

# 고소음 발생 기계류의 소음저감을 위한 공학적 대책 연구

김용국 · 김태구\* · 박대식 · 박재석

한국산업안전공단 산업안전보건연구원 · \*인제대학교 보건안전공학과

## 1. 서 론

### 1.1 연구의 배경 및 목적

산업현장에서 기계류 사용의 증가에 따라 소음 및 진동에 의한 근로자들의 소음성 난청 등의 직업병이 증가하는 실정이다. 특히 산업현장 등에서 널리 사용되는 공기압축기는 고압·고속의 공기 유동으로부터 발생하는 소음과 피스톤, 스크류 등의 진동 및 마찰에 의해 큰 소음이 발생하는 대표적 산업기계로 인식되고 있다. 이러한 고소음 기계류에 의한 소음원의 차폐 또는 저감을 위한 공학적 대응능력을 향상시켜 소음을 저감하고 국제적 기계류의 안전규제에 대하여 능동적인 대처능력을 확보하기 위함이 본 연구의 목적이다.

### 1.2 연구 내용 및 범위

왕복동식 압축기를 대상으로 저소음 기계의 설계와 관련된 ISO(ISO/TR 11688-1:1995) 기준을 적용하여 음향학적 모델링을 통한 압축기에서 발생할 수 있는 소음원의 종류 및 소음 전달경로를 분석하고 압축기에서 발생하는 소음원과 진동원 파악을 위한 Data acquisition과정으로 소음의 주파수 분석을 통한 해석과 FFT를 이용하여 진동을 측정 및 분석한 후 소음 및 진동원의 특성을 분석하였다. 이 결과 얻어진 압축기의 실험결과와 음향모델에 의한 소음·진동 특성에 관한 내용을 정리하고 이에 대한 대책을 제시하였으며 수행한 연구범위는 다음과 같다.

- 왕복동식 공기압축기의 소음체계 분석
- 소음 및 진동 측정을 통한 주 소음원 분석
- 왕복동식 압축기에 대한 소음 저감 대책 제시
- 고소음 기계류의 소음저감 연구에 대한 향후대책 제시

### 1.3 연구수행 방법

ISO/TR 11688-1(1995)에서 제시하고 있는 일반적인 소음저감 설계규칙을 참조하여 본 연구를 수행하였다.

- 기계요소는 능동 및 수동 소음 구성요소로 구분한다.
- 공기전파, 액체전파, 구조물전파 소음원의 위치를 확인한다.

- 공기전파, 액체전파, 구조물전파 음향경로를 알아낸다.
- 음향방사 표면의 위치를 확인한다.
- 가장 강력한 소음 유발 요소(음원, 전달경로, 방사표면)를 확인한다.

## 2. 소음측정 실험

### 2.1 실험 대상

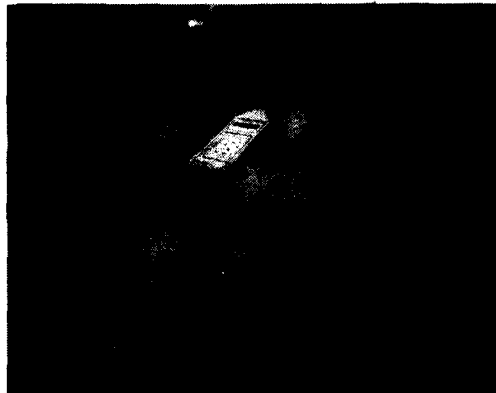
왕복동식 압축기는 축의 회전에 의한 피스톤의 운동으로 유체를 압축한다. 기계적인 구동 특성으로 인하여 동작 중에 쉽게 소음이 발생하므로 발생 소음원에서 압축기의 소음수준에 큰 영향을 끼치는 소음수준이 높은 주파수대역을 설정하고, 압축기를 구성하는 각 부품의 동특성과의 연계를 파악하기 위하여 소음을 측정하였다. 본 연구의 실험 대상으로 선정한 압축기의 제원은 표 1과 같다.

<표 1> 공기압축기 제원

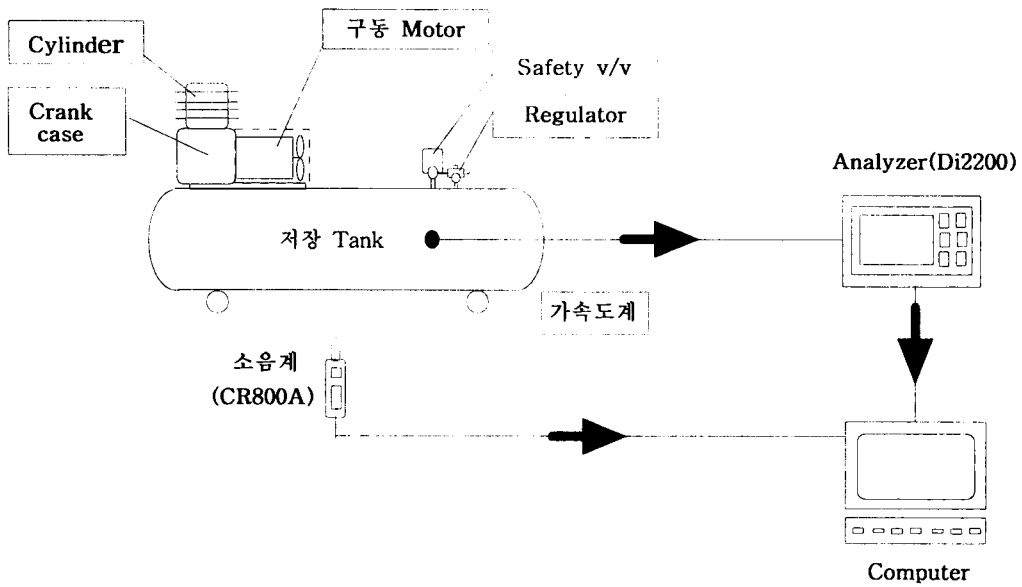
구동마력(HP)	공급전원	RPM	ℓ/min
2.5	220V/60Hz	1750	100

### 2.2 실험장치

소음기(Cirrus 800A)와 FFT(DI-2200)를 이용하여 측정하였다. 이러한 장비를 이용하여 소음측정을 통하여 주파수 대역에 대한 소음원 구조물의 진동과 연계를 검증하기 위하여 진동을 측정·평가하였다. 특히 경계조건의 영향을 고려하여 무향실에서 측정하여야 하나 넓은 실내로 반사음의 영향이 없을 것으로 가정하고 측정하였다.



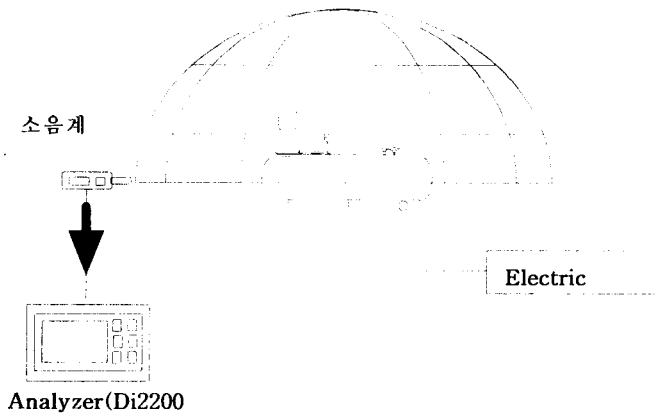
[그림 1] 실험장치의 사진



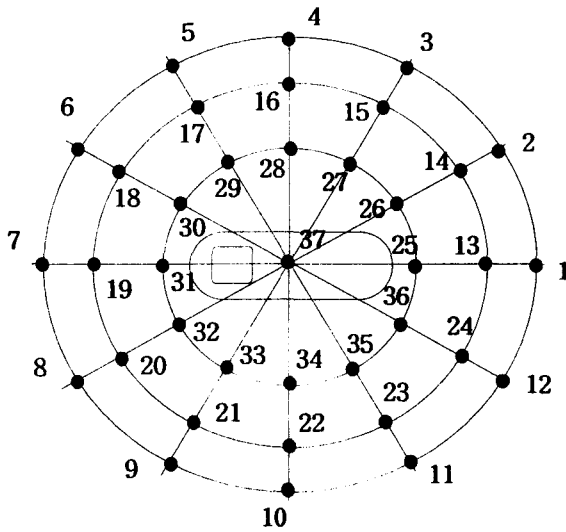
[그림 2] 압축기 소음특성 실험장치 개념도

### 2.3 소음측정

압축기의 소음방사(sound radiation)특성을 파악하기 위하여, ISO 3744-1981(E)에 구성된 반구형(hemisphere)측정장치를 구성하고[그림 3], 압축기중앙에서 0.5m 이격된 37개의 지점에서 음압을 측정하여 방향성도(sound directivity pattern)[그림 4]를 구성하였다. 압축기가 정상적으로 작동할 때 발생소음을 등가소음도와 1/1 octave band로 측정하여 도시하였다.



[그림 3] Sound directivity pattern실험 개략도



[그림 4] Sound directivity pattern 실험 측정점

### 3. 소음도 측정 실험분석 결과

#### 3.1 소음의 방향성

압축기의 발생 소음원을 분석하기 위하여 앞에서 제시한 방법을 이용하여 실험을 수행하였다. 발생된 소음원의 분석을 통하여 500Hz 영역에서 소음이 크게 발생함을 알 수 있다. 소음도의 방향성으로 소음원을 분석한 결과 흡입구방향에서 소음도가 가장 높게 나타나며, motor의 냉각팬, 토출구 라인부분에서 비교적 높은 소음도를 나타내었다.

#### 3.2 전체 소음도

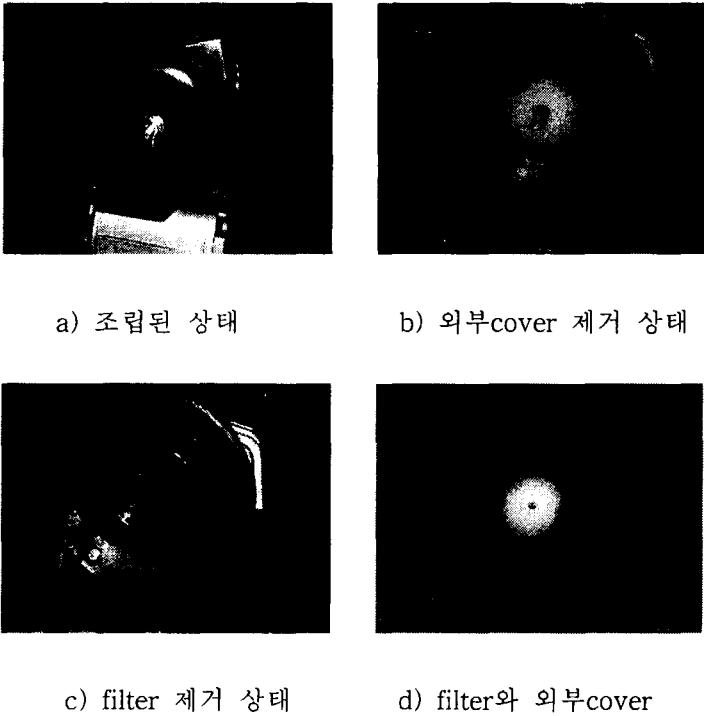
압축기에서 발생하는 전체적 소음도를 측정하기 위하여 압축기에서 이격거리 1m 지점에서의 소음도를 측정하였다. 측정 결과는 약 76.2dB(A)의 전체 소음도를 나타내었다. 또한 구동모터의 안전cover가 소음도에 미치는 영향을 확인하기 위하여 구동모터의 안전커버를 제거[그림 5]한 후 측정한 소음도가 제거 전보다 약 1dB(A) 정도 높게 나타나는 결과를 얻었다.

- 구동motor의 안전cover를 설치한 경우의 소음도 : Leq 76.2 dB(A)
- 구동motor의 안전cover를 제거한 경우의 소음도 : Leq 77.2 dB(A)
- 흡입구부분의 filter제거 후 소음도 : Leq 79.5 dB(A)

이는 냉각용 팬소음이 안전커버에 의해서 일부 감소됨을 의미하는 것으로 추가적인 보완으로 소음도를 낮출 수 있을 것으로 판단된다.

흡입구부분의 필터에 의한 영향을 고찰하기 위하여 [그림 5]와 같이 필터부분을 제거한 후 소음도를 측정하였다.

측정결과[그림 5] 필터의 부착 유·무에 따라 약 3dB(A)의 소음도차이를 나타내었다. 필터부분의 스폰지에 의한 분진의 제거역할뿐만 아니라 일종의 소음기 역할을 수행함을 알 수 있다. 이는 구조적인 변경 또는 필터재료의 선정에 따라 소음저감능을 향상시킬 수 있을 것으로 판단된다.



[그림 5] 흡입구부분의 필터

### 3.3 압축기의 진동

소음특성실험을 통하여 발생한 소음이 구조물의 진동과 관련이 있을 것으로 예상하여 주요부품에 대한 진동량을 측정하였다. cylinder head부분의 체결지점 4곳, crank case의 체결지점 4곳, 구동motor와 crank case부분을 지지하는 connect point지점 4곳, Receiver tank주변 7곳에 대한 진동을 측정하였다. 진동이 크게 나타나는 주파수대역이 500, 800, 1000Hz의 중주파영역으로 소음도

가 크게 발생하는 주파수 영역과 유사함을 알 수 있다. 이는 반복적인 공기압축에 따른 맥동현상에 의해 발생하는 소음뿐만 아니라 압축기 구성요소들의 진동에 의한 방사소음에 의한 영향을 나타내는 것을 의미하므로 방사소음의 대책 선정이 중요함을 의미한다.

<표 2> 압축기 진동 측정 결과표

측정점	진동량(G)	주요 주파수(Hz)	비고
Cylinder head	max 0.43	500, 1000, 2900	
Crank case	max 0.32	500, 800, 1000, 2900	
Connect point	max 0.31	120, 250, 800	
Motor frame	max 0.15	500, 800, 1200	
Receiver tank	max 0.6	120, 800, 1000, 1200	

#### 4. 소음저감 대책

선행된 연구와 실험을 통하여 얻어진 압축기의 음향모델에 의한 소음·진동 특성에 관한 내용을 정리하고 흡입밸브와 토출밸브의 거동, 모터의 주기 등을 파악하여 각각에 대한 소음저감 대책을 제시한다.

##### 4.1 흡입밸브

흡입밸브의 최대변위(maximum displacement)와 열림횟수(fluttering)의 증가는 흡입방에서 압력맥동을 증가시키는 원인이 되므로 흡입파이프의 압력을 줄이기 위해 흡입파이프와 흡입방에서의 유체흐름이 원활하도록 흡입밸브와 구조를 개선해야 한다.

흡입방의 크기가 증가하면 흡입방에서 압력맥동의 크기가 감소하고 압력맥동의 횟수가 감소하여 흡입파이프에서 진동과 소음이 감소하고, 흡입밸브의 강성이 증가하면 흡입밸브의 최대변위는 감소하고 열림 횟수가 증가하게 되어 흡입방에서 압력맥동의 크기가 감소하게 되어 흡입소음을 감소시킬 수 있다.

##### 4.2 토출밸브

토출파이프에서 압력을 증가시키면 흡입밸브의 지연시간(time delay)이 증가하며, 흡입방에서 압력맥동의 크기가 증가하고 토출밸브의 시간지연도 증가시켜, 토출밸브의 열림 횟수를 감소시킬 수 있다. 또한 토출방의 크기를 증가시키면 토출방에서 압력맥동의 크기가 감소하고 압력맥동의 횟수도 감소하고 토출파이프에서 토출밸브의 변위가 감소하게 되어 소음을 감소시킬 수 있다.

### 4.3 모터

모터의 회전수가 증가할수록 흡입밸브와 토출밸브의 최대변위는 증가하나 열림회수는 감소하고, 흡입방과 토출방에서 압력맥동의 크기가 증가하나 맥동의 회수는 감소하게 된다. 즉, 흡입관과 토출관에서 소음은 증가하나 단위시간에 많은 양의 유체를 수송하게 되어 압축기의 효율은 증가하게 되므로, 이 경우는 모터의 회전수를 감안한 적정 수준의 소음저감 대책이 수립되어야 한다.

## 5. 결 론

왕복동 공기압축기로부터 발생하는 소음은 다양한 기계적 구조 및 재질로부터 기인하여 여러 형태로 발생한다. 일반적인 산업기계의 생산현장에서는 이러한 소음원에 대하여 흡음재, 차음재 등을 이용한 수음자로부터 소음원을 단순히 격리시키려는 소극적인 방안으로 저소음화를 이루어 왔지만 향후에는 보다 적극적이고 근본적인 방안으로 능동적 소음원에 대한 개선이 필요할 것으로 생각된다.

그러나 이러한 문제의 해결을 위해서는 지속적인 공학적 개선 대책에 관한 연구가 다양한 실험을 통하여 진행될 필요성이 있으며, 특히 실험결과로부터 공기압축기 소음의 방향성을 고려해 보면 흡입구에서의 소음은 주로 밸브로부터 기인한 소음이라 판단되고, 공기압축기 기계 자체의 소음원 제거뿐만 아니라 밸브, 연결배관에서의 소음원 제거가 매우 중요하므로 흡입밸브, 토출밸브의 구조, 흡입필터의 최적화 및 토출배관의 구조에 따른 소음저감 등과 같은 관점에서 집중적인 실험연구가 추가로 필요하다고 판단된다.

## 6. 연구결과의 현장 적용 방법 제시

### 6.1 소음 증감량의 계산 방법

본 연구를 통하여 볼 때 소음의 증감요소는 여러 가지가 있을 수 있지만, 문헌에서 제시된 연구결과를 토대로 원동기의 마력증가, 회전체 단수 증가, 회전차 날개 수 증가, 회전속도 증가 및 유체속도가 증가하는 경우별로 구분하여 산출 공식에 의한 소음의 증감량을 현장에서 용이하게 파악할 수 있는 계산 방법을 다음과 같이 제시한다.

#### 가. 원동기 마력이 증가하는 경우

원동기 마력이 증가할수록 소음은 증가한다. 일반적으로 기계에서 발생하는 소음은 기계를 구동하기 위하여 사용되는 원동기의 마력수와 관계가 있다. 실제로 원동기의 마력이 증가하면 대체로 아래와 같은 산출 공식에 의거 소음이 증가된다.

$$\text{증가되는 소음}[dB(A)] = 17 \log \frac{HP_2}{HP_1} \quad (HP : \text{마력})$$

예로서 원심형 압축기나 펌프는 마력이 2배로 증가할 때 소음은 4~5 dB(A)이 증가한다.

**나. 압축기의 단수가 증가하는 경우**

단수가 많을수록 소음은 감소된다. 원심압축기의 경우 단수를 늘려 단수별 부하량을 줄여주게 되면 소음은 줄어든다. 이 경우 감소량의 산출 공식은 다음과 같다.

$$\text{감소되는 소음} [dB(A)] = 25 \log N \quad (N : \text{단의 수})$$

**다. 회전차의 날개 수가 증가하는 경우**

회전차의 날개 수가 많을수록 소음은 감소된다. 회전차(Impeller)의 날개(Blade) 수가 많을수록 소음이 감소된다. 이에 따른 산출 공식은 다음과 같다.

$$\text{감소되는 소음} [dB(A)] = 10 \log \frac{N_2}{N_1} \quad (N : \text{날개 수})$$

예로서 날개의 수가 배로 증가하면 소음은 3dB(A) 정도가 줄어든다.

**라. 회전속도가 빨라지는 경우**

회전속도가 빨라지면 소음은 증가한다. 즉 고속의 기계가 저속의 기계보다 소음이 더 크다. 그 소음 증가의 산출 공식은 다음과 같다.

$$\text{증가되는 소음} [dB(A)] = 20 \sim 50 \log \frac{N_2}{N_1} \quad (N : \text{회전속도})$$

원심형 압축기를 예로 들면 저속범위인 경우는 20log 속도비, 고속범위인 경우는 50log 속도비 기준으로 소음이 증가한다.

**마. 유체의 속도가 증가하는 경우**

유체의 속도가 증가하면 소음은 증가한다. 유체가 관내에 흐를 때 소음이 발생하는 것은 대부분 공동현상(Cavitation)이 발생하기 때문이다.

- 관내에 공동현상이 발생하지 않는 경우에는 유체의 속도가 증가하게 되면 소음은 아래와 같이 증가하게 된다. 이 공식에서 유체 속도가 2배 빨라지면 소음은 약 18dB(A)이 증가함을 알 수 있다.

$$\text{증가되는 소음} [dB(A)] = 60 \log \frac{V_2}{V_1} \quad (V : \text{유체속도})$$

- 관내에 공동현상이 발생한 경우에는 발생하지 않는 경우보다 증가소음이 2배가 크며 산출 공식은 다음과 같다.

$$\text{증가되는 소음} [dB(A)] = 120 \log \frac{V_2}{V_1}$$



## 6.2 기계 소음의 공학적 개선을 위한 체크리스트

### 가. 설계관련 체크사항

1. 동력을 최소화하였는가?
2. 사용속도를 최대한 줄였는가?
3. 임펠러의 직경이 크고 선단 속도(RPM)가 낮은가?
4. 소음이 적은 부품의 사용을 고려하였는가?
5. 회전물질(Mass) 대 고정물질의 비율을 줄였는가?
6. 회전축의 기계적인 마멸을 줄이도록 설계시 고려되었는가?
7. 구조적인 공명(Structural Resonance)을 피할 수 있는 구조인가?
8. 충격 부분의 무게를 줄이고 충격속도를 감소시켰는가?
9. 회전부분의 속도변화율을 최대한 줄였는가?
10. 베어링 부분 등의 윤활이 잘 될 수 있는 구조인가?
11. 베어링과 회전부분의 허용공차 및 간극을 가능한 한 적게 하였는가?
12. 음향학적인 관점에서 임펠러 날개의 형태가 설계시 고려되어 있는가?
13. 임펠러 날개와 디퓨저(diffuser) 사이의 간격이 가능한 한 넓게 유지되고 있는가?
14. 회전날개와 고정날개의 조합이 잘 선택되어 있는가?
15. 가능한 한 입구의 크기가 크고, 입구 길이가 짧게 되어 있는가?
16. 유체수송 경로상의 모든 방해물, 굴곡 및 급격한 방향 전환 등을 최소화하거나 없애도록 설계되었는가?
17. 음향학적 관점에서 출구의 형태를 설계 시에 반영하였는가?
18. 통로, 배관 등에서 유속을 줄였는가?
19. 분출속도를 줄였는가?
20. 발산면적의 크기를 줄였는가?
21. 금속과 금속의 접촉을 피하면서 진동 발산부분과 다른 전달부분을 가능한 한 분리하기 위하여 진동 차단장치의 설치가 고려되었는가?
22. 넓은 발산면적에는 그 곳으로 공기가 배출될 수 있도록 개구부나 공기배출구의 설치가 고려되었는가?
23. 왕복식 기계류에서는 피스톤으로 인한 충격을 줄이기 위해 간극을 줄여주고 피스톤 무게 및 커넥팅로드의 무게도 최대한 줄였는가?
24. 기타 필요한 특정 사항들이 고려되었는가?

### 나. 제작관련 체크사항

1. 베어링이 정확하게 설치되어 있는가?
2. 축 정렬(alignment)이 잘 되어 있는가?
3. 동적 균형(Dynamic Balance)이 유지되고 있는가?

4. 운전속도와 축 방향 및 비틀림 방향의 공명속도간에 적절한 간격을 유지하고 있는가?
5. 베어링 부분 등의 윤활이 잘 될 수 있는 구조인가?
6. 유체수송 경로상의 모든 방해물, 굴곡 및 급격한 방향 전환 등을 최소화하거나 없애도록 한 구조로 제작되었는가?
7. 진동 발산부분과 다른 전달부분을 분리하기 위한 진동 차단장치가 제작시 고려되었는가?
8. 넓은 발산면적에는 개구부나 공기배출구가 제작 시 고려되었는가?
9. 왕복식 기계류에서 간극을 줄여주고 피스톤 무게 및 커넥팅로드의 무게도 최대한 줄일 수 있도록 제작되었는가?
10. 기타 필요한 특정 사항들이 고려되었는가?

#### 다. 설치관련 체크사항

1. 입구와 출구에는 소음기와 방음덮개 등과 같은 방음장치를 설치하였는가?
2. 방음덮개를 설치한 경우에는 내부에 흡음재를 설치하고 개구부를 적정하게 기밀을 시켰는가?
3. 적절한 받침대와 기초 위에 설치하여 구조부에서 발생하는 소음과 진동을 최대한 줄였는가?
4. 기계의 무게 중심 위에 지지 및 설치되어 있는가?
5. 입·출구의 개방 방향이 작업자와 가능한 한 반대 방향으로 설치되어 있는가?
6. 기타 필요한 특정 사항들이 고려되었는가?

#### 참고문헌

1. ISO/TR 11688-1, 저소음 기계 및 장비 설계를 위한 권장 실행 방법
2. J. R. Hassall, K. Zaveri, Acoustic Noise Measurements, B&K, 1979
3. K.Sano: "Analysis of hermetic rolling piston type compressor noise and counter measurements" Proc. of 1984 International Compressor Conference at Purdue. 1984, pp 242-250
6. 한국원 "소음방지의 공학적 대책" 1992, 한국산업안전공단
7. 이성욱, "왕복동식 압축기의 벨브가동 및 압력 맥동에 대한 해석적 연구" 인하대학교, 1999,
8. 하재현 외, "유체기계", 문운당, 1998, p220~240