

## 회전자 구조에 따른 브러시리스 모터 편심 특성 분석

(Analysis of the Eccentric Characteristics of the Brushless Motor by the Rotor Structure)

손병옥\* · 이 주\*\*

(Byoung-Ook Son · Ju Lee)

### Abstract

The brushless motor is getting widely applied to the automotive component with the advantage of the high efficiency, high reliability and etc.. Most of the motor applications require the low vibration and acoustic noise. The cogging torque is the one of the main cause of the noise and vibration. The step-skewed rotor is used to reduce the cogging torque. We analyze the characteristics of the step-skewed rotor and non skewed rotor with the same stator by using 2-dimensional FEM. And then we analyze the characteristics variation according to the rotor eccentricity. The prototype is made and tested. As the results, the step-skewed rotor structure reduce the cogging torque and local radial force but it is more sensitive to rotor eccentricity.

Key Words : Brushless Motor, Step-Skew Rotor, Eccentricity, Cogging Torque, Local Radial Force

### 1. 서 론

브러시리스 모터는 고 효율화, 고 신뢰성의 장점으로 산업계 전반에 적용되고 있으며 특히, 최근 자동차용 전장 모터 분야에 적용이 확대되고 있다. 자동차의 친환경성, 고연비, 사용자 쾌적성 등이 중시됨에 따라 모터에도 고 출력화, 경량화, 저소음, 저진동 등의 특성이 요구되고 있으며, 소음 진동 문제는 소비자 사용 환경에 직접 영향을 주어 엄격한 품질 특성이 요구되

고 있다.

브러시리스 모터의 소음 진동 요인은 여러 가지가 있다. 그중 코깅토크는 주요 인자중의 하나로서 스큐 방법, 코어형상, 착자 방법 등을 이용한 코깅토크 저감 방법이 제안되어 있는데 작업성, 경제성 측면에서 회전자에 스텝스큐를 적용하는 방법이 많이 응용되고 있다[1-2]. 한편, 대칭형상의 모터의 경우 회전자와 고정자 공극중심이 일치한다면 불평형 전자기력이 없지만, 조립 시 부품 오차나 구동 조건 등에 의해 회전자가 편심되어 회전할 경우에 불평형 가진력이 작용하게 된다. 불평형 가진력은 브러시리스 모터의 진동, 소음을 유발하며 제어 특성에도 영향을 주게 된다. 회전자 편심에 따른 모터 특성에 대한 해석, 분석에 관하여 여러 논문이 발표되고 있다[3-4].

본 논문에서는 회전자에 스큐를 적용하지 않은 기존

\* 주저자 : 한양대학교 전기공학과 박사과정, 대성전기(주)  
\*\* 교신저자 : 한양대학교 전기생체공학부 교수  
Tel : 02-2220-0349, Fax : 02-2295-7111  
E-mail : sonbach@naver.com  
접수일자 : 2010년 8월 11일  
1차심사 : 2010년 8월 21일  
심사완료 : 2010년 9월 13일

회전자와 스텝스큐를 적용한 회전자에 대해서 각각의 회전자가 편심 되었을 때의 역기전력, 코깁토크, 반경 방향 국속작용력 특성 변화에 대해 유한요소법을 이용하여 해석하고, 시제품을 제작하여 시험 결과와 비교 하였다. 아울러, 회전자 종류별 편심에 따른 반경방향의 전자기력 특성 변화를 유한요소법을 이용하여 해석하였다.

## 2. 모터 특성 해석

해석모델은 6극9슬롯 내전형 브러시리스 모터이다. 회전자 구조에 따른 특성을 비교하기 위하여 스큐를 적용하지 않은 회전자와 축 방향으로 3단의 스텝스큐가 적용된 회전자를 모델로 선정하였으며 동일 고정자에 적용하여 유한요소 해석을 실시하였다. 표 1은 해석모델의 설계 제원이며, 그림 1은 유한요소 해석을 위한 단면 형상, 그림 2는 각 회전자 해석 형상이다.

표 1. 해석모델 설계제원  
Table 1 Design parameter of the analysis model

구분	항목	값
고정자	슬롯수	9
	외경	84.0[mm]
	적층길이	39.0[mm]
	공극길이	1.0[mm]
회전자	극수	6
	외경	41.7[mm]
	적층길이	39.0[mm]
	영구자석	Nd소결
	착자방식	Parallel
	스큐방식	스텝스큐
	스큐각도	6.67[°]/스텝

### 2.1 코깁토크 해석

코깁토크는 회전자의 영구자석과 고정자 슬롯 개구간의 상호 작용력으로 발생하게 되며, 회전자 위치  $\theta$ 에 따른 코깁토크는 식 (1)과 같이 표현될 수 있다[2].

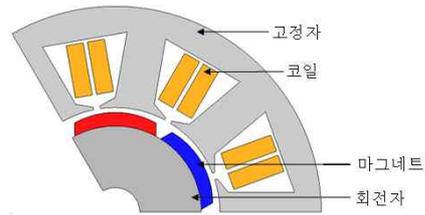
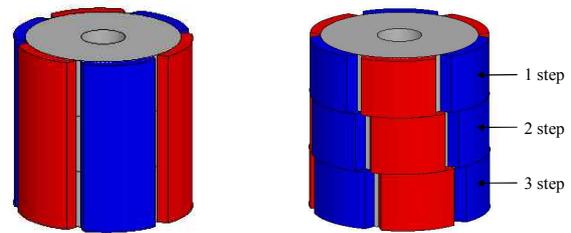


그림 1. 해석모델 단면도  
Fig. 1. Section drawing of the model



(a) 스큐미적용 회전자 (b) 스텝스큐 회전자

그림 2. 해석모델 회전자 형상  
Fig. 2. Shape of the analysis rotor

$$T_{cog} = \sum_{k=1}^{\infty} T_{ck} \cos(kQ\theta) \quad (1)$$

여기서  $k$ 는 코깁토크 고조파 차수,  $T_{ck}$ 는  $k$ 차의 코깁 주파수에서의 코깁토크 크기,  $Q$ 는 고정자 슬롯수를 나타낸다.

코깁토크를 감소시키기 위해서 고정자 또는 회전자에 스큐를 시행하는 것이 일반적인 방법이다. 고정자에 스큐를 시행할 경우 슬롯이 경사지어 적층되기 때문에 코일을 권선하는데 있어서 권선기 노즐이 제약을 받게 되어 코일 점적율이 저하되는 단점이 있다. 한편 회전자에 스큐를 적용하는 방식은 영구자석을 직접 스큐를 적용하여 제작하는 것과, 일직선의 영구자석으로 부착되어 있는 회전자를 축 방향으로 분할한 뒤, 각 단의 회전자를 원주방향으로 일정 각도 회전시켜 결합함으로써 각 단의 코깁토크를 상호 상쇄시키는 스텝스큐 방식이 있다. 영구자석에 직접 스큐를 적용하여 제작하게 되면 영구자석 소모량이 증가하여 재료비가 상승하게 되며 정확한 착자 파형 구현이 어려운 단점이 있어 가격과 조립성을 고려하여 스텝스큐 방식이 널리 사용되고 있다. 최적의 스큐 각도는

회전자 구조에 따른 브러시리스 모터 편심 특성 분석

다음 식 (2)와 같이 계산된다[1].

$$\theta_{skew} = \frac{2\pi}{N_p Q} \quad (2)$$

$$N_p = \frac{P}{HCF\{Q, P\}} \quad (3)$$

여기서 P는 극수, HCF는 극수와 슬롯수의 최대공약수를 나타낸다. 이를 바탕으로 회전자의 스텝스큐 분할 수를  $N_{step}$ 이라 한다면, 코깅토크를 최소화 할 수 있는 스텝스큐 각도는 식 (4)와 같이 결정될 수 있다. 3-스텝 구조가 제작성과 성능 면에서 우수한 것으로 알려져 있어 보편적으로 사용되고 있으며 6극9 슬롯 구조의 경우, 각 스텝별 각도는 6.67도의 위상차가 된다.

$$\theta_{step} = \frac{\theta_{skew}}{N_{step}} \quad (4)$$

스텝스큐를 적용하였을 때의 코깅토크 식은 식 (5)와 같이 표현될 수 있으며, 각 스텝 별 코깅토크 계산값을 중첩하여 특성을 계산할 수 있다. 2차원 유한요소법을 이용하여 스텝스큐 특성을 해석하기 위해 적층 방향으로 3분할 한 후, 각 스텝 별로 스텝스큐된 위상차  $\theta_{step}$  만큼 회전하여 코깅토크를 해석한다. 각 해석 결과 값을 합하면 스텝스큐된 코깅토크 특성을 얻을 수 있다.

$$T_{cog} = \sum_{n=1}^{N_{step}} \sum_{k=1}^{\infty} T_{ck} \cos \{k Q (\theta - (n-1) \times \theta_{step})\} \quad (5)$$

그림 3과 그림 4는 각 회전자 조건별 코깅토크에 대한 유한요소 해석 결과이다. 스텝스큐 적용 회전자의 경우 각 스텝의 코깅토크 발생 파형이 정현적이면 코깅토크는 0이 된다. 스텝스큐 회전자 해석모델에 대해 코깅토크를 해석한 결과 각 스텝의 코깅토크 파형은 정현적이 아니므로 코깅토크는 0이 되지 않는 것으로 나타났다. 스텝스큐 미적용 회전자에 비해 코깅토크가 현격히 저감되고 주파수는 증가됨을 알 수 있다.

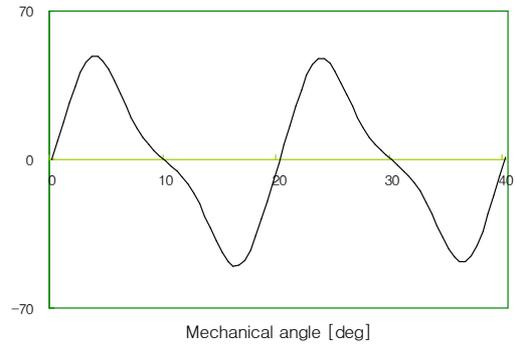


그림 3. 스큐 미적용 회전자 코깅토크 해석파형  
Fig. 3. Cogging torque analysis results (No skew rotor)

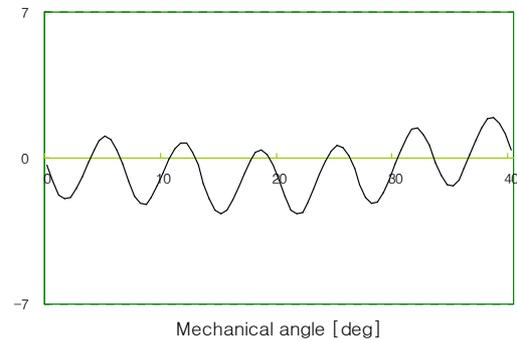


그림 4. 스텝스큐 적용 회전자 코깅토크 해석파형  
Fig. 4. Cogging torque analysis results (Step skew rotor)

## 2.2 역기전력 해석

역기전력은 시간당 자속 쇄교량의 변화량으로부터 구할 수 있게 된다. 유한요소법을 이용하여 각 회전자의 역기전력을 계산할 때 스텝스큐 회전자에 대해서는 각 스텝 별로 역기전력을 중첩하여 계산할 수 있다.

그림 5는 스텝스큐 회전자의 역기전력 해석파형으로서 점선은 각 스텝별 역기전력 값이고, 실선은 중첩하여 계산된 전체 스텝스큐 회전자의 역기전력 값이다. 회전자 구조에 따른 역기전력 해석 결과, 스텝스큐 적용 회전자의 역기전력 피크치는 3.45[V], 미적용 회전자는 3.56[V]로서 스텝스큐 적용 회전자 역기전력이 약 3% 감소되는 것을 알 수 있었다.

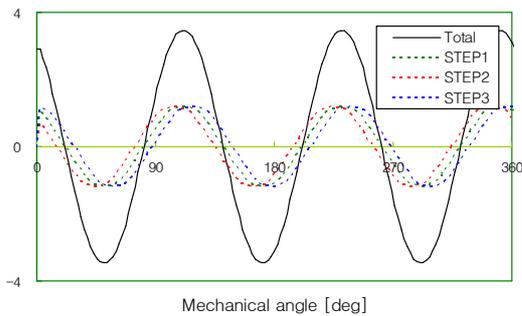


그림 5. 스텝스큐 회전자 역기전력 해석 결과 (@1,000rpm)

Fig. 5. Analysis results of BEMF(Step skew rotor)

### 2.3 반경방향 국소작용력

회전자 영구자석과 자성체로 이루어진 고정자 사이에 반경방향으로 작용하는 국소작용력은 맥스웰 응력 텐서를 이용하여 구할 수 있으며, 원통 좌표계를 사용하여 고정자 표면에 작용하는 반경 방향 및 접선 방향의 자기력은 다음과 같이 계산될 수 있다.

$$f_r = \frac{1}{2\mu_0} (B_r^2 - B_\phi^2 - B_z^2) \quad (6)$$

$$f_\phi = \frac{1}{\mu_0} B_r B_\phi \quad (7)$$

여기서  $\mu_0$ 는 공기중 투자율,  $B_r$ 은 반경방향,  $B_\phi$ 는 접선방향,  $B_z$ 은 축방향의 자속밀도이다. 한편, 스텝스큐가 적용된 회전자의 경우, 각 스텝별 위상차  $\theta_{step}$ 을 고려하여 중첩 계산하도록 한다.

$$f_{r_{step\ skew}} = \sum_{n=1}^{N_{step}} f_r \{ \theta - (n-1) \times \theta_{step} \} \quad (8)$$

$$f_{\phi_{step\ skew}} = \sum_{n=1}^{N_{step}} f_\phi \{ \theta - (n-1) \times \theta_{step} \} \quad (9)$$

유한요소법을 이용하여 각 회전자 구조에 따른 공극 자속밀도 분포 특성을 그림 6과 같이 얻을 수 있었고, 식 (6), 식 (8)을 이용하여 각 회전자 구조에 따른 반경방향 국소 작용력을 계산하였다.

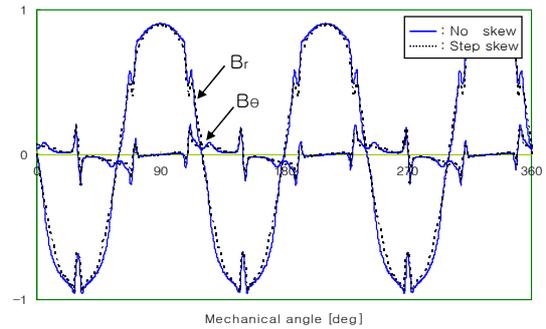


그림 6. 회전자 구조별  $B_r, B_\theta$  해석결과

Fig. 6. Analysis result of  $B_r, B_\theta$  of the each rotor

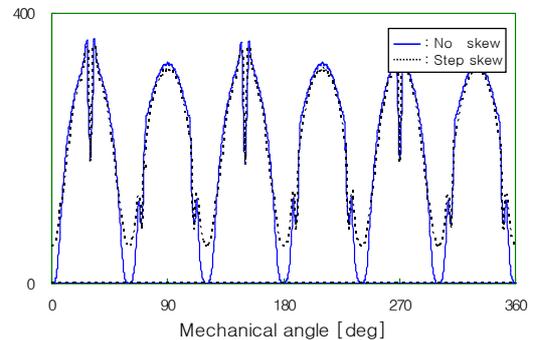


그림 7. 회전자 구조별 반경방향국소작용력해석결과

Fig. 7. Analysis result of local radial force of the each rotor

스큐 미적용 회전자의 반경방향 국소 작용력은 약 361[kPa], 스텝스큐 적용 회전자는 약 344[kPa]로서 스텝스큐를 적용한 회전자가 반경방향 국소작용력이 약 4.9[%] 감소함을 알 수 있었다.

### 3. 회전자 편심에 따른 특성 해석

편심은 회전 중심축으로부터 회전자의 기하학적 중심 축간의 이격 거리로서, 모터가 회전할 때 풀리, 기어등의 부품, 조립 공차에 의해 회전자가 반경 방향력을 받음으로써 편심이 발생되기도 한다. 본 논문에서는 회전자 샤프트 끝단에 작용하는 편심력에 의해 그림 8과 같이 회전자에 편심이 발생될 때, 편심량 d에 따른 특성 영향을 분석하고자 한다. 편심된 회전자에 대한 특성 해석은 스텝스큐 회전자 해석 방법과 유사

회전자 구조에 따른 브리시리스 모터 편심 특성 분석

하계 2차원 유한요소법을 이용하여 해석한다. 그림 9와 같이 편심된 회전자에 대해 축 방향으로 임의의 개수( $N_{ecc}$ )로 분할한 뒤, 각 스텝면의 중심을 회전자 편심량 ( $N_{ecc}/d$ )에 해당하는 만큼 이동하여 2차원 유한요소 해석을 실시한다. 스퀘 미적용 회전자의 경우, 마그네트 간의 위상차가 없으므로 동일 위상에 대하여 중첩하여 특성을 계산하고, 스텝 스퀘 적용 회전자의 경우, 각 스텝별 위상차를 적용, 중첩하여 특성을 구한 도록 한다. 편심된 회전자에 대한 코깅토크, 역기전력, 반경방향 국소작용력은 각각 식 (10), (11), (12)와 같이 표현될 수 있으며, 스텝스큐 회전자의 경우  $\theta_{step}$ 는 6.67도, 스퀘 미적용 회전자의 경우,  $\theta_{step}$ 은 0이 된다.

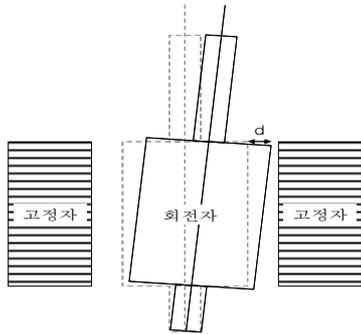


그림 8. 회전자 편심 도해  
Fig. 8. Diagram of the eccentric rotor

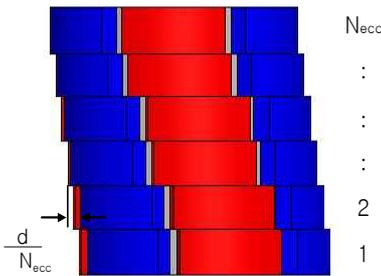


그림 9. 편심된 회전자 2차원 모델링  
Fig. 9. 2D modeling of eccentric rotor

$$T_{cog} = \sum_{m=1}^{N_{ecc}} \sum_{n=1}^{N_{step}} \sum_{k=1}^{\infty} T_{ck} [\cos k Q \{ \theta - (n-1) \times \theta_{step} \}] \quad (10)$$

$$E_{ecc} = \sum_{m=1}^{N_{ecc}} \sum_{n=1}^{N_{step}} E \{ \theta - (n-1) \times \theta_{step} \} \quad (11)$$

$$f_{r_{ecc}} = \sum_{m=1}^{N_{ecc}} \sum_{n=1}^{N_{step}} f_r \{ \theta - (n-1) \times \theta_{step} \} \quad (12)$$

코깅토크는 회전자 편심에 의해 영향을 받는데, 특히 스텝스큐 회전자 구조가 민감하게 영향을 받을 수 있었다. 스텝스큐 회전자 구조는 각 스텝의 균일한 코깅토크 량과 위상차를 이용하여 상쇄시키는 원리인데, 회전자 편심이 발생될 경우 각 스텝의 코깅토크의 크기가 달라져 상쇄가 되지 않게 되어 증가하게 된다. 표 2의 회전자 편심별 해석결과에서 보는 바와 같이 회전자 편심량이 0일때와 0.5일 때의 스퀘 미적용 회전자의 코깅토크는 99[mNm]에서 116[mNm]로 약 17[%] 증가되었고, 스텝스큐 회전자의 코깅토크는 3.0[mNm]에서 7.0[mNm]로 약 156[%] 증가되었다.

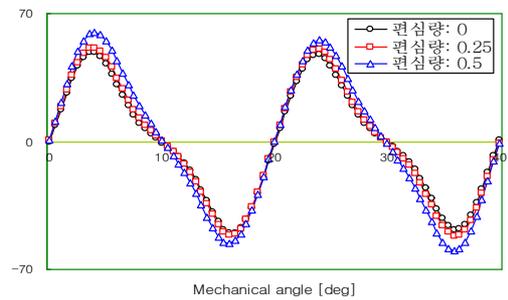


그림 10. 편심량에 따른 코깅토크해석(스큐미적용)  
Fig. 10. Cogging torque via. rotor eccentricity (No skew rotor)

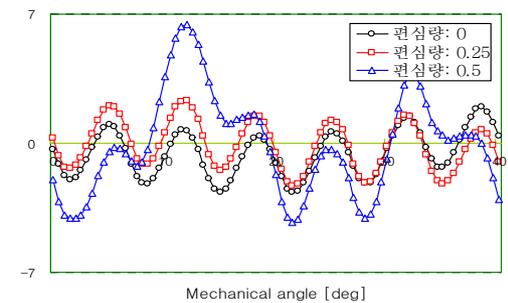


그림 11. 편심량에 따른 코깅토크 해석(스텝스큐 회전자)  
Fig. 11. Cogging torque via eccentricity (Step skew rotor)

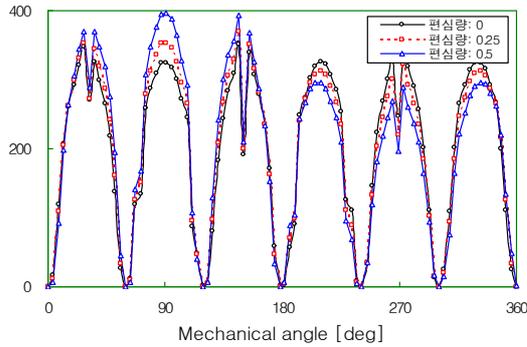


그림 12. 편심량에 따른 반경방향력(스큐미적용)  
Fig. 12. Local radial force via eccentricity  
(No skew rotor)

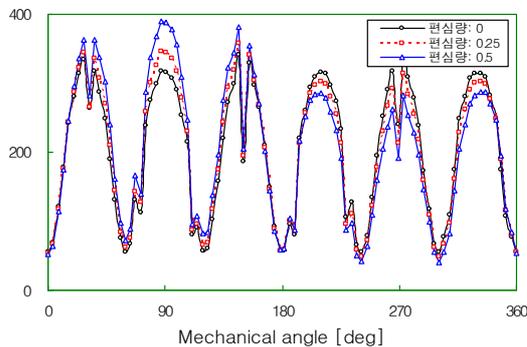


그림 13. 편심량에 따른 반경방향력(스텝스큐회전자)  
Fig. 13. Local radial force via eccentricity  
(Step skew rotor)

한편 회전자 편심량  $d$ 의 변동에 따른 각각의 특성들을 해석한 결과, 역기전력 특성은 회전자 편심량에 큰 영향을 받지 않는다. 이는 고정자 권선이 고정자 코어에 균등하게 분포되어 감겨 있기 때문에 회전자가 편심되어도 공극이 좁아진 곳과 반대쪽과는 일정하게 회전자가 위치하므로 편심의 영향이 상쇄되기 때문이다. 그림 12, 그림 13은 각 회전자의 편심량에 따른 반경방향 국소 작용력 해석 결과이다. 스텝스큐 회전자 구조의 반경방향 작용력의 피크치는 스큐 미적용 회전자에 비해 약 3~5[%] 작다. 이는 스텝스큐 회전자는 각 스텝의 영구자석에 위상차가 존재하기 때문에 자속이 분산 분포되어 반경방향 국소작용력이 감소되는 것에 기인한 것으로 사료된다. 회전자 편심량이 0 일 경우, 각 회전자별로 반경 방향 작용력의 분포는 원

주면을 따라 균일하게 분포하나, 회전자가 편심 됨에 따라 공극길이가 짧아진 곳(0~180도)으로 반경 방향 작용력이 집중되어 증가하고, 반대방향(180~360도)은 상대적으로 반경방향 작용력이 감소하게 된다. 회전자별 반경방향 작용력의 피크치 증가율 및 감소율은 두 구조 모두 비슷하게 변동하게 된다.

각 회전자 조건별로 회전자 편심에 따른 특성에 대해 유한 요소법을 이용하여 해석한 결과는 표 2와 같다.

표 2. 회전자 조건별 특성해석 결과  
Table 2. Analysis results of the each condition

항 목	조 건		스텝스큐 회전자		스큐미적용 회전자	
	편심: 0	편심: 0.5	편심: 0	편심: 0.5	편심: 0	편심: 0.5
역기전력[Vpk]	3.45	3.45	3.56	3.54		
코깅토크[[mNm](pk-pk)]	3.0	7.7	99	116		
반경방향력[kPa]	344	397	361	405		

#### 4. 시제품 제작 및 시험

회전자 종류와 편심량에 따른 특성 변화를 검토하기 위하여 시제품을 제작하여 시험을 실시하였다. 시제품은 그림 14의 (a), (b)와 같이 스텝스큐 미적용, 적용 회전자를 제작하였고, 동일한 고정자에 각각 조립하였다. 아울러 회전자 편심량이 0과 0.5가 되도록 베어링 안착부 위치를 조정하여 각각의 하우징을 제작하여, 각 회전자 별로 조립하여 편심량에 따른 특성을 시험하였다.



(a) 기존 회전자 (b) 스텝스큐 회전자 (c) 모터 시제품

그림 14. 모터 시제품  
Fig. 14. Prototype of the test motor

## 회전자 구조에 따른 브러시리스 모터 편심 특성 분석

제작된 각 모터에 대해 역기전력과 코깅토크를 측정하여 회전자 종류와 편심조건에 따른 특성 변화를 확인하였다. 역기전력은 전용 측정 JIG를 이용하여 1,000[rpm]에서 측정하였는데, 스텝스큐를 적용하지 않은 회전자의 역기전력이 스텝스큐 회전자보다 약 2[%] 역기전력이 크게 측정되었으며, 회전자 편심에 따른 역기전력의 크기는 두 회전자 모두 변동이 없음을 확인하였다. 역기전력 특성은 해석치와 일치함을 확인하였다.

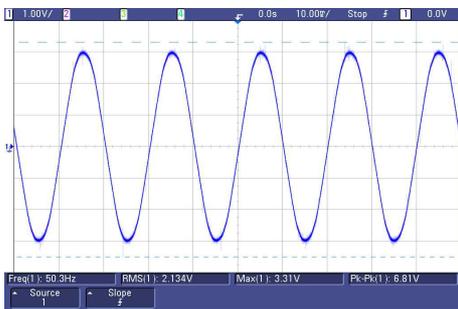


그림 15. 역기전력 측정파형  
Fig. 15. Measured data of BEMF

한편 코깅토크는 그림 16과 같이 전용 토크 미터 (SUGAWARA사 ATM-2)를 이용하여 측정하였다.



그림 16. 코깅토크 시험장치  
Fig. 16. Apparatus of the cogging torque

각 샘플 조건별 코깅토크 측정결과는 그림 17 과 같다. 측정결과, 스큐 미적용 회전자는 해석치와 유사한 측정 파형을 확인하였다. 스텝스큐 회전자의 코깅토크 시험 결과, 편심량에 따라 코깅토크가 증가하나 해석치와 시험치가 오차가 발생하였다. 이는 스텝스큐 회전자의 경우, 각 스텝 별 착자량, 위상차가 균일한

조건일 경우에 각 스텝의 코깅토크가 완전히 감소하게 되는데, 실제 제작 시에 각 영구자석 별 치수, 조립 공차, 착자량 산포등의 편차가 발생함에 따라 코깅토크가 증가한 것으로 사료된다. 따라서 스텝스큐 회전자 조립은 각 영구자석의 중량, 치수 등의 부품 별 릿트 관리, 조립라인 설비 자동화를 통한 조립 치수관리, 착자 요크의 착자량 관리등 정밀 생산기술이 요구되는 것으로 사료된다. 아울러 부품 공차 및 조립 산포와 코깅토크 특성 민감도에 대해 분석하여 코깅토크 감소 방법에 대한 연구가 필요한 것으로 사료된다.

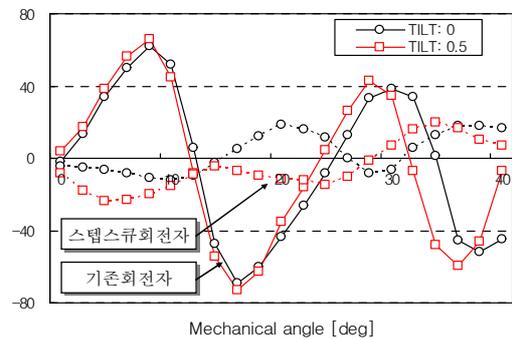


그림 17. 코깅토크 측정파형  
Fig. 17. Measured data of cogging torque

표 3. 회전자 조건별 시험 결과  
Table 3. Test results of the each rotor

항 목	조 건		스큐미적용 회전자	
	편심: 0	편심: 0.5	편심: 0	편심: 0.5
역기전력[Vpk]	3.25	3.25	3.31	3.30
코깅토크[[mNm](pk-pk)]	30.5	43.5	131.1	135.4

## 5. 결 론

본 논문에서는 브러시리스 모터의 회전자 종류별 편심량에 따른 특성 변화를 검토하였다. 회전자는 스텝스큐를 적용한 회전자와 미적용 회전자로 구분하였고, 각 회전자 종류 및 편심량에 따라 역기전력, 코깅토크, 반경방향력 특성에 대하여 2차원 유한요소법을 이용하여 해석하였다. 해석결과 스텝스큐 적용 회전자가 스큐 미적용 회전자에 비해 역기전력 특성은 약 3[%], 반경방향력은 4.9[%] 정도 미소하게 감소하는데, 코깅

토크 특성은 99[mNm]에서 3[mNm]로 급격하게 감소함을 알 수 있었다. 한편 각 회전자별로 회전자 편심량(0.5[mm])에 따라 특성을 해석한 결과 두 종류의 회전자 모두 역기전력의 변화는 거의 없었으며, 반경방향력은 약 12~15[%]로 비슷하게 증가하였다. 코깅토크 특성은 스큐 미적용 회전자가 17[%] 증가한 반면에 스텝스큐 회전자가 약 155[%] 증가하여 스텝스큐 회전자가 민감하게 변함을 알 수 있었다.

회전자 조건별로 시제품을 제작하여 편심에 따른 역기전력과 코깅토크 특성 시험을 실시하였다. 스큐 미적용 회전자의 코깅토크 특성과형은 해석치와 일치하나, 스텝스큐 적용 회전자는 시험치와 오차가 발생하였다. 향후 스텝스큐 회전자에 대해 코깅토크와 설계, 제작변수 민감도에 대한 연구가 필요한 것으로 사료된다.

#### 감사의 글

본 연구는 2010년도 지식경제부의 재원으로 한국에너지기술평가원(KETEP)의 지원을 받아 수행한 연구과제입니다. (No. 2010T100100630)

#### References

- [1] Nicola Bianchi and Silverio Bolognani, "Design Technique for Reducing the Cogging Torque in Surface-Mounted PM Motors", IEEE Trans. on Industry applications, vol 38, no.5, pp. 1259-1265, Sep 2002.
- [2] Z.Q.Zhu, David Howe, "Influence of Design Parameters on Cogging Torque in Permanent Magnet Machines", IEEE Trans. on Energy Conversion, vol 15, no. 4, pp. 407-412, Dec 2000.
- [3] Ungtae Kim, Dennis K. Lieu, "Magnetic Field Calculation in Permanent Magnet Motors with Rotor Eccentricity: With Slotting Effect Considered", IEEE Trans. on Magnetics, vol.34, No. 4, pp. 2253-2266, July 1998.
- [4] 황근배, 김경태, 황상문, "회전자 편심을 가지는 IPM, SPM 진동특성 비교 : (1) 영구자석에 의한 가진력", 한국소음진동공학회 논문집 제11권 제9호, pp 454-461, 2001.

#### ◇ 저자소개 ◇



##### 손병욱(孫炳旭)

1970년 6월 15일생. 1994년 한양대학교 전기공학과 졸업. 1996년 동 대학원 전기공학과 졸업(석사). 2006년~현재 동 대학원 박사과정. 현재 대성전기(주) 수석연구원.



##### 이 주(李 柱)

1963년 8월 30일생. 1986년 한양대 전기공학과 졸업. 1988년 동 대학원 전기공학과 졸업(석사). 1988~1993년 국방과학연구소 연구원. 1997년 일본 큐슈대학교 SYSTEM 정보과학연구과 졸업(박사). 1997년 한국 철도기술연구원 선임연구원. 1997년~현재 한양대학교 전기제어생체공학부 교수.