

왕복동 압축기의 소음 및 진동 기여도 분석 Coherence Analysis of Noise and Vibration For Reciprocating Compressor

이대성* · 황원걸** · 이유엽*** · 임형은****
Dae-Sung Lee, Won-Gul Hwang, You-Yub Lee, Hyung-eun Im

Key Words : Compressor(압축기), Vibration Source(진동원), PCF(부분 기여도 함수),
Transmission Path(전달경로), LDT(Line Discharge Tube)

ABSTRACT

It is necessary to determine the vibration source and its transmission paths in order to develop a low-noise compressor. Through the use of multiple-input/single-output(MISO) model, the transmission paths of vibration within a reciprocating compressor have been investigated. In order to identify the transmission path, we measure the accelerations of the block and transverse vibrations of the line discharge tube. As outputs, vibrations of compressor shell were measured at three positions; cylinder head, one near the suction line, and the top of upper shell. The partial coherence function and transfer function are obtained from the measured data, and the results are observed in order to determine vibration source and its influence on the shell vibration.

———— 기호설명 ————

- $G_{yy}(f)$: 출력 $y(t)$ 의 자기스펙트럼
- $G_{iy}(f)$: 입력 $x_i(t)$ 와 출력 $y(t)$ 의 상호스펙트럼
- $G_{ij,ri}(f)$: 입력 $x_i(t)$ 와 $x_j(t)$ 사이에서 r 개의 상관 성분을 제거한 상호스펙트럼
- $\gamma_{iy}^2(f)$: 입력 $x_i(t)$ 와 출력 $y(t)$ 의 기여도 함수
- $\gamma_{iy,(i-1)}^2(f)$: 입력 $x_i(t)$ 와 출력 $y(t)$ 의 부분기여도 함수
- $\gamma_{y,x}^2(f)$: 입력과 출력의 다중기여도 함수

1. 서론

가전 산업 분야에서 제품의 소음/진동은 상품성과 직결되므로 발생위치와 그 원인별 특성 파악은 소음 저감에 있어서 일차적으로 선행 되어야 할 가장 중요한 작업이라고 할 수 있다. 그러나 냉장고용 압축기의 경우 주요 부품들이 쉘 내에 밀폐되어 있어 소음/진동 연구에 많은 어려움이 있다. 구조적으로 주요 소음과 진동이 쉘이라는 전달 경

로를 지나가게 되어 있는데 이 과정에서 여러 종류의 소음/진동들이 증폭이나 저감이 이루어지면 서로 섞이게 되어 실험적으로나 해석적으로 소음/진동원 파악이 힘들게 된다. 따라서 본 연구에서는 왕복동식 압축기의 소음/진동특성을 파악하고 밀폐되어 있는 압축기내 여러 진동원들이 쉘에 미치는 영향과 이런 진동들이 소음과 어떤 관계를 가지고 있는지를 규명하기 위해 다입력/단일출력계(MISO)를 도입하고 PCF(부분 기여도 함수)법을 사용하여 진동원과 쉘(shell)진동 사이의 기여 관계를 부분기여 출력 스펙트럼과 다중기여 함수를 통해 살펴보았다. 주파수 별로 관련성을 검토하였고 이를 통해 향후 저감 대책을 수립하는 데 도움이 될 것으로 사료된다.

2. 기여도 함수

2.1 압축기의 진동 모델

일반적으로 운전중인 압축기의 소음 스펙트럼을 보면 특성상 세 부분의 주파수 영역으로 나눌 수 있다. 먼저 1000Hz 이하의 저주파 소음은 캐비티에 포함하고 있는 유체 유동이나 토출파이프를 통하여 전달되는 힘 또는 압축기 몸체의 suspension spring 에 의해서 발생하는 것이 쉘의 강제 진동과 관련이 있고 중주파 영역인 1200 ~ 2600Hz 은 캐비티에 함유되어 있는 유체(냉매나 윤활유)에 의해서 나타나며 2500Hz 이상의 고주파

- * 전남대학교 기계공학과
E-mail : dsleenvh@hanmail.net
Tel : (062) 530-0211, Fax : (062) 530-1689
- ** 전남대학교 기계공학과
- *** 전남대학교 기계공학과
- **** 전남대학교 기계공학과

소음은 밸브의 충격 작용이나 turbulence 로부터의 진동이 쉘을 가진 함으로써 발생한다고 알려져 있다.

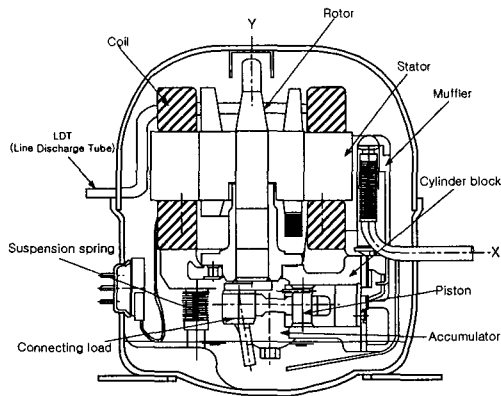


Fig. 1 Reciprocating compressor

이런 특성을 가지고 있는 압축기내 진동원 규명을 위해 일반적으로 다입력/단일출력계(MISO)를 적용하는데 본 논문에서는 3 입력/단일 출력로 하여 분석하였다. 그림 2 에서 3 개의 입력 $x_i(t)$, $i=1,2,3$ 와 $y(t)$ 는 측정 가능한 신호이며, 외부잡음 $\phi(t)$ 는 모형에 고려하지 않은 비선형성, 신호들의 비정상 과정 측정 잡음의 영향, 그리고 모형에 고려되지 않는 다른 입력들의 영향을 포함한다. 이러한 모델은 추가적으로 입력 개수를 계속 증가 시켜 적용할 수 있다. 입력 $x_3(t)$ 는 $x_1(t)$ 과 $x_2(t)$ 와 상관성이 존재하므로 $x_3(t)$ 로부터 $x_1(t)$ 와 $x_2(t)$ 의 상관 성분을 제거한 $x_{3:12}(t)$ 로 되고 출력 스펙트럼은 아래 그림 2 와 같이 나타낼 수 있다.

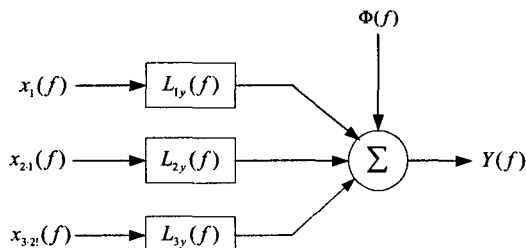


Fig. 2 Modal of three input/single output system in the case of coherent inputs

그림 2 에서 $\phi(t)$ 가 각 입력 $x_i(t)$ 와 상관 관계가 없다면 상호 스펙트럼 $G_{i\phi}(f)$ 가 0 이 되므로 식 (1)과 같고 출력의 자기스펙트럼 밀도함수 $G_{yy}(f)$ 은 식 (2)와 같이 된다.

$$G_{iy}(f) = \sum_{j=1}^3 H_j(f) G_{ij}(f) \quad i=1,2,3 \quad (1)$$

$$G_{yy}(f) = \sum_{i=1}^3 \sum_{j=1}^3 H_i^* H_j(f) G_{ij}(f) + G_{\phi\phi}(f) \quad (2)$$

2.2 기여도 함수

운전중인 압축기에 대해 다입력/단일출력 모형을 적용하여 진동원을 규명하고자 할 경우, 입력으로 사용되는 신호들은 서로 상관관계를 갖는 경우가 많다. 그러므로 각각의 입력신호가 어떤 출력 신호에 미치는 영향을 보기 위해서는 상관성이 있는 양만큼 제거해 주어야 하는데 차수 $r!$ 의 조건화된 스펙트럼은 차수 $(r-1)!$ 에 대해 이미 알고 있는 조건화된 입력스펙트럼으로부터 어떻게 계산할 수 있는지를 정확하게 보여줄 수 있는 최종적인 식은 다음과 같다.

$$G_{ij,r!} = G_{ij,(r-1)!} - \left[\frac{G_{rj,(r-1)!}}{G_{rr,(r-1)!}} \right] G_{ir,(r-1)!} \quad (3)$$

실제 계의 경우 관심 있는 주파수 영역에서 입력 신호와 출력 신호와의 기여도 함수가 큰 순서대로 입력 신호의 순서를 정하여 부분기여도 함수등을 구하게 된다.

어떤 입력 x_i , $i=1,2,K,n$ 와 출력 y 사이의 보통 기여도 함수는 다음과 같이 정의된다.

$$\gamma_{iy}^2 = \frac{|G_{iy}|^2}{G_{ii} G_{yy}} \quad (4)$$

본 연구에서 적용한 3 입력/단일출력 모델에 대해서 상관관계를 제거한 입력 $x_{i:21}(t)$, $i=3$ 과 출력 $y(t)$ 사이의 부분 기여도함수는 다음과 같이 정의된다.

$$\gamma_{iy:21}^2 = \frac{|G_{iy:21}|^2}{G_{ii:21} G_{yy:21}} \quad (5)$$

3 입력 단일출력 모델에 대해서 입력의 선정에 있어서 타당성을 판별해주는 다중 기여도 함수는 다음과 같이 정의된다.

$$\gamma_{y,31}^2 = 1 - (1 - \gamma_{1y}^2)(1 - \gamma_{2y,1}^2)(1 - \gamma_{3y,12}^2) \quad (6)$$

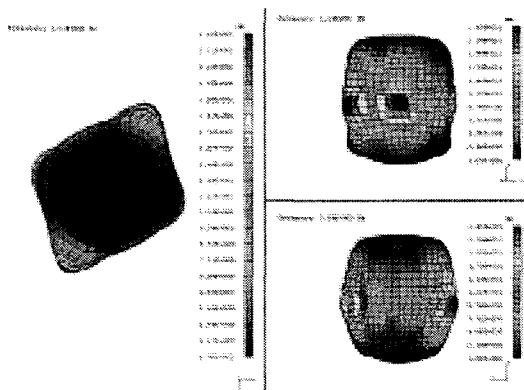
3. 실험 및 고찰

3.1 압축기 셸의 모드 해석

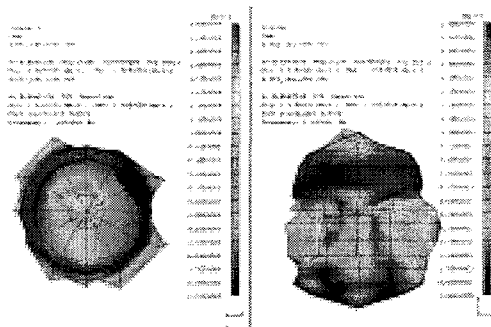
먼저 셸의 주요 진동 특성을 파악하기 위해 모달 해석을 수행하였는데 유한요소 모델에 자유경계조건을 부여한 후 Lanczos method 를 이용하여 고유진동수와 모드형상을 해석적으로 구하였고 또한 실험을 통한 모드해석도 같이 수행하였다. 압축기 소음은 규정상 측면 중앙 부위를 기준으로 하는데 표 1 에 나타난 주파수중 측면 진동과 관련이 있는 주파수는 주로 3.5kHz 부근에서 나타나고 있다. 그림 3 의 모드형상에서 볼 수 있듯이 3.5kHz 부근에서 셸이 측면 방향으로 모드형상이 나오는 것으로 봐서 이 주파수 영역에서 소음이 클 것으로 예상된다.

Table 1 Comparison of Experiment and Simulation

Mode	Simulation	Experiment
1	2490	2400
2	2820	2860
3	3000	3020
4	3400	3510
5	3760	3550
6	4260	4290
7	4600	5010
8	4870	5040
9	5080	5530
10	5650	5600



(a) 3400Hz Mode shape of compressor shell FEM result



(b) 3510Hz Mode shape of compressor shell modal test

Fig. 3 Mode shape

3.2 실험 장치

실험 장치는 그림 4 와 같이 압축기, 신호 증폭기 (PCB-481A), 가속도계(PCB-4906), 신호 분석기 (OROS OR25PC-Pack), 디지털 테이프 레코더 (TEAC-145T)로 구성 하였다. 압축기에서 발생하는 소음/진동만을 고려하기 위해 흡입관과 토출관을 길게 확장시켜 압축기를 무향실에 설치하여 가동시킨 후 소음과 진동을 측정하였다. 상부 셸을 밀폐시킨 상태에서 압축기를 실제 냉매 조건에서 실험하기 어려우므로 이와 비슷한 100Psi 의 공기부하를 걸어주어 작동시키고 압축기 기구부와 LDT 에 각각 1 축 가속도계를 부착하여 측정하고, 측정된 신호는 신호 증폭기를 거쳐 FFT 신호 분석기와 디지털 레코더에 기록하였다. 이때 측정된 신호로 부분 기여도와 다중기여도 함수를 구하게 된다. 주파수 범위는 5kHz 까지 각각의 자기스펙트럼과 상호스펙트럼을 측정하였다. 그림 4 는 실험 장치 구성도를 나타낸다.

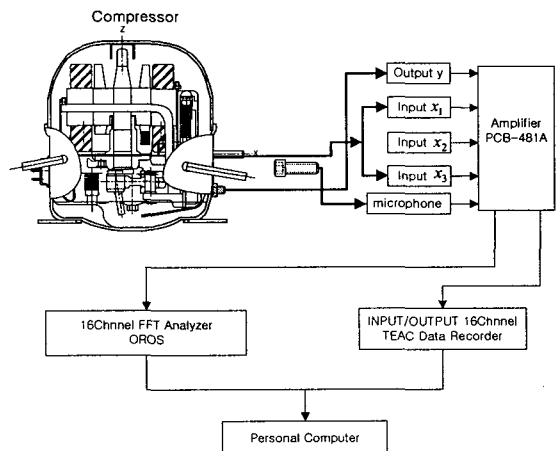


Fig. 4 Experimental setup

가속도 측정 위치는 스테이터의 X 방향을 1 번, Z

방향을 2 번, LDT Z 방향을 3 번으로 하며 출력은 측면의 진동과 거기에 근접한 소음으로 하였다. 그림 5 는 압축기 내부에 가속도 센서를 설치한 그림이다.

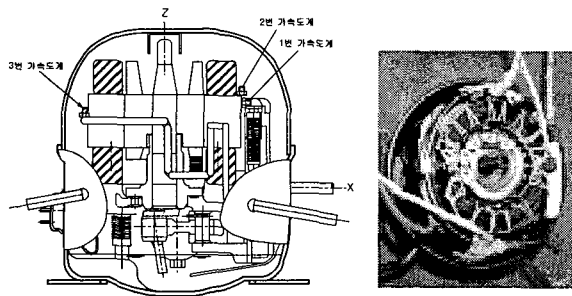
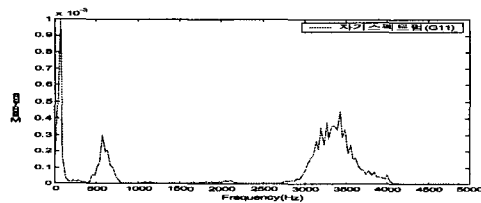


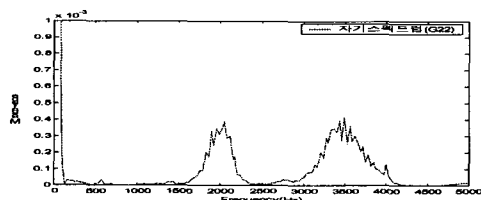
Fig. 5 Experimental setup

3.3 기여도 분석

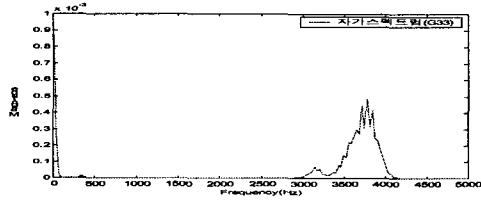
앞서 설명한 실험 장치를 통해 나타난 각 부위의 진동 자기스펙트럼은 그림 6 과 같다.



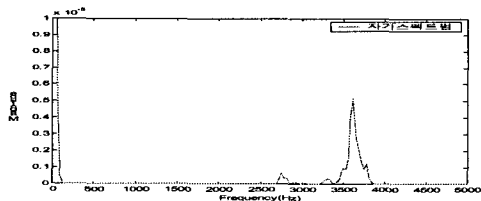
(a) G_{11} (스테이터의 X 방향)



(b) G_{22} (스테이터의 Z 방향)



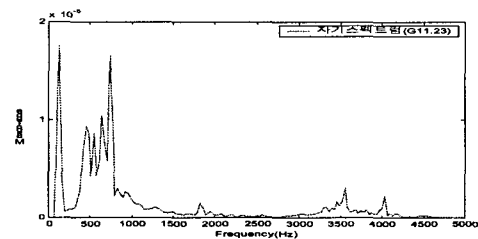
(c) G_{33} (LDT Z 방향)



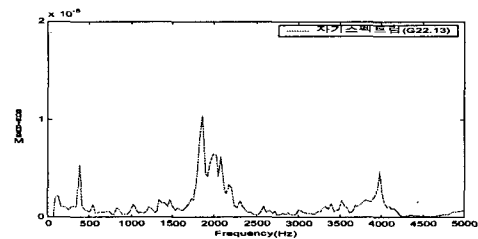
(d) G_{yy} (셸의 측면방향)

Fig. 6 Vibration auto-spectrum

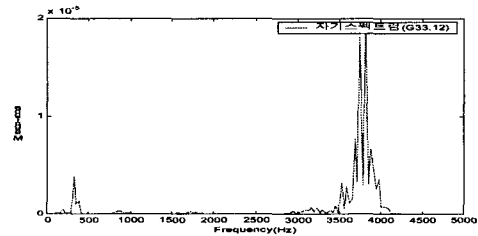
측정된 입력 데이터는 서로 상관관계를 가지고 있으므로 이러한 상관관계를 제거해 주어야 한다. 그림 7 은 입력의 자기 스펙트럼 중에서 상관 성분을 제거한 그래프인데 G_{11} 의 경우 500Hz 와 3500Hz 에서 피크들이 나타나는데 그림 7 의 (a)와 같이 입력의 상관 성분을 제거하게 되면 500Hz 부근에서만 나타나게 된다. 이 주파수 영역은 실제로 관련 업체에서도 문제시 하고 있는 영역이기도 하다. G_{22} 도 마찬가지로 2000Hz 와 3500Hz 부분의 피크 값이 상관 관계를 제거하게 되면 2000Hz 부근에서 크게 나타나게 됨을 알 수 있고 G_{33} 는 3500~4000Hz 부근에서 고르게 피크가 발생하는데 상관 성분을 제거하게 되면 3.5kHz 부근에서 집중적으로 피크 값이 존재하게 된다. 한편 그림 6 (d)의 셸진동은 3.5kHz 에서 피크값이 나타나고 있다.



(a) $G_{11,23}$



(b) $G_{22,13}$



(c) $G_{33,12}$

Fig. 7 Conditioned input

그림 8 은 상관관계를 제거한 입력들을 가지고 다중기여도 함수를 그려 보았다. 전체적으로 1 에 근접하므로 입력의 선정에 타당함을 확인할 수 있다.

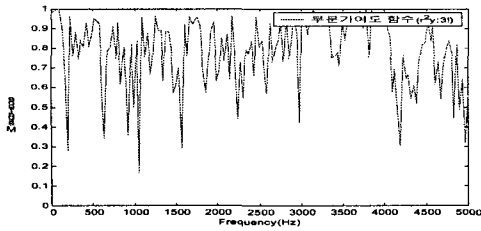
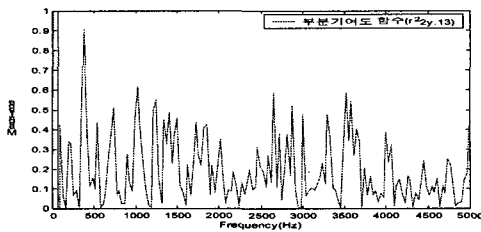
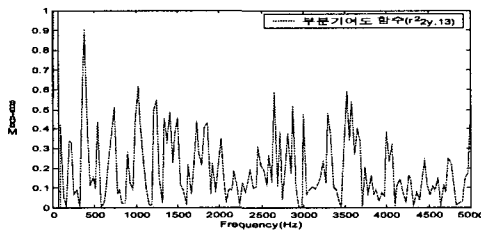


Fig. 8 Multiple coherence function of inputs

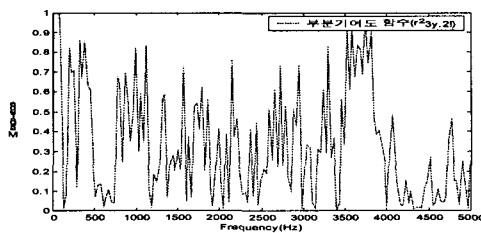
그림 9 는 부분기여도함수를 나타낸 것인데 (c)의 경우 즉 입력 LDT 의 Z 방향이 출력에 차지하는 비율이 가장 큼을 확인할 수 있다.



(a) γ^2_{2y-13}



(b) γ^2_{2y-13}



(c) γ^2_{3y-12}

Fig. 9 Partial coherence output spectrum

그림 10 은 기여출력파워스펙트럼을 전 주파수 대역에 걸쳐서 적분시킨 오버올 레벨을 나타내고 있다. 그림에서 나타난 바와 같이 각 입력원의 출력에의 기여도 순위는 전 주파수 영역에서 LDT 의 Z 방향, 스테이터의 Z 방향 그리고 스테이터의 X 방향의 진동 순으로 나타나고 있다. 즉, 각 입력원 사이의 상관성을 관찰하여 계산한 기여출력스펙트럼을 적분함으로써 각 입력원의 기여 순위를 결정할 수 있었다. 특히 3500Hz 부근에서 LDT 의 Z 방

향의 레벨이 갑자기 높게 나타나는데 이는 상관성분을 제거한 그림 7 의 (c)와 부분기여도 함수를 나타낸 그림 9 의 (c)에서도 나타나고 있다. 즉 3.5kHz 부근에서 LDT 의 Z 방향의 진동이 셸진동과 직결된다는 것을 확인할 수 있다.

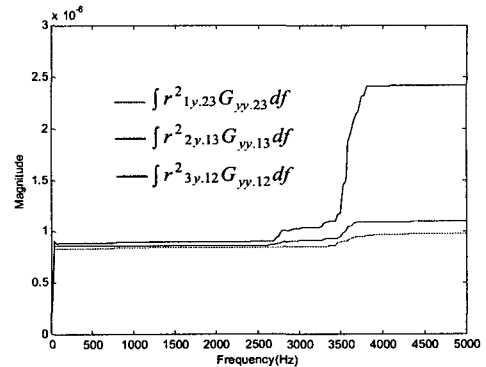


Fig. 10 Comparison of integrated energy contributions to the coherent output power spectrum

소음과 셸진동의 관련성을 검토하기 위해서 그림 11 은 소음의 자기스펙트럼을 나타내고 그림 12 는 소음과 셸진동 사이의 기여도를 나타내고 있다. 그림에서 나타난 바와 같이 셸진동과 관련이 있는 3.5kHz 부근에서 소음도 크게 나타나고 있다. 따라서 셸의 진동이 소음에 실질적으로 영향을 미치고 있음을 알 수 있다.

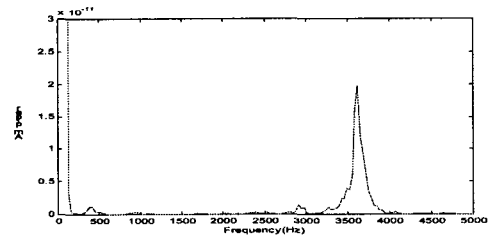


Fig. 11 Auto-spectrum for noise

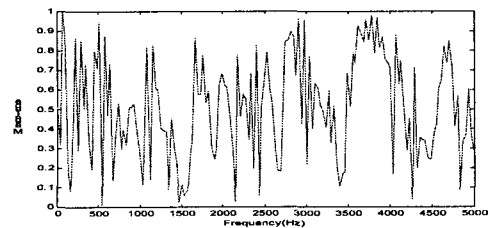


Fig. 12 Coherence between noise and shell vibration

4. 결론

압축기의 소음저감 대책을 세우는데 중요한 것은 각 소음원의 기여 관계 및 전달 특성을 파악하

여 소음원을 검출하는 것이다. 본 연구에서는 밀폐된 압축기를 3 입력/단일출력계로 모델링하고, 압축기 내부에 가속도 센서를 부착하여 기구부에서 발생하는 진동이 셸에 미치는 영향을 PCF 법을 이용하여 살펴 보았다. 이상의 결과로부터 다음의 결론을 얻을 수 있었다.

1. 본 실험에서 사용된 압축기의 내부 진동이 셸에 미치는 기여 순위는 LDT의 Z 방향, 스테이터의 Z 방향, 스테이터의 X 방향의 순으로 됨을 알 수 있었다.
2. 압축기 구동시 문제시 되는 500Hz 영역은 스테이터의 X 방향의 진동에 의해서 발생될 것으로 사료 되는데 실제 이 방향으로 피스톤이 왕복운동을 하고 압축기 머플러가 흡입 토출을 하므로 이런 것들이 복합적으로 작용하여 나타나는 것으로 사료 된다.
3. 압축기의 소음과 진동에서 나타난 바와 같이 높게 나온 3500Hz 대역에서의 주요 소음/진동원은 LDT Z 방향에 의해서 발생한다는 것을 확인 하였다.

앞으로 압축기의 정확한 소음 특성을 알기 위해서는 여러 지점에서 소음을 측정하여 분석하면 보다 정확하게 압축기 소음 특성을 예측할 수 있고 이를 통해 내부 진동과의 연관성 규명을 좀더 정확하게 수행할 수 있을 것으로 판단된다.

참고문헌

- (1) 박연택, “다차원 스펙트럼해석에 의한 테니스라켓의 진동특성에 관한 연구,” 한양대학교 석사학위 논문, 1984
- (2) 이재운, “냉장고 압축기의 소음전달특성에 관한 연구,” 서울대학교 석사학위논문, 1991.
- (3) 이동현, “압축기 셸의 소음방사 특성에 관한 연구,” 전남대학교 석사학위논문, 1999.
- (4) 이승화. “음질을 고려한 소음원 파악에 관한 연구,” 과학기술원 석사학위 논문, 1998.
- (5) 오재웅, “냉장고의 소음진동 제어,” 한국소음진동공학회지(1 권 2 호), 1991
- (6) Bendat, J.S., and Piesol, A.G, “Random Data: Analysis and Measurement Procedures,” 3rd ed., John Wiley and Sons, 2000.
- (7) 함경훈, “PCF 기법을 이용한 광디스크 드라이브의 진동원 규명,” 한국소음진동공학회 춘계 학술대회 논문집, 2002