

역주파수 응답함수를 이용한 잔향성이 강한 음장에서의 소음원 규명 및 특성에 대하여

전인열*, 이정권*, 김종혁**

*한국과학기술원 기계공학과 소음 및 진동제어 연구센터

Identification of Vibro-acoustic Sources in the Highly Reverberant Field Using the Inverse Frequency Response Function

In-Youl Jeon*, Jeong-Guon Ih*, Jay H. Kim**

*Center for Noise and Vibration Control, Department of Mechanical Engineering,
Korea Advanced Institute of Science and Technology, Science Town, Taejon 305-701, Korea

**Mechanical, Industrial and Nuclear Engineering Department, University of Cincinnati, USA

1. 서론

최근 자동차, 고속 전철과 같이 밀폐된 공간 내부에서 느끼는 소음의 저감이 중요한 문제로 등장하고 있다. 소음 저감을 위해서는 내부 공간을 둘러싸는 구조 경계면에서의 진동 및 소음원에 대한 연구가 선행되어야 한다. 실험적 음원 규명 방법으로는 남아나 흡음재로 이루어진 차음 패널을 이용하여 패널의 소음 기여도를 추산하는 음원 개폐기법 (Partial Exposure Method)과 단위면적 당 음향 에너지인 음향 인텐시티를 측정하여 음원을 탐색하는 방법이 있다. 음원 개폐기법은 시간이 많이 들고, 저주파수 소음이 투과되며 여러 음원 간의 상호 간섭효과를 무시하기 때문에 정확도가 떨어지는 단점이 있다[1]. 음향 인텐시티 방법은 내부 공간이나 복잡한 형상의 음장에 대해서는 소음원의 위치를 찾는 것이 어렵다[2].

최근에는 근접 음향 홀로그래피 (Nearfield Acoustic Holography; NAH)와 같은 다수의 마이크로폰을 이용하여 소음원을 규명하는 방법이 개발되었다[3-5]. 이 방법은 외부 문제에 대해서는 적용이 쉽지만, 내부 공간의 음향 문제에서는 강한 잔향성의 존재로 인해서 전달 함수의 선형 독립성이 떨어져서 랭크가 부족하게 된다(rank deficiency)[4]. 즉 전달 함수의 조건수가 커져서 결국 음압 측정값의 작은 변화에도 불구하고 재구성된 값에는 큰 오차가 발생하는 문제점이 있다.

본 논문에서는 역주파수 응답함수를 이용하여 내부 음장에서 소음원을 규명하고자 한다[6,7]. 이 방법의 특징은 내부 음장을 형성하는 경계면 상에 위치시킨 가상의 보정 음원(calibration sources)과 음장 내에 배치한 마이크로폰들 사이의 주파수 응답함수를 구성한 다음 실제

음원을 보정 음원들의 선형 조합으로 표현하는 방법이다. 이 방법 역시 내부 음향 문제에 대해서는 잔향장의 형성으로 공명 주파수 근처에서 전달 함수가 특이성을 보이기 때문에, 본 연구에서는 흡음재를 사용하여 잔향을 줄이면서 전달 함수의 특성을 향상시키는 방법을 이용하였다[7]. 그리고 흡음재에 의한 음장의 잔향성 변화를 측정하기 위해서 반향 지수와 같은 음장 척도를 사용하였으며, 역주파수 응답함수 방법의 검증용 위해서 간단한 상자 모델 및 1/2 축소 모형차에 대한 음원 규명 실험을 수행하였다.

2. 역주파수 응답함수 방법의 기본 이론

그림 1과 같이 지정된 위치에서 가진 되는 m 개의 음원 $q(\omega)$ 와 n 개의 마이크로폰에서 측정된 음압 $p(\omega)$ 사이에는 다음과 같은 관계식이 성립한다.

$$\langle p(\omega) \rangle_n = [H(\omega)]_{m \times n} \langle q(\omega) \rangle_m \quad (1)$$

여기서 $H(\omega)$ 는 입력과 출력 사이의 주파수 응답 함수이다. 음원이 i 번째 위치에 존재하는 경우, 마이크로폰 어레이에서 측정된 음압과 주파수 응답함수 사이에는 다음과 같은 관계식이 성립한다.

$$\begin{Bmatrix} p_1 \\ p_2 \\ \vdots \\ p_n \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} H_{11} & H_{12} & \cdots & H_{1m} \\ H_{21} & H_{22} & \cdots & H_{2m} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ H_{n1} & H_{n2} & & H_{nm} \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} q_1=0 \\ q_2=0 \\ \vdots \\ q_i \\ \vdots \\ q_m=0 \end{Bmatrix} \quad (2)$$

위 식을 간략히 표현하면 다음과 같다.

$$\begin{aligned} \{p_1 \ p_2 \ \dots \ p_n\}^T \\ = [H_{1i} \ H_{2i} \ \dots \ H_{ni}]^T \times q_i \end{aligned} \quad (3)$$

즉 음원이 i 번째 위치에 있을 때 측정된 음압을 이용해서 i 번째 주파수 응답함수의 column 벡터를 구할 수 있다. 모든 음원의 위치에 대해서 같은 방법을 적용하면 전체 주파수 응답함수를 구성할 수 있는데 이를 보정 과정 (calibration process)이라고 한다. 여기에서 구해진 주파수 응답함수와 실제 음원에 의해서 측정된 음압을 이용하면 다음과 같이 음원을 예측할 수 있다.

$$\langle \hat{q}(\omega) \rangle = [H(\omega)]^+ \langle \hat{p}(\omega) \rangle \quad (4)$$

여기서 $H(\omega)^+$ 는 $H(\omega)$ 의 pseudo-inverse 이고, $\hat{p}(\omega)$ 는 실제 음원에 대한 음압이며 $\hat{q}(\omega)$ 는 예측된 음원의 크기이다.

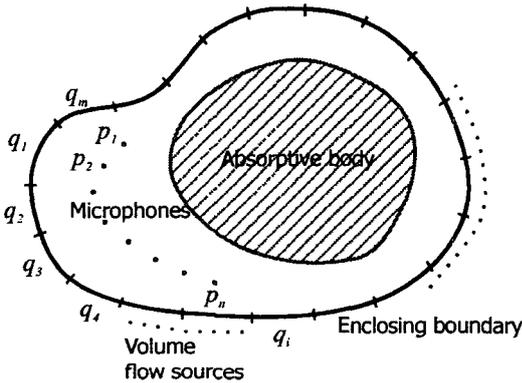


그림 1. 역주파수 응답함수 방법의 개괄 상황도.

3. 음장의 잔향성

일반적으로 자유 음장을 제외한 거의 모든 음장에서 음압 레벨과 인텐시티 레벨 사이에는 차이가 있는데 이를 반향지수(reactivity index) 또는 음압-인텐시티 지수 (pressure-intensity index)라고 하며 정의는 다음과 같다[8]:

$$L_K = L_I - L_p \quad (5)$$

자유 음장에서 평면파 또는 원거리에서 구면파가 진행할 때 인텐시티의 값은 $I = p_{rms}^2 / \rho c$ 로 정의가 되며, 식 (5)에 대입하면 다음과 같다.

$$L_K = -10 \log_{10}(\rho c / 400) = -10 \log_{10} K \quad (6)$$

위 식으로부터 온도 22 도, 압력 1bar 인 자유 음장에서는 음압 레벨과 인텐시티 레벨이 거의 같아서, $L_K \approx 0$ 이 된다.

그러나 일반적인 확산음장(diffuse field)의 경우에는 반향지수 레벨 L_K 가 -12dB 정도 된다. 반향지수 레벨이 자유 음장에 비해서 크게 차이가 나는 경우는, 음압과 입자속도의 위상차가 90 도일때, 음원의 표면에서 근접한 곳, 강한 정재파에 의해서 형성된 잔향장 또는 확산장이 있는 곳 그리고 상관성이 없는 배경 소음의 존재등에 의해서 발생한다.

식 (5)에서 음향인텐시티의 값은 실험적으로 r 방향으로 Δr 만큼 떨어져서 서로 마주보고 있는 2개의 마이크로폰 짝을 이용하며, 2 개의 마이크로폰 사이의 위상 불일치에 의한 오차는 0.5dB 미만의 값이 나왔다. 그림 2 는 자유 음장에서 거리에 따른 반향지수 레벨로써 음원으로부터 거리가 가까울수록 근접장에 의한 효과 때문에 음장이 리액티브해 지는 것을 알 수 있다.

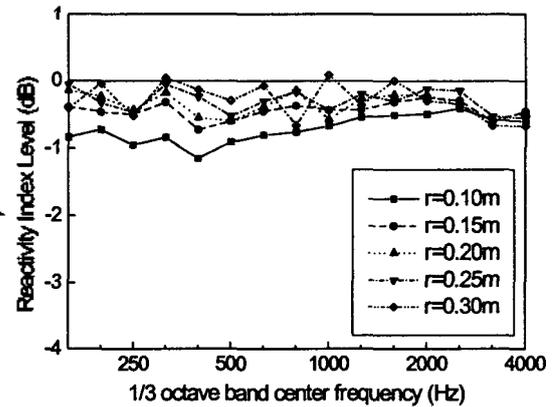


그림 2. 거리에 따른 반향지수 레벨 (자유음장).

4. 소음원 규명

실제 문제에 대한 적용성을 알아 보기 위해, 상자를 이용해 내부 공간을 형성하였으며, 소음원 규명에 이용할 상자 모델은 그림 3 과 같다. 표 1 은 상자 모델 내부 공간의 고유주파수의 이론해, 경계요소법에 의해 예측된 값, 그리고 실험을 통해서 구한 값을 비교한 것이다. 그림 4 는 내부 공간에 흡음재 존재 유무에 따른 반향지수 레벨을 비교한 것으로써 흡음이 존재하지 않은 경우에 비해서 흡음이 존재할 경우 반향지수 레벨 값은 0 으로 접근한다는 것을 알 수 있다.

그림 5 는 역주파수 응답함수 구성을 위한 3 개의 보정 음원($m=3$) 위치와 마이크로폰($n=18$)의 위치를 나타낸다. 실제 음원이 1 번 보정 음원의 위치에 있을 때 측정된 음압을 이용하여 구한 음원의 기여도는 그림 6 과 같다. 여기서 내부공간에 흡음재가 없는 경우에는 고유주파수 근처에서 음원 규명이 어렵다는 것을 알 수 있다.

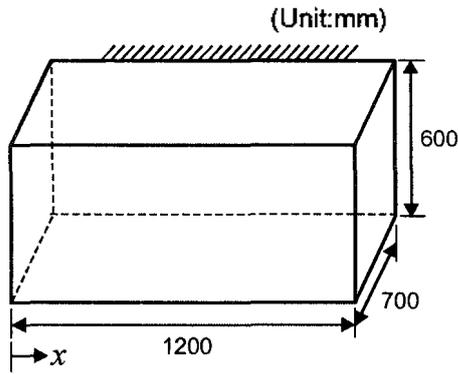


그림 3. 실험에 쓰인 간단한 상자 모델.

Mode	Analytic	BEM	Experimental
1	142.9	143	154
2	245.0	245	251
3	283.6	285	290
4	285.8	290	294

표 1. 상자 모델 내부 공간의 고유 주파수 (Hz) 비교.

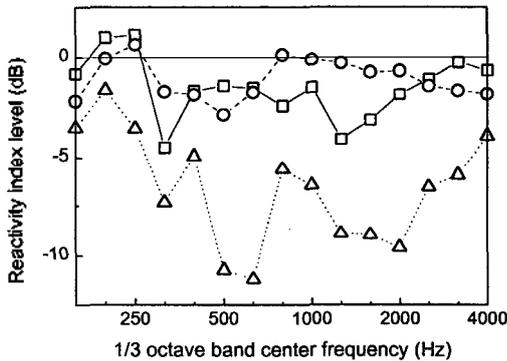


그림 4. 상자 모델에서 측정된 반향지수 레벨: -□-, 50% 흡음; -○-, 70% 흡음; -△-, 흡음 무

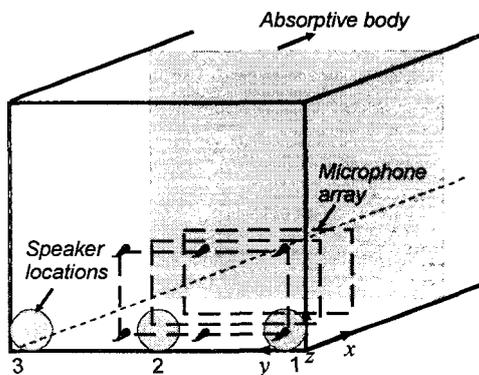


그림 5. 음원과 마이크론의 위치.

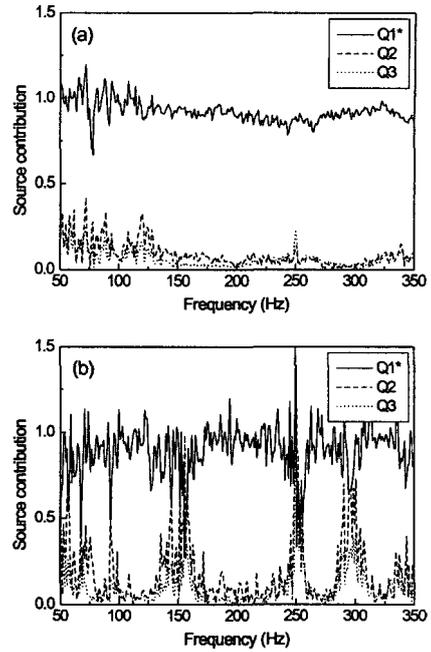


그림 6. 상자 모델에서의 음원 규명 결과. (a) 흡음재 유, (b) 흡음재 무.

그림 7은 두께 3mm의 강철판으로 구성된 1/2 축소 모형차이며, 표 2는 경계요소법 및 실험으로 구한 고유 주파수이다. 먼저 잔향성을 줄이기 위해서 차실 내 경계면에 25mm의 폴리우레탄 폼을 설치하고 트렁크 부위에는 흡음재를 채워 넣었다. 그림 8은 흡음재 유무에 따라 측정된 반향지수 레벨을 비교한 것으로 흡음재가 존재할 때 잔향성이 많이 감소함을 알 수 있다.

본 모형차에 대해서는 상관성을 가지는 2개의 음원에 대한 실험을 하였는데 2개의 음원에 대해서 측정된 음압을 이용하여 예측한 음원은 다음과 같이 표현할 수 있다.

$$\begin{aligned} \langle \tilde{p}(\omega) \rangle &= \langle \tilde{p}_1(\omega) + \tilde{p}_2(\omega) \rangle = [H(\omega)] \langle q_1(\omega) + q_2(\omega) \rangle \\ \langle \hat{q}(\omega) \rangle &= [H(\omega)]^* \langle \tilde{p}_1(\omega) + \tilde{p}_2(\omega) \rangle \end{aligned} \quad (8)$$

흡음 조건하에 음원을 위치 1과 2에서 동위상 또는 역위상으로 동시 가진 하였을 때 측정된 음압을 이용하여 예측된 음원의 크기 및 위상은 그림 9와 같으며, 음원 예측이 정확히 이루어지고 있음을 알 수 있다.

Mode	BEM	Experimental
1	174	178
2	252	253
3	295	299
4	307	312

표 2. 1/2 축소 모형차 내부 공간의 고유 주파수 (Hz).

5. 결론

역주파수 응답함수 방법을 이용하는 음원 탐색 기법은 내부 음장의 공명 주파수 부근에서는 전달 함수의 특이성으로 인하여 악조건 문제가 되기 때문에 정확한 음원 규명이 어렵지만, 내부 공간에 흡음재를 설치하여 잔향성을 낮추는 동시에 특이성을 제거함으로써 음원 탐색을 정확히 수행할 수 있었다. 또한 2 개의 상관성이 있는 음원에 대해서 크기 및 위상에 대한 정보를 얻을 수 있었으며 자동차와 같이 복잡한 형상을 갖는 구조에 대해서도 쉽게 적용이 가능함을 확인 하였다.

참고 문헌

- [1] M. J. Crocker, "Surface intensity, acoustic intensity and selective wrapping measurements for evaluations of diesel engine noise," *Proc. Inter-noise Conference 1982, San Francisco*, pp.103-107.
- [2] 이정권, 강승천, "복잡한 형상의 구조 소음원에 의한 음장에서 음향 인텐시티 기법에 의한 음원 탐색의 문제점에 관하여," 한국음향학회 학술발표대회, Nov. 1997, pp.25-36.
- [3] J. D. Maynard, E. G. Williams and Y. Lee, "Nearfield acoustic holography: I. Theory of generalized holography and the development of NAH," *J. Acoust. Soc. Am.*, Vol. 78, pp.1395-1414, 1985.
- [4] B.-K. Kim and J.-G. Ih, "On the reconstruction of the vibro-acoustic field over the surface enclosing an interior space using the boundary element method," *J. Acoust. Soc. Am.*, Vol. 100, pp.3003-3016, 1996.
- [5] H.-S. Kwon and Y.-H. Kim, "Moving frame technique for planar acoustic holograph," *J. Acoust. Soc. Am.*, Vol. 103, pp. 1734-1741, 1998.
- [6] D. B. Crafton, J. Ding and J. H. Kim, "Noise source identification in highly reverberant enclosures by the IFRF method," *Proc. International Modal Analysis Conference 1997, Orlando*, pp.1686-1691.
- [7] S. Dumbacher and D. Brown, "Practical considerations of the IFRF technique as applied to noise path analysis and acoustic imaging," *Proc. International Modal Analysis Conference 1997, Orlando*, pp.1677-1685.
- [8] F. Jacobsen, "Sound field indicators: Useful tools," *Noise Control Eng. J.*, Vol. 35, pp.37-46, 1990.
- [9] L. E. Kinsler, A. R. Frey, A. B. Coppens and J. V. Sanders, *Fundamentals of Acoustics*. 3rd ed.(John Wiley & Sons, New York, 1982), pp.214-216.

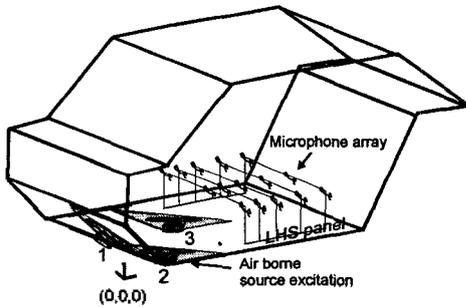


그림 7. 1/2 옥소 모형차에서의 실험.

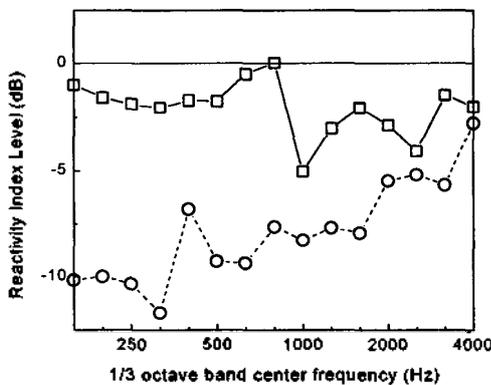


그림 8. 1/2 옥소 모형차에서 측정된 반향 지수 레벨: □, 흡음 유; ○, 흡음 무

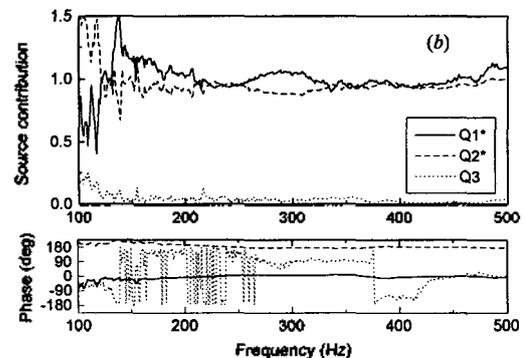
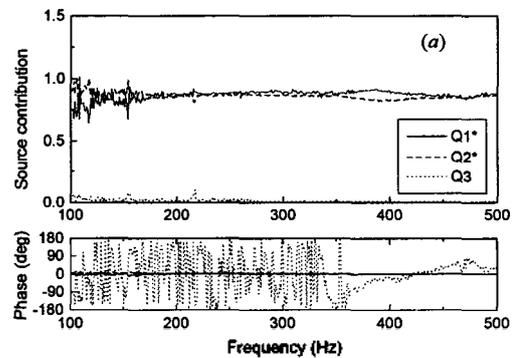


그림 9. 1/2 옥소 모형차에서의 음원 규명 결과: (a) 2 개의 음원(동위상), (b) 2 개의 음원(역위상).