한국소음진동공학회 2011년 추계학술대회논문집, pp.463~468

외부회전자형 BLDC 전동기의 소음원 규명

Sound Source Investigation of Outer Rotor BLDC Motor

이창민† · 우호균* · 문정원*

Lee Chang-Min, Woo Ho-Kyun and Moon Jung-Won

Key Words : BLDC Motor(BLDC 전동기), Kinematic Energy(운동에너지), Local Force(로컬 포스), Modal analysis(모드해석)

ABSTRACT

According to a quantum leap of the performances of automobile, environmental factors are important as functional factors, especially noise. BLDC motor, one of the part of automobile, is also no exception. In this paper, investigation of the sound sources of outer rotor type BLDC motor is performed. In order to reduce noise, it must be necessary knowing sound source. To this end, this paper is analyzed two viewpoints, structural and electromagnetic causes. For structural analysis, modal experiment and 3D mode analysis are performed. On behalf of electromagnetic analysis, 2D finite element method is carried out. Finally, coupling analysis is performed in order to know about influence between two factors.

1. 서 론

자동차 시장이 지속적으로 증가되고 여러 가지 신기술이 자동차 각 부품에 적용됨에 따라 자동차의 성능이 비약적으로 향상되었다. 특히 전기자동차와 하이브리드 자동차의 개발과 자동차의 고급화와 고내구성을 지속적으로 요구하는 추세에 맞게 BLDC (Brushless Direct Current) 전동기가 각광을 받고 있다. BLDC 전동기는 기존의 기계적으로 정류하는 DC 전동기와는 달리 전기적으로 비접촉식 정류가 가능하므로 반영구적이고 신뢰성이 높아 그 쓰임이 계속 증가하는 추세이다. 그러나 여전히 소음측면에서의 문제점은 대두되고 있으며, 이를 해결하기 위해 여러 가지 설계 방안이 제시되고 있다. BLDC 전동기는 회전하는 형태에 따라 외부회전자형과 내부회전자형으로 나눌 수 있다. 외부회전자형 BLDC 전동기는 일반 내부회전자형 전동기보다 관성 모멘트가 커서 정속운전에 유리하고, 고속회전과 회전력이 많이 필요한 곳에 사용된다. 특히 자동차의 환풍장치나 에어컨 휀에 주로 사용되기 때문에 전동기에서 발생하는 소음이 탑승자에게 더욱 민감하다.[1] 본 논문에서는 BLDC 전동기 중에서 외부회전자형 전동기의 소음원을 밝히고자 한다. 전동기의 소음원은 크게 구조적인 원인과 전자기적 원인으로 나눌 수 있다. 구조적인 원인은 모드실험과 해석을 통해 분석한다. 전자기적 원인은 전자기력으로 작용하는 글로벌 포스인 코깅토크와 토크리플이 있으며, 로컬포스인 법선방향 로컬포스가 있다. 그러나 전동기의 소음원을 자세히 분석하기 위해서는 글로벌포스의 요소인 로컬포스를 연구할 필요가 있다. 전류파형의 왜곡이나 드라이버에 의한 스위칭 주파수 (switching frequency)도 소음에 영향을 미치지만, 결국 로컬포스에 영향을 미쳐 진동이나 소음의 원인이 된다고 보는 것이 타당하다. 이를 분석하기 위해

† 교신저자; LIG 넥스원 주식회사
E-mail : changmin.lee@lignex1.com
Tel : 031-288-9370 , Fax : 031-284-4542
* LIG 넥스원 주식회사

서 Maxwell stress tensor를 이용한 2D 유한요소법으로 해석하고 주파수 분석을 실시하였다.

2. 본 론

2.1 소음의 측정

Fig. 1의 대상전동기는 4극 6슬롯의 히터 또는 에어컨 모드 시 공기순환용으로 사용되는 전동기이며, Table 1은 출력 특성에 대한 제원표이다. 전동기 자체의 소음을 분석하기 위하여 휀을 부착하지 않은 상태에서 소음을 측정하였으나, 휀을 장착한 상태의 정격부하를 인가하기 위해 Fig. 2와 같이 전동기에 부하기를 연결하였으며, 부하기는 전동기와 커플링을 통해 연결되어 있다. 수음거리에 대해서는 정해진 국제 규격이 없으며, 업체별, 제품별로 자체규정을 가지고 있는 것이 일반적이다.[(2)] 본 논문에서는 0.1m 떨어진 지점에서 Bruel&Kjaer Microphone Type 2669를 이용하여 수음을 하였고, 소음 측정을 위해 Bruel&Kjaer Mulichannel Data Acquisition Type 2816을 이용하였다. 또한 대상전동기의 정격회전수인 3000RPM을 확인하기 위해 타코미터를 장착하였다. 측정주파수는 가청주파수인 20Hz ~ 20kHz 범위 내에서 실시하였다. Fig. 3과 Fig. 4는 소음 측정결과를 각각 1/3 octave band와 narrow band로 나타낸 것이다. 결과에서 알 수 있듯이 600Hz와 1.5 ~ 2.5kHz 부근에서 소음이 크게 발생하는 것을 알 수 있다. 따라서 이 영역을 관심주파수로 선정하고 소음의 원인을 분석하고자 한다.

Figure 1. Schematic of subject motor

Table 1 Specifications of subject motor

항목		단위	
정격전압		Voltage	DC12.5
정격부하 5.5kgf.cm	전류	Amp.	30이하
	운전속도	RPM	3,000 ± 100
	효율	%	65이상
	출력파워	Watt	200
전장		mm	95
무게		kg	1.5이하

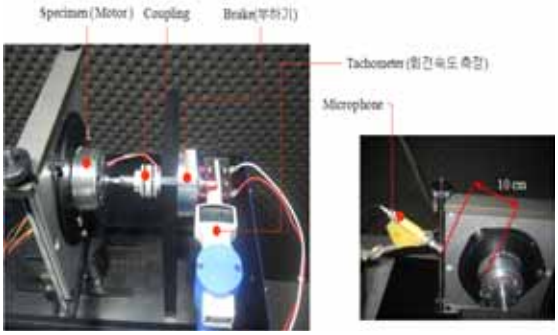

Fig 2. Experimental setup of noise.

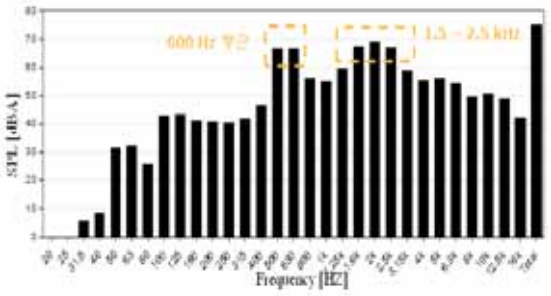

Fig 3. Result of noise, 1/3 octave band

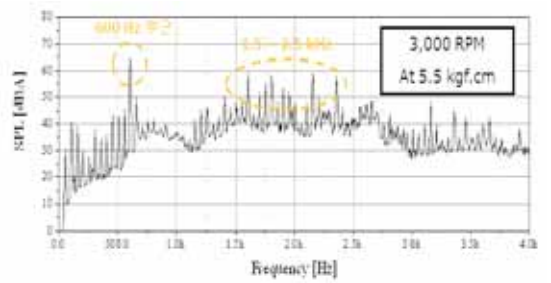

Figure 4. Result of noise, narrow band

2.2 구조적 소음원 분석

외부회전자형 전동기의 구조적 소음원인을 분석하기 위해 모드실험과 해석을 병행하였다. Fig. 5는 모드실험 시 구성도이다. Fig. 6과 같이 전동기에 가속도계를 부착한 후, Impact Hammer를 이용하여 전동기의 고정자와 회전자 그리고 이들의 결합한 상태를 각각 가진하였다. Fig. 7은 모드 실험의 결과 그래프이다. 그래프에서 확인할 수 있듯이 회전자 및 고정자와 회전자를 결합한 상태의 공진주파수는 600Hz와 1.6kHz, 2.2kHz로 소음이 크게 발생하는 부분과 일치하는 것을 알 수 있고, 고정자는 3.3kHz에서 공진이 발생함을 알 수 있다. 모드 실험의 결과를 모드해석을 통해 다시 한 번 확인하였다. 표2에는 모드해석 시 사용한 고정자, 회전자 및 자석의 물성치를 나타내었다. Fig. 8은 모드해석의 결과이다. 그림 8에서 알 수 있듯이 1차 모드는 600Hz 부근에서 발생하며 회전자가 변형하는 모드가 아닌 회전축에서 발생하는 공진임을 알 수 있고, 2차, 3차모드가 각각 1.7, 2.3kHz로 회전자 자체에서 발생하는 모드임을 알 수 있다. Fig. 9는 3.3kHz에서 발생하는 고정자의 1차모드 형상이다. 모드실험과 모드해석 결과 소음이 발생하는 주파수와 일치하는 모드는 회전자에서 발생하는 것을 알 수 있고, 외부회전자형 BLDC 전동기에서는 구조적으로 회전자가 소음에 영향을 미치는 것을 알 수 있다.

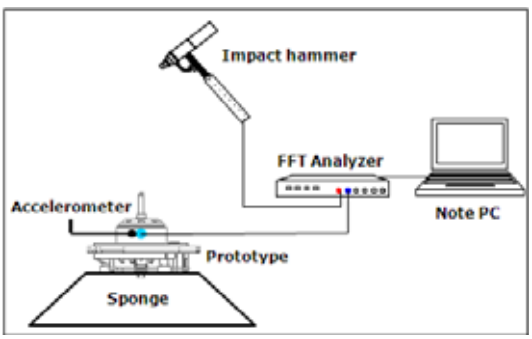

Figure 5. Mode experimental setup.

Table 2 Material properties of each part

Part	material	Density [kg/m^3]	Young's modulus [GPa]	Poisson's ratio
Rotor	S45C	7870	205	0.29
Stator	S45C	7870	205	0.29
Magnet	Ferrite	4800	150	0.28

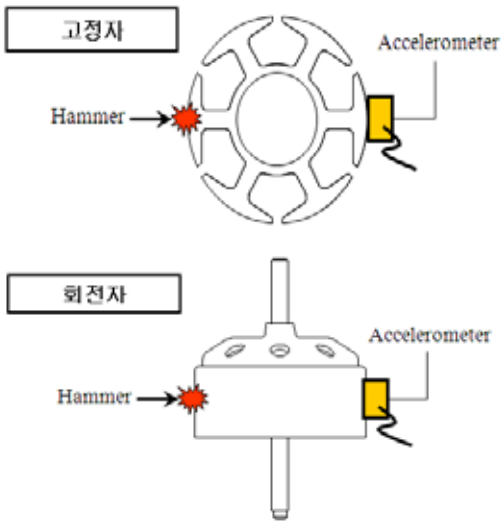

Figure 6. Position of Accelerometer.

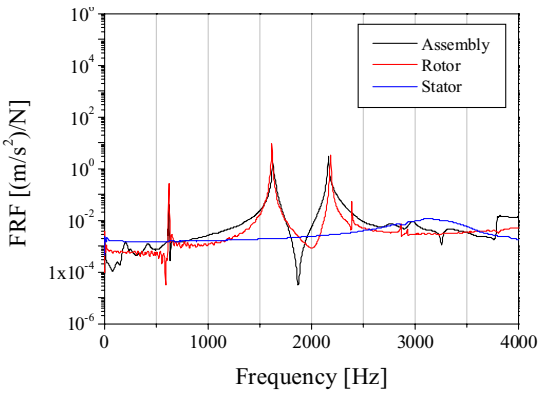

Figure 7. Results of modal experiment.

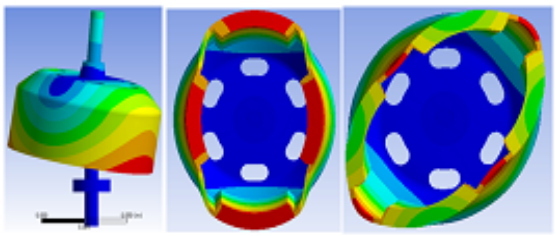

Figure 8. Results of modal analysis of Rotor

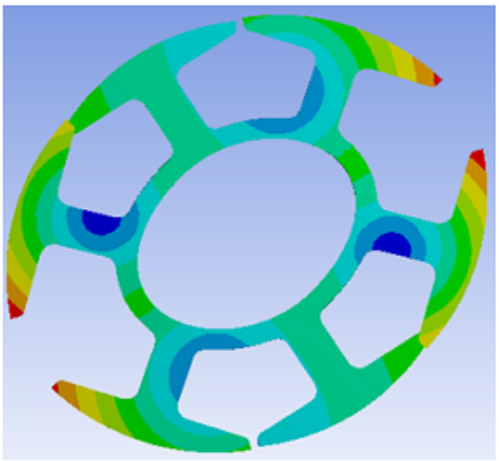

Figure 9. Result of modal analysis of stator

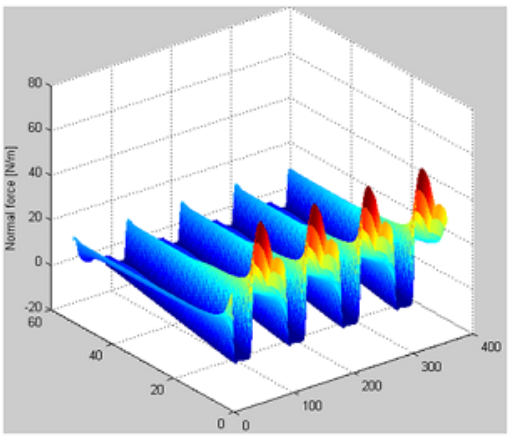

Figure 10. Local force applied on stator

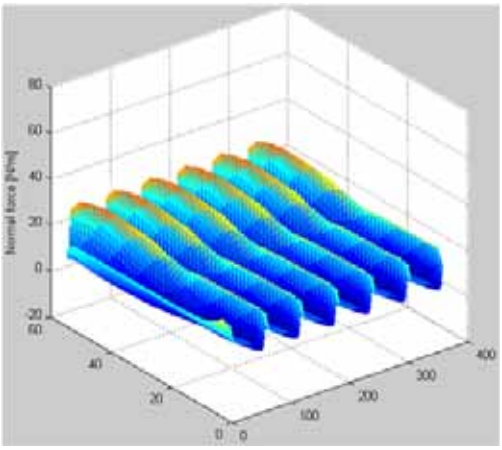

Figure 11. Local force applied on rotor

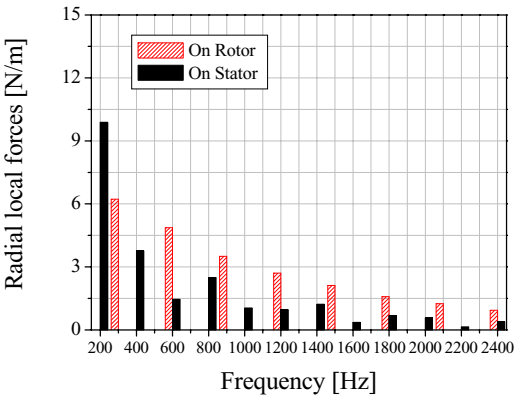

Figure 12. FFT of local force.

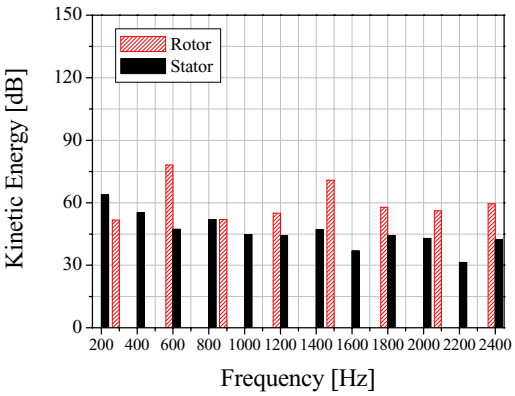

Figure 13. Kinematic energy on surface of rotor and stator.

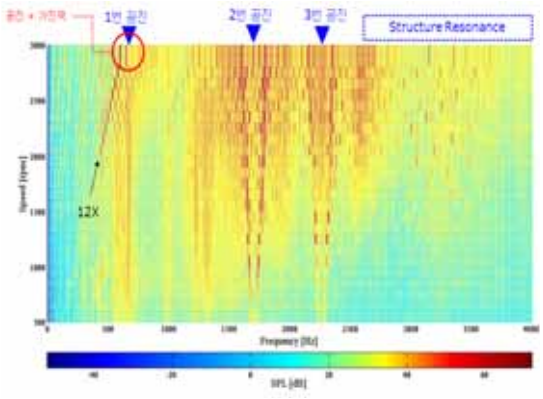

Figure 14. Waterfall of noise

2.3 전자기적 소음원 분석

구조적 소음원 분석을 통해 전동기의 회전자가 구조적인 소음원임을 알 수 있었다. 본 절에서는 서론에서 언급한 바와 같이 전자기 가진력인 로컬포스를 분석한다. 로컬포스는 접선방향 힘과 법선방향 힘이 존재하지만 접선방향의 힘은 법선방향의 힘에 비해 무시할 만큼 작게 나타나므로 법선방향의 힘만 계산하였다. 식 (1)과 같이 Maxwell stress tensor로 표현할 수 있는 법선방향 로컬포스는 BLDC 전동기의 고정자 잇날 표면에 수직으로 작용하는 자기견인력으로 이는 전동기 회전 시 잇날을 직접적으로 가진하게 된다.

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

여기서 μ_0, B_n, B_t 은 각각 공기투자율, 잇날 표면의 법선방향 자속밀도, 접선방향 자속밀도를 나타낸다. 회전자가 회전하면서 이 힘들은 자기장의 변화로 인해 변하게 된다.[3] 식(1)을 이용해 고정자와 회전자에 작용하는 반경방향 로컬 포스를 회전각도와 위치에 따라 구하였다. Fig. 10과 Fig. 11은 정격회전수인 3000rpm에서 각각 고정자에 작용하는 반경방향 힘과 회전자에 작용하는 반경방향의 힘이다. 그림에서 알 수 있듯이 고정자와 회전자에 작용하는 반경방향의 힘은 주기가 다름을 알 수 있다. 강제 진동해석 시 하모닉 해석을 위해 반경방향 로컬포스의 주파수 분석을 실시하였다. 주파수 분석은 관심주파수영역인 2.4kHz까지 수행하였고, Fig. 12에 그 결과를 나타내었다. 주파수분석 결과에서도 알 수 있듯이 고정자와 회전자는 기본주파수가 다른 것을 확인할 수 있다. 주파수분석 결과를 가진력으로 이용하여 고정자와 회전자 표면에 접한 공기층의 운동에너지가 소음에너지로 전부 변환한다는 가정 하에 강제진동해석을 수행하였다. 식(2)와 같이 소음의 크기는 진동해석을 통해 분석하고자 하는 진동자 법선방향 속도에 의한 운동에너지를 적분하여 나타낼 수 있다.

$$E_k = \oint_c \rho V_n^2 dl \qquad (2)$$

여기서 E_k, ρ, V_n은 각각 운동에너지, 공기의 밀도, 고정자 표면의 법선방향 속도이다.[2] Fig. 13에는 회전자와 고정자 표면에 작용하는 운동에너지를 나타내었다. 그림에서 알 수 있듯이 회전자와 고정자 표면의 운동에너지는 주파수 성분이 다른 것을 알 수 있으며, 회전자 표면의 운동에너지가 소음이 크게 발생하는 주파수와 일치하는 600Hz와 1.6~2.5kHz 값이 큰 것을 알 수 있다.

2.4 종합접 분석

Fig. 14는 500~3000rpm의 전동기 회전속도에 따른 0~4kHz의 주파수 범위에서 전동기의 소음 레벨을 색깔로 도시한 것이다. 전동기 회전주파수와 상관없이 소음이 일정한 주파수에도 발생하는 부분이 보이는데 이는 구조공진주파수이다. 반면 전자기 가진력 주파수는 전동기의 회전속도에 따라 변하게 되는데 Fig. 14를 보면 공진주파수 부근에서 전동기 회전속가 변함에 따라 소음이 대각선으로 발생하는 요소가 그것이다. Fig. 12에 보이듯이 고정자와 회전자 모두 공진주파수에서의 가진력이 될 수 있다. 하지만 소음이 크게 발생하는 주파수 대역에서 고정자보다 회전자의 가진력 크기가 크고, Fig. 14에 나타나있듯이 회전자 표면에서의 운동에너지가 소음이 크게 발생하는 주파수와 일치하기 때문에 회전자가 소음의 주된 원인임을 알 수 있다. Fig. 14의 가장 윗부분인 3000rpm에서 보면 전자기 가진력과 구조공진 주파수가 일치하는 지점이 600Hz부근과 1.6~2.4kHz 부근인 것을 알 수 있으며, 회전자의 가진력이 구조공진과 더 크게 작용하면서 소음이 크게 발생하는 결과이다.

3. 결 론

본 논문에서는 외부회전자형 BLDC 전동기의 소음원을 분석하였다. 전동기의 소음을 저감하는 설계를 진행함에 있어서 소음원 분석 과정이 없이 소음을 저감하는 방법이란 있을 수 없을 것이다. 이를 밝히기 위해 모드실험과 모드해석을 통해 구조공진주파수를 찾고, 전자기 가진력인 로컬포스를 해석하여 가진력의 주파수 성분을 확인하였다. 그 결과 회전자의 전자기 가진력 주파수가 회전자 및 전동기 전체의 구조공진주파수와 일치하는 것을 알 수 있었고, 이는 소음이 크게 발생하는 주파수 대역과 동일한 것을 알 수 있었다.

참 고 문 헌

(1) Bang, K. C., Kim, K. S., Kwon, J. H., 2008, Lee, Y. K., Choi, S. K., Yoon, K. C. and Lee, Y. S., 2003, Analysis of Outer Rotor Type BLDC motor vibration characteristics according to slot combination, Proceedings of the Korean Society for Noise and Vibration Engineering Conference, pp. 196~201.

(2) Lee, H. J., Kwon, J. H., 2009, Study on Acoustic Resonance of Air-conditioner Fan BLDC Motor, Transactions of the Korean Society for Noise and Vibration Engineering, Vol. 19, No. 9, pp. 863~869.

(3) Kwon, J. H., Kim, K. S., 2009, Effect of the Number of Slots on the Acoustic Noise from BLDC Motors, Transactions of the Korean Society for Noise and Vibration Engineering, Vol. 19, No. 8, pp. 759~763.

(4) Kenneth, G. M., 1995, Vibration Testing, John Wiley & Sons, Inc., New York.