

코깅토크 저감을 위한 Spoke Type BLDC 전동기의 새로운 극 형상 설계

황규운\*, 이상봉\*, 양병렬\*\*, 권병일\*  
 \*한양대학교, \*\*삼성전자

New Design of Rotor Pole Shape in Spoke type of BLDC Motor  
 to Reduce Cogging Torque

Kyu Yun Hwang\*, Sang Bong Rhee\*, Byoung Yull Yang\*\*, Byung Il Kwon\*  
 \*Hanyang University, \*\*Samsung Electronics

**Abstract** - This paper proposes a design method by varying rotor pole shape to reduce cogging torque, torque ripple and harmonics of back emf in Spoke type brushless DC(BLDC) motor. In the process of design and analysis, Response surface method(RSM) and finite-element method(FEM) are employed to get the rotor geometry and verify the results of new pole shape.

1. 서 론

영구자석 brushless DC(BLDC) 전동기는 고효율, 고효율, 높은 토크밀도, 적은 유지비용의 장점으로 넓은 응용 분야에 적용되고 있다. 특히 Spoke type BLDC 전동기는, 영구자석이 회전자 자극의 양쪽에 분할, 세로로 배치되어 자극을 형성하는 구조를 갖고 있어 자속이 집중되는 구조를 갖으며, 높은 돌극비로 인해 큰 릴럭턴스 토크를 낼 수 있어 단위체적당 높은 토크밀도를 갖는다. 그러나 Spoke type BLDC 전동기는 영구자석 끝단부에 인접하는 고정자치가 각각 다른 극을 형성하므로 그 부분에 자속이 집중되고, 그로 인한 포화 때문에 자기저항 불평형이 심해져 공극자속밀도 분포파형에 심한 왜곡을 갖는다. 이것은 코깅토크 및 토크리플을 증가시키는 요인이 되고 있다.

이와 같은 공극의 자속분포파형에 의해 생기는 코깅토크 및 토크리플을 저감시키기 위한 회전자 설계법들이 연구되어져 왔다. 코깅토크의 저감을 위해 고정자 teeth의 평형, 불평형 공극의 조합을 갖는 새로운 구조를 설계하는 방법과, 토크리플 저감을 위해 전자기 반작용을 보상하는 eccentric pole 설계법이 제안되어졌다[1-2].

본 논문은 Spoke type BLDC 전동기에서 생기는 공극자속밀도 분포파형의 왜곡을 고려하여, 좀 더 효율적인 코깅토크 및 토크리플 저감을 위해 불평형 공극길이를 갖는 회전자의 형상을 제안하였다. 또한 분포권형태를 갖는 Spoke type BLDC 전동기의 정현적인 공극자속 분포를 갖도록 평형 및 불평형 조합을 갖는 양방향 운전을 위한 3상 Spoke type BLDC 전동기의 회전자 표면형상을 RSM(Response Surface Method)을 이용하여 설계하였고, 좀 더 효율적인 변수들의 범위를 정하기 위해 2<sup>요인</sup> 배치법을 적용하였다[3]. 본 논문에서 제안한 방법의 설계결과는 2D FEM을 통해 코깅토크 및 평균토크, 역기전력 파형을 해석하고 비교함으로써 본 논문에서 설계한 방법의 타당성을 증명하였다.

파형에 가깝게 만들어 주기 위해 d축 회전자의 arc형상을 변화시킨다. 이를 위해 전동기의 d축 영역을 3부분으로 나누어 양끝의 두 부분은 eccentric한 표면을 갖도록 하고, 가운데는 uniform한 표면을 갖도록 하여, 적당한 자속이 uniform한 표면에 집중되도록 하면서 정현적인 파형에 가까운 공극자속파형을 만든다.

그림 1(a)에서는 초기모델의 회전자 형상을 나타내며, 그림 1(b)에서는 회전자의 eccentric한 표면을 그림 2에서 나타내어진 방법으로 반지름의 길이가 L인 원이 회전자와 동일한 중심(0,0)으로부터 이동거리, 이동각도(r, theta)만큼 변할 때 Part I을 얻고, 중심이동으로부터 이동거리, 이동각도(r, theta) 2만큼 변할 때, part III을 얻는다. 마지막으로 part II는 중심이동을 하지 않은, 즉 그림 1(b)에서 전기각 180도 중 uniform한 표면을 갖는 부분을 의미한다. 이러한 회전자 중심 이동에 따라 회전자의 eccentric한 표면은 원의 이동으로부터 얻어진 것이기 때문에 1/L인 곡률 값을 갖으며, 자석의 끝단부가 R만큼의 공극을 갖는 회전자 형상을 얻는다. 이러한 형상은 기본모델보다 정현적인 파형에 가까운 공극자속밀도 분포를 갖는다는 것을 예측할 수 있다.

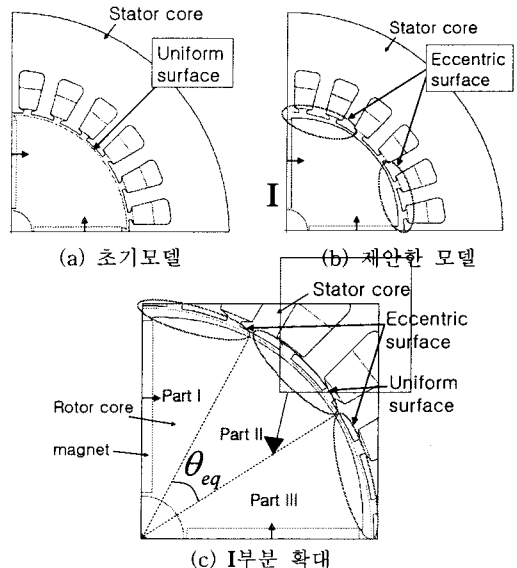


그림 1 Spoke BLDC 전동기 초기모델과 제안한 모델

2. 전동기 회전자의 극형상 설계

2.1 극형상 설계방법

Spoke type BLDC 전동기의 코깅토크를 효율적으로 저감시키기 위해 한 극에서의 공극자속파형을 정현적인

2.2 최적화 설계 변수설정 및 제한조건

길이가 L인 원의 중심이동에 따라 생기는 회전자의 eccentric한 표면은 그림 2와 같으며, 전체적인 회전자 형상은 그림 3에서 보여준다. 이 형상에서는 eccentric한

표면에서의 자속이 uniform한 표면으로 서서히 집중되어 정현적인 공극자속분포 및 smooth한 킬러턴스 변화를 갖는다는 것을 예측할 수 있다. 이러한 장점을 갖는 회전자 형상을 최적설계하기 위해 RSM을 적용한다. 이에 앞서 반응값과 설계변수를 결정해야 하는데, 반응값은 영구자석에 의한 자속과 킬러턴스변화량에 크게 영향을 받는 코깅토크로 정하고, 이 반응값에 영향을 미치는 요소로써 그림 3에 나타내어진 A, B, C를 설계변수로 선정한다.

그림 3에서 전기각 180도 중 uniform한 표면을 갖는 부분을 의미하는 설계변수 A는 그 크기가 매우 작으면 영구자석에 의한 자속이 eccentric한 표면보다 자료가 짧은 이 표면으로 집중되어 포화가 일어나 유효자속의 저감을 가져올 수 있기 때문에 이들을 고려해 설계변수 A는 27[°] 이상의 값을 갖도록 제한한다. 그리고 eccentric한 표면의 휨 정도를 나타내는 설계변수 B는 회전자 중심(0,0)으로부터 중심이동한 반지름의 길이가 L인 원의 곡률을 의미하며, 이때의 곡률 값은 1/L이 된다. 설계변수 B를 곡률 값으로 설정하기에는 그 값이 매우 작아 비교적 큰 값을 갖도록 이동시킨 원의 곡률반경을 의미하는 L값으로 정하였다. 또한 설계변수 A, C의 모든 제한범위 안에서 이 곡률반경 값들을 적용시킬 수 있도록 이를 고려한 적당한 범위로 표2와 같이 정하였다. 설계변수 C는 자석 끝단의 공극길이를 나타내며 고속회전시 자석의 이탈을 막아주는 부분의 기계적 강성 등을 고려해서 설계변수 C는 1.68[mm] 이하로 제한한다. 이러한 제약조건들을 고려한 설계변수들의 범위와 목적함수인 코깅토크에 미치는 영향을 2<sup>3</sup>요인배치법을 이용하여 나타내었고, 그림 4와 그림 5에서 알 수 있듯이 설계변수 A와 B는 교호작용으로 인하여 주 효과관을 고려하기 어렵다고 판단되므로, 변수의 범위는 간단한 요인배치법을 통해서 얻어진 데이터를 이용해 정하였다. 설계변수 C 역시 교호작용이 존재 하지만, 교호작용만을 고려해 얻은 최소값과 주효과만을 고려해 얻은 최소값이 모두 1.68[mm]에서 만족하므로, 설계변수 C는 이 근처의 값으로 설계범위를 정하였다.

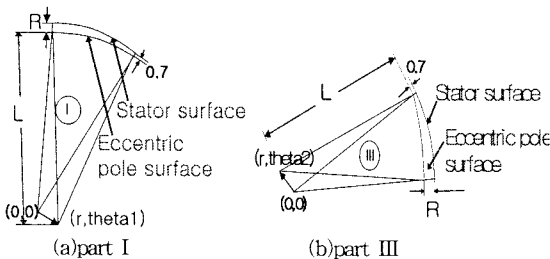


그림 2 중심이동에 따른 Spoke형 BLDC 전동기의 형상변화

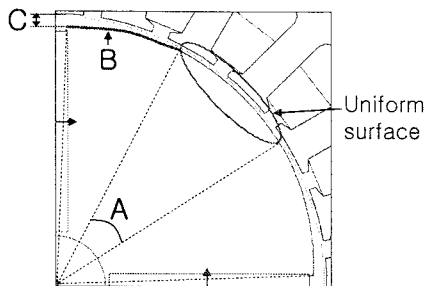


그림 3 볼평형 공극 Spoke형 BLDC 전동기의 설계변수

표 1 기본 모델 사양

구분	제원
정격 출력 [W]	250
정격 속도 [rpm]	3000
극수/ 슬롯수 [poles]/[slots]	4극/24슬롯
공극 길이	0.7[mm]
권선 방식	분포권
영구자석 잔류자속밀도 [T]	1.1

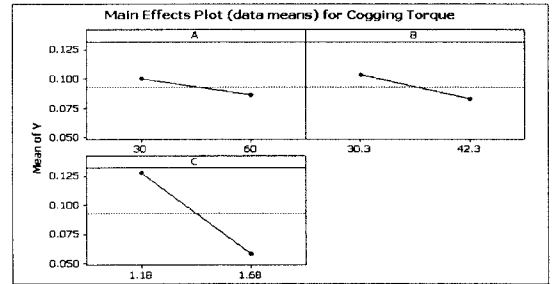


그림 4 각 설계변수의 주효과

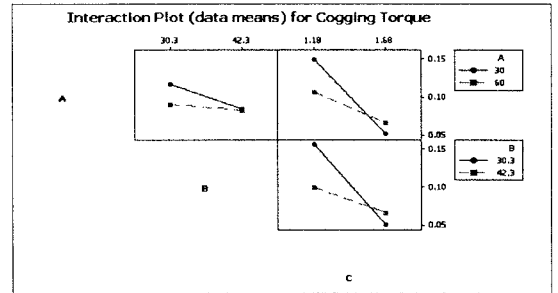


그림 5 각 설계변수의 교호작용 효과

표 2 설계영역

설계 변수	설계변수의 레벨				
	-2	-1	0	1	2
A	27	36	45	54	63
B	28.3	32.3	36.3	40.3	44.3
C	1.73	1.68	1.63	1.58	1.53

### 2.3 반응표면방법론(RSM)

반응표면방법론의 주요 과정은 식(1), (2), (3)에서 표현되어지며, 식(1)은 설계변수와 반응변수와의 간단한 관계식을 보여준다.

$$y = f(A, B, C; x_1, x_2, x_3) + error \quad (1)$$

여기에서,  $x_1, x_2, x_3$ 는 설계변수 A, B, C를 의미한다. 중심합성계획법을 통해 얻은 결과를 바탕으로 코깅토크를 나타내는 2차 근사다항식은 식(2)와 같다.

$$f(x_1, x_2, x_3) = b_0 + \sum_{k=1}^3 \sum_{j=1}^3 b_{kj} x_k x_j + \sum_{k=1}^3 b_{kk} x_k^2 \quad (2)$$

여기에서  $b_k, b_{kj}, b_{kk}$ 는 실험값으로부터 회귀방정식의 회귀계수를 의미한다. 중심합성계획법으로 구한 회귀방정식의 정도(precision)가 어느 정도 좋은가를 보기 위하여 식(3)에서 보여주는 결정계수  $R^2$  식을 이용하여 다항식이 얼마만큼의 정확성을 갖는지를 분석한다.

$$R^2 = \frac{SSR}{SST} \quad (3)$$

여기서, SSR과 SST는 다음과 같다.

$$SST = \sum_{v=1}^N (Y_v - \bar{Y})^2 \quad SSR = \sum_{v=1}^N (\hat{Y}_v - \bar{Y})^2 \quad (4)$$

여기서  $N$ 은 중심합성계획법의 총 실험 횟수,  $Y$ 는 실제 반응값,  $\bar{Y}$ 는 실제 반응값들의 평균,  $\hat{Y}$ 는 회귀방정식에 의한 반응값을 나타낸다.

## 2.4 해석 결과

논문에서 제안한 변수와 코깅토크의 관계를 나타낸 2차 근사 다항식은 식(5)와 같이 얻을 수 있었다.

$$Y = 0.150663 + 0.014287x_1 + 0.005500x_2 + 0.003750x_3 + 0.008150x_1x_2 - 0.00265x_1x_3 - 0.00005x_2x_3 - 0.018392x_1^2 - 0.000179x_2^2 + 0.001771x_3^2 \quad (5)$$

결정계수  $R^2$ 의 값이 0.7이상이면 모형의 적합은 대체로 적절하다고 판단하는데 여기에서  $R^2=0.7915$  이므로 위 회귀방정식의 적용이 적절하다는 것을 확인할 수 있었다. 또한 반응표면방법론으로부터 표 3과 그림 6과 같은 결과를 얻었으며, 이는 초기모델과 제안한 모형의 각 특성값들과, 위의 회귀방정식을 이용한 설계변수들의 변화에 따른 반응표면의 변화 양상을 보여준다. 두 개의 설계변수 변화에 따른 반응표면을 보기 위해 설계변수  $x_1$  값을 최적화 결과값으로 고정시키거나, 또는  $x_2, x_3$  값을 고정시켜 각각의 반응값들을 나타내었다.

$A = 27[^\circ]$ ,  $B = 43.9[mm]$ ,  $C = 1.73[mm]$ 일 때 [즉, 곡률반경이 43.9[mm]인 원이 회전자의 중심(0,0)으로부터 (11.63[mm], 93.44[^\circ]), (11.63[mm], 176.55[^\circ])만큼 이동한 위치에서의 형상] 표 3에서 보여주듯이 초기모델에 비해 코깅토크는 85[%]이상 감소하였고, 평균토크는 21[%] 증가하였다. 또한 최적화된 형상에서는 앞에서 언급한 영구자석의 끝 단부 근처에서 일어나는 포화 및 손실의 효율적인 저감과, 평균토크의 증가로 인하여 효율이 1.59[%] 증가하는 결과를 얻었다. 또한 그림 7과 그림 8은 한 극에서의 공극자속밀도파형과 역기전력분포파형을 나타내며 이를 통해 제안한 모델이 초기모델에 비해 보다 정현적인 공극자속밀도 파형을 갖으며, 역기전력분포파형의 고조파 성분도 저감된다는 것을 확인하였고, 그림 9과 그림 10에서는 초기모델과 제안한 모델의 코깅토크 및 토크리플 파형을 보여준다.

표 3 최적화 해석 결과

	$A[^\circ]$	$B[mm]$	$C[mm]$	$T_{cogging}$	$T_{avg}$	효율(%)
초기모델	87.59	33.3	0.7	0.4545	0.9	73.55
제안모델	27	43.9	1.73	0.0637	1.09	75.14

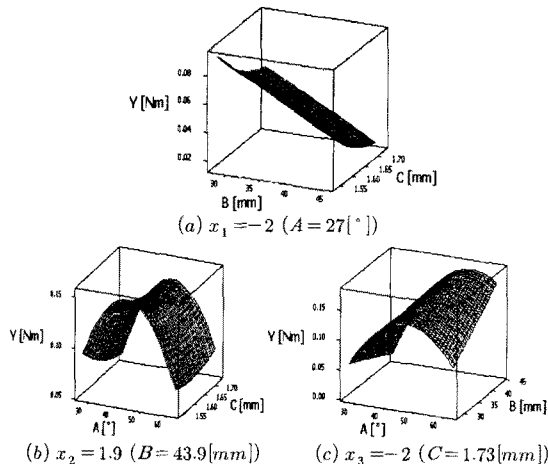


그림 6 코깅토크의 peak-to-peak 값에 대한 반응표면

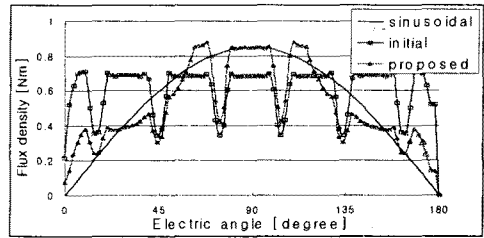


그림 7 공극자속밀도 파형 비교

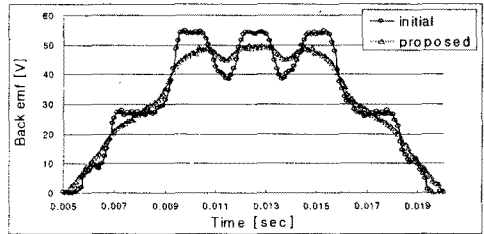


그림 8 역기전력분포 파형 비교

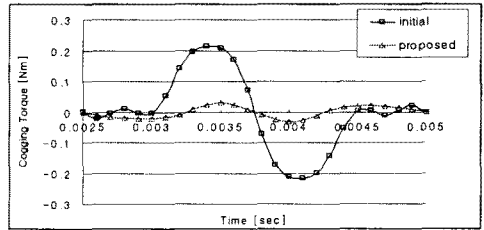


그림 9 코깅토크 파형 비교

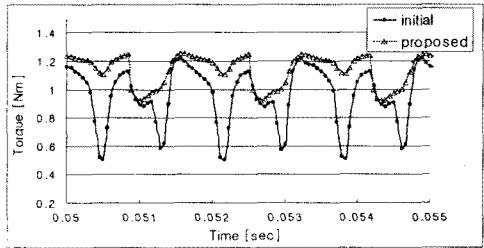


그림 10 토크리플 파형 비교

## 3. 결 론

본 논문에서는 양방향 운전용 3상 Spoke type BLDC 전동기의 코깅토크와 토크리플, 그리고 역기전력 고조파 성분의 저감을 위해 새로운 회전자의 형상을 제안하였다. smooth한 릴럭턴스 변화량을 갖는 eccentric한 회전자표면을 포함시켜 공극자속밀도 분포를 보다 정현파에 가깝도록 만들었다. RSM을 이용해 최적화된 변수값들에 의한 코깅토크 및 상역기전력의 고조파성분이 초기모델에 비해 크게 저감된다는 것을 2D FEM을 통해서 확인하였다.

### [참 고 문 헌]

- [1] B.I Kwon, B. Y Yang, S. C Park, Y. S Jin, "Novel topology of unequal air gap in a single-phase brushless DC motor", IEEE Trans. on Magnetics, Vol.37, No.2, pp. 3723-3726, Sept. 2001.
- [2] P. Zheng, Y. Liu, T. Wang, S. Cheng "Pole Optimization of Brushless DC Motor" Annual Meeting. Conference Record of 39th IAS Volume 2, 3-7, pp1062-1067 Oct. 2004
- [3] 박성현, "현대실용계획법", 민영사