

Outer Rotor Type BLDC 모터의 슬롯 수에 따른 진동 특성 분석

Analysis of Outer Rotor Type BLDC motor vibration characteristics according to slot combination

방기창*·김광석*·권중학*·이영욱**·황상문†

Ki-Chang Bang, Kwang-Seok Kim, Joong-Hak Kwon, Yeong-Uk Ree and Sang-Moon Hwang

Key Words : Outer rotor(외부회전자), BLDC motor(BLDC 모터), Vibration(진동), Cogging torque(코깅토크), Torque Ripple(토크리플)

ABSTRACT

This paper is about electromagnetic vibration source in outer rotor type of BLDC motors.

Experiments are carried out with three pole-slot combinations which are 6 slots, 12 slots, and 24 slots with 4 poles rotor. According to results, vibration sources separate into electromagnetic and mechanical factors. Using the finite element method (FEM), It is analyzed that vibration characteristics of electromagnetic source in each type. This paper shows electromagnetic sensitivity to vibration, and introduces necessary point in lower vibration motors. Also rotor balance is important to prevent uneven distribution of magnetic flux between rotor and stator.

1. 서론

BLDC (Brushless Direct Current) motor는 비접촉식으로 전기각을 검출하므로 부품을 교체할 필요가 없어 수명이 반영구적이고 신뢰성이 높아 그 쓰임이 계속 증가하는 추세이다. 본 논문에서 말하는 BLDC 모터 중에 외부회전자형(Outer Rotor Type) BLDC 모터는 일반 내부회전자 모터보다 관성 모멘트가 커서 정속운전에 유리하다. 즉 고속회전과 회전력이 많이 필요한 곳에 사용된다. 특히 자동차의 환풍장치의 부품으로 사용하고 있는데, 현재의 자동차들이 고급화 되어감에 따라 정량적으로 만족시켜야할 토크, 속도, 전류(Torque Speed Current : TSI)를 만족시키면서 저진동의 특성이 더해진 모터를 요구하고 있다. 이에 본 논문에서는 3상 구동의 외부회전자형 BLDC 모터의 슬롯(Slot)수를 4극(Pole) 6슬롯, 4극 12슬롯, 4극 24슬롯으로 바뀌어 가면서 모터가 가지는 각각의 진동 특성을 측정하여 분석하고자 한다. 슬롯의 형상이나 수의 변화는

자계의 흐름에 변화를 발생시키고 이는 전자기시스템의 힘의 변화를 야기하여 변화된 진동발생 요인에 의해 서로 다른 진동특성을 나타낸다. 모터의 진동은 기계적 진동요소와 전자기적 진동요소로 나눌 수 있는데, 본 논문에서는 슬롯 수의 변화로 인한 전자기적 진동요소의 변화에 따른 진동 특성의 분석을 하고자한다. 모터의 진동 특성을 측정하기 위해 모터의 TSI의 성능 특성을 각 슬롯별로 정량적으로 만족시키게 설계하고, 각 슬롯별 토크 및 출력 특성의 해석을 위하여 유한 요소법을 이용하여 측정된 결과를 바탕으로 시뮬레이션을 통한 진동특성의 분석을 하고자한다.

2. 진동 특성 실험

2.1 슬롯별 설계

(1) 회전자 Balance

진동특성의 측정을 위해 우선 회전자의 회전시 발생할 수 있는 기계적 불균형을 배제하기 위해 회전축과 회전자의 동심도 및 회전자가 가지고 있는 불균형 요소를 소거하는 작업이 선행되어야 한다⁽¹⁾. 회전자의 불균형량을 측정하여 수정한 다음 재측정 자료는 표 I.와 같다. 그림 1.은 회전자의 불균형을 교정하기 위한 장치와 외부회전자이다.

† 황상문; 부산대학교 기계공학부
E-mail : shwang@pusan.ac.kr
Tel : (051) 510-3204, Fax : (051) 582-3104

* 부산대학교 기계공학부

** (주)효성전기

Table I. Unbalance weight

4 Pole	Balance weight (after) 0.1g/Cm down	
	Rear-L	Front-R
Outer Rotor	0.089	0.100

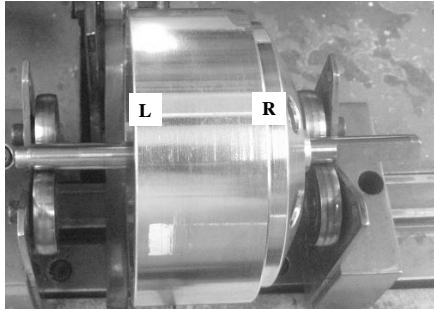


Fig 1. Balance control

(2) 각 슬롯별 사양

정량적으로 만족시켜야 할 TSI 성능을 만족시키기 위한 설계를 기본으로 하여 설계를 하는데 있어 각 슬롯이 가지는 치수는 표 2와 같다. 그림 2는 6, 12, 24 슬롯의 그림이다.

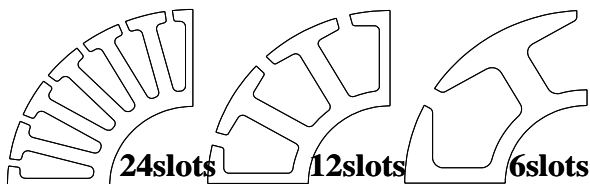


Fig 2. Slot combination

Table II. Parameter of Slots

Motor (4Pole)	6 Slot	12 Slot	24 Slot
Rotor outer diameter [Ø]	85	85	85
Stator outer diameter [Ø]	68	68	68
Air-gap [mm]	1	1	1
Teeth width [mm]	6	45	3
Slot width [mm]	3.8	2.85	1.9
Stack height of stator [mm]	28.5	28.5	28.5
Core material	S18	S18	S18

각 슬롯을 가지는 모터들은 정격출력 200 [W], 정격속도 3200 [rpm], 정격전압 12[V]이며, 공극의 간격과 회전자, 고정자의 외경은 동일하게 설계되었다.

(3) 성능 특성

TSI 성능을 측정하여 비교하여 본 결과 정량적으로 만족시켜야 할 성능은 3 종류의 모터 모두 그림 3에서 나타난 것과 같이 만족함을 알 수 있다.

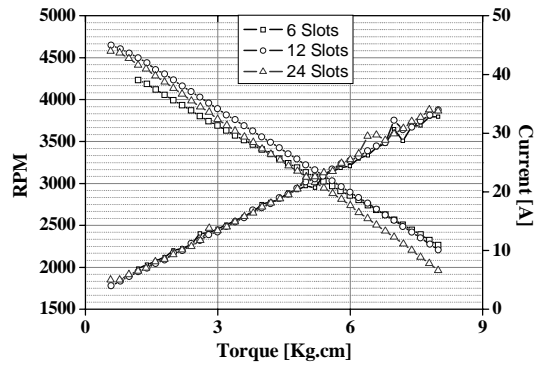


Fig 3. TSI Curve of motors

모터의 슬롯별 동선을 감은 횟수는 6슬롯이 22 turn, 12슬롯이 32 turn, 24슬롯이 32 turn으로 감아 슬롯이 늘어나면 공극에서 자석의 Flux 활용성이 떨어짐을 보였다.

(3) 진동 측정

가속도 센서(3축 센서)를 이용하여 모터의 진동을 측정하였다⁽²⁾. 진동량 측정을 위해서 모터는 0에서 무부하 속도까지 측정하여 아래의 그림들처럼 나타내었다.

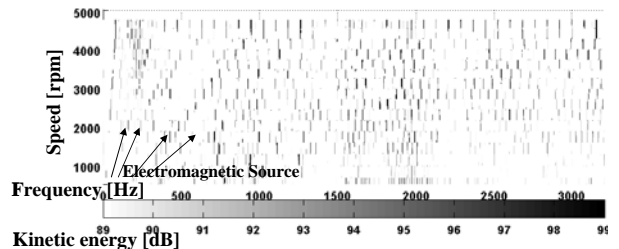


Fig 4. Vibration spectra according to 6slot motor

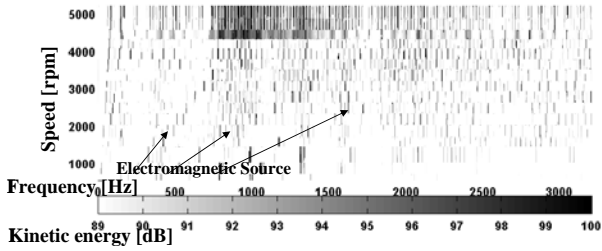


Fig 5. Vibration spectra according to 12slot motor

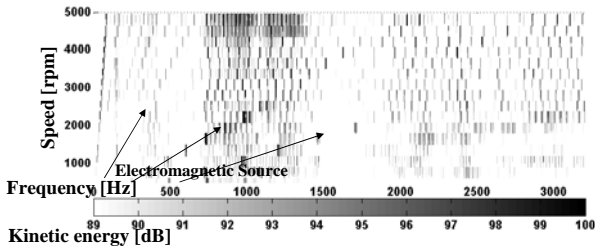


Fig 6. Vibration spectra according to 24slot motor

모터의 진동은 구조적인 원인으로 발생하는 진동과 전자기력에 의해 발생하는 진동이 합쳐져서 모터 전체의 진동으로 나타난다. 전자기력에 의한 진동은 모터의 운전속도에 비례하므로 주파수 특성에 따라 변화하며 공진에 의한 소음은 주파수 특성이 일정하므로 본 실험을 통리하였다. fig 4, 5, 6는 6슬롯, 12슬롯, 24슬롯 모터의 운전 속도 변화에 따른 진동의 주파수 특성을 나타낸 것이다. 운전 속도 범위는 0 ~ 5000 rpm이고, 가속도 센서를 진동이 잘 전달될 수 있는 곳에 부착하여 진동의 크기를 색으로 나타내었다. 그림의 화살표 연장선상의 점들처럼 진동의 크기가 일정하게 변하는 주파수 대역의 경우 운전 속도의 X4 배의 간격으로 진동이 발생하므로 전자기적 가진력이 진동에 영향을 미치는 것이다.

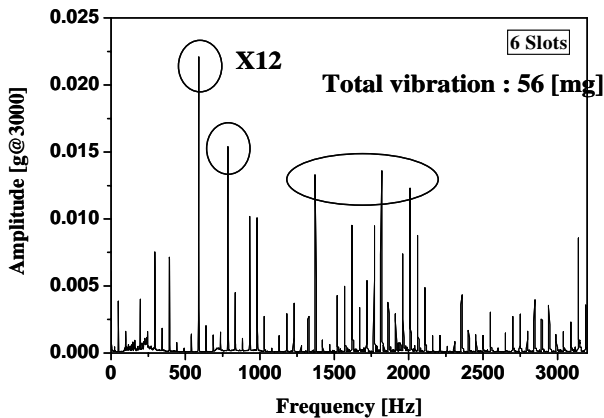


Fig 7. Result of Vibration measurement by 6slot motor

그림 7.은 6슬롯 모터의 진동특성을 3000 rpm 상태에서 측정된 것으로 가장 큰 값을 가지는 600 Hz 대의 진동 요소는 X12의 Harmonic order를 가진다. 여러 Hz에서 Harmonic 성분이 나타나지만 X12 성분이 가장 강하게 나타난다.

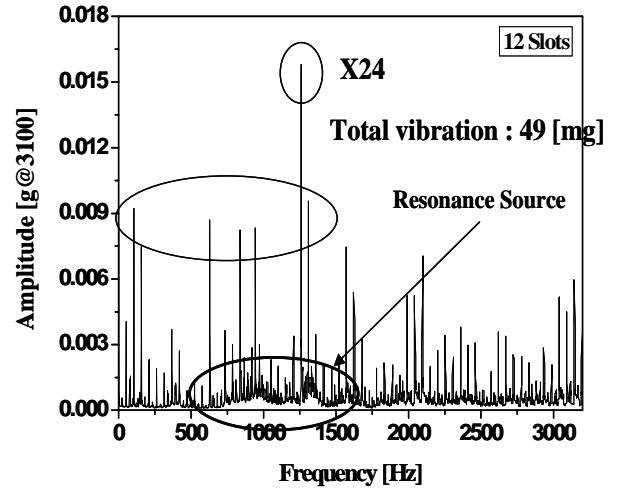


Fig 8. Result of Vibration measurement by 12slot motor

그림 8.은 12슬롯 모터의 진동특성을 3100 rpm 상태에서 측정된 것으로 가장 큰 값을 가지는 1600 Hz 대의 진동 요소는 X24의 조화 성분을 가진다. 1000 Hz ~ 1500 Hz 사이에서 기구적 진동요소에 의한 공진의 성분이 보이며 전자기적 진동 성분과는 다른 형태로, 넓은 대역에 걸쳐서 나타난다.

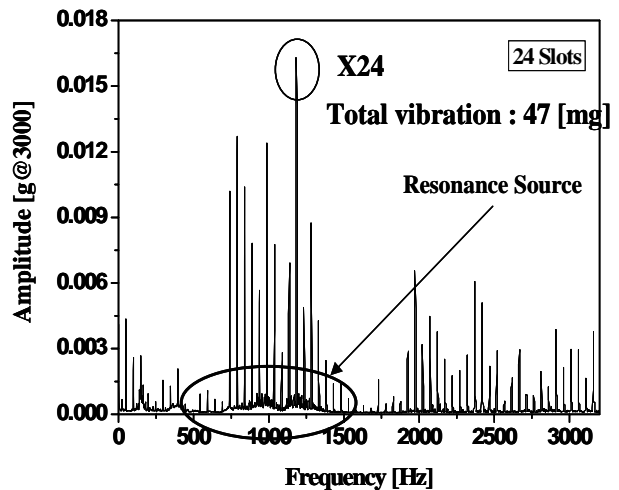


Fig 9. Result of Vibration measurement by 24slot motor

그림 9.은 24슬롯 모터의 진동특성을 3000 rpm 상태에서 측정된 것으로 가장 큰 값을 가지는 1300

Hz 대의 진동 요소는 X24의 Harmonic order를 가진다. 1000 Hz~1500 Hz 사이에서 12슬롯 모터와 마찬가지로 기구적 진동요소에 의한 공진이 보인다. 이는 12슬롯과 24슬롯에서 거의 동일한 주파수 대역에서 나타나고 있으며, 더욱이 특정 주파수 성분과 조화 성분이 합해져서 진동의 크기가 커졌음을 보인다. 하지만 3000 rpm의 운전속도에서 3가지 모터의 전체 진동량을 비교하면 24슬롯 모터의 진동량이 가장 작음을 알 수 있다.

3.1 진동 특성 분석

(1) Cogging Torque

코깅 토크(cogging torque)는 모터 내의 비 균일 토크로서, 모터 시스템의 자기 에너지(magnetic energy)가 최소인 위치로 이동하려는 접선 방향의 힘인데, 부하 전류와는 상관없이 회전자 영구 자석과 고정자 슬롯의 상호작용에 의해 발생한다. 그래서 영구 자석의 극이 바뀌는 부분에서 가장 크게 나타난다. 그리고 코깅 토크는 반복적으로 나타나는 주기 함수로 극수와 슬롯 수 사이의 최소공배수에 영향을 받으며, 모터의 1 회전 당 최소공배수만큼의 주기를 가진다. 이러한 코깅 토크는 항상 백동으로 작용하며, 영구자석 모터의 진동을 발생시키고 정밀 제어를 어렵게 하는 주원인으로 작용한다. 코깅 토크를 구하기 위하여 식(1)과 같이 맥스웰 응력 방법(maxwell stress tensor)을 이용하였다.

$$T(\alpha) = \frac{L_s \pi}{4\mu_0} (R_2^2 - R_1^2) \cdot \sum_{n=0}^{\infty} n N_L G_{a_n N_L} B_{a_n N_L} \sin n N_L \alpha \quad (1)$$

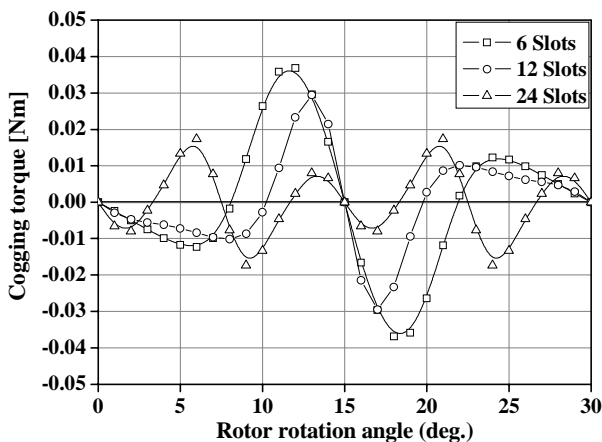


Fig 10. Comparison of cogging torque according to slot combination

각 슬롯 별 코깅 토크를 고속 푸리에 변환 [Fast Fourier transform, FFT]을 통하여 보면 각각 X4 배의 간격으로 발생한다는 것을 알 수 있다. 그림 10의 6슬롯은 X24 배 성분이 주성분을 이루고 그림 11의 12슬롯은 X36 배 성분이 주를 이루나 앞과 뒤의 X24, X48 성분과 골고루 나타난다. 그림 12의 24슬롯 모터는 X48성분이 주성분으로 나타난다.

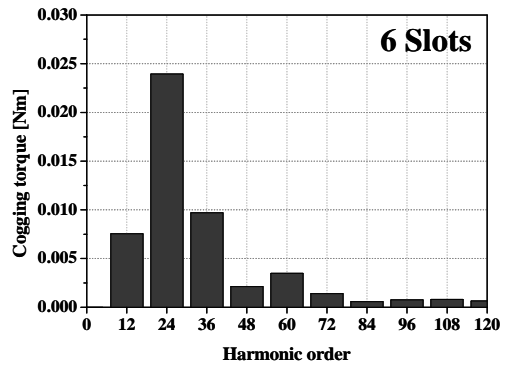


Fig 11. Result of cogging torque fft

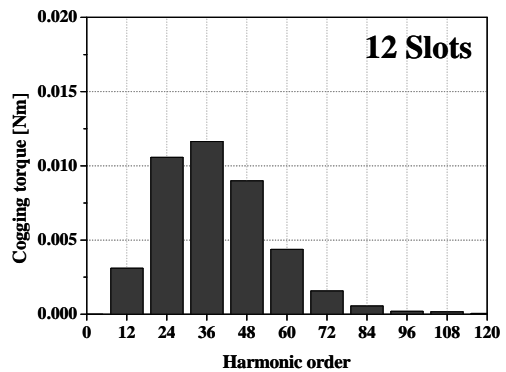


Fig 12. Result of cogging torque fft

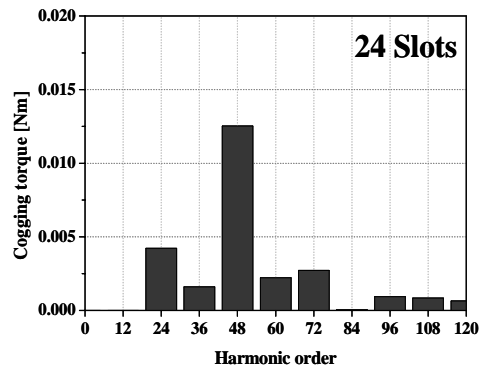


Fig 13. Result of cogging torque fft

(2) Torque Ripple

일반적으로 토크는 여자 전류 식(2)와 고정자의 역기전력 식(3) 성분의 곱으로 식(4)와 같이 표현되는데, 이들이 이상적으로 조화한다면 순시 토크는 균일하게 발생하게 된다. 그러나, 실제 운전시의 경우 commutation 지점에서 발생하는 전류 파형의 왜곡과 회전자의 위치에 대한 자계분포의 불균일에 의해 발생하는 역기전력의 왜곡으로 인해 출력 토크에 많은 고조파 성분이 함유되게 된다^(3,4). 부하 전류 파형의 해석과 모터 내의 자계상태 해석은 완전히 별개의 것이 아니며, 모터의 구조 설계 결과가 자계 상태를 변화시키며 이는 전류 파형에 영향을 미치기도 한다. 전류 파형의 변화는 출력 토크의 변화를 가져와 모터 내의 진동 및 소음 가 진력의 변화를 가져오게 된다.

$$V_j = R_j i(\theta)_j + \frac{d\lambda(i, \theta)_j}{dt} \quad (2)$$

$$e = \frac{d\lambda}{dt} = \frac{d\lambda}{d\theta} \frac{d\theta}{dt} = \omega_m \frac{d\lambda}{dt} \quad (3)$$

$$T = \sum_{j=1}^3 \frac{e_j i_j}{\omega_m} \quad (4)$$

그림 13.은 6슬롯 모터의 토크 리플을 보여주고있다. 슬롯의 수나 넓이 등으로 인해 역기전력의 형태는 다양하게 변화 할 수 있으며 그로인해 균일하지 못한 역기전력에 의해 토크 리플은 시스템의 진동에 영향을 미치게 된다. 그림 14.는 12슬롯 모터의 토크 리플을 보여준다. 매우 날카로운 형상을 하고 있으며 6슬롯에 비해 최고점과 최저점의 차이가 크다. 그림 15.는 24슬롯 모터의 토크 리플이다.

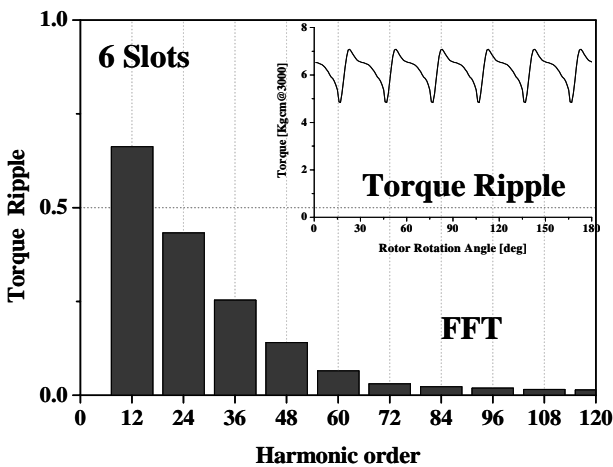


Fig 14. Result of torque ripple fft & torque ripple 6slot motor

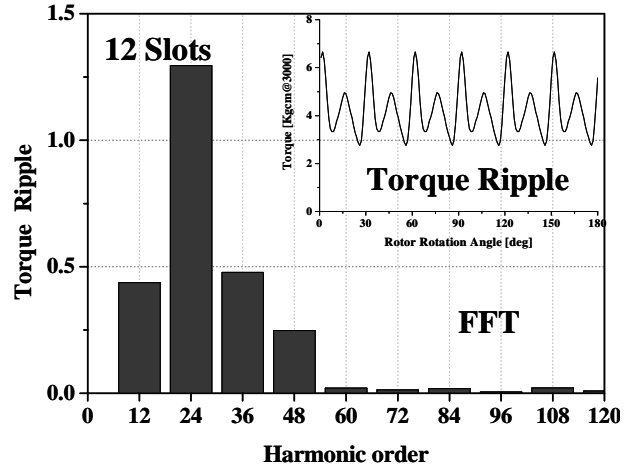


Fig 15. Result of torque ripple fft & torque ripple of 12slot motor

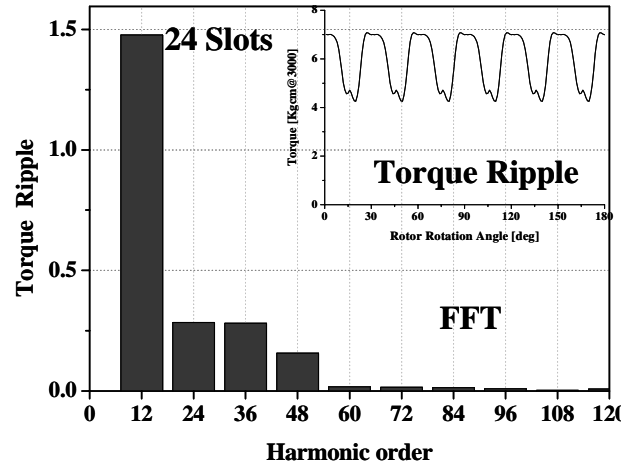


Fig 16. Result of torque ripple fft & torque ripple of 24slot motor

4. 결 론

모터의 전자기적 진동 요소는 기구적인 요소와 전자기적인 요소로 나누어 생각할 수 있다. 모터의 운전에 상관없이 특정 주파수 대역에서 진동의 특징이 나타나는 공진과 주파수에 따라 진동 특성이 나타나는 형태의 두가지 형태가 있다. 전자기 가진원에 의해 발생하는 진동의 특징은 슬롯별로 각각 다르며 슬롯의 수와 넓이 등에서 오는 Flux의 변화와 관련이 있다. 6슬롯의 경우 특정 조화 성분에 의한 진동도 발생하지만 전자기력에 의한 진동 요소가 골고루 분포하고 있어 전체적으로 많은 진동을 일으킨다. 12슬롯의 경우 역기전력에 영향을 많이 받으며 토크 리플의 경우 진동에 많은 영향을 미치겠지만, 전체 토크가 크지 않아

6슬롯의 진동보다 크지않다. 24슬롯의 경우 코깅 토크 면에서 주기가 많아지면서 그 크기 또한 작아지는 효과와 더불어 토크 리플도 12 슬롯 보다 진동에 대한 영향도가 낮은 형태와 크기를 갖고있다. 종합해보면 슬롯의 수가 많은 쪽이 저진동 면에서 더 유리하다.

후 기

본 연구는 산업자원부와 한국산업기술재단의 지역혁신인력양성사업으로 수행된 연구결과임

참 고 문 헌

(1) Jae-Yeol Kim, Lee-Ku Kwac, Jae-Sin An, Dong-Jo Yang, Kyung-Suck Song, Ki-Hyung Park, 2002, "Acoustic Noise Reduction of A SRM for Fan in Air conditioner" Proceedings of the KSNVE Annual Spring Conference, pp. 816~821.

(2) H.S.Han, W.B.Jeong, G.H.Kim and D.H.Song 2002, "Automatic Measurement of Noise and Vibratio for Power Seat Dc motor in the vehice", Proceedings of the KSNVE Annual Spring Conference, pp. 1142~1147.

(3) Sang-Moon Hwang, 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) Sang-Moon Hwang, 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.