

공조용 회전식 압축기 소음원 규명을 위한 실험적 연구

An Experimental Study on the Noise Source Identification of Rotary Compressor

손 영 부[†] · 하 종 훈* · 이 장 우*

Young-boo Son, Jong-hun Ha and Jang-woo Lee

(Received July 9, 2015 ; Revised October 15, 2015 ; Accepted October 15, 2015)

Key Words : Noise Source Identification(소음원 규명), Rotary Compressor(회전식 압축기)

ABSTRACT

This paper investigated the noise generation mechanism of a rotary compressor using experimental method. The measurement was carried out for primary parameters which influence noise characteristics. By using STFT(short time Fourier transform), noise sources of a rotary compressor were identified and vibrating modes that increase the noise are verified. Also, it was studied that the correlation between operating speed and noise. Main factors that affect the variation of noise level were considered by the comparison of the experimental results. In addition, a dynamic characteristic of crank shaft was studied and the critical speed was analyzed.

1. 서 론

압축기는 냉동공조 기기에 사용되는 핵심 부품 중 하나로 저온·저압의 냉매를 고온·고압의 상태로 바꿔 주는 기기이다. 압축기는 압축 방식에 따라 왕복동식(reciprocating type), 원심식(centrifugal type), 회전식(rotary type), 스크롤식(scroll type) 등 다양하게 분류할 수 있다. 그 중 회전식 압축기는 편심된 회전자가 실린더(cylinder) 내면을 회전하며 압축하는 방식으로, 가정용 에어컨에 널리 사용되고 있다.

회전식 압축기는 구조가 단순하고 가격이 저렴하다는 장점이 있는 반면 소음·진동에 취약하기 때문에 이와 관련된 연구가 활발하게 진행되어 왔다. Adachi⁽¹⁾는 회전식 압축기의 실린더 압력과 소음의 연관성을 확인하고 주 소음 발생 영역을 분석한 후, 압축기 내부 구조를 개선하여 소음을 저감하는 연구

를 수행하였다. Nonaka⁽²⁾는 회전식 압축기 내부의 구조 진동 및 음향 공명 특성을 각각 분류하여 검토한 후, 토출머플러(discharge muffler)를 재설계하여 3~6 kHz 소음을 저감하였다. Ahn⁽³⁾은 회전식 압축기의 소음·진동 시간 신호를 이용하여 STFT(short time Fourier transform)을 수행하고, 크랭크샤프트(crank shaft) 1회전 당 발생하는 실시간 소음 특성을 분석하였다.

이와 같이 회전식 압축기의 소음과 관련된 다양한 연구가 진행되어 오고 있지만, 현 수준의 소음을 파악하여 개선한 사례가 대다수이며 소음 발생 원리를 근본적으로 검토한 연구는 많지 않다⁽⁴⁻¹⁰⁾. 압축기 구조 상 밀폐된 고온·고압 냉매 분위기에서 다양한 센서를 활용하여 정확한 신호를 측정하기가 쉽지 않고, 소음 발생 원리를 규명하기 위해 측정이 필요한 인자를 확정하는 것도 어렵기 때문이다.

이 논문에서는 회전식 압축기의 소음 발생 원리

[†] Corresponding Author ; Member, LG Electronics
E-mail : youngboo.son@lge.com
* Member, LG Electronics

[‡] Recommended by Editor Il Kwon Oh
© The Korean Society for Noise and Vibration Engineering

를 규명하기 위한 실험을 수행하고, STFT를 이용하여 측정된 신호를 분석하였다. 압축기 내부의 소음·진동 신호와 토출 밸브(discharge valve) 거동, 실린더 내부 압력을 함께 측정한 후, 시험 결과를 바탕으로 주요 인자 사이의 관계를 확인하였다. 또한, 최근 가정용 에어컨에 널리 적용되고 있는 인버터 시스템(inverter system)이 압축기 구동 특성에 미치는 영향을 파악하기 위해, 운전 속도를 변경하면서 각 인자의 변화 추이를 확인하였다. 이를 통해 압축기 운전 속도와 소음의 관계를 파악하고, 크랭크샤프트의 회전체 특성을 파악하였다.

2. 회전식 압축기 소음

회전식 압축기의 소음 특성을 파악하기 위해, 우선 압축기에서 발생하는 소음을 측정하여 주파수 분석을 수행하였다. 이를 위해 Fig. 1과 같이 지름 101 mm, 높이 202 mm인 압축기 시료를 준비하고, 압축기 외곽 30 cm 위치에 소음을 측정할 수 있도록 1/2" 마이크로폰(B&K 4190)을 설치하였다. 압축기를 ARI 조건(P_s 9.12 kg/cm², P_d 33.45 kg/cm²)에서 60 r/s로 운전시킨 후, 정상상태에서 15초간 소음을 측정하였다. 또한, 다양한 주파수의 소음·진동이 발생하는 위치와 전파경로를 파악하고자 압축기 표면의 진동을 측정하여 가시화 하였다. 압축기 높이를 10등분 하여 11개의 측정 지점을 선정하고, 원주를 22.5°씩 등간격으로 나누어 17개 측정 지점을 선정하였다. 소음 측정과 동일한 조건으로 압축기를 운전시키고, 정상상태 운전 중 각 계측 지점의 진동을 측정한 후, MATLAB을 이용하여 1/3 옥타브 밴드(octave band)별 표면 진동을 나타냈다. 모든 시험은 ISO 3745 규격에 의거한 반무향실에서 수행되었으며, 압소음 측정 결과 30 dB(A) 이하 수준으로 실험 대상체인 회전식 압축기 소음에 미치는 영향이 미미함을 확인하였다.

Fig. 2는 15초간 측정된 소음의 평균 주파수 스펙트럼(frequency spectrum)을 나타낸 것이다. 압축기를 구성하는 다양한 부품의 모드 특성과 모터(motor), 토출계(discharge system) 등에 의한 가진 성분이 소음으로 나타나는 것을 확인할 수 있다. 그러나 주파수 스펙트럼은 가진원과 전달 경로를 구분하여 파악하기 어려울 뿐만 아니라 시간 정보가 존재

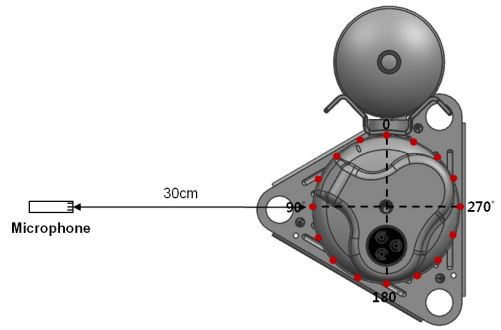


Fig. 1 Noise and vibration measurement points

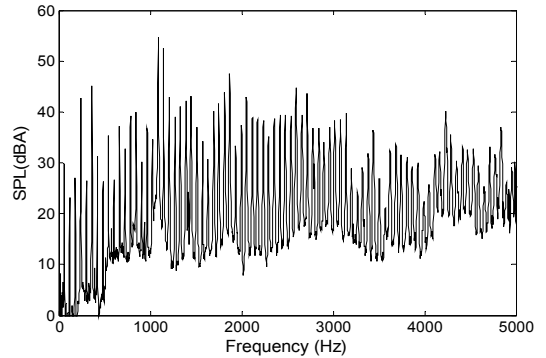


Fig. 2 Frequency spectrum of rotary compressor

하지 않아 소음 발생 과정을 확인할 수 없다. 따라서, 주파수 스펙트럼을 이용하여 소음을 측정하고 문제를 개선하기 위해서는 각 부품의 모드와 가진원을 파악하기 위한 추가 검토가 필요하다.

Fig. 3은 압축기의 주 소음 주파수인 1~5 kHz 영역의 표면 진동을 가시화한 것이다. 1 kHz 영역과 1.25 kHz 영역의 경우 압축기 상부 끝단, 브라켓(bracket) 용접 위치 등 지지 강성이 취약하거나 제관부 공진에 해당하는 지점에서 진동 레벨이 높게 나타난다. 반면 1.6 kHz 이상 영역에서는 압축부가 셸(shell)과 용접되는 위치를 중심으로 진동 레벨이 높게 발생하므로, 내부의 진동 특성에 의해 소음이 발생함을 알 수 있다. 또한 2.5 kHz 영역의 경우 모터 고정자(stator) 위치의 진동 레벨이 높으므로, 고정자 모드의 영향을 확인할 수 있다. 이와 같이 가시화 기법을 이용하면 각 주파수 별 압축기의 소음에 영향을 미치는 요소를 분류하여 파악할 수 있다. 하지만, 압축기 구동 시 소음이 발생하는 근본적인 원리를 명확하게 규명하기에는 어려움이 있다.

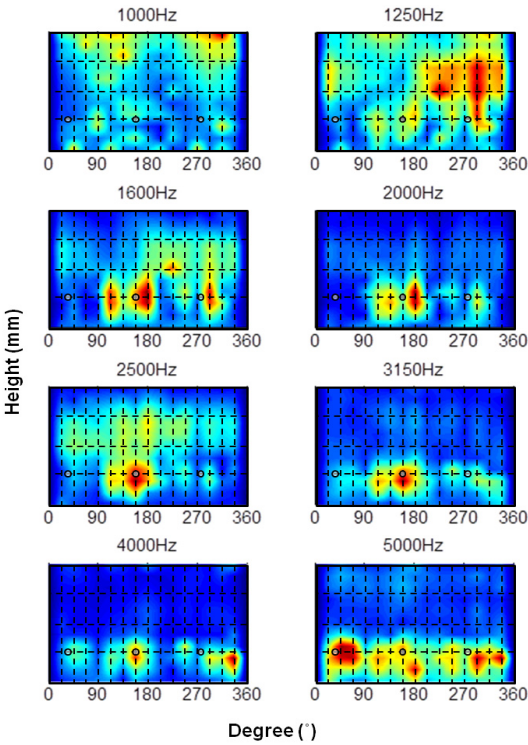
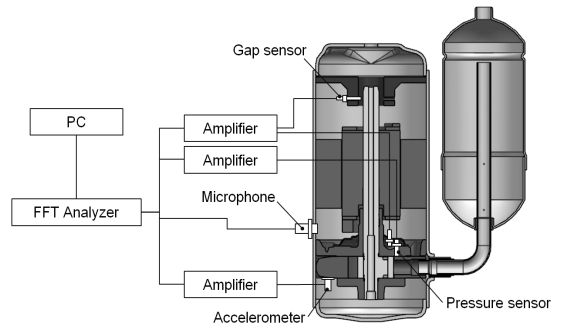


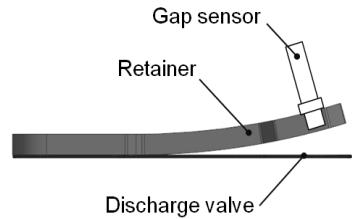
Fig. 3 Vibration intensity of rotary compressor

3. 시험 장치

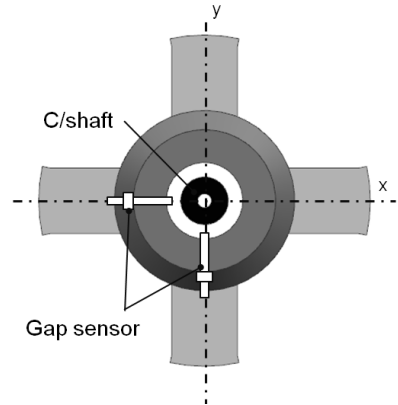
소음 주파수 스펙트럼과 표면 진동 가시화 결과를 알 수 있듯이, 압축기 외부의 소음·진동 신호를 이용한 분석으로는 소음 발생 원리를 명확하게 규명하고 전달경로를 파악하는데 한계가 있다. 따라서, Fig. 4(a)와 같은 시험 장치를 준비하여 압축기 내부의 소음·진동 특성을 확인하는 한편, 실린더 압력, 토출밸브 거동 등 소음과 연관성이 높은 인자도 함께 측정하였다. 압축기 내부의 진동 특성을 파악하고자 메인베어링(main bearing) 하단부에 가속도계(B&K 4393)를 설치하고, 압축기 내부의 소음을 측정할 수 있는 마이크로폰(PCB 106B)을 설치하였다. 압축실 내부의 압력 변화와 소음의 관계를 확인하기 위해 실린더 토출구에 정동압 압력센서(PCB 4005B)를 설치하였다. 또한, Fig. 4(b)와 같이 리테이너(retainer)에 갭센서(AEC PU03A)를 설치하여 토출밸브의 거동을 측정하고, Fig. 4(c)와 같이 두 개의 갭센서를 이용하여 크랭크샤프트의 거동 특성을 측정하였다. 또한, 운전 속도와 소음의 관계를



(a) Schematic diagram



(b) Valve displacement measurement



(c) Crank shaft orbit measurement

Fig. 4 Experimental set-up

파악하기 위해 압축기를 40 r/s, 60 r/s, 80 r/s로 구동시키고, FFT analyzer(B&K Pulse 3560)를 이용하여 모든 인자의 시간 신호를 동기화 한 후, 각각의 경우에 대한 계측을 실시하였다.

4. 결과 고찰

4.1 소음원 규명

앞서 준비한 시험 장치를 이용하여 60 r/s 운전 시 계측을 수행한 후, 측정 결과를 분석하여 압축기의 소음 발생 원리를 규명하고자 하였다.

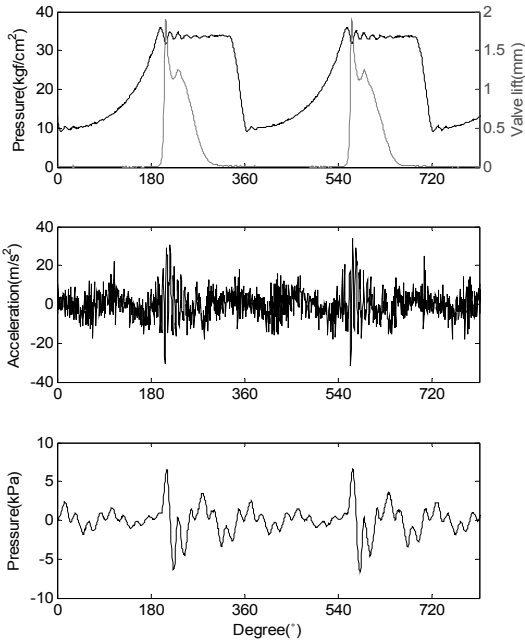
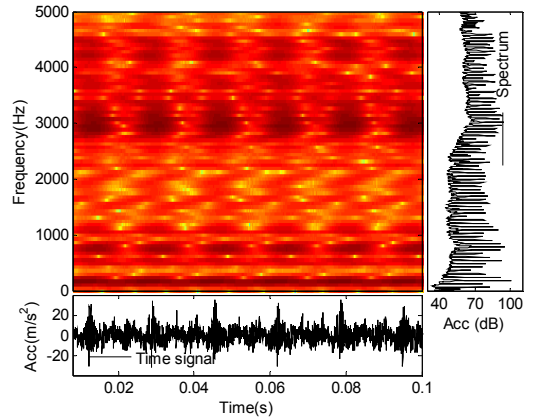


Fig. 5 Noise and vibration measurement result

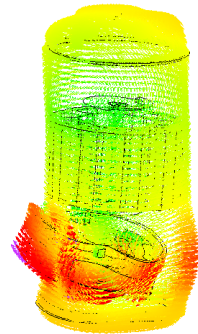
Fig. 5는 압축기 2회전 시 실린더 내의 압력, 토출밸브 거동, 압축부 진동, 내부 소음 측정 결과를 비교한 것이다. 0°시점에 냉매가 압축실로 흡입되고, 회전자가 실린더 내면을 회전하며 냉매를 압축하는 것을 알 수 있다. 토출밸브가 열리기 직전에는 실린더 압력이 설정 토출압력 보다 일시적으로 높아지는 과압축 현상이 나타난다. 토출밸브가 열리면 고압의 냉매가 압축실 외부로 배출되며, 실린더에 냉매가 거의 존재하지 않게 되면 토출밸브가 닫히면서 1회전이 완료된다. 진동 신호와 토출밸브의 거동을 비교하면, 토출밸브가 리테이너에 충돌하는 순간 충격 신호가 발생함을 알 수 있다. 또한, 소음 데이터와 토출밸브의 거동을 비교하면 닫혀있던 밸브가 열리는 시점에 소음이 높게 발생함을 알 수 있다. 이와 같이, 압축기 내부의 주요 인자에 대한 측정 결과를 분석하면 소음·진동이 발생하는 시점을 정확하게 파악할 수 있다. 그러나 시간 신호 분석만으로는 각 응답의 주파수 성분을 알 수 없다.

압축기 내부 소음·진동 신호의 주요 주파수 성분을 파악하기 위해, 각 신호에 대한 STFT 분석을 수행하고 모드 해석 결과와 비교하였다. Fig. 6(a)는 진동 신호에 대한 STFT 분석을 수행하여 주 주파수 성분이 발생하는 시점을 확인한 것이다. 그래프



(a) STFT of vibration signal

Ac Modal (ANSYS)
 Total Deformation 8
 Type: Total Deformation
 Frequency: 2969.4 Hz
 Unit: m
 Time: 2969.4
 Custom
 Max: 2.5841
 Min: 0.0099257
 2014-08-26 오전 11:40

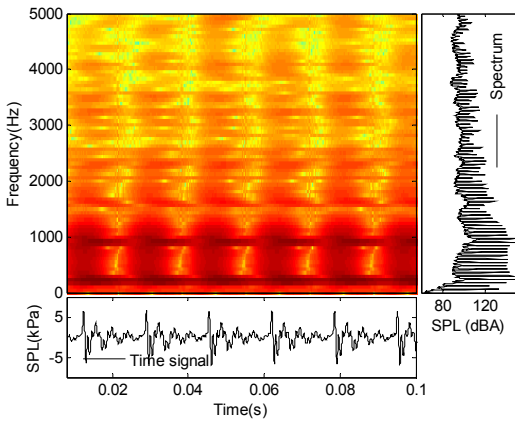


(b) Pump part mode(2969.4 Hz)

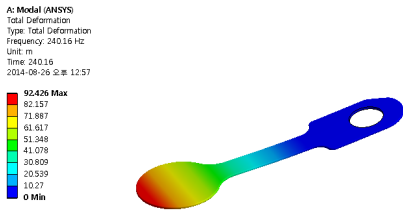
Fig. 6 Source identification of vibration signal

우측과 하단에는 각각 평균 주파수 스펙트럼과 진동 시간 데이터를 나타내었는데, 충격 신호가 발생하는 시점에 주 진동 주파수인 3000 Hz 성분이 두드러지게 나타남을 알 수 있다. 해당 주파수의 모드를 파악하기 위해 ANSYS를 이용하여 해석한 결과, Fig. 6(b)와 같이 압축부 모드를 확인할 수 있었다. 따라서, 토출밸브가 열린 후 리테이너에 충돌할 때 진동이 발생하고, 3000 Hz 영역 압축부 모드가 응답에 가장 큰 영향을 미친다는 것을 알 수 있다.

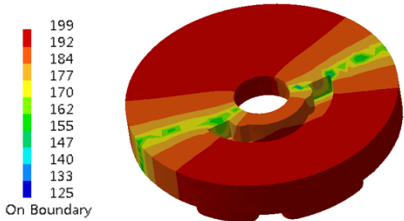
Fig. 7(a)는 내부 소음 신호에 대한 STFT 분석을 수행한 것으로, 토출밸브가 열리면서 소음이 발생하는 시점에 250 Hz와 900 Hz 성분이 두드러지게 나타나는 것을 확인할 수 있다. 각 주파수 성분에 영향을 미치는 요소를 파악하기 위해 모드 해석을 수행한 결과, Fig. 7(b)와 Fig. 7(c)에 나타난 바와 같이 각각 토출밸브 모드와 압축기 내부 공간의 공명 모드를 확인할 수 있었다. 이를 통해, 밸브가 열리는



(a) STFT of noise signal



(b) Discharge valve mode(240.16 Hz)



(c) Acoustic chamber mode(898.9 Hz)

Fig. 7 Source identification of noise signal

시점에 압축실 내부의 압력파에 의해 소음이 발생하고, 250 Hz 토출밸브 모드와 900 Hz 공명 모드가 가장 큰 영향을 미친다는 것을 알 수 있다. 또한, 진동 STFT 결과와 달리 주 소음 성분이 회전 주기 동안 지속되는 것을 확인할 수 있는데, 이는 고주파 구조진동 대비 감쇠계수가 낮기 때문인 것으로 판단된다.

4.2 인버터 특성

최근 가정용 에어컨의 효율을 향상시키기 위한 방법 중 하나로, 구동 조건에 따라 압축기의 운전 속도가 변하는 인버터 시스템(inverter system)을 적용한 제품의 개발이 활발하게 진행되고 있다. 인버터

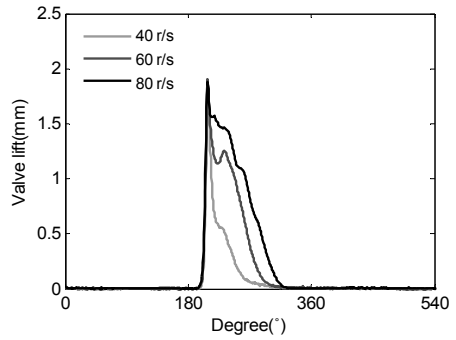


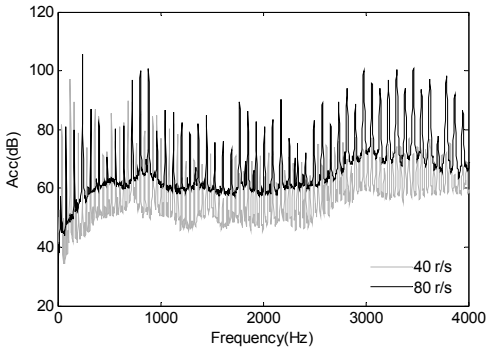
Fig. 8 Discharge valve displacement

Table 1 Over compression of pressure

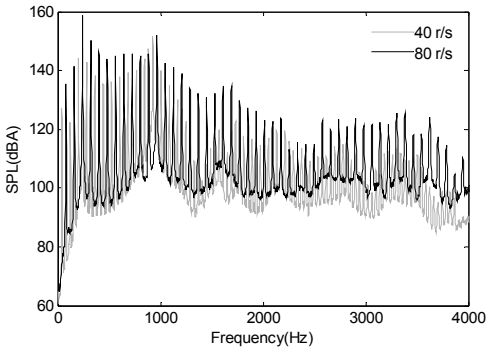
Speed(r/s)	Over compression(kg/cm ²)
40	2.34
60	2.56
80	3.84

시스템을 적용할 경우, 다양한 운전 조건에 따라 소음·진동 특성이 다르게 나타날 수 있기 때문에 주요 인자의 거동 특성을 정확히 이해하는 것이 중요하다. 따라서, 40 r/s, 60 r/s, 80 r/s 정상상태 운전 중 측정 결과를 분석하여 압축기의 운전 속도와 소음·진동의 관계를 파악하였다.

Fig. 8과 Table 1은 각각 운전 속도별 토출밸브의 거동과 실린더 내부의 과압축을 나타낸 것이다. Fig. 8에 나타난 바와 같이, 운전 속도에 비례하여 토출밸브 개도가 증가하고 토출이 완료되는 시점에 밸브가 급격하게 닫히는 현상을 확인할 수 있다. 이는 운전 속도가 증가할수록 1회전 주기가 감소함에 따라, 동일한 양의 냉매를 토출하기 위해 소요되는 시간이 줄어들기 때문이다. 또한, 운전 속도에 비례하여 토출밸브와 리테이너가 충돌하는 횟수가 증가하게 된다. Table 1은 운전 속도와 실린더 내부의 과압축량을 비교하여 나타낸 것으로, 80 r/s 운전 시 40 r/s 대비 과압축량이 약 64% 증가함을 알 수 있다. 이를 통해, 토출밸브가 열리는 시점에 실린더 내부에서 발생하는 압력파의 크기도 증가함을 알 수 있다. 따라서, 운전 속도가 증가할수록 압축실 내부 압력파의 크기가 증가하고, 토출밸브와 리테이너로 구성된 토출계의 거동 또한 소음·진동에 불리하게 작용함을 알 수 있다.



(a) Frequency spectra of vibration signals



(b) Frequency spectra of noise signals

Fig. 9 Comparisons of vibration and noise

Fig. 9는 운전 속도와 압축기 내부 소음·진동의 관계를 파악하기 위해 40 r/s와 80 r/s 운전 시 측정된 데이터를 비교 분석한 것이다. Fig. 9(a)는 내부 진동 레벨의 평균 주파수 스펙트럼을 비교한 것으로, 80 r/s 운전 시 기저 진동레벨이 40 r/s 운전 시 기저 진동레벨 보다 약 10 dB 상승하는 것을 알 수 있다. Fig. 9(b)는 압축기 내부 소음의 평균 주파수 스펙트럼을 비교한 것으로, 900 Hz 공명 주파수의 기저 소음은 운전 속도에 관계없이 동등 수준이지만, 압축기의 구조 진동에 기인한 고주파 영역의 기저 소음은 증가하는 것을 알 수 있다. 이를 통해, 운전 속도가 빨라질수록 냉매 압축 과정에서 발생하는 가진력의 크기가 증가하여 소음·진동에 영향을 미친다는 것을 알 수 있다. 다만, 고속 운전 시 모터에 의한 조화가 진 성분도 증가하여 소음·진동에 영향을 미치지만, 이 연구 결과로는 정확한 검토가 이루어지기 어렵다. 모터의 영향을 정확히 파악하기 위해서는 고정자 위치의 진동 신호를 측정하여 분석할 필요가 있다.

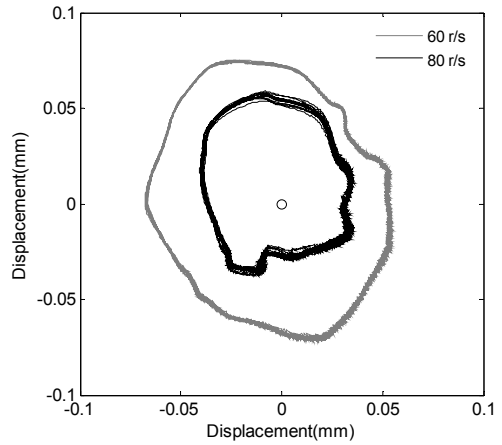


Fig. 10 Comparison of crank shaft orbits

A: Modal (ANSYS)
Total Deformation
Type: Total Deformation
Frequency: 305.29 Hz
Unit: m
Time: 305.29
2014-08-28 오전 10:37

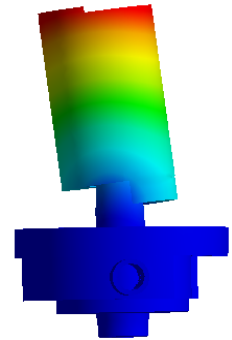
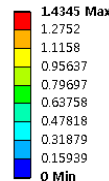


Fig. 11 Crank shaft bending mode

Table 2 Natural frequency of crank shaft

Method	Natural frequency(Hz)
Analysis	305.29 Hz
Experiment	292 Hz

Fig. 10은 운전 속도와 회전축 거동의 관계를 파악하기 위해 60 r/s와 80 r/s 운전 시 축 궤적(orbit) 측정 결과를 비교한 것으로, 운전 속도가 빨라질수록 궤적이 중심에 가까워짐을 확인할 수 있다. 궤적이 원형을 나타내지 않는 이유는, 조립 공정에서 모터 회전자와 고정자 사이의 에어갭(air-gap)이 균일하게 형성되지 않아 각도에 따라 작용하는 전자기력의 크기에 차이가 발생하고, 압축과정에서 축에 작용하는 베어링 반력이 매 순간 변하기 때문이다.

운전 속도가 증가할수록 축의 궤적이 감소하는 원인을 파악하기 위해 압축부에 대한 모드 해석을

수행하고, 모드 시험 결과와 비교하여 타당성을 확인하였다. 보다 정확한 분석을 위해서는 회전체 해석이 수행되어야 하지만, 크랭크샤프트와 베어링 사이의 강성계수와 감쇠계수를 파악할 수 없기 때문에 정지 상태의 굽힘 모드를 파악하여 위험속도에 대한 검토를 수행하였다. 모드 해석 시 크랭크샤프트와 베어링 사이에 마찰 경계조건을 부여하고, 마찰계수는 0.1로 설정하였다. 또한, 메인베어링이 셸에 용접되는 지점에 고정 경계조건을 적용하였다. 그 결과 Fig. 11과 Table 2에 나타난 바와 같이 크랭크샤프트의 위험 속도가 약 300 Hz이며, 해석 결과와 시험 결과의 오차가 약 4.5 % 수준으로 서로 유사함 알 수 있다.

일반적으로 크랭크샤프트의 동특성에 가장 큰 영향을 미치는 가진력은 모터 MPF(magnetic pull force)인데, 이 연구에 사용된 모터의 규격은 6극 BLDC(brushless direct current) 이므로 회전 속도의 6X 성분에 해당한다. 따라서, 크랭크샤프트의 회전 속도가 약 50 r/s일 때 공진이 발생하고, 60~80 r/s 운전 영역에서는 회전 속도가 빨라질수록 축의 궤적이 감소하고 구동 안정성이 증가할 것으로 판단된다. 향후에는 해당 압축기 모델에 대한 회전체-베어링계 동적 해석을 통해 크랭크샤프트의 거동 특성에 대한 상세 검토가 이루어질 예정이다.

5. 결 론

이 연구에서는 회전식 압축기의 소음 발생 원리를 파악하기 위해 압축기 내부의 소음·진동과 실린더 압력, 토출밸브 변위 등 주요 인자에 대한 계측을 수행한 후, STFT를 이용하여 신호를 분석하였다. 또한, 최근 각광받고 있는 인버터 압축기의 소음·진동 특성을 파악하기 위해 운전 속도를 변경시키면서 압축기 내부 주요 인자의 거동 특성을 분석하였다. 이 연구를 통해 아래와 같은 결론을 도출할 수 있다. 추후에는 이 소음 발생 메커니즘을 해석적으로 구현하고, 실험 결과와 비교하여 타당성을 확인하는 연구가 수행될 예정이다.

(1) 압축기 소음에 영향을 미치는 주요 인자를 검토한 결과, 토출밸브가 열리는 시점에 내부 압력파에 의해 소음이 발생하고 토출밸브가 리테이너에 충

돌하여 진동이 발생한다.

(2) STFT 분석 결과 압축기 내부에서 250 Hz, 900 Hz, 3000 Hz 성분이 크게 발생하였으며 각각 토출밸브, 음향 공명, 압축부 모드에 해당한다.

(3) 운전 속도가 증가할수록 토출밸브 거동과 과압축이 소음에 불리하게 작용하며, 압축기 내부의 소음·진동 측정 결과 기저 성분이 상승하였다.

(4) 이 연구에 사용된 압축기의 크랭크샤프트 위험속도는 약 300 Hz이며, 50 r/s 운전 시 모터 가진력(6X) 성분과 공진을 일으킨다. 또한 운전 속도가 증가할수록 축의 궤적이 감소하여 구동 안정성이 증가한다.

References

- (1) Adachi, Y., Onoda, I. and Takashima, K., 1996, Development of a Low Noise Rotary Compressor, International Compressor Engineering Conference, pp. 709~714.
- (2) Nonaka, R., Suda, A. and Matsumoto, K., 1992, Noise Reduction Analysis On Inverter Driven Two-cylinder Rotary Compressor, International Compressor Engineering Conference, pp. 341~350.
- (3) Ahn, S. J., Jeong, W. B., Park, J. H. and Hwang, S. W., 2002, The Visualization of Vibration and Noise of the Rotary Compressor During One Cycle of Crank Shaft by Use of Short Time Fourier Transform, Proceedings of the KSNVE Annual Autumn Conference, pp. 428~433.
- (4) Dreiman, N. and Herrick, K., 1998, Vibration and Noise Control of a Rotary Compressor, International Compressor Engineering Conference, pp. 685~690.
- (5) Kumar, K., Lu, J., Leyderman, A., Marler, M. and Nieter, J., 1994, Reduced Noise Valve Design for a Rotary Compressor, International Compressor Engineering Conference, pp. 19~23.
- (6) Kim, H. J. and Cho, Y. M., 2000, Noise Source Identification in Rotary Compressor: A Multidisciplinary Synergetic Approach, Journal of Acoustics Soc. Am., Vol. 110, No. 2, pp. 887~893.
- (7) Jeong, W. B. and Kim, T. H., 1999, Dynamic Behavior Analysis of Rotor-bearing System for Rotary Compressor, Journal of Korean Society of Marine

Engineering, Vol. 23, No. 2, pp. 244~251.

(8) Cho, I. S., Chang, W. S., Kim, J. M., Kim, D. W., Oh, S. H. and Jung, J. Y., 1996, The Analysis of Shaft Center Locus in the Refrigeration & Air Conditioning Rotary Compressor, Journal of KSTLE, Vol. 12, No. 2, pp. 65~73.

(9) Wang, Z., Yu, X., Liu, F., Feng, Q. and Tan, Q., 2013, Dynamic Analyses for the Rotor-journal Bearing System of a Variable Speed Rotary Compressor, International Journal of Refrigeration, Vol. 36, No. 7, pp. 1938~1950.

(10) Kim, J. S., Lim, K. N., Ku, S. J., Lee, J. W. and Jeon, S. M., 2008, Study on the Noise Reduction in the Rotary Compressor Using BLDC Motor, Transactions of the Korean Society for Noise and Vibration Engineering, Vol. 18, No. 9, pp. 920~929.



Young-boo Son is received B.S. and M.S. degrees from Sungkyun kwan University in 2006 and 2008, respectively. He is currently a Research Engineer of LG Electronic s. His research interests

are noise and vibration of Home appliance.



Jong-hun Ha is received B.S. degree from Pusan National University. He then received M.S. degree from Pukyong National University. He is currently a Chief Research Engineer of LG Electronics. His research interests are noise and vibration of Home appliance.



Jang-woo Lee is received B.S. degree from Pusan National University. He then received M.S. and Ph.D. degrees from Pukyong National University. He is currently a Chief Research Engineer of LG Electronics. His research

areas are noise and vibration of Home appliance.