

BLDC모터의 회전자 형상변화에 의한 특성해석

한 문규* 황상연
(주)효성 중공업 연구소

Characteristic Analysis of BLDC Motor considering various rotor shapes

Moon-Kyu Han Sang-Yeon Hwang
Industries R & D Institute, Hyosung Corporation

Abstract

The rotor of the BLDC motor has permanent magnets on its surface, and is alike the structure of the rotor of synchronous motors. when designing the BLDC motor which has a limited volume in a specific environment, it is important to consider the geometry of the rotor and the length of the airgap.

This paper describes a design procedure by analyzing the induced voltage and cogging torque with changing the width of magnets and length of the airgap.

And we made a prototype of BLDC motor with this design procedure, and our experiment result shows that the cogging torque can be reduced significantly. Also we find a good agreement between the result of experiment and simulation values using Finite Element Analysis.

1. 서 론

BLDC모터는 회전자축에 영구자석이 부착되어 자석에 의하여 여자를 수행하는 동기전동기의 일종이며, 브러시가 없어 보수성이 우수하고 소음이 적어 고속회전시 유용한 특징을 지닌다.

일반적으로 구동시스템에 들어가는 BLDC 모터를 설계하려면 외형의 크기에 제약이 있으므로, 고정자의 형상은 용량, 토오크, 극수가 정해지면 구조변경에 한계가 있다.

따라서, 구동시스템의 요구특성을 만족하는 BLDC 모터를 설계하기 위하여 본 논문에서는 고정자는 일반적인 사양을 적용하고, 회전자의 형상을 조정하면서 그때의 특성이 어떻게 나타나는 지를 알아보았다. 영구자석은 온도특성이 우수한 SmCo계 자석을 사용하였다.

BLDC 모터는 일반적으로 120° 통전방식을 적용하고 유기전압 파형이 사다리꼴 파형에 근접하도록 설계하는 것이 보통이나, 여기서는 모터의 회전속도가 고속인 점을 감안하여 소음 및 토오크리플을 최소화하는 데 가장 큰 영향을 미치는 코깅토오크의 크기를 줄이는 데 주안점을 두었다. 이를 토대로 시제품을 제작, 시험결과와 비교하여 해석결과의 타당성을 입증하였다.

2. 모터 특성해석

2.1 해석모델

당사에서 설계한 BLDC모터의 사양을 표2.1에 나타내었다. 철심재료는 고속회전시의 철손을 줄이기 위하여 H14를 사용하고, 코일은 2층중권 및 전철권으로 하였고, 권선방식은 Δ 결선, 영구자석의 착자방향은 평행차사이다.

표2.1 시제품 BLDC모터 사양

입력전압 (V_{DC})	28	철심종류	H14
상수	3	철심두께 (mm)	0.35
극수	6	최대회전수 (rpm)	5,800
슬롯수	18	최대토오크(kgf.cm)	8.64
고정자외경(mm)	37.8	최대전류 (A)	18
고정자내경(mm)	19	잔류자속밀도(Tesla)	1.1
Turn/Coil	14	리코일투자율	1.08
철심장(mm)	33	자석두께 (mm)	2.5

BLDC 모터의 해석모델의 형상을 그림 2.1에 나타내었다.

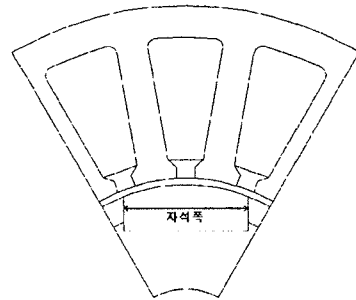


그림 2.1. BLDC모터 해석모델(1극)

해석모델은 6극으로 대칭구조이므로 해석요소수를 절감하기 위하여 1극을 해석하였다.

2.2. 유기전압 정수 계산

모터성능의 지표로서 유기전압을 구한다. 유기전압은 권선의 시간당 쇄교자속의 변화로 구할 수 있다. 즉, 직렬권선의 권수가 N 일 때, 다음식으로 나타내어진다.

$$E = N \frac{d\phi}{dt} = N \frac{d\phi}{d\theta} \cdot \frac{d\theta}{dt} = N\omega \frac{d\phi}{d\theta}$$

여기서, $\omega = d\theta/dt$ 이다.

윗식을 이용하면 유한요소 해석으로 각 회전자 위치에서의 쇄교자속을 구하여 유기전압을 구할 수 있고, 유기전압정수(K_E)는 일정속도에서의 유기전압을 알면 그 비로 구할 수 있다.

2.3. 회전자 형상변화에 의한 모터특성값의 변화

모터의 전체적인 설계는 등가 자기회로법을 이용하여 고정자 형상 및 Turn수를 결정하고, 회전자 형상은 유한요소 해석기법을 이용하여 공극 및 자석폭을 선정하였다.

모터 구동용 제어반의 입력전압이 DC 28V이므로, 무부하시 모터의 회전수가 5,800 rpm이 되도록 설계하려면, 유기전압정수는 4.8 mV/rpm 선에서 결정되어야 한다. 영구자석의 잔류자속 밀도는 1.1 Tesla이므로, 자석중심부의 두께를 2.5mm로 유지하면서, 여기서는 자석폭 및 공극을 변경하면서 Flat-Top부의 유기전압을 해석하고 그 평균값을 그림 2.2에 나타내었다.

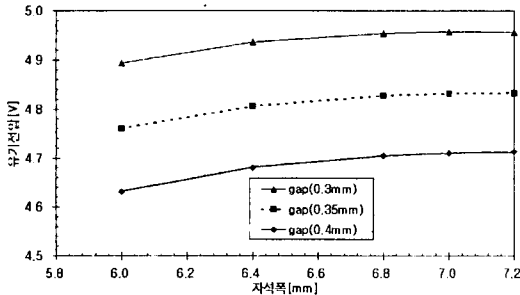


그림 2.2 공극 및 자석폭 변경에 의한 Flat-Top부의 유기전압 해석결과(1000 rpm)

그림 2.3은 자석폭 및 공극의 변경에 의한 코깅토포크의 변화추이를 나타낸 것이다.

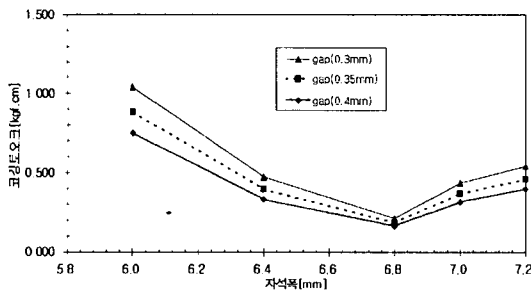


그림 2.3 공극 및 자석폭 변경에 의한 코깅토포크의 변화

위의 해석결과를 요약 정리하면 다음과 같다.

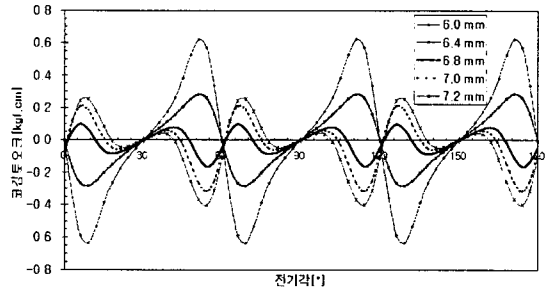
- (1) 공극이 증가하면 자기저항의 크기가 증가하여 유효자속량이 적어지므로 일정속도에서의 유기전압은 감소한다. 따라서, 유기전압 정수도 감소한다. 그림 2.2를 보면 1000rpm에서 공극이 0.35mm 일 때 유기전압이 4.8V에 근접하여 설계값으로 가장 적합함을 알 수 있다.
- (2) 자석의 폭이 증가하면 유효자속량이 증가하므로 일정속도에서의 유기전압은 증가한다. 하지만, 자석폭의 증가에 따라 극간격이 좁아져 자체 누설자속량의 증가로 어느정도 이상에서는 유기전압이 더 이상 증가하지 않음을 알 수 있다.
- (3) 코깅토포크는 계자자석과 전기자 구조사이의 상호 작용으로 공극에 쌓인 자기에너지가 회전자의 이동과 함께 생기는 것으로, 공극이 증가하면 자속량의 감소만큼 줄어든다. 그런데, 코깅토포크에 가장 큰 영향을 미치는 것은 자기저항의 변화요인이 큰 자석폭과 슬롯에 주로 있기 때문에, 그림 2.3의 경우와 같이 자석폭이 6.8 mm 일 때 코깅토포크가 가장

적음을 알 수 있으며, 그 이상으로 하면 다시 증가하게 된다.

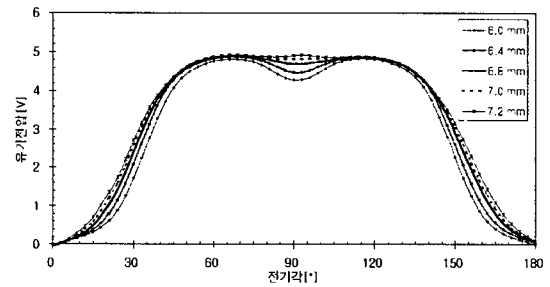
위의 요약결과를 토대로 공극이 0.35mm 일 경우와 자석폭이 6.8mm일 경우, 요구하는 설계값으로 가장 적합함을 알 수 있다. 그림 2.4는 공극이 0.35 mm 일 때, 자석폭에 의한 코깅토포크 및 유기전압 파형의 변화를 나타낸 것이다.

그림 2.4(a)에서는 자석폭이 6.0mm에서 6.8mm까지는 리플수가 증가하면서 코깅토포크는 감소하고, 그 이상이 되면 리플수가 감소하면서 코깅토포크가 다시 증가하는 경향을 보여주고 있다.

그림 2.4(b)에서는 자석폭이 6.0일 때 유기전압파형의 중심부가 가장 오목하고, 7.0mm에서 사다리꼴 파형에 가장 근접하며, 그 이상이 되면 다시 볼록해지는 것을 알 수 있다.



(a) 코깅토포크파형 (gap: 0.35mm)

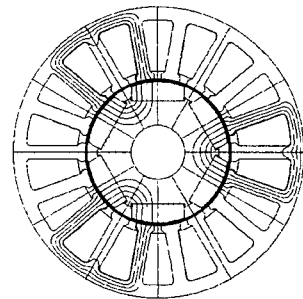


(b) 유기전압 파형 (gap: 0.35mm)

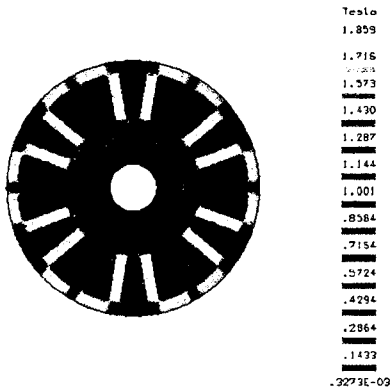
그림 2.4 코깅토포크 및 유기전압 파형 해석결과

2.4. 자속 및 자속밀도 분포

위의 해석결과를 토대로 공극이 0.35mm, 자석폭이 6.8mm일 때의 d축 자속 및 자속밀도 분포를 그림 2.5에 나타내었다.



(a) 자속분포



(b) 자속밀도 분포

그림 2.5 d축 자속 및 자속밀도 분포

그림 2.5(b)를 살펴보면 Teeth와 Yoke부에서의 평균 자속밀도는 1.72 Tesla 이고, Teeth 끝단부의 자속밀도는 1.86 Tesla 임을 알 수 있다.

3. 시제품 제작

앞에서 기술한 바와 같이 주어진 설계조건을 만족하는 회전자 자석폭 및 공극의 크기는 각각 6.8mm 및 0.35mm 임을 알 수 있다. 이 사양을 가지고 시제품을 설계/제작하여 시험한 결과를 아래에 수록하였다.

3.1. 유기전압 측정

표 3.1은 1000, 2000, 3000 rpm으로 모터를 회전시켰을 때 발생하는 유기전압의 평균값 및 Peak값을 해석값과 비교한 것이다.

표 3.1을 보면 유기전압 평균값은 오차가 4%이내이고 Peak값은 2%이내의 오차로 양호한 값을 알 수 있다.

표 3.1 유기전압의 해석값과 시험값 비교

항 목		rpm		
		1000	2000	3000
유기전압 (Vrms)	해석값	3.71	7.42	11.13
	측정값	3.61	7.16	10.74
	오차(%)	2.8	3.6	3.6
유기전압 (Vpeak)	해석값	4.83	9.65	14.48
	측정값	4.80	9.53	14.28
	오차(%)	0.6	1.3	1.4

그림 3.1은 3,000 rpm에서의 유기전압 파형을 나타낸 것이다. 앞의 해석결과와 유사한 모양을 나타내고 있음을 알 수 있다.

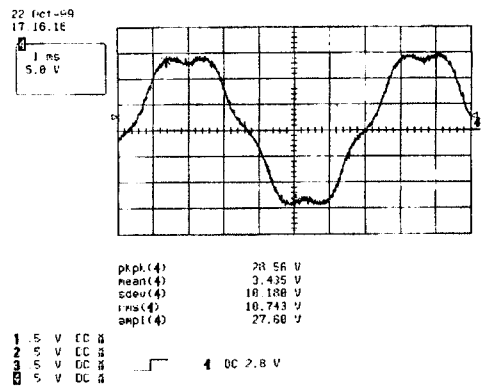


그림 3.1 유기전압 파형(3000 rpm)

3.2 코깅토크 측정

표 3.2는 당사가 보유하고 있는 코깅토크 시험기로서 시제품의 코깅토크를 5회 측정하여 그 평균값을 해석값과 비교한 것이다.

표 3.2 코깅토크 해석값과 시험값 비교

코깅 토크	측정값[$gf \cdot cm$]					평균	해석값 [$gf \cdot cm$]	오차 (%)
	1회	2회	3회	4회	5회			
	192	195	193	193	196	194	185	4.8

표 3.2를 보면 해석값과 측정값이 5%이내의 오차로 양호함을 보여준다.

4. 결 론

본 논문에서는 구동시스템의 요구특성을 만족하며 외형의 크기에 제약이 따르는 BLDC모터의 회전자 형상 설계를 유한요소 해석기법으로 수행하였다.

특히, 소음 및 토크 리플을 최소화하는 데 가장 큰 영향을 미치는 코깅토크의 감소를 목적으로 자석폭을 변경하면서 특성을 해석하고, 최적 회전자 형상을 결정하였다. 이를 토대로 시제품을 설계/제작하여 시험한 결과 해석값과 유사한 결과를 얻을 수 있었다. 향후 본 해석기법을 토대로 속도정밀도가 높고 고속회전에 적합한 BLDC모터의 개발을 수행하는 데 적극 활용할 계획이다.

(참 고 문 헌)

- 1) 星野, 森本, 松井, "埋込磁石構造PMモータの回転子の設計", 回転機研究会, RM 99-118~129, 1999.
- 2) 三井, 森田, "FEMによる埋込磁石形同期電動機の特성解析", 回転機研究会, RM 98-159, 1998.
- 3) J.R. Hendershot Jr, TJE Miller, "Design of Brushless Permanent Magnet Motors", 1994.