

전기자동차 구동용 In-wheel type IPMSM 설계

이병화, 김성일, 이정중, 권순오, 홍정표
한양대학교 자동차공학과

Design considerations of IPMSM for in-wheel type electric vehicle

Byeong-Hwa Lee, Sung-Il Kim, Jeong-Jong Lee, Soon-O Kwon, Jung-Pyo Hong
Department of Automotive Engineering, Hanyang University, Hanyang University

Abstract - This paper presents a method for designing a high power motor that is applicable to electric vehicles. Interior Permanent Magnet (IPM) type motor which has high efficiency and high durability is selected. To apply to the electric vehicles, a form, a tire and a wheel of vehicles are considered when calculating a motor performance. After calculating a motor performance, space harmonic analysis and FEA(Finite Element Analysis) is used for designing In-Wheel motor.

1. 서 론

In-Wheel 구동시스템은 하이브리드 자동차, 연료전지 자동차 및 전기자동차와 같이 전기 동력으로 주행하는 차량에서 대형의 단일 모터를 사용하지 않고 각 차륜에 구동 모터를 내장하여 분산 구동하는 시스템이다. 이 시스템은 고성능의 전기 모터를 휠에 직접 장착하여 파워트레인 요소를 모두 제거함으로써 차량 시스템의 효율을 높이고, 추후 친환경 자동차에 적용하여 신개념 플랫폼을 제공할 수 있다는 장점을 가지고 있다. 또한 휠에 모터를 장착함으로써 충분한 구동력을 확보할 수 있고 제동 시 회생제동으로 인한 제동에너지를 회수를 극대화함으로써 연비 개선할 수 있다[1].

따라서, 본 논문에서는 위와 같은 장점을 가진 고효율 In-Wheel 모터 설계를 위한 방법을 제시하고자 한다. 모터 설계에 앞서, 모터 사양이 결정되어야 한다. 공차중량, 공기저항, 지면과의 저항을 고려하여, 25[kW] 이상의 전동기 출력, 200 [Nm] 이상의 토크, 최대 회전수를 5000[rpm]을 만족시키는 설계 과정을 수행하였다. 여기서 전동기 최대 회전수를 만족시키기 위해 constant power speed range(CPSR)를 4, 기어비를 5로 결정하였으며, 토크는 경사별 등판성능을 고려하였다. 따라서 모터 사양을 만족하는 파라미터 산정을 위하여 등가회로를 이용하여 파라미터 변화에 따른 E-L map 그린 후 특성을 만족하는 목표 파라미터를 설정하였다. 목표 파라미터를 만족하는 전동기의 자기회로를 설계하고 유한 요소해석을 통하여 확인한 후 영구자석 불가역 감자해석 및 구조해석을 통하여 전동기 설계의 신뢰성을 높였다[2].

2. In-wheel motor 사양 결정

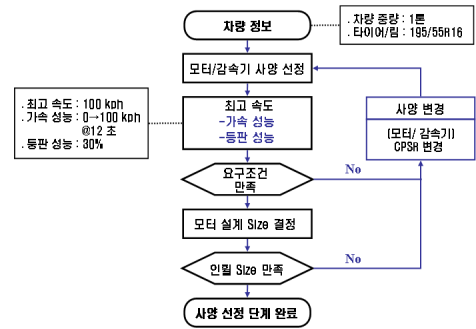
전기 차량에 적용하는 모터를 설계하기 위해서는 먼저 차량의 타이어와 휠, 차량의 형태 등에 대한 정보가 필요하다. 본 논문에서 설계된 In-Wheel 모터는 16인치 타이어 적용되며, 실제 차량 형태를 고려하여 Rolling Resistance coefficient와 aerodynamic resistance coefficients를 각각 0.013, 0.35로 설정하였다[3]. 표 1은 모터 성능 분석을 위한 해석 조건을 나타내고 있다.

전기 차량용 In-Wheel 모터를 위한 모터 사양 선정 Process는 그림 1과 같다. 차량 정보를 기본으로 하여 모터/감속기 사양을 선정하였다. 최고 속도에서 가속 및 등판 성능을 확인한 후 요구 조건을 만족되면, 모터 설계 크기를 결정된다. 만약 만족하지 못할 경우 CPSR을 변경하여 모터/감속기의 사양을 다시 변경하여야 한다. 결정된 모터 사이즈가 인휠 사이즈에 만족하면 모터 사양 선정 단계는 완료되며, 그렇지 않은 경우 프로세스를 반복한다.

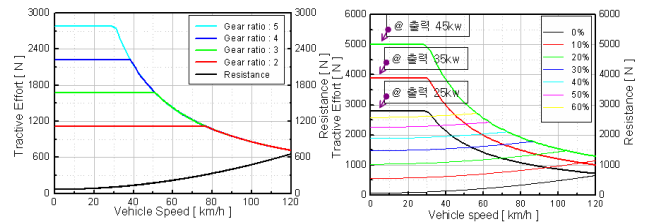
기어비에 따른 tractive effort 곡선과 전동기 용량별 등판 성능은 그림 1의 (a), (b)에 나타내었다. 먼저 기어비에 따른 Tractive effort는 전동기의 용량이 25kW, CPSR이 4 그리고 기울기가 0°일 때 산정된 값이다. 그리고 전동기의 용량 별 등판 성능은 CPSR이 4, 기어비가 5일 때 전동기의 용량별로 산정된 값이다. CPSR의 변화에 따른 전동기의 토크 및 가속 성능은 그림 2의 (c),(d)에 나타내었다. CPSR이 클수록 전동기의 토크 및 가속 성능이 좋아지는 것을 확인할 수 있다. 그러나 CPSR이 증가될 경우 전류도 함께 증가하므로 무조건 크게 결정하는 것이 좋지 않다. 본 논문에서는 CPSR을 4, 기어비를 5로 설정하여 모터 사양을 선정하였으며 이때 인휠 사이즈를 만족하여 사양 선정을 완료하였다.

〈표 1〉 성능 분석을 위한 해석 조건

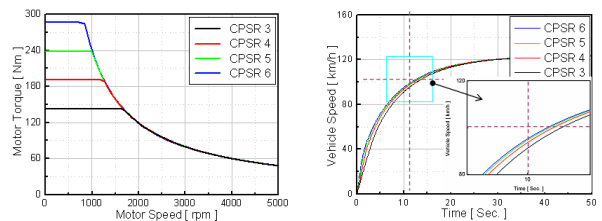
List	Value
Rolling resistance coefficients	0.013
Aerodynamic resistance coefficients	0.35
Motor power	25[kW/wheel] 이상
Motor Torque	200[Nm/wheel] 이상
Air density	5000[rpm]
Frontal Area	1.177@27[°C]
타이어 유효 반경	0.326[m @16inch wheel]
공차 중량	1000[kg]



〈그림 1〉 모터 사양 선정 Process



(a) 기어비에 따른 Tractive effort 곡선 (b)전동기 용량별 등판 성능



(c)CPSR에 따른 토크 곡선 (d)CPSR에 따른 가속성능

〈그림 2〉 전동기 용량과 성능

3. In-wheel motor 설계

3.1 In-wheel motor의 목표 사양

앞서 산정된 모터 성능을 만족하기 위한 모터 사양은 표 2와 같다. 극수와 슬롯수는 16극 24슬롯으로 정하였으며 DC link voltage는 300[V], modulation ratio는 약 90[%]이다. 그리고 최대 정격 시 출력과

토크는 각각 25[kW], 200[Nm]이며, Base rpm과 Max. rpm은 각각 1250, 5000[rpm]이다.

3.2 전동기 설계 Process

그림 4에는 본 논문에서 사용된 In-Wheel 전동기의 설계 프로세스를 나타낸 것이다. 전원 및 출력 사양을 만족하도록 역기전력을 결정 후 Torque per Volume [TRV]을 90 [kNm/m³]이 되도록 회전자 사이즈를 결정하였다. 선정된 사이즈에서 공간 고조파법과 유한요소해석법을 이용하여 초기 설계를 진행하였다. 이 때 선정된 파라미터를 기준으로 하여 전동기 특성을 만족시키는 파라미터를 E-L map을 이용하여 결정하였다. E-L map을 이용하면 전동기의 주요 파라미터인 역기전력과 인덕턴스 값을 변화시켜가면서 전동기의 특성을 만족하는 목표 파라미터를 보다 짧은 시간에 결정했다. 그림 5는 최대 정격 시와 연속 정격 시의 base rpm과 max. rpm에서의 E-L map을 그린 것이다. 그림에서 볼 수 있듯이 최대 정격 시와 연속 정격 시 전동기의 단자 전압 및 전류 제한을 넘지 않는 목표 파라미터의 범위는 역기전력이 77.5~83.5 [V]이며 d축 인덕턴스는 0.56~0.64 [mH]이다. 이때 돌극비는 1.69로 가정하였다. 이것은 초기 설계된 전동기의 값을 참고한 것이다. 따라서 목표 파라미터를 만족하는 전동기의 자기 회로를 설계한 결과, 설계된 전동기의 형상 및 치수는 그림 3에 나타내었다. 마지막으로 전동기 특성 향상을 위해 DOE와 RSM을 이용한 최적화 단계가 진행되어진다.

3.3 전동기 설계 결과

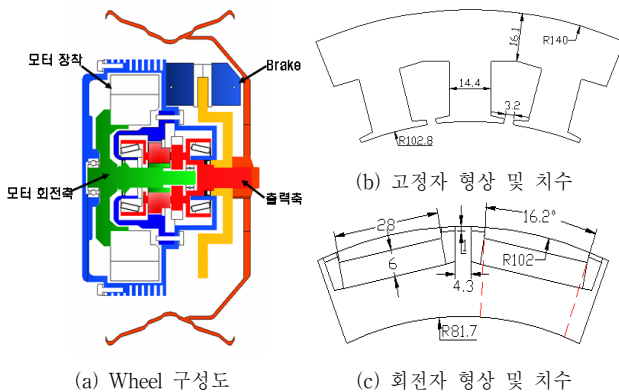
그림 6 (a)에서 보듯이 설계된 전동기의 특성 해석 결과를 확인하기 위하여 유한요소법을 이용하여 토크를 산정한 결과, 최대와 연속 정격 시 각각 196[Nm]과 77[Nm]으로 전동기의 모터 사양을 만족함을 확인할 수 있었다. 또한 영구자석의 불가역 감자뿐만 아니라 고속으로 운전할 시의 안전성을 검토하기 위하여 전동기의 강성 해석을 하였다. 그 결과 그림 6과 그림 7에 나타내었다. 그림 6의 (b)에는 최대 정격에서의 최대전류를 인가하였을 경우 영구자석의 감자를 평가한 결과 외부가력 인가 전과 후의 역기전력이 일치함을 확인할 수 있었다.

4. 결 론

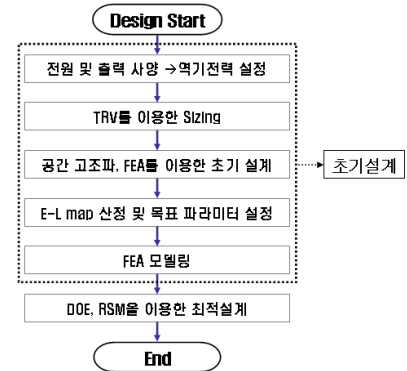
본 논문에서는 전기 차량용 인휠 모터의 설계 방법을 제시하였다. 전동기 설계에 앞서 차량의 모양과 휠 등에 관련된 차량 정보를 전동기 성능 선정 시 반영하였다. 전동기 설계는 공간고조파와 유한요소해석을 이용하였다. 해석 결과를 이용하여 특성해석을 수행하여 모터의 해석 결과가 전동기 목표 사양을 만족함을 확인할 수 있었다. 또한 전동기의 영구자석 불가역 감자 및 강성해석을 통하여 전동기 설계의 신뢰성을 확보하였다. 설계된 모터는 시험을 통하여 설계 결과를 검증할 계획이다.

〈표 2〉 모터 사양

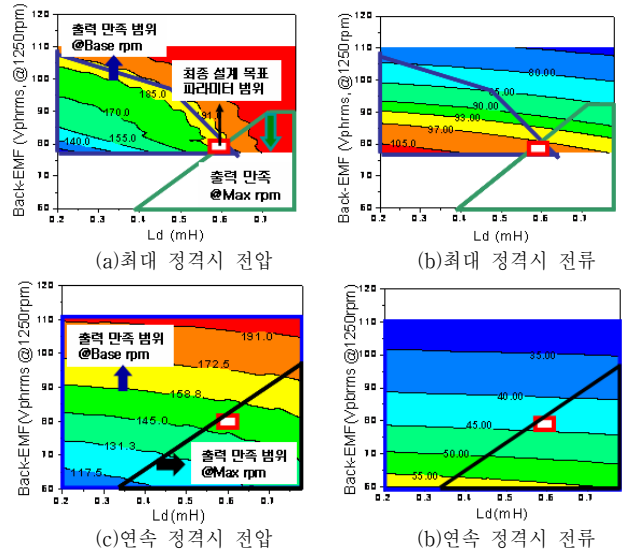
List	Value
Pole / Slot	16 / 24
DC link voltage [V]	300
Max Power / Continuous Power [kW]	25 / 10
Max Torque / Continuous Torque [Nm]	200 / 76.5
Base speed / Max. speed [rpm]	1250 / 5000
Stator out dia. / Rotor out dia. [mm]	280
Stack length [mm]	67
냉각방식	공기 냉각



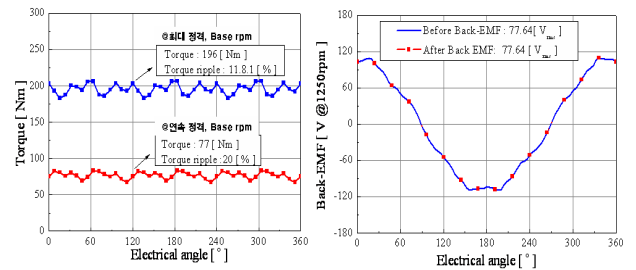
〈그림 3〉 Wheel 구성도 및 전동기 형상 및 치수



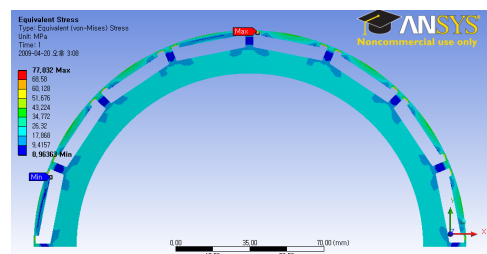
〈그림 4〉 전동기 설계 Process



〈그림 5〉 E-L map



(a) 최대와 연속에서의 Torque (b) 영구자석 불가역 감자 해석 결과
〈그림 6〉 Torque와 back-EMF



〈그림 7〉 최대 속도에서의 구조해석

[참 고 문 헌]

- [1] J. M. Nagashima, "Wheel hub motors for automotive applications," EVS21, Monaco, 2005
- [2] Soon-O Kwon, "Design of BLDC motor using Parametric design," 대한전기학회 하계학술대회 논문집, pp. 1013-1014., 2007
- [3] Mehrdad Ehsani, "Modern Electric, Hybrid Electric, And Fuel Cell Vehicles", 2004