

동심관형 공명기의 천공 분포 및 연장관이 전달 손실에 미치는 특성 해석

Effect of Non-uniform Perforation and Extended Inlet/outlet Length in the Concentric Resonator on the Transmission Loss

이 성 현* · 이 정 권**
Seong-Hyun Lee and Jeong-Guon Ih

Key Words: Concentric Resonator (동심관형 공명기), Transmission Loss (전달 손실), Perforated Element (천공 요소)

ABSTRACT

In the reactive concentric resonator, perforated inner tubes are widely used for various purposes related to noise reduction, flow guiding, and structural aspects. Perforation distribution patterns influence both the acoustic performance and mechanical performance. In this study, the influence of distribution patterns on acoustic performance are explained by adopting the concept of extended inlet/outlet length. Predicted transmission with varying extended inlet/outlet length is compared with prediction by varying distribution patterns. The transmission loss difference due to perforation distribution patterns can be explained by changing the extended inlet/outlet length of the uniformly perforated resonator.

1. 서론

소음기는 자동차 및 유체기계의 흡/배기계에서 소음을 저감시키기 위하여 사용되며, 크게 반사형 소음기 (reactive silencer)와 흡음형 소음기 (dissipative silencer)로 나눌 수 있으며, 반사형 소음기는 면적의 변화 등에 의하여 발생하는 임피던스 부정합 (impedance mismatch)을 이용하여 소음을 저감시키며, 흡음형 소음기는 흡음재 등을 이용하여 음향 에너지를 열 에너지 등으로 변화시킴으로써 소음을 저감시키게 된다. 소음기의 중요 설계 변수로는 전달 손실, 배압, 크기, 단가 등이 있다 [1]. 소음기 설계에 있어서 가장 중요한 두 가지의 목표는 소음 저감량 (noise reduction)을 요구량보다 크게, 배압을 허용량 보다 작게 하는 것이며, 이 두 가지는 서로 상충된다. 이는 반사형 소음기의 소음 저감 원리인 입사 음파를 소음원으로 반사시키는 임피던스 부정합은 일반적으로 높은 배압을 동반하기 때문이다.

소음기는 일반적으로 소음과 유동을 동시에 접하게 되며, 소음 저감 및 구조적 보강을 위하여 천공관이 사용되고 있다. 천공관이 사용되는 가장 단순하며 기본적인 소음기 요소는 동심관형 공명기이다. 공명기의 내부 관의 천공율 (porosity)이 16~20% 보다 큰 경우에는 음향학적으로 단순

확장 소음기 (simple expansion chamber)와 같은 성능을 보이며, 구조적인 강성을 높여주는 효과를 갖게 된다. 또한 천공율이 약 16% 보다 작은 경우에는 천공율을 제어함으로써 특정 대역 주파수 혹은 광대역 주파수에서의 소음 감소 효과를 나타내게 된다.

일반적으로, 소음기 내부에서 천공 요소들은 균일하게 분포되지만, 천공 요소들의 분포 양상 (distribution pattern)에 의하여 소음기의 기계적, 음향학적 성능은 결정된다 [2]. Shenoda [3]는 디젤 엔진의 배기계에 설치된 소음기의 성능 측정 시험을 통하여 좋은 성능을 갖는 두 가지의 천공 분포 양상을 제안하였다. 그는 천공율을 서서히 증가시켰다가 감소시키면, 즉 양 끝부분에서는 최저 값의 천공율을, 중간 지점에서는 최고 값의 천공율을 갖게 하면, 좋은 성능을 갖는다는 것을 보였다. 하지만, 그에 대한 구체적인 이유나 다른 양상과의 비교가 없어서 물리적인 해석이 부족하였다. 이성현 등 [4,5]은 다섯 가지의 서로 다른 천공 분포 양상이 음향학적, 기계적 성능에 미치는 영향을 실험적, 계산적인 방법으로 보인 바 있다. 천공율이 서서히 증가했다가 감소하는 양상 다른 양상들에 비하여 좋은 성능을 갖는 것을 보였다. 본 연구에서는 음향학적 성능인 전달손실에서 분포 양상에 따라서 차이가 발생하는 이유를 입구/출구의 연장관의 길이 변화를 이용하여 설명하고자 한다.

* 한국과학기술원 기계공학과 박사과정

E-mail : irony00@kaist.ac.kr

Tel : (042) 869-3075, Fax : (042) 869-8220

** 한국과학기술원 기계공학과 교수

2. 동심관형 공명기의 성능

소음기의 성능은 기계적 특성과 음향학적 특성으로 나눌 수 있다. 기계적 성능으로는 배압(back pressure)이 있으며, 소음기 요소를 통과하면서 발생하는 정체 압력(stagnation pressure)의 차이를 의미한다. 음향학적 성능으로는 소음기 자체의 음향 성능만을 나타내는 전달 손실(transmission loss), 소음기 및 소음원(noise source) 그리고 미관에서의 방사 특성을 모두 포함하는 삽입 손실(insertion loss) 등이 있다. 본 연구에서 다루게 될 전달손실은 동심관형 공명기의 내부 관에서와 외부의 공동에서의 연성된 2 차 미분 방정식(coupled second-order ordinary differential equation)을 천공 요소에서의 음향 임피던스 모델 [6]을 이용하여 decoupling 해석을 수행하여 예측하였다 [7-10].

2.1 비 균일 천공 분포의 영향

본 연구에서는 이성현 등 [4,5]이 제안했던 다섯 가지 천공 분포 양상의 전달 손실 예측 및 측정 값을 이용하여 물리적 해석을 수행하고자 한다. 해석에 사용된 동심관형 공명기의 기하학적 형상은 그림 1에 나타나 있으며, 천공 분포 양상은 표 1에 나타나 있다. 동심관형 공명기의 연장관(extended pipe)의 길이는 입구, 출구 모두 10mm이다. 그림 2, 3은 천공 분포 양상에 따른 전달 손실 예측 및 측정 결과를 보이고 있다. 천공의 분포 양상에 따라서 전달손실의 세 번째 lobe에서 차이가 나타나고 있으며, pattern 4의 전달손실이 가장 크게, pattern 5가 가장 작게 예측, 측정됨을 보이고 있다. 각 분포 양상에 따라서 peak 주파수가 이동하며, 크기가 변한다. Pattern 2, 3, 4의 경우에는 pattern 1보다 peak 주파수가 저주파로 이동하였으며, pattern 5의 경우에는 고주파로 이동하였다. 이러한 양상은 연장관을 가지는 확장 소음기(expansion chamber with extended inlet/outlet)에서 주로 나타나는 현상이며, peak 주파수는 다음과 같이 정의되어,

$$f_{peak} = \frac{c_0}{\lambda} = \frac{c_0}{4L_{extended}}, \quad (1)$$

연장관의 길이가 길어질수록 저주파로, 짧아질수록 고주파로 이동하게 된다. 여기서 f_{peak} 는 peak 주파수, c_0 는 음속(speed of sound), λ 는 파장, $L_{extended}$ 는 연장관의 길이를 의미한다. 하지만 동심관형 공명기의 전달손실에서의 peak 주파수가 확장 소음기의 경우에 비하여 매우 작게 나타나고

있다. 이를 설명하기 위하여, 천공이 균일하게 분포되어있는 동심관형 공명기의 천공율을 변화시키면서 전달손실을 예측하였으며, 그림 4는 이를 나타내고 있다. 천공율 100%는 확장 소음기의 경우를 의미한다. 천공율이 감소함에 따라서 연장관의 길이에 따른 peak 주파수가 감소함을 알 수 있다. 이를 이용하여 천공 분포 양상에 의하여 발생하는 전달 손실의 차이를 연장관의 길이 변화로 설명하고자 한다.

2.2 연장관의 길이 변화에 의한 영향

동심관형 공명기 내부의 연장관의 길이가 전달 손실에 미치는 영향을 살펴보기 위하여, 천공이 균일하게 분포되어 있는 ($\sigma=10\%$) 동심관형 공명기의 연장관의 길이를 0에서 0.02까지 증가시키며 예측한 결과를 그림 5에 보이고 있다. 입구와 출구의 연장관의 길이는 같다고 가정하였다. 연장관의 길이가 0인 경우에는 특별히 증가하는 주파수 대역이 없으며, $L_{extended}$ 가 0.01인 경우(pattern 1과 같은 경우)를 기준으로 연장관이 길어지면 peak 주파수가 저주파로, 연장관이 짧아지면 고주파로 이동함을 알 수 있다. 이로부터 천공 분포 양상에서 pattern 4, 5가 보이던 양상은 연장관의 길이 변화에 의한 것으로 설명 가능함을 알 수 있다. 즉, 천공율이 평균값보다 작은 경우는 연장관이 길어지는 효과를, 천공율이 평균값보다 큰 경우는 연장관이 짧아지는 효과를 보임을 알 수 있다. 이를 이용하면 pattern 2, 3의 양상도 입구와 출구의 연장관의 길이를 다르게 고려하여 나타낼 수 있다. 그림 6은 연장관의 길이 변화가 전달 손실에 미치는 영향을 보이고 있다. 여기서, L_1 은 입구 연장관의 길이, L_2 는 출구 연장관의 길이를 의미한다. 입구, 출구 연장관의 길이를 변화시킴으로써 천공 분포 양상에 의한 전달 손실 변화와 같은 결과를 얻을 수 있다. 천공 분포 양상에 의하여 음향학적 성능이 변하는 것은 연장관의 길이 변화에 의하여 나타나는 것임을 알 수 있다.

3. 결론

천공요소의 분포 양상에 의하여 소음기의 음향학적, 기계적 성능이 변하게 되며, 천공율이 서서히 증가했다가 감소하는 경우에 좋은 성능을 갖는다고 알려져 있다. 본 연구에서는 이러한 천공 분포 양상이 음향학적 성능에 미치는 영향을 입구와 출구에서의 연장관의 길이 변화로 설명하였다. 기계적인 성능의 관점에서는 천공 요소의 분포가 서

서히 변하는 것이 좋지만, 음향학적 관점에서는 균일하게 분포된 천공판에서 연장관의 길이를 바꿈으로써 같은 효과를 얻을 수 있음을 알 수 있다.

후 기

본 연구는 BK21 Project 의 일부 지원을 받았습니 다. 본 연구의 초기 단계에서 기여를 한 Mr. Antoine Delaigue 에게 감사 를 전합니다.

참고문헌

- (1) L. L. Beranek and I. L. Ver, 1992, *Noise and Vibration Control Engineering*, John Wiley & Sons, Inc., New York.
- (2) D. Davis, G. Stokes, D. Moore, and G. Stevens, 1954, *Theoretical and Experimental Investigation of Mufflers with Comments on Engine Exhaust Design*, NACA Report 1192.
- (3) F. B. Shenoda, 1982, "A new silencer with good matching performance for air ducts and exhaust systems", *Acustica* **50** 338-341.
- (4) 이성현 등, 2002, "동심관형 공명기 내부의 천공 요소의 불규칙한 배열이 전달손실 및 배압에 미치는 특성 연구", *춘계학술발표 논문집, 한국소음진동공학회*, pp. 515-519.
- (5) S.-H. Lee and J.-G. Ih, 2003, "Effect of non-uniform perforation in the concentric resonator on the transmission loss and back pressure", *Proceedings of Internoise 2003*.
- (6) S.-H. Lee and J.-G. Ih, 2003, "Empirical model of the acoustic impedance of a circular orifice in grazing mean flow", *Journal of the Acoustic Society of America* **114** 98-113.
- (7) K. Jayaraman and K. Yam, 1981, "Decoupling approach to modeling perforated tube muffler components", *Journal of the Acoustic Society of America* **69** 390-396.
- (8) M. L. Munjal, K. N. Rao, and A. D. Sahasrabudhe, 1987, "Aeroacoustic analysis of perforated muffler components", *Journal of Sound and Vibration* **114** 173-188.
- (9) K. S. Peat, 1988, "A numerical decoupling analysis of perforated pipe silencer elements", *Journal of Sound and Vibration* **123** 199-212.
- (10) P. T. Thawani and K. Jayaraman, 1983, "Modeling and applications of straight-through resonators", *Journal of the Acoustic Society of America* **73** 1387-1389.

표 1. 동심관형 공명기 내부의 천공 분포 양상

Pattern No.	Porosity (%)
- 1	10.3 (uniform)
2	5.7-14.9 (monotonic increase)
3	14.9-5.7 (monotonic decrease)
4	5.7-14.9-5.7 (increase-decrease)
5	14.9-5.7-14.9 (decrease-increase)

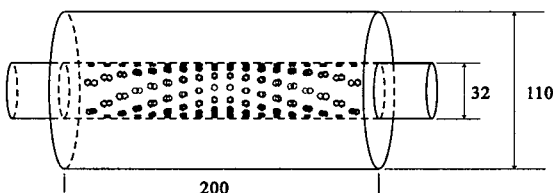


그림 1. 해석에 사용된 동심관형 공명기

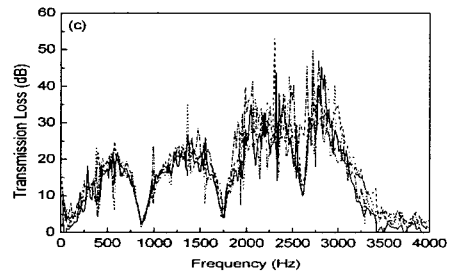
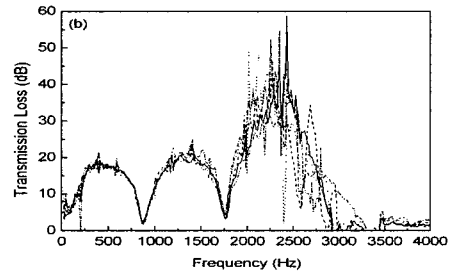
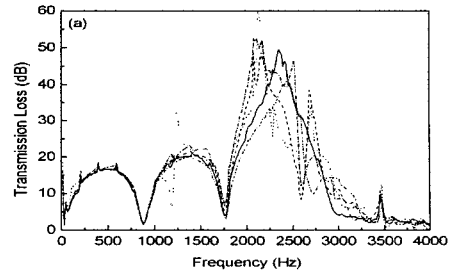
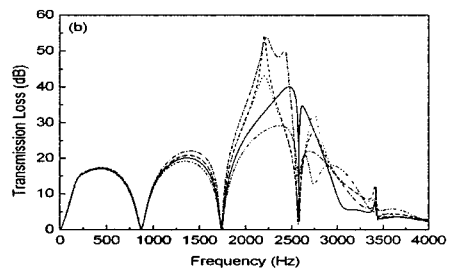
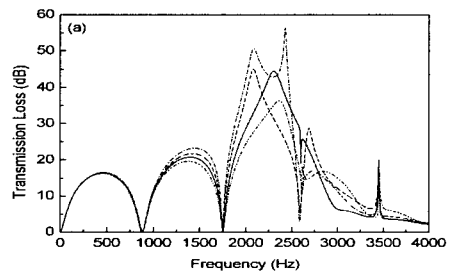


그림 2. 천공 분포 양상에 따른 전달손실 측정값: —, pattern 1; — —, pattern 2; - · - · - ·, pattern 3; - - - -, pattern 4; - · - · - ·, pattern 5. (a) $M=0.0$; (b) $M=0.085$; (c) $M=0.17$.



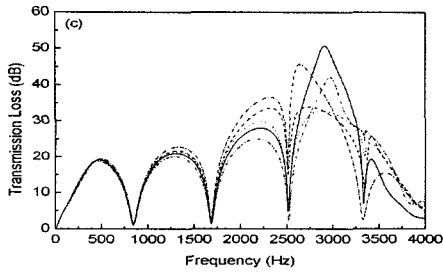


그림 3. 천공 분포 양상에 따른 전달손실 예측값: **—**, pattern 1; **— —**, pattern 2; **- - - -**, pattern 3; **- - - -**, pattern 4; **- - - -**, pattern 5. (a) $M=0.0$; (b) $M=0.085$; (c) $M=0.17$.

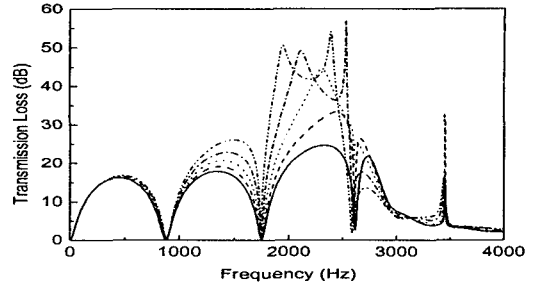


그림 5. 연장관의 길이 변화가 전달손실에 미치는 영향 ($\sigma=0.1$, $M=0$): **—**, $L_{extended} = 0$; **— —**, $L_{extended} = 0.005$; **- - - -**, $L_{extended} = 0.01$; **- - - -**, $L_{extended} = 0.015$; **- - - -**, $L_{extended} = 0.02$.

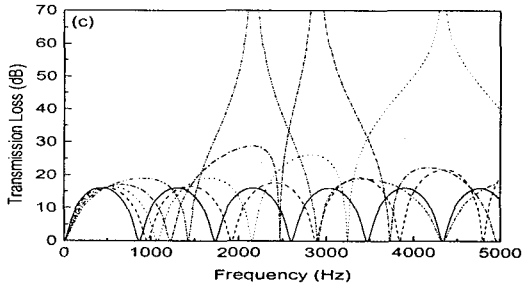
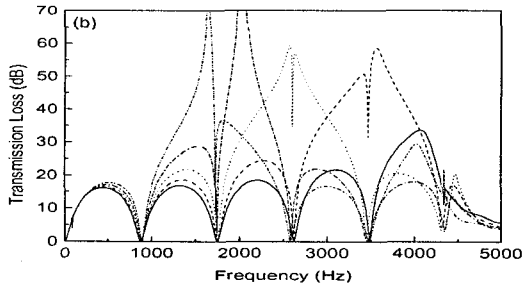
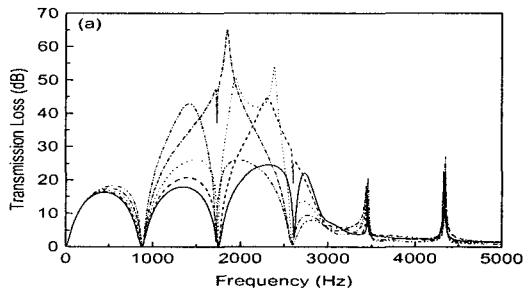


그림 4. 천공율의 변화에 따른 동심관형 공경기의 전달손실 예측값 ($M=0$): **—**, pattern 1; **— —**, pattern 2; **- - - -**, pattern 3; **- - - -**, pattern 4; **- - - -**, pattern 5. (a) $\sigma=0.1$; (b) $\sigma=0.25$; (c) $\sigma=1$.

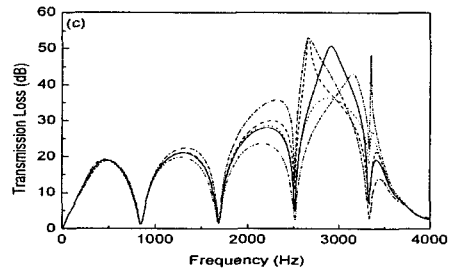
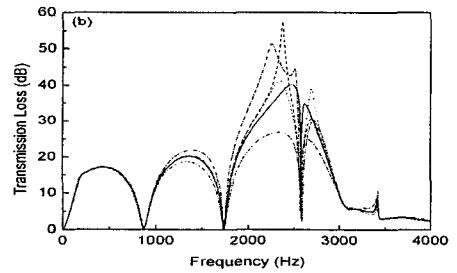
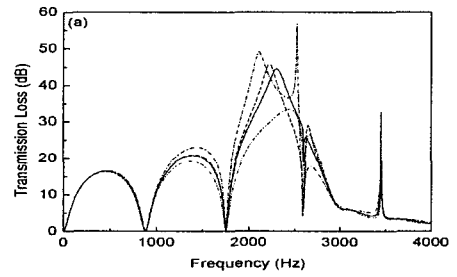


그림 6. 입구와 출구의 연장관의 길이 변화에 따른 전달손실 예측값: **—**, $L_1 = L_2 = 0.01$; **— —**, $L_1 = 0.015$; $L_2 = 0.005$; **- - - -**, $L_1 = 0.005$; $L_2 = 0.015$; **- - - -**, $L_1 = L_2 = 0.015$; **- - - -**, $L_1 = L_2 = 0.005$. (a) $M=0$, (b) $M=0.085$, (c) $M=0.17$.