

# 브러시리스 직류전동기 특성에 대한 영구자석 오버행 효과

論 文

53B-4-3

## Permanent Magnet Overhang Effect on the Characteristics in Brushless DC Motor

全 衍 度\* · 若尾 真治\*\* · 李 柱\*\*\*  
(Yon-Do CHUN · Shinji WAKAO · Ju LEE)

**Abstract** - In this paper, the effect of permanent magnet overhang structure on the characteristics in Brushless DC motor has analyzed quantitatively. We classified the overhang structure as symmetric and asymmetric. 3D equivalent magnetic circuit network (EMCN) method which uses the permeance as the distributive variable is used for the efficient analysis of magnetic field. The overhang effect which increases the linkage flux at the stator is verified by comparison between overhang and no overhang structure. In addition, it is known that no load back electro motive force (EMF) is also increased due to the overhang effect. In case of asymmetric overhang structure, the ratio effect of the upper to lower overhang length on the magnetic forces is analyzed. Form the analysis results, the variation of the asymmetric overhang ratio has a significant effect on the axial magnetic force except the radial and tangential magnetic forces. The validity of the analysis results is also clarified by comparison between calculated results and measured ones such as back EMF and cogging torque.

**Key Words** : Permanent Magnet, Overhang Structure, Brushless DC motor, 3D Equivalent Magnetic Circuit Network Method

### 1. 서 론

브러시리스 직류전동기는 특성 향상을 위해 일반적으로 영구자석의 축방향 길이를 고정자의 적층방향 길이보다 길게 하는 오버행 구조를 가지고 있다. 이는 오버행을 시행하게 되면 계자에서 발생하는 유효 자속을 증가시키기 때문이다. 영구자석 오버행 효과에 대한 연구는 주로 상·하 오버행의 길이가 동일한 대칭 오버행 구조가 많이 보고되고 있으나 [1-4], 최근에는 제조원가 절감 및 소형 경량화 추세로 전동기 제작시 구동 드라이브 기판 및 하우징 등을 전동기에 바로 취부하여 결합하는 등, 상·하 오버행 길이가 다른 비대칭 오버행 구조로 설계되는 경우도 많다. 이러한 비대칭 오버행의 경우, 축방향으로 자기적 불평형이 발생하기 쉬우므로 적절한 상·하 오버행 비율을 산정하는 것은 소음, 진동 저감을 위해서도 중요한 문제이다[5][13][14]. 비대칭 오버행의 경우, 오버행 효과의 역할이나 기능에 대해 정량적으로 제시한 문헌은 아직 미미한 실정이며, 따라서 이에 대한 정밀 해석 및 검토가 필요하다.

2차원 해석의 경우, 해석 단면의 수직방향으로 기하학적, 물리적 성질이 변화하지 않는다는 가정하에 적용하므로 본

논문의 해석대상인 영구자석 오버행 및 회전자 요크의 캡 구조를 가지는 전동기 모델에서는 이러한 형상 변화를 근본적으로 고려할 수 없다. 따라서, 실제 모델을 정확히 해석하기 위해서는 3차원 해석이 필수적이다.

전자계 해석방법으로는 유한요소법이 일반적으로 많이 사용되고 있으나 3차원 해석의 경우, 미지 절점수의 증가로 인한 메모리 및 계산시간이 많이 소요되는 단점이 있으므로 브러시리스 직류전동기의 효율적인 3차원 특성 해석을 위하여 분포적인 퍼미언스를 계변수로 하는 수치해석방법인 3차원 등가자기회로방법을 이용하였다[6-10].

본 논문에서는 적층 방향으로 상·하 오버행 길이가 같은 대칭 오버행 구조와 상·하 길이가 다른 비대칭 오버행 구조로 각각 나누어서 오버행 효과를 정량적으로 해석하였다. 대칭오버행의 경우 오버행이 없는 구조와 비교해서 상·하 오버행 길이 변화에 따른 자속분포, 역기전력 특성 등을 알아보았다. 또한 비대칭 오버행의 경우 오버행의 상·하 길이 비율에 따라 전동기의 힘 특성에 미치는 영향을 정량적으로 해석하였으며, 이를 통해 축방향 힘이 평형이 되도록 작용하는 적절한 오버행 비율을 결정할 수 있었다. 또한 실험치와 해석치를 비교함으로써 해석결과의 타당성을 확인하였다.

### 2. 해석 모델 및 해석방법

#### 2.1 해석 모델

그림 1은 회전자 요크 캡 및 비대칭오버행 구조를 가지는 해석모델의 3차원 형상을 나타내고 있다. 상·하 오버행 길이

\* 正 會 員 : 漢陽大 BK21機械分野 契約教授 · 工博  
\*\* 非 會 員 : 日本 早稻田大學 理工學部 電氣 · 情報生命  
I學科 助教授 · 工博  
\*\*\* 正 會 員 : 漢陽大 工大 電氣工學科 助教授 · 工博  
接受日字 : 2003年 11月 4日  
最終完了 : 2004年 3月 21日

가 서로 같은 경우를 대칭 오버행, 다른 경우를 비대칭 오버행이라 하고 각각의 r-z 단면을 그림 2에 나타내었다. 비대칭 오버행 비율은 상·하 길이비 (LO/UO)로 정의한다. 본 논문의 해석모델은 극수 8, 슬롯수 12, 3상 전과구동 방식의 외전형 브리시리스 직류전동기이다. 영구자석 재질은 링형 페라이트로서 영구자석의 자화분포는 해석에 의한 영구자석 표면의 자속밀도 분포와 가우스 메터로 측정된 분포값을 비교하여 구하였다 [11]. 그림 3은 영구자석의 표면자속밀도의 측정치를 나타내고 있다. 전동기의 사양은 표 1과 같다.

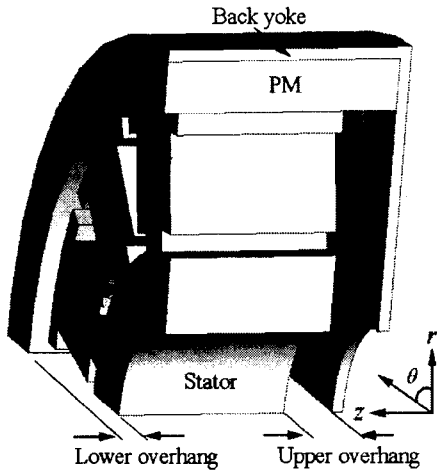
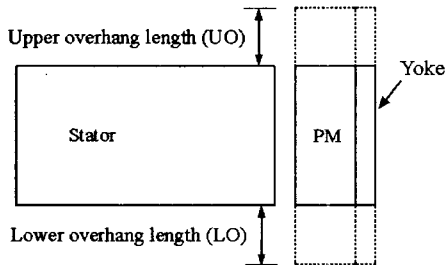
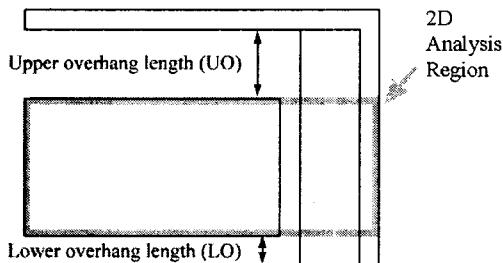


그림 1. 회전자 캡 및 비대칭오버행 구조를 가지는 3차원 해석모델  
 Fig. 1. 3d analysis model with asymmetric overhang and rotor cap structure



(a) 대칭 오버행 구조



(b) 비대칭 오버행 구조

그림 2. 오버행의 종류에 따른 r-z 단면도  
 Fig. 2. Cross section on r-z plane according to overhang structure

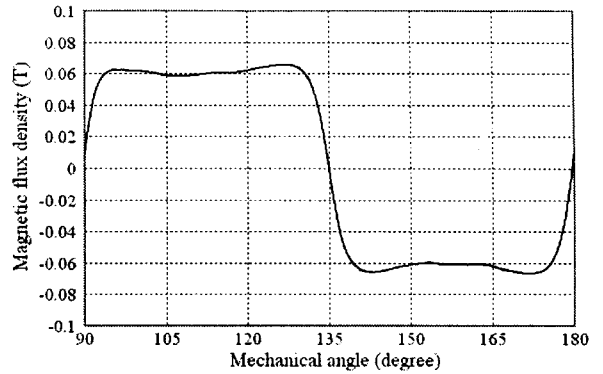


그림 3. 영구자석 표면자속밀도의 측정치  
 Fig. 3. Measurement of magnetic flux density on the surface of permanent magnet

표 1. 해석모델의 주요사양  
 Table 1. Specifications of the analysis model

구분	제 원	
고정자	슬롯수	12
	상수	3
	슬롯당 턴수	28
	적층폭	20 (mm)
	외경	73.3 (mm)
회전자	극수	8
	내경	73.9 (mm)
	외경	88 (mm)
	요크 두께	1.3 (mm)
영구자석 Ferrite	자석 두께	5.75 (mm)
	극당자극각도	45 (°)
	잔류자속밀도	0.275 (T)
	보자력	3 (kA/m)
공극	0.3 (mm)	

2.2 2차원 해석시 문제점

2차원 해석은 3차원 해석에 비해 계산시간이 짧고 모델링 등의 절차가 간단하므로 모터의 특성해석에 많이 사용되고 있다. 그러나 2차원 해석의 경우, 해석 단면의 수직방향으로 기하학적, 물리적 양이 일정하다는 조건이 필요하고 해석의 정밀도를 확보하기 위해서는 해석대상의 형상 등에 주의할 필요가 있다. 본 논문의 해석대상은 오버행 및 회전자 캡 구조를 가지고 있으므로, 2차원 해석을 적용하게 되면, 해석영역은 그림 2 (b)와 같이 굵은 선 내부로 한정되어 영구자석의 오버행 부분 및 회전자의 캡부분 형상을 고려할 수 없으므로 이곳을 흐르는 자속은 근본적으로 해석할 수 없다. 따라서 오버행 및 캡부분에 흐르는 자속은 무시하게 되므로 2차원 해석영역의 요크 부분에서는 자기포화가 쉽게 발생하게 되고 전동기의 정확한 특성 예측에 어려움을 겪게 된다. 따라서 이러한 문제는 근본적으로 3차원 해석으로 해결할 수밖에 없다.

### 2.3 3차원 등가자기회로방법

3차원 등가자기회로방법은 기존의 자기회로법에 수치해석적 기법을 도입하여 분포정수로 퍼미언스를, 계변수로 자기스칼라 포텐셜을 사용하여 기기의 3차원 특성을 쉽게 구할 수 있는 해석 방법이다. 일반적으로 전자계 해석에 많이 사용하는 유한요소법은 적용을 위해 전자계의 물리적 현상을 표현하는 Maxwell방정식으로부터 이산화 과정을 통해 대수방정식으로 유도하지만, 3차원 등가자기회로방법은 Ampere법칙으로부터 유도된 기자력, 자속 및 퍼미언스의 관계식과 자속의 연속조건을 가지고 직접 대수방정식을 도출할 수 있으므로 유한요소법보다 적용 과정이 간단하고 직관적이다. 요소형상의 한계로 복잡한 형상 모델링시 제약이 따르는 등 단점도 있지만 사다리꼴 형태와 같은 요소의 도입 등으로 이를 개선하고 있으며, 최근에는 와전류 문제 등으로 적용 범위가 확장되고 있다. 3차원 등가자기회로방법에 관해서는 그동안 많은 논문이 발표되었으므로 본 논문에서는 자세한 정식화 과정은 생략하고 결과식만 간단히 정리한다 [6-10].

두절점 (i,j,k)와 (i+1,j,k)의 자위가 각각  $U_{i,j,k}$ ,  $U_{i+1,j,k}$ 일 때, r방향으로의 자속과 자속밀도는 식 (1) 및 식 (2)로 나타낼 수 있다.

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

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

여기서  $P_{i,j,k}^r$ 는 r방향 두절점 사이의 퍼미언스,  $U_{i,j,k}$ 는 절점 (i,j,k)에서의 자기스칼라 포텐셜,  $E_{i,j,k}^r$ 는 영구자석 또는 전기자권선의 기자력,  $S_{i,j,k}^r$ 는 r방향 두절점 사이의 단면적이다.

임의 절점에 대하여 각 방향의 자속식을 구성한 후 해석 영역의 각 절점에 자속의 연속조건을 적용하여, 조합하면 식 (3)과 같은 대수방정식으로 표현할 수 있다.

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

여기서,  $[P]$ 는 퍼미언스 계수행렬,  $\{U\}$ 는 절점자위 행렬,  $\{F\}$ 는 구동벡터(기자력 × 퍼미언스)를 나타낸다. 퍼미언스 계수행렬은 절점수가 n인 경우, n×n 대칭행렬로서 주대각 성분은 구하고자 하는 절점과 인접한 6개의 절점 사이에 존재하는 퍼미언스의 합으로만 구성되므로, 행렬의 이산도(sparsity)가 3차원 유한요소법보다 우수하다. 따라서 3차원 유한요소법에 비해 행렬 계산시 소요되는 메모리가 감소하고 계산시간이 작은 장점을 가지고 있다.

그림 4는 해석모델의 요소분할도를 나타내며 전체요소수 및 절점수는 175,980이다. 공극의 요소는 해석의 정밀성을 위하여 5층으로 분할하였으며, 코깁토크, 토크 및 자기력 특성은 맥스웰응력법을 적용하여 계산하였다. 브러시리스 직류전동기는 PWM 인버터로 구동되고 있으므로, 동작 특성을 정확히 파악하고 해석하기 위해서는 PWM 인버터의 스위칭, 구동회로 전압방정식 및 환류다이오드 등을 고려하여야 하나 본 논문에서는 3차원 해석의 적용시, 해석모델을 각 상의 입

력전류가 3.6 A이고, 3상 전파방식으로 구동되는 정자계 문제로 보았다.

## 3. 해석 및 실험결과

### 3.1 대칭 오버행 구조

영구자석 오버행의 역할을 정량적으로 알아보기 위해서 전류를 인가하지 않은 상태에서 오버행의 유무에 따른 r-z 단면의 자속밀도 분포를 살펴보았다. 오버행을 시행하지 않은 초기모델의 적층길이는 20 mm이다. 그림 5(a)와 같이 오버행이 없는 구조에서는 축방향 공극의 상·하 단부에서 자속의 프린징 및 누설이 발생하며, 그림 5(b)에서 오버행 길이를 2.5 mm로 하였을 경우 영구자석 오버행 부분에서 발생한 자속의 일부가 고정자 상·하 양단으로 쇄교함으로써 공극 양단부에서의 자속이 오버행이 없는 구조보다 증가함을 알 수 있다. 따라서 오버행 구조는 축방향 공극 양단에서의 자속 누설성분이 많은 경우 쇄교자속을 증가시키기 위해 도입하면 효과적이라 할 수 있다. 예를 들면 공극이 큰 직선기 등에서는 공극 상·하 단부의 자속 누설성분이 회전기보다 훨씬 커지므로 영구자석을 오버행 구조로 설계하면 좋을 것으로 판단된다.

그림 6은 전류를 인가하지 않은 상태에서 오버행 길이 변화에 따른 z축방향 고정자 치 부분에서의 반경방향 자속밀도 분포를 나타내고 있다. 0에서 6 mm까지 2 mm씩 오버행 길이의 증가에 따라 z축 끝단에서 자속밀도의 크기가 커지지만 그 증가비율은 점차 감소함을 알 수 있다. 그림 7은 오버행이 없는 구조를 기준으로 오버행 길이를 1에서 6 mm까지 1 mm씩 증가시켜 가면서 z축 방향 고정자 치 부분에서의 반경방향 자속밀도의 합을 [%]로 나타낸 것이다. 오버행 길이의 증가에 비례하여 고정자의 자속은 증가하지만 4 mm 이후부터는 증가 기울기가 점차 완만해짐을 알 수 있다.

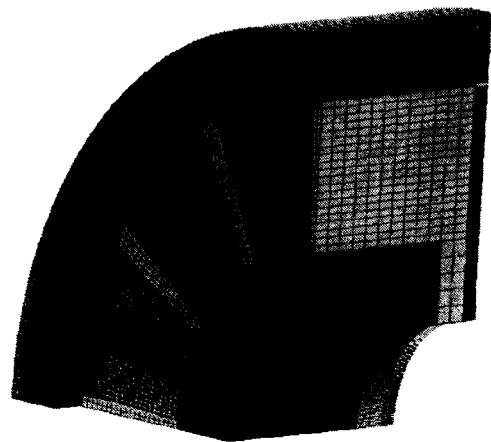
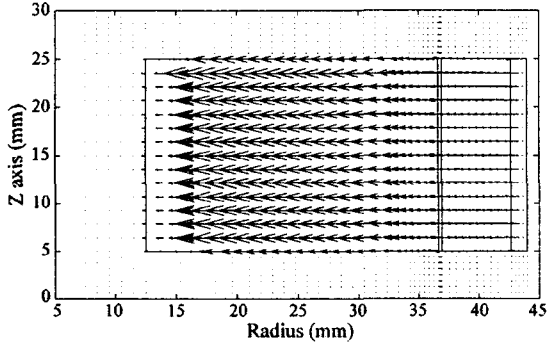
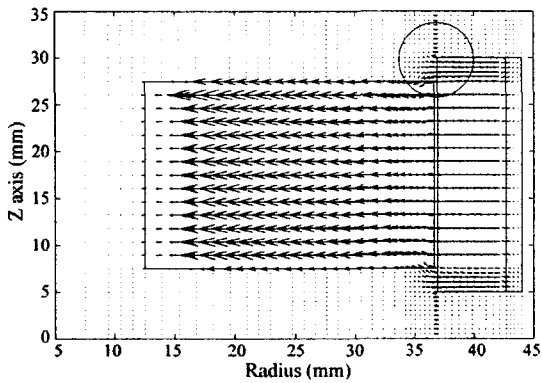


그림 4. 해석모델의 요소분할도  
Fig. 4. Mesh of analysis model

이것은 오버행을 시행하더라도 오버행 길이에 따라서 오버행 부분에서 발생하는 자속이 고정자에 전부 쇄교하지 못하고 일부 자속은 영구자석의 오버행 상·하 양단에서 누설성분으로 작용하기 때문이다. 따라서 과도한 오버행 구조는 쇄교자속 증가의 큰 효과를 볼 수 없으므로 적절한 오버행 길이의 선정이 필요하다.



(a) Without overhang



(b) Overhang (2.5 mm)

그림 5. 오버행 유무에 따른 r-z 단면의 자속밀도벡터분포도  
Fig. 5. Vector distribution of magnetic flux density on r-z plane between overhang and no overhang

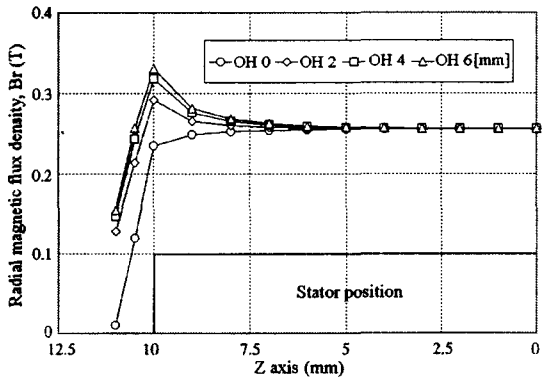


그림 6. 대칭오버행 길이에 따른 고정자 z축상에서의 반경 방향 자속밀도 분포  
Fig. 6. Radial flux density distribution in the z axis according to the symmetric overhang length

그림 8은 회전자속의 속도가 1252 rpm일 때 오버행 길이에 따라 권선에 발생하는 무부하 역기전력의 특성을 나타내고 있다. 앞서 살펴본 바와 같이 오버행 길이에 따라 고정자의 쇄교자속이 증가하므로 역기전력 크기 또한 오버행 길이와 비례하며 그림 7에서 확인한 것과 마찬가지로 오버행 길이 4 mm를 기점으로 증가 기울기가 점차 완만해짐을 알 수 있다.

### 3.2 비대칭 오버행 구조

회전자의 캡 구조와 상·하 오버행 길이가 다른 비대칭 오버행 구조는 축방향으로 자기적 불평형을 발생하기 쉬우므로 적절한 오버행 비율을 산정하는 것은 소음, 진동 저감을 위해서도 중요한 문제이다. 적층길이 20 mm인 고정자에 영구자석의 축방향 길이는 28 mm로 고정시켜 놓고, 오버행의 상·하 길이 비율(LO/UO)을 각각 변화시켜 가면서 자기력의 각 성분에 미치는 영향을 살펴보았다[13].

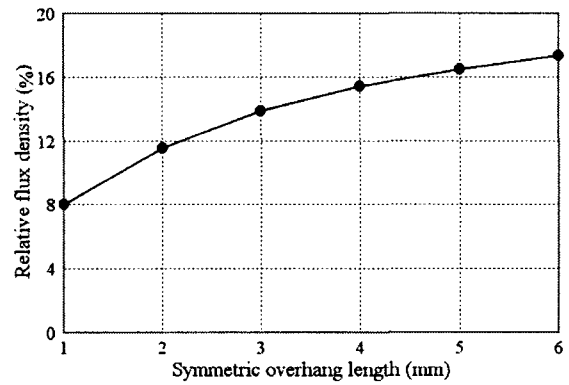


그림 7. 대칭오버행 길이에 따른 고정자의 반경방향 상대자속량

Fig. 7. Relative radial flux density of the stator according to the symmetric overhang length

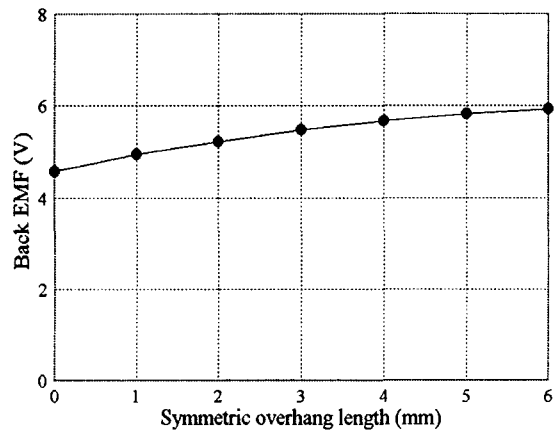
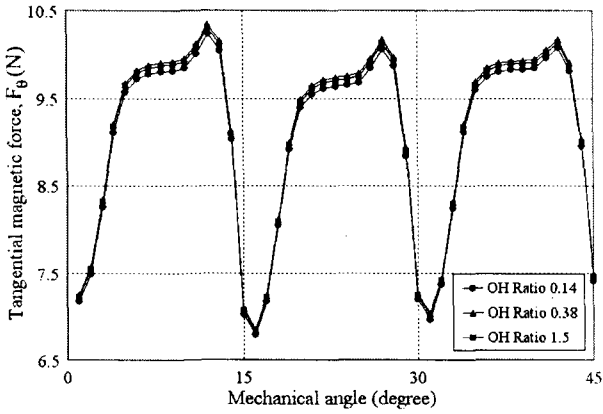
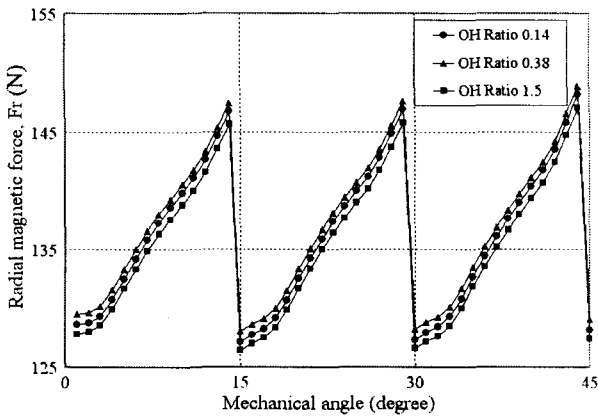


그림 8. 대칭오버행 길이변화에 따른 무부하 역기전력 특성  
Fig. 8. No load back EMF characteristics according to the symmetric overhang length

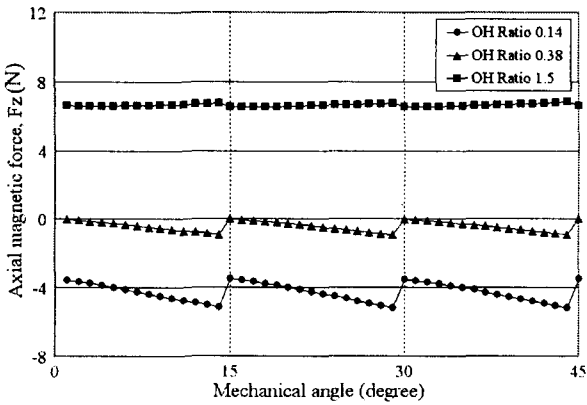
그림 9는 오버행 비율 변화에 따른 반경방향, 접선방향, 축방향의 자기력 특성을 나타내고 있다. 자기력의 각 성분은 고정자의 치 중심부분에서 계산된 값이다. 그림 9(a), 9(b)와 같이 오버행 비율 변화에 따라 반경방향 및 접선방향 힘은 큰 변화가 없었으며, 따라서 오버행 비율은 코강토크 및 토크 특성에 큰 영향을 미치지 않을 것임을 알 수 있다.



(a) Tangential force



(b) Radial force



(c) Axial force

그림 9. 비대칭 오버행 비율 변화에 따른 힘 특성  
Fig. 9. Force characteristics according to the asymmetric overhang ratio

그러나 축방향 힘의 경우 오버행 비율 변화에 따라 영구자석의 자기적 중심 위치가 고정자와 평형을 이루지 못하므로 크게 영향을 받고 있으며, 그림 10과 같이 회전각이 14°인 순간의 축방향 힘 특성 비교로부터 해석모델의 오버행 비율을 0.38로 하는 것이 축방향 힘의 평형을 이루는데 가장 좋을 수 있었다.

그림 11은 오버행 비율이 0.38일 때, 오버행 및 요크 캡 구조를 가지는 브러시리스 직류전동기의 각 부분에 흐르는 자속의 흐름을 확인하기 위해 슬라이스면을 표시한 것이다. 그림 12는 슬라이스 ABCD면에 대한 자속밀도 벡터분포도이다. 대칭구조와 마찬가지로 영구자석의 오버행 부분에서 발생한 자속이 고정자 양단으로 집중하여 쇠교자속을 증가시키는 것을 알 수 있으며, 영구자석 상단 부분의 누설자속은 회전자 캡부분으로 자로를 형성함을 확인 할 수 있었다.

그림 13 및 그림 14는 해석모델의 회전자 캡 부분 및 요크 부분을 지나는 자속밀도 벡터분포도이다. 3차원 해석결과로부터 캡부분 및 요크 부분의 자로를 확인할 수 있었으며, 2차원 해석에서는 형상에 따른 이러한 자속의 경로를 고려하지 못하므로 주의하여야 한다.

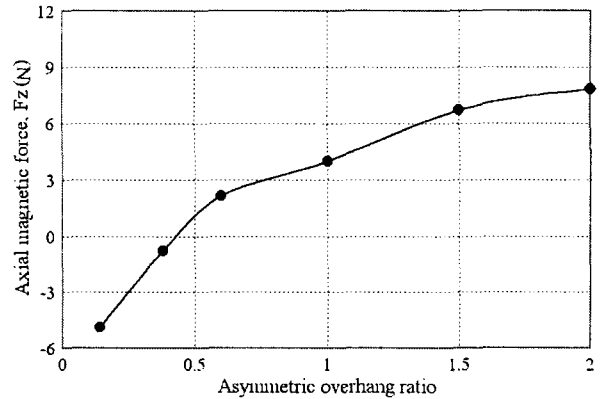


그림 10. 비대칭 오버행 비율 변화에 따른 축방향 힘 특성  
Fig. 10. Axial force characteristics with asymmetric overhang ratio

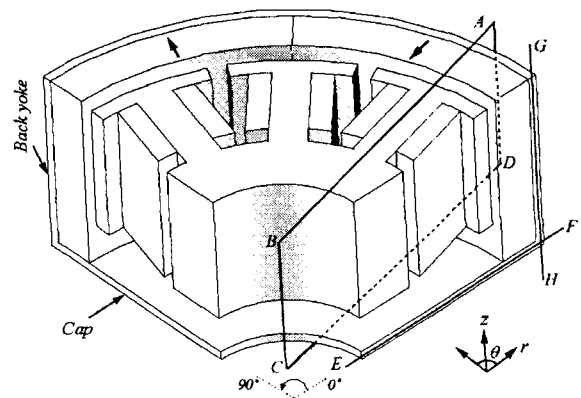
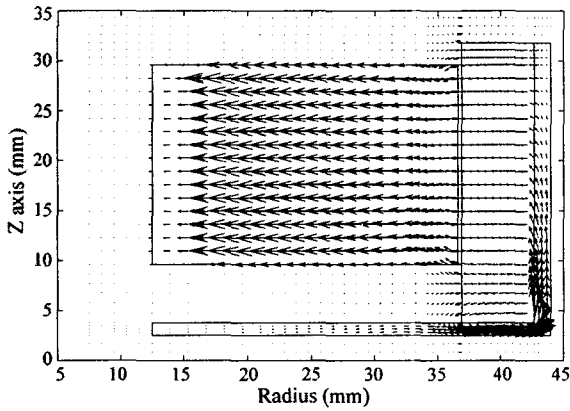


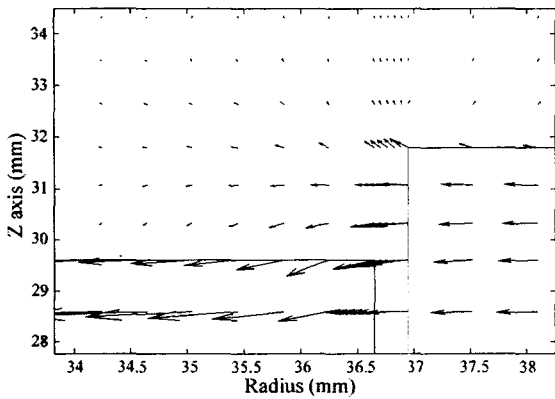
그림 11. 해석모델의 슬라이스 면 (비대칭 오버행비 0.38)  
Fig. 11. Slice plane of analysis model (the asymmetric overhang 0.38)

해석결과의 타당성을 확인하기 위해 오버행 비가 0.38일 때의 코깅토크 및 역기전력 특성을 실험치와 비교하여 보았다. 그림 15는 오버행 비가 0.38인 경우의 코깅토크 특성으로서, 실험치와 해석치가 비교적 잘 일치하고 있음을 확인하였다.

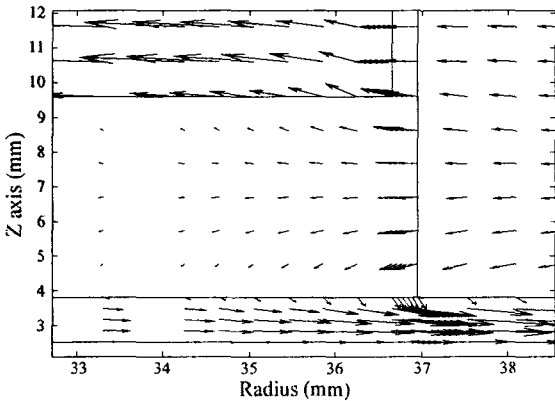
그림 16은 속도 1252 rpm에서 측정된 무부하 역기전력 실험치 및 2차원, 3차원 해석결과를 나타내고 있다. 2차원 유한요소 해석에서는 오버행 및 회전자 캡 구조를 고려하지 못하므로 실제 고정자의 쇄교자속량을 정확히 해석할 수 없다.



(a) ABCD plane



(b) Enlargement of the lower overhang part



(c) Enlargement of the upper overhang part

그림 12. ABCD 면의 자속밀도 벡터 분포

Fig. 12. Vector distribution of magnetic flux density on ABCD plane

그림으로부터 한상의 역기전력 평균치를 비교하여 보면, 2차원 해석결과는 실험치와 비교하여 2.53[%]의 오차를 보이지만 3차원 해석결과는 0.52[%]의 오차로 실험치와 잘 일치함을 알 수 있었다. 결과적으로 2차원 해석의 오차는 오버행 효과를 고려하지 못함으로써 발생된 것으로 판단된다.

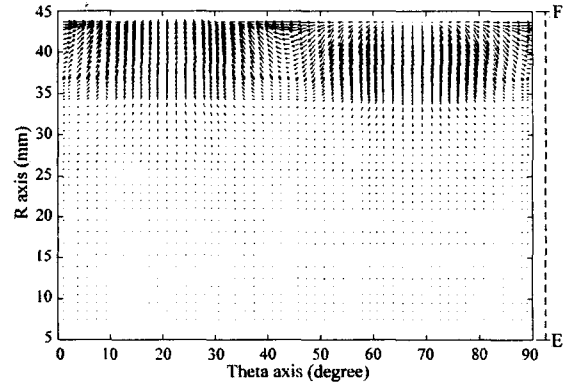


그림 13. E-F 단면의 자속밀도 벡터 분포

Fig. 13. Vector distribution of magnetic flux density on E-F plane

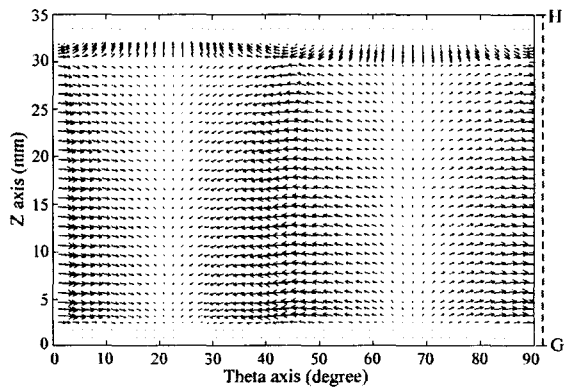


그림 14. H-G 단면의 자속밀도 벡터 분포

Fig. 14. Vector distribution of magnetic flux density on H-G plane

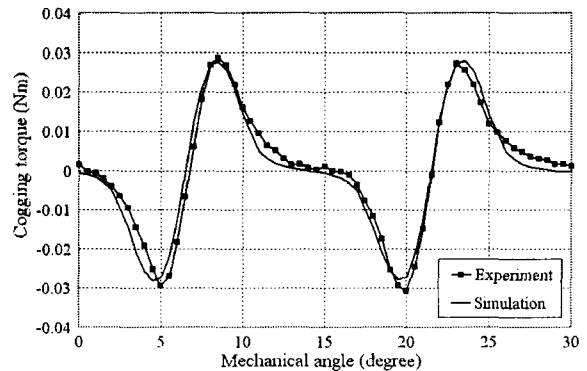
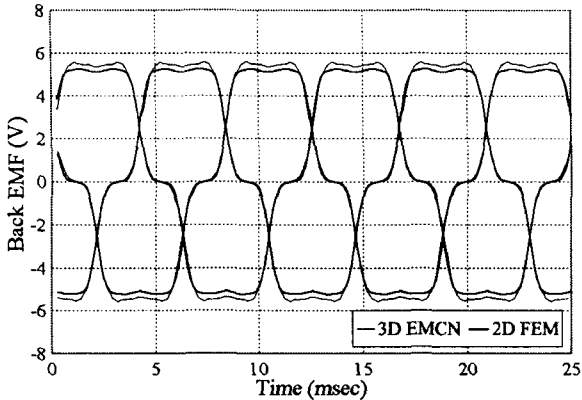
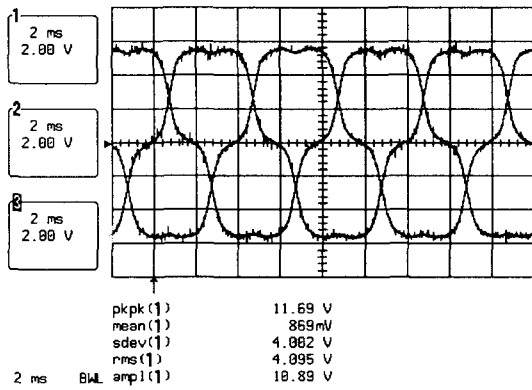


그림 15. 코깅토크 특성 비교

Fig. 15. Cogging torque characteristic by comparing the analysis result and the measured one



(a) Analysis result



(b) Experimental result

그림 16. 역기전력 특성 비교

Fig. 16. Back EMF characteristic by comparing the analysis result with the measured one

#### 4. 결론

본 논문에서는 영구자석 오버행 구조가 브러시리스 직류전동기의 특성에 미치는 영향을 정량적으로 해석하였다. 오버행을 효과적으로 해석하기 위해서 3차원 등가자기회로방법을 사용하였으며, 오버행 구조를 대칭 및 비대칭으로 각각 나누어 오버행 길이 및 상·하 비율의 변화에 따라 쇠교자속량, 역기전력, 자기력 등에 미치는 영향을 자세히 검토하였다. 해석결과로부터 오버행 효과가 고정자의 유효 쇠교자속량을 증가시키며, 역기전력 또한 오버행 길이에 비례하여 커짐을 확인하였다. 비대칭 오버행의 경우, 오버행의 상·하 비율이 축방향 자기력에 큰 영향을 미침을 알 수 있었으며 오버행 비율을 0.38로 했을 경우, 축방향 힘의 평형을 이루는데 가장 좋음을 알 수 있었다.

브러시리스 직류전동기는 PWM 인버터로 구동되므로, 보다 정확한 동작 특성 해석을 위해서는 PWM 인버터의 스위칭, 구동회로 전압방정식 등이 고려되어야 하고, 이것은 앞으

로 지속적인 연구를 통해 보완해야 할 과제이다. 본 연구결과는 영구자석을 사용하는 각종 전동기에 유용한 참고자료가 될 것으로 사료된다.

#### 감사의 글

본 연구는 일본학술진흥회 및 산업자원부에서 시행한 전력산업 인프라구축 지원사업으로 수행된 논문입니다.

#### 참고 문헌

- [1] J. P. Wang, D. K. Lieu, W. L. Lorimer and A. Hartman, "Influence of the permanent magnet overhang on the performance of the brushless dc motor," *Journal of Applied Physics*, vol. 83, no. 11, pp. 6362-6364, 1998.
- [2] G. H. Jang and J. W. Yoon, "Three dimensional analysis of magnetic force and torque in a BLDC motor due to the axial variation of yoke and pole," *IEEE Trans. on Magn.*, vol. 35, no. 5, pp. 3694-3696, Sep., 1999.
- [3] 河瀬 順洋, 山口 忠, 大野 友寛, "三次元有限要素法による薄形永久磁石回転機のコギングトルク解析," *日本電気学会 静止器・回転機合同研究会資料*, SA-01-35, RM-01-103, pp. 85-90, 2001.
- [4] I. S. Jung, J. Hur and D. S. Hyun, "Performance analysis of skewed PM linear synchronous motor according to various design parameters," *IEEE Trans. on Magn.*, vol. 37, no. 5, pp. 3653-3657, Sep., 2001.
- [5] T. K. Lin, Y. H. Chang, H. C. Huang, S. J. Wang, T. F. Ying, and D. R. Huang, "The dynamic performance affected by the axial magnetic force for a DVD spindle motor," *Journal of Magnetism and Magnetic Materials*, vol. 209, pp. 183-185, Feb., 2000.
- [6] 임달호, 홍정표, "3차원 등가자기회로방법에 의한 영구자석 모터의 자계 해석," *대한전기학회논문지*, vol. 43, no. 9, pp. 1432-1439, 1994.
- [7] J. Hur, Y. D. Chun, J. Lee and D. S. Hyun, "Dynamic analysis of radial force density in brushless DC motor using 3 dimensional equivalent magnetic circuit network method," *IEEE Trans. on Magn.*, vol. 34, no. 5, pp. 3142-3145, Sep., 1998.
- [8] 전연도, 허진, 홍정표, 이주, 현동석, "3차원 등가자기회로방법을 이용한 브러시리스 DC 모터의 코깅토크 저감에 관한 연구," *대한전기학회 논문지*, 제 47B권, 제 12호, pp. 2101-2107, 1998.

- [9] Y. H. Kim, C. S. Jin, S. Kim, Y. D. Chun and J. Lee, "Analysis of hybrid stepping motor using 3D equivalent magnetic circuit network method based on trapezoidal element," *Journal of Applied Physics*, vol. 91, no. 10, pp. 8311-8313, May, 2002.
- [10] J. Hur, D. S. Hyun, S. S. Kim, G. H. Kang and J. P. Hong, "Three dimensional eddy current calculation using magnetic scalar potential in conducting regions," *Journal of Applied Physics*, vol. 91, no. 10, pp. 8314-8316, May, 2002.
- [11] 양병렬, 권병일, 박승찬, "단상 BLDC 전동기의 토오크 리플 저감을 위한 공극 설계," *대한전기학회논문지*, 제 51B권 제 2호, pp. 49-54, 2002.
- [12] Y. D. Chun, J. Lee and S. Wakao, "Overhang effect analysis of brushless DC motor by 3D equivalent magnetic circuit network method," *IEEE Trans. on Magn.*, vol. 39, no. 5, pp. 1610-1613, May, 2003.
- [13] Y. D. Chun, S. Wakao and J. Lee, "Magnetic force characteristics according to the variation of asymmetric overhang ratio in brushless direct current motor," *Journal of Applied Physics*, vol. 92, no. 10, pp. 8775-8777, 2003.

## 저 자 소 개



### 전연도(全衍度)

1970년 3월 4일 생. 1996년 한양대 전기공학과 졸업. 1998년 동 대학원 전기공학과 졸업(석사). 2001년 동 대학원 전기공학과 졸업(공학). 2001년~2003년 일본학술진흥회 외국인특별연구원. 현재 한양대 BK21 기계분야 계약교수.

Tel.: (02) 2290-1782

E-mail : ydchun@ieee.org



### WAKAO Shinji(若尾 真治)

1965년 7월 7일생. 1993년 일본 와세다대학 대학원 이공학과 박사후기과정 수료(공학). 1996년~현재 와세다대학 전기·정보생명공학과 조교수. IEEE 등 회원.

Tel : +81-3-5286-3219

Email : wakao@waseda.jp



### 이주(李柱)

1963년 8월 30일 생. 1986년 한양대 전기공학과 졸업. 1988년 동 대학원 전기공학과 졸업(석사). 1988년~1993년 국방과학연구소 연구원. 1997년 일본 큐슈대학교 SYSTEM 정보과학연구과 졸업(공학). 1997년 한국철도기술연구원 선임연구원. 1997년~현재 한양대 공대 전자전기공학부 조교수.

Tel.: (02) 2290-0342

E-mail: julee@hanyang.ac.kr