Design of Outer Rotor Type In-Wheel SRM for Welfare Neighborhood Electric Vehicle

정 광 일* · 이 동 희** · 안 진 우†
(Kwang-il Jeong · Dong-Hee Lee · Jin-Woo Ahn)

Abstract - Outer rotor type in-wheel switched reluctance motor for Welfare neighborhood electric vehicle is researched. In-wheel system is to drive the electric vehicle without mechanical transmission, shaft, differential gears or other mechanical system. To calculate drive power for each wheels, the elder's and disable's safety driving conditions are considered. The designed outer rotor SRM has a 6-stator and 8-rotor pole. The determined dimensions as well as the stator and rotor pole arc are simulated and tested with CAD and finite element analysis to verify the performance of the proposed motor.

Key Words : Outer rotor type, In-wheel SRM, Welfare neighborhood electric vehicle, Finite element analysis

1. 서 론

석유에너지의 고갈과 가격상승, 대기 오염의 환경문제 등으로 전기자동차에 대한 관심이 높아지고 있다[1]. 또한 출산율저하와 인구고령화에 따라 고령인구가 급속히 증가하고 있으며, 이에 따라 고령화운전자도 같이 증가하고 있다[2-3]. 고령운전자의 증가는 고령자의 삶의 질 향상, 승용차 중심의 교통체계, 핵가족화에 따른 독거노인 증가, 그리고 고령자의 왕성한 활동, 고령자 및 장애인의 개별 이동수단인 수동 및 전동 휠체어의 이동거리 제약에 따른 대체 이동수단 확보 차원에서 복지형 근거리 전기자동차의 개발필요성이 점증하고 있다. 또한, 인-휠 전동기는 전동기가 엔진룸이 아닌 차륜의 휠 안으로 장착되어 구동력을 직접적으로 얻게 함으로 트랜스미션, 프로펠러 샤프트, 디퍼렌셜 기어, 드라이브 샤프트 등 구동계 시스템전체를 제거하게 된다[4]. 인-휠 전동기는 화석연료를 사용하지 않고 완전히 전기 에너지로 대체할 수 있으며, 구동력을 순수하게 전기 모터에서만 얻으므로 세계적으로 대두 되고 있는 환경 문제, 고령자와 장애인에 대한 이동성 및 편의성을 확보 할 수 있다. 그림 1은 실제 복지형 NEV를 보여주고 있으며, 본 논문에서 제안된 복지형NEV차량은 전장이 2,450mm, 전폭이 1,500mm, 전고는 1,520mm이다.

복지형 NEV에 휠체어를 장착하기위해 구동 전동기의 적재공간을 줄여야 한다. 또한, 견인용 전동기는 저속에서 높은 토크를 요구한다. SRM은 이중 돌극형 자기구조와 집중권의

그림 1 복지형 NEV
Fig. 1 Welfare NEV

권선방식을 가진 단순한 구조의 전동기로 기계적 구조가 강인하고 전동기의 제작단가가 낮은 장점을 가지고 있다. 또한 직류직권전동기의 속도-토크 특성을 가지고 있어 넓은 속도 범위 및 고속, 정·역회전특성이 우수하고 강인하다는 특성을 가지고 있으며, 내환경성에 유리하고, 타 전동기에 비해 가격이 저렴하다. 이러한 장점으로 인하여 항공기, 전기자동차, 청소기, 송풍기등 고속의 운전이 요구되는 시스템에 대한 적용이 이루어지고 있다[5-6]. NEV용 인-휠 SRM은 휠내부에 SRM을 장착하므로, 내 환경성 및 저속에서 고 토크를 얻을 수 있는 SRM의 적용이 타 전동기보다 유리하다는 장점이 있다. 본 논문에서는 복지형 NEV의 휠 내부의 공간을 활용함으로써, 전동기의 장착공간을 줄일 수 있으며, 고령자 및 장애자가 안정감을 느끼고, 안전한 속도구간 내에서의 주행조건을 고려하였다. 또한 현재 인-휠 전동기의 기술적 어려움인 조향제어도 저속인 경우 신뢰도를 상대적으로 높일 수 있다. 그리고 직접구동방식으로 효율적인 차량

* 준 회 원 : 경성대 메카트로닉스공학과 석사과정

** 정 회 원 : 경성대 메카트로닉스공학과 조교수

† 교신저자, 펠로우회원 : 경성대 메카트로닉스공학과 교수

E-mail : jwahn@ks.ac.kr

접수일자 : 2010년 12월 15일

최종완료 : 2011년 1월 14일

의 동력을 얻을 수 있으며, 유한요소해석(Finite Element Analysis)을 통해 그 성능과 특성을 해석하였다.

2. 복지형 NEV용 인-휠 전동기 설계

2.1 물리적 제한

그림 2는 자동차 휠의 단면을 보여주고 있다. 각 휠당 토크는 휠의 구조에 따라 그 크기가 제한되어진다. 본 논문에서 사용되어지는 NEV의 휠 크기는 165/65 R13으로 휠의 지름은 13인치이고, 휠의 폭은 165mm이므로 외전형 회전자 지름은 330.2mm 이내로 제한되고, 스택길이는 휠의 폭 165mm 이내로 제한된다.

그림 2 휠의 단면도

Fig. 2 Sectional view of a Wheel

2.2 운전성능에 따른 용량 선정

고령자 및 장애인들은 20~50세의 청년, 장년 사이에서 느끼는 속도감보다 20km/h의 낮은 속도범위 내에서 안정감을 느낀다[7-8].

일반인들은 80km/h에서 안정된 속도감을 느끼는 반면 고령자 및 장애인들은 60km/h이하의 저속 구간에서 안정적인 속도감을 느낀다.

복지형NEV의 최대 속도는 60[km/h]이고, 전체 무게는 900[kg]이다. 제안된 복지형 NEV는 직접구동방식으로 감속기를 포함하지 않는다. 감속기가 없기 때문에 기계적인 마찰이 없고, 각 휠마다 효율적인 차륜의 동력을 얻는다. 휠은 자동차의 무게에 비해 작으므로 바퀴의 무게, 바퀴의 요잉, 핏칭 그리고 롤링은 고려하지 않는다. 그림 3은 자동차의 용량을 모델링하기 위해 견인력에 대한 식을 도출하기 위한 주행부하 그림이다. 견인력은 자동차를 앞으로 나아가게 하는 힘으로써, 구동 바퀴를 통해 지면으로 전달된다. 타이어에 작용하는 힘은 구동저항력(F_{load}), 가속력(F_{ta}), 구동력(F_{drive})로 구분되며, 구동력은 식(1)과 같다[9].

$$F_{drive} = F_{ta} + F_{load} \quad (1)$$

구동력은 전동기에서 발생된 가속 또는 감속 토크가 동력

전달장치를 통해 전달되는 힘이고, 구동력과 구동저항력의 차이에 의해 가속속이 결정되게 된다.

식(1)에서 가속력(F_{ta})이 양의 값을 가지면 가속을 의미하고, 음의 값을 가지면 감속을 의미한다. 식(2)와 같다.

그림 3 주행 부하

Fig. 3 Driving Load

$$F_{ta} = ma \quad (2)$$

그림 3에서 구동저항력(F_{load})은 구름저항력(F_{rr})과 공기저항력(F_{ad}), 등판 저항력(F_{hc})으로 구분되며, 식은 다음과 같다.

$$F_{load} = F_{rr} + F_{ad} + F_{hc} \quad (3)$$

식(3)에서 구름 저항력은 도로에 대한 자동차 타이어의 마찰에 의해 주로 발생된다. 구름 저항력은 대략 상수로서, 자동차의 속도와는 거의 무관하며, 자동차의 무게에 비례한다. 식은 다음과 같다.

$$F_{rr} = C_{rr} mg \cos \theta \quad (4)$$

식(5)는 공기 속을 주행하는 자동차 차체의 마찰이다. 이 힘은 자동차의 전면 면적과 공기밀도 속도의 제곱에 비례한다.

$$F_{ad} = \frac{1}{2} \rho A C_d v^2 \quad (5)$$

식(6)은 자동차가 경사면을 올라가는데 필요한 힘으로 경사면을 따라 작용하는 자동차의 무게성분과 비례한다.

$$F_{hc} = mg \sin \theta \quad (6)$$

여기서, 질량 m , 경사면의 등판각 θ , C_{rr} 은 구름저항계수, C_d 는 항력계수, v 는 속도, ρ 는 공기밀도, A 는 전면 면적이다.

그림 4는 전동기 특성 곡선으로 식(1)~(6)에 의해서 결정되어지는 전동기의 최대 토크 $T_{maximum}$ 와 정격 토크 T_{rated} 그리고 EV 속도 V_{ev} 를 보여준다.

그림 4 전동기 특성 곡선

Fig. 4 Motor Characteristic Curves

2.3 복지형 NEV의 주행거리 모델링

전기자동차는 주행거리가 대표적으로 관심사이다. 국내에서 자동차의 연비효율을 평가하는 대표적인 운전모드로는 FUDS(FTP-72)가 있으며 시간별 구동되는 속도특성이 그림 5와 같다[10].

이 사이클의 시험시간은 1500초이며, 매 초마다 속도가 다르다.

그림 5 FUDS(FTP-72)의 운전모드

Fig. 5 Driving Mode of FUDS(FTP-72)

1. 고령운전자의 지각과 반응시간을 측정하는 Olson의 연구에서 오르막길에서 예상치 못한 장애물을 만났을 때의 반응시간을 조사하였다. 연구결과에 따르면 고령운전자는 일반운전자에 비하여 더 많은 지각시간과 반응시간이 필요하며 이는 고령운전자의 둔화된 지각 능력과 인지적 특성에 의한 것으로 판단하였다. 즉, 고령운전자는 신체적인 기능 저하에 따라 일반 운전자에 비하여 반응 속도 측면에서 일정 부분 감소하는 것은 사실이며 대략 일반인보다 20~30% 내외의 반응시간 차이를 가진다[8].

일반인들은 80km/h에서 안정된 속도감을 느끼나, 고령자 및 장애인들은 60km/h이하의 저속 구간에서 안정적인 속도감을 느낀다. 그리고 물체를 판별하고 급정지가 가능한 안

정적인 주행속도는 30km/h일 경우이다. 따라서 복지형 자동차의 토크, 속도 및 이에 따른 에너지 소비빈도는 일반자동차와 다르다. 그림 6은 FUDS 운전모드에서의 토크와 속도 구간별 사용 빈도를 나타내는데, 10~60[Nm]와 270~320[rpm]에서 가장 빈번하게 운전되고 있음을 알 수 있다[9].

그림 6 FUDS 모드에서 토크-속도 사용 빈도

Fig. 6 Frequency in Use of Torque-Speed in FUDS Mode

그림 7과 8은 각각 FUDS의 운전모드에서 주행중 가장 많이 사용되어지는 전동기의 속도, 토크 구간을 나타낸다. 전기자동차의 주행 효율을 최적화하기 위해서 속도 토크의 모든 범위 내에서 에너지 소비는 그림 9에서 보여 준다.

그림 7 FUDS에 따른 전동기 속도빈도

Fig. 7 Range of Motor Speed according to FUDS

그림 8 FUDS에 따른 전동기 토크빈도

Fig. 8 Rang of Motor Torque according to FUDS

그림 9 FUDS에 따른 에너지 소비빈도

Fig. 9 Energy Consumption according to FUDS

FUDS의 운전모드에서 사용되어진 에너지 소비와 전동기의 속도, 토크 해석으로부터 효율적인 전동기의 토크와 속도는 280[RPM]일 때, 20[Nm]이다. 복지형 인-휠 SRM은 주행시 전인전동기의 최대효율을 사용빈도가 높은 구간과 고정자의 안정적인 주행속도 구간을 고려하면, 290[RPM]에서 18[Nm]가 적절하다.

2.4 NEV 구동용 SRM의 기본 설계

주어진 전동기 요구성능에서 NEV용 SRM을 설계하면 다음과 같다. 전동기의 길이와 외경을 고정하면, 전동기의 길이 L 은 다음과 같다[11].

$$L = \frac{T}{k_d k_c k_3 k_2 (B A_s) D^2} \quad (7)$$

여기서, k_d 는 듀티 사이클이고, k_c 는 효율, $k_2 = 1 - \frac{1}{\sigma_s \sigma_u}$ (여기서, $\sigma_s = \frac{L_s^s}{L_u^s}$ 와 $\sigma_u = \frac{L_u^u}{L_u^s}$), $k_3 = \frac{\pi}{4}$ 로 k_2 와 k_3 는 상수이며, 일반적으로 k_2 의 범위는 $0.65 < k_2 < 0.75$ 이고, B 는 자속 밀도이고, A_s 는 전기적 부하로 $A_s = \frac{2T_{ph} i}{\pi D}$ 이고, 일반적인 A_s 의 범위는 $25000 < A_s < 90000$ 이다. 여기서 T_{ph} 턴수이고, D 는 고정자 직경이다. 고정자와 회전자 극호각은 전동기의 자기 기동을 위한 오버랩구간을 제한하기 위해서 최소한의 극호각은 다음과 같은 식을 만족해야한다.

$$0.4 < \frac{\beta_s}{\theta_{sp}} < 0.5 \quad (8)$$

$$0.3 < \frac{\beta_s}{\theta_{rp}} < 0.45 \quad (9)$$

$$\theta_{sp} = \frac{360}{N_s} \quad (10)$$

$$\theta_{rp} = \frac{360}{N_r} \quad (11)$$

θ_{sp} 는 고정자 극 피치 이고, θ_{rp} 는 회전자 극 피치, 그리고 N_s 와 N_r 는 각각 회전자와 고정자 수이다.

$$\min[\beta_s] = \frac{720}{N_s N_r} \quad (12)$$

$$B_s > B_r \quad (13)$$

위의 계산식에 의해 고정자 극호각 B_s 는 18° 회전자 극호각 B_r 은 20° 로 산정 하였다. 6/8 SRM의 성능과 사양에서 제안된 전동기의 정격 출력은 1.1kW이다. 표 1에서 제안된 SRM의 사양과 치수를 보여준다.

표 1 제안된 SRM의 설계값

Table 1 Design of Proposed SRM

Parameter	Value	Parameter	Value
Dia. Shaft	30[mm]	Air-gap	0.3[mm]
Dia. of Stator	150[mm]	Dia. of Rotor	165[mm]
Stack Length	135[mm]	Rated Current	45[A]
Turn No. /Phase	40[Turn]	Max. Current	80[A]
Rotor pole Arc	20[°]	Max. Torque	116[Nm]
Stator pole Arc	18[°]	Rated Power	1.1[kW]

2.5 제안된 전동기의 성능

고정자 극호각 B_s , 전기적인부하 A_s 그리고 k_2 는 기기적인 인덕턴스 특성 차이에 따른 값이고, 고정자 직경 D 의 값은 이미 식(7)로부터 결정되었다. 따라서, 제안된 외전형 SRM의 특성해석을 위해서 Maxwell 2D를 사용하였다. 설계된 전동기는 6/8 외전형 SRM이고, 여기서 6은 고정자 극수이고, 8은 회전자 극수를 갖는다는 것을 의미한다. 제안된 전동기의 최대 전류는 80[A]에서 토크는 116[Nm]를 가지고, 고정자 턴수는 40[Turn], 회전자가 8극이므로 회전자위치의 각은 $0 \sim 45^\circ$ 로 설정하여, Maxwell2D 해석을 수행하였다. 그림 12는 Maxwell2D에서 해석된 mesh를 보여준다. 그림 10에서 16670개를 mesh한 삼각형 중에 반 이상이 얇은 공극에 위치해 있음을 알 수 있다. 그 이유는 토크 발생에 중요한 역할을 공극에서 수행함을 나타낸다. 전자기 변환에서 대부분의 에너지는 이 얇은 공극에 저장된다.

그림 10 외전형 6/8 SRM용 Maxwell2D mesh

Fig. 10 Maxwell2D mesh for out rotor type 6/8 SRM

그림 11은 제안된 외전형 6/8SRM의 시뮬레이션 결과를 보여주고 있으며, 여자된 상에 따라 정렬위치와 오버랩 위치에서의 자기분포를 나타내고 있다. 정렬위치와 오버랩 위치

에서의 자기분포 결과는 이론과 일관되며, 토크 생성이 가능함을 보여주고 있다.

(a) 정렬위치의 자속분포

(b) 중첩된 위치의 자속분포

그림 11 상여자에 따른 자속분포

Fig. 11 Flux distribution with phase excitation

그림 12 상여자에 따른 권선의 열 해석

Fig. 12 Thermal analysis of winding with phase excitation

그림 12는 제안된 외전형 6/8 SRM이고, 권선의 열 해석을 수행하기 위해 ANSYS의 열 해석기법을 사용하여 시뮬레이션을 수행하였으며, 상권선 여자에 따른 권선의 열의 분포는 정렬위치에서 고정자에서의 최고 온도는 86°C이고, 이때

회전자의 열은 75°C였다. 고정자에서 동손에 의하여 발생하는 열을 방열 허브를 사용하여 권선의 열을 배출한다.

그림 13은 제안된 유한요소해석(FEA)을 사용하여 특성을 해석하였으며, 제안된 전동기의 인덕턴스 프로파일을 보여준다. 토크는 인덕턴스의 기울기와 전류의 제곱에 비례한다. 회전자가 8극이므로 회전자의 위치가 0~45°의 반주기인 22.5° 이내에서는 정토크를 발생 시키고, 22.5~45°에서는 부토크를 발생 시킨다. 부토크가 발생되면, 평균 토크가 감소되므로 부토크가 발생하는 반주기 동안은 온-오프 스위칭 제어가 필요하다.

그림 13 제안된 SRM의 인덕턴스 프로파일

Fig. 13 Inductance Profile of the proposed SRM

그림 14는 제안된 SRM의 토크 프로파일을 보여주고 있다. 제안된 SRM의 모든 결과인 토크는 매우 중요하다. 그림 14에서 전류가 80[A]일 때, 최대 토크 116[Nm]를 얻을 수 있으며, 전류가 45[A]일 때, 토크가 59[Nm]를 얻는 것이 가능함을 보여주고 있다. 그리고 0~45°의 구간의 평균토크는 0[Nm]임을 알 수 있다.

그림 14 제안된 SRM의 토크 프로파일

Fig. 14 Torque Profile of the proposed SRM

속도와 토크 그리고 효율 곡선은 그림 15에서 보여주고 있다. 최대 토크 116[Nm]에서 150[RPM]을 얻을 수 있으며, 최대 전력은 2[kW]이며, 165[RPM]을 갖는다. 제안된 SRM

의 효율적인 주행구간과 고령자를 위한 안정적인 주행 구간은 290[RPM]에서 18[Nm]이고, 효율은 86%이다.

그림 15 속도-토크 및 효율 곡선

Fig. 15 Speed-Torque and efficiency

3. 결 론

본 논문에서는 고령자 및 장애인을 위한 복지형 NEV에 외전형 인-휠 SRM을 제안하였고, 제안된 외전형 6/8 SRM은 자기기동이 가능하고, 상중복 구간을 고려하여 고정자 및 회전자 극호각을 산정하였다. 그리고 주행조건과 고령운전자의 안정적인 주행 속도 구간을 고려하고, 견인 전동기의 최대효율을 사용 빈도가 높은 구간에 맞추어 설계하였다. 설계된 SRM의 치수를 CAD를 이용하여, 최적화 설계를 하였으며, 최적화된 SRM 전동기를 유한요소해석(Finite Element Analysis)을 통하여 전동기 성능 및 특성을 해석을 통하여 그 적용 가능성을 검증하였다.

감사의 글

본 논문은 부산광역시와 교육과학기술부의 지원으로 수행된 부산지방과학단지육성사업 R&D 역량강화 지원사업과 지식경제부지원 에너지자원인력양성사업의 연구결과입니다.

참 고 문 헌

- [1] 엄태준, "석유고갈문제의 해법", 대한기계학회, 기계저널, 제47권 제7호, pp. 18~20, 2007
- [2] 지우석, 이철규 "고령자 운전특성에 관한 연구" 경기개발연구원, 연구보고서 2003-11, pp.1~166, 2003
- [3] 조규태, 노관섭, 김동균, "고령사회를 고려한 고속도로 설계기준 개선방안 연구", 제 11회 한국도로학회 학술대회 논문집, 제11권, 4호, pp. 19~24, 2009
- [4] 이택재, 김동현, "인휠 시스템 기술", 한국자동차공학회 오토저널, 제31권 제4호, pp.21~25, 2009
- [5] 안진우, "스위치드 릴럭턴스 전동기", 오성미디어, 2001
- [6] B. K. Bose, T. J. E Miler, P.M. Szezesny and W.H. Boknell "Microcomputer Control of Switched Reluctance Motor", IEEE Trans. on Industrial

Application, Vol 22, No.4, pp. 708-715, 1986

- [7] 김태호, 고준호, 원제무, 허억, "운전능력에 연관된 인적 특성의 연령 임계점 연구", 한국안전학회지, 제23권 3호, pp.71~78, 2008
- [8] 김만호, 손준우, "고령자 친화형 자동차 안전성 기술 개발을 위한 고령 운전자의 운전 특성 분석", 한국자동차 공학회, 창립 30주년 기념 학술대회 논문집, Vol. 4, pp 1605~2150, 2008
- [9] 박한웅, "MATLAB 활용 전기자동차", 아진, 2008
- [10] 김창기, 박지성, 김민석, 정사용, "연비효율 향상을 위한 연료전지 전기자동차 구동용 견인 전동기 설계특성" SMART Center 1차 합동워크샵 및 초청강연, pp.1~2, 2008
- [11] R. Krishnan. "Switched Reluctance Motor Drives", CRC Press, 2001

저 자 소 개

정 광 일 (鄭 光 一)

1986년생, 2008년 진주산업대 메카트로닉스공학과 졸업2008~현재 경성대학교 메카트로닉스공학과 석사과정
Tel : 051-663-4779
E-mail : you486-7179@hanmail.net

이 동 희 (李 東 熙)

1970년생. 1996년 부산대 공대전기공학과 졸업. 1998년 부산대 공대 전기공학과 졸업(석사). 2001년 동 대학원 전기공학과 졸업(박사). 2002년~2005년 OTIS-LG 선임연구원. 2005년~현재 경성대 메카트로닉스 공학과 조교수
Tel : 051-663-4693
E-mail : leedh@ks.ac.kr

안 진 우 (安 珍 雨)

1958년생. 1984년 부산대 전기공학과 졸업. 1992년 동 대학원 전기공학과 졸업(박사). 1992년~현재 경성대 메카트로닉스공학과 교수. 2008년 7월~현재 지식경제부지정 고령친화지라이프RIS사업단장. 스마트메카트로닉스 연구센터장. 당 학회 이사 및 학술위원장.
Tel : 051-663-4773
E-mail : jwahn@ks.ac.kr