

## 필름코일을 이용한 슬롯리스형 BLDC 모터의 설계

김만중 제환영 김학원 성병호  
(주) 엠베스트

### Design of slotless BLDC motor using film coil

Mhan joong Kim Hwan young Jae Hak won Kim Byung ho Sung  
EMbest Co., LTD

**Abstract** - In this paper, it is object of design of high efficiency slotless BLDC motor using film coil.

Slotless BLDC motor is able to have high efficiency property and low cogging torque, due to magnetization of stator core have constant contribution by slotless core. But it is difficult to make coil winding of slotless BLDC motor. So we make amateur of slotless BLDC motor using film coil. Film coil is fabricated by drilling, electro-plating and etching of copper/insulator/copper plate.

In this paper, after design of slotless BLDC motor for moving axial blower, it is fabricated by NdFeB permanent magnet type rotor and film coil.

%, 잔류자속밀도: 1.2 T, 자석두께 5 mm의 계원을 가지고 있다.

그림 2는 그림 1의 계원인 슬롯형 BLDC모터를 FEM 프로그램으로 자체해석을 실시한 결과로서 그 자속 분포를 알수있다.

## 1. 서 론

BLDC모터는 회전자측에 영구자석을 배치하여 자계를 회전시키고 전기자의 정류를 전자화한 것으로 기존의 DC모터와 달리 기계적 브러쉬가 없으므로 기계 및 전기적 노이즈가 적고 내구성이 우수하여 사무기기, 광학기기, 컴퓨터 하드디스크, VCR 및 가전기기등에 걸쳐 폭넓게 사용되고 있다.[1]

일반적으로 슬롯형 BLDC 모터는 외측코어에 슬롯을 구성하여 동선을 권선하여 전기자를 구성한 것으로 영구자석으로부터 발생한 자력선이 슬롯에 의해 불규칙한 철심코어를 지나므로 토크변동이 심하게 유도하며 코어의 특정부분에서 자기포화가 발생한다. 그러나 슬롯리스형 BLDC는 슬롯이 없는 원형코어를 사용하므로 균일한 자력선이 코어를 통과하므로 토크변동이 적고 자기포화가 발생하지 않으므로 진동 및 소음이 적고 고효율의 모터를 제작할 수 있다. 그러나 슬롯리스형 BLDC 모터는 전기자의 코일권선이 복잡하고 제작하기 곤란한 구조를 가지고 있다. 본 연구자들은 코일권선 대신에 복잡한 형상도 제작하기 용이한 필름코일을 이용한 슬롯리스형 BLDC모터를 제작하였다.[2][3]

본 논문에서는 슬롯리스형 BLDC모터를 설계하여 그 특성을 슬롯형 BLDC모터와 비교해석 하였으며 필름코일을 이용한 슬롯리스형 BLDC모터를 제작하여 그 특성을 측정 및 해석하였다.

## 2. BLDC 모터의 특성해석

### 2.1 슬롯형 BLDC 모터의 특성해석

그림 1은 슬롯형 BLDC 모터의 구조를 나타내고 있다. 그 구조는 직경: 120 mm, 길이: 100 mm, 극수: 4극, 슬롯수: 24개, 공극: 0.25 mm, 코일용적율: 60

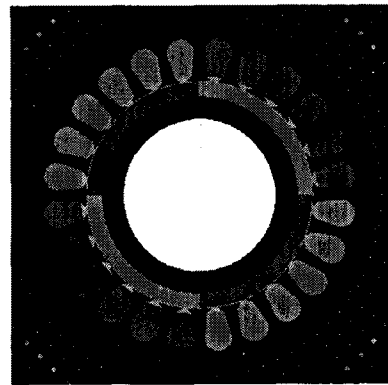


그림 1 슬롯형 BLDC 모터의 구조



그림 2 슬롯형 BLDC모터의 자속분포도

그림 2에서 보는 바와 같이 코일이 점유하고있는 슬롯부분은 비자성체이므로 자속이 미미하므로 슬롯의 neck부분에 자속이 집중되어 높은 자속분포를 갖는 것을 알 수 있다. 이와 같이 영구자석에 의해 발생된 자속이 슬롯구조에 의해 왜곡되어 코어의 위치에 따라 불균일한 자속분포를 가지므로 높은 코킹토크의 원인이 되며, 높은 잔류자화를 갖는 영구자석에 의해 슬롯 neck 부분에서 자기포화가 일어나므로 누설자속량이 증가한다. 그림 3은 슬롯형 BLDC 모터의 정류에 의한 토크

### Torque vs. Current

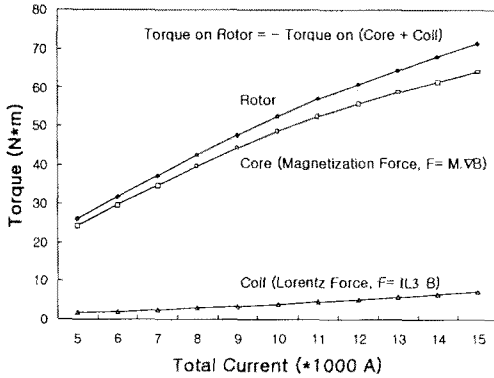


그림 3 슬롯형 BLDC모터의 전류에 의한 토크변화

변화를 도식한 그림이다. 영구자석형 BLDC모터는 영구자석이 부착된 로터부와 코일과 코어로 구성된 고정자부로 구성되어 있으므로 로터부와 고정자부의 상호간에 인가된 토크는 그 크기는 같고 방향이 반대이다. 그리고 고정자부에 총 토크량은 코어에 의한 토크와 코일에 의한 토크의 합으로 구성되어있다. 한편 코어에 의한 토크는

$$F = M \cdot \nabla B \quad (1)$$

식 (1)과 같은 자기력에 의해 발생한 토크이며, 코일에 의한 토크는 식 (2)와 같이 로렌츠력에 의해 발생한 토크이다.

$$F = IL \times B \quad (2)$$

그림 3에서 보는 바와 같이 슬롯형 BLDC모터는 총 토크 중 대부분은 코어에 의한 자기력이 차지하며 그 일부를 코일에 의한 로렌츠력이 기여하고 있다. 또한 코일에 의한 로렌츠력은 전류증가에 따라 직선적으로 증가하지만 코어에 의한 자기력은 전류증가에 따라 직선적으로 증가하다가 고 전류영역에서는 그 기울기가 적어지는 곡선형태를 갖는다. 이는 코어의 자기포화에 의해 그 기울기가 적어지는 것으로 사료된다.

### 2.2 슬롯리스형 BLDC 모터의 특성해석

그림 4는 슬롯리스형 BLDC 모터의 구조를 나타내고 있다. 그 구조는 직경: 120 mm, 길이: 100 mm, 극수: 8극, 슬롯수: 없음, 공극: 5 mm, 코일용적율: 80%, 잔류자속밀도: 1.2 T, 자석두께 9 mm의 제원을 가지고 있다.

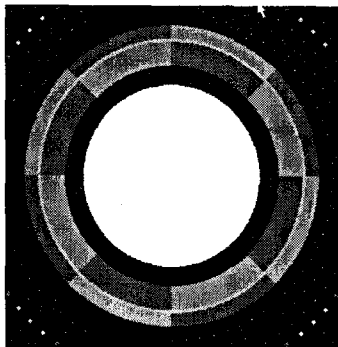


그림 4 슬롯리스형 BLDC모터의 구조

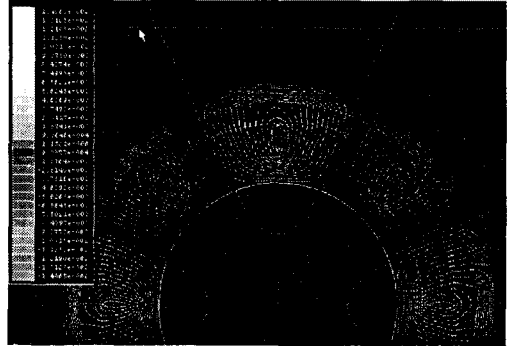


그림 5 슬롯리스형 BLDC모터의 자속밀도 분포도

그림 2.5는 그림 2.4의 제원인 슬롯리스형 BLDC모터를 FEM 프로그램으로 자체해석을 실시한 결과로서 그 자속밀도 분포를 알 수 있다. 그림 2.5에서 보는 바와 같이 비자성체인 코일이 영구자석과 코어의 중간지점에 위치하여 코어는 슬롯이 없는 원형코어의 형상을 가지며 코어의 전 영역에 걸쳐 균일한 자속분포를 가지므로 위치에 따른 불균일한 자속분포에 의한 코깅토크가 감소하며 자기포화를 가지는 영역이 없으므로 누설자속량이 매우 적다.

그림 2.6은 슬롯형 및 슬롯리스형 BLDC 모터의 전류에 의한 토크변화를 도식한 그림이다. 슬롯형 BLDC 모터의 고정자부에 발생하는 토크는 주를 이루는 코어의 자기력과 부차적인 코일의 로렌츠력의 합으로 나타나는데 반하여 슬롯리스형 BLDC모터의 고정자부에 발생하는 토크는 전적으로 코일에 발생한 로렌츠력에 의한 토크로 구성되어있다. 그러므로 슬롯리스형 BLDC모터는 자기포화에 의한 누설자속이 없으므로 토크총량이 크고 그 토크가 로렌츠력으로 구성되어 있으므로 대전류에서 전류대 토크기울기가 변화없이 직선적인 특성을 갖는다.

표 1은 슬롯형 및 슬롯리스형 BLDC모터의 특성을 나타내고 있다. 슬롯리스형 BLDC모터는 그 구동력이 로렌츠력으로서 원형코어를 사용하여 누설자속이 적으므로 슬롯형 BLDC모터에 비하여 코어형상이 간단하고, 코깅과 코어로스가 적고, 효율이 높고 파워밀도가 높은 것을 알 수 있다.

### Torque vs. Current

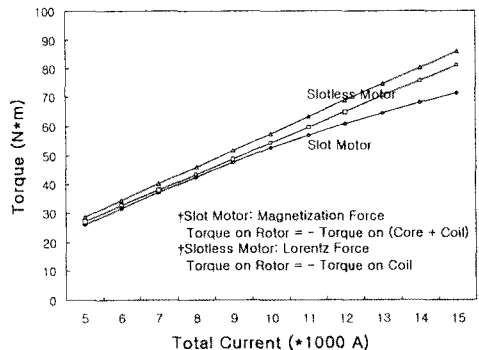


그림 6 슬롯형 및 슬롯리스형 BLDC모터의 전류에 대한 토크변화

표 1 슬롯형 및 슬롯리스형 모터의 특성

Item	Slot Motor	Slotless Motor
Structure	Complex	Simple
Air Gap	Small	Large
Cogging	Yes	No
Driving Force	Magnetization Force	Lorentz Force
Magnet Size	Small	Large
Coil Density	60 %	80 %
No. of Poles	4	8
Core Loss	Large	Small
End Coil Loss	Large	Small
Efficiency	Good	Very Good
Power Density	Large	Very Large

코어에 실린더형 필름코일을 삽입 후 접합시킨 고정자 및 기타 모터부품을 조립하여 만든다.

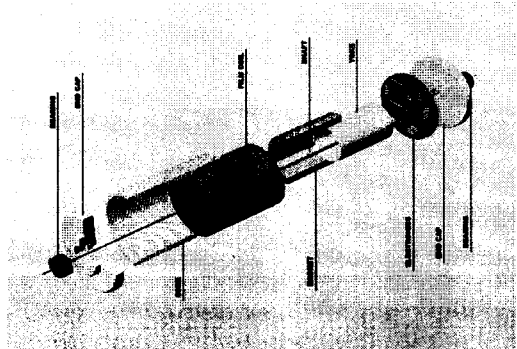


그림 8 필름코일형 BLDC 모터

### 3. 필름코일형 BLDC 모터의 제작

#### 3.1 필름코일의 형상 및 제작

기존의 권선형 슬롯리스형 BLDC모터는 그 권선방법이 복잡하고 재현성이 떨어져 필름코일로 제작하려는 시도가 있어왔다. 그러나 기존에는 동반사이의 절연체를 사용하는 연성 PCB기술과 상 상호간을 연결하는 접점을 만드는 드릴링, 도금 및 식각기술이 부족하여 코일의 집적도 및 재현성이 부족으로 실용성이 떨어졌다. 또한 기존 필름코일의 형상은 상간연결의 곤란성으로 인해 최소접점을 갖는 형상으로 필름코일을 설계하여 동점유율이 부족한 형상을 가지고 있었다.

그러나 필름코일형 BLDC는 그간 연성 PCB기술의 진보에 의해 박형 절연체의 구현과 정밀한 드릴링, 도금 및 식각이 가능하여 동점유율이 높은 다점접 필름코일이 가능하게 되었다.

그림 7은 슬롯리스형 BLDC모터의 필름코일 형상이다. 이 그림은 다점접을 갖는 3상 육각형 형상의 필름코일로서 절연체 양측에 2개의 동박 형상을 도시하고 있다. 한상에서 인가된 전류가 극간이동시 방향이 역전되어야 하므로 상측동박과 하측동박은 육각형형상을 가지고 한 극간의 간격으로 접촉하게 되어있다.

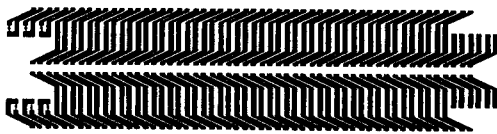


그림 7 슬롯리스형 BLDC모터의 필름코일 형상

#### 3.2 필름코일 모터의 형상 및 제작

그림 8은 필름코일형 BLDC모터의 분해도이다. 내측에 영구자석이 부착된 로터가 있고 외측에 필름코일로 제작 후 권선한 전기자와 원형코어가 고정자로 구성되어 있다. 로터의 축과 고정자의 베어링에 의해 회전운동을 하도록 구성되어 있다.

그림 9는 필름코일모터의 제작 모식도이다. 실린더형 필름코일은 절연필름의 양편에 동박을 접착한 후 드릴링과 도금으로 점접을 형성하며, 리소그리피와 식각법으로 의도한 필름코일형상을 만든 다음 권취하여 만든다. 또한 필름코일형 BLDC모터는 철심 링으로 된 코어에 NdFeB 영구자석 편을 붙여 만든 로터, 실린더형 철심

#### Manufacturing of Film Coil Motors

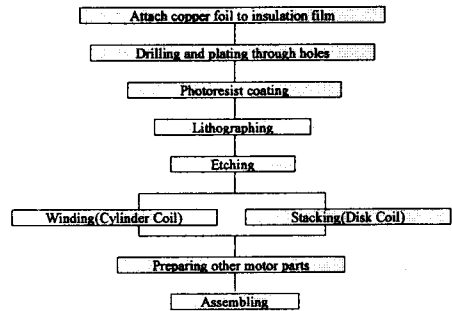


그림 9 필름코일모터의 제작 모식도

### 4. 결 론

본 논문에서 슬롯형 및 슬롯리스형 BLDC모터를 설계하여 상호간의 특성을 비교하고 해석한 결과, 슬롯형 BLDC모터의 주 기동력은 코어에서 발생한 자기력이고 슬롯리스형 BLDC모터의 경우에는 코일의 로렌츠허력이며, 또한 슬롯형인 경우 슬롯형상에 의해 자기포화구역이 존재하고 불균일한 자속밀도에 의해 코킹이 발생하지만 슬롯리스형 BLDC모터의 경우에는 자기포화영역과 코킹이 발생하지 않다.

또한 동점유율이 높고 고효율 모터를 제작할 수 있는 코일 형상을 제안하고 실린더형 필름코일을 장착한 슬롯리스형 BLDC모터를 제작 후 그 특성을 파악하였다. 같은 구조물을 이용하여 필름코일의 형상에 따라 다양한 특성을 갖는 모터가 제작 가능하므로 사용처에 따라 적합한 필름코일형상을 설계하여야 할 것이다.

#### (참 고 문 헌)

- [1] J. R. Hendershot Jr and TJE Miller, "Desing of Brushless permanent-magnet motor"
- [2] Kais Athallah, Zi Qiang Zhu, David Howe and Terry S. Birch, " Armature reaction Field and Winding Inductances of Slotless Permanent-magnet Brushless Machines", IEEE Trans. on Magnetics, Vol. 34 No. 5, Sept. 1998 pp. 3737-3744
- [3] (주)엠베스트, "전동기 또는 발전기의 박막코일" 특허 제 0311900