 원중수, "전기설계학", 통일출판사, pp.175-183, 1994.
- [8] 오철수, 노재균, "새로운 경향의 전기기계", 도서출판 중앙, pp.71-75, 1997.