

# BLDC 모터를 적용한 로터리 컴프레서 소음 저감에 관한 연구

## Study on the Noise Reduction in the Rotary Compressor using BLDC Motor

김진수† · 임경내\* · 구세진\* · 이장우\*\* · 전시문\*\*  
Jinsoo Kim, Kyungnae Lim, Sejin Ku, Jangwoo Lee and Simoon Jeon

**Key Words** : Electromagnetic attractive force(전자기적 인력), Modal Analysis(모드 해석), Air-gap (공극), Rotary compressor(로터리 압축기), Noise contour(소음 등고선도), Eccentricity(편심)

### ABSTRACT

The main noise source of the BLDC rotary compressor for air conditioner was analyzed by using the measurement of noise and vibration, noise contour, and experimental modal analysis. The source is presumed to be the mechanical resonance excited by the electromagnetic attractive force of the BLDC motor. To reduce the excessive noise of the BLDC rotary compressor due to the mechanical resonance, air-gap was enlarged. Its validation was conducted by the analysis of the electromagnetic attractive force which is generated by the BLDC motor. By enlarging the length of air-gap, the noise in the compressor and air conditioner was significantly improved by 2.5dB(A) and 4.5dB(A), respectively.

## 1. 서론

소비자가 일상적인 생활에서 손쉽게 접할 수 있는 가전제품을 중심으로 고효율화와 소음 저감을 위해 주요 제조 메이커들의 경쟁이 점점 치열해지고 있다. 고효율과 저소음으로 대표되는 에어컨의 기본 성능 특성은 압축기의 성능에 의해서 결정된다고 해도 지나친 말이 아니다. 에어컨을 구성하고 있는 여러 부품 중에서 효율과 소음에 중요한 영향을 미치는 핵심 부품이 압축기이므로 압축기의 고효율, 소음 저감이 절실히 요구된다. 이러한 추세에 발맞춰 고효율 BLDC (Brushless Direct Current) 모터가 개발된 이래, 유도 전동기의 사용이 주류였던 압축기에서도 회전자에 영구자석을 채용한 BLDC 모터의 사용이 점점 증가하고 있다. 그러나 유도 전동기를 채용한 압축기에 비해 운전주파수 가변이 가능한 BLDC 모터를 채용한 압축기에서 고 주파수 운전시 소음과 진동이 증가하는 문제가 빈번하게 발생하고 있다.

일반적으로 BLDC 모터를 채용한 압축기에서 발생하는 소음은 압축과정에서 발생하는 압력맥동에 의한 소음과 압축기 내부 공간의 공명에 의한 소음이 케이스 셸을 통과하여 전달되는 유동 기인 소음(Air-borne noise)과 압축기 내부 부품의 상대 운동으로부터 발생하는 상호 접촉에 의한 마찰음, 소음 원으로부터 발생한 진동이 내부 구조물을 통해 압축기 케이스 셸을 진동시켜 전달되는 구조 기인 소음

(Structure-borne noise)로 분류할 수 있다.<sup>(1)</sup> 또한 BLDC 모터의 소음은 모터의 각 상에 공급되는 전류의 고조파에 의한 전기적 토크 변동(electrical torque ripple)과 코깅 토크(cogging torque) 외에도 회전자와 고정자 사이에서 발생하는 전자기적 인력(electromagnetic attractive force)에 의해서 발생된다.<sup>(2)</sup> BLDC 모터를 채용한 압축기의 소음원 분석과 소음 저감을 위해서는 압축기의 전통적인 소음 저감 대책인 소음기와 공명기 최적화 설계와 압축기 케이스 셸 및 어큐플레이터의 구조 변경 이외에 BLDC 모터로부터 발생하는 전자기적 가진력 성분이 압축기의 소음과 진동에 미치는 관계를 파악할 필요가 있으며, 이를 토대로 한 소음 저감 대책 설계가 요구된다.

고홍석<sup>(3)</sup>은 영구자석 매입형 BLDC 모터의 전자기적 가진력 규명 및 모터의 구조적 동특성을 파악하여 소음 및 진동과의 연관성에 관한 연구를 수행하였으며, 이택진<sup>(4)</sup>은 BLDC 팬 모터의 모드해석을 통하여 진동과 소음 특성에 관한 연구를 수행하였다. Kim<sup>(5)</sup>은 냉장고용 BLDC 소형 팬 모터에 대해 유한 요소 해석과 전기적 비틀림 가진 실험을 통하여 모터의 코깅 토크가 팬 모터의 소음원임을 규명하였다. Ede<sup>(6)</sup>는 과도한 소음 방사와 베어링 손실을 이유로 설계단계에서 회전자-베어링계의 정확한 고유진동수와 모드를 예측의 중요성에 대해서 언급하고 있으며, 이장우<sup>(7)</sup>는 순시 인텐시티(intensity) 측정 기법을 이용하여 로터리 압축기에서의 소음 방사 패턴을 분석하였다.

현재까지 BLDC 모터를 채용한 공조냉동용 기계의 저소음 및 저진동에 대한 연구는 활발히 진행되고 있으나, 주로 BLDC 모터 단품의 소음 및 진동 저감에 관한 연구가 대부분이다. 따라서 본 연구에서는 BLDC 모터로부터 발생하는 전자기적 가진력

† 교신저자, 정회원 (주)LG 전자 DA 본부 연구소  
E-mail : captain2004@lge.com

Tel : (055) 260-3826, Fax : (055) 260-3507

\* (주)LG전자 컴프레서 연구실

\*\* (주)LG전자 DA본부 연구소

성분을 이론적으로 규명하는데 초점을 맞추기 보다는 BLDC 모터로부터 발생하는 전자기적 가진 주파수의 이론적인 계산과 실험을 통해 BLDC로터리 압축기의 소음 및 진동과의 관계 규명에 중점을 두었다. 본 연구에서는 BLDC 모터를 채용한 공조용 로터리 컴프레서의 방사 소음을 측정하여 소음 저감을 위한 문제 주파수 대역을 선정하였으며, 소음과 진동 특성을 비교 검토하였다. 근접 음장에서 음압 측정을 토대로 음원의 소음 가시화를 수행하였다. 소음 가시화를 통하여 소음원을 추정한 후, 실험적 모드 해석을 통하여 특정 운전주파수에서의 압축기 소음의 원인이 압축기 펌프부와 BLDC 모터의 공진임을 밝혔다. 그 후, 공진에 의한 소음을 저감할 수 있는 방안을 마련하였고, 모터 상용해석 프로그램인 Maxwell<sup>(8)</sup>을 이용하여 BLDC 모터의 전자기력 해석을 수행하였으며, 해석 결과로부터 전자기적 인력에 의한 가진 성분 저감을 확인하였다. 도출된 저감 방안을 압축기와 에어컨 실외기에 적용한 후, 실험을 통해 효과를 검증하였다.

## 2. 현상 분석

### 2.1 BLDC 로터리 압축기의 구성

본 논문에서 사용된 공조용 로터리 압축기는 밀폐형 압축기로서 모터와 펌프부로 구성되어 있다. Fig. 1에서 보는 바와 같이 셀의 내부는 모터와 압축부로 구성되며, 셀과 상부 베어링은 3점 용접으로 고정되어 있다. 고정자는 셀에 원주용접으로 고정되어 있으며, 회전자는 크랭크 축에 열박음 되어 있다. 압축기 펌프부가 직접 케이스 셀에 고정되어 있으므로 압축기 펌프부의 소음과 진동은 압축기 본체의 소음 및 진동에 상당한 영향을 미친다.

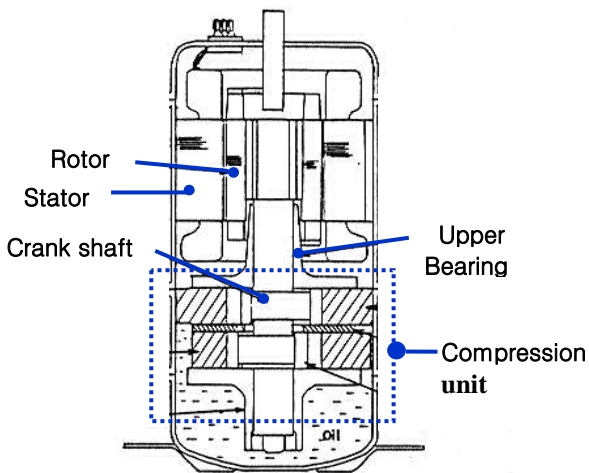


Fig. 1 Cross-sectional view of the BLDC rotary compressor

### 2.2 BLDC 로터리 압축기 소음 특성

본 BLDC 로터리 압축기는 인버터 운전에 의해서 30 ~ 120Hz까지 넓은 주파수 범위를 가지고 운전되기 때문에, 운전 주파수의 모든 영역에서 저소음 및 저진동이 요구되나, 인버터의 주 운전 영역은 높은 주파수 영역이기 때문에 특히 그 영역에서의 저소음과 저진동이 보다 더 요구된다. 소음 주파수 특성 분석, 소음 저감을 위한 주파수 대역 선정과 회전주파수의 영향을 확인하기 위해, 반무향실에서 ARI 조건 (압축기의 흡입, 토출 압력과 흡입 온도를 각각 9.12 kgf/cm<sup>2</sup>, 33.45 kgf/cm<sup>2</sup> 과 18.3 °C)에서 Fig. 2 와 같이 두 방향에서 소음을 측정하였다. 압축기 본체와 마이크로폰의 거리는 30cm이며, 압축기 본체의 중간 높이에서 1 개의 마이크로폰은 어큐뮬레이터(accumulator)를 기준으로 반시계 방향으로 90도 지점에 위치시켰으며, 다른 1 개의 마이크로폰은 반 시계 방향으로 180도 지점에 위치시켜 압축기로부터 방사되는 소음을 측정하였다.

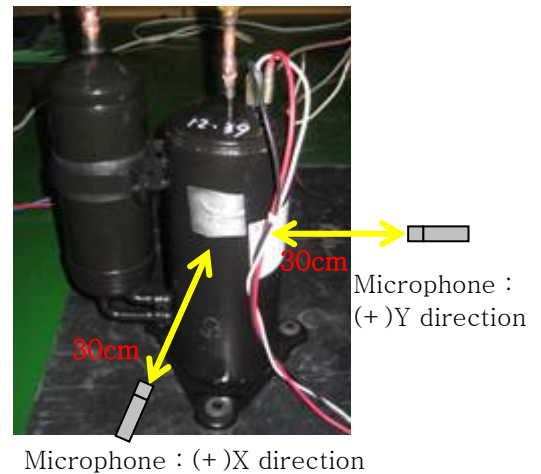


Fig. 2 Experimental set-up for measuring the noise of the BLDC rotary compressor

Fig. 3 은 운전 주파수 65 ~ 95Hz 영역에 대해서 5Hz 간격으로 실제 운전시 발생하는 소음을 (+)X 방향과 (+)Y 방향에서 측정한 결과이다. Fig. 3에서 운전주파수 80Hz 에서 방사 소음이 정점을 이루고 있으며, (+)X 방향에서 소음이 (+)Y 방향에 비해 평균 2dB(A) 정도 높게 나타나고 있다. 이는 어큐뮬레이터로부터의 소음 방사와 함께 머플러 토출 홀이 (+)X 방향으로 근접한 위치에 있기 때문에 고온고압으로 압축된 냉매가스가 머플러 홀을 통해 토출될 때, (+)X 방향을 직접적으로 음향 가진 함으로써 상대적으로 (+)X 방향에서 높은 소음이 발생한다. BLDC 로터리 압축기에서 운전 주파수가 증가할수록 모터의 회전수가 증가하게 된다. 회전수와 압축

기가 받는 부하는 비례 관계이기 때문에 모터 회전수가 증가할수록 소음이 증가한다. 그러나 Fig. 3 을 살펴보면, 운전 주파수 80Hz 를 정점으로 해서 그 이상의 운전 주파수에서 소음이 포화(saturation)되는 경향을 보이고 있다. 따라서, 80Hz 운전시 압축기 부하와 고압 냉매가스의 토출에 의한 소음원 이외에 다른 중요한 소음원이 있다고 할 수 있다. 소음 특성을 관찰하기 위하여, 소음 레벨이 상대적으로 높은 (+)X 방향에서 협대역(Narrow band)과 1/3 옥타브 대역에서 측정된 소음 스펙트럼을 Fig. 4 에 각각 도시하였다. Fig. 4(a)에서 가장 큰 소음이 발생하는 주파수는 대략 320Hz 이다. 회전 주파수 80Hz 를 1X 라고 하면, 320Hz 는 4X 성분이다. 일반적으로 압력 맥동 및 밸브에 의한 유동 기인 소음은 2kHz 이상의 고주파 대역에서 발생하는 것으로 알려져 있으므로 저주파 대역에 해당 되는 320Hz 는 진동에 의해 발생된 구조 기인 소음이다. Fig. 4(b)에서 중심주파수 315Hz 대역은 주변 주파수 대역에 비해 평균 20dB 이상 돌출되어 있으며, 이러한 현상은 청각음에도 좋지 않은 영향을 미친다.

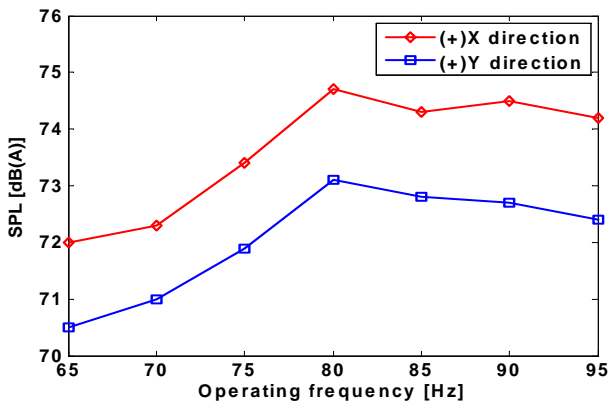
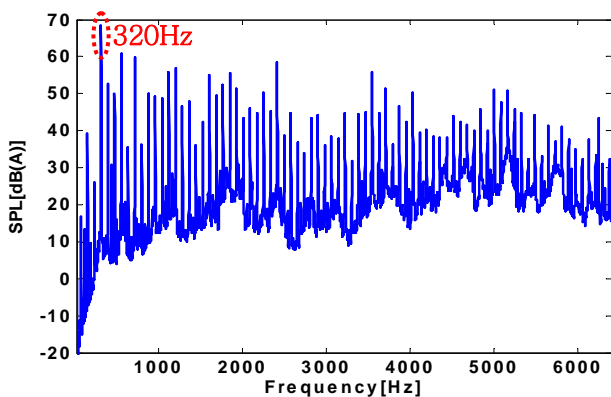
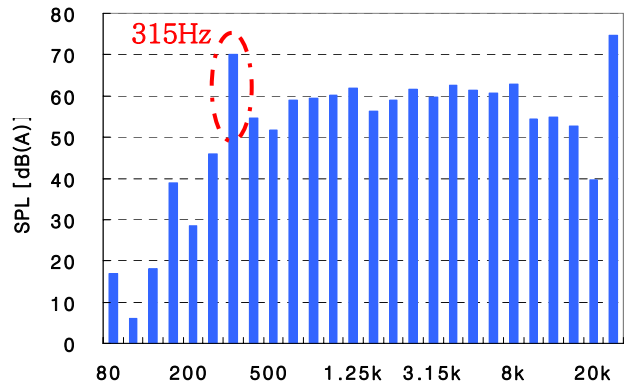


Fig. 3 Overall sound pressure level versus the change in the operating frequency



(a) Noise spectrum in narrow band at operating frequency, 80Hz



(b) Noise spectrum in the 1/3 octave band at the operating frequency, 80Hz

Fig. 4 Noise spectrum of the BLDC rotary compressor at the operating frequency, 80Hz

### 2.3 소음과 진동 상관 관계 분석

압축기에서 저주파에 의한 소음 문제는 주로 구조 진동에 의해 야기된다. Fig. 5 는 압축기 본체를 대상으로 운전 주파수 80Hz 에서 고정자가 케이스에 지지되어 있는 위치인 상부 지점과 압축 및 토출이 발생하는 하부 지점에 각각 가속도를 측정된 결과이다. 운전 주파수 65 ~ 95Hz 영역에서 5Hz 간격으로 가속도계(B&K Type 4393)와 마이크로폰(B&K Type 4190)을 이용하여 가속도와 소음을 동시에 측정하였다. 가속도 신호를 기준 신호로 선정하고 (+)X 방향의 소음을 측정 후, 상호상관 함수(cross-correlation function)를 고속 푸리에 변환(FFT)한 상호 스펙트럼(cross-spectrum)을 이용하여 각 운전 주파수의 4 배 성분의 크기를 추출한 결과를 Fig. 6 에 나타내었다. 본체 상, 하부에서 획득한 가속도 신호와 소음 신호의 주파수 분석과 상호 스펙트럼 분석을 통해 관심 주파수 320Hz 에서 소음 기여도가 큰 진동 위치를 확인할 수 있다.

Fig. 5 를 관찰해 보면, 가속도를 측정한 두 지점 모두 320Hz 에서 가장 큰 피크를 가지고 있으나, 모터 부근에서 발생한 운전 주파수의 4 배 성분의 가속도 크기가 압축부 근처에서의 4 배 성분의 가속도 크기에 비해 대략 3 배 정도 크다는 것을 알 수 있다. Fig. 6 을 통해 운전 주파수 65~95Hz 의 4 배 성분 중에서 운전주파수 80Hz 의 4 배 성분, 즉 320Hz 에서 모터 부근의 진동과 (+)X 방향 소음의 상관관계가 가장 높음을 알 수 있다. 이상의 결과로부터 문제주파수 320Hz 는 모터에서 발생된 진동으로 인한 구조 기인 소음이라고 예측할 수 있다.

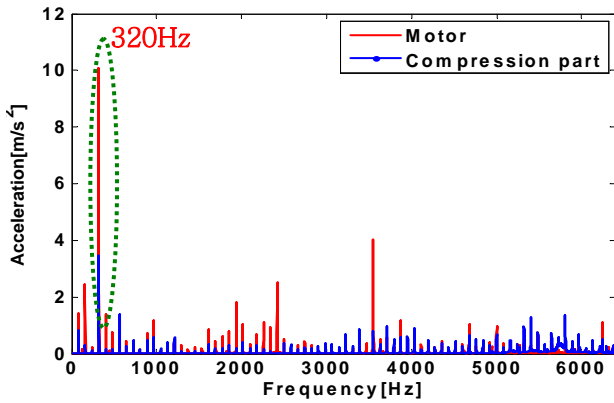


Fig. 5 Vibration spectrum measured on the motor and compression part at 80Hz

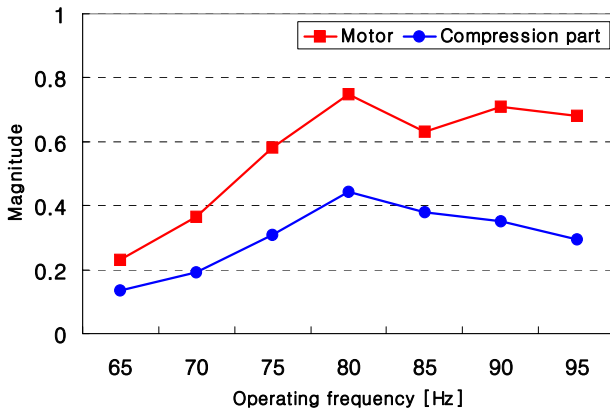


Fig. 6 Magnitude of 4X component in the cross spectrum at 80Hz operation

#### 2.4 소음원 가시화

문제 주파수 320Hz 는 1/3 옥타브 대역으로 315Hz 대역에 해당된다. 따라서 중심주파수 315Hz 대역에서의 소음 가시화를 통해 소음원의 위치를 파악하고자 한다. 본 연구에서는 소음 가시화를 위해 마이크로폰을 이용하여 근접장에서 음압을 측정 한 후, Matlab 을 이용하여 소음 등고선(Noise contour) 를 작성하였다. 일반적으로 가시화를 위한 목적으로 마이크로폰을 이용한 근접장에서의 음압 측정법은 측정 주파수가 고주파인 경우, 측정 점의 개수가 상당히 많아져서 시간과 비용 측면에서 비효율적이다. 그러나, 본 연구에서는 관심 주파수가 1kHz 대역 이하이므로 공간상의 앨리어싱(Aliasing)을 고려함과 동시에 측정 면적이 압축기 면적의 2 배 이상이 될 수 있도록 가로, 세로 8cm 간격으로 측정 간격을 설정하였고, 64 개의 측정 점에 대해서 소음이 높은 (+)X 방향에서 15cm 떨어진 근접장에서 압축기로부터 방사되는 음압을 측정하였다. Fig. 7 은 가시화

를 위한 음압 측정 위치를 나타내고 있으며, 소음 가시화의 결과인 등고선도를 Fig. 8 에 나타내었다. Fig. 8 에서 보듯이 압축기 본체 상부에 위치해 있는 모터 부위를 중심으로 압축기 전체에 걸쳐 소음 레벨이 높게 형성되어 있다. 즉 BLDC 모터부가 소음원이며, 모터에서 발생된 가진 성분이 압축기 펌프부의 고유진동수와 일치하여 발생하는 공진일 가능성이 높으며, 그로 인해 특정 주파수 320Hz 에서 큰 피크를 가지는 소음, 진동 특성을 가진다고 할 수 있다.



Fig. 7 Photo of experimental set-up for contour

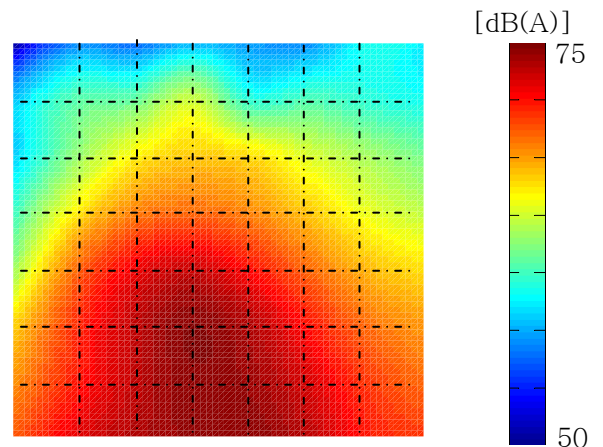


Fig. 8 Noise contour at the 315Hz frequency band in the (+)X direction

### 3. 실험적 모드 해석

#### 3.1 BLDC 모터의 전자기적 가진 주파수 성분

본 논문에서 사용된 BLDC모터는 분포권 DC모터로서 회전자는 4 극의 영구자석이 회전자 내부에 매입되어 있는 매입형(interior permanent magnet,

IPM) 형태로 되어 있으며, 고정자는 24 개의 슬롯으로 구성되어 있다. Fig. 9는 모터의 형상을 나타내고 있으며, Table 1은 연구 대상 모터의 매개 변수를 나타내고 있다. 회전자 내부에 영구자석이 매입되어 있는 매입형 BLDC 모터에서 주요 소음원은 가공 및 조립 오차, 불평형에 의해 발생하는 기계적인 요인과 전자기적 가진력에 의한 전기적인 요인으로 크게 나눌 수 있다. 소음에 보다 큰 영향을 미치는 요인은 전기적인 가진력으로 알려져 있다. 전기적인 가진력은 크게 코깅 토크, 모터의 각 상에 입력되는 전류의 고조파에 의한 토크 리플, 전자기적 인력 성분으로 분류할 수 있다. 위에서 언급한 전자기적 가진력 성분 중에서 전자기적 인력은 BLDC 모터의 소음에서는 중요하지 않다고 언급되어 있다.<sup>(3)</sup>

본 절에서는 모터의 주요 가진 성분인 코깅 토크, 전자기적 인력, 전류의 고조파에 의한 토크 리플에 의해 발생하는 주파수 성분을 이론 계산과 실험을 통해 확인하였다. 코깅 토크는 모터가 회전함에 따라 회전자와 고정자의 위치변화에 따른 공극에서의 자속 변화에 의해 발생하는 토크 변동으로, 극수와 슬롯 수의 최소 공배수를 기본 주파수로 가지며, 기본 주파수와 고조파에 의해 소음과 진동이 발생한다. 대상 모터의 극수는 4 이고 슬롯 수는 24 개 이므로 코깅 토크의 기본 주파수는 모터 회전 주파수의 24 배 성분이 된다. 전자기적 인력은 공극 사이의 자기장에 의해서 회전자와 고정자 사이에 작용하는 인력 성분이며, 극 쌍수가 2 이므로 자속 밀도의 제곱에 비례하는 관계에 의해 회전 주파수의 4 배 성분인 기본 주파수가 된다. 그러므로 회전 주파수의 4 배 성분과 고조파 성분이 전자기적 인력에 의한 가진 주파수가 된다. 전류의 고조파에 의한 토크 리플에 의한 가진 주파수를 파악하기 위해 전류 탐침자(current probe)를 이용하여 상으로 공급되는 전류를 측정하였다. Fig. 10(a)는 운전주파수 80Hz에서 인버터로부터 공급되는 전류의 측정 결과이며, 파워 스펙트럴 밀도(power spectral density)를 Fig. 10(b)에 도시 하였다. Fig. 10(a)을 살펴보면, 인버터를 통하여 공급되는 전류에 고조파 성분이 포함되어 있음을 알 수 있으며, 이러한 고조파 성분은 토크 리플을 발생시킨다. Fig. 10(b)에서 상으로 공급되는 전류의 기본 주파수를 1Y라고 하면, 1Y, 5Y, 11Y, 13Y, 23Y, 25Y의 피크 성분이 발생하고 있다. 이는 11Y, 13Y는 전류의 기본 주파수 12Y에 해당하는 토크의 변동 성분을 발생 시킨다.<sup>(2)</sup> 대상 모터는 4 개의 영구 자석이 매입되어 있는 4 극 구조이므로 전류의 고조파에 의한 토크 리플은 회전 주파수의 24 배를 기본 주파수로 가지며, 이의 고조파 성분이 소음과 진동에 영향을 미치게 된다. 이상으로 BLDC 모터에 의한 가진 성분을 확인하였고, 각각의 가진 성분의 기본 주파수를 Table 2에 정리하였다.

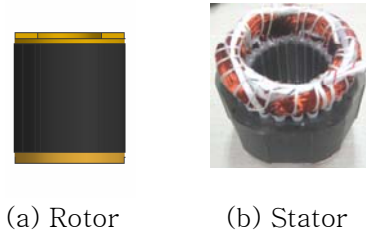
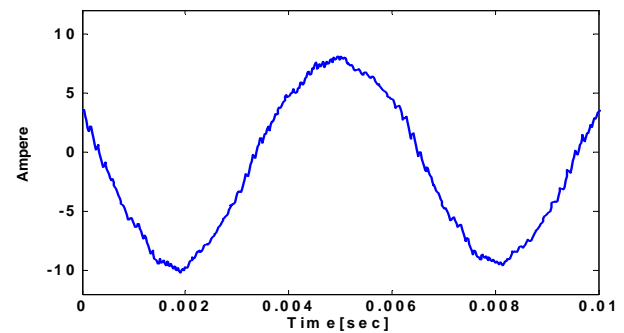


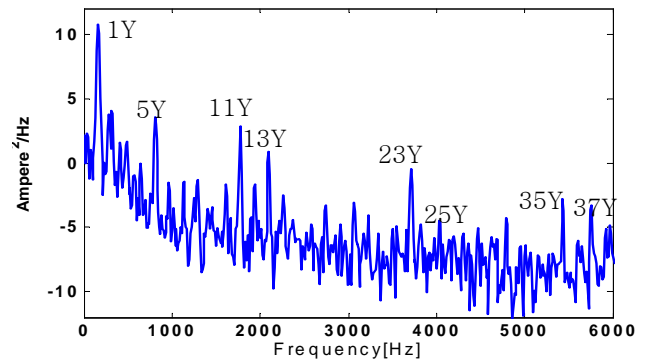
Fig. 9 Photo of distributed winding motor

Table 1. Parameters of the BLDC motor

Air-gap length	0.55mm
Number of slots	24
Number of pole-pairs	2



(a) Current waveform at 80Hz operation



(b) Power spectral density of current waveform

Fig. 10 Current supplied from the inverter

Table 2. Excitation frequencies from motor

Excitation source	Frequency [Hz]
Cogging torque	1920 and harmonics
Attractive force	320 and harmonics
Electrical torque ripple due to the harmonics of current	1920 and harmonics



### 3.2 압축기 펌프부의 고유 모드

앞에서 언급한 코깅 토크, 전자기적 인력, 전류 고조파에 의한 토크 리플에 의해 발생하는 주파수는 BLDC 로터리 압축기에 작용하는 가진 주파수이며, 압축기 펌프부(pump unit)의 고유 진동수와 일치할 경우 공진이 발생하게 된다. 따라서 압축기 펌프부에 공진이 발생하게 되면 소음과 진동이 커지게 되어 압축기의 신뢰성이 저하될 뿐만 아니라 에어컨 실외기의 소음과 진동에 심각한 문제를 일으키게 된다. 따라서 모드 해석으로부터 압축기 펌프부의 고유진동수와 BLDC 모터의 가진 주파수의 비교를 통해 소음 및 진동원을 분석하여야 한다.

운전주파수 80Hz의 4 배 성분에 해당하는 320Hz에서 소음이 증가하는 원인을 파악하기 위해 압축기 펌프부에 대해 모드 시험(modal testing)을 실시하였다. 고유 진동수와 모드 형상을 구하기 위해 모드해석 상용프로그램인 SMS(Star Modal System)<sup>(9)</sup>이 사용되었으며, SMS 프로그램을 통하여 구조물이 기하학적으로 표현될 수 있도록 모델링을 한 후, Fig. 11 과 같이 10 번 지점에서 가진을 하고 여러 지점에서 응답을 측정하였다. 본 실험에서는 강철팁(steel tip)이 달린 충격 해머(impact hammer)를 사용하였으며, 고유진동수와 모드형상을 정확하게 파악하기 위해 충격 해머의 주파수 응답의 최대값에서 3dB만큼 떨어지는 주파수 범위로 한정하여 800Hz 까지 분석하였다. 실제 압축기의 펌프부는 상부 베어링이 3 점 용접에 의해 케이스 셸에 고정되어 있다. 실제 조립 조건과 유사하게 상부 베어링을 고정시켜 충격 해머로 충격시험을 하였다. 총 42 개의 지점에 대해서 번호 순서대로 충격 해머로 측정 대상 구조물에 충격을 가하였으며, 가속도계(B&K 4393 type)을 이용하여 가속도 응답을 측정하고 주파수 분석기(ONOSOKI FFT Analyzer CF-350)로 주파수 응답 함수(Frequency Response Function)를 측정하였다. 주파수 응답 함수의 신뢰성 향상을 위해 각 측정 지점마다 16 번 측정하여 평균을 구하였으며, 측정된 주파수 응답 함수로부터 모달 변수(modal parameter)를 구하기 위해 곡선추정(curve fitting)을 사용하였다. Fig. 12 는 2 차 고유진동수에서의 굽힘(bending) 모드 형상을 보여 주고 있다. Table 3 에 모드 시험 결과를 나타내었다.

모터의 가진 주파수 성분인 전자기적 인력에 의한 가진 주파수 320Hz 와 압축기 펌프부의 2 차 고유진동수 325Hz 가 1.4% 이내로 근접하는 것이 압축기 펌프부의 고유진동수와 Table 2 에 나타나 있는 모터 발생 주파수와 비교한 결과 확인되었다. 모터의 전자기적 인력에 의한 가진 주파수 성분인 320Hz 와 압축기 펌프부의 2 차 고유진동수가 거의 일치하므로 공진에 의해 BLDC 로터리 압축기의 운전 영역대인 80Hz 에서 소음이 크게 나타남을 알 수 있

다. 따라서 공진 회피를 위한 구조 변경 설계가 요구된다. 공진 회피를 위하여 모터의 가진 주파수를 변화시키는 것은 압축기의 고효율 및 인버터 제어와 밀접한 관련이 있기 때문에 현실적으로 매우 어렵다. 압축기 펌프부의 경우, 크랭크 축(crank shaft)의 재질 변경, 축 지름 증가 등의 방법으로 강성을 보강함으로써 모터의 전자기적 인력에 의한 가진 주파수 성분과 일치하는 고유진동수를 변화시켜 공진에 의한 소음과 진동을 저감할 수 있을 것이다. 그러나 압축기의 양산성을 고려할 때, 축 강성 보강을 위한 축 재질 변경, 축 지름 증가 등의 방법은 재료비 상승, 막대한 설비 투자 문제와 직결되므로 제품의 가격 경쟁력 측면에서 위의 방법을 적용하기가 쉽지 않다. 본 연구에서는 공진 회피를 위한 구조 변경에 초점을 맞추기 보다는 가진력 저감 측면에서 공극을 확대하여 모터의 전자기적 인력을 감소시켜 BLDC 로터리 압축기의 소음을 저감하고자 한다.

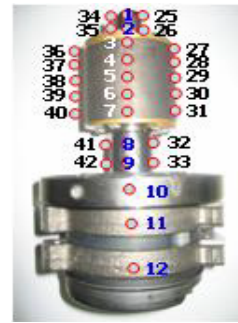


Fig. 11 Measurement position for impact test

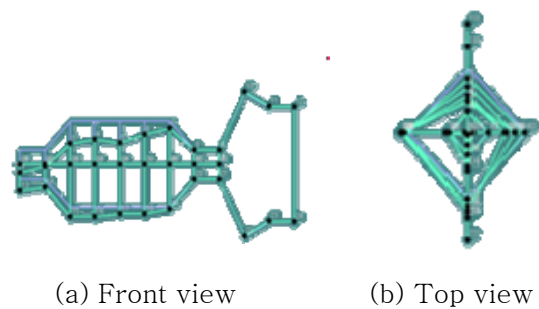


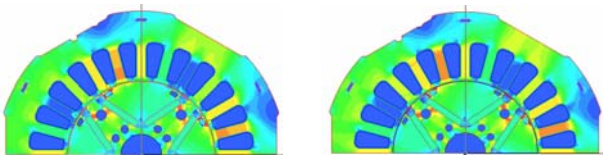
Fig. 12 Mode shape at 2<sup>nd</sup> natural frequency (Bending mode)

Table 3. Modal parameters from modal test

Mode	Natural frequency [Hz]	Damping [%]
1	186	11.12
2	325	0.72
3	604	2.39
4	751	2.62

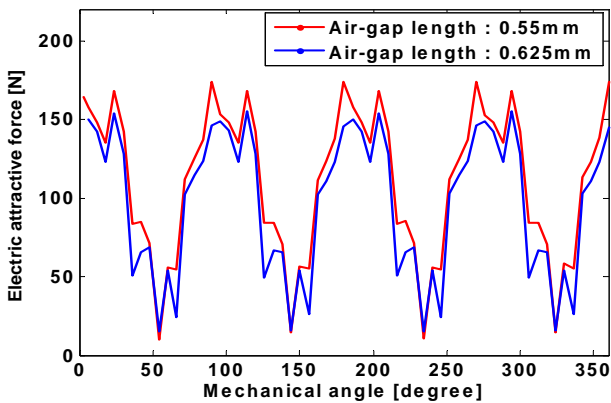
#### 4. BLDC 모터의 전자기력 해석

모터와 압축기 펌프부의 공진의 원인인 전자기적 인력의 크기를 저감하는 방안으로 회전자와 고정자의 간극, 즉 공극 길이를 확대하였다. 해석의 편리를 위해 회전자와 고정자의 동축도가 보존되어 회전자와 고정자 사이에 편심(eccentricity)이 존재하지 않은 이상적인 상태를 해석 조건으로 하여 상용프로그램인 Maxwell 을 이용하여 공극 길이에 따른 자기장 해석과 전자기력 해석을 수행 하였다. 운전 주파수 80Hz 로 모터가 구동될 때, 모터 내부의 자속 밀도 분포와 고정자에 미치는 전자기적 인력을 2 차원 유한 요소법으로 해석한 결과를 각각 Fig. 13 와 Fig. 14 에 도시하였다. Fig. 13 에서 공극 길이에 따른 자속 밀도에는 큰 차이가 없으나, Fig. 14(a)를 살펴보면, 공극 길이가 0.55mm 에서 0.625mm 로 증가함에 따라 고정자 이(teeth)에 걸리는 전자기적 인력이 11.6% 정도 감소하였다. Fig. 14(b)는 주파수 분석한 결과이며, 전자기적 인력 성분의 0 차 성분, 즉 직류 성분을 제외한 나머지 주파수 성분을 비교한 결과, 공극 길이가 증가함에 따라 회전 주파수의 4 배 성분과 고조파 성분의 크기가 감소함을 알 수 있다. 따라서 공극 길이를 증가함으로써 회전자와 고정자 사이에 발생하는 전자기적 인력에 의한 가진력을 효과적으로 저감할 수 있다.

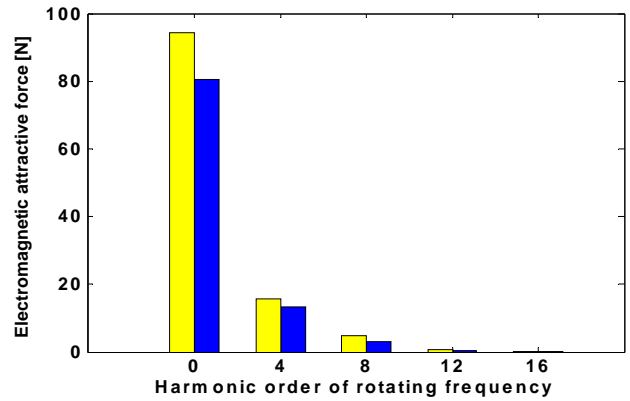


(a) Air-gap : 0.55mm (b) Air-gap : 0.625mm

Fig. 13 Analysis of flux density distribution



(a) Electromagnetic attractive force acting on stator's teeth according to rotor position



(b) Harmonic magnitude of attractive force

Fig. 14 Analytical results of attractive force

#### 5. 공극 길이 확대를 통한 소음 저감

##### 5.1 압축기 단품 소음 개선 검증

이상적인 공극을 가지는 모터에 한정하여 전자기력 해석을 수행하였으나, 실제 조립상태에서는 금형의 정밀도, 조립에 의한 편차와 압축기 운전 시 크랭크 축의 탄성 모드의 영향으로 회전자는 편심이진 상태로 회전하게 된다. 따라서 이론적인 공극 길이가 0.55mm 의 경우, 실제 공극 길이는 평균 0.45mm, 0.625mm 인 경우는 실제 공극은 평균 0.525mm 정도로 실제 공극과 이상적인 공극의 차이는 0.1mm 정도가 된다. Fig. 15 는 (+)X 방향에서 공극 길이 변경 전과 후의 소음을 측정하여 공극 길이 확대방안의 소음 저감 효과를 1/3 옥타브로 확인한 결과이다. 전체 주파수 대역에서 소음은 약 2.5dB(A)가 저감되었으며, 문제 주파수대역인 중심 주파수 315Hz 대역에서 13dB(A) 감소하였다. 중심 주파수 315Hz 대역에서 현저하게 소음이 저감된 원인은 공극 길이 증가로 인하여 회전 주파수의 4 배를 기본 주파수로 하는 모터의 전자기적 인력의 감소에 있다.

##### 5.2 에어컨 실외기 소음 개선 검증

1m 떨어진 거리에서 압축기가 장착되어 있는 방향인 오른쪽 측면에서 에어컨 실외기의 소음을 측정하여, 공극 길이 변경 전, 후의 소음을 비교하였다. 냉방표준조건에서 315Hz 대역의 소음이 11.5dB(A) 정도 저감되었으며, 전체 소음레벨은 4.5dB(A)가 저감되었다. 그 결과를 Fig. 16 에 도시하였다. 이상의 결과로부터 에어컨 실외기의 315 대역의 소음은 압축기에서 발생한 소음이며, 압축기의 소음을 저감함으로써 실외기의 소음이 저감되었음을 알 수 있다.

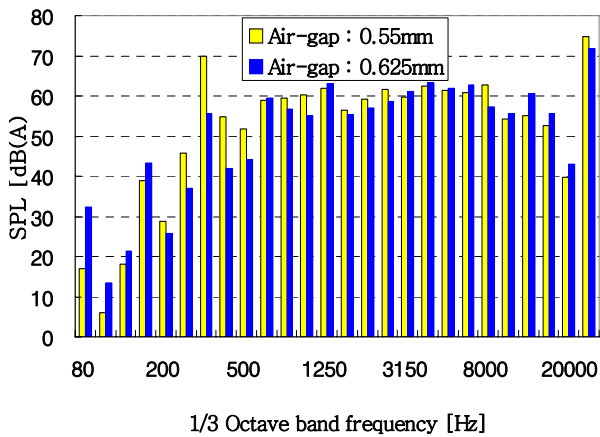


Fig. 15 Comparison of sound spectrum between modified model(ideal gap : 0.55mm) and original model(ideal gap : 0.625mm) in the BLDC rotary compressor

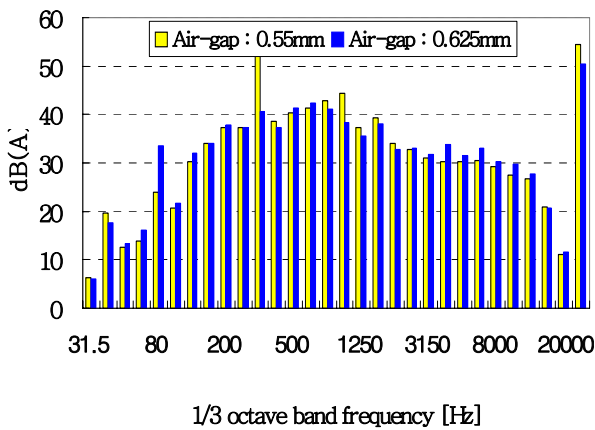


Fig. 16 Comparison of sound spectrum between modified model(ideal gap : 0.55mm) and original model(ideal gap : 0.625mm) in the outdoor air conditioner

## 6. 결 론

본 연구를 통해 BLDC 로터리 압축기에서 발생하는 소음과 진동을 분석한 결과 다음과 같은 결론을 얻었다.

(1) 운전주파수 80Hz 에서 소음 및 진동 신호의 주파수 분석, 소음과 진동의 상관성 검토와 소음 가시화를 통해 320Hz 의 피크 소음은 모터의 진동으로부터 야기된 구조 기인 소음임을 밝혔다. BLDC 모터의 주요 가진 주파수 성분을 이론 계산과 실험을 통해서 규명한 후, 소음의 원인이 전자기적 인력에 의해 발생하는 회전주파수의 4 배 성분과 압축기 펌프부의 2 차 고유진동수와와의 공진임을 실험적 모

드 해석을 통해서 확인하였다.

(2) BLDC 로터리 압축기의 소음 저감을 위해서는 BLDC 모터의 주요 소음원으로 알려진 코깅 토크, 토크 리플과 비교해서 상대적으로 모터의 소음과 진동에 중요하지 않게 여겨 왔던 전자기적 인력에 의한 가진 성분과 압축기와의 공진 발생 가능성에 대한 검토가 개발단계에서 이뤄져야 한다.

(3) 편심이 존재하지 않은 이상적인 조건하에서 모터의 전자기력 해석을 통해 공극이 증가함에 따라 전자기적 인력이 감소함을 예측하였으며, BLDC 로터리 압축기와 에어컨 실외기에 적용하여 전체 소음 레벨을 각각 2.5dB(A), 4.5dB(A) 저감 할 수 있었다.

(4) 가공 및 조립 편차로 인해 실제 회전자는 편심을 가진 상태에서 회전하게 된다. 회전자의 동축도 개선, 금형과 조립 정밀도의 향상, 크랭크 축의 휨(whirling)량 개선을 통해서 편심을 축소한다면 소음과 진동이 저감 될 것이라고 예측된다. 저소음과 저진동을 위해서는 본 연구 내용을 토대로 편심량이 BLDC 로터리 압축기의 소음과 진동에 미치는 영향에 대해 이론 및 실험적인 규명이 요구되며, 이에 관한 향후 연구가 진행되어야 할 것이다.

## 참 고 문 헌

- (1) 박상영, 이상현, 이수일, 이장우, 1999, “ 로터리 컴프레서 방사소음의 실험적 저감”, 한국소음진동공학회지, 제 9 권, 제 1 호, pp. 189~195.
- (2) 고흥석, 은희광, 김광준, 신현정, 2000, “ 영구자석 매입형 BLDC 모터의 전자기적 가진력 및 소음특성에 관한 연구”, 한국소음진동공학회 창립 10 주년 기념 소음진동학술대회논문집, pp. 1139~1146.
- (3) 고흥석, 2002, “ 영구자석 매입형 BLDC 모터의 소음/진동 평가를 위한 전자기적 가진력 특성화”, 한국과학기술원 공학박사학위논문.
- (4) 이택진, 박준홍, 이상호, 홍정표, 2007, “ FEM 을 이용한 BLDC Axial-gap type 진동기의 진동과 소음 특성 분석”, 한국소음진동학회 추계학술대회논문집, pp.
- (5) Kim, Y. H., Yang, B. S and Kim, C. J., 2006, “ Noise Source Identification of Small Fan-BLDC Motor System”, International Journal of Rotating Machinery, Vol.2006, pp.1~7.
- (6) J. D. Ede, Z. Q. Zhu, and D. Howe., 2002, “ Rotor Resonance of High Speed Permanent-Magnet Brushless Machines”, IEEE Transactions on Industry Applications, Vol. 38, No. 2, pp.1542~1548.
- (7) 이장우, 김영종, 안병하, 이운섭, 2001, “ 순시 인텐시티 측정 기법의 개발 및 응용”, 한국정밀공학회 추계학술대회논문집, pp. 300~304.
- (8) Using Maxwell, version 11.1.1, Ansoft
- (9) Using STAR MODAL, version 6.2, Spectral Dynamics 2002