

전동 골프카용 5kW급 매입형 영구자석 동기전동기 개발

오영진, 문병선

(주)효성 중공업PG 중공업연구소

Development of 5kW Interior Permanent Magnet Synchronous Motor for Electric Golf-car

Oh Young Jin, Moon Byeong Sun

R&D center, Power and Industrial Performance Group, Hyosung co.

ABSTRACT

Abstract - Recently study on components for a electric golf car and a utility car driven by a electric motor has been performed actively, and the study on a drive motor, a inverter and a battery focuses on a small, light weight and high power density source to improve fuel efficiency using limited electric energy. Especially, since a utility car such as a golf car performance depends on initial acceleration and maximum speed capability, a drive system requires high power and large and wide operation area, This study therefore investigates on the interior permanent magnet synchronous motor with high power density and wide operation, and is verified with the test result after design and characteristic analysis is performed

1. 서 론

근래에 들어 전동기를 구동원으로 하는 전동 골프카나 유틸리티 카의 구성요소에 대한 연구가 활발히 진행되고 있다. 구성요소 중에서 전동기에 대한 기술발전은 에너지 밀도가 높은 영구자석 재료의 개발과 더불어 전력변환 기술, 설계기술 분야에서의 발전, 그리고 영구자석 가격의 저렴화에 힘입어 고효율 및 고�출력 전동기를 실용화시키는데 걸림돌로 작용하였던 많은 점들이 해소되어 여러 형태의 전동기가 개발되고 있다. 특히 골프카와 같은 유틸리티 카는 초기 가속능력과 최대속도가 골프카 성능을 결정하기 때문에 고�출력과 넓은 운전영역이 기본적으로 구성되어야 한다. 또한 골프카에 장착되기 위해서는 소형, 경량화 되어야 하며, 전지의 용량을 고려하여 고효율을 만족해야 하는 등의 많은 요구조건을 가지고 있다. 본 연구에서는 현재 차량 구동용으로 가장 활발한 연구가 이루어지고 있는 매입형 영구자석 동기전동기를 대상으로 설계 및 특성해석을 수행하였으며, 부하시험장치에 의한 기본성능시험과 전동 골프카 실차에 의한 주행성능시험을 통해 개발품의 성능을 확인하였다.

2. 본 론

2.1 전동 골프카용 IPMSM 설계사양

골프카 주행환경은 평지 및 경사지에서의 토크 및 저항력을 고려하여야 하며, 따라서 골프카용 전동기는 중량, 속도, 등판각 등을 고려하여 정격, 등판, 최대 토크 등을 상정하여야 한다. 전동 골프카의 사양은 <표 1>과 같다.

표 1 전동 골프카 사양

Table 1 Specification of Electric Golf-car

구 분	단 위	값
총 중 량	kg	915
속 도	km/h	19
타이어 직경	mm	558
등 판 각	deg	13
감 속 비	-	10
감속기 효율	-	0.92

- 1) 등판토크 = 등판력 × 타이어 직경 ÷ [감속비 × 감속기효율]
- 2) 구름저항토크 = 구름저항력 × 타이어 반경 ÷ 감속비
- 3) 전동기 속도 = 감속비 × 속도 ÷ [60 × π × 타이어 직경]
- 4) 전동기 토크 = 출력 ÷ 속도
- 5) 전동기 최대토크 = 정격토크 + 등판토크 + 구름저항토크
- 6) 전동기 최대토크 시 속도 = 출력 ÷ 최대토크

상기의 식은 표 1의 전동 골프카 사양으로부터 전동기에 요구되는 성능을 계산하는 수식이며, 그 계산결과에 의한 전동 골프카용 구동시스템 및 전동기 설계조건은 <표 2>와 같다.

표 2 전동 골프카용 구동시스템 설계조건

Table 2 Design condition of drive system for Golf-car

구 분	단 위	값
정격 출력	kW	5.0
배터리 전압	V	72.0
운전속도 범위	rpm	0 ~ 4500
운전 시간	min.	30.0
정격 속도	rpm	1800.0
정격 토크	Nm	26.5

2.2 전동 골프카용 IPMSM의 전기설계

본 장에서는 영구자석을 회전자 속에 매입하는 매입형 영구자석 동기전동기(Interior Permanent Magnet Synchronous Motor: IPMSM)의 설계 및 특성해석 내용을 나타내었다. 전동 골프카용 전동기의 요구사양은 기저속도(Base speed)에서 정격 출력 5[kW]를 만족하고 4500[rpm]까지 속도확장이 필요하다. IPMSM의 초기설계는 회전기의 설계에 널리 이용되고 있는 장하 분배법을 이용하였으며, 세부설계는 수치해석을 이용하여 전자기, 구조, 열 특성을 고려하였다. 그리고 결과 검증을 위해 부하시험 및 실차시험을 수행하였다.

2.2.1 자기등가회로법을 이용한 초기설계

영구자석 동기전동기를 설계하는 방법에는 장하분배법과 퍼미언스법이 주로 이용된다. 퍼미언스법은 자속의 경로를 간단한 형태로 고려하여 등가 자기회로를 형성하여 극당 자속을 결정하는 방법으로 이는 회전자자의 기본 치수가 결정되어야 적용 가능하다. 장하분배법은 출력과 용량이 결정되면 장하비에 의한 전기장하와 자기장하로부터 극당 자속의 비를 결정하고 출력과 용량을 만족하는 기기의 치수를 결정하기 때문에 회전자자의 치수가 결정되지 않아도 적용할 수 있다. 그러나 장하분배법의 경우 많은 가정을 수반하기 때문에 설계의 정밀도는 다소 떨어지지만 이는 수치해석적인 방법으로 보완이 가능하다. <그림 1>은 영구자석 동기전동기의 설계 과정을 나타내며, <표 3>은 초기설계 결과를 나타낸다.

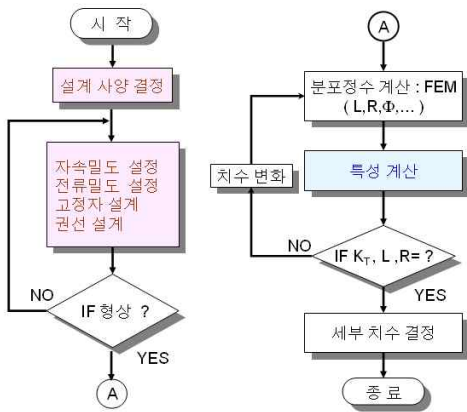


그림 1 영구자석 전동기 설계과정
Fig. 1 Design process of Permanent Magnet Motor

표 3 초기 설계 결과
Table 3 Design result of Prototype

구 분	단 위	값
영구자석 Br	T	1.25
극 수	-	4
슬롯 수	-	24
상당 직렬 턴수	turn	32
고정자 외경	mm	165
적층 길이	mm	100
스큐 각도	degree	1 slot

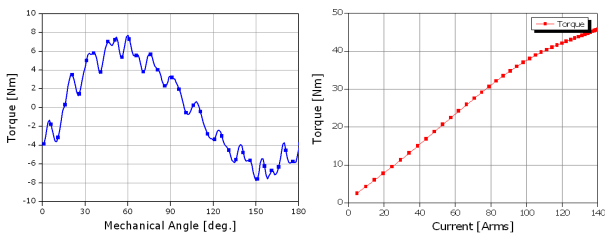


그림 2 초기 설계 모델의 특성해석 결과
Fig. 2 Characteristic analysis result of Prototype

초기 설계된 IPMSM을 대상으로 한 1상 유기전압 특성해석 결과는 정격속도인 1800[rpm]에서 26.01 [Vpeak]를 나타내었으며 이를 유기전압 상수로 환산하면 0.01445 [Vpeak/rpm]이 된다. <그림 3>은 Load angle 및 전류에 따른 출력토크 특성을 나타낸다. 해석결과 회전자 초기각 60[deg]에서 최대토크를 나타내었다.

<표 4>는 정격시의 전동기의 손실과 효율을 나타낸다. 동손의 경우 I2R 식을 이용하여 계산하였으며, 철손은 Steinmetz equation을 적용한 전자계 수치해석의 후처리 과정을 통해 계산하였다.

표 4 정격 시 효율특성 해석결과
Table 4 Analysis result of Rated Efficiency

구 분	단 위	값
동 손	W	65.2
철 손	W	203.0
총 손 실	W	268.2
효 율	%	94.9

장하분배법에 의한 초기설계결과와 전자계 수치해석을 이용한 특성해석을 이용한 최종 설계결과를 <표 5>에 나타내었다. 최종 설계결과를 바탕으로 구조 및 열 특성해석을 수행하여 설계의 신뢰성을 확보하였으며 부하시험 및 골프카 실차시험을 통하여 그 결과를 검증하였다.

표 5 최종 설계 결과
Table 5 Final design result

구 분	단 위	값
영구자석 Br	T	1.25
극수/슬롯수	-	4 / 24
상당 직렬 턴수	turn	32
고정자 외경	mm	154
적층 길이	mm	130
스큐 각도	degree	1 slot
Ld	mH	0.3528
Lq	mH	0.7135
Ke	Vpeak/rpm	0.01445
Kt	Nm/Apeak	0.2716

2.3 전동 골프카용 IPMSM 구조 및 온도특성해석

2.3.1 회전자 구조강도 특성해석

회전자 구조 강도 해석을 위한 가정은 다음과 같으며, 해석 사양은 <표 6>과 같다.

- 회전자 축 주위는 강체로 가정하고 고정경계조건을 적용
- 회전자 토크에 의한 하중이 ±45°±90°위치에서 최대로 발생하므로, 각 위치에 대해 load case 1, 2로 구분
- 회전자의 회전력을 고려하지 않고 4500[rpm], 6750[rpm]의 원심력을 고려하였을 때를 고려하여 load case 3, 4로 구분

표 6 회전자 구조강도 해석 조건
Table 6 Analysis condition of Rotor structure analysis

Torque [kg · m]	허용 응력 [Mpa]	안전계수
2.71	270	3.0

표 7 회전자 응력해석 결과
Table 7 Result of structure analysis

구 분	최대 응력 [Mpa]	안전률
Load Case 1	82.0	3.3
Load Case 2	89.0	3.0
Load Case 3	38.7	7.0
Load Case 4	87.0	4.0

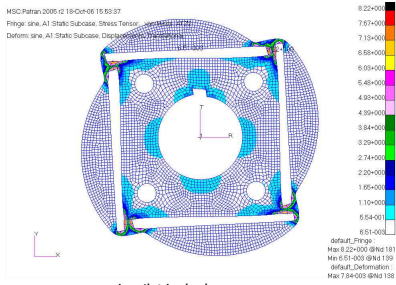


그림 3 Load case 1의 해석결과
Fig. 3 Analysis result of Load case 1

<그림 3>은 Load Case 1에 대한 응력해석 결과를 나타낸다. 이와 같은 방법으로 Load Case 1에서 Load Case 4까지의 해석결과는 <표 7>과 같다. 해석결과 모든 경우에 대하여 안전율이 3.0 이상으로 회전자는 안정적인 구조로 설계되었음을 확인하였다.

2.3.2 온도 특성해석

골프카용 전동기 내부는 고정자에 권선이 감겨져 있고 회전자에는 영구 자석이 있는 영구 자석 전동기로 회전자는 고속으로 회전하고 고정자 철심과 권선에서 손실이 발생하여 열원으로 작용한다. 발생한 열은 고정자와 맞붙어 있는 프레임으로 전도를 통해 전달이 되고 프레임 표면에서는 자연 대류 및 강제 대류 조건에 의해 냉각이 된다.

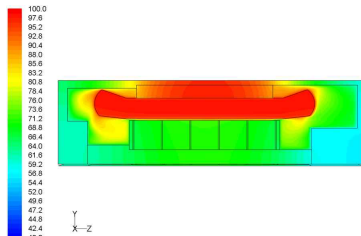


그림 4 전동기 온도분포
Fig. 4 Thermal distribution of motor

<그림 4>는 전동기 내부 및 외부 프레임에 대해 해석을 통한 운전시간 30분 후의 온도분포를 나타내고 있으며, <표 8>은 IPMSM 주요부의 열 해석결과를 나타낸다. 골프카용 전동기의 경우 강제냉각방식이 아닌 자연냉각방식이기 때문에 고정자의 철심과 권선에서 발생한 열이 대부분 프레임을 통해 전달되며, 손실부에서 온도 상승이 크게 되는 것을 확인할 수 있다. 평균온도 상승치는 권선부에서 57℃로 가장 높게 나왔으며 고정자에서 전도로 열 전달되는 프레임 역시 41.2℃로 높은 온도 상승치를 보여주고 있다. 각 주요부 온도 상승치는 전동기 냉각설계 기준 H중 [25℃]을 만족하는 것을 확인하였다.

표 8 열해석 결과
Table 8 Result of Thermal Analysis

구 분	평균 온도 [℃]	온도 상승치 [℃]
회전자 철심	69.9	29.9
영 구 자 석	70.0	30.0
고정자 철심	94.7	54.7
고정자 권선	97.0	57.0
프레임 표면	81.0	41.2

2.4 전동 골프카용 IPMSM 시험평가

설계 및 특성해석 결과를 바탕으로 시제품을 제작하여 특성시험을 통하여 설계의 타당성을 검증하였다. 운전특성 시험은 속도 범위 200[rpm]에서 4500[rpm]까지로 하고 입력토크 범위를 5[Nm]에서 26.5[Nm]로 하였으며, 정격속도 이상의 약계자 운전영역에서는 출력을 정격 출력으로 고정하여 정출력 특성에 대한 특성시험을 수행하였다. <표 9>는 정격에서의 운전특성 시험결과를 나타내며 <그림 5>은 IPMSM 주요부의 온도상승 시험결과를 나타낸다. 결과를 보면 시험결과와 해석결과가 거의 동일함을 알 수 있다.

표 9 정격부하 시험 결과
Table 9 Result of Rated load Test

구 분	단 위	값	
회전 속도	rpm	1800.0	
출력 토크	Nm	26.5	
출력 용량	kW	5.0	
효율	시험치	%	94.7
	계산치	%	94.9

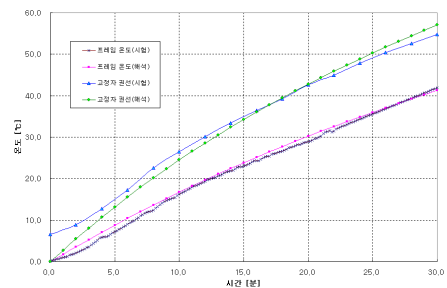


그림 5 온도 시험 결과전동기 온도분포
Fig. 5 Result of Thermal Test

3. 결 론

본 논문에서는 전동 골프카용 5kW IPMSM을 대상으로 장하분 배법과 전자계 수치해석을 이용한 전기설계와 구조해석 및 열 해석을 통하여 전기적 특성 및 구조·열 특성을 계산하였고 그 결과를 바탕으로 시제품 제작 및 시험평가를 수행하여 설계 및 해석결과와의 신뢰성을 확보하였다. 시험 결과를 보면 정격출력 효율이 설계치인 94.9%와 거의 동일한 94.7%라는 시험결과를 나타내었으며, 온도특성 또한 거의 유사한 결과를 나타내었다. 이는 전동 골프카용 IPMSM의 개발에 있어 전자기적인 특성 뿐 아니라 구조, 열 특성 등 다양한 측면을 고려한 설계가 진행되어 보다 정확한 결과를 얻은 것이라 할 수 있다.

참 고 문 헌

- [1] 이근호, 이지영, 홍정표, "42V 전동식 에어컨 시스템용 영구자석 매입형 동기전동기 및 드라이버 개발", 대한전기학회 논문지, 제54권6호, pp.269-277, 2005
- [2] T.J.E. Miller. "Design of Brushless Permanent Magnet Motor". Oxford:Clarendon Press, 1994-00-00.
- [3] Gyu-Hong Kang,Jung-Pyo Hong(의 3인). "Improved parameters modeling of Interior Permanent Magnet Synchronous Motor based on Finite Element Analysis", in Proc. compumag 99. 1999-10.