

# 인휠모터용 축방향자속 전동기 설계

## Design of an Axial Flux Machine for In-wheel Motor

\*#이지영<sup>1</sup>, 주대석<sup>1</sup>, 홍도관<sup>1</sup>, 우병철<sup>1</sup>, 김종무<sup>1</sup>

\*# J. Y. Lee<sup>1</sup> (jylee@keri.re.kr), D. S. Joo<sup>1</sup>, D. K. Hong<sup>1</sup>, B. C. Woo<sup>1</sup> and J. M. Kim<sup>1</sup>

<sup>1</sup>한국전기연구원 전동력연구센터

Key words : Axial flux machine, In-wheel motor, Motor design

### 1. 서론

축방향 자속 전동기 (Axial flux machine, 이하 AFM)는 높은 토크밀도와 효율로 인해 전기추진 시스템에서 많은 연구가 진행되고 있는데, 특히나 직경에 비해 축방향이 얇은 구조적 특징으로 인해 자동차 인휠용 모터(In-wheel direct-drive motor)로 관심이 집중되고 있다 [1]-[2].

AFM에서 주자속의 흐름은 회전자가 회전하는 평면뿐만 아니라 그 평면에 수직인 축방향으로도 흐르기 때문에 3차원적인 자속 흐름을 가지는데, 이로 인해 코어를 구성하는데 많은 어려움이 있다. 따라서 과거에는 코어를 사용하지 않거나 [2], 분말 코어 기술의 발달로 최근에는 연자성분말 (Soft magnetic composite, SMC) 코어를 사용하기도 한다 [1]. 코어가 없는 코어리스(coreless) 타입의 AFM 보다 코어가 있는 AFM의 출력밀도가 높고, 고정자와 회전자를 다중으로 구성하는 경우 권선을 감는 고정자 보다는 에너지 밀도가 높은 영구자석을 사용하는 회전자를 많이 구성하는 것이 토크밀도를 높이는데 도움이 된다.

따라서 본 논문에서는 효율은 물론 소형·경량화를 우선시하는 자동차 인휠용 모터 개발을 위해서 코어가 있는 1고정자-2회전자 토폴로지를 이용한 AFM 설계에 대해서 기술하고자 한다. 특히 제어 성능을 고려하여 출력을 만족하면서 토크리플을 저감시키는데 설계를 집중하였다.

### 2. 인휠모터 개발사양

본 논문에서 AFM 설계에 고려한 인휠모터의 개발 사양은 표 1에 요약되었다. 기어를 사용하지 않고 전동기에 의해서만 구동되므로 토크가 크고 속도가 낮다. 전동기의 주요 운전 특성은 기저속도와 최대속도에서 각각 정격출력 운전과 최대출력

Table 1 Specifications for an in-wheel motor design

Items	Values
Base and maximum speed (rpm)	300, 800
Rated and maximum torque (Nm)	238.8, 477.5
Rated and maximum power (kW)	7.5, 15.0
Drive input voltage (Vdc)	300
Drive output current (Arms)	100 (limit)
Maximum outer diameter (mm)	360
Material of magnetic core	35PN380
Material of permanent magnet	N39UH
Maximum temperature (°C)	150 (@ coil) 120 (@ PM)
Cooling condition	natural cooling

운전의 4개 점으로 정의되는데, 설계는 기저속도와 최대속도에서 최대출력 지점에 맞춰 진행되었다.

### 3. 축방향자속 전동기 설계

AFM의 극수/슬롯수 및 기본적인 치수와 권선 사양은 종자속(longitudinal flux or radial flux) 동기 전동기 설계를 이용하였다. 즉 상용프로그램인 RMXprt를 이용하여 표 1의 설계 사양을 만족하는 종자속 전동기를 먼저 설계하고 이를 AFM으로 변환하여 3차원 유한요소해석 (3-dimensional finite element analysis, 3-D FEA)을 수행하면서 실험계획법 (Design of experiment, DOE)과 표면반응법 (Response surface methodology, RSM)을 이용하여 고려한 범위 내에서 영구자석과 치, 슬롯 세부치수에 대한 최적 치수를 결정하였다.

1차 프로토타입을 위해 결정된 모델의 형상은 그림 1과 같고 이에 대해 자계해석을 수행한 해석

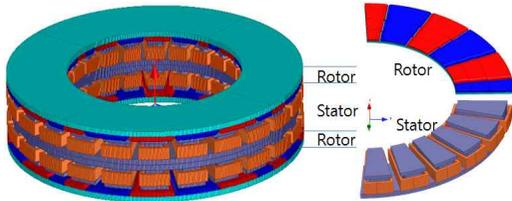


Fig. 1 The configuration of a designed AFM

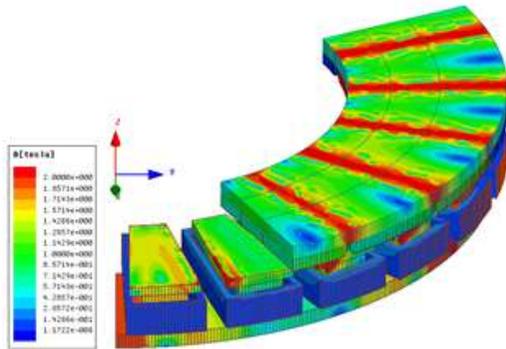


Fig. 2 Analysis model (1/8 model), and its magnetic field distribution for maximum power condition

Table 2 Design results

Items	Values
No. of pole and slot	20, 24
Outer diameter of rotor (mm)	320
Inner diameter of rotor (mm)	190
Total axial length (mm)	78
Air-gap length (mm)	1
PM skew angle (°)	1
Torque ratio @300rpm (kW/kg)	0.65
Efficiency @300rpm and 800rpm for 7.5kW output power (%)	90.8, 98
Electric time constant L/R (ms)	25.3
Torque ripple @300rpm (%)	1.6

모델은 그림 2와 같다. 결정된 상세 치수와 관심 운전 지점에서 출력특성을 표 2에 정리하였다. 토크리플을 저감하기위해서 극수/슬롯수 비를 정수 배가 아닌 5/6으로 가져갔고, 회전자에 있는 영구자석의 형상에 스큐각 (skew angle)을 주었다. 최대한 축방향 길이를 줄이기위해서 자속밀도의 포화정

도를 2T 이상까지도 허용하였고, 코일의 사용량 대신 에너지밀도가 높은 영구자석의 사용량을 늘렸다. 그러나 축방향으로 얇고 권선기자력이 적지 않으므로 영구자석의 감자(demagnetization) 특성 또한 검토하여 요구되는 온도 내에서 불가역 감자 영역이 발생하지 않는 것을 확인하였다.

#### 4. 결론

인휠모터용으로 축방향자속 전동기를 적용하여 1차 프로토타입 모델을 설계하였다. 자동차 모터에 대해 많은 곳에서 연구를 하고 있지만 보다 효율적인 시스템을 위해서는 아직도 해결해야 할 문제가 많다. 본 연구 결과가 전기자동차의 상용화에 기여하기를 바란다.

#### 후기

This work was supported by the Primary of the Korea Electrotechnology Research Institute (KERI)

#### 참고문헌

1. W. Fei and P. C. K. Luk, "An Improved Model for the Back-EMF and Cogging Torque Characteristics of a Novel Axial Flux Permanent Magnet Synchronous Machine with a Segmental Laminated Stator," IEEE Trans. on Magnetics, **45**, no.10, 4609-4612, 2009.
2. 최해용, 최규하, "고효율 전기자동차를 위한 AFPM모터의 설계 및 제어," 전력전자학회 논문집, 2003.
3. 박창석, 배병덕, 김희천, 정태욱, "이중 고정자 AFPM 발전기의 코강토크 저감에 관한 연구," 한국조명 전기설비학회, 2012.
4. 사이드 퀴반알리샤, 유용민, 권병일, "전자기 및 기계적 특성을 고려한 다중 적층형 AFPMSG의 설계," 대한전기학회 논문집, 2011.