

# 전달률을 이용한 압축기용 소음기 해석 Analysis of compressor muffler using transmissibility

신강식\*· 김상명\*· 조용훈\*\*

Gangsig Shin, Sang-Myeong Kim and Yong-Hoon Cho

Key Words : volume velocity transmissibility(체적 속도 전달률), muffler(소음기), compressor(압축기), insertion loss(삽입손실)

## ABSTRACT

The common practice to reduce the compressor noise is installing a muffler. The noise reduction performance of the muffler is the most critical one for the total noise characteristics of the compressor. In this paper, a simple impedance approach using the concept of transmissibility is employed for the acoustic analysis of the muffler. It is known that transmissibility is directly related to insertion loss, and thus transmissibility can indicate the correct performance of the muffler. The analysis result is supported by a Finite Element Model. In addition, some experiments conducted also show that the transmissibility is mildly related to the measured sound pressure outside the compressor.

의 관계를 알아보았다.

## 1. 서론

가정용이나 상업용 에어컨용 실외기의 소음은 이웃이나 다른 사람들이 듣기에 큰 소음원이 되고 있다. 실외기의 소음원으로는 크게 압축기와 팬으로 나눌 수 있다. 이중에서도 저주파대역의 팬에 의한 소음 보다는 소음기에서 기인한 고주파의 소음이 귀에 크게 거스르고 실제로 제조회사의 고객 불편사항으로 많이 지적되고 있다. 이에 절대적인 음압(sound pressure)이나 dBA, 혹은 loudness의 저감을 위해 많은 연구가 되어왔다. 이러한 값들의 저감을 위하여 먼저 머플러의 성능을 평가하는 인자에 대한 연구가 진행되어야 하며 그 성능을 평가하는 인자를 이용하여 머플러의 디자인 개선이 이루어져야 한다.

머플러의 성능을 평가하고 기술하는 인자로는 현재 IL(삽입 손실, insertion loss)등이 많이 쓰이고 있으나 본 연구에서는 김상명[1,2]에 의해 제안된 volume velocity transmissibility (체적 속도 전달률)개념을 사용하였다.

아울러 실제 압축기의 소음을 측정하여 그 데이터를 여러 각도에서 분석하였고 또한 전달률과

## 2. 전달률 해석

### 2.1 이론 모델

이론적인 모델해석을 위해서 임피던스 해석법을 이용하였다. 이를 위하여 하나에 관에 대한 해석부터 하면 다음과 같다.

#### (1) 하나의 관에 대한 해석

그림 1에 간단한 확장관을 나타내었다. 아래의 파이프 시스템에 임피던스 해석법을 적용하면 다음 식을 얻을 수 있다.

$$\begin{Bmatrix} p_1 \\ p_2 \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} Z_{11} & Z_{12} \\ Z_{21} & Z_{22} \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} Q_1 \\ Q_2 \end{Bmatrix} \quad (1)$$

\* 광주과학기술원

E-mail : gsshin@kjist.ac.kr

Tel : (062) 970-2409, Fax : (062) 970-2384

\*\* 롯데 기술 연구소

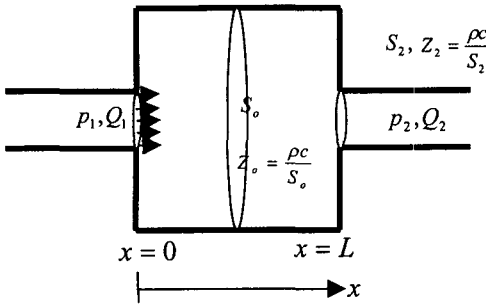


Fig 1. Geometry of a simple pipe

여기서  $Z_{11} = p_1/Q_1|_{Q_2=0}$  는 출구단이 막혀있을 때의 입구단의 음향 임피던스(acoustic impedance)이다. 마찬가지로 다른 인자들도 각각  $Z_{12} = p_1/Q_2|_{Q_1=0}$ ,  $Z_{21} = p_2/Q_1|_{Q_2=0}$ ,  $Z_{22} = p_2/Q_2|_{Q_1=0}$  과 같이 정의 할 수 있다.

각각의 임피던스 성분들은 파이프 내부의 파(wave)를 오른쪽과 왼쪽으로 진행하는 각각의 파로 나눔으로써 얻을 수 있다. 즉, 음압 성분은 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$p(x) = Ae^{-jkx} + Be^{jkx} \quad (2)$$

여기서  $k$  는 파수(wave number)이고,  $A, B$  는 각각 오른쪽과 왼쪽으로 진행하는 파의 음압을 나타내는 복소수이며 체적속도(volume velocity)는 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$Q(x) = Ae^{-jkx} / Z_0 - Be^{jkx} / Z_0 \quad (3)$$

위의 식에서  $Z_0$  는 파이프의 특성 임피던스(characteristic impedance)이다.

이를 토대로 각각의 임피던스 성분을 계산하고 이를 식 (1)에 적용하면  $Q_1$  과  $Q_2$  를 얻을 수 있고  $Z_{11} = Z_d = -jZ_0 \cot kL$ ,  $Z_{12} = Z_i = jZ_0 \csc kL$ ,  $Z_{21} = -Z_i$ ,  $Z_{22} = -Z_d$  의 관계를 얻을 수 있다. 여기서,  $Z_i$ ,  $Z_d$  는 각각 전달 임피던스(transfer impedance)와 직접 임피던스(direct impedance)를 나타낸다.

또한,  $Z_0^2 = Z_d^2 - Z_i^2$  의 관계로부터

$$Z_i = Z_0 \frac{Z_d \cos kL + jZ_0 \sin kL}{Z_0 \cos kL + jZ_d \sin kL}$$

(4)

을 구할 수 있으며 또한 체적속도 전달률(volume velocity transmissibility)  $T$ 를 다음과 같이 얻을 수 있다.

$$T = \frac{Q_2}{Q_1} = -\frac{Z_i}{Z_d + Z_2} \quad (5)$$

여기서 전달률은 진동 절연계의 전달률과 같은 개념으로 입력과 출력의 비로써 머플러의 성능을 나타내고자 하는 방식이다.

또한 머플러의 삽입 손실(IL)과 전달률은 다음과 같은 관계가 있다.[2]

$$IL = -20 \log_{10} |T| \quad (6)$$

삽입 손실(IL)의 경우는 실험시 머플러를 붙였다 떼었다 하는 번거로움이 있으며, 이론적 해석시 소음기뿐만 아니라 전체 압축기를 모델링해야 하므로 사실상 해석이 불가능한데 반해, 전달률은 단지 소음기 자체 입구단과 출구단의 체적 속도만 알면 되므로 상당히 쉽게 계산할 수 있는 장점이 있다. 또한 필요한 경우 위 의 식 (6)에 의해 간단하게 삽입손실(IL)로도 변환이 가능하다.

## (2) 단순화된 머플러에 대한 이론 해석

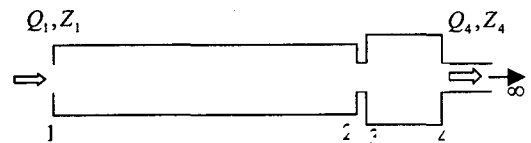


Fig 2. Simplified muffler model

여기서 각 단의 단면적과 길이는 실제 형상으로부터 근사화할 수 있으며,  $Q_1, Z_4$  는 주어진 값이라 가정했다. 이 단순 모델은 실제 머플러의 형상을 길이를 가장 중요한 기준으로 하여 단순화 한 모델이다.

하나의 관에 대한 해석으로부터 구한 각각의 관에 대한 전달률로부터 전체 전달률을 다

음과 같이 구할 수 있다.

$$T = \frac{Q_4}{Q_1} = \frac{Q_4}{Q_3} \cdot \frac{Q_3}{Q_2} \cdot \frac{Q_2}{Q_1} = T_{34} \cdot T_{23} \cdot T_{12} \quad (5)$$

전달률이 IL 에 비해서 가질 수 있는 또 하나의 장점은 위에 보인 것 같이 하나의 시스템을 여러 부분으로 나누어서 부분적으로 해석할 수 있다는 것이다. 즉, 위의 예를 들면  $T_{12}$ ,  $T_{23}$ 과  $T_{34}$ 를 각각 따로 해석할 수도 있고  $T_{12}$ 와  $T_{23}$ 를 곱하면  $T_{13}$ , 즉 1 단과 3 단 사이의 전달률을 구할 수 있으며 전체를 곱하면 전체의 전달률을 구할 수 있다.

### (3) 머플러에 대한 유한 요소 해석

그림 3 에 실제 머플러의 형상을 나타내었다.

먼저 전달률의 이론적인 분석을 위하여는 단순화된 모델을 이용하였고, 유한요소해석으로는 단순모델과 실제모델을 모두 이용하였다.

그림 4 에 실제모델의 유한요소해석 결과를 이론모델의 결과와 비교하여 나타내었다. 이론모델 해석을 하는데 사용된 머플러의 형상은 Fig2 에 나타낸 것과 같고 치수는 다음과 같다. 1 단의 단면적  $A_1 = 377mm^2$ , 1-2 단 pipe 의 단면적  $A_{12} = 1147.3mm^2$ , 2-3 단 pipe 의 단면적  $A_2 = 230.7mm^2$ , 3-4 단 pipe 의 단면적  $A_{34} = 1372.2mm^2$ , 4 단의 단면적  $A_4 = 113.1mm^2$ 이며 1-2 단, 2-3 단, 3-4 단의 길이는 각각  $l_{12} = 171.3mm$ ,  $l_{23} = 4mm$ ,  $l_{34} = 39.3mm$ 이며  $Q_1 = 1 \times A_1$ ,  $Z_4 = \rho \cdot c / A_4$ 이다.

여기서  $\rho$ 는 냉매의 밀도,  $c$ 는 음속이며 각각  $74.3 kg/m^3$ ,  $205 m/s$ 이다.

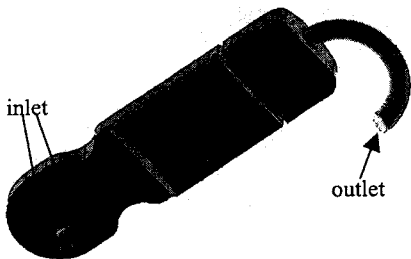


Fig 3. Shape of the compressor muffler analyzed

그림 4 는 그림 2 의 단순화 모델을 이용한 이론식과 그림 3 의 실제모델을 이용한 유한요소법 결과를 비교하였다. 이론식이 단순화된 머플러로부터 도출된 것임을 감안하였을 때 유한요소 결과는 이론식과 경향이 비슷한 것을 볼 수 있다.

그림에서 볼 수 있는 것과 같이 머플러의 전달률이 전체적으로 1 보다 작은 것으로 보아 이 머플러는 전체적으로 양호한 성능을 나타낸다고 보여진다.

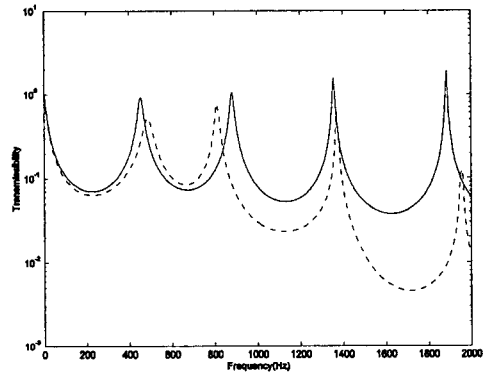


Fig 4. Transmissibility of simplified muffler theory(solid lines), FEM(dashed lines)

이론적 모델의 전달률이 FEM 모델의 전달율과 경향이 일치하므로 복잡한 모델의 경우 이론적 전달률에 대한 식을 이용하면 머플러의 개념설계(concept design)시 시행착오성 FEM 모델링을 위한 시간과 노력을 현저히 줄일 수 있을 것으로 판단 된다.

## 3. 실험

### 3.1 실험결과

본 실험은 현재 사용되고 있는 상업용 대형 에어컨에 사용되는 왕복동식 압축기를 이용하여 이루어 졌다.

실험은 무향실 안에서 이루어 졌으며, 압축기로부터 1m 떨어진 곳에 위치에서 마이크와

dummy head 로 동시에 측정하였다.

압축기 소음은 컴퓨터 내에 wave file 로 저장되었으며 이 때의 샘플링 주파수는 48000Hz 였다. 또한 이론적으로 60Hz 로 회전하는 정상 상태 회전이지만 오차를 감안하여 데이터를 1 분 동안 저장하였다. 참고로 dummy head 를 이용한 실험 장면을 Fig 5 에 보였다.

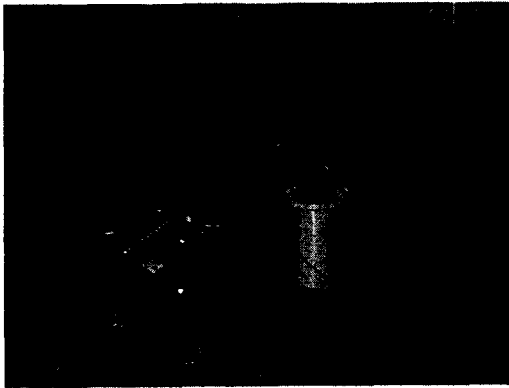


Fig 5. Experimental setup for compressor and dummy head in anechoic chamber

위와 같은 방식으로 실험을 하여 얻은 데이터를 주파수 영역에서 A-weighting 을 하여 그림 6 에 나타내었다. 위에서 볼 수 있듯이 전체적으로 3000-5000Hz 부근에서 큰 값을 가짐을 알 수 있으며 고주파로 갈수록 점차 값이 줄어드는 것을 볼 수 있다.

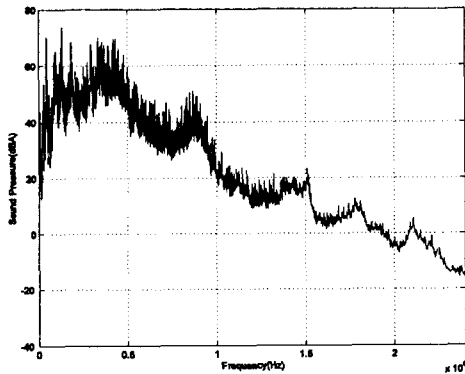


Fig 6. A-weighted sound pressure level

그림 6 의 음압에 대한 1/3 옥타브 분석 결과를 그림 7 에 나타내었다.

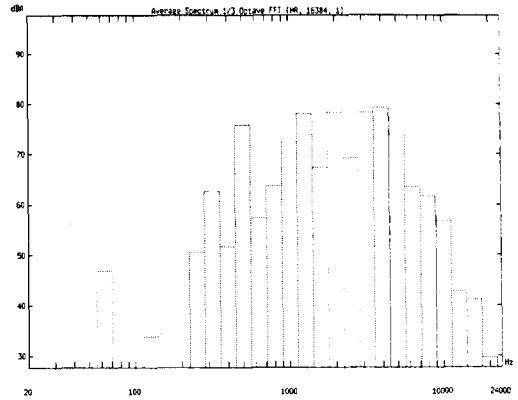


Fig 7. Experimental data(1/3 octave analysis)

위의 그림에서 알 수 있듯이 대략 500, 1000, 1200, 2000, 3200Hz 그리고 4000Hz 근처에서 가장 큰 값들을 보임을 알 수 있다. 1/3 옥타브분석 결과 또한 5000Hz 이하의 영역에서 큰 음압을 갖는 것을 볼 수 있다.

그림 8 은 컴프레서 표면에 가속도계를 부착해 측정된 압축기의 속도 값이다. 진동의 경우 2000 Hz 부근에서 두드러진 피크값을 갖는다. 그림 9 는 그림 8 의 속도 입력에 대한 그림 6 의 음압의 주파수 응답함수를 보였다. 5 kHz 이상에서는 속도 값과 방사 음압값이 거의 비례함을 알 수 있다. 진동속도가 큰 값을 가졌던 2 kHz 부근은 음압이 크지 않은 걸로 보아 방사효율이 높지 않다고 추론할 수 있다.

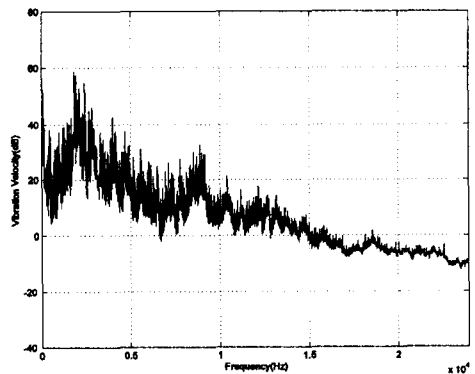


Fig 8. Vibration velocity at the compressor shell

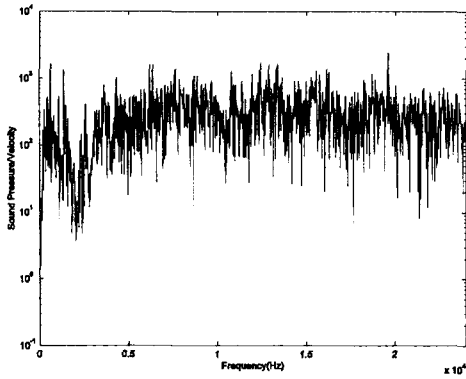


Fig 9. Sound pressure response to the vibration velocity input

### 3.2 실험결과와의 비교

실험은 그림에서 보인 것 같이 압축기 전체를 무향실 안에서 정상속도(steady state rpm)로 가동시킨 상태에서 소음을 측정하였다. 소음기의 음질 해석을 위해서는 소음기만 따로 떼어서 실험을 해야 하지만 냉매보급 및 설치 등의 어려움으로 인해 전체 컴프레서로 실험을 하여 결과를 보고 전체적인 결과에서 머플러의 특성인 전달율의 경향을 조사하였다.

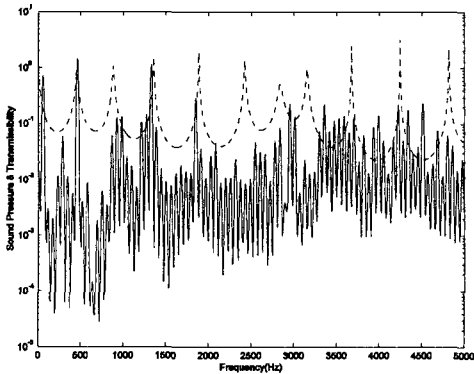


Fig 10. Experimental result(solid lines) and theoretical transmissibility(dashed lines)

Fig 10 에 실험 결과와 이론 해석법에 의한 전달율을 나타내었다. 이 경우 이론 결과와의 정확한 비교를 위해 A-weighting 이 없이 선형 음압 레벨을 나타내었다. 그림에서 보는 것과 같이 소

음기의 전달률이 실험 결과와 전체적인 면에서 경향을 같이 하는 것을 볼 수 있다. 특히 저주파 영역의 경향이 많이 일치하는 것을 볼 수 있다.

위의 전달률 모델은 소음기만 따로 떼서 실험한 것은 아니어서 소음기 입력 단의 실제 입력 값이나, 압축기 구조적인 것에서 기인하는 소음 등을 알 수 없는 등 어느 정도의 한계를 가지고 있지만 전체적인 경향을 보면 실험결과도 이론이나 유한요소에 의한 전달률을 나타내는 것으로 볼 수 있다.

## 4. 결론

본 연구에서는 머플러의 성능을 나타내는 하나의 방법으로써의 전달률에 대해서 다루어 보았다.

전달률은 흔히 쓰이는 음압에 기초한 IL 측정법에 비해 이론적 분석이 용이하고, 또한 필요한 경우 IL로의 전환이 용이하다.

본문에 보인 것 같이 전달률은 이론이나, 유한요소해석에서 상당한 일치를 보였고, 실험에 의한 스펙트럼과의 비교에서도 실험 시 소음기만 따로 떼어서 실험한 것이 아니고 또한 입력 값을 정확히 알 수 없음을 감안할 때 전체적인 경향이 상당히 일치하는 것을 보임을 확인할 수 있었다.

따라서 체적 속도 전달률(volume velocity transmissibility)은 그 편리함과 IL 등 다른 인자들과의 전환의 용이함 때문에 중요성이 확대될 것으로 기대된다.

## 후기

본 연구는 룰택의 연구 지원으로 이루어 졌음을 밝히는 바이며 이에 관계자 여러분께 감사드립니다.

## 참고문헌

(1) 김상명, 2002, "유체기인 방사소음 저감용 소음기 개념설계 이론", 한국 소음진동 공학회 춘계 학술대회 논문집, pp627~632.

(2) S.M.Kim, 2003, "Transmissibility as a new performance of the muffler" , J. Acoustical Society of America, submitted.

(3) L. E. Kinsler, A. R. Frey, 2000, Fundamentals of acoustics 4<sup>th</sup> ed., John Wiley & Sons, Inc., New York.

(4) Simon Y. Wang, 1996, International compressor engineering conference at Purdue, pp. 241~246.

(5) E. Zwicker, H. Fasti, Psycho-acoustics Facts and models 2<sup>nd</sup> updated ed., Springer, Berlin.

(6) 기아 기술센터, 육상교통 소음케어 기술 - 차량 Muffle 용 능동소음제어장치 개발, 환경부