

# 세그먼트 극을 가진 BLDC 전동기의 가진력에 관한 연구

論 文  
48B - 10 - 2

## Effects of Segmented Poles on Exciting Forces for BLDC Motors

金 京 泰\* · 黃 彦 文\*\*  
(Kyung Tae Kim · Sang Moon Hwang)

**Abstract** - This paper investigates effects of segmented poles on exciting forces such as cogging torque, BEMF, phase current, torque ripple and local forces. Cogging torque, BEMF and local force are determined by FEM analysis and phase current is calculated using voltage equations after determining BEMF and phase inductance. Effective dead zones at pole separations result in wider than the physical dead zones due to leakage field during magnetization. Due to the existence of dead zones, there exist additional exciting harmonics of the cogging torque which play adverse effect on vibration and noise performance. The magnitude of BEMF is decreased and the waveforms are also distorted depending on dead zone positions. Segmented poles inevitably cause uneven magnetic field distribution at pole separations which introduces additional harmonics of exciting forces which are detrimental to structural resonances. They also decrease motor efficiency by reducing effective phase BEMF.

**Key Words** : Cogging Torque, Mutual torque, Phase current, Radial traction, Segmented poles

### 1. 서 론

영구자석 BLDC(Brushless Direct Current)전동기는 기존의 DC 전동기의 브러시와 정류자를 반도체 소자들을 이용한 인버터로 대체시켜 전자적으로 정류를 하는 전동기이다. 최근 고에너지 영구자석 재료의 출현과 반도체 소자 기술의 발달에 따라 고성능, 고폭특성을 요하는 가전기구동분야용으로 적용이 확대되고 있다. 또한, BLDC 전동기의 성능 향상 및 진동, 소음 저감을 위한 영구자석의 형상설계에 관한 연구는 활발히 이루어지고 있다. Hwang은 영구자석 설계변수에 대해 코깅토크의 민감도 해석을 수행하여 코깅토크를 저감하였고[1], Jang은 유한요소 해석을 이용하여 잇날 표면에 작용하는 반경 방향의 힘을 해석하여, 가진력의 고조파성분을 제거할 수 있는 영구 자석 맞물림(intertlocking) 형상을 제안하였다[2]. 또한, R. Carlson등은 적절한 전류제어에 의해 토크 맥동을 저감할 수 있음을 보여주고 있다[3]. 그러나 이전의 연구 결과는 일반적인 연속형 극(continuous type poles)을 갖는 BLDC 전동기의 성능 및 특성평가에 연구이며, 생산성 향상 및 제조원가에 유리한 세그먼트형 극(segmented type poles)으로 구성된 BLDC 전동기에 대한 정보는 제공하지 못하고 있다.

영구자석의 잔류자속밀도 및 자화상태는 코깅토크, 전류

파형, 토크 맥동, 반경 방향의 견인력등의 출력 특성에 많은 영향을 미치므로, 전동기의 출력 특성 해석에 앞서 영구자석의 자화의 세기와 자화상태를 구하는 것이 중요하다[4]. 세그먼트형(segmented type) 영구자석을 다극착자하였을 경우, 프로브(probe)의 크기 때문에 가우스 미터(meter)를 이용하여 영구자석의 자화 상태를 실험에 의하여 직접 구하는 것은 불가능하다[5]. 또한, 착자시 누설 자속의 영향으로 인해 영구자석의 dead zone 각을 실험으로 결정하기는 더욱 힘들다.

본 논문에서 영구 자석의 자화 분포 형태에 크게 의존하는 코깅 토크의 실험결과와 유한요소해석에 의한 결과를 통해 세그먼트 dead zone의 영향을 분석하였다. 이러한 결과를 토대로하여 세그먼트형 극 BLDC 전동기를 2차원 비선형 유한요소법을 이용하여 코깅토크, 상전류, 역기전력, 유우츄얼 토크 및 반경반향 견인력을 분석하였다. BLDC 전동기 내에 작용하는 코깅토크는 맥스웰 응력 텐서(Maxwell stress tensor)를 이용하여 계산하였으며, 유우츄얼 토크는 전압방정식에 의해 산정된 상전류와 유한요소해석을 통하여 구한 역기전력을 이용하여 계산하였다. 이 결과를 활용해 시작전동기의 전자기회로를 해석함과 동시에 전동기 잇날 각 부분의 힘을 모델링하여 위의 소음발생 추정인자들이 소음에 미치는 영향과 관련특성을 고찰하였다.

### 2. 영구자석 자화 분포 특성

본 논문에서 사용한 세탁기 구동용 BLDC 전동기의 모델은 그림 1에서와 같이 36슬롯, 48극의 구조를 가지고 있으며, 영구자석은 다극착자된 세그먼트형의 페라이트(ferrite)

\* 準 會 員 : 釜山大 機械設計工學科 碩士課程

\*\* 正 會 員 : 釜山大 機械工學部 및 機械技術研究所  
助教授 · 工博

接受日字 : 1999年 6月 23日

最終完了 : 1999年 9月 20日

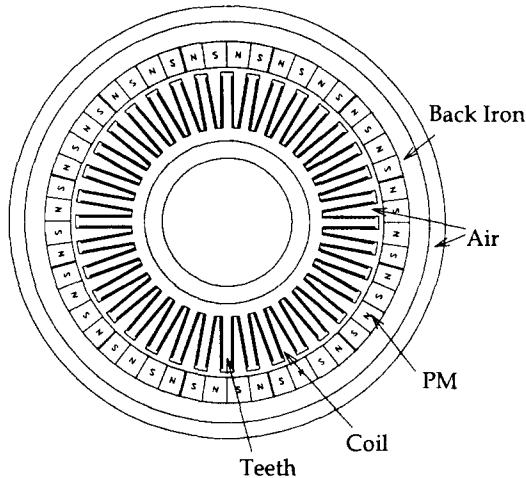


그림 1 시작기 전동기의 구조도  
Fig. 1 Schematic of a motor to be analyzed

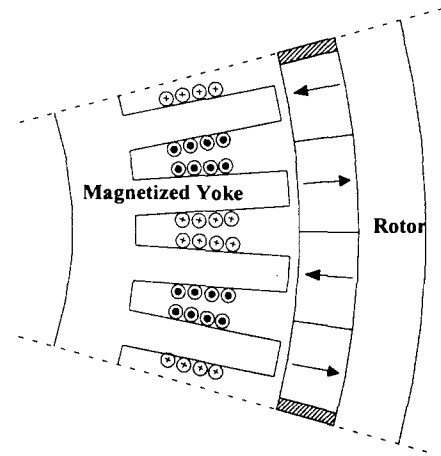


그림 3 영구 자석 착자기  
Fig. 3 Magnetizing fixture

표 1 해석 모델의 사양  
Table 1 The specification of analysis model

항 목		사 양
공 극		1 mm
고정자 (SC 60)	슬롯수	36
	고정자 외경	132.5 mm
	고정자 잇날 크기	5 degree
	상저항	3.5Ω
	상인덕턴스	24.43mH
	상당 권선수	96 turns
	적층폭	42mm
회전자 (Ferrite)	영구자석두께	7 mm
	극수	48
	잔류자속밀도	0.4 [T]
정격 출력		250 W
최대 인가 전압		290 V

의 재료이다. 고정자는 3상 Y결선이며, 인버터는 3상중 2상이 동시에 동작되는 120° 구형파 통전방식이다. 해석 전동기에 적용된 자세한 기계적 및 전기적 제원은 표1과 같다.

그림 2는 연속형 극과 세그먼트형 극의 자화 상태를 나타내고 있다. 세그먼트형 극의 경우 영구자석을 회전자에 접

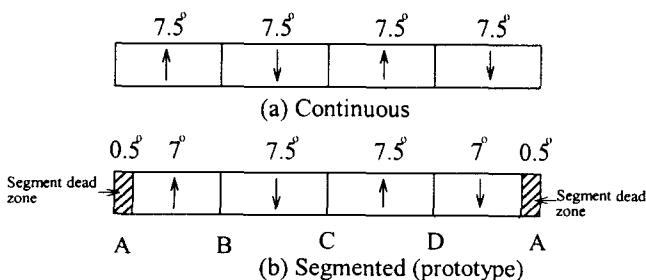


그림 2 영구 자석의 착자 상태  
Fig. 2 Magnetization Status

합하기 위한 가공허용오차를 고려하여 세그먼트 극천이구간에서는 0.5°의 공기영역이 존재하게 된다.

영구자석의 자화상태 및 dead zone 각은 코깅토크, 전류 파형, 토크 맥동등 전동기의 특성에 영향을 많이 미치므로, 영구 자석의 자화의 상태를 정확히 예측할 필요가 있다. 최근, 착자 과정의 해석을 통하여 영구자석의 자화 분포를 구하는 방법을 사용하는 예가 있으나, 착자시의 조건 변화등에 의하여 정확한 자화의 분포를 예측하기는 힘들다[7].

그림 3는 영구자석의 착자 과정을 보여주고 있다. 4턴을 가지는 코일에 5kA의 전류를 공급함으로써 영구자석의 잔류 자속밀도가 0.4T, 반경방향의 자화가 되도록 착자한다.

그림 4와 그림 5는 각각 회전자의 영구자석이 단락상태일 경우에 가우스 미터(일본전자측기주식회사, Model : P-3 (수직형))를 이용하여 측정된 영구 자석의 자속밀도분포와 유한 요소 해석을 통한 시뮬레이션 결과를 나타내고 있다. 그림 4에서와 같이 착자 조건의 변동 및 프로버의 크기에 기인한 평균효과에 의해 영구자석의 표면 자속밀도분포는 세그먼트 극의 영향을 관찰하기 힘들고, 또한 비대칭적으로 측정됨을 알 수 있다. 따라서, 영구자석의 자화상태 및 dead

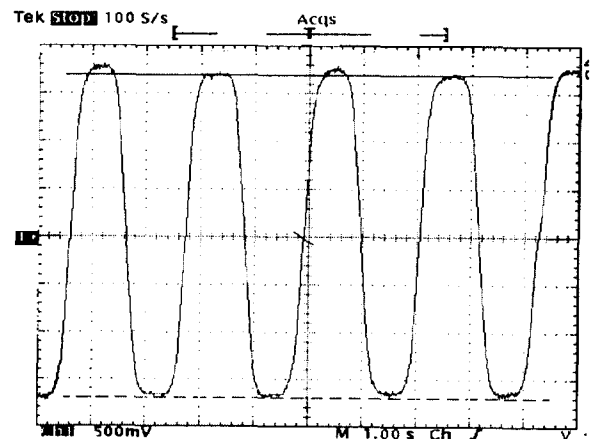


그림 4 영구자석 표면의 자속밀도 분포(0.05T/div)  
Fig. 4 Experimental result of flux density distribution(0.05T/div)

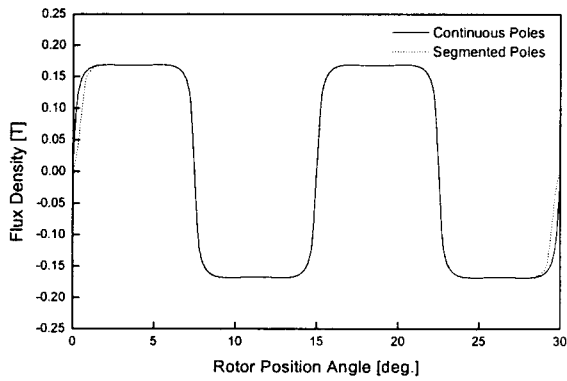


그림 5 유한요소법을 이용한 영구자석 표면의 자속밀도 분포  
Fig. 5 Simulation result of flux density distribution

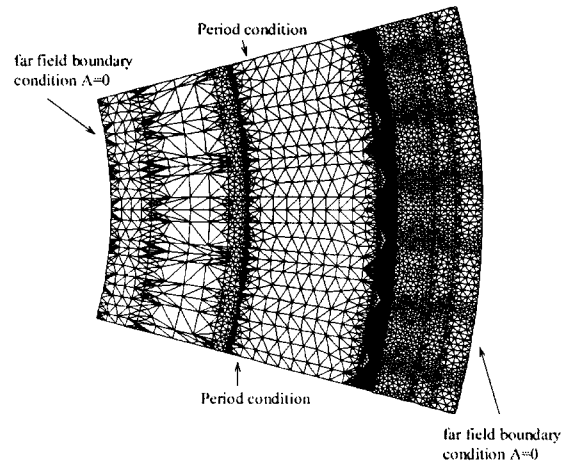


그림 6 해석 모델의 요소 분할도  
Fig. 6 Finite element mesh of the model

zone 각을 실험으로 직접 예측하기는 어려움이 있음을 확인할 수 있다. 따라서, 본 논문에서는 세그먼트형 극 BLDC 전동기에서 세그먼트 간격의 영향을 확인하기 위해 세그먼트 극원이 구간을 제외하고는 완전 착자(full magnetization)라 가정하였다.

### 3. 코깅토크의 해석

연속형 극과 비교하여 세그먼트형 극에서는 영구자석에 의한 자계 분포의 변화를 발생시키므로, 부하전류와 상관없이 작용하는 코깅토크를 변화시키게 된다. 코깅토크의 해석은 자기 벡터 포텐셜 A를 계산하는 상용 유한요소프로그램(ANSYS E-mag)을 이용하여 전동기 내의 전자기장을 해석한 후 맥스웰 응력법(Maxwell stress method)에 의해 산정하였다. 그림 6는 해석모델에 대한 요소분할도로서 전동기의 구조와 경계조건을 나타내고 있다. 전동기의 자기적인 주기성과 주기 경계조건을 사용하여 전체의 1/12분만을 해석영역으로 하였으며 10944개의 삼각요소와 7535개의 질점으로 구성되어 있다.

맥스웰 응력법에 의하면 전동기 내의 총 토크는 공극 내의 폐면을 따라 토크 밀도를 적분함으로써 구해지므로 2차원 모델에 대해 식(1)과 같이 주어진다.

$$T(\theta) = \frac{1}{\mu_0 \Gamma} \int r \cdot B_r \cdot B_\theta d\Gamma = \sum_{n=1}^{\infty} A_n \sin(n\theta + \Psi_n) \quad (1)$$

여기서,  $\mu_0$ 는 공기의 투자율,  $\Gamma$ 는 임의의 폐면을 따른 적분 경로이고,  $r$ 는 반경 방향의 거리,  $h$ 는 전동기의 적층 길이,  $B$ 는 자속 밀도,  $A_n$ 는 푸리에 계수의 크기,  $\Psi_n$ 는 푸리에 계수의 위상을 나타낸다.

그림 7은 세그먼트형 극원이 간격을  $0.5^\circ$ 와  $1^\circ$ 로 고려하였을 경우 연속형 극에 비교하여 세그먼트형 극의 코깅토크 시뮬레이션 결과를 나타내고 있다. 그림 8은 각각의 경우에 대하여 푸리에 전개(fourier expansion)하였을 경우의 푸리에 계수의 크기를 보여주고 있다.

그림 7에서 코깅토크는 세그먼트 dead zone 각의 증가에 따라서 그 크기 및 주기성이 대폭 변화됨을 알 수 있다. 코

깅토크의 최대값으로 표시하였을 경우, 연속형 극에 비해 세그먼트형 극의 경우 약 80%의 증가되는 양상을 볼 수가 있다. 연속형 극 회전자의 경우 코깅토크의 주기는  $360^\circ$ 에 극수(48)와 고정자 슬롯수(36)의 최소공배수를 나누어 준 값이 되므로, 코깅토크의 기본 주파수는 회전 주파수의 144배수차에 해당한다. 그러나, 세그먼트형 극 구조를 가진 회전

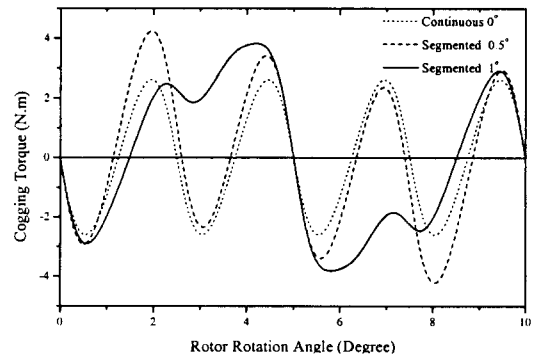


그림 7 시뮬레이션에 의해 산정된 코깅토크  
Fig. 7 Simulated cogging torque

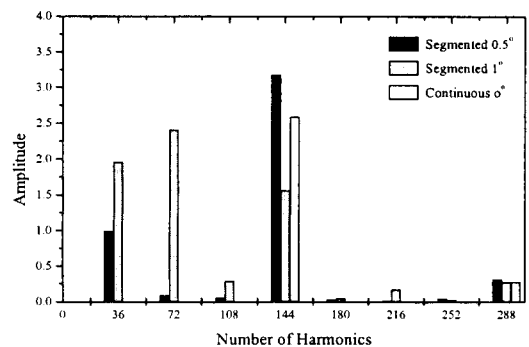


그림 8 코깅토크의 주파수 스펙트럼  
Fig. 8 Frequency spectra(simulated)

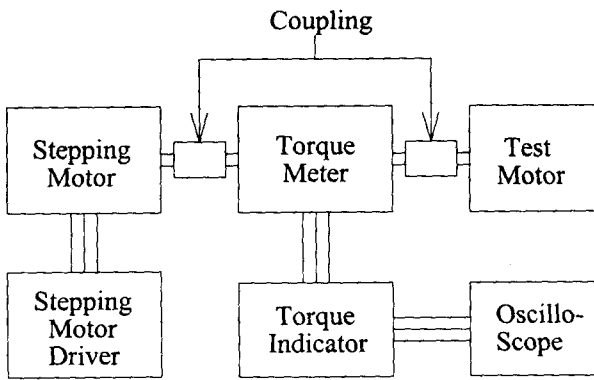


그림 9 코깅토크 측정 실험 장치도  
 Fig. 9 Experimental setup for measurement of cogging torque

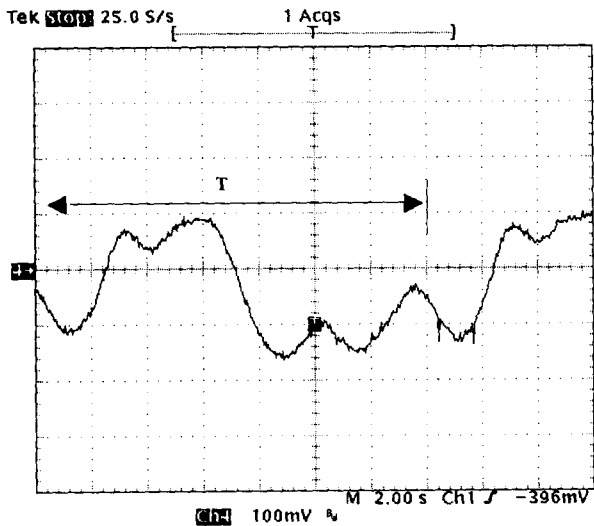


그림 10 실측된 코깅토크(0.5° 세그먼트 간격, 20 kgcm/div)  
 Fig. 10 Experimented cogging torque (0.5° separation, 20 kgcm/div)

자의 경우 그 구조적 대칭성이 변화하게 되어 360°를 세그먼트 극수와 슬롯수의 최소 공배수인 36으로 나눈 10°가 코깅토크의 기본 각도 주파수가 된다. 즉, 세그먼트형 극의 경우 코깅토크의 기본 주파수는 전동기 회전 주파수의 36배 수차에 해당함을 확인할 수 있다.

그림 9은 코깅토크를 측정하기 위해 사용된 실험장치도이다. 그림 9에서처럼 토크 미터에 커플링을 사용하여 스텝핑 모터를 저속(0.5rpm)으로 회전시켜 회전자의 위치 따른 코깅토크를 측정하였다.

그림 10은 세그먼트 dead zone 각이 0.5° 일 때의 코깅토크 실험치를 나타내고 있다. 그림 7의 시뮬레이션 결과와 비교할 경우 실측된 코깅토크 파형은 세그먼트 dead zone 각이 0.5°보다 1°로 모델링하여 해석한 결과와 더욱 잘 일치함을 확인할 수 있다. 이는 영구자석 착자 과정에서 착자 요크에서 발생하는 누설 자속에 의해 세그먼트 dead zone 각이 실제의 영역보다 더 넓게 분포함을 확인할 수 있다.

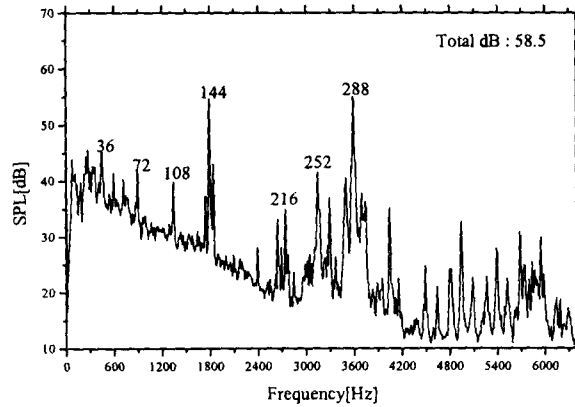


그림 11 시작기전동기의 소음 스펙트럼(750rpm, 무부하)  
 Fig. 11 Acoustic noise measurement (750rpm, no-load)

그림 11은 시작기 전동기를 무부하 상태로 운전하였을 경우 음압 측정 결과를 보여주고 있다. 그림 11에서와 같이 세그먼트형 극의 영향으로 인하여 기본 속도 주파수의 36번째(450Hz), 72번째(900Hz), 108번째(1350Hz)의 코깅토크 고조파 성분이 발생하여 전동기의 소음의 가진원으로 작용함을 확인할 수 있다. 한편, 144번째, 288번째 고조파 성분은 코깅토크 뿐만 아니라 토크 맥동, 국소 가진력과 같은 다른 전자기 가진 소스에 의해 연성되어 발생하게 된다.

#### 4. 유우츄얼 토크의 해석

세그먼트형 극의 사용으로 영구자석의 자화 분포의 특성의 변화는 전류 및 역기전력 파형의 특성에 크게 영향을 미치게 되고, 전동기 내의 전체 출력 토크의 대부분을 차지하는 유우츄얼 토크에도 영향을 주게 된다.

본 시작기 인버터에 대해 상전류는 전압방정식을 계산함으로써 시뮬레이션할 수 있다.

$$\begin{aligned}
 V_j &= R_j i(\theta)_j + \frac{d\lambda(i, \theta)_j}{dt} \\
 &= R_j i_j + \left( \sum_k \left[ \frac{\partial \lambda_j}{\partial i_k} \frac{di_k}{dt} \right] \right) + \left[ \frac{\partial \lambda_j}{\partial \theta} \frac{d\theta}{dt} \right]
 \end{aligned}
 \tag{2}$$

여기서,  $V$ 는 상권선에 인가되는 전압,  $R$ 는 상권선의 저항,  $\lambda$ 는 상권선에 쇄교하는 자속량,  $j$ 와  $k$ 는 각각의 상을 나타낸다.

그림 12은 각상의 전압 방정식을 도출하기 위해 스위치의 작동 상태에 따른 회로도를 나타낸다. 일정한 출력 토크를 발생시키기 위하여 스위칭 교환시 모우드 1에서와 같이 c상의 전류는 다이오드를 통해 freewheeling을 하게 된다. 한편, c상에 흐르던 전류의 freewheeling이 끝나는 시점에서 3상 중에 1상은 단락 상태가 되어 모우드 2로 변환하게 된다.

유우츄얼 토크는 역기전력과 상전류를 구한 후 식(3)를 이용하여 계산할 수 있다.

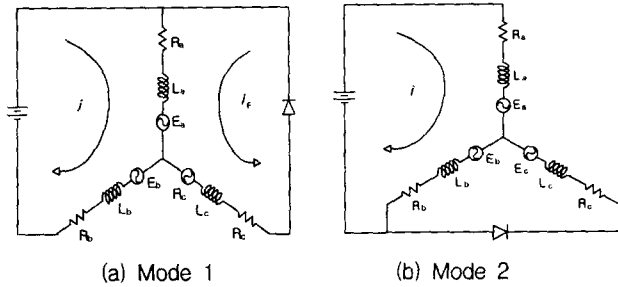


그림 12 인버터의 동작모드  
Fig. 12 Operation mode of BLDC inverter

$$T = \sum_j e_j i_j / \omega_m \quad (3)$$

그림 13은 시작기 전동기에서 시뮬레이션된 역기전력 파형과 실측된 역기전력 파형을 회전자의 위치각에 대해 나타내고 있다. 그림 2에서 표시한 각 구간의 역기전력 특성을 살펴보면, A 구간은 세그먼트 극권이 구간에 해당하며, 양쪽방향에 존재하는 세그먼트 극의 영향으로 인해 역기전력 피크 값이 연속형 극에 대하여 15%감소하게 된다. B, D 구간에서는 한쪽에만 존재하는 세그먼트 극의 영향으로 인하

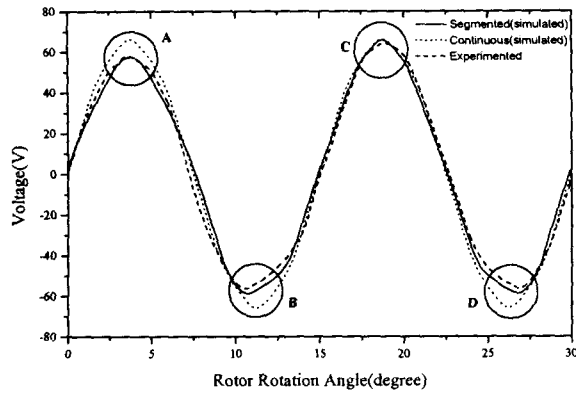


그림 13 시작기 전동기에서의 역기전력 파형(150rpm)  
Fig. 13 BEMF waveforms(150rpm)

여 역기전력 파형의 왜곡현상이 발생함을 확인할 수 있다. C구간에서는 연속형 극과 거의 유사한 파형을 보이고 세그먼트 극에 의한 영향이 미소함을 확인할 수 있다.

그림 14은 역기전력 파형과 식(2)의 전압방정식을 이용하여 시뮬레이션한 상전류 파형을 나타내고 있다. 임의의 회전자 위치에 대하여 스위칭 모드에 따른 상전압을 계산한 후, 전압 방정식을 수치적인 Runge-Kutta방법에 의해 계산하였다. 그림 13의 역기전력 결과로 유추할 수 있듯이 역기전력의 감소로 인하여 상전류의 피크치는 연속형 극에 비하여 증가함을 확인할 수 있다. 따라서, 일정한 출력을 발생시키기 위하여 세그먼트 극의 경우 상전류가 증가하게 되므로 효율의 감소를 초래함을 예측할 수 있다.

그림 15와 그림 16은 각각 식(3)을 이용하여 산정한 토크 파형과 유추얼 토크 파형의 푸리에 계수를 나타내고 있다. 토크 맥동을 최대 토크와 최소 토크의 차를 평균 토크로 나눈 백분율의 값으로 표시할 경우, 연속형 극에 비하여 세그먼트형 극의 토크 맥동은 82%의 증가함을 알 수 있다. 토크 맥동에 의한 가진력의 고조파 성분도 속도 주파수의 144번째 성분에서 36번째 성분으로 변화하게 됨을 확인할 수 있다.

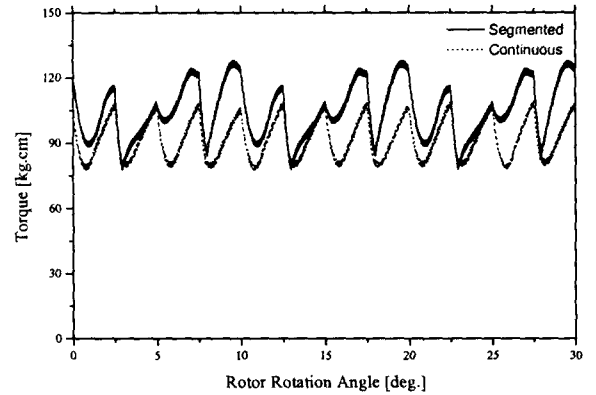


그림 15 유추얼 토크(150rpm)  
Fig. 15 Mutual Torque(150rpm)

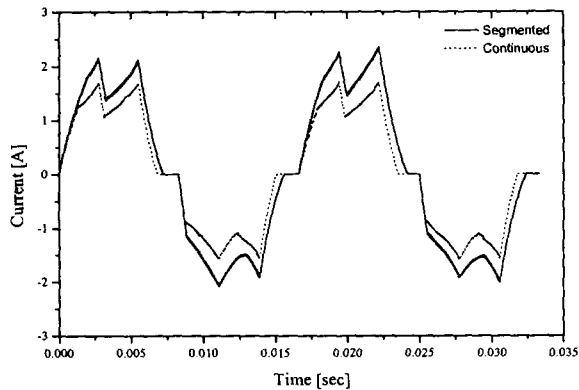


그림 14 상전류 파형(150rpm)  
Fig. 14 Phase current waveforms(150rpm)

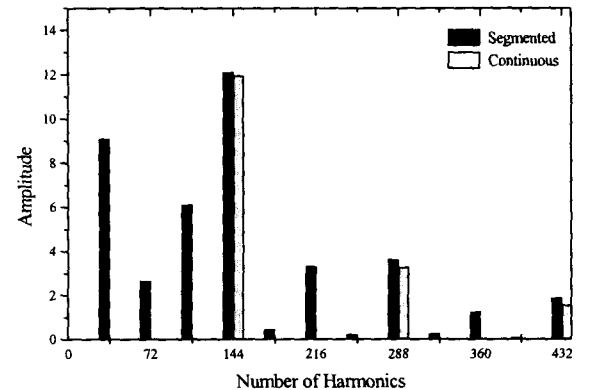


그림 16 토크 맥동의 푸리에 계수(150rpm)  
Fig. 16 Frequency spectra of mutual torque ripple(150rpm)

### 5. 국소 작용력의 해석

국소 작용력은 탄성체로 모델링될 수 있는 고정자를 가진 시변 자기 견인력으로, 고정자 진동, 소음 발생에 주요한 가진원으로 작용하게 된다. 세그먼트형 극의 영향을 확인하기 위해 고정자의 슬롯을 제거하고, 철의 자기 투자율을 무한대라고 가정하였을 경우, 반경방향의 자기 견인력은 맥스웰 응력법으로부터 식(4)와 같이 계산된다.

$$f_r = \frac{1}{2\mu_0} B_r^2 \quad (4)$$

고정자 표면에 작용하는 시변 자기 견인력은 푸리에 급수 전개를 이용하여 각각의 주파수 성분을 분해하였다.

그림 17은 세그먼트형 극과 연속형 극의 반경방향의 자기 견인력 성분을 나타내고 있다. 세그먼트형 극에서는 자기 견인력 성분이 세그먼트 끝단에서 불균형적임을 알 수 있다. 그림 18은 반경 방향 견인력을 푸리에 변환하여 스펙트럼 분석한 결과를 나타내고 있다. 세그먼트 끝단의 자계 불균일에 의해 반경 방향의 견인력의 기본 주파수 성분이 속도 주파수의 12번째로 변화함을 확인할 수 있다. 세그먼트

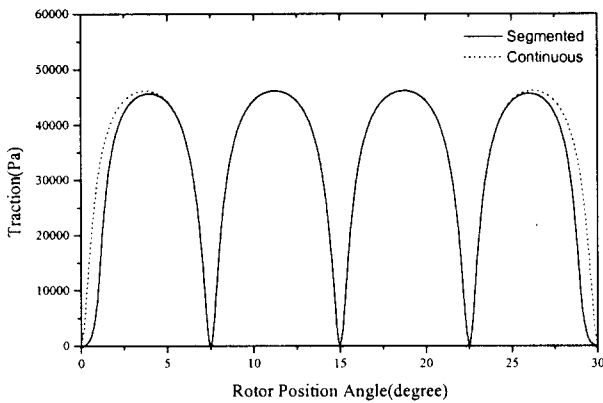


그림 17 반경 방향 견인력 (slotless stator)  
Fig. 17 Radial magnetic traction (slotless stator)

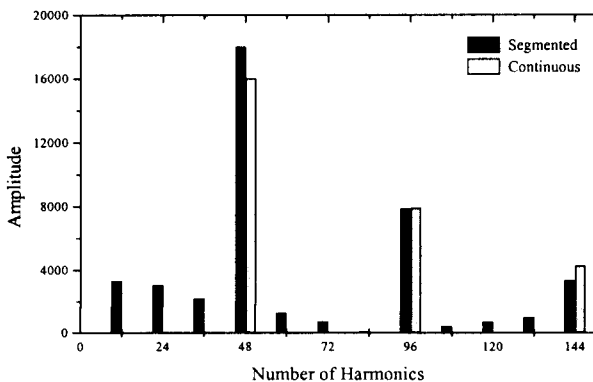


그림 18 반경 방향 견인력의 푸리에 계수  
Fig. 18 Frequency spectra of radial magnetic traction

극의 영향으로 많은 고조파 성분 함유하게 되며, 이러한 고조파 성분으로 고정자 공진 가능성이 증대되어 전동기의 심각한 진동을 발생할 수 있음을 예측할 수 있다.

### 6. 결론

본 논문에서는 생산성 향상 및 제조원가 절감을 위해 사용되어진 세그먼트형 BLDC 전동기에 대하여 진동 및 소음 발생 인자로 추정되는 코깅토크, 뮤우츄얼 토크, 반경방향 견인력을 시뮬레이션 및 실험을 통하여 분석하였다. 세그먼트형 극의 효과는 착자시 누설 자속에 의해 실제 세그먼트 극 간격보다 더 넓게 분포함을 확인할 수 있었다. 시뮬레이션 결과 세그먼트형 극 BLDC 전동기의 코깅토크, 토크 맥동, 반경 방향 견인력의 전자기 가진력 기본 주파수는 전동기내의 주기적인 대칭성의 변화에 의해 새로운 가진 주파수 성분이 발생하게 됨을 알 수 있었다. 또한, 실험 결과를 통해 BLDC 전동기에서 세그먼트 영구자석을 적용할 경우 세그먼트 극에 의해 발생하는 새로운 가진력 성분은 시스템의 공진 가능성을 증가시킬 수 있음을 확인하였다. 그리고, 세그먼트형 극 BLDC 전동기에서 역기전력의 감소로 인해 상전류가 증가되어 결국 전동기의 효율 및 출력이 저하되는 현상이 발생되었다.

### 참 고 문 헌

- [1] S. M. Hwang and D. K. Lieu, "Design Technique for Reduction of Reluctance Torque in Brushless DC Permanent Magnet Motors," IEEE Transactions on Magnetics, Vol. 30, No. 6, pp. 4287~4289, 1994.
- [2] G. H. Jang and D. K. Lieu, "Vibration Reduction in Electric Machines By Interlocking of Magnets," IEEE Transactions on Magnetics, Vol. 29, pp. 1423-1426, 1993.
- [3] R. Carlson, M. Lajoie-Mazenc and J. Fagundes, "Analysis of Torque Ripple due to Phase Commutation in Brushless DC Machines", IEEE Trans. on Industry Applications. Vol. 28, No. 3, pp. 632~638, 1992.
- [4] T. Nakada, N. Takahashi, "Analysis of magnetic characteristics of brushless dc motor taking into account the distribution of magnetization," IEEE Transactions on Magnetics, Vol. 22, No. 5, 1986.
- [5] W. L. Lorimer and D. K. Lieu, "Prediction and Verification of the Magnetic Orientation Pattern in Motor Magnets", Proceedings of 27th Annu. Sym. on IMCSD, pp. 203-208, 1998.
- [6] Yukihiro Okada, Hiroto Inoue, Hirotsugu Fusayasu and Hironobu Nishida, "Analysis for Permanent Magnet Motor Taking Account of Magnetizing Process," IEEE Transactions on Magnetics, Vol. 33, No. 2, March, pp. 2113-2116, 1997.

저 자 소 개



**김경태 (金京泰)**

1974년 10월 10일 생. 1998년 부산대 정  
밀기계공학과 졸업. 1998년~현재 동  
대 학교 기계설계학과 석사과정  
Tel : (051) 510-3204

**황상문 (黃庠文)**

전기학회논문지 제48B권 제3호 참조  
Tel : (051) 510-2468, Fax : (051) 514-7640  
E-mail : shwang@hyowon.pusan.ac.kr