

## 공간 고조파 해석 기법을 이용한 로봇용 소형 Slotless BLDC Motor 설계

김홍석, 김성진, 강규홍

(주) 모터넷 인터내셔널

### Design of small slotless BLDC motor for robot using Space Harmonic Analysis Method

Hong-Seok Kim, Sung-Jin Kim, Gyu-Hong Kang

Motor-Net International CO.,LTD

**Abstract** - This paper presents a design strategy of Slotless type BLDC motor using the space harmonic field method. The distribution of Back emf and torque are considered by movement of the Permanent Magnet and armature current. The result of magnetic field distribution, back-emf, and torque are in agreement with FEM.

### 1. 서 론

최근 산업계 및 가정에서 여러 가지 형태의 로봇의 개발 및 제품화가 이루어지고 있다. 특히 인간형 로봇이나 공작기계 로봇의 손목이나 손가락 등에 이용되는 소형모터는 반복정밀도와 빠른 응답속도가 요구되는 모터로서 저 코깅토크(Cogging torque), 저 관성이 요구되어지고 있다. 기존의 슬롯형 BLDC 전동기는 영구자석과 슬롯의 영향으로 코깅토크가 발생하여 로봇용 정밀 소형 모터로의 성능을 만족시키지 못하고 있다. 그러나, 슬롯리스형 BLDC 전동기는 제어성능에 악영향을 주는 코깅토크를 근본적으로 가지고 있지 않기 때문에 정밀 제어 성능을 만족 시킨다.

슬롯리스형 BLDC 전동기는 전기자에 있어서 치-슬롯 구조를 가지지 않고 있기 때문에 큰 자기적 공극을 갖는다. 큰 자기적 공극으로 인해 포화현상이 없고, 구조가 간단하므로 주기적으로 분포하고 있는 전류 및 영구자석의 자화분포를 푸리에 급수(Fourier series)로 전개하여 해석하는 공간고조파법(space harmonic field method)과 같은 해석적 방법(analytic method)으로도 유한요소법(Finite Element Method : FEM)과 오차가 거의 없는 정확한 결과를 보다 빨리 얻을 수 있다.

따라서, 본 논문에서는 공간고조파법을 이용한 해석적인 방법으로 로봇용 소형 슬롯리스 BLDC 전동기를 설계 하였으며, 또한 자계 및 특성해석결과를 유한요소법을 통하여 비교 분석 하였다.

### 2. 공간고조파 해석

공간고조파법으로부터 자계해석을 위하여 다음과 같은 가정을 두었으며, 원형의 전동기 구조를 그림 1과 같이 선형의 구조로 가정하여 해석하였다[1].

- ① 해석 영역은 x, z방향으로 무한히 길다.
- ② 영구자석 및 전기자 전류에 의한 자화 분포는 y방향으로 자화되어 있으며, x, z방향으로 주기적으로 분포해 있다.
- ③ 철심의 투자율은 무한대이다.
- ④ 해석 영역의 재질 분포는 x, z방향으로 변화가 없다.

공간고조파법을 이용하여 공극 자속밀도 특성은 영구자석만 존재할 때의 공극 자속과 전기자 전류만 여자하였

을 때의 공극 자속을 각각 계산하여 중첩하여 해석하였다. 해석 결과로부터 산정된 공극 자속밀도를 이용하여 슬롯리스 BLDC 전동기의 특성 해석을 수행하였다.

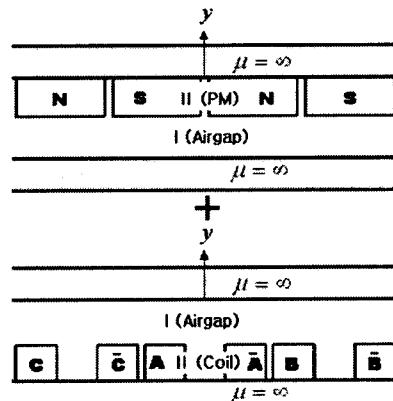


그림 1 해석 모델의 측면도

#### 2.1 공극영역 공간고조파 자계 해석

그림 1의 해석 모델의 일반해는 각각의 분활된 해석 영역에서 자기스칼라포텐셜  $\phi$ 를 계변수로 하는 맥스웰 방정식을 이용하여 미분방정식 형태의 지배방정식을 유도하고 이에 대하여 각 영역의 경계에서 경계조건을 적용함으로써 구할 수 있다.

공극 자속밀도는 영구자석과 코일 전류에 의한 자화분포(magnetization distribution)를 이용하여 계산하였으며, 각 영역의 지배방정식은 식 (1), (2)와 같다[2].

$$\nabla^2 \phi_I(x, y) = 0 \quad (\text{공기: I 영역}) \quad (1)$$

$$\nabla^2 \phi_{II}(x, y) = \frac{\nabla \cdot \vec{M}}{\mu_r} \quad (\text{PM, Coil: II 영역}) \quad (2)$$

자화벡터의 y축 성분은 다음과 같이 푸리에급수 전개를 이용하여 나타낼 수 있다.

$$M_y = \sum_{n=1}^{\infty} M_n \cos(k_n x), \quad k_n = n \frac{\pi}{\tau} \quad (3)$$

여기서,  $M_n$ 은 푸리에계수,  $\tau$ 는 자극 피치를 의미한다. 그림 1의 영구자석이나 코일에 의한 공기 영역(I)에 발생하는 자속밀도는 다음의 식 (4), (5)와 같다.

$$B_x = \mu_0 \sum_{n=1}^{\infty} \beta_n \sinh(k_n(y-y_2)) \sin(k_n x) \quad (4)$$

$$B_y = -\mu_0 \sum_{n=1}^{\infty} \beta_n k_n \cosh(k_n(y-y_2)) \cos(k_n x) \quad (5)$$

여기서, 계수  $\beta_n$ 는 식 (6)과 같다.

$$\beta_n = \frac{\mu_0 M_n \sinh(k_n y_1)}{\xi_n}$$

$$\xi_n = \mu \cosh(k_n y_1) \sinh(k_n(y_1 - y_2)) - \mu_0 \cosh(k_n(y_1 - y_2)) \sinh(k_n y_1) \quad (6)$$

### 2.1.1 영구자석에 의한 자계 해석

영구자석의 자화성분은  $y$ 방향으로만 자화되어 있기에  $M_y$  성분만 존재한다. 균일하게 자화된 영구자석일 때 푸리에계수는 다음과 같다[3].

$$M_n = \frac{4M_{pm}}{n\pi} \sin(n\alpha_p \frac{\pi}{2}), \quad n = 1, 3, 5, \dots \quad (7)$$

여기서,  $\alpha_p = \omega_p/\tau$ 는 영구자석의 자극 비,  $M_{pm} = B_s/\mu_0$ 은 영구자석의 자화량이다. 이 식의 결과를 식 (4), (5)에 대입하여 영구자석에 의한 공극자속 밀도를 구할 수 있다.

### 2.1.2 코일전류에 의한 자계 해석

전기자 코일에 전류가 흐르면 그 전류로 인하여 자계가 유기된다. 이 자계를 가상의 자화값  $M_{co}$ 로 치환하여, 자화분포를 푸리에 계수로 표현하면 다음과 같다.

$$M_n = \frac{4M_{co}k_n}{n^2 \pi k \omega_c} \sin(nk \frac{d_c + \omega_c}{2}) \sin(nk \frac{\omega_c}{2}) \quad (8)$$

$$n = 1, 2, \dots$$

여기서,  $M_{co} = J \times \omega_c$ 는 자화의 크기,  $J$ 는 전류밀도,  $\omega_c$ 는 코일 폭,  $d_c$ 는 코일 사이의 간격을 의미한다. 전기자 전류에 의한 공극 자속밀도 분포도는 영구자석과 같은 방법으로 구할 수 있다.

### 3. Slotless type BLDC Motor 설계

그림 2는 본 논문에서 설계하고자 하는 슬롯리스형 BLDC 전동기의 기본 구조도이다. 정격출력 150[W], 정격회전수 5000[rpm], 정격 토크는 285.5[mNm]이다. 설계 모델의 목표 사양을 표 1에 나타내었다.

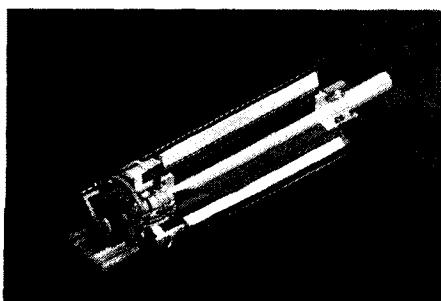


그림 2 슬롯리스형 BLDC 전동기의 기본 구조

표 1 슬롯리스형 BLDC 전동기의 목표사양

항 목	기호	개발목표[단위]
정격출력	W	150 [W]
입력 전압	V	24 [V]
정격 회전수	rpm	5000 [rpm]
정격 토크	mNm	285 [mNm]
외 경	mm	Φ55 [mm]

### 3.1 자기회로 설계

공간고조파법을 이용한 슬롯리스 BLDC 전동기의 설계 과정을 그림 3에 나타내었다. 설계 변수로는 코일 형상, 기자력(MMF)변화, 영구자석 크기이다. 특히 코일 형상 변화는 그림 4와 같이 면적이 일정한 상태에서 코일의 폭과 높이에 변화를 주면서 기자력을 만족하는 최적의 코일의 형상을 설계 하여야 한다.

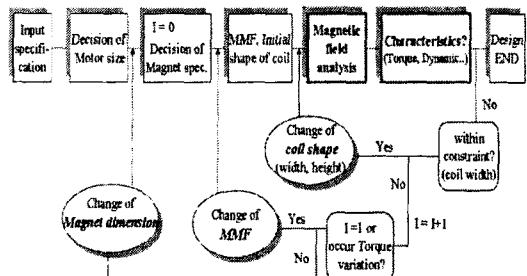


그림 3 슬롯리스형 BLDC 전동기 자기회로 설계 과정

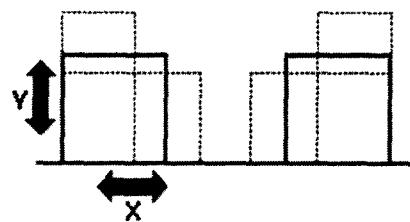


그림 4 코일 형상 변화

### 3.2 구조설계 (Winding)

슬롯리스형 BLDC 전동기의 권선 설계에 있어서 고려해야 할 점은 제작 상의 권선기술이 설계에 반영되어야 한다는 점이다. 권선설계의 핵심은 자기적 공극을 최소화 하면서 권선의 채적 설계가 이루어져 저야하며, 이는 전동기의 제작성도 고려되어야 한다.

본 논문에서는 그림 5와 같이 돌극 집중권의 정렬 권선을 시행하여 설계 하였다.

### 4. 특성해석 결과

영구자석과 전기자 전류에 의한 공극 자속밀도를 구한 후, 두 자속 밀도를 중첩하여 공극에서의 합성 자속밀도를 계산하였다. 공극 자속 분포 특성으로부터 슬롯리스 BLDC 전동기의 역기전력 및 토크 특성을 해석하였다. 그림 6은 공극자속밀도의 해석 결과로써, 공간고조파 해석과 유한요소해석 결과가 거의 일치함을 알 수 있다.

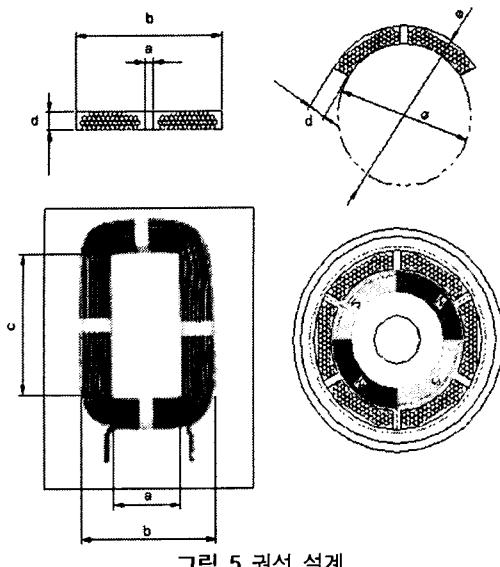


그림 5 권선 설계

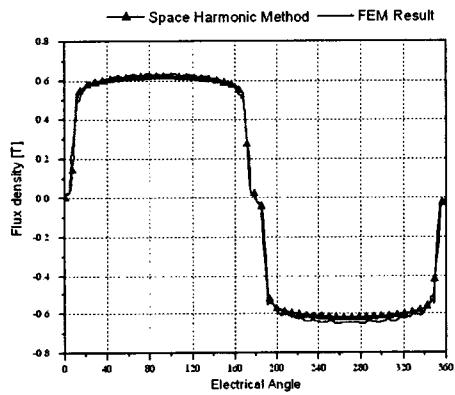


그림 6 회전자 위치변화에 따른 공극 자속밀도 비교

그림 7은 역기전력 과정을 비교하였다. 해석결과 유한요소법보다 공간고조파법이 1.3[V] 정도 작게 나타났다. 그림 8에 정 토크 특성을 나타내었다. 해석 결과 120도 통전구간인 30도~150도 사이의 토크의 평균값이 290[mNm]로 설계 목표 값을 만족한다.

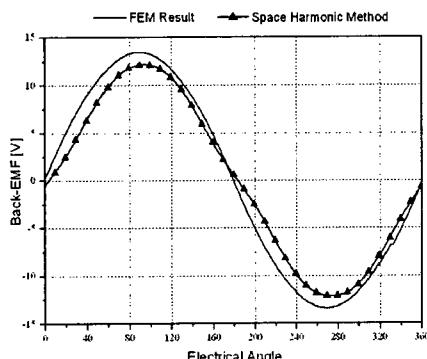


그림 7 회전자 위치변화에 따른 역기전력 비교

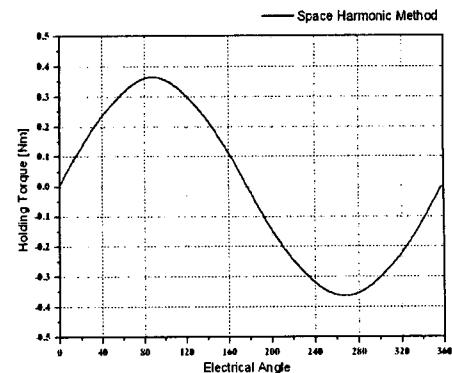


그림 8 정 토크 해석 결과

## 5. 결 론

본 논문에서는 해석적인 방법 공간고조파법을 이용하여 슬롯리스 BLDC 전동기의 특성 해석 및 설계를 수행하였다. 설계 해석 결과 FEM과 비교하였을 때, 거의 차이가 없음을 확인하였다. 향후 슬롯리스 BLDC 전동기의 권선 설계 기술 및 동특성 해석을 수행하여야 할 것이다.

## [참 고 문 헌]

- [1] G. H. Kang, J. P. Hong and G. T. Kim, "Design and Analysis of Slotless type Permanent Magnet Linear Brushless Motor by Using Equivalent Magnetizing Current", *IEEE Transaction on Industry Applications*, Vol. 37, No. 5, pp 1241-1247, Sep/Oct 2001
- [2] 이루민, 강규홍, 홍정표, 김규탁, "3차원 공간고조파법을 이용한 슬롯리스형 영구자석 선형 동기전동기의 자계 및 추력특성 해석", 대한전기학회 논문지, Vol. 50B, No 6, pp. 255-262, 2001
- [3] Z. Q. Zhu, David Howe, Ekkehard Bolte, Bernd Ackermann, "Instantaneous Magnetic Field Distribution in Brushless Permanent Magnet dc Motors, Part I:Open-Circuit Field", *IEEE Transaction on Magnetics*, Vol. 29, No. 1, pp 124-135, Jan 1993