ISSN (Print) 1598-5385
ISSN (Online) 2233-6648
≪해설논문≫ Journal of the Korean Magnetics Society 25(3), 92-100 (2015) http://dx.doi.org/10.4283/JKMS.2015.25.3.092

Design of In-Wheel Motor for Automobiles Using Parameter Map

Hae-Joong Kim, Choong-Sung Lee, and Jung-Pyo Hong*
Department of Automotive Engineering, Hanyang University, Seoul 133-791, Korea

(Received 24 March 2015, Received in final form 21 May 2015, Accepted 21 May 2015)

Electric Vehicle (EV) can be categorized by the driving method into in-wheel and in-line types. In-wheel type EV does not have transmission shaft, differential gear and other parts that are used in conventional cars, which simplifies and lightens the structure resulting in higher efficiency. In this paper, design method for in-wheel motor for automobiles using Parameter Map is proposed, and motor with continuous power of 5 kW is designed, built and its performance is verified. To decide the capacity of the in-wheel motor that meets the automobile's requirement, Vehicle Dynamic Simulation considering the total mass of vehicle, gear efficiency, effective radius of tire, slope ratio and others is performed. Through this step, the motor's capacity is decided and initial design to determine the motor shape and size is performed. Next, the motor parameters that meet the requirement is determined using parametric design that uses parametric map. After the motor parameters are decided using parametric map, optimal design to improve THD of back EMF, cogging torque, torque ripple and other factors is performed. The final design was built, and performance analysis and verification of the proposed method is conducted by performing load test.

Keywords : in-wheel, parameter map, design process, permanent magnet motor, synchronous motor, traction motor

파라미터 맵을 이용한 차량용 인휠 전동기의 설계

김해중 · 이충성 · 홍정표*
한양대학교 미래자동차공학과, 서울시 성동구 행당동, 133-791

(2015년 3월 24일 받음, 2015년 5월 21일 최종수정본 받음, 2015년 5월 21일 게재확정)

전기자동차는 구동방식에 따라 인휠(in-wheel) 방식과 인라인(in-line) 방식으로 구분될 수 있다. 인휠 방식 전기자동차는 기존의 자동차에서 사용하였던 변속기, 축, 차동기어 등을 제거 할 수 있기 때문에 구조가 간단해지고 차체를 경량화하여 효율을 증대시킬 수 있는 장점이 있다. 본 논문에서는 파라미터 맵(parameter map)을 이용한 차량용 인휠 전동기의 설계 방법을 제시하고, 연속정격 5 kW급 전동기를 설계하여 제작 및 성능 검증을 한다. 우선 차량의 요구 성능을 만족하는 인휠 전동기의 용량을 결정하기 위해 차량의 총무게, 기어 효율, 바퀴의 등가반경, 등판각도 등을 고려한 차량동특성해석을 수행한다. 이것을 통해 전동기 용량을 결정하고, 전동기 형상 및 치수를 결정하기 위한 초기설계를 진행한다. 그리고 요구 성능을 만족하는 전동기 파라미터를 결정하기 위해 파라미터 맵을 이용한 파라미터 설계를 수행한다. 파라미터 맵을 통해 전동기 파라미터를 결정한 후 마지막으로 무부하역기전력의 왜형율(Total Harmonic Distortion, 이하 THD), 코깅토크(cogging torque), 토크리플(torque ripple) 등의 개선을 위해 최적설계를 수행한다. 최종 설계 모델에 대해 제작을 하였으며, 성능 검증 및 제시한 설계방법의 신뢰도 검증을 위해 부하시험을 진행한다.

주제어 : 인휠, 특성 맵, 디자인 프로세스, 영구자석 전동기, 동기전동기, 견인전동기

I. 서 론

오늘날 석유자원의 고갈과 대기환경문제 등으로 인해 전 세계적으로 전기자동차에 대한 개발이 빠르게 이루어지고 있다. 특히 최근에는 전기자동차에 사용되는 인휠 전동기에 대한 연구가 활발히 이루어지고 있다[1-4]. 전기 자동차에 사용되는 인휠 전동기 시스템은 구동 전동기가 자동차 바퀴의 휠 안에 장착되어 있다[5, 6]. 그로인해 변속기, 축, 기어 등을 제거할 수 있어 구조가 간단해지고 차체를 경량화 시킬 수 있으며 에너지의 효율을 증대시키는 장점이 있다[7-10]. 영구자석 동기 전동기(Permanent Magnet Synchronous Motor, 이하 PMSM)

© The Korean Magnetics Society. All rights reserved.
*Corresponding author: Tel: +82-2-2220-0455,
Fax: +82-2-2220-4465, e-mail: hongjp@hanyang.ac.kr

는 영구자석의 배치방법에 따라 표면부착형 동기전동기(Surface-mounted Permanent Magnet Synchronous Motor, 이하 SPMSM)와 매입자석형 동기전동기(Interior Permanent Magnet Synchronous Motor, 이하 IPMSM)으로 나눌 수 있다. IPMSM은 영구자석을 회전자 철심의 내부에 삽입한 영구자석 동기전동기이다. 차량용 인휠 전동기의 설계를 위해 본 논문에서 선택한 전동기 구조는 IPMSM이다. IPMSM은 고출력, 고효율 전동기로서 사이즈의 제약이 큰 자동차 분야에서 많이 사용되는 핵심 구동원이며 그 중요도가 점점 더 높아지고 있다[11, 12]. 본 논문에서는 우선 차량의 요구 성능을 만족시키기 위해 차량 동특성 시뮬레이션을 수행하여 전동기의 사양을 결정한다. 결정된 사양을 만족시키기 위한 초기설계를 진행하고, 전동기 파라미터 설계를 수행한다. 요구사양을 만족하는 전동기 형상에 대해 최적설계를 수행한다. 최종모델에 대해 전동기를 제작하고 부하시험을 통하여 설계방법의 신뢰성 확인 및 전동기 성능을 평가하였다.

II. 차량 동특성 이론

Fig. 1은 차량이 비탈길을 올라갈 때 작용하는 모든 힘을 나타내었다. 여기서 F_a는 공기저항력, F_r는 구름마찰력, F_g는 중력에 의한 항력 그리고 F_t는 견인 전동기에 의한 구동력이다. 즉, 차량의 구동력이 공기저항력, 구름마찰력 그리고 중력에 의한 항력보다 클 경우 차량은 구동력 방향으로 진행하게 된다. 식(1), (2), (3)은 차량이 운전 시 발생하는 힘을 나타낸다.

$$F_a = f_a(v_s)^2 \tag{1}$$

$$F_r = f_r m_s g \tag{2}$$

$$F_g = m_s g \sin\alpha \tag{3}$$

여기서, f_r은 구름마찰력계수, m_s는 차량의 총질량, g는 중력가속도, f_a는 공기저항력계수, v_s는 차량의 속도이다.

구름마찰력은 짐과 사람의 무게를 포함한 차량의 무게에 의해서 결정되고 공기저항력은 차량의 속도 그리고 중력에 의한 항력은 경사의 기울기와 무게에 의해서 결정된다. 따라서

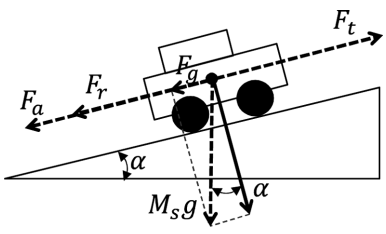


Fig. 1. Forces acting on the vehicle.

뉴턴의 제2법칙에 의해서 운전 시 필요한 구동력은 식(4)와 같이 나타낼 수 있다.

$$F_t - F_r - F_a - F_g = m_s \frac{dv_s}{dt} \tag{4}$$

그리고 전동기의 속도와 토크 곡선에 따라 동작성능을 변환하기 위해서 식(5), (6) 변환식이 필요하다. 식(5)는 운동방정식에서 사용되는 차량의 속도와 전동기의 분당 회전수의 관계를 나타낸다. 식(6)은 차량 운전 시 필요한 힘을 토크로 표현한 식이다.

$$V_s = \frac{60 N_m \pi D}{1000} \tag{5}$$

$$F_t = \frac{T_m}{D/2} \tag{6}$$

여기서 N_m은 전동기의 분당 회전수이고, D는 전동기의 회전자 직경, T_m은 전동기 토크이다.

마지막으로 식(7)을 이용하여 필요한 출력을 계산할 수 있다.

$$P_{out} = F_t V_s = T_m \frac{2\pi N_m}{60} \tag{7}$$

실제로는 위의 식들에 기어효율 η_t 및 기어비 λ 등 추가적인 사항을 고려해야 한다. 힘-토크 변환 식과 차량의 속도-전동기의 회전수 변환 식을 (8), (9) 같이 수정하였다.

$$V_s = \frac{60 N_m \pi D \lambda}{1000} \tag{8}$$

$$F_t = \frac{\lambda \eta T_m}{D/2} \tag{9}$$

III. 전동기 설계 프로세스

Fig. 2는 본 논문에서 사용하고 있는 동기 전동기의 설계 프로세스를 나타낸다. 초기설계에서는 대상 전동기의 냉각 방식에 따라 회전자 부피당 토크(Torque per unit Rotor Volume, 이하 TRV) 값을 적용하여 회전자의 부피를 계산하고 그에 따라 적층길이 및 회전자의 지름이 결정된다. 등가자기회로(Equivalent Magnetic Circuit, 이하 EMC)를 통해 극호각(pole arc), 영구자석 폭, 슬롯오픈 폭 등을 결정한다. 전동기 파라미터 설계에서는 인덕턴스와 무부하역기전력 변화에 따른 특성 해석결과를 등가회로 해석을 통해 확인함으로써 요구되는 출력을 만족시키고 효율을 극대화하는 파라미터를 얻는다. 최적설계에서는 실험계획법(Design Of Experiment, DOE)기법을 이용하여 무부하역기전력, 손실, 코깅토크 등에

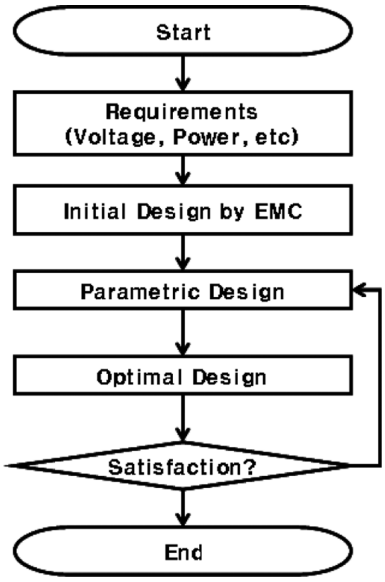


Fig. 2. Motor design process.

대해 영향도가 높은 파라미터를 얻어낸다. 그리고 설계 변수의 변화에 따른 시스템의 응답 특성을 예측할 수 있는 반응표면법(Response Surface Method, 이하 RSM)를 이용하여 최적 설계안을 도출한다.

1. 전동기 초기 형상 설계

전동기의 초기설계는 다음과 같은 과정을 거친다.

첫째, TRV를 이용하여 회전자 사이즈를 결정한다. 전동기의 초기 형상 설계 시 회전자의 크기는 TRV를 이용한다. 전동기에서 TRV는 아래식과 같이 나타낸다.

$$TRV = \frac{T}{\frac{\pi}{4}D^2 L_{stk}} \; [kNm/m^3] \tag{10}$$

여기서, D는 전동기의 회전자 직경, L_{stk}는 적층길이, T는 부하토크이다.

둘째, EMC를 이용하여 초기설계를 진행한다. 전동기의 초기설계 시 설계변수(극수, 슬롯 수, 공극 길이 등)에 따라 효율, 코깅토크 및 토크리플과 같은 전동기의 특성이 바뀐다. 이러한 전동기 특성의 예측에는 일반적으로 유한요소 해석(Finite Element Analysis, 이하 FEA)이 사용되지만 FEA는 전처리, 해석, 후처리 과정을 필요로 하며 이러한 과정은 복잡하고 많은 시간과 노력을 필요로 한다. 전동기의 초기설계를 효율적으로 수행하기 위해 FEA에 비해 해석의 정밀도는 다소 떨어지지만, 전동기의 설계 변수에 따른 특성을 아주 짧은 시간 내에 얻을 수 있는 해석적 방법인 EMC 해석법을 초기설계에 적용한다. EMC 해석법은 전동기 특성해석에 필요한 시간과 노력이 FEA에 비해 현저히 적다. 그러나 철심의 자기포화현상을 무시하기 때문에 해석의 정밀도는 FEA에 비해 다소 떨어지게 되므로 세부설계를 수행한다.

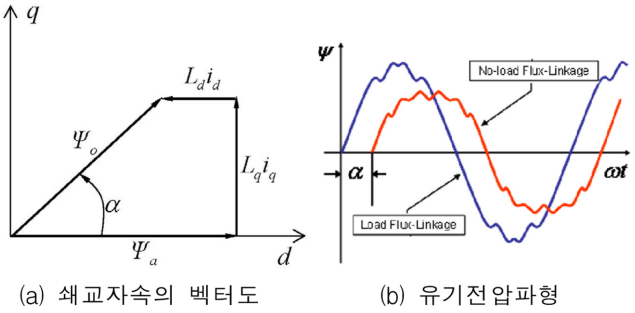


Fig. 3. (Color online) Vector diagram and induced voltage waveform for determining the inductance.

2. FEA를 이용한 회로정수 산정 및 손실해석

영구자석 동기전동기의 특성해석에서 정확한 인덕턴스의 산정은 필수적이며 전기자 권선에 쇄교하는 자속을 이용하는 방법이 사용되고 있다. 이 방법은 고정자 권선의 U상에 무부하시 쇄교자속과 부하전류가 흐를 때 쇄교자속의 위상차를 이용하여 구하는 방법이다. Fig. 3(a)는 U상에 대한 쇄교자속의 벡터도를 나타내었으며, Fig. 3(b)에는 U상의 부하시와 무부하시 유기전압파형을 비교하여 나타내었다. 전기자반작용에의해 부하시와 무부하시 유기전압은 위상차를 갖는데, 이때 두

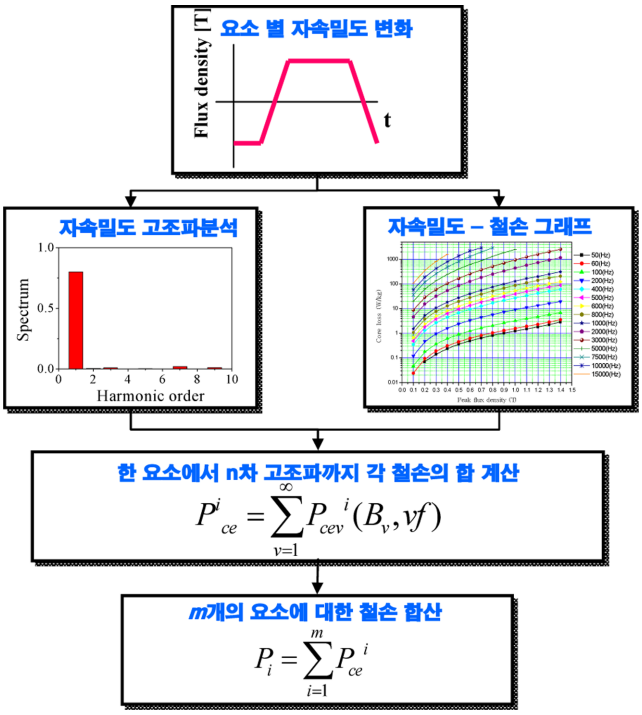
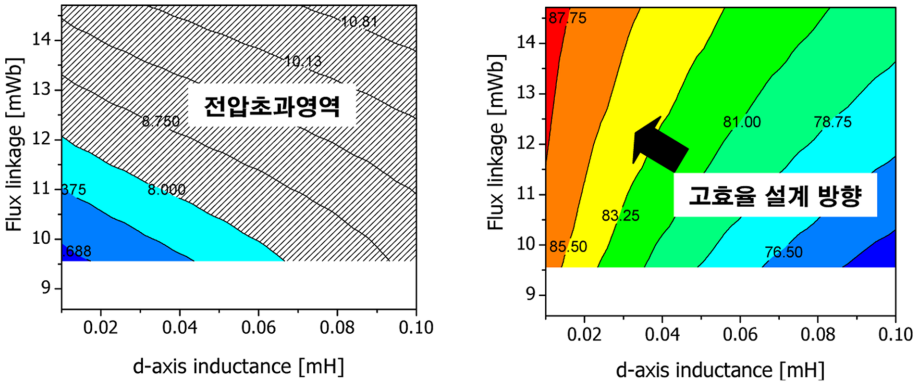


Fig. 4. (Color online) Iron loss analysis process using FEA.



(a) (b)

Fig. 5. (Color online) Parameter map (E-L map).

유기전압파형의 위상차를 나타내는 α를 구하여 제시한 벡도터를 이용해 *d-q*축 인덕턴스를 구할 수 있다.

전동기 구동 시 FEA을 통하여 각 요소에서의 자속밀도 분포에 대하여 고조파 분석을 수행하여 각 고조파 성분에 따른 자속밀도를 산출한다. 그리고 각 주파수 성분별 자속밀도의 크기를 바탕으로 주파수별 철손 데이터를 이용하여 각 요소의 철손을 구한 후, 각 요소에서 구한 철손을 합하여 전동기의 전체 철손을 계산하여 전동기 특성해석에 반영하였다. 이 방법은 히스테리시스 및 와전류 손실을 포함하는 철손 데이터를 이용하므로, 각 손실 계수를 분리하여 사용하지 않는다. Fig. 4는 FEA를 이용하여 철손을 산정하는 과정을 나타내었다.

3. Parametric Design

무부하쇄교자속과 인덕턴스는 전동기의 출력특성을 좌우하는 가장 중요한 파라미터로 PMSM의 설계에서 가장 선행되어 결정된다. 파라미터 맵을 이용한 설계는 넓은 범위의 파라미터(무부하쇄교자속, 인덕턴스)에 대해 다양한 출력 특성을 확인 할 수 있다. 그래서 요구사양을 만족시키기 위한 전동기의 회로정수를 합리적이고 효과적으로 얻을 수 있게 한다. E-L map은 *d-q*축 등가회로를 이용하여 무부하쇄교자속과 *d*축 인덕턴스에 따른 출력을 나타낸다. Fig. 5에 E-L map을 이용한 파라미터 설계의 적용 예를 나타내었다. Fig. 5의 (a), (b)는 d축 인덕턴스와 무부하쇄교자속 변화에 따른 선간 전압(a), 효율(b)을 나타낸다.

IV. 차량용 인휠 전동기 설계

1. 차량 동특성 시뮬레이션

본 논문에서는 전동기 설계에 앞에 전동기 요구사양의 타당성을 확인하기 위하여 차량 동특성 시뮬레이션을 실시하였다. 차량 부하는 크게 도로와 바퀴 사이의 마찰력에 의해 발생하는 회전부하, 속도를 가지고 진행함에 따라 공기 저항으로 받게 되는 공기항력 부하, 그리고 경사도를 가질 경우 중력에 의해 발생하게 되는 경사도 부하를 들 수 있다. 최대 요구 추력을 계산하기 위해서는 만승 시 차량의 중량과 가속도, 마찰저항, 공기저항, 경사 등을 고려해야 한다. 그리고 이러한 저항을 계산하기 위해서는 계수 혹은 물성치와 같은 조건이 필요하다. 차량 동특성 시뮬레이션을 수행하기 위한 조건은 다음과 같다.

Table I. Vehicle dynamic simulation condition.

Parameter	Value
Total mass of vehicle [kg]	900
Gear ratio	6
Gear efficiency [%]	80
Frontal area [m^2]	2
Effective radius of tire [m]	0.259
Aerodynamic drag coefficient	0.35
Slope ratio [%]	0, 25
Air density [kg/m^3]	1.1774

Fig. 6은 경사율이 0 %인 경우의 차량 동특성 시뮬레이션 결과를 보여주고 있다. 전동기 최대속도 4580 rpm에서 차량 속도 74.5 km/h이고 목표 속도 60 km/h 이상 달성하였다. 이 때 전동기 속도는 5500 rpm이고, 그림에서와 같이 견인력(traction force)과 항력(drag force)이 교차한다. Fig. 7은 경사율이 25 %인 경우의 차량 동특성 시뮬레이션 결과이다. 경사로 정지 출발 후 50 m에서 주행 탈출 속도는 16.7 km/h이다. 이 때 전동기 속도 1025 rpm이고, 견인력과 항력이 교차한다.

2. 전동기 초기설계

전동기의 구조는 16극 24슬롯 집중권 IPMSM이며, 최대전류에 대해 전류 밀도가 15A rms/mm^2 이하가 되도록 설계하였다. 회전자의 크기를 결정하기 위해 본 논문에서 일반적인

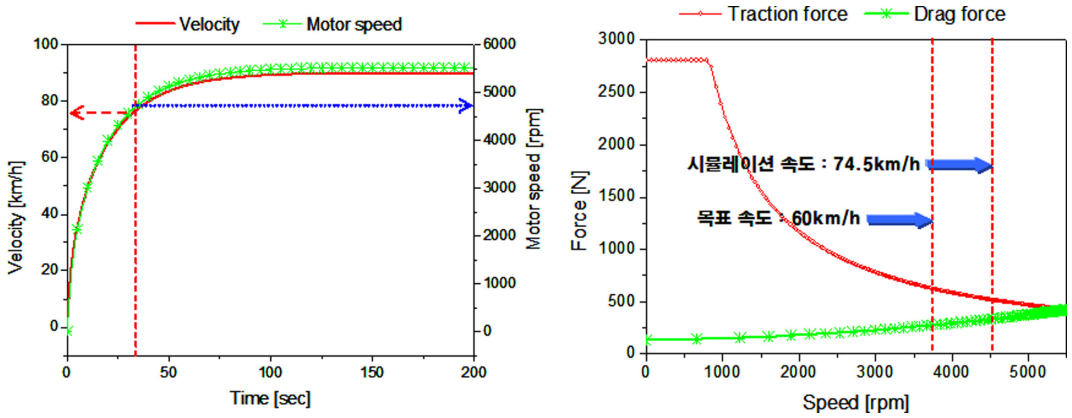


Fig. 6. (Color online) Dynamic simulation result (slope ratio 0 %).

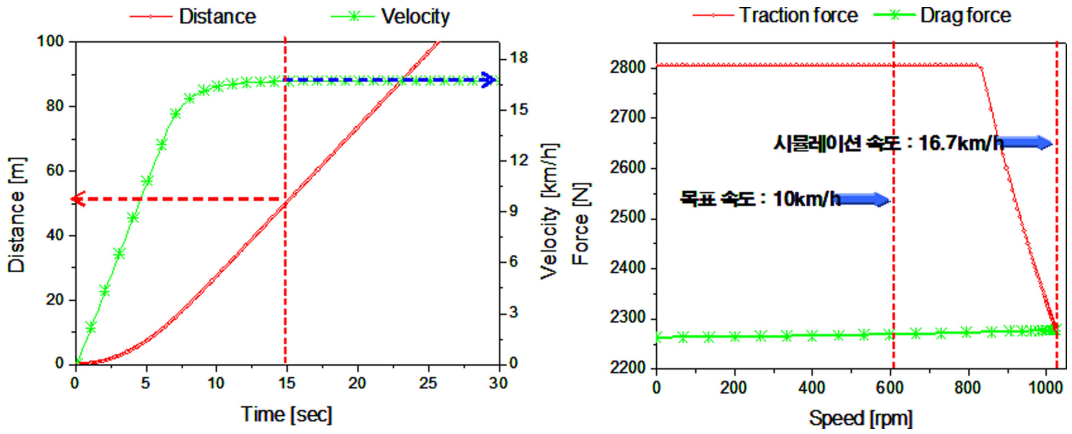


Fig. 7. (Color online) Dynamic simulation result (slope ratio 25 %).

하이브리드 전기차용 견인전동기에 적용하는 TRV 값을 사용한다. TRV를 이용하여 회전자 체적을 계산하였다. 적층길이를 고려하여 최종 회전자의 외경은 155 mm로 결정하였다. 기저속도에서 전동기는 최대 토크를 발생하고, 입력전류는 최대가 된다. 이때의 출력과 입력전류 값을 이용하여 필요한 무부하역기전력을 대략적으로 계산할 수 있다. 다음 단계에서 EMC를 사용하여 단일 코일 당 무부하역기전력을 평가하고 필요한 무부하역기전력의 값을 얻기 위해서 코일 턴 수를 결정한다. EMC 해석에서 코어의 투자율을 무한대로 가정하기 때문에 공극의 자기저항만 고려하여 선형해석을 한다. Fig. 8은 정격출력 5 kW, 최대토크 75 Nm의 초기모델로 설계된 인휠 전동기 회전자와 고정자의 형상을 나타낸다.

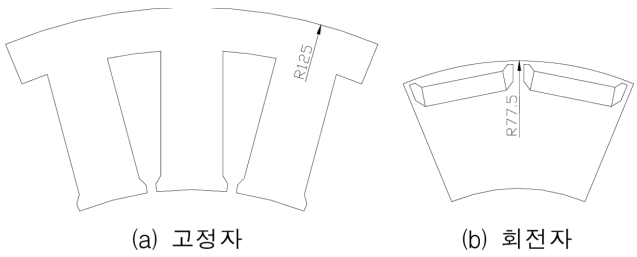


Fig. 8. Stator and rotor of the initial model.

초기 모델을 바탕으로 E-L map를 산정하였다. 선간전압은 변조율(Modulation ratio) 85 %(43.3 Vrms)를 고려하였으므로 추가 마진을 고려하지 않았다. 최대 토크 운전 영역에서 포화를 고려하여 입력전류는 최대전류(170 Arms)에서 10 %~20 % 마진을 고려하였으며, 연속정격에서 입력전류가 작은 영역을 목표 파라미터로 선택하였다. Fig. 9는 초기모델에 대한 효율 및 선간전압 E-L map 보여주고 있다.

선간전압은 40~43 Vrms 범위에서 선택되었으며, 논문에는 언급되어 있지 않지만 최대 전류는 마진을 고려하여 160~170 Arms 범위에서 선택되었다. 범위 선정 후 목표 인덕턴스를 만족시키기 위한 권선 수를 결정하였다. 회전자 사이즈 내에서 일자형 영구자석은 목표 쇄교자속량을 만족시키지 못하므로 영구자석 형상은 V타입으로 결정하였다. 전압 제한으로 인해 권선 수 증가를 통한 쇄교자속량 확보는 제한을 받는다. 설계된 모델에 대해 FEA를 이용하여 등가회로 특성해석을

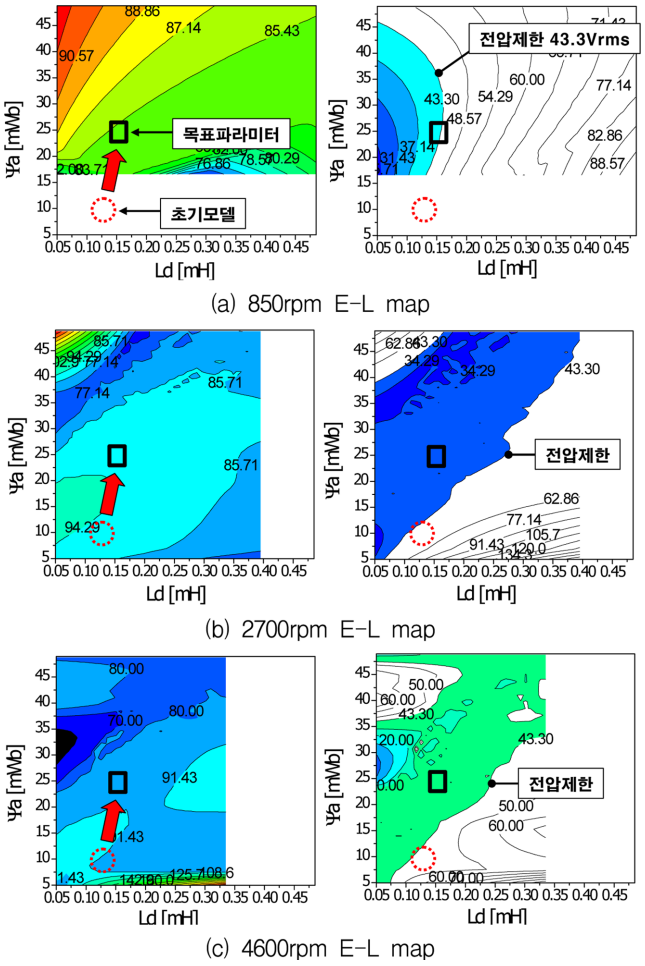


Fig. 9. (Color online) E-L map for efficiency and voltage at each speed.

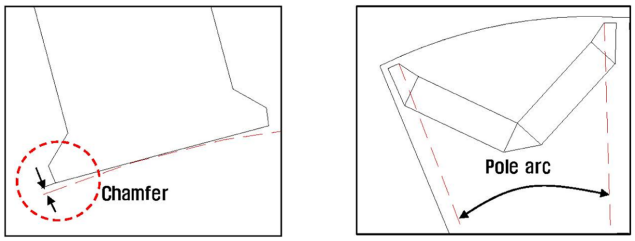


Fig. 10. (Color online) Optimal design factors.

위한 전동기 파라미터를 산정하고, 산정된 파라미터를 이용하여 전동기 등가회로 특성해석을 수행하였다. 특성해석을 통하여 전동기 요구사항을 만족함을 확인한 후 무부하역기전력 THD, 코깅토크, 토크리플에 대한 최적설계를 진행하였다. 최적설계에는 반응표면론법(RSM: Response Surface Method)이 적용되었다.

목적함수로는 무부하역기전력 THD, 코깅토크, 토크리플을 설정하고, 설계변수로는 Fig. 10, 11에 나타낸바와 같이 챔퍼

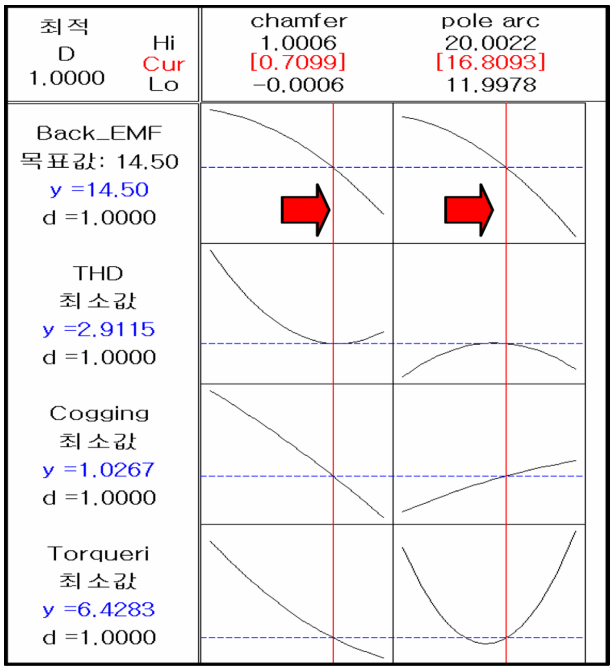


Fig. 11. (Color online) Analysis result of RSM.

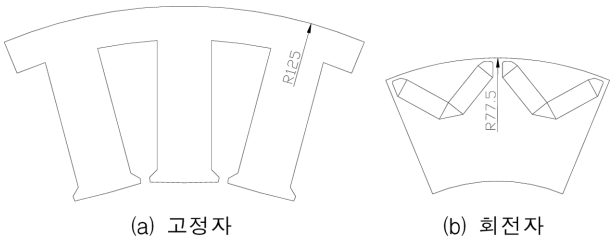


Fig. 12. Stator and rotor of the optimal design.

(chamfer), 극호각으로 설정하였다. 무부하역기전력 THD, 코깅토크, 토크리플 저감을 위하여 챔퍼와 극호각를 변형시킨 결과 무부하역기전력 THD와 코깅토크는 챔퍼에 큰 영향을 받으며, 토크리플은 극호각에 큰 영향을 받는다. 무부하역기전력을 만족하면서 무부하역기전력 THD, 코깅토크 및 토크리플이 최소가 되는 적절한 지점을 결정하였다. E-L map를 통하여 얻어진 목표 파라미터를 만족하고, 최적설계를 수행한 최종모델의 형상 및 치수는 Fig. 12과 같다.

설계된 모델에 대해 등가회로 특성해석을 위해 전동기 파라미터를 산정하였다. 파라미터는 FEA를 이용하여 산정되었다. Fig. 13은 FEA를 이용하여 산정된 전동기 무부하역기전력 및 인덕턴스를 보여준다.

무부하역기전력는 초기모델과 비교하여 2.2 % 감소하였지만 무부하역기전력 THD는 25.9 % 개선되었다.

산정된 파라미터를 이용하여 전동기 등가회로 특성해석을 수행하였다. 최종모델(최적설계모델)에 대해 전동기 특성해석을 수행한 결과 요구 출력 및 전압, 전류 제한을 모두 만족하였다.

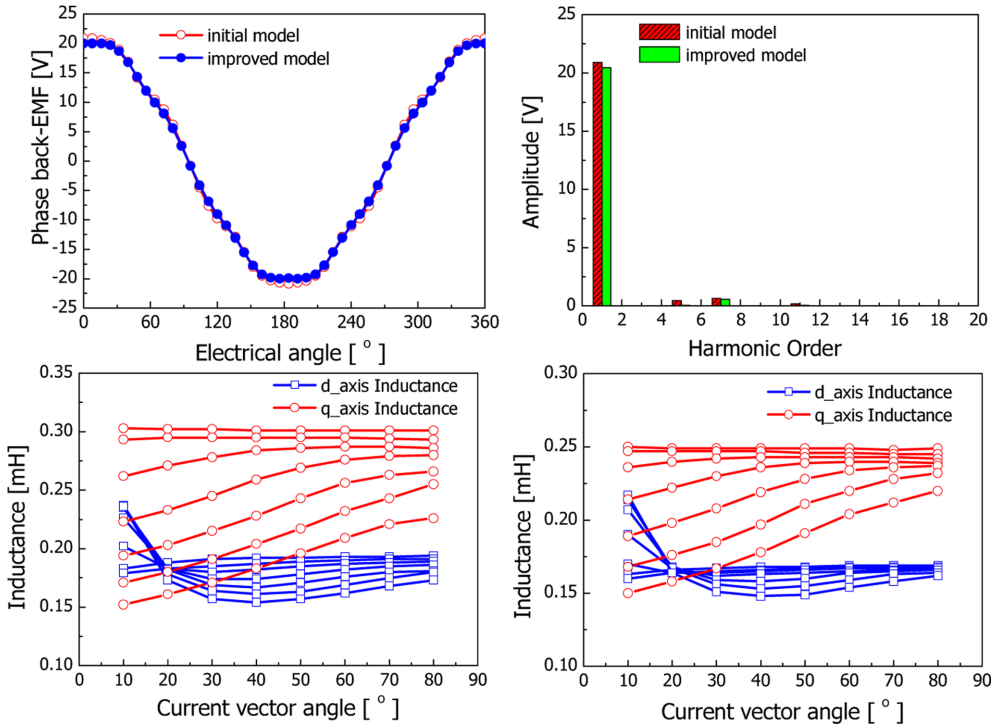


Fig. 13. (Color online) 무부하역기전력 and inductance of optimal model.

Table II. Result of characteristic analysis for the motor at different speeds.

속도 [rpm]	토크 [Nm]	출력 [W]	전류 [Arms]	선간전압 [Vrms]	효율 [%]
850	75.15	6689	163.0	41.0	89.4
2700	18.35	5180	74.2	42.9	94.5
4600	10.39	5509	78.3	43.2	91.3

Fig. 14, 15는 운전속도범의 500 rpm에서 4600 rpm까지의 최대정격과 연속정격에 대한 전동기 부하토크, 선간전압, 입력전류, 효율 등의 특성곡선을 보여준다.

Fig. 16은 최종 설계 모델의 속도와 토크에 따른 효율 맵을 보여주고 있다. 저속 고 토크 영역으로 갈수록 효율이 감소하는데 이것은 동손증가의 원인이다. 또한 고속 저 토크 영역으로 갈수록 효율이 감소하는데 이것은 철손증가의 원인이다. 인휠 전동기의 효율을 높이기 위해서는 속도 및 토크가 높지 않은 영역에서 주 운전 영역을 설정해야 한다.

V. 제작전동기의 성능평가

설계된 전동기를 제작하여 무부하시험과 부하시험을 통해

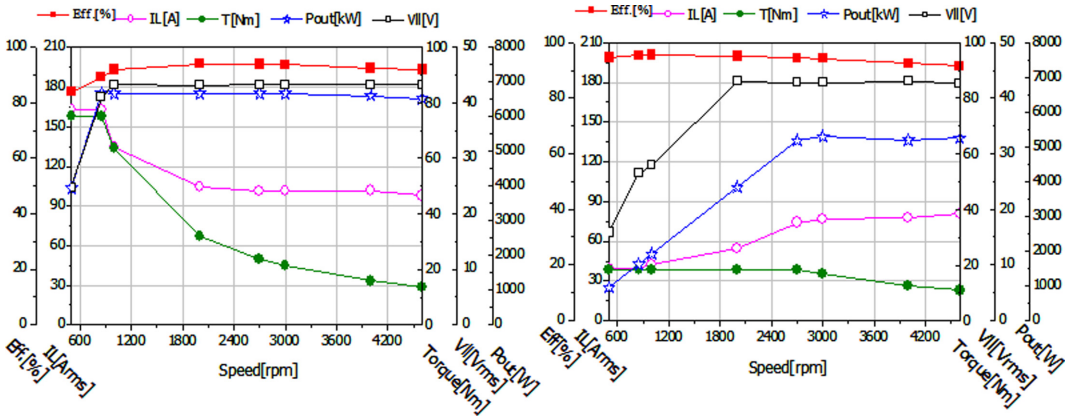


Fig. 14. (Color online) Characteristic curve (continuous rating).

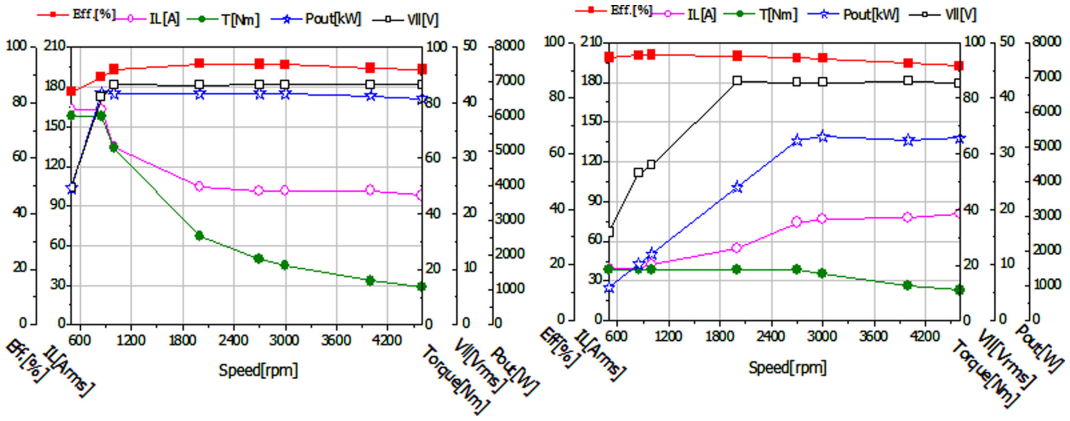


Fig. 15. (Color online) Characteristic curve (maximum rating).

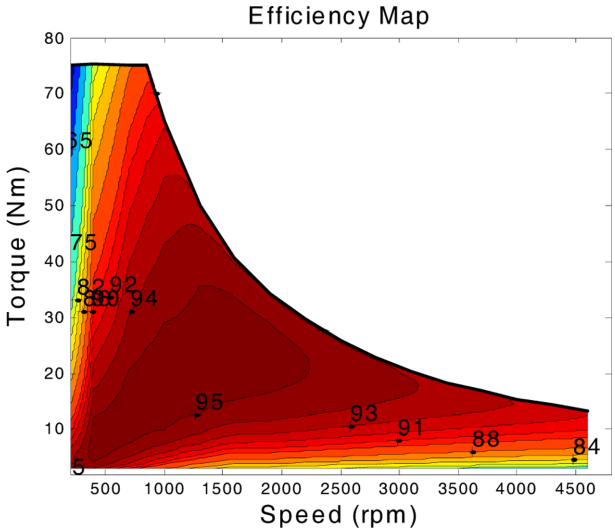


Fig. 16. (Color online) Efficiency map.

성능평가를 수행하였다. 무부하시험을 통해 전동기의 파라미터인 권선저항과 상무부하역기전력을 측정하였다. 또한 부하시험을 통해 최대정격 운전 및 연속정격 운전 시 토크, 출력, 효율, 전압, 전류 등의 전동기 특성을 시험하였다. Fig. 17은 제작된 전동기 및 부하시험 시험 구성을 보여주고 있다.

무부하 무부하역기전력 시험 시 레졸버(resolver)의 위치센서 신호 측정이 필요하다. 측정된 위치센서 신호는 인버터 구동 시 입력 전류의 위상각에 적용된다. 부하시험 시에는 인버터의 위상과 레졸버 신호의 위상을 맞추는 것이 중요하다. 무부하 시험에서 레졸버 신호의 위치가 전동기 d, q축에 정확히 위치함을 확인한 후에 무부하무부하역기전력과 인버터 신호의 세팅이 필요하다. 무부하무부하역기전력과 인버터 위치 신호가 맞지 않은 상황에서 전동기를 제어 할 경우 정확한 전류 위상각 제어가 어려워진다.

Table III은 제작전동기의 각 속도에 대한 부하시험 결과를 보여준다. 표에서 알 수 있듯이 850 rpm에서의 효율을 제외하고는 해석결과와 설험결과가 큰 오차를 보이지 않음을 알 수 있다. 850 rpm에서의 효율오차 원인은 추가 분석이 필요하다.

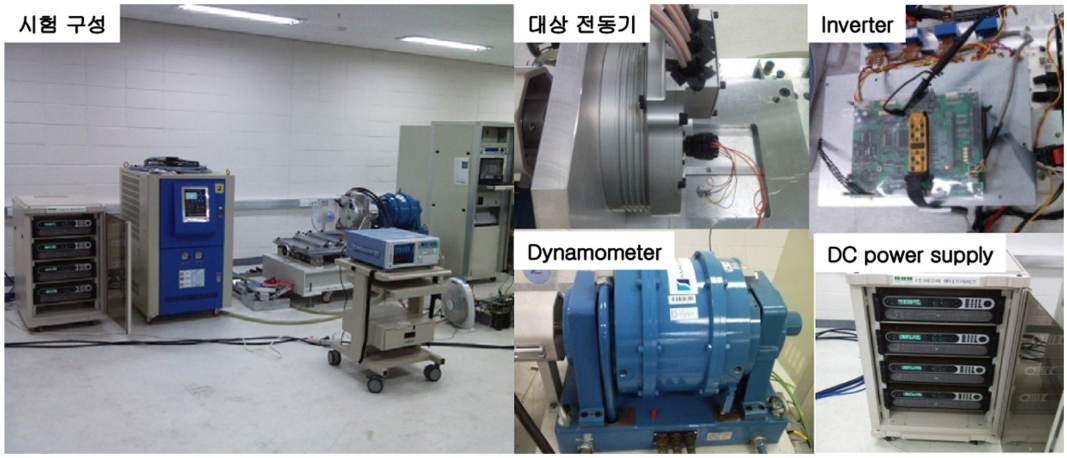


Fig. 17. (Color online) Test setup for load test.

Table III. Comparison of load test and FEA results.

속도 [rpm]		토크 [Nm]	전류 [Arms]	선간전압 [Vrms]	효율 [%]
850	해석치	75.15	163.0	41.0	89.4
	실험치		162.4	43.0	97.4
2700	해석치	18.35	74.2	42.9	94.5
	실험치		75.0	41.6	95.4
4600	해석치	10.39	78.3	43.2	91.3
	실험치		77.3	43.2	92.6

VI. 결　　론

본 논문에서는 파라미터 맵을 이용한 5 kW급 차량용 인휠 구동 시스템 전동기 설계방법을 제시하고, 설계를 진행하다. 저속에서 큰 토크와 넓은 속도 영역을 확보하기 위하여 신뢰성이 뛰어난 IPMSM으로 전동기 타입을 결정하였다.

초기 설계 모델은 낮은 입력 전류 사양으로 인해 요구사양을 만족하는 전동기 파라미터 범위는 매우 제한적이었다. 전압 및 전류사양을 만족하기 위해 각속도에서 파라미터 맵을 사용하여 무부하역기전력 및 인덕턴스를 결정하였다.

결정된 파라미터를 만족시키기 위해 초기모델의 형상 및 치수를 변경하고, 변경된 모델에 대해 FEA를 이용하여 등가회로 특성해석을 위한 전동기 파라미터를 산정하였다. 산정된 파라미터를 이용하여 전동기 등가회로 특성해석을 수행하였다. 특성해석을 통하여 전동기 요구사항을 만족함을 확인한 후 무부하역기전력 THD, 코깅토크, 토크리플에 대한 최적설계를 진행하였다. 제시한 설계 방법의 신뢰성 검증 및 제작된 전동기의 성능 확인을 위해 부하시험을 실시하였다.

부하시험결과는 대부분의 해석결과와 큰 오차를 보이지 않았지만, 850 rpm에서 효율 오차가 크게 발생하였다. 850 rpm에서의 효율오차 원인은 추가 분석이 필요하다.

References

[1] Y. Luo and D. Tan, IEEE Trans. Veh. Technol. **61**, 3510 (2012).
[2] K. Kamiya, J. Okuse, and K. Ooishi, Electric Vehicle Symp., Berlin, Germany (2001).
[3] F. Tahami, R. Kazemi, and S. Farhanghi, IEEE Trans. Veh. Technol. **52**, 683 (2003).
[4] E. Esmailzadeh, G. R. Vossoughi, and A. Goodarzi, Vehicle Syst. Dyn. **35**, 163 (2001).
[5] S.-Y. Yun and J. Lee, Trans. KIEE **62**, 750 (2013).
[6] K.-I. Jeong, D.-H. Lee, and J.-W. Ahn, Trans. KIEE **61**, 567 (2012).
[7] U.-S. Chong, B.-J. Jeon, S.-K. Sul, and J.-H. Jung, KIEE 172 (1994).
[8] S.-M. Lee, Y.-M. Jeong, W.-Y. Sung, O.-J. Kim, and B.-K. Lee, KIEE 348 (2012).
[9] A. Watts, A. Vallance, A. Whitehead, C. Hilton, and A. Fraser, SAE Int. J. Passeng. Cars - Electron. Electr. Syst. **3**, 37 (2010).
[10] K.-J. Tseng and G. H. Chen, IEEE Trans. Power Electron. **12**, 517 (1997).
[11] S.-J. Lee and J.-P. Hong, Trans. KIEE **62**, 1403 (2013).
[12] L. Fang, D.-J. Kim, and J.-P. Hong, Trans. KIEE **60**, 759 (2011).