

연자성 분말코어를 적용한 축방향 영구 자속형 전동기 설계

최명욱* · 양승진** · 문채주***

Design of Axial Flux Permanent Magnetic Motor Using Soft Magnetic Composite Core

Myung-Wook Choi* · Seung-Jin Yang** · Chae-Joo Moon***

요 약

본 논문에서는 전기 자동차 응용을 위해 연자성 분말 코어가 있는 새로운 축방향 자속 영구자석 모터를 제안한다. 권선 및 연자성 분말 코어는 매우 조밀한 구조를 형성하도록 설계할 수 있으므로 토크 밀도를 크게 향상시킨다. 우수한 자속 집중 능력을 얻기 위해 두 대의 토로이드형 내부 고정자형 모터가 설계 및 분석되었으며, 설계된 모터에는 고성능 전기자동차 애플리케이션 적용을 위해 네오디움 자석이 사용되었다. 3차원 유한 요소 방법은 전자기 매개변수 및 성능을 분석하는 데 사용되었으며, 성능 비교를 위해 상용 축방향 자속 영구자석 모터가 사용되었다. 제안된 모터는 기존 구동모터에 비해 약 5.8% 무게가 가벼워지고 약 8Nm 정도 높은 토크를 생성하였다.

ABSTRACT

A new axial flux permanent magnet machine with soft magnetic composited cores is proposed for electric vehicle application in this paper. The windings and soft magnetic composited cores can be designed to form a very compact structure, and; thus, the torque density can be improved greatly. To obtain the a good flux concentrating ability, two toroidally wound internal stator machines are designed and analyzed, and the designed motor is with NdFeB magnet for high-performance electric vehicle application. The 3-D finite-element method is used to analyze the electromagnetic parameter and performance, for performance comparison, a commercial axial flux permanent magnet machine is used. The proposed motor reduced weight about 5.8%, produced torque higher than about 8Nm for existing motor.

키 워드

Axial Flux Permanent Magnet, Electric Vehicle, Magnetic Flux, Soft Magnetic Composited Cores, Toroidally Wound Internal Stator

축 방향 영구 자석, 전기 자동차, 자속, 연자성 분말 코어, 내부 고정자

* 국립목포대학교 전기공학과(cmwjoker@naver.com) · Received : Jun. 14, 2022, Revised : Jul. 13, 2022, Accepted : Aug. 17, 2022

** (재)광주그린카진흥원(yang3675@gigca.or.kr)

· Corresponding Author : Chae-Joo Moon

*** 교신저자 : 국립목포대학교 스마트그리드연구소

Smart Grid Institute, Mokpo National University,

· 접수 일 : 2022. 06. 14

Email : cjmoon@mokpo.ac.kr

· 수정완료일 : 2022. 07. 13

· 게재확정일 : 2022. 08. 17

I. 서론

세계적인 환경 규제와 자원 고갈 등의 문제로 연비 향상은 자동차의 가장 큰 이슈 중 하나이다. 최근 에너지 자원의 가격상승은 친환경 자동차 개발 및 차량 경량화를 촉진하는 동기로 작용하고 있다. 하지만 전기차 무선충전시스템 도입, 비전센서와 딥러닝을 이용한 자동차 자동 조향 및 속도제어, 자동차 부품결합 감지장치 등 편의사양 증가로 인하여 차량의 중량은 증가하는 추세이다. 이러한 현상은 내연기관 자동차 뿐만 아니라 배터리 때문에 증가한 차량의 무게를 더 상쇄하여야 하고 1회 충전 주행거리 개선이 시급한 전기자동차는 더 큰 이슈로 등장하고 있다. 연비향상을 위해 일반적으로 수행되는 연구는 엔진과 구동계 향상, 주행저항 감소, 경량화 등으로 구분되며, 엔진효율 향상을 위해서는 엔진 다운사이징, 친환경 동력원 적용 등과 같은 연구가 진행되고 있다[1-4].

자동차 중량을 줄이기 위한 부품의 저중량 연구이며, 이를 위한 다양한 방법 중 전기구동 모터를 활용하여 전동화를 통한 연비향상은 가장 큰 효과를 거두고 있는 항목이다. 이를 위해 보조모터 및 전기자동차는 Brushless Motor 형태의 Main Traction Motor를 장착중에 있으며, 고정자와 회전자가 전기강판으로 이루어져 있다. 현재까지의 기술은 주재료인 전기강판의 출력밀도를 개선하는 방안은 고정자 및 회전자 형상을 바꿔서 효율을 개선하고 있고 이것은 전기강판은 재질의 특성상 형상이 2D로만 구성이 되고 철판으로 무게가 증대되는 실정이다. 이러한 추세 속에서 최근 전기구동 모터를 활용한 연비향상과 전동기의 고효율화를 위해 SMC(Soft Magnetic Composite)를 활용한 모터의 경량화가 주목받고 있다. SMC는 기기의 설계에서 효율적인 공간활용과 경량화 최적 설계에 매우 유용하다. SMC를 활용한 모터의 경우 3차원적인 자속 활용이 가능하기 때문에 최근 경량화를 위해서 주목받고 있는 모터이다[5-7].

한편, SMC는 기존의 적층된 금속에 비해 낮은 자기 투자율, 높은 자기 히스테리시스 손실 및 낮은 기계적 강도 등 결점도 가지고 있다. 자화를 통해서 발생하는 손실은 히스테리시스, 맴돌이 전류 및 남아있

는 예외적인 손실 등으로 구분할 수 있다. 맴돌이 전류 손실은 주파수에 독립적이고 재질의 전기적 저항에 비례하여 발생하고 자속방향과 수직성분 부품의 단면적 크기에 비례한다. 이러한 문제는 전기적으로 절연된 금속판 적층으로 줄일 수 있다. 따라서, 이러한 부정적인 요소를 줄이거나 회피하는 주의를 기울여야 한다. 하드 디스크 드라이브(Hard Disk Drives, HDD)의 경우 스핀들 모터의 요소 부품 중에서 스테이터 코어를 SMC로 구성하여 기존 Si-Fe로 구성된 스테이터 코어에 비해 고주파 입력전류, 즉 고속으로 회전하는 스핀들모터에 매우 향상된 효율을 가질 수 있는 장점이 있다[8-10].

본 연구는 이러한 연자성체를 활용한 모터의 설계 시 특성을 최대한 활용할 수 있을 것으로 판단되는 축방향 자속형 전동기(AFPM)를 설계한다.

2장에서는 연자성 분말코어(SMC)가 적용된 모터 설계를 위해 고려되어야 할 영구자석 모터의 설계 이론에 대해 기술하였으며, 3장에서는 2장 이론을 바탕으로 한 모터 크기, 재질 선정 등 설계 방법에 대해 설명하였다. 4장에서는 설계모터의 전자장 시뮬레이션을 위해 셋팅 및 해석을 진행하며 모터 구동 시 발생하는 손실을 최대한 저감하기 위해서 기존 Rotor와 Stator 사이에 발생하는 자속누설현상을 Rotor의 형상을 변경하여 고효율화에 용이한 구조를 보완과정을 거치며 최적화해 가능 과정을 나타내어 동일체적대비 모터의 고효율, 고효율화, 경량화를 실현하였다.

II. 영구자석 동기 모터 이론

2.1 모터 기본구성

영구자석 동기모터(PMSM : Permanent Magnet Synchronous Motor)는 직류모터의 브러시와 정류자에 의한 기계적 정류작용을 반도체의 스위칭 작용으로 대체한 모터이다[11]. 직류모터는 원리적으로 계작용 영구자석이 고정자에, 전기자권선이 회전자에 배치되어 있으므로 전기자 회전형이 되지만, PMSM은 기계적 정류작용을 반도체의 스위칭 작용이 대신하므로 영구자석을 회전자에, 전기자 권선을 고정자에 설치하

여 계자회전형의 구조가 된다. 그림 1은 회전자의 위치에 따라 제어되는 인버터 구동의 영구자석 동기모터 구성을 보여준다.

2.2 회전자 구조 및 특징

PM모터의 대표적인 회전자 형상은 그림 2와 같이 나타나며, 영구자석의 배치로부터 그림 2(a)는 회전자 표면에 영구자석을 부착한 표면자석구조의 동기모터(SPMSM : Surface Permanent Magnet Synchronous Motor)와 그림2(b)에 표시된 것처럼 회전자 내부에 영구자석이 매입된 매입자석형 동기모터(IPMSM : Interior Permanent Magnet Synchronous Motor)으로 구분된다.

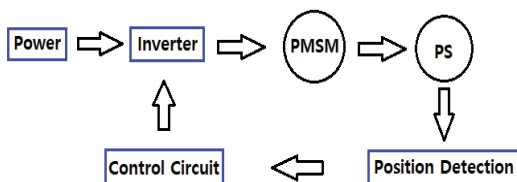


그림 1. PMSM 기본구조

Fig. 1 Basic structure of PMSM

그림 2(a)는 회전자의 표면에 영구자석을 부착한 형태로서 자석과 공극의 거리가 일정하기 때문에 자속밀도가 일정하게 분포되고 최근까지도 이용되고 있는 구조이다. 영구자석의 투자율은 진공중의 투자율과 거의 같으므로 영구자석이 존재하는 부분은 자기적으로 공극과 같다. 또한 표면자석구조의 자기저항은 회전자의 위치와 무관하므로, 전기자권선의 d축 인덕턴스 L_d 와 q축 인덕턴스 L_q 가 같은 비돌극기가 된다.

그림 2(b)는 회전자 속에 영구자석을 매입한 형태로서 매입자석구조에서는 전기자권선이 만드는 d축 방향 자속의 자로에는, 공극과 동일하게 자기저항이 큰 자석이 존재하여 자속이 흐르기 어렵지만, q축방향의 자속은 철심을 통해 흐르기 때문에 이 방향의 자기저항은 작게 되고, 이 결과 $L_d < L_q$ 의 돌극성이 된다.

2.3 PMSM의 토크방정식

영구자석 매입형 모터의 특징인 킬러턴스 토크는 그림 2의 d축과 q축의 자속 경로에 의한 차이 때문에 나타나게 된다. 즉 d축의 자속 경로에는 영구자석이 매입되어있기 때문에 자기저항이 크지만 q축 자속경로는 영구자석을 통과하지 않아 자기 저항이 작다. 이러한 차이가 킬러턴스 토크를 발생시킨다. 발생된 킬러턴스 토크는 마그넷 토크와 합쳐져 식 (1)과 같이 유도된다.

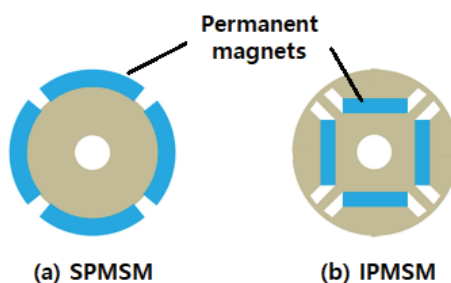


그림 2. PMSM의 표준 모터구조

Fig. 2 Standard motor structure of PMSM

$$\Psi_a i_q + L_d i_d i_q - L_q i_d i_q = \Psi_a i_q + (L_d - L_q) i_d i_q \quad (1)$$

$$\therefore T = P_n \Psi_a i_q + P_n (L_d - L_q) i_d i_q$$

P : 극쌍수

$$\Psi_a : \sqrt{\frac{3}{2}} \Psi_f = \sqrt{3} \Psi_e$$

Ψ_e : 영구자석에 의한 U상전기자 쇄교자속의 실효값

$i_d i_q$: 전기자 권선의 d, q축 성분

$$i_a = \sqrt{i_d^2 + i_q^2} = \sqrt{3} i_u, i_u = \text{상전류 실효값}$$

L_d : d축 인덕턴스

L_q : q축 인덕턴스

식 (1)은 마그네틱 토크와 릴럭턴스 토크의 합을 나타낸 것이며 마그네틱 토크는 전기자 쇠교 자속량과 전류에 비례함을 볼 수 있고, 릴럭턴스 토크는 d 축과 q축의 인덕턴스 차에 비례하고 전류 값의 제곱에 비례하게 된다. 전류 위상 β 는 식(2)와 같이 표시된다.

$$\beta = \sin^{-1} \left\{ \frac{-\Psi_a + \sqrt{\Psi_a^2 + 8(L_q - L_d)^2 I_a^2}}{4(L_q - L_d)I_a} \right\} \quad (2)$$

그림 3은 전류위상 β 를 변화시켰을 때의 발생토크 T, 마그네틱 토크 T_m , 릴럭턴스 토크 T_r 을 표시하였고 위의 식 (2)에서 보듯이 $\beta=45^\circ, -135^\circ$ 에서 최대, $\beta=-45^\circ, 135^\circ$ 에서 최소가 된다. 따라서 전류 위상이 $0^\circ < \beta < 45^\circ$ 범위에서 최대인 토크가 발생한다.

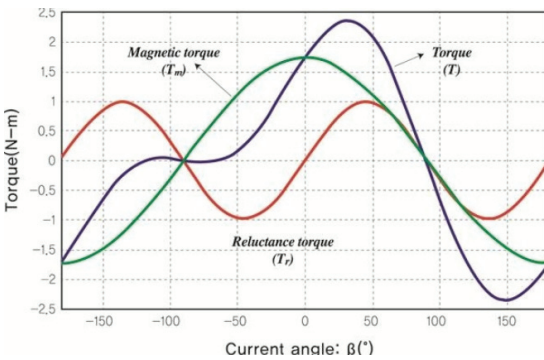


그림 3. 전류위상과 토크특성
Fig. 3 Characteristics current angle and torque

III. IPM 구동 모터 설계

3.1 모터크기 선정

Rotor의 형상에 변화를 줌으로서 자속누설현상을 최소화하여 IPM 타입의 영구자석 전동기를 고효율, 고토크 낼 수 있도록 기본 사양을 선정하고 전기기계적 설계이다. 가장먼저 고려해야 할 요소로 첫 번째로 자동차 프레임에 다른 부품들과 간섭되지 않고 배치되어

야하기 때문에 알맞은 크기여야 한다. 두 번째로 구동용 모터로서 자동차를 주행시키기에 충분한 출력과 토크를 가지고 있어야 한다. 따라서 프레임과 체결되는 하우징 크기를 고려하여 선정하고 식 (3)을 이용하여 개략적인 RPM과 출력을 산정한다.

$$T = \frac{P}{\omega} = \frac{P60}{2\pi N} \quad (3)$$

N : revolution per minute
 P : power (W)
 T : torque (Nm)

3.2 재질선정

모터의 성능을 높이는 방법은 좋은 재질을 사용하는 것이 유리하다. 하지만 모터의 실제 제작하기 위해서는 비용적인 측면을 고려해야 하기 때문에 적은 비용으로 최대의 효과를 볼 수 있는 설계를 하여야 한다. 따라서 모터에 적용할 강판과 자석, 그리고 고정자에 권선되는 코일의 종류와 특징을 파악하고 선정된 재질을 기준으로 하여 전기기계적 설계를 진행한다.

① 강판 선정에서 모터의 코어에 사용되는 연자성체는 결정방위가 한방향이 아닌 무방향성 강판을 사용한다. 모터 설계시 선정 기준은 손실이 적게 발생하는 재질을 선택하는 것이 중요하므로 somaloy 1000 3P를 사용한다[12].

② 영구자석은 자동차 운전의 특성상 높은 보자력을 가지고 고온 감자 특성이 좋아야 한다. 일반적으로 네오디움 자석은 가장 널리 사용되는 자성합금이며 NdFeB는 33~52 MGOe의 BHmax 값으로 가장 높은 가용 에너지를 제공한다. 네오디움 자석의 다른 자성재료보다 1 입방 미터 당 더 많은 힘을 가지며, 상대적으로 싸고, 페라이트 자석의 무게에 1/20이다. 따라서 자석 중에 보자력이 크면서 고온 감자영역도 적당한 N41TS 등급의 자석을 선정하여 설계를 진행하였다[13, 13].

③ 코일의 종류는 경동선과 연동선이 있으며 모터에 사용되는 코일은 경동선에 비해 전기저항이 낮은 연동선이 사용된다. 코일의 선정에서 중요한 것은 모터가 구동중에 온도에 의해서 절연이 파괴되지 않아

야 한다. 코일의 절연등급표에 허용온도가 결정되므로 모터 내부 온도를 고려하여 선정한다.

④ 모터의 극수와 슬롯수의 비율은 권선계수와 코깅토크등 모터 특성에 많은 영향을 주기 때문에 초기 선정에 유의해야 한다. 극수와 슬롯수를 선정할 때 고려해야 하는 몇가지 요소로 전동기의 형태, 회전속도, 영구 자석의 등급등이 고려되어지는데 극수가 증가하면 회전자 요크의 두께를 얇게 할 수 있고 저속에서 고토르크를 낼 수 있다. 하지만 극수의 양을 증가시킬 경우 고속회전에 불리하고 모터 제작 코스트가 증가하게 된다[14]. 모든 조건들을 고려하여 최종적으로 8극 12슬롯으로 설계한다.

⑤ 모터에서 한국의 유효자속 ϕ_g [Mx]을 계산하기 위해서는 모터의 장하비를 설정해야한다. 장하비란 전기장하와 자기장하의 비율로서 설계하고자 하는 모터의 특성에 맞추어 설계자가 선정해야한다. 한 극의 유효자속을 계산하기 위하여 전기자 유효직렬권회수를 계산한 다음 구속시 토크와 무부하 회전속도를 정의하고 식 (4)에 대입한다. 도출된 식(4)에서 ϕ_g 를 좌측항으로 옮기면 1극의 자속량이 계산된다.

$$K_w \cdot W = \frac{30 \sqrt{2} V_t \tau_s}{\pi p N_0 \phi_g (\tau_s + \tau_0)} \times 10^8 \quad (4)$$

- V_t : 전원상전압
- ϕ_g : 한국의유효자속
- τ_0 : 무부하손실토크

⑥ 재질선정 과정을 통해 모터의 1차적인 개략적 설계를 거친 후 고정자와 회전자의 세부적인 형상 및 자석의 사양을 FEM 툴을 이용하여 최적화한다. 스테이터의 형상은 슬롯 두께를 증가시킬 때 출력이 증가하고 코일이 감기는 부분의 슬롯 길이를 외경쪽으로 증가시켰을 경우에 출력이 떨어지는 현상을 보인다. 로터는 자석이 매입되는 부분으로 자석의 위치와 크기에 따라 모터의 성능에 영향을 미치기 때문에 설계하고자 하는 모터 사양 내에서 최적의 효과를 낼 수 있도록 고려하였다. 공극의 길이는 로터와 스테이터간의 거리로 공극이 작을수록 높은 출력을 갖지만 자력에 의해

서 코깅 토크도 심해진다는 단점도 있다. 따라서 해석에 의한 적정 지점을 찾아 설계를 진행하였으며 최종 설계된 규격은 표 1과 같다.

표 1. 설계된 모터 규격
Table 1. Designed motor specification

items	unit	specification
pole	ea	8
slot	ea	12
lamination	mm	85
rated speed	rpm	12000
winding pattern	-	0.8Φ*12Reel *30Tc
parallel circuit	Paths	1
stator size	Φ	235
air gap	mm	1
rated output	Kw	60
efficiency	%	92
torque	N.m	208.31
current density	A/mm ²	29.85

IV. IPM 구동 모터 해석 및 검증

4.1 해석절차

IPM 모터의 전자장 해석을 하기 위해서 전자장 소프트웨어를 그림 4와 같이 flow chart 방식을 적용하여 해석절차를 진행하였고 해석의 종류는 전류원 해석을 진행한다[15].

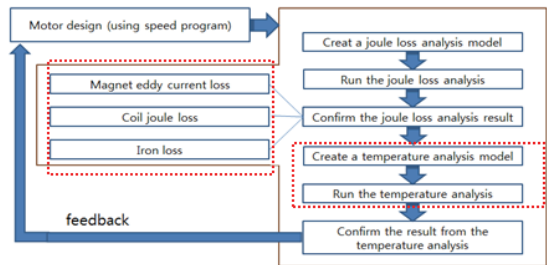


그림 4. 해석절차
Fig. 4 Analysis procedure

전자장 소프트웨어를 이용하여 시뮬레이션 모델을 설계하기 위해서는 첫번째로 Geometry Editor을 사용하여 모터를 모델링한다. 모델링을 하기 위하여 모터의 극수, 슬롯수와 회전자, 고정자 등의 기본적인 치수를 결정하고 전자장해석을 위한 모델링이 완성되면 모터 각각에 재질들을 입력하여 와이딩 패턴을 입력한 뒤 모터를 구동시키기 위한 회로를 설정한다. 전자장 소프트웨어를 이용하여 시뮬레이션한 결과들을 바탕으로 정현파에 가까워서 토크를 매끄럽게 하며, 권선의 누설 리액턴스(reactance)를 감소시키며 과열을 방지할 수 있고 모터의 소음을 최소화 할 수 있도록 back EMF, cogging torque 등을 확인하며 모터를 점점 최적화하는 과정을 거친다. 최종 얻어진 stator flux linkage와 back EMF는 그림 5와 같다.

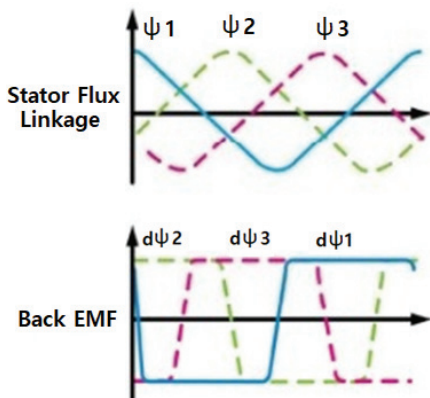


그림 5. 설계된 IPM 해석결과
Fig. 5 Analysis Results of designed IPM

4.2 해석결과 검증

설계한 1차 IPM 모터와 기존 모터를 모델링하여 그 성능을 비교한다. 기존 모터는 표 2와 같이 IPM타입으로 8극 48슬롯을 가지며 최대출력은 60kW, 외경은 246mm이고 적층은 50.5mm이다. 이 모터의 성능은 최대 200Nm의 토크를 가지며 최대 13000rpm까지 회전한다[16].

이 모터의 사양 및 성능을 기반으로 전자장 소프트웨어의 정밀도를 확인하기 위해 기존 사양과 같은 크기로 모터를 모델링하고 해석을 진행하여 얻은 결과

는 그림 6과 같이 거의 실측치와 일치하는 결과 값을 갖는다.

표 2. 기존 모터 규격
Table 2. The existing motor specification

items	unit	specification
pole	ea	8
slot	ea	48
lamination	mm	50.5
rated speed	rpm	2770
winding pattern	-	0.8Φ*8Reel *11Tc
stator size	Φ	246
air gap	mm	0.8
rated output	Kw	60
torque	N.m	200
motor weight	kg	28.2

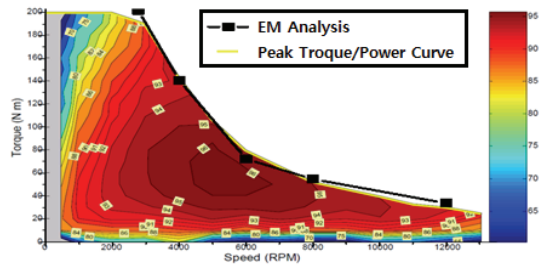


그림 6. 기존 모터의 해석 및 실측결과 비교
Fig. 6 Comparison of analysis and measured data

1차 IPM 모터 설계시 고려한 사항은 기존 자동차용 모터와 자석의 사용량과 재질이 같도록 설정하였고, 외경과 적층의 높이는 다르나, 체적은 유사하게 모델링을 진행하였다. 또한 기존 모터 전기강판의 재질은 35JN230이라는 철판을 사용하였지만, 설계한 1차 IPM형의 모터는 경량화를 위해 연자성체를 사용하였고 재질의 성능은 전기강판과 가장 유사한 성능을 갖는 Somaloy 1000 3P를 사용하여 설계하였다. 또한 모터 설계시 그림 7과 같이 stator core의 모서리를 곡선형으로 디자인하여 코일이 잘 감길 수 있도록 하였고 back yoke의 외·내경을 확대 및 축소하여

모터의 무게를 절감하였다[17].

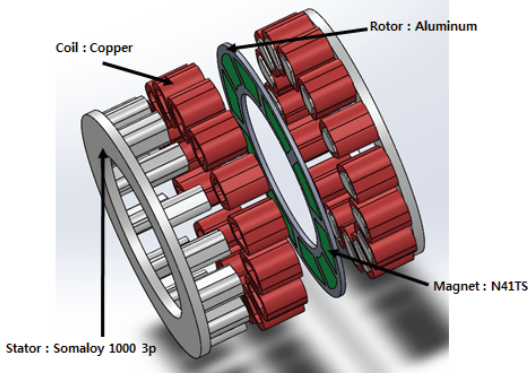


그림 7. 설계된 IPM 형상
Fig. 7 Designed IPM configuration

1차 IPM 모터와 기존 모터의 성능을 비교한 결과 그림 8과 같이 나타난다. 기존 모터에 비해 1차적으로 모델링된 IPM 모터는 약 15% 정도 무게가 경량화되었고 토크 그래프가 유사성을 보이기는 하지만 기존 모터에 비해 직경과 적층의 높이가 너무 크고 출력이 약간 떨어지는 성능을 보였다.

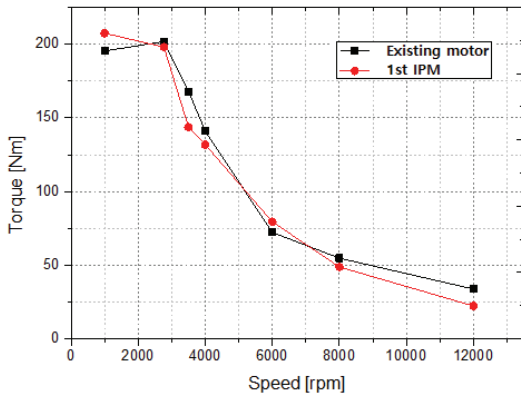


그림 8. 기존 모터와 1차 IPM의 토크비교
Fig. 8 Torque comparison of existing motor and 1st IPM

4.3 IPM 모터의 재설계

1차 설계된 IPM 모터는 외형이 크다는 단점을 보

완하기 위해 고정자, 회전자, 자석 등 모터의 재질은 동일하게 하고 회전자의 형상을 수정하였다. 2차 모델링시에도 1차때와 마찬가지로 기존 자동차용 모터와 자석의 사용량과 재질도 같도록 모델링하였다. 고정자의 코어도 1차 IPM 모터와 같이 모서리에 곡선형을 적용해 코일이 잘 감길 수 있게 설계하였다. 설계된 2차 IPM의 규격은 표 3과 같고 모터형상은 그림 9와 같다.

표 3. 2차 IPM 규격
Table 3. The 2nd IPM motor specification

items	unit	specification
pole	ea	8
slot	ea	12
lamination	mm	86
stator size	Φ	235
air gap	mm	1
motor weight	kg	26.57

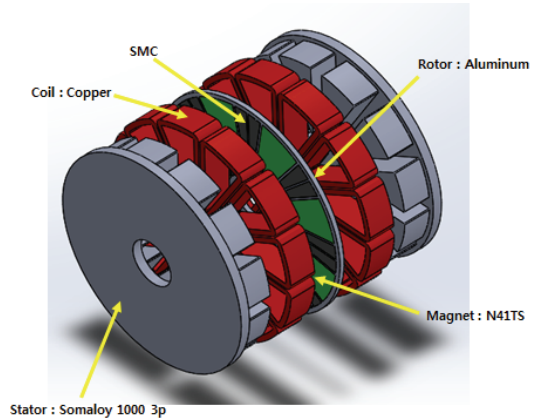


그림 9. 설계된 2차 IPM 형상
Fig. 9 Designed 2nd IPM configuration

2차 IPM 모터 설계는 기존 구동모터에 비해 직경이 작아지고 높이가 조금 커졌다. 또한 1차 IPM 모터보다 직경과 높이를 줄였고 자석의 사용량을 동일하기 위해 회전자의 외경을 줄여서 자석의 사용량을 조절하였고 모델링한 결과 모터의 무게는 양산중 모터보다 약 2kg 정도 가벼워졌고 1차 설계된 IPM형 모

터보다는 2.7kg 정도 무거운 특징을 보였다. 그러나 기존의 모터보다 경량화가 목적이기 때문에 그림 9의 모델링된 모터의 해석을 진행하였고 그림 10과 같은 결과를 얻었다.

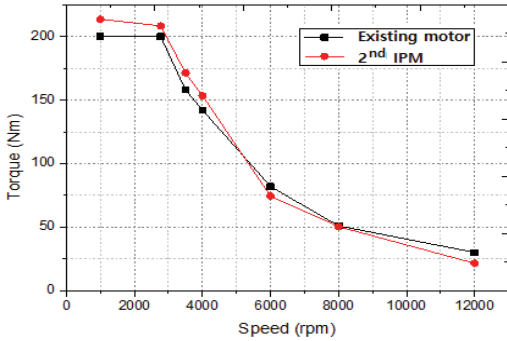


그림 10. 기존 모터와 2차 IPM의 토크비교
Fig. 10 Torque comparison of existing motor and 2nd IPM

2차 설계된 IPM형 구동모터는 기존 모터에 비해 모터의 체적이 작아졌으며 무게 또한 약 5.8%가 경량화 되었다. 자석의 사용량도 거의 동일한 상태에서 보다 높은 토크를 낼 수 있으며, 기존 모터와 1차, 2차 IPM 설계모터의 토크를 그림 11과 같이 그래프로 비교하였다.

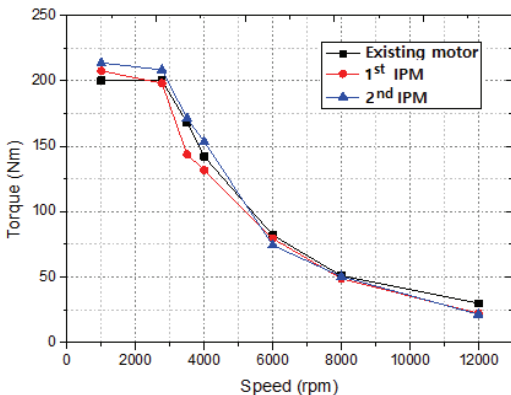


그림 11. 기존 모터와 1, 2차 IPM의 토크비교
Fig. 11 Torque comparison of existing motor, 1st and 2nd IPM

4.4 IPM 모터의 3차 설계

2차 설계된 IPM모터에서 효율을 분석하기 위하여 해석모델의 자속 흐름도를 본 결과 그림 12와 같이 회전자 자석과 자석사이 부분의 연자성체에서 자속이 누설되는 현상이 발생되었다[18].

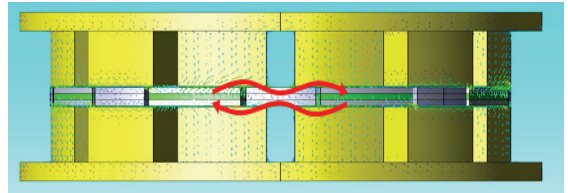


그림 12. 2차 IPM의 자속 흐름
Fig. 12 Magnetic flux flow of 2nd IPM

분석결과를 근거로 회전자의 자속이 누설되는 시점에 자석과 자석사이의 연자성체를 분할함으로써 자석을 구조적으로 구분한 설계를 진행하여 자로의 진로를 원활하게 하여 주면 모터의 손실이 줄어들고 출력이 더 향상되며 고효율 모터를 설계할 수 있을 것이다. 이를 반영한 3차 IPM 구동모터를 그림 13과 같이 설계하였다.

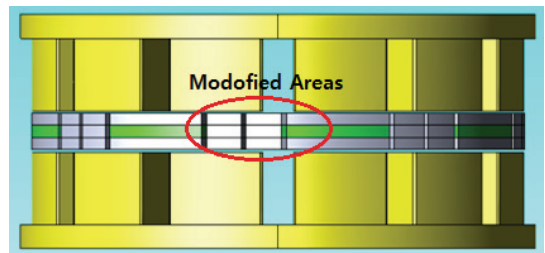


그림 13. 개선된 3차 IPM 형상
Fig. 13 Modified 3rd IPM configuration

3차 모터 설계는 2차 설계된 모터와 재질, 크기 등의 모든 사양이 동일하며 자석의 사용량도 2차 모델과 일치한다. 또한 모터의 무게도 거의 차이가 없다. 자석과 자석사이의 와류가 발생하는 지점에 자석을 두는 설계 결과로 2차 모터 설계에서 생겼던 자속의 와류현상이 없어지고 원활한 자속의 흐름을 보였

으며 2차 설계되어진 IPM 모터보다 높은 토크를 생성하였다. 또한 자로의 진로를 원활하게 흐르게 함으로써 구동모터의 손실이 저감되어 표 4와 같이 2차 IPM 설계 모터보다 효율이 향상되었다.

표 4. 기존 모터와 1차, 2차 IPM의 효율비교
Table 4. Efficiency comparison of existing, 1st and 2nd IPM

speed	existing motor efficiency(%)	2 nd IPM efficiency(%)	3 rd IPM efficiency(%)
2770	88	90.69	89.08
3500	92	92.22	92.47
4000	93	91.20	92.69
6000	95	89.21	90.90
8000	94	88.87	90.16
12000	92	90.27	90.37

V. 결론

IPM 타입을 갖는 구동용 모터의 경량화 및 고효율화를 위하여 구동모터를 설계하였다. 회전자와 고정자의 형상을 변경하고 자속누설현상이 발생하는 지점에 자석을 설치하여 자속을 원활하게 흐를수 있도록 설계하였다. 기존 모터를 선정하여 비슷하거나 같은 재질을 사용하였고 자석의 사용량도 동일하게 선정 하여 설계한 결과 최적의 설계를 도출하였다. 최종 제안된 방식이 기존 구동모터에 비해 약 5.8% 무게가 가벼워지고 약 8Nm 정도 높은 토크를 생성하였다. 설계와 분석을 통하여 회전자와 자석사이 부분이 분할되어있지 않은 모터는 자속의 흐름에서 와류 현상이 발생되나, 와류 현상이 발생하는 시점에 자석을 새워 자로를 원활하게 흐르게해 모터의 효율을 증대시켰다. 이러한 기술적인 해석과 설계변경을 통하여 최적의 모터를 설계할 수 있다는 것을 제시하였다.

향후 설계한 자석 사이에서 발생하는 자속의 와류 현상을 줄이기 위해 와류발생 지점에 자석을 추가로 새워 모터의 효율을 증대시키는 방법에 대한 연구와 고정자 형상 변경을 통해 round형 권선을 각형 권선으로 바꿔 Hairpin Type의 Winding을 적용할 수 있을 것으로 판단된다.

References

- [1] F. Czerwinski, "Current Trends in Automotive Lighrweighting Strategies and Materials", *Materials*, vol. 14, issue 6631, 2021, pp. 1~27.
- [2] I. Kwak, J. Seo, D. Ha, and Y. Ko, "The Road Speed Sign Board Recognition, Steering Angle and Speed Control Methodology based on Double Vision Sensors and Deep Learning," *J. of the Korea Institute of Electronic Communication Sciences*, vol. 16, no. 4, 2021, pp. 699-708.
- [3] J. Lim and D. Lee, "A Technology Trend and Analysis of Electric Vehicle Wireless Charging System," *J. of the Korea Institute of Electronic Communication Sciences*, vol. 16, no. 2, 2021, pp. 255-260.
- [4] Y. Chai, "Development of Internal Defect Detector of Automotive Transmission Parts Using Eddy Current," *J. of the Korea Institute of Electronic Communication Sciences*, vol. 14, no. 3, 2021, pp. 513-518.
- [5] F. Nishanth, J. Verdegheem, and E. Severson, "Recent Advances in Analysis and Design of Axial Flux Permanent Magnet Electric Machines," *2021 IEEE Energy Conversion Congress and Exposition*, Vancouver, Canada, 2021, pp. 1-8.
- [6] M. Gulec and M. Aydin, "Implementation of Different 2D Finite Element Modelling Approaches in Axial Flux Permanent Magnet Disc Machines," *J. of Electric Power Applications*, vol. 12, issue 2, 2017, pp. 195-202.
- [7] L. Pennander, "Recent Development of Soft Magnetic Composite Materials and its Application," *Int. Symposium of Magnetic Bearing 2014*, Linz, Austria, 2014, pp. 1-4.
- [8] Y. Dou, Y. Guo, and J. Zhu, "Investigation of Motor Topologies for SMC Application," *Pro. of Int. Conference on Electrical Machines and Systems*, Seoul, Korea, 2007, pp. 695-698.
- [9] S. Kim, "Spindle Motors using SMC for HDD," *J. of the Transactions of the Korean Institute of Electrical Engineers*, vol. 59P, no. 2, 2010, pp. 151-153.
- [10] L. Pennander, E. Gutowski, and L. Lackner, "Design and Implementation of SMC

Components for an Automotive Electric Water Pump," *The World Conference on Powder Metallurgy 2018*, Beijing, China, 2018, pp. 1-7.

- [11] C. Park, H. Lee, and B. Lee "Analysis of Eddy Current Loss on Permanent Magnets of Interior Permanent Magnet Synchronous Motor for Railway Transit," *Journal of the Korean Society for Railway*, vol. 15, no. 4, 2012, pp. 370-375.
- [12] M. Hwang, H. Lee, J. Han, D. Kim, H. Cha, "Densification Mechanism of Soft Magnetic Composites Using Ultrasonic Compaction for Motors in EV Platforms.", ISSN 1996-1944, vol. 12, no. 5, 2019, pp. 824.
- [13] J. Hendershot and T. Miller, *Design of Brushless Permanent Magnet Machines* Motor Design Books LLC, Scottish, 2010.
- [14] Z. Zhu and D. Howe, "Influence of Design Parameters on Cogging Torque in Permanent Magnet Machines," *IEEE Trans. Energy Conversion*, vol. 15, no. 5, Dec. 2000, pp. 407-412.
- [15] D. Sim, H. Jeong, "Magnetic Field Analysis and Optimum Design of Small Motor.", *Journal of the Korean Magnetics Society*, vol. 4, no. 2, 1994, pp.188 - 191
- [16] T. Burruss and S. Campbell, "Evaluation of the 2010 Toyota Prius Hybrid Synergy Drive System," Oak Ridge National Laboratory, ORNL/TM-2010/253, 2011, pp. 63.
- [17] Masatsugu Takemoto, "Development of a Ferrite Permanent Magnet Axial Gap Motor with Segmented Rotor Structure", *JMAG User Conference 2011*, 2011
- [18] D. Hanselman, *Brushless Permanent Magnet Motor Design Second Edition*. The Writers Collective, USA, 2003, pp. 282-283.

저자 소개

최명욱(Myung-Wook Choi)



2008년 및 2019년 전남대학교 공학사, 공학석사
2017년~현재 (재)광주그린카진흥원 장비운영팀 책임연구원

세방전지(주) 대리, (재)광주테크노파크 선임연구원, (재)광주그린카진흥원 책임연구원
※ 관심분야 : EV 동력계, 자율주행, 전력전자, 인공지능

양승진(Seung-Jin Yang)



2015년 조선대학교 공학사 및 2018년 전남대학교 공학석사
2018년~현재 (재)광주그린카진흥원 장비운영팀 선임연구원

한국생산기술연구원 서남지역본부 동력부품소재그룹 연구원, (재)광주그린카진흥원 선임연구원
※ 관심분야 : EV 파워트레인, 전력변환시스템

문채주(Chae-Joo Moon)



1981년, 1983년 및 1994년 전남대학교 공학사, 공학석사, 공학박사
1997년~현재 목포대학교 공과대학 전기 및 제어공학과 교수
2017년~현재 에너지밸리산학융합원장

한국전력기술(주) 책임연구원, 광주일보 테마칼럼니스트, 전력전자학회 부회장, 이투뉴스 및 한국전기신문 칼럼니스트, 기초전력연구원 에너지밸리분원장 역임
※ 관심분야 : 풍력발전시스템, 전력변환시스템, 전력시스템