

브러시리스 DC 모터의 영구자석 오버행 효과에 대한 연구

°권 호\*, 전연도\*, 이 주\*, 김 솔\*, 김윤현\*, 임태빈\*\*, 성하경\*\*  
 한양대학교 전기공학과\*, 전자부품연구원 정밀기기연구센터\*\*

A Study on the Permanent Magnet Overhang Effect in Brushless DC Motor

°H. Kwon\*, J. Lee\*, Y. D. Chun\*, S. Kim\*, Y. H. Kim\*, T. B. Im\*\*, H. K. Sung\*\*  
 Dept. of Electrical Engineering, in Hanyang University  
 Div. of Mechatronics Research Center in Korea Electronics Technology Institute

**Abstract** - This paper investigates the permanent magnet (PM) overhang effect on the characteristics such as cogging torque and torque in brushless DC motor (BLDCM). The overhang effect has been used to enlarge the performance of the radial flux density in BLDCM and balance the force in the axial direction for the reduction of the vibration. 3D equivalent magnetic circuit network method (3D EMCNM) is used for the accurate and efficient analysis. The characteristics of BLDCM are analyzed according to the variation of overhang length and the optimal length and ratio of overhang is determined.

1. 서 론

브러시리스 직류전동기(이하 BLDCM이라 함)는 소형 모터 영역에서 비교적 큰 토크를 얻을 수 있고 속도 제어 등의 가변속 제어가 용이하고 브러시가 없어 반영구적으로 사용 가능하므로 가전기기, 컴퓨터 주변기기, 사무자동화(OA) 및 공장자동화(FA) 등의 구동원 및 제어원의 핵심 부품으로서 그 수요가 급속히 증가하고 있으며 특히 80년대 이후로 내오디움 계열의 고성능 영구자석의 개발, 전력용 반도체 소자와 고성능 마이크로프로세서의 급속한 발전에 따른 제어기계의 발달로 많은 성능 개선이 이루어져 소형·경량화, 고속화를 지향하고 있다.

BLDCM은 구조적으로 영구자석이 고정자의 적층 길이보다 긴 오버행 구조를 가지고 있다. BLDCM의 설계시 보통 오버행 길이는 계자의 유효자속을 증가시키기 위해 1차측 코어 적층길이의 1.1~1.2배 정도로 설정하고 있다. 직선기의 경우, 대칭 오버행 구조로 설계하여 3차원 등가자기회로방법을 이용하여 이에 대한 정량적 특성을 해석한 연구결과가 발표된 바 있다[1]. 그러나 회전기에 대해서는 아직까지 오버행 효과의 역할이나 기능에 대해 정량적으로 제시한 문헌은 미미한 실정이며 따라서 BLDCM의 성능 향상을 위해서 시행하고 있는 영구자석 오버행의 영향에 대한 정밀 해석 및 검토가 필요하다[2].

영구자석의 오버행 구조는 해석 단면의 수직방향으로 기하학적, 물리적 성질이 변화하지 않는다는 가정하에 적용하는 2차원 해석은 오버행에 따른 유효자속의 증가를 적절히 고려할 수 없으며 3차원 해석이 필수적이다. 3차원 해석방법으로는 유한요소법이 많이 사용되고 있으나 미지절점수의 증가로 인한 계산시간 및 메모리 증대가 요구되며 회전자 이동시 요소를 재분할 해야 하는 등의 단점이 있다. 따라서 본 연구에서는 BLDCM의 3차원 특성해석을 위하여 3차원 등가자기회로방법(Equivalent Magnetic Circuit Network method: 3D EMCNM)을 사용하고자 한다[3]. 3차원 등가자기회로방법을 회전기에 적용해서 퍼미언스 계산을 하는 경

우 기존의 문헌들은 주로 부채꼴 모양의 요소를 사용하고 있으나 고정자와 회전자의 형상이 복잡할 경우 정확한 형상의 모델링이 어려울 뿐 만 아니라 실제 형상과의 차이로 인한 퍼미언스 계산시 오차를 수반하게 된다[4]. 따라서 이러한 문제점을 해결하기 위해서 본 논문에서는 개선된 사다리꼴 요소를 이용하여 해석을 수행하였으며 적층방향으로 동일한 오버행을 가지는 경우 오버행 길이 변화에 따른 자속분포, 코깅 토크와 토크 특성을 정량적으로 비교하였으며 적절한 오버행의 길이를 제안하였다.

2. 해석 방법

2.1 3차원 등가자기회로방법

3차원 등가자기회로방법은 기존의 자기회로법에 수치적 기법을 도입하여 퍼미언스를 분포적인 회로정수로 사용함으로써 3차원적 형상을 비교적 쉽게 해석할 수 있는 방법이다. 본 방법에서는 분포정수로 퍼미언스를, 계변수로 자기스칼라 포텐셜을 사용하며 해석모델에 대하여 전체영역을 매질의 종류에 따라 영역을 구분한 후, 영역을 세밀히 요소분할하고, 각 요소의 중심에 절점을 잡고 이를 잇는 등가자기회로망을 구성하게 된다.  $\theta$  방향으로는 자속과 자속밀도는 두 절점  $(i,j,k)$ 와  $(i+1,j,k)$ 사이의 자위가 각각  $U_{i,j,k}$ ,  $U_{i+1,j,k}$ 일때, 식 (1), 식 (2)와 같이 나타낼 수 있다[3],[4].

$$\Phi_{i,j,k}^{\theta} = P_{i,j,k}^{\theta}(U_{i,j,k} - U_{i+1,j,k} + E_{i,j,k}^{\theta}) \quad (1)$$

$$B_{i,j,k}^{\theta} = \Phi_{i,j,k}^{\theta} / S_{i,j,k}^{\theta} \quad (2)$$

여기서  $P_{i,j,k}^{\theta}$ 는  $\theta$  방향 두 절점사이의 퍼미언스,  $U_{i,j,k}$ 는 절점  $(i,j,k)$ 에서의 자기스칼라 포텐셜,  $E_{i,j,k}^{\theta}$ 는 소스 내부에 해당하는 영구자석과 전기자권선의 기자력이 분포하는 치와 슬롯부의 기자력,  $S_{i,j,k}^{\theta}$ 는  $\theta$  방향 두 절점사이의 단면적이다.

임의 절점에 대하여 각 방향의 자속식을 구성한 후 해석 영역의 모든 절점에 대하여 "한 절점에서 자속의 유효입 양은 불변"이라는 자속의 연속조건을 적용하여, 조합하면 식 (3)과 같은 미지절점수 만큼의 대수방정식인 행렬식으로 표현할 수 있다.

$$[P]_{n \times n} \{U\}_{n \times 1} = \{F\}_{n \times 1} \quad (3)$$

여기서,  $[P]$ 는 퍼미언스 계수행렬,  $\{U\}$ 는 절점자위행렬,  $\{f\}$ 는 구동벡터(기자력  $\times$  퍼미언스)를 나타낸다. 퍼미언스 계수행렬  $[P]$ 는 절점수가  $n$ 이면  $n \times n$  대칭행렬로서 주대각 성분은 구하고자 하는 절점과 인접한 6개의 절점 사이에 존재하는 퍼미언스의 합으로 구성되며 이산

도(sparsity)가 3차원 유한요소법 보다 좋다. 따라서 행렬 계산시 소요되는 메모리가 감소하고 계산시간이 작은 장점을 가지고 있다[3].

### 2.2 퍼미언스의 계산

퍼미언스는 자기저항의 역수로 각 요소의 중앙에 위치한 절점들 사이의 자로 길이와 단면적과 채질정수에 의해 계산되는 값이다. 회전기의 경우, 기존의 등가자기회로방법은 부채꼴 요소를 주로 사용하고 있으나 형상이 복잡해질 경우 정확한 형상의 모델링이 어려울 뿐만 아니라 이로 인해 퍼미언스 계산시 오차가 크게 발생할 수 있으므로 이러한 문제점을 보완하기 위해 본 논문에서는 사다리꼴 요소를 제안하였다. 그림 1은 사다리꼴 요소를 나타내고 있으며 이로부터 계산되는 퍼미언스의  $x, y, z$  성분은 아래 식과 같다.

$$P_x = \mu \frac{lh}{w_2 - w_1} \ln(w_2 / w_1) \quad (4)$$

$$P_y = \mu \frac{l(w_2 - w_1)}{h \ln(w_2 / w_1)} \quad (5)$$

$$P_z = \mu \frac{(w_1 + w_2)h}{2l} \quad (6)$$

여기서,  $\mu$ 는 투자율,  $w_1, w_2$ 는 사다리꼴 요소의 아랫변과 윗변의 길이,  $h$ 는 사다리꼴 요소의 높이,  $l$ 은 사다리꼴 요소의 폭이,  $x$ 는 사다리꼴 요소의 미소체적까지의 길이이다.

### 2.3 해석 모델

본 논문에서 사용된 브러시리스 DC 모터 모델은 극수 8, 슬롯수 12, 3상 전파구동 방식의 외전형이다. 대칭성을 고려하여 2극분만을 해석영역으로 하였으며 영구자석은 링형 Ferrite로 자극 전체가 원주방향으로 균일하게 자화되는 것이 아니라 자극 경계에서는 약하게 착자된 사다리꼴 분포의 형태를 갖는 것으로 가정하였다. 그림 2는 해석모델을 나타내고 있으며 제원은 표 1과 같다. 그림 3은 해석모델의 요소분할도를 나타내며 요소수 및 절점수는 91,260이다.

## 3. 해석 결과 및 고찰

### 3.1 해석결과

그림 4는 축방향 동일 길이를 가지는 대칭 오버행의 경우에 대해, 오버행을 시행하지 않은 경우와 오버행을 고정자 적층길이보다 40% 증가한 경우  $r-z$ 단면에 대한 자속밀도의 벡터 분포도를 나타내고 있다. 그림에서처럼 오버행을 시행하지 않은 경우 자속의 경로를 살펴보면 대부분 영구자석에서 고정자로 쇄교하지만 고정자의 양 끝단에서는 프린징과 누설자속으로 인해 자속이 균일하게 쇄교하지 않는 것을 알 수 있다. 반면에 오버행을 40% 증가한 경우에는 영구자석의 끝단에서 자속의 누설성분이 많이 증가하지만 고정자에 비교적 균일하게 쇄교하고 있으며 이로 인해서 유효자속이 증가함을 알 수 있다.

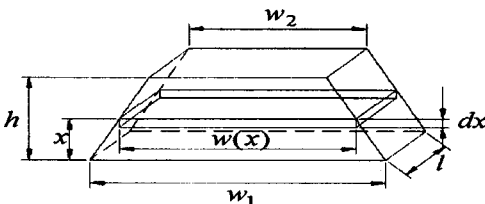
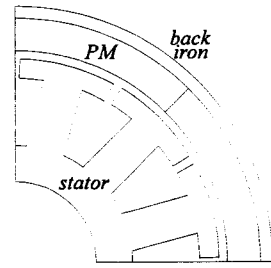
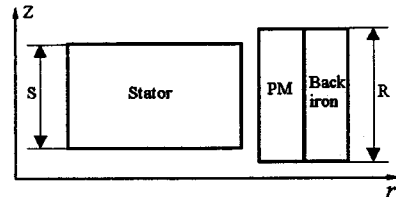


그림 1. 퍼미언스 계산을 위한 사다리꼴 요소



(a)  $r-\theta$  단면



(b)  $r-z$  단면

그림 2. 해석 단면

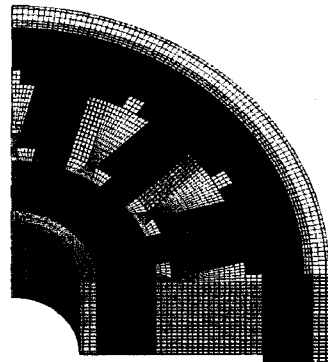


그림 3. 해석모델의 요소분할도

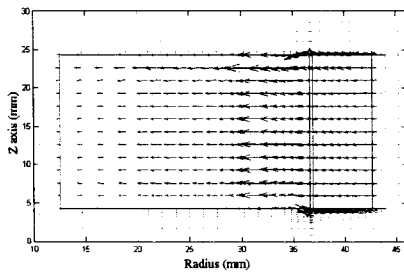
표 1. 해석모델의 제원

구분	제원	
고정자	슬롯수	12
	상수	3
	상당권선수	28
	적층폭	20.0(mm)
	외경	73.3(mm)
회전자	극수	8
	내경	85.4(mm)
	외경	88.0(mm)
영구자석 Ferrite	자석 두께	4.8(mm)
	극당자극각도	45°
	잔류자속밀도	0.275(T)
	보자력	3 (KA/m)
공극	길이	0.3 (mm)

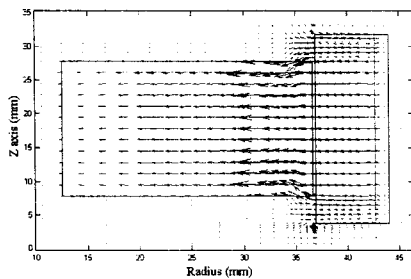
그림 5, 그림 6은 각각 대칭 오버행의 경우에 오버행 길이 변화에 따른 코깅 토크 특성을 나타내고 있다. 오버행을 시행한 경우 공극의 유효자속 증가로 인해서 오버행 길이에 비례해서 코깅 토크는 완만히 증가하고 있으며 그림 6에서 코깅 토크의 최대값을 오버행 변화에 따라 비교하여 보면 오버행을 40% 증가한 경우 오버행이 없는 경우에 비해 11.1% 증가하였다.

그림 7, 그림 8은 각각 대칭 오버행의 경우에 오버행

길이 변화에 따른 토크 특성을 나타내고 있다. 오버행을 시행한 경우 오버행 길이에 비례해서 토크가 완만히 증가하였으며 고정자 적층길이보다 40% 증가한 오버행의 경우 오버행이 없는 경우와 비교해서 토크의 최대값은 각각 6.21% 증가하였다.



(a) 오버행이 없는 경우



(b) 오버행이 40%인 경우

그림 4. 오버행 길이 변화에 따른 r-z 단면에서의 자속밀도 벡터분포도

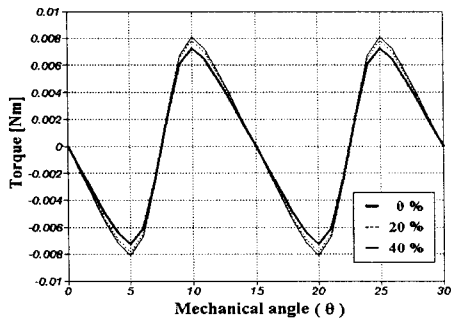


그림 5. 오버행 길이 변화에 따른 코깅토크 특성 비교

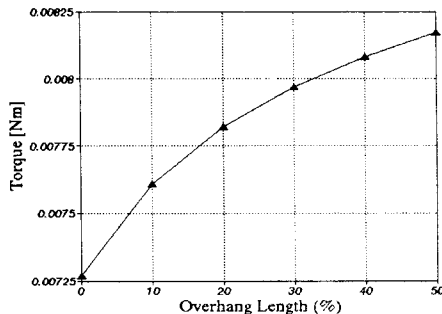


그림 6. 오버행 길이 변화에 따른 최대 코깅 토크 비교

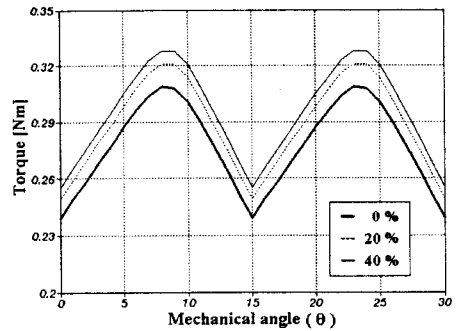


그림 7. 오버행 길이 변화에 따른 토크 특성 비교

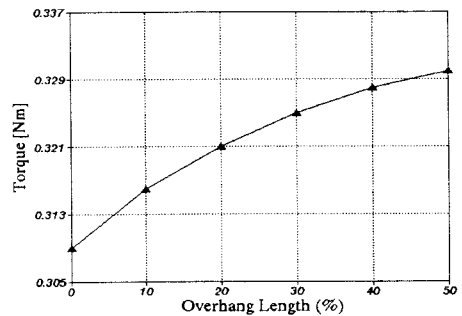


그림 8. 오버행 길이 변화에 따른 최대 토크 특성 비교

#### 4. 결론

본 논문에서는 오버행 효과가 BLDCM의 특성에 미치는 영향을 해석하기 위해서 사다리꼴 요소를 적용한 3차원 등가자기회로방법을 이용하였다. 영구자석 오버행 길이 변화가 코깅토크, 토크 특성에 미치는 영향을 살펴보기 위해서 대칭 오버행 구조에 대해서 오버행의 길이를 변화시켜 가면서 자계해석을 수행하였다. 대칭 오버행의 경우, 오버행 길이에 비례해서 유효자속이 증가하므로 코깅 토크와 토크 특성은 고정자 적층 길이보다 40% 증가한 오버행의 경우 오버행이 없는 경우와 비교해서 각각 11.1%, 6.21% 증가함을 알 수 있었다. 따라서 BLDCM의 특성 향상을 위해서는 오버행을 시행하는 것이 유리하며 오버행 길이는 설계시 효율성과 경제적 측면을 고려하여 선정하여야 한다. 본 연구결과는 BLDCM의 설계시 영구자석 오버행 결정에 유용한 참고자료가 될 것으로 사료된다.

#### (참고 문헌)

- [1] 정인성, "개선된 수치해석기법을 이용한 영구자석형 선형 동기전동기의 특성 해석," 박사학위 논문, 한양대학교, 1999.
- [2] J .P. Wang and D.K. Lieu, "Influence of Permant magnet overhang on the Performance of the Brushless dc motor", Journal of Applied Physics, vol 83, pp. 6362-6364, 1998.
- [3] 허진, "3차원 정자계 해석을 위한 등가자기회로방법에 관한 연구," 박사학위 논문, 한양대학교, 1998.
- [4] 임달호, 홍정표, "3차원 등가자기회로방법에 의한 영구자석 모터의 자계해석," 대한전기학회논문지, vol. 43, no. 9, pp.1432-1439, 1994.