

듀얼 클러치 변속기용 탈 희토류 영구자석 동기전동기 설계

박 권 일* · 정 영 훈 · 임 명 섭 · 홍 정 표

한양대학교 미래자동차공학과

Design of Rare-Earth Free Permanent Magnet Synchronous Motor For Dual Clutch Transmission

Kwon-Il Park* · Young-Hoon Jung · Myung-Seop Lim · Jung-Pyo Hong

Department of Automotive Engineering, Hanyang University, 222, Wangsimni-ro, Seongdong-gu, Seoul 133-791, Korea

Abstract : Rare earth Permanent Magnet (PM) has been widely used in the electric motor due to the high magnetic flux density. However, minimizing the use of rare-earth permanent magnet in the electric motor is needed because of the limited supply and price fluctuation of rare-earth permanent magnets.

In this paper, a method is suggested to replace the Surfaced-mounted Permanent Magnet Synchronous Motor (SPMSM) using neodymium magnet with Concentrated Flux Synchronous Motor (CFSM) using the ferrite magnet as keeping the same performance. To achieve this, various design parameters such as the width of PM, the thickness of PM, fastening part are adjusted. In result, although a 47% in volume increases compared to SPMSM, electrical characteristic under the same load condition is similar and the torque ripple has been reduced by 7%.

Key words : Concentrated Flux Synchronous Motor (자속집중형동기전동기), Dual Clutch Transmission (듀얼 클러치 변속기) Ferrite Permanent Magnet (페라이트영구자석), Neodymium Permanent Magnet (네오디뮴 영구자석), Surface-mounted Permanent magnet synchronous Motor(표면 부착형 동기전동기)

Nomenclature

B_g : air gap magnetic flux density, T
 B_r : residual induction, T
 A_g : area of air gap, mm²
 D : inner diameter of stator, mm
 p : number of pole pair
 h_m : width of permanent magnet, mm
 t_m : thickness of permanent magnet, mm
 g : length of air gap, mm

ω : rotation velocity, rad/s
 μ_{rec} : permanent magnet recoil permeability
 L_{stk} : lamination length, mm
 V_a : voltage of phase, V
 R_a : resistance of phase, ohm
 L_a : inductance of phase, H
 k_T : torque constant
 k_e : back electromotive force constant

* 박권일, E-mail: zkdn7769@hanyang.ac.kr

1. 서론

최근 전 세계적인 녹색화 정책으로 인해, 자동차의 연비 개선에 관한 기술개발이 이루어지고 있다. 특히 자동차 파워트레인은 차량 연비효율에 가장 큰 영향을 미치는 인자이다.¹⁾ 그 중에서도 변속기의 성능은 전체 차량의 에너지효율에 큰 영향을 미치게 된다. 따라서 높은 전달효율을 가지는 Dual Clutch Transmission(DCT)이 차량에 많이 적용되고 있다. DCT에 사용되는 전동기는 에너지밀도가 큰 희토류 자석을 이용한 전동기가 사용되고 있다. 하지만, 희토류 영구자석 가격의 급격한 변동과 잠재적으로 수급의 제한이 있기 때문에 희토류 영구자석 사용을 최소화 하거나 희토류 탈피 전동기 연구가 필요하다.²⁾

현재 대안으로 연구되고 있는 전동기는 회전자에 권선을 감고 외부 전원으로부터 전류를 입력하여 영구자석 계자를 대체 하는 Wound Field Synchronous Motor (WFSM) 가 있다.³⁾ 또한, 페라이트 자석을 이용하며 형상적으로 Surface-mounted Permanent Magnet Motor(SPMSM)와 Interior Permanent Magnet Motor(IPMSM) 보다 영구자석을 많이 사용할 수 있으며, 자석이 방사형으로 배치되어 자속이 집중 되는 구조를 가진 Concentrated Flux Synchronous Motor(CFSM)가 있다.

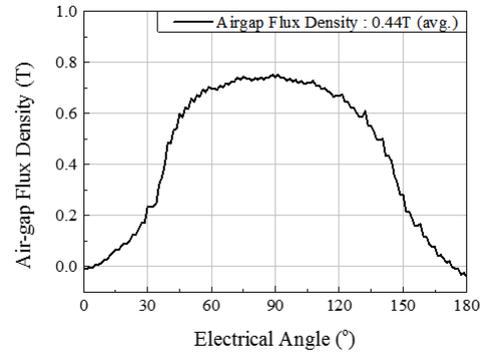
본 논문에서는 기존에 사용되고 있는 네오디뮴(Nd-Fe-B)자석을 이용한 SPMSM을 페라이트 자석을 이용하여 동일성능을 만족하는 CFSM으로 설계하는 방법을 제시한다. 이를 위해 영구자석의 폭, 두께, 체결부의 형상을 설계 변수로 하여 Parametric Design을 수행하였다. 또한 2-D유한요소 해석 프로그램을 이용하여 SPMSM과 CFSM의 전기적 특성을 파악하고 동일 성능을 만족하는 것을 검토한다.

2. 기존 SPMSM 특성

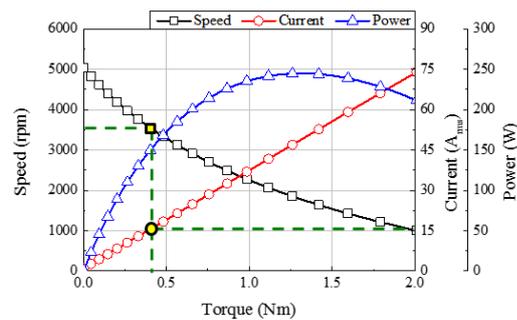
Table. 1은 기존 전동기의 구동조건을 나타낸다. 전동기의 특성을 검토하기 위해 2-D유한요소해석 프로그램을 이용하여 기존 SPMSM의 무부하 및 부하 특성을 검토하였다. Fig. 1(a)은 무부하시 극당 공극 자속 밀도를 나타내고, Fig. 1(b)는 부하 특성을 나타낸다. Table. 2는 SPMSM의 특성해석 결과가

Table. 1 전동기 구동조건

	단위	값
토크	Nm	0.42
속도	rpm	3000
최대 선전류	A_{rms}	22.5



(a) 무부하시 극당 자속밀도 분포



(b) 특성곡선

Fig. 1 SPMSM 특성

Table. 2 SPMSM 특성해석 결과

토크[Nm]		속도[rpm]		선전류[A _{rms}]	
해석치	제한	해석치	제한	해석치	제한
0.42	0.42	3503	3000	16.14	22.5

다. 토크 0.42Nm에서 속도 3503rpm, 최대 선전류 16.14A_{rms}의 값을 확인 하였으며, 전동기 구동조건을 만족함을 확인 하였다.

3. CFSM 설계 프로세스

CFSM은 형상적으로 SPMSM보다 영구자석의 양을 많이 사용 할 수 있으며 자석이 방사형으로 배치 되기 때문에 자속이 집중 되는 구조를 가지고 있다. 이러한 이점을 활용하여, 페라이트 영구자석을 이용한 동일한 극수의 CFSM으로 설계를 진행 하였다. Fig. 2은 CFSM(Concentrated Flux Synchronous Motor)의 형상을 보여준다.

SPMSM과 동일 부피에서 최대 공극 자속량을 발생시키는 회전자를 설계 한후, 동일 공극 자속량을 만족시키는 회전자 설계를 하기 위하여 수식을 이용하여 설계를 진행한다. 그후 전동기 구동조건을 만족시키기 위하여 고정자 치, 요크 폭 체결부의 형상을 변수로 설정하여 설계를 진행 하였다. Fig. 3은 설계 프로세스를 보여준다.

3.1 초기모델 설계

초기설계 모델은 기존 SPMSM과 동일한 부피에 대해 진행 하였다. CFSM의 경우 비자성체의 두께에 따라 영구자석의 폭, 두께가 변화 하기 때문에 동일 부피 내에서 공극자속이 가장 큰 영구자석의 폭, 두께를 산정 하였다. 유한요소해석을 이용하여 비자성체 두께에 따른 평균공극 자속 밀도를 Fig. 4에서 비교 하였다. 그 결과 비자성체 두께가 3.5mm 일 때 평균공극 자속 밀도가 가장 큰 것을 알 수 있다. 따라서 초기 CFSM의 비자성체 두께는 3.5mm, 영구자석 두께 및 폭은 각각 2.8mm, 7.5mm로 설정하였다. Fig. 5는 동일 부피에서 회전자만 CFSM으로 변경한 초기 CFSM모델에 대하여 무부하시 공극 자속밀도를 비교하였다. 해석결과 동일부피에서 SPMSM이 CFSM보다 평균 공극 자속량이 1.7배 높은 것을 알 수 있다.

3.2 개선 모델 설계

기존 SPMSM과 동일한 공극 자속량을 맞추기 위하여 영구자석의 폭과 고정자 외경을 증가시킨다.

3.2.1 고정자 외경 및 영구자석 폭 산정

고정자 외경 및 영구자석 폭을 산정하기 위하여 식(1)을 이용하여 영구자석의 폭 및 고정자,

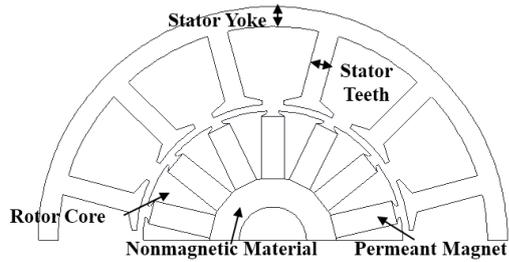


Fig. 2 CFSM(Concentrated Flux Synchronous Motor)

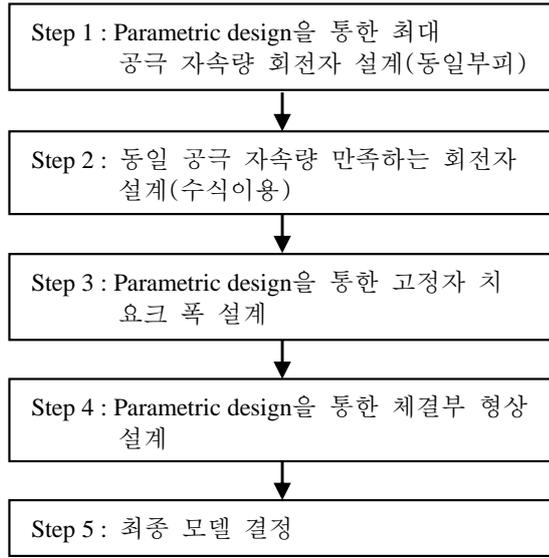


Fig. 3 CFSM design process

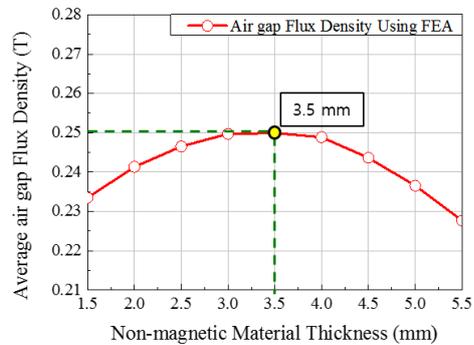


Fig. 4 비자성체 두께에 따른 평균공극 자속밀도

회전자 외경의 증가 비율을 결정 하였다.

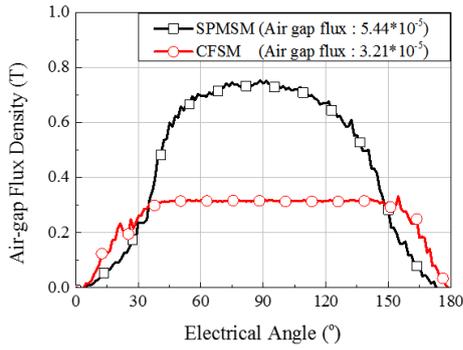


Fig. 5 동일 부피 CFMS, SPMSM의 공극 자속 밀도 비교

$$\Phi_{gm} = B_g \cdot A_g = \frac{B_r}{\frac{\pi D}{4p} + \frac{2g\mu_{rec}}{t_m}} \cdot \frac{\pi DL_{stk}}{4p} \quad (1)$$

이때 산정된 모델을 Model1이라 한다. Table. 3는 Model1의 공극자속량과 SPMSM의 공극자속량을 비교하였고, 동일한 크기의 공극자속량을 나타내는 것을 알 수 있다.

Table. 4은 Model1의 특성해석 결과를 나타낸다. 특성해석 결과 속도 및 선전류가 전동기 구동조건에 만족하는 것을 알 수 있다. 속도조건에 여유를 주기 위하여 식(2)를 이용하여 상당직렬턴수를 줄여, 인덕턴스 및 저항을 감소시켜 속도를 증가하는 설계를 추가로 진행하였다. 이때 산정된 모델을 Model2라 한다.

Table. 5는 산정된 Model1, Model2의 정보이다.

$$\omega = \left(V_a - \frac{T}{\sqrt{2}k_T} R_a \right) / \left(k_E + jL_a \frac{T}{\sqrt{2}k_T} \right) \quad (2)$$

Table. 6은 Model2의 특성해석 결과를 나타낸 것이다. 특성해석 결과 Model2의 회전속도가 Model1보다 증가했음을 알 수 있다. 또한, 특성해석 결과를 바탕으로 부하해석을 진행 하였으며 부하해석 결과, 고정자 치의 포화로 인하여 평균 토크가 전동기 구동조건에 만족하지 못하였다. 부하해석 결과는 Fig. 6와 같다.

Table. 3 Model1 공극 자속량 비교

항 목	SPMSM	CFMSM
공극 자속 [wb]	5.44×10^{-5}	5.38×10^{-5}

Table. 4 Model1 특성해석 결과

토크[Nm]		속 도[rpm]		선 전류[Arms]	
해석치	제한	해석치	제한	해석치	제한
0.42	0.42	3083	3000	17.75	22.5

Table. 5 Model1, Model2 정보

항 목	단위	Model1	Model2
회전자/고정자 외 경	mm	44 / 67.8	44 / 67.8
영구자석 폭/두께	mm	14 / 2.8	14 / 2.8
상당직렬턴수	-	62	58

Table. 6 Model2 특성해석 결과

토크[Nm]		속 도[rpm]		선 전류[Arms]	
해석치	제한	해석치	제한	해석치	제한
0.42	0.42	3272	3000	19.03	22.5

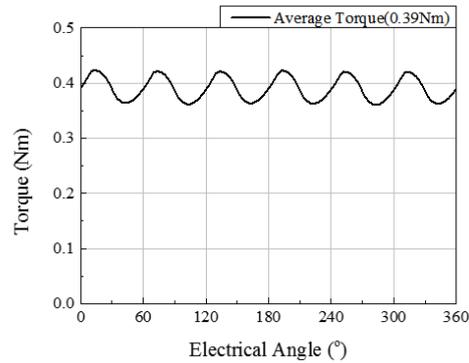


Fig. 6 Model2 부하해석 결과

3.2.2 고정자 치 요크 폭 산정

고정자 치의 포화로 인하여 전동기 구동조건인 평균 토크를 불만족 하기 때문에, 동일 슬롯 면적에서 고정자 치와 요크 폭을 변화 시키면서 평균 토크를 확인 하였다. Fig. 7에서 알 수 있듯이

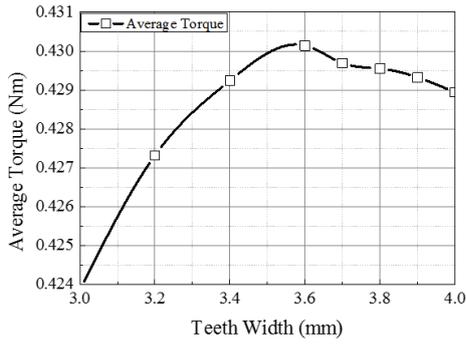


Fig. 7 고정자 치 폭에 따른 평균토크

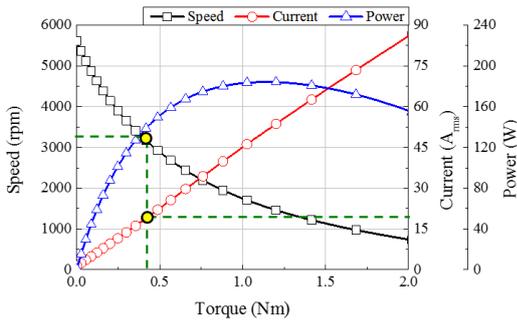


Fig. 8 Model3 특성 곡선

Table. 7 Model3 특성해석 결과

토크[Nm]		속도[rpm]		선전류[A _{rms}]	
해석치	제한	해석치	제한	해석치	제한
0.42	0.42	3168	3000	18.93	22.5

치 폭이 3.6mm에서 최대 평균 토크를 나타내는 것을 확인할 수 있다. 이때 산정된 모델을 Model3라 한다. Fig. 8은 Model3의 특성 곡선을 나타내며, Table. 7은 특성해석 결과를 나타낸다.

3.2.3 체결부

전동기가 고속 회전시 영구자석 및 철심이 구조적으로 비산하는 것을 방지하기 위하여 체결부를 사용하였다. Fig. 9(a)는 체결부의 변수를 나타내며, Fig. 9(b), (c), (d)는 각각 변수에 따른 최대 응력 및 역기전력을 나타낸다. 변화시킬 변수를 제외한 다른 변수는 중앙값으로 고정을 하고 진행을 하였다. 체결부형상에 따른 역기전력의 변화가 없기 때문에 최대응력이 가장 낮은

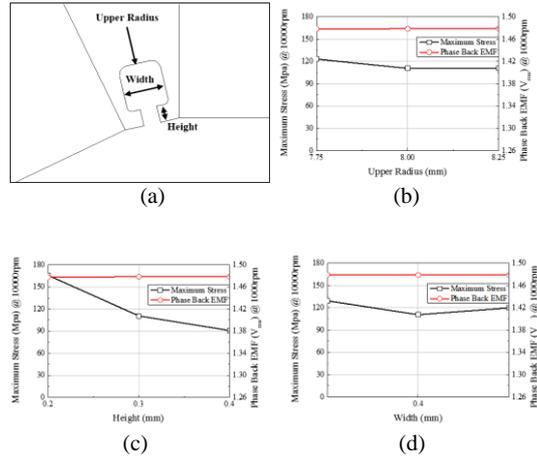


Fig. 9 설계변수 및 그에 따른 결과

- (a) 설계변수
- (b) Upper Radius에 따른 최대응력 및 역기전력
- (c) Height에 따른 최대응력 및 역기전력
- (d) Width에 따른 최대응력 및 역기전력

지점에서 설계를 진행 하였다

3.2.4 최종모델 결과

Fig. 10는 체결부를 고려한 Model3의 형상이다. Fig. 11(a)는 SPMSM과 Model3의 특성 곡선을 나타내며, 두 전동기는 동일 부하에서 특성이 크게 차이 나지 않는 것을 볼 수 있다. Fig. 11(b)는 SPMSM과 Model3의 부하해석 결과를 나타낸 것이며, CFMSM이 SPMSM보다 토크리플이 7% 감소하는 것을 볼 수 있다.

4. 결론

본 논문은 희토류 영구자석을 이용한 SPMSM을 동일성능을 만족하며 페라이트 자석을 사용한 CFMSM으로의 설계 방법을 제시하였다. 유한요소 해석을 이용하여 SPMSM과 동일한 공극 자속량을 갖는 회전자를 설계한 후 고정자의 치, 요크 폭을 재산정 하였다. 고속 회전시 자석 및 철심의 비산을 방지하기 위하여 체결부 형상을 고려하여 설계를 진행 하였다.

SPMSM 대비 47%의 부피 증가를 보였으나, 동일부하에서 특성 차이는 크지 않으며 토크리플은

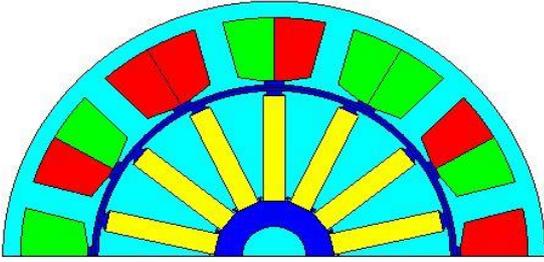
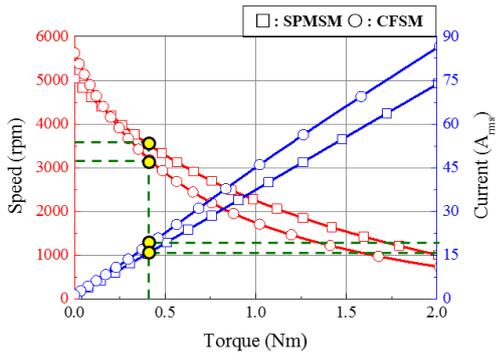
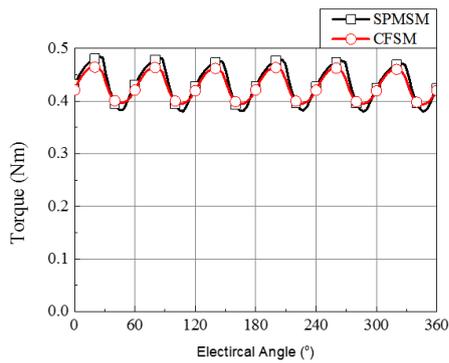


Fig. 10 체결부를 고려한 Model3



(a) SPMSM, CFMSM 특성곡선



(b) SPMSM, CFMSM 부하해석

Fig. 11 SPMSM, CFMSM 특성

7% 저감이 되었다. 본 논문에서 제시한 설계 프로세스를 이용하여 각각의 단계의 수렴율을 낮춰 진행을 한다면, 부피를 더욱 감소 시킬수 있을 것으로 생각 된다.

References

- 1) Jin-sung Kim, Sei-bum Choi “Design and Control of Clutch Actuator for Dual Clutch Transmission”, The Korean Society of Automotive Engineers, pp.341-341, 2014
- 2) K. Sung-Il, C. Jin-woo, P. Tae-sang, L. Seong-teak, “Characteristics Comparison of a Conventional and Modified Spoke-Type Ferrite Magnet Motor for Traction Drives of Low-Speed Electric Vehicles”, IEEE Transactions on Industry Application, Vol.49, No.6, pp.3048-3054, November / December 2013.
- 3) Jung-Pyo Hong “Trends of Wound Field Synchronous Motor Development”, The Korean Society of Automotive Engineers journal, Vol.35, No.10, pp.31-37, 2013