

초고속용 영구자석형 브러시리스 AC 모터의 자계 및 유기전압 특성

장석영, 양현섭, 정상섭, 류동완, 최상규\*, 임기순\*\*  
 충남대학교, 한국 기계 연구원\*, (주)삼진

Permanent Magnet Brushless AC Motor for High Speed

S.M Jang, H.S Yang, S.S Jeong, D.W Rhu, S.K Choi\*, G.S Lim\*\*  
 Chungnam National University, KIMM\*, SAMJIN\*\*

**Abstract** - High-speed brushless permanent magnet machines are good for compressor and aerospace applications, etc, since they are conducive to high efficiency, high power density, small size and low weight.

This paper describes a diametrically magnetized PM motor with the rating of 4.3kW and 50000 rpm for high-speed drive applications. To bear strong stress from high speed, rotor was designed cylindrical structure, was magnetized diametrically permanent magnet. The performance characteristic of motor was evaluated by means of FEA(Finite Element Analysis), no-load test. And then, in order to find back-EMF constant, used FEA, search coil.

1. 서론

고속용 브러시리스 영구자석 모터는 고효율, 고출력 밀도, 그리고 소형·경량성 때문에 많은 응용범위에 이용되고 있다. 즉, 항공기, 잠수함, 선박, 자동차, 우주분야(인공위성) 등에 고속용 영구자석 모터가 이용하고 있다.

산업 전반에 활용되고 있는 고속 영구자석형 브러시리스 AC모터는 고속회전에 의한 원심력이 매우 크기 때문에, 회전자에 많은 스트레스가 가해져 표면에 부착되어 있는 영구자석이 이탈할 가능성이 있다. 이를 방지하기 위해 비자성체 금속 슬리브로 영구자석을 구속을 하게 된다. 이때 고정자 슬롯팅에 의한 공극 자속밀도의 고조파성분에 의해 금속 슬리브에 와전류 손실이 발생하게 되며, 이는 영구자석의 감자특성을 현저히 저하시켜 모터의 성능을 저하시키는 원인이 된다. 따라서 이런 손실이나 스트레스를 줄일 수 있는 구조의 회전자를 선택해야 하며, 또한 영구자석에 의해 만들어지는 공극자속밀도의 고조파에 의해 손실이 발생하게 되므로, 이런 손실을 줄이기 위한 영구자석의 자화방법을 선택해야 한다.[1]

본 논문에서는 50000rpm, 4.3kW급 모터를 설계 제작하여, 특성시험을 실시하였다. 모터의 회전자형태는 고속회전에 적합한 원통형 구조를 갖는 구조를 선택하였고, 회전축도의 제곱에 비례하는 회전자기 생성손실 [3]을 줄이기 위해 이 손실의 원인이 되는 공극자속밀도의 고조파성분을 작게하기 위해 기본적으로 정현파인 파형을 갖도록 영구자석을 직경방향으로 자화하였다[1]. 또한 금속 슬리브를 대신하여 FRP로 영구자석을 강한 원심력 스트레스로부터 보호하였다.[2]

공극 자속밀도의 분포를 해석적인 방법, 유한요소해석(FEA), 그리고 자속계를 이용한 실측으로 알아보았으며, 또한 back-EMF를 알아보기 위해 FEA, 특성시험, 그리고 서치코일을 이용한 예측과 같은 방법을 이용하였다.

2. 모터 설계

2.1 모터 구조

고속 모터는 고속회전에서부터 오는 강한 스트레스를 견디기위해 기계적으로 충분히 강해야 한다.

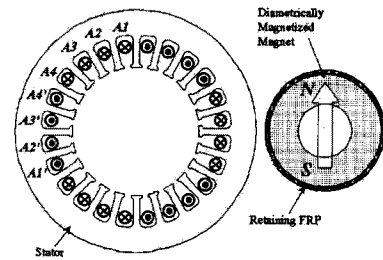


그림 1. 설계 모델

따라서 스트레스를 가장 많이 받는 회전자 구조는 간단, 견고해야 하며, 공극자속 밀도에 의한 와전류손실을 줄이기 위해, 공극자속 밀도분포는 정현파에 가까워야 한다. 따라서 고속모터에 적합하며, 기본적으로 정현파 자계분포를 갖는 직경방향 자화방법을 선택하였다.[1]

2.1 모터 설계의 기본

Z. Q. Zhu, K. Ng, 그리고 D. Howe[4] 등은 직경방향으로 자화된 영구자석을 갖는 모터의 공극 자속밀도 분포를 해석적으로 예측을 하였다. 이 방법은 고정자의 슬롯 개구부를 무시한 것으로서, 다음과 같은 식으로 나타낼 수 있다.

$$B_{gr} = \frac{B_r \left[ 1 - \frac{R_r^2}{R_m^2} \right] \left[ \frac{R_m^2}{R_s^2} + \frac{R_m^2}{r^2} \right] \sin \theta}{\left[ 1 + \frac{R_m^2}{R_s^2} \right] \left[ 1 - \frac{R_r^2}{R_m^2} \right] + \mu_r \left[ 1 - \frac{R_m^2}{R_s^2} \right] \left[ 1 + \frac{R_r^2}{R_m^2} \right]} \quad (1)$$

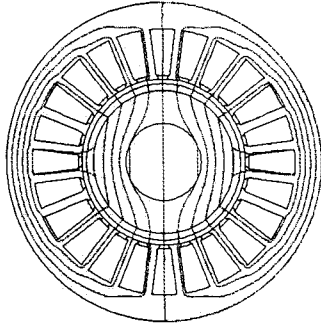
여기서,

$B_r$ ,  $\mu_r$  각각 영구자석의 잔류자기이며, 상대 리코일 투자율이다. 또한  $R_s$ ,  $R_m$ , 그리고  $R_r$ 은 각각 고정자의 내측 반경, 회전자 영구자석의 반경, 그리고 축의 반경이다. 이를 기본으로 모터를 설계 제작하였다. 시험용 모터의 사양은 부록에 나타난 것과 같다.

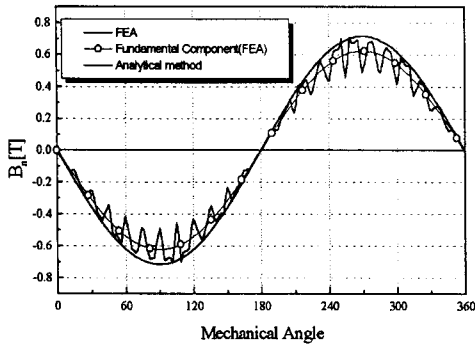
### 3.유한 요소 해석 및 특성시험

#### 3.1 공극 자속 밀도 분포

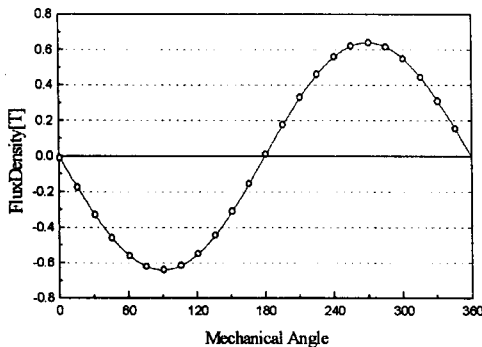
시험 모터의 공극은 기계적으로 1.5mm, 자기적으로 3.5mm이며, 공극에 분포하는 공극자속 밀도를 알아보기 위해 유한요소해석과 식(1)을 이용하여 계산한 값과, 마지막으로 open-circuit 상태에서, 자속계로 실측한 값들을 서로 비교하여 그림 3.에 나타내었다.



(a)자속 분포



(b). 설계 및 해석치 비교



2(c). 자속 밀도계에 의한 측정치

그림 2. Distribution of Airgap Flux density

공극자속밀도를 실측한 결과, 양극에서의 자속밀도가 서로 달리 측정되었다. 즉, 착자시 비대칭적으로 착자되어, 이로 인해 불필요한 코깅 토크가 발생하게 되었다.

#### 3.2 Back-EMF 측정

모터의 특성을 잘 표현해주는 back-EMF 상수를 구하기 위해 그림 3과 실험장치를 구성하였다. 실험장치는 2극이며, 정격속도가 20,000rpm인 유도모터를 PMSM과 축 커플링을 이용해 연결한 후, VVVF인버터를 이용해 유도모터의 속도를 가변 시키면서 그에 따른 상전압의 역기전력을 디지털 오실로스코프를 이용해 측정하였다. 한 예로 회전속도 15,000rpm의 상 유기 기전력 파형이 그림 4에 나타내었다.

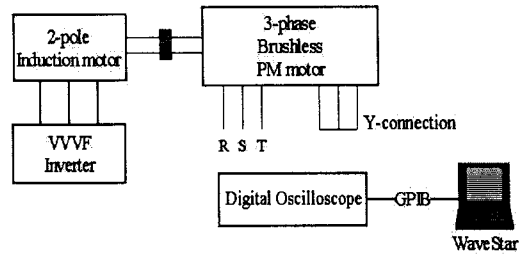


그림 3. Induced voltage measuring system

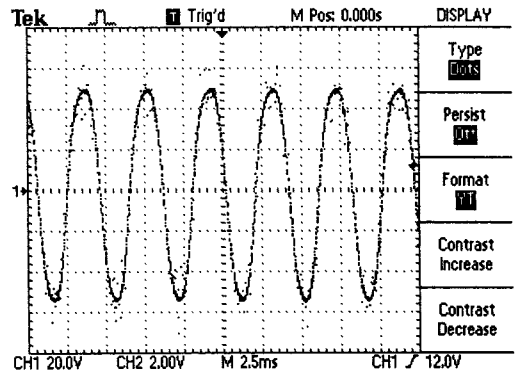


그림 4. Back-EMF wave form with 15,000rpm

또한 모터의 치에 설치된 서치코일을 이용해 공극자속 밀도를 예측하여 각상에서 유기 되는 전압을 추정할 수 있다. 서치코일은 치에 직경 0.35mm의 코일을 5턴을 감아놓았으며, 모터 회전에 따른 서치코일에 유기되는 전압을 표 1에 측정하였다.

표 1 서치 코일에 의한 유기전압(실효치)측정 결과

RPM	2,000	8,000	10,000	12,000	14,000	16,000
유기전압	0.119	0.466	0.580	0.696	0.813	0.931
RPM	18,000	20,000	22,000	24,000	26,000	
유기전압	1.051	1.170	1.292	1.415	1.535	

[참고 문헌]

서치 코일에서 측정되는 실효전압은 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$E_{rms} = 4.44fN\phi_m \quad (2)$$

여기서,  $f = rpm/60$ ,  $N$  = 서치코일 턴수,  $\phi_m$  = 최대 자속이다. 식(2)를 이용해 측정 유기기전력과 회전속도에 따라 치 자속밀도의 최대값을 계산한 결과 1.43~1.47[T]가 산출되었다. 유한요소해석에 의해 얻은 1.44[T]와 거의 유사함을 알 수 있었다.

이렇게 세 가지 과정을 통해 얻은 속도에 따른 유기기전력을 그림 5.에 비교하여 나타내었으며, 그에 해당하는 역기전력 상수를 산출하였다.

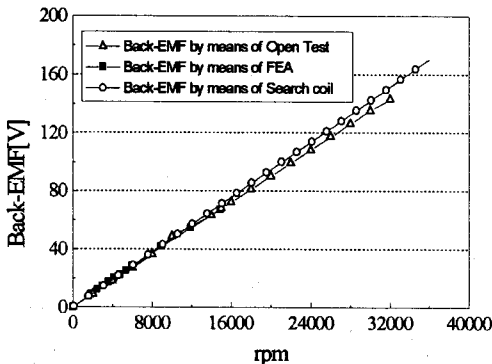


그림 5. Comparison Back-EMF

역기전력 상수의 정의는 다음과 같다.[5]

$$k_e = \hat{e}_{LL}/\omega_m \quad (3)$$

식(3)을 이용해 세가지 방법으로 구한 속도별 back-EMF로부터  $k_e$ 를 구하면 각각 표2와 같은 값을 얻는다.

표 2 역기전력 상수

	Open Test	FEA	Search Coil
$k_e$ [V-s/rad]	0.0606	0.06058	0.06393

4. 결론

본 논문에서는 3상, 정격 속도50000rpm인 영구자석형 브러시리스 고속동기모터를 설계 제작하여, 여러 가지 모터특성을 알아보았다.

2D 유한요소해석과 특성시험을 통해 공극 자속밀도 분포와 back-EMF등 모터특성을 알아보았으며, 서치코일을 이용해 치자속밀도와 공극자속밀도를 예측하여 유한요소해석에 의한 값과 서로 비교해보았다.

앞으로는 부하시험과 모터의 특성을 나타내는 토크/속도특성을 실험과 유한요소해석을 이용해 알아보려고 하며, 마지막으로 전류에 따른 토크특성을 측정하여 모터의 특성을 나타내는 토크상수를 구해야 한다.

- [1] K. Ng, Z.Q.Zhu, and D. Howe, IEEE Inter-mag '96, Seattle, Paper No. HD-1, April, 1996
- [2] Isao Takahashi, Takehisa Koganezawa, Gujia Su, "A super high speed PM motor drive system by a quasi-current source inverter.", IEEE Trans., Ind. Appl., vol 30, NO.3, 1994
- [3] H. Obaraki, K. Tawara, T. Endo, Takahashi, H. Toyoshima, and Ishii, "Characteristics evaluation of a high speed brush-less motor", Rec. JIEE Conf. Rotary Machine, June 1991, RM-91-23.
- [4] Z.Q. Zhu, K.Ng, and D. Howe, "Design and analysis of high-speed brushless permanent magnet motors", Eight International Conference of Electrical Machines and Drives, 1-3 September 1997
- [5] J.R. Hendershot Jr., TJE Miller, "Design of Brushless Permanent-Magnet Motors"

본 연구 결과의 일부는 통상산업부(에너지 관리공단) R&D 본부의 에너지 절약기술개발 사업연구비 지원에 의하여 수행된 연구결과이며, R&D 보고서 97-E-ID-02-P-12의 일부이다.

부록. Design Parameter & Result

Item	Value
Power	4.3[kW]
Rated Speed	50,000[rpm]
Input Voltage	220[V]
Num. of Phase	3
Num. of Pole	2
Maximum current density	4[A/mm <sup>2</sup> ]
Winding	Concentric Winding
Connection	Y-Connection
Num. of Turn for Phase	60
Resistance per phase	0.192Ω
Inductance per phase	553 μH
Permanent Magnet (NdFeB)	B <sub>r</sub> = 1.1[T] H <sub>c</sub> = 10,400[Oe]

Item	Value	
Stator	Outside Diameter	96[mm]
	Inside Diameter	50[mm]
Rotor	Outside Diameter	47[mm]
	Inside Diameter	23.15[mm]
Air-Gap		1.5[mm]
Shaft Diameter		23.15[mm]
Slot	Depth	15[mm]
	Opening	2.7[mm]
Tooth width,		2.6[mm]
FRP Thickness		2[mm]