

에어컨 뺀 BLDC 전동기의 음향공진에 관한 연구

Study on Acoustic Resonance of Air-conditioner Fan BLDC Motor

이 홍 주* · 권 중 학* · 이 창 민* · 황 건 용** · 황 상 문†

Hong-Joo Lee, Joong-Hak Kwon, Chang-Min Lee, Gun-Yong Hwang and Sang-Moon Hwang

(2008년 3월 3일 접수 ; 2009년 7월 9일 심사완료)

Key Words : Acoustic Noise(소음), Acoustic Resonance(음향공진), Design of Experiments(실험계획법), Fan Motor(뺀 전동기)

ABSTRACT

Acoustic noises generated during motor operation in mechanical system are from electromagnetic, mechanical, aerodynamic and electrical sources. For identification of mechanical noise origins, misalignment, unbalance, fan shape, resonance, and vibration modes have been extensively considered to describe noise behavior. An experiment-based approach as well as a mathematical approach needs to be adopted for a realistic study into noise and vibration of the motor, because motor noise characteristics differ from type to type due to various noise sources. This paper analyzes noise characteristics of a brushless DC motor for air-conditioner fan, and proves that the test motor noise originates from acoustic modes of airspace in the motor. The motor noise sensitivity analysis by design of experiments reveals that the noise characteristics are closely related to switching frequency and frame thickness.

1. 서 론

최근 생활수준의 질적 향상 및 대기오염 등의 이유로 가정이나 사무실 등에 에어컨과 같은 공조설비의 수요가 증가하고 있으며 점차 널리 일반화 되어가고 있는 추세이다. 특히 실내에서의 생활이 매우 큰 비중을 차지하고 있는 요즘 에어컨은 필수 불가결한 존재로서 인식되고 있으며 생활필수품으로서 자리를 잡아가고 있다. 에어컨의 기본은 냉방 기능이다. 하지만 요즘은 업체들 간에 냉방 기술 수준이 비슷해지면서 공기정화 능력, 절전 기능, 전문 설비 등 부가적인 요건들이 에어컨 선택의 중요한 기준이 되고 있으며, 여기에서 간과될 수 없는 사항이 진동과 소음 문제이다. 소음에 민감한 사람은 에

어컨의 저소음 기능을 고려하여, 조용한 도서관 수준의 소음인 40 dB 이하 제품을 선호한다. 기존에 에어컨의 전동기는 inner rotor를 사용하였고 이 전동기는 전동기 체적이 커서 유로 면적을 줄여 냉각 효율이 떨어지는 문제점이 있었다. 따라서 냉각 효율을 세계최고의 시스템을 갖추기 위해서 전동기 볼륨을 줄여 유로공간을 확보되어야 하는 동시에 저소음에 대한 연구가 절실히 요구 된다. 에어컨의 실내기를 구성하고 있는 것에는 열 교환기와 뺀 전동기가 있다. 뺀 전동기는 과거에는 유도전동기를 사용하였으나 현재는 고효율, 고회력, 인버터 제어 그리고 소형화하는 추세에 있다. 진동과 소음은 소비자의 생활의 불편을 초래하는 것 외에 시스템의 효과적인 운전과 시스템 수명에도 직접적인 영향이 있으므로, 진동과 소음을 최소화 하는 설계가 반드시 고려되어야 한다. 특히 가전 기기의 고회력화 및 소형화 추세에 맞춰 이를 구성하는 전동기 또한 높은 출력 밀도가 요구됨에 따라, 이에 부응하는 전동기로서 outer rotor BLDC(brushless DC) 전동기가

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

* 부산대학교 기계공학부

** 영산대학교 컴퓨터공학부

각광을 받고 있다. Outer rotor BLDC 전동기는 영구자석에 의한 자기 토크(magnetic torque)를 이용함에 따라 높은 출력 밀도를 가지는 장점이 있으나, 유도기에 비해 더 많은 진동 소음원을 가진다는 단점이 있다. Outer rotor BLDC 전동기에서 발생하는 진동 소음의 주요 원인은 크게 전자기적인 원인, 기계적인 원인, 그리고 공기역학적인 원인으로 분류할 수 있다. 최근에 에어컨의 소음문제가 대두되면서 웬 전동기에 의한 진동 소음의 저감 대책에 대한 연구는 미흡한 실정이다. 따라서 이로서, outer rotor BLDC 전동기를 대상으로 발생하는 소음원을 찾아내고 진동과 소음을 저감할 수 있는 설계에 대해서 스위칭주파수, 브라켓 두께, 오버행 등 인자들을 고려하여 검토하고자 한다. 먼저 이미 제작되어 있는 시작기의 소음 성능 평가를 시행하여⁽¹⁾, 소음원을 분석하고⁽²⁻⁴⁾, 실험계획법⁽⁵⁾을 이용해 다른 요인도 검증한다.

2. 시작기의 소음 평가

2.1 웬 장착과 전동기 단품시 소음 비교

현상분석을 위하여 에어컨 웬 전동기의 소음 측정시 전동기에 웬을 부착한 채로 소음을 측정하는 것이 옳으나, 소음이 전동기에 기인한 것인지 확인하기 위해서 웬 장착시와 전동기 단품상태에서의 소음을 모두 측정하였다. 소음을 측정하는 가장 기본 방법은 일정한 위치에서 동일한 조건으로 소음을

측정하는 것으로 둘 이상의 조건에 대한 소음 비교가 가능 하다. 수음거리에 대해서는 정해진 국제 규격이 없으며, 업체별, 제품별로 자체규정을 가지고 있는 것이 일반적이다. 이 논문에서는 전동기에서 수직으로 1 m 떨어진 지점에서 Bruel&Kjaer Microphone Type 2669를 이용하여 수음을 하였다. 이 실험에서는 전동기를 지그에 고정시킨 상태로 소음을 측정하였으며, Bruel&Kjaer Multichannel Data Acquisition Unit : Type 2816을 이용하여 소음을 분석하였다. FFT 장비 설정은 아래와 같으며, Fig. 1과 Table 1은 실험에 사용된 모터 및 실험에 대해 나타낸 것이다.

에어컨 실내기의 소음은 웬 소음이 주류를 이루나, 저속으로 갈수록 웬 소음은 감소하고, 전동기의 소음이 부각된다. 이는 에어컨 취침 모드인 경우 저속으로 운전시 귀에 거슬리는 전동기 소음이 발생한다. 따라서 에어컨의 저속 운전시에 전동기소음의 주요 원인을 도출하고자 한다. Fig. 2는 웬 장착시 전동기의 전체소음과 전동기 단품상태의 전체소음을

Table 1 Test setup of noise and vibration

	Noise	Vibration
Sensor	Microphone	Accelerometer
Sensitivity	62.05 (μPa/V)	10(mV/g)
Average time	500	50
Frequency range	0~6.4(kHz)	0~2(kHz)
Frequency resolution	1(Hz)	1(Hz)
Window function	Hanning	Hanning
Weighting function	A-weighting	-

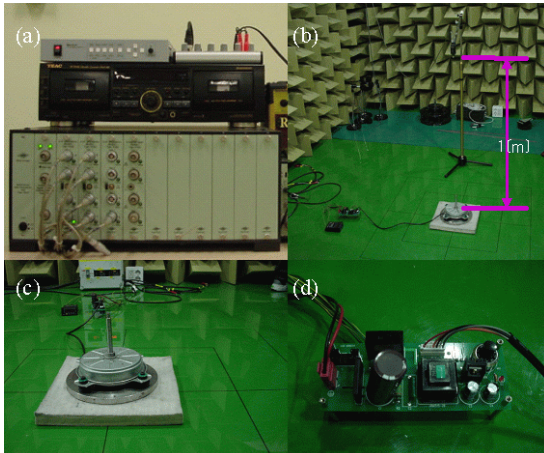


Fig. 1 Test setup; (a) FFT analyzer, (b) anechoic room, (c) test motor, (d) driver

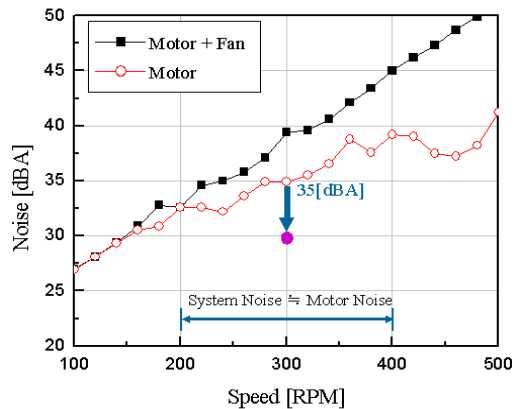


Fig. 2 Total noise of prototype

비교한 것이다. 여기서 전동기의 운전속도는 100 rpm 부터 500 rpm으로 20 rpm단위로 측정하였고 값은 전체 소음값으로 표시하였다. 여기서 알 수 있는 것은 400 rpm 이하의 영역은 시스템의 소음이 전동기 소음에 의한 소음과 유사함을 알 수 있으며, 전동기 소음이 팬 소음에 비해 커지는 것을 알 수 있다.

2.2 전동기 속도에 따른 소음 평가

Fig. 3은 공진에 의한 구조적인 원인에 의해 발생하는 소음과 전자기적 source에 의해 발생하는 소음이 각각 합쳐져서 전동기 전체의 소음으로 나타남을 설명하고 있다. 전자기력에 의한 소음은 전동기의 운전속도에 비례해 소음의 주파수특성이 변화할 것이나 공진에 의한 소음은 전동기의 운전속도와 소음의 주파수특성이 변화하지 않는다. 이 실험은 이러한 특성을 이용하여 전자기력에 의한 소음과 공진에 의한 소음을 분해하고자 한 것이다. Fig. 4는 전동기의 운전 속도 변화에 따른 소음의 양상을 측정 한 것이다. 운전속도는 100에서 500 rpm까지 변화시켜가며 1 m 떨어진 지점에서 수음한 소음의 크기를 색으로 나타낸 것이다. 이 그림에서 운전속도의 변화와 무관하게 소음이 크게 발생하는 대역(600~700 Hz)이 존재한다. 이 대역에 걸쳐 운전속도의 16X배의 간격으로 소음이 더 크게 발생하며 이는 속도가 변함에 따라 가진력이 변하기 때문이다. 이런 전자기적 가진력의 변화가 소음의 크기를 변화시키는 원인임을 Fig. 3을 통해 이미 설명하였다. 600~700 Hz에서의 소음은 운전 속도 변화와 무관하고 항상 크게 나타나는 것으로 보아 공진에 의한 것이라고 볼 수 있다. 위의 공진 주파수의 원인을 알아내기 위해 전동기 부품별로 모달 테스트를 병행할 필요가 있다. 전동기 자체 소음이 어느 대역에서 높은지 정확하게 현상을 분석하기 위하여 Fig. 5에서와 같이 전동기 회전수별 소음을 조화 성분만 뽑아서 분석을 해 보았다. 조화 성분의 16X의 배수이면서 600~700 Hz에 해당되는 고조파 모두가 큰 소음 발생함을 알 수 있다. 이것은 전동기의 소스보다는 공진에 의한 소음이 크게 나오기 때문이다. 전동기의 저속 영역에서 소음원의 주 관심영역은 16X의 배수이면서 600~700 Hz로 나타 낼 수 있다. 따라서 전동기의 회전수를 300 rpm으로 정하고 이때의 전동기 소음을 1/3 옥타브밴드와 리니어

밴드 두가지 조건으로 분석하였다. 이때 높게 나타나는 부분은 Fig. 7에서 보이듯이 16 kHz의 전기적인

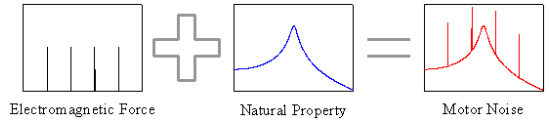


Fig. 3 Outline of motor noise

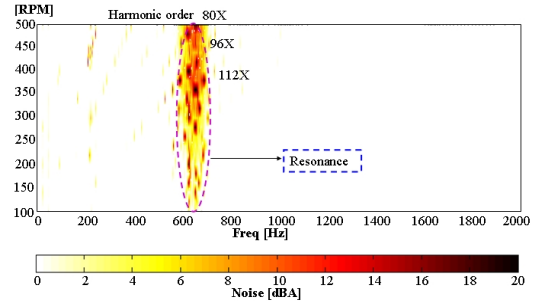


Fig. 4 Noise characteristic according to drive speed

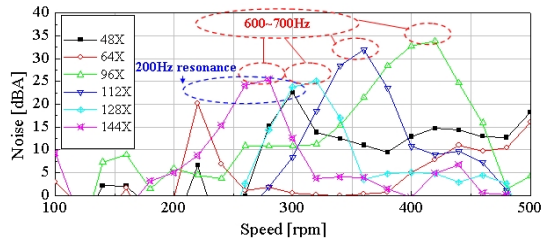


Fig. 5 Noise respect to harmonics order

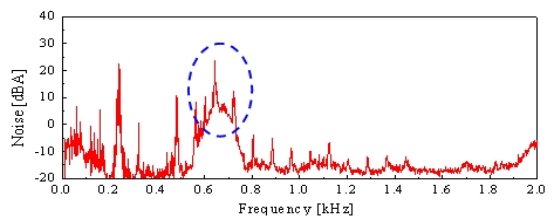


Fig. 6 Narrow band noise at 300 rpm

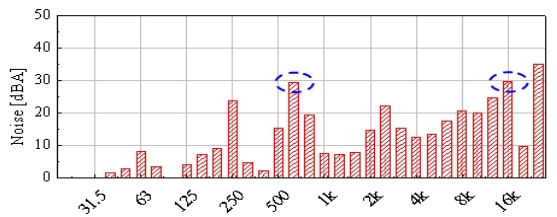


Fig. 7 1/3 Octave band Noise at 300 rpm

스위칭의 부분과 공진이 일어나는 600~700 Hz에서 알 수 있다. 전기적 스위칭주파수와 관련된 소음은 뒤에서 다시 다루고자 한다. 300 rpm 내로우 밴드 조건을 보면 600~700 Hz에서 공진 소음이 발생함을 알 수 있다.

3. 소음 분석

3.1 전자기력 분석

이 논문에서 사용된 진동기의 극 수와 슬롯 수는 각각 32와 24이며, 전자기력의 주파수 성분은 다음과 같다.

$$f_c = n \cdot lcm \cdot \frac{N}{60}, f_t = 3n \cdot p \cdot \frac{N}{60}, f_l = 3n \cdot p \cdot \frac{N}{60} \quad (1)$$

여기서 f_c, f_t, f_l, n, N, p 및 lcm 은 각각 코깅토크, 출력토크, 국소작용력의 주파수 성분, 임의의 자연수, 진동기의 회전속도(rev/min), 극수 및 극수와 슬롯수의 최소공배수이다. 식에서 알 수 있듯이 진동기의 전자기력은 진동기의 회전속도에 비례한다. 이러한 특성은 소음 특성에도 나타난다. Fig. 4에서 보여주는 공진주파수 부근의 대각선이 이에 해당한다.

3.2 실험 모드 해석

이 실험의 목적은 앞선 소음실험의 결과로 확인한 시스템 공진주파수(600~700 Hz)를 확인하고자 함이다. 진동기를 줄에 매달아서 웨이커(shaker)로 랜덤가진한 것을 가속도계로 진동신호를 측정하여 주파수 응답 함수(FRF: frequency response function)를 구하였다. 진동기의 상태에 따라 Table 2와 같이 모드 실험을 수행하였다. 그 결과 Fig. 8과 같이 600~700 Hz사이에서는 공진주파수가 존재하지 않는 것을 확인하였다. 이는 600~700 Hz에서 발생하는 소음이 공진소음이 아닌 것을 의미한다.

3.3 음향 모드 해석

이 실험은 600~700 Hz에서 음향 모드가 존재하는지 확인하기 위한 실험이다. 먼저, 회전자 프레임에 구멍을 뚫은 후 한 쪽 구멍에서 혼 드라이버를 이용해 주파수에 따라 일정한 음, 다시 말해 랜덤 노이즈를 발생시키고 다른 쪽에서 마이크로폰을 이

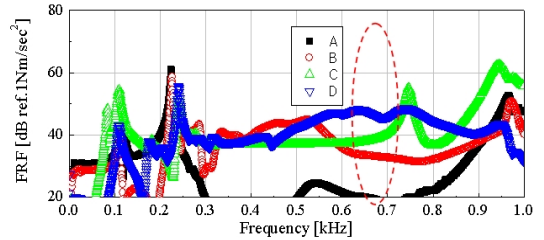


Fig. 8 Frequency response function

Table 2 Experimental condition of FRF analysis

Item	Experimental condition
A	Rotor (motor only)
B	Bottom Bracket (motor only)
C	Rotor (combined jig)
D	Bottom Bracket (combined jig)



Fig. 9 Acoustic modal test set up

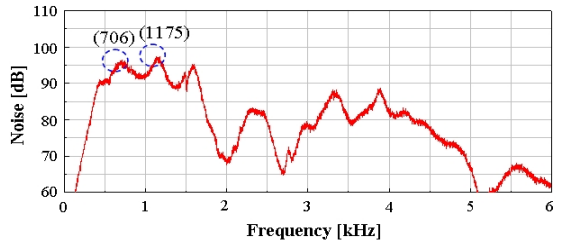


Fig. 10 Result of acoustic modal test

용해 음압을 측정하였다. 관심 주파수에서의 소음이 음향 모드에 의한 소음이라면 그 주파수 대역에서 소음이 크게 발생할 것이고, 기구부 공진에 의한 소음이라면 소음이 발생하지 않을 것이다. Fig. 10은 음향 모드 실험 결과이다. 700 Hz와 1200 Hz부근에서 음향공진이 발생하는 것을 확인할 수 있다. 이 실험 결과가 타당한지 확인하기 위하여 유한요소 툴인 sysnoise로 해석하였다. Fig. 11은 음향모드를 해석하기 위하여 사용된 모델이며, Fig. 12는 음향 모드 형상을 보여준다. 실험에서의 공진주파수와 해

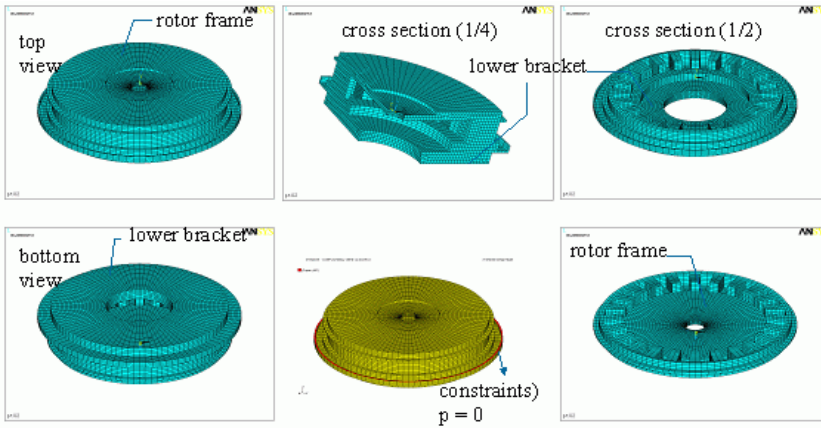


Fig. 11 Airspace model for finite element analysis

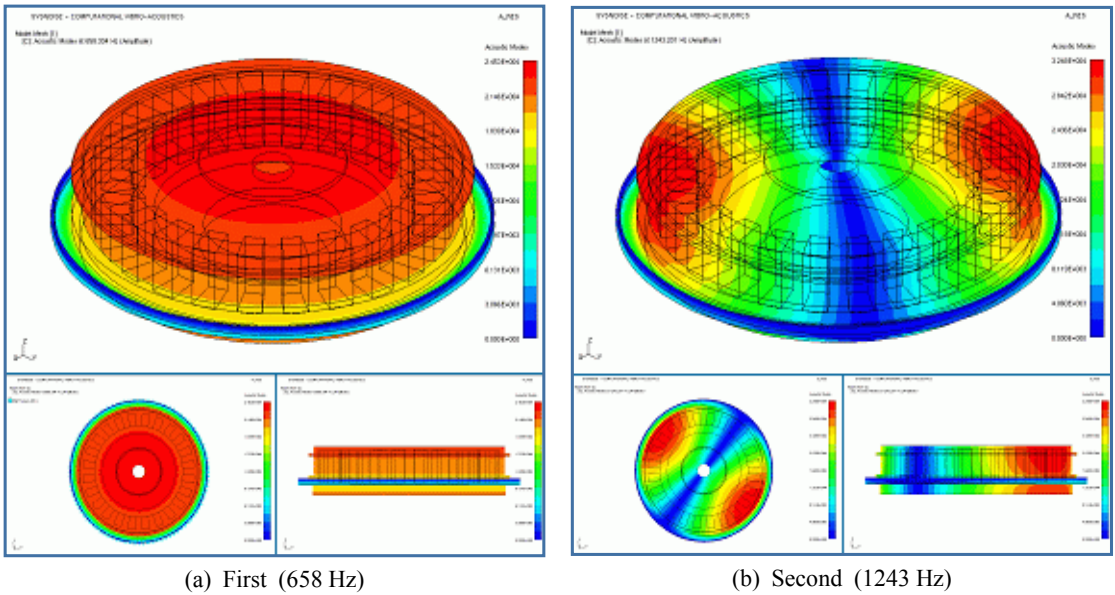


Fig. 12 Acoustic mode shape

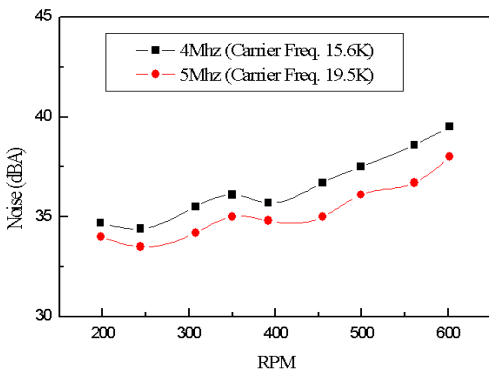


Fig. 13 Total noise respect to switching frequency

석에서의 공진주파수가 거의 비슷한 대역임을 확인할 수 있으며, 이는 600~700 Hz에서 음향모드가 존재하는 것을 확인할 수 있다.

3.4 전기적 스위칭주파수와 소음의 영향 분석

전동기 단품상태에서 발생하는 소음 중에서 600~700 Hz를 제외하면 전기적 스위칭 주파수인 16 kHz에서의 소음이 가장 크다. 일반적으로 스위칭주파수가 높으면 높을수록 소음이 감소하는 경향이 있으나, 비용이 커지는 단점이 있다. 그리고, 20 kHz 이상의 음압은 가청주파수 범위를 넘기 때문에 이 실

험에서는 스위칭주파수를 프로토타입인 16 kHz와 20 kHz를 비교 분석하였다. Fig. 13은 스위칭 주파수와 전동기 속도별 전체소음을 나타낸 것이다. 전체적으로 2~3 dB 저감하는 것을 볼 수 있다.

4. 실험계획법을 통한 민감도 분석

여러 가지 공학적 설계 문제 중에서도 특히 소음 저감 설계는 많은 설계 변수들과 그 설계 변수들의 상호작용 그리고 자기적 비선형성 때문에 매우 복잡한 문제라고 할 수 있다. 따라서 이러한 점들을 고려하지 않은 채 설계를 수행한다면 많은 시간과 노력을 필요로 할 것이다. 이 논문에서는 진동 및 소음을 줄이기 위해 보다 효율적이고 객관적인 소음 저감 설계가 되도록 실험 계획법(design of experiment)을 이용하였다.

오버행은 전동기의 고정자의 코아와 회전자자의 마그넷의 자속이 쇄교하는 범위 내에 있지만 단자가 크면 소음에 영향을 미친다. 이 실험은 마그넷의 폭을 변화시켜서 진행하였고, Fig. 14와 Table 3에서 소음의 실험결과를 보면 300 rpm에서는 소음의 차이를 나타나는 것을 확인할 수 있으며 유의한 인자로 볼 수 있다. 그리고, 전동기 하우징에 구멍을 내어 실험을 해보았다. 구멍의 없는 시작기와 구멍의 크기 및 수량으로 각각 실험 해 보았다. 소음실험을 한 결과를 Fig. 15과 Table 4에서 보면 구멍의 크기와 수가 증가할수록 600 Hz의 소음은 감소하는 대신에 2 kHz에서는 오히려 증가하는 경향을 나타냈다. 전체 소음 은 증가하므로 인자로서는 적합하지 않는 것으로 판단되어 인자에서 제외하고, 회전자 프레임 두께/오버행 변화로 두가지 인자를 선정하여

이후 실험계획을 진행하였다.

2인자 2수준으로 실험계획을 수립하여 실험을 하였다. 인자 조건은 회전자 프레임 두께를 1.2 mm/2.0 mm, 오버행의 유무 조건으로 시험결과를 보면 다음과 같다. 실험결과를 보면 조건별로 회전자 프레임 두께가 2.0 mm, 오버행이 없는 조건에서 전체

Table 3 Noise results of overhang

Run order	Rotor frame thickness (mm)	Overhang	Noise (dBA)
1	1.2	OK	32.1
2	2	NG	29.8
3	1.2	OK	31.1
4	2	NG	28.8

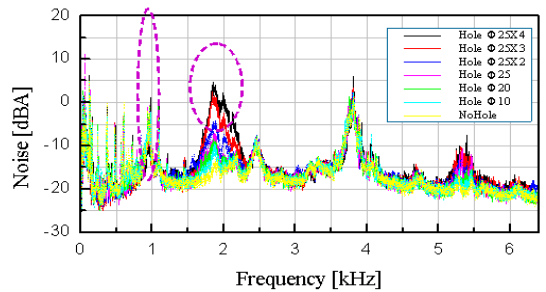


Fig. 15 Noise respect to hole size

Table 4 Noise results of hole size

Case	@ 600 Hz	@ 2 kHz
Hole Φ25 X 4	-8.35	4.65
Hole Φ25 X 3	-6.41	2.33
Hole Φ25 X 2	-6.43	-4.22
Hole Φ25	-3.4	-7.12
Hole Φ20	-2.98	-8.55
Hole Φ10	-2.6	-9.57
No hole	-0.15	-11.85

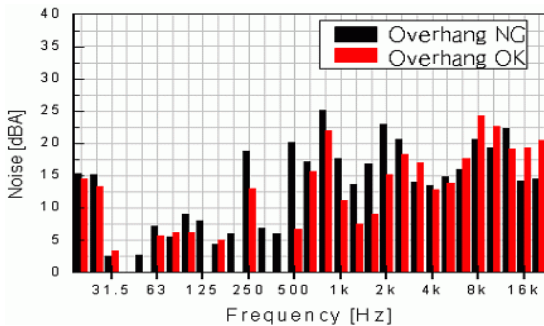


Fig. 14 Noise respect to overhang

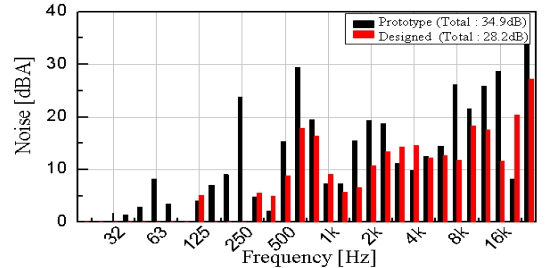


Fig. 16 Results of noise in the final condition

소음이 저감됨을 확인하였다. 주요 인자는 회전자 프레임 두께가 주인자임을 확인하였다. 앞서 도출된 인자들을 실험계획으로 최적조건을 도출하였다. 최종 조건에 시료를 제작하여 시험한 평가 결과를 정리하면 시작기와 최적 설계된 두 조건을 시험한 결과 Fig. 16과 같이 6.7 dB 감소하는 것을 확인하였다.

5. 결 론

지금까지 에어컨 실내기의 뢰 outer rotor BLDC 전동기 소음을 다양하게 해석 및 실험을 실시하였다. 고속영역에서는 뢰소음으로 전동기단품의 소음은 크게 영향을 주지 않는다. 이 논문에서는 저속영역에서 전동기 단품의 소음을 줄이기 위해 전기적인 부분과 기계적인 부분을 구분하여 영향을 분석하였다. 먼저, 전기적인 영역에서는 일반적인 전동기 전자기력의 주파수 특성을 제시하였고, 전동기의 입력단에 해당하는 스위칭 주파수에 따라 전동기 소음이 변하나 가청 소음 영역에서는 두가지 조건을 실험적으로 결과를 도출하였다. 스위칭주파수를 16 kHz에서 20 kHz로 변화시키면 소음이 2~3 dB 저감되는 것을 확인하였으며, 저속영역(200~400 rpm)에서는 모터 소음이 전체소음을 대부분을 차지하고 있으며, 전동기 소음이 시스템의 소음과 유사함을 확인하였다. 이 논문에서 제시된 전동기는 600~700 Hz 부근에서 공진주파수가 존재하는 것을 확인하였으며, 실험모드해석 및 음향모드해석과 실험을 통해 구조적 공진이 아니라 음향공진이 소음의 주인자임을 확인하였다. 저속영역에서의 소음을 저감하기 위해 설계변수를 도출하였다.

그러나 저속영역(200~400 rpm)에서는 전동기 소음이 전체소음에 많은 영향을 미치고 있으며, 저속영역 소음 저감을 위한 설계인자를 선정하여 실험계획을 적용하여 최적조건을 도출하였다. 기구부의 설계인자인 회전자 프레임의 두께, 오버행의 조건, bracket내에 hole의 수와 크기에 따라 소음이 변함을 실험적

로 확인을 했고 소음을 줄이기 위해서는 hole은 소음에 직접적인 영향을 주지 않으며, 주요 인자는 전기적인 스위칭 주파수와 회전자 프레임의 두께가 개선 인자임을 확인하였다. 회전자 프레임 두께가 2.0 mm, 오버행이 없는 조건에서 전체 소음이 시작기 대비 6.7 dB 저감되었다. 결론적으로 실험에 사용된 전동기의 소음원은 음향공진임을 확인하고 소음 저감을 위한 또 다른 조건을 확인하였다.

후 기

이 연구는 교육과학기술부와 한국산업기술진흥원의 지역혁신인력양성사업으로 수행된 연구결과임.

참 고 문 헌

- (1) Kenneth, G. M., 1995, *Vibration Testing*, John Wiley & Sons, Inc., New York.
- (2) Leo, L. B. and Eric, E. U., 1992, "Noise and Vibration Control Engineering," John Wiley & Sons, Inc., New York.
- (3) Lee, Y. K., Choi, S. K., Yoon, K. C. and Lee, Y. S., 2003, "NRRO Analysis of 3.5inch HDD Spindle Ball Bearings utilizing the Measured Geometric Imperfection," *Proceedings of the KSNVE Annual Spring Conference*, pp. 585~591.
- (4) Jeong, S. W. and Jang, G. H., 2001, "Analytical Theory of Ball Bearing Considering Waviness of Rolling Elements," *Transactions of the Korean Society for Noise and Vibration Engineering*, Vol. 11, No. 7, pp. 275~286.
- (5) Lee, G. G. and Goo, J. G., "Noise Reduction of Automobile Using Design of Experiment/Response Surface Method," *Transactions of the Korean Society for Noise and Vibration Engineering*, Vol. 10, No. 2, pp. 207~214.