

BLDC 전동기의 슬롯수가 소음에 미치는 영향

Effect of the Number of Slots on the Acoustic Noise from BLDC Motors

권 중 학* · 김 광 석* · 이 창 민* · 황 상 문†

Joong-Hak Kwon, Kwang-Suk Kim, Chang-Min Lee and Sang-Moon Hwang

(2008년 2월 29일 접수 ; 2009년 7월 10일 심사완료)

Key Words : BLDC Motor(BLDC 모터), Acoustic Noise(소음), Cogging Torque(코깅 토크), Torque Ripple(토크 리플), Normal Local Force(법선방향 로컬포스)

ABSTRACT

The goal of this study is to examine the effect of the number of slots on the noise from BLDC motors. To this end, the number of poles was fixed to 4 and the number of the slots was set to 6 or 24 before noise was measured. Motors having different numbers of slots showed clear differences in noise. Cogging torque, torque ripple and normal local force were interpreted, analyzed and compared to determine the reason for the differences. To determine the cause of the noise, cogging torque, torque ripple and normal local force were calculated, which are representative noise sources of BLDC motors, and FFT was performed to analyze their frequency components(harmonics). The results show that torque ripple and normal local force were the dominant factors in the noise difference between the 6-slot and 24-pole motors. As the number of the slots increased, the number of harmonics decreased and their amplitude of harmonic were reduced, which was attributed as the reason for the noise differences.

1. 서 론

자동차의 고급화와 고내구성을 지속적으로 요구하는 추세에 대응하기 위해 자동차 내부에 사용되는 전동기 또한 이러한 추세에 부응하여야 한다. 지속적인 고급화에 대응하기 위해선 쾌적한 운전 환경을 제공하여야 하며 또한 고내구성을 위해선 각 파트의 부품 또한 이의 수명을 만족시킬 수 있도록 대체/보급 되어야할 것이다. 이러한 요구조건을 만족시키기 위해 기존의 자동차 부품용 전동기가 brush가 없는 BLDC(bushLess direct current) 전동기로 빠르게 교체되고 있는 실정이다. 이러한 BLDC 전동기는 기존의 기계적으로 정류하는 DC

전동기와는 달리 전기적으로 비접촉식 정류가 가능하므로 거의 반영구적인 내구성을 확보할 수 있다. 그러나 여전히 소음 측면에서의 문제점은 대두되고 있으며 이를 해결하기 위해 여러 가지 방안이 제시되고 검증되어 실제 설계에 적용되고 있는 실정이다. 이러한 기술적 문제점에 대응하기 위해 이 논문에서는 전동기의 슬롯수가 전동기 소음 특성에 미치는 영향을 분석하고자 한다. 전동기 내의 슬롯수가 변한다는 것은 실제로 출력 측면에서의 변화도 있지만 소음의 원인이 되는 전자기 가진력의 변화도 초래하게 된다. 이러한 가진력에는 코깅 토크, 토크 리플, 법선방향 로컬포스를 대표적으로 들 수 있다.

따라서, 이 논문에서는 극수는 같고 슬롯수만 다른 4극 6슬롯, 4극 24슬롯의 2종의 전동기를 제작하여 소음 특성을 시험하고 이들의 차이점을 분석하였다. 또한 이러한 차이점의 원인을 밝혀내기 위해 상기 언급하였던 전자기 가진력을 Maxwell

† 교신저자; 정회원, 부산대학교 기계공학부
E-mail : shwang@pusan.ac.kr
Tel : (051)510-3204, Fax : (051)581-3104
* 부산대학교 기계공학부

stress tensor를 이용한 유한요소법으로 해석하고 주파수 분석을 실시하였다.

2. 본 론

2.1 시편의 설계 및 제작(시편의 준비)

서론에서 언급한 슬롯수가 서로 다른 2종의 전동기를 제작하기에 앞서, 명확한 소음 특성 비교를 위한 준비 작업이 이루어져야 한다. 즉 이러한 준비작업의 목적은 소음 측정시 나타나는 편차의 최소화를 위한 것으로서 최대한 슬롯수의 영향만을 보기 위한 것이라고 할 수 있다. 이를 위해 소음에 영향을 줄 수 있는 3가지 원인을 예측하여 제작시 이를 제거하도록 노력하였다.

첫 번째는 자기회로의 편차이다. 즉, 고정자의 슬롯수가 달라짐으로 해서 전동기 내부의 자기회로에 많은 변화가 발생하게 된다. 6 슬롯의 경우에는 24 슬롯 보다 잇날의 크기가 크며 자속의 경로 또한 24 슬롯 보다는 그리 복잡하지 않다. 이러한 경우에 있어서 국부적으로 발생하는 자기포화의 조건을 동등하게 하기 위해서 두 종류의 고정자 철심의 부피를 동일하게 설계·제작하였다. 이는 Fig. 1에서 확인할 수 있다.

두 번째는 회전자가 회전할 때 무게 불평형에 의한 편심력이 소음에 미치는 영향을 최소화하기 위해서 balancing 작업을 수행하였으며 이는 Fig. 2에서 확인할 수 있다. 전동기의 수직방향으로 수행하였으며 수평방향, 즉 반경방향으로는 동일한 크기의 자석이 조립 치공구를 이용하여 부착되었기 때문에 이쪽 방향으로는 불평형력이 거의 없다고 판단하였다. 최종적인 불평형량은 Table 1에 나타내었다.

마지막 준비작업으로는 출력 편차를 최소화하여 이것이 소음에 미치는 영향을 최소화하는 것이다.

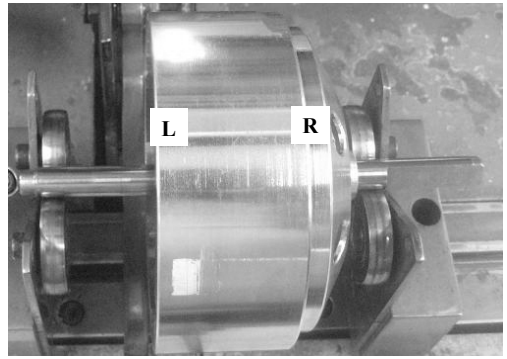


Fig. 2 The schematic of balancing

Table 1 Balancing weight

Target : below 0.1 g

	Rear(L)	Front(R)
Balancing weight	0.089	0.093

Table 2 The coil specification

Model	D of coil [mm]	# of turns
4 pole	6 slot	22(double)
	24 slot	9

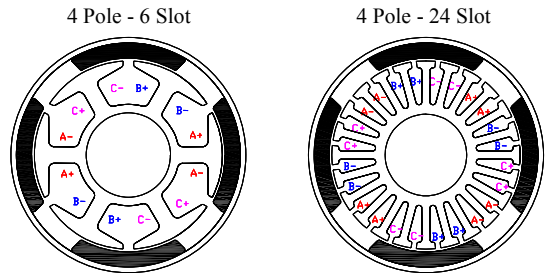


Fig. 3 The winding schematic

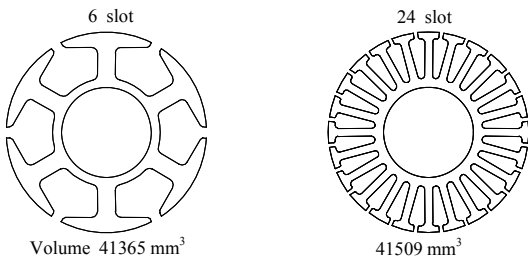


Fig. 1 The volume of stator iron

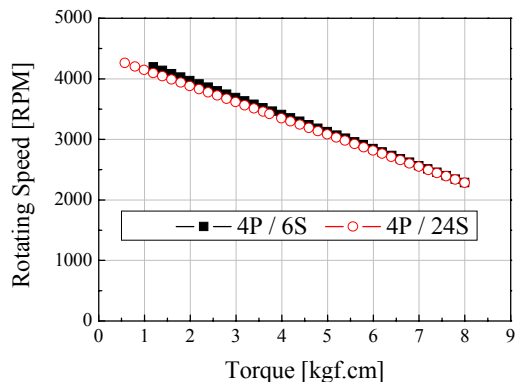
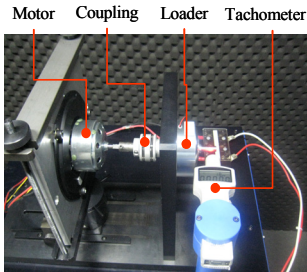


Fig. 4 TS curve of the 6 and 24 slots

출력 크기가 서로 다른 전동기의 소음 특성을 비교하는 것은 의미가 없기 때문이다. 일반적으로 슬롯수가 변하게 되면 이에 따라 권선 사양 및 결선도 등이 변하게 된다. 예를 들어 직권에서 분권으로의 변화도 발생할 수 있으며 또한 권선 저항이나 역기전력의 변화도 발생할 수 있다. 또한 구동방식도 달라지게 된다. 이들은 모두 전동기 출력에 영향을 주는 주요 변수들이다. 따라서 출력의 크기가 소음에 미치는 영향을 최소화하기 위해서 정격상태, 즉 차후 소음을 측정하는 조건에서의 전동기 출력을 동일하게 설계·제작하였다. Table 2는 출력을 동일하게 하기 위한 각 슬롯별 권선 사양을 보여주고 있으며 Fig. 3에서는 이들의 결선도를 Fig. 4에서는 실제 측정된 TS 곡선을 보여주고 있다. Fig. 4에서 확인할 수 있듯이 2종의 전동기는 정격상태에서 거의 동일한 출력 수준을 나타내고 있다. 그러므로 출력 차이에 의한 진동 편차를 최소화할 수 있을 것으로 판단된다.

2.2 소음의 측정

정격상태에서의 소음을 측정하기 위해서 Fig. 5에서 보는 바와 같이 전동기에 부하를 가할 수 있도록 부하기를 구비하여 설치하였다. 마이크로폰과 시편과의 거리는 0.1 m로 하였으며 측정은 총 2분 동안 20~20 kHz 주파수 범위 내에서 실시하였다. 두 전동기 회전속도는 정격상태인 3,000 RPM이다. Table 3은 이의 total 소음치를 보여주고 있다. 24



Test Condition
 - Rated Voltage : 13.5 V_{DC}
 - Load : 0.6 Nm

Fig. 5 Schematic of acoustic noise test

Table 3 Results of the acoustic noise test

The number of slots	Total noise
6 slots	75 dB
24 slots	69.4 dB

슬롯 BLDC 전동기가 무려 5.6 dB 정도 개선되는 결과를 보여주고 있다.

2.3 소음원 분석을 위한 가진력 해석

현재 24 슬롯을 가지는 BLDC 전동기가 소음 특성이 좋은 결과를 나타내는 것을 상기 시험을 통해 확인할 수 있었다. 그러면 이러한 소음의 차이의 근원이 무엇인지를 밝혀낼 필요가 있다. Figs. 6, 7은 소음 측정 결과를 1/3 octave와 narrow band로 각각 보여주고 있다. 결과에서 알 수 있듯이 이 둘의 소음차이는 600 Hz와 2 kHz 부근에서 가장 극심하게 나타나는 것을 알 수 있다. 특히 12, 32, 36, 44, 48차 고조파 성분의 차이가 두드러지는 것을 narrow band 결과를 통해 확인할 수 있다.

이러한 고조파 성분의 차이를 분석하기 위해 전동기 구동시 발생하는 전자기 가진력을 해석하고 비교해 볼 필요가 있다. 고려되는 전자기 가진력으로는 코깅 토크, 토크 리플, 고정자 잇날 표면에 작용하는 법선방향 로컬포스의 3종류가 있을 수 있다. 이들 모두는 전동기의 소음을 유발하는 실질적인 인자들로서 각 슬롯에 따른 이들의 결과를 서로 비교, 분석하기로 한다. 상기의 전자기 가진력을 해석적으로 구하기 위해 맥스웰 스트레스 텐서(maxwell stress tensor)를 이용하여 유한요소법으로 계산하였다.

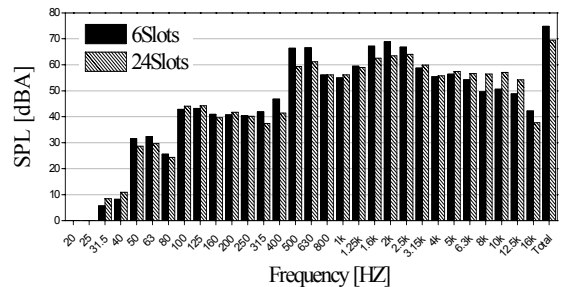


Fig. 6 1/3 octave band

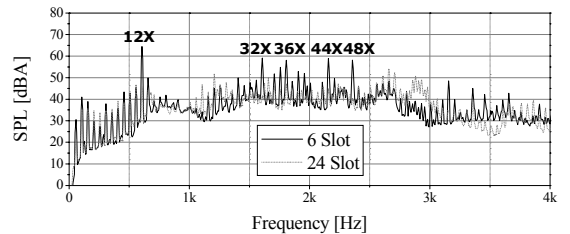


Fig. 7 Narrow band

코킹 토크는 입력전류가 없더라도 회전자의 위치에 따라 영구자석과 잇날의 상호작용에 의해 발생하는 것으로서 식(1)과 같이 구할 수 있다.

$$T_{cog} = \frac{R}{\mu_0} \int B_R B_\theta dS \quad (1)$$

여기서, R 은 전동기 공극의 반경, μ_0 는 공기의 투자율(permeability), B_R, B_θ 는 각각 공극에서의 반경 및 접선방향의 자속밀도를 나타낸다.

토크 리플은 전동기 구동시 발행하는 토크가 일정하지 않고 어느 정도의 최소, 최대치 범위 내에서 맥동하는 크기를 말한다. 이는 토크를 계산한 후 이 파형의 최소·최대치의 차이로써 나타낼 수 있다. 식(2)는 토크를 계산하는 방법을 나타내고 있다.

$$T = \frac{\sum e \cdot i}{\omega} \quad (2)$$

여기서, e 와 i 는 각 상의 역기전력과 전류는 나타내며 ω 는 전동기 회전속도이다. 즉, 식(2)와 같이 토크를 계산한 후 이 파형의 최소와 최대값으로 맥동 크기를 알 수 있다.

법선방향 로컬포스는 BLDC 전동기의 고정자 잇날 표면에 수직으로 작용하는 자기견인력을 뜻하는 것으로서 이 연구에서는 전동기 잇날 하나에 작용하는 힘을 살펴보았다. 이러한 법선방향 로컬포스는 전동기 회전시 잇날을 직접적으로 가진하게 된다. 이는 식(3)과 같이 표현할 수 있다.

$$F_N = \frac{1}{2\mu_0} \int (B_N^2 - B_T^2) dS \quad (3)$$

여기서, B_N 은 잇날 표면의 수직방향의 자속밀도를 B_T 는 접선방향의 자속밀도를 나타낸다.

Fig. 8에서 10은 상기의 방법으로 해석된 가진력의 파형 및 크기와 이들의 FFT(fast Fourier transform) 결과를 각각 보여주고 있다. Cogging torque의 경우, 파형의 크기는 유사하지만 24슬롯의 주기가 6슬롯에 비해 반으로 줄어든 것을 알 수 있다. 이로 인해 24슬롯에서는 12, 36차 고조파 성분이 사라진 것을 확인할 수 있으며 앞서 Fig. 7의 소음 측정 결과에서 보듯이 12, 36차 소음 성분에 영향을 줬다고 볼 수 있다.

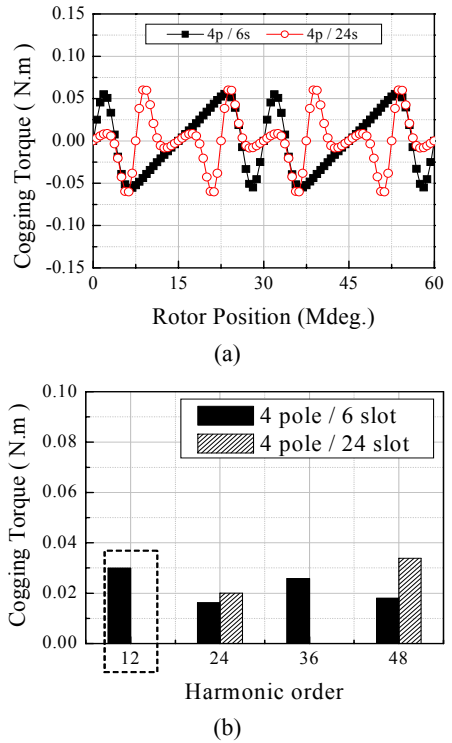


Fig. 8 (a) The wave form (b)FFT of cogging torque

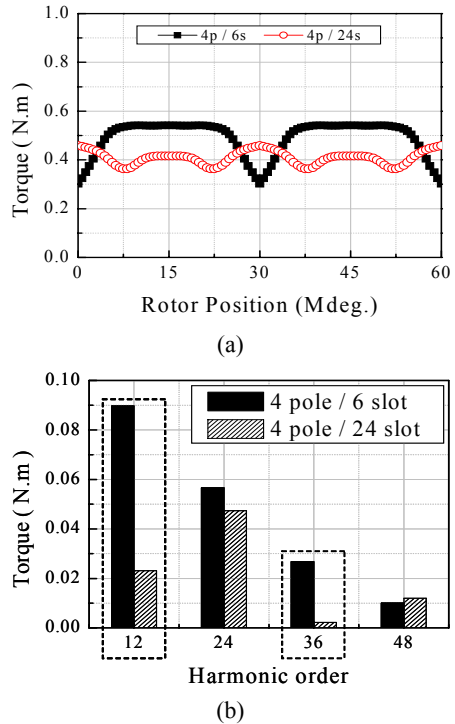


Fig. 9 (a) The waveform (b) FFT of torque(ripple)

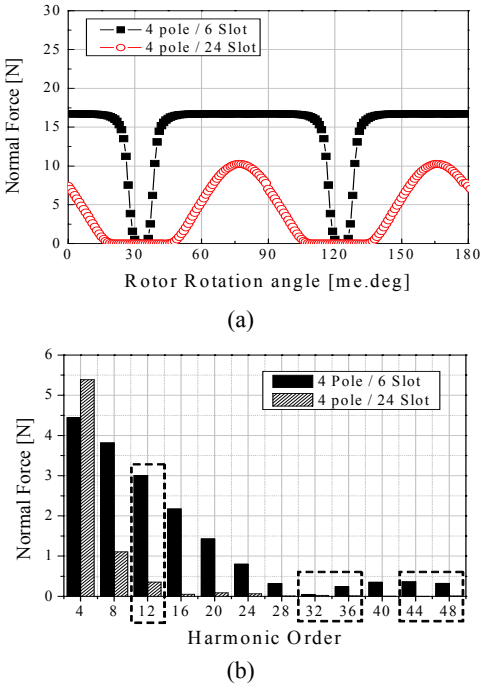


Fig. 10 (a) The waveform (b) FFT of normal force

Fig. 10의 법선방향 로컬포스는 6슬롯이 24슬롯보다 고차의 고조파 성분을 많이 가지고 있는 것으로 나타났다. 특히 24슬롯에서는 거의 없는 32, 36, 44, 48차 고조파 성분을 가지고 있다. 또한 소음 측정 결과에서 많은 차이를 보인 12차 성분의 경우, 여기서 매우 두드러진 차이를 보이고 있다. 따라서 이러한 고조파 성분의 차이가 소음 측정 결과에 반영되어 나타난다고 볼 수 있다.

3. 결 론

BLDC 전동기의 소음 개선을 위해 고정자 슬롯수에 초점을 두고 실시한 이 연구의 최종결론은 슬롯수가 많아질수록 소음 특성이 개선될 수 있다는 것이다. 그 원인을 분석하기 위해 코깅 토크, 토크 리플, 고정자 잇날에 수직방향으로 작용하는 법선방향 로컬포스를 해석하고 비교해 본 결과, 결국 이들

고조파 성분들의 차이가 최종적으로 소음 차이로 나타남을 확인할 수 있었다. 이 연구에서는 cogging torque와 torque ripple의 경우 12, 36차 성분에서 많은 차이를 보였으며 법선방향 로컬포스의 경우에는 12차와 32, 36, 44, 48차의 고차 성분에서 많은 차이를 보였다. 따라서 BLDC 전동기 설계 및 제작시 허용되는 구조적 크기나 경제적인 합리성을 고려한다면 가능한한 슬롯수를 크게 가져가는 것이 소음 특성에 대해선 유리하다고 판단된다.

후 기

이 연구는 교육과학기술부와 한국산업기술진흥원의 지역혁신인력양성사업으로 수행된 연구결과임.

참 고 문 헌

- (1) Kim, J.-Y., Kwac, L.-K., An, J.-S., Yang, D.-J., Song, K.-S. and Park, K.-H., 2002, "Acoustic Noise Reduction of A SRM for Fan in Air conditioner," Proceedings of the KSNVE Annual Spring Conference, pp. 816~821.
- (2) Han, H. S., Jeong, W. B., Kim, G. H. and Song, D. H., 2002, "Automatic Measurement of Noise and Vibration for Power Seat DC Motor in the Vehicle," Proceedings of the KSNVE Annual Spring Conference, pp. 1142~1147.
- (3) Hwang, S.-M., 1998, "Reduction of Electromagnetic Torque Ripple in High-speed, High-load Brushless DC Motor used for Automobile Parts," The Korean Society of Automotive Engineering, Vol. 11, No. 6, pp. 39~46.
- (4) Hwang, S.-M., 1996, "Sensitivity Analysis of Design Parameters to Reduce Cogging Torque in Permanent Magnetic Brushless DC Motors," Proceedings of the KSAE Annual Autumn Conference, pp. 403~410.