

동심관형 공명기 내부의 천공 요소의 불규칙한 배열이 전달손실 및 배압에 미치는 특성 연구

Effect of nonuniform perforation in the concentric resonator on the transmission loss and back pressure

이 성 현*·Antoine Delaigue**·이 정 권***

Seong-Hyun Lee, Antoine Delaigue and Jeong-Guon Ih

Key Words: muffler (소음기), perforates (천공요소), impedance (임피던스), mean flow (평균 유동), transmission loss (전달손실), back pressure (배압)

ABSTRACT

자동차 및 유체기계의 흡기계나 배기계에 사용되는 소음기의 음향성능은 전달손실로 기계성능은 배압으로 표현된다. 유체가 흐르는 관 사이의 임피던스 부정합을 이용하는 반사형 소음기의 경우, 내부 유로에 천공을 주어 음향 감쇠를 시키거나 유동을 안정시키는 경우가 많다. 본 연구에서는 동심관형 공명기의 내부 관에 존재하는 천공의 분포 양상이 소음기의 전달손실과 배압에 미치는 영향을 실험을 통하여 고찰하였다. 내부관의 평균 천공율은 일정하지만 길이 방향을 따라서 천공율이 변하는 다섯가지의 공명기에 대한 실험을 수행하고, 성능에 미치는 영향을 살펴 보았다. 전달손실은 천공요소의 임피던스 모델을 고려하여 예측한 결과와 비교하였고, 측정된 배압은 모의 해석 결과와 비교하였다. 분석 결과, 천공율이 점점 작아지는 분포나, 작았다가 커진후 다시 작아지는 형태의 분포를 가질 경우, 배압 측면에서 매우 유리하고, 음향 전달손실도 큰 차이가 없음을 밝혔다.

1. 서 론

소음기는 내연기관, 압축기 등과 같은 음원에 의하여 발생하는 소음을 줄이기 위하여 사용된다. 이러한 소음기의 내부에는 일반적으로 천공관이 사용된다. 대부분 유동을 접하게 되고, 천공요소에 의하여 연결된 바깥쪽의 공동과의 음향학적인 연결 (coupling)을 통하여, 배압과 소음기 내부에서 유체에 의하여 발생하는 소음을 감소시키게 된다. 소음기의 내부에는 유동에 대한 저항 특성이 상대적으로 작은 음향학적 공명기가 널리 사용되고 있으며, 고전적인 헬름홀츠 (Helmholtz) 공명기 이론이 발표된 이후로 많은 공명기들에 대한 연구가 이루어져 왔다.

A. Delaigue 등 [1]은 동심관형 공명기 (concentric tube resonator)의 내부 관의 천공요소의 분포 양상에 따라서 공명기의 전달손실이 어떠한 영향을 받는지를 보인바 있다. 본 연구에서는 분포 양상 배압 (back pressure)에 미치는 영향을 고려하고, 이를 전달손실에 미치는 영향과 함께 분석하였다. 평균 천공율 (porosity)은 같지만, 공명기

의 길이방향을 따라서 천공요소의 분포양상이 변하는 5 가지의 공명기에 대하여 전달손실 및 배압을 측정하였다. 전달손실은 천공 요소의 임피던스 모델을 고려하여 예측한 값과 상용 해석 프로그램인 FLUENT 의 모의실험 결과로부터 얻은 배압 값을 측정값과 비교하였다. 이러한 결과들을 바탕으로 천공요소의 분포양상의 공명기의 성능에 미치는 영향을 고찰하고자 한다.

2. 동심관형 공명기의 성능

2.1 공명기의 성능 측정

동심관형 공명기 내부 관의 천공율 변화가 성능에 미치는 영향을 고려하고자 다섯 가지의 내부 천공관을 제작하여 전달손실 및 배압을 측정하였다. 내부 관의 천공요소의 분포 양상은 표 1 에서 보인 바와 같다. 실험에 사용된 공명기의 기하학적 형상은 그림 1 과 같고, 내부 관의 천공요소의 지름은 4 mm, 두께는 2 mm 이다.

(1) 전달손실 측정

유동은 압축기를 사용하여 마하 (Mach) 수 0 에서 0.17 까지 공급하였고, 평균 유속은 피토폴 (Pitot tube)과 미소 압력계로 측정하였다. 공명기

* 한국과학기술원 기계공학과 박사과정
E-mail : irony@kaist.ac.kr
Tel : (042) 869-3075, Fax : (042) 869-8220

** 현대자동차

*** 한국과학기술원 기계공학과 교수

하단의 주관의 끝부분에는 반사파에 의한 특정 주파수에서의 신호 왜곡을 방지하기 위하여 무반사 종단 (anechoic termination)을 설치하였다. 음장을 공급하기 위한 스피커는 공명기로부터 0.8m 떨어진 지점에 설치하고, 광대역 가진을 하였다. 공명기의 상단과 하단에서 1/4" 마이크로폰들로부터 각각의 반사계수를 측정하고, 상단과 하단의 마이크로폰 간의 주파수 응답함수를 측정하여 전달손실을 측정하였다. [2,3] 상단과 하단에서 반사계수를 구하는 과정에서 오차의 영향을 줄이기 위하여 각각 3 개의 마이크로폰을 사용하는 다음의 방식을 사용하였다 [4]:

$$TL = 20 \log_{10} \left| \frac{1+R_d}{1+R_u} \right| - 20 \log_{10} |H_{14}|. \quad (1)$$

여기서, R_d , R_u , H_{14} 는 각각 하단에서의 반사계수, 상단에서의 반사계수, 기준 마이크로폰 간의 주파수 응답함수를 의미한다.

실험에서 유속이 증가함에 따라 유동에 의한 소음이 발생하여 전달손실을 예측하는 데 있어서 고려하지 않은 영향들이 부가되게 된다. 이를 방지하기 위하여 유동을 공급하는 상단 부분에 기준 마이크로폰을 설치하여 보정하여 주었다. 기준 마이크로폰은 다음과 같은 관계를 만족하도록 설치하였다 [5]:

$$ks > 2\pi M. \quad (2)$$

여기서, k 는 파수, s 는 기준 마이크로폰과 가장 가까운 마이크로폰 간의 간격, M 은 주관 내부의 마하 수이다. 기준 마이크로폰과 측정하고자 하는 마이크로폰간의 상호 상관도를 측정하고 이로부터 각 마이크로폰 간의 주파수 응답함수를 얻게 된다. 이 방법을 통하여 전달손실을 측정하면, 유동에 의하여 발생하는 소음들이 제거되기 때문에 천공요소와 공명기만에 의한 전달손실을 얻는다.

(2) 배압 측정

유동은 역시 압축기를 사용하여 공급하였고, 평균 유속은 피토 관과 미소 압력계를 사용하여 측정 하였다. 공명기의 상단에 압력 단 (pressure tap)을 만들고 미소 압력계를 이용하여 상단에서의 정압 (static pressure)을 측정하게 된다. 일반적으로 배압은 소음기의 상단과 하단간의 정체압 (stagnation pressure)의 차이를 의미하지만 [6], 본 연구에서는 상단과 하단에서의 유속이 같다고 가정하고 정압의 차이를 측정하여 배압이라 하였다. 정압은 측정 환경에 매우 민감하므로, 유속 측정

및 실험 장치 연결 상태 등에 주의를 기울여야 한다.

2.2 공명기의 성능 예측

(1) 임피던스 모델을 이용한 전달손실 예측

이성현, 이정권 [7]이 제안한 임피던스 모델을 이용하여 얻은 내부 관의 천공요소의 임피던스 값과 내부 관에서와 외부의 공동에서의 음파의 전파에 관련된 연성된 2 차 미분 방정식을 풀어서 전달손실을 예측하였다. [8-11]

(2) 상용 코드에 의한 배압 예측

유동 장을 예측하는데 널리 사용되는 상용 프로그램인 FLUENT 를 사용하여 공명기 내부의 천공요소의 분포양상이 배압에 미치는 영향을 예측 하였다. 해석을 수행함에 있어서, 각 수식들이 연관이 없다고 가정하였고, implicit 수식을 사용하였으며, 시간에 대하여 정상 상태로 가정하였고, 절대 속도 표현을 이용하였다. 난류의 효과는 $k-\epsilon$ 모델을 이용하여 모델링 하였다.

3. 측정 결과 및 분석

3.1 전달 손실

제작된 다섯 가지의 공명기에 대하여 각각의 마하 수에서 측정된 전달손실은 그림 2.4 와 같다.

②, ③의 전달손실을 ①의 전달손실과 비교하여 보면, 세번째 로브 (lobe)가 2600 Hz 부근에서 나뉘고 있는데, 마하 수가 증가함에 따라서 이러한 경향이 작아진다. ②, ③의 전달손실을 비교하여 보면, 유동이 없는 경우에는 같은 값을 갖지만 마하 수가 증가함에 따라 세번째 로브에서 2600 Hz 를 중심으로 앞부분에서는 ③이 더 높은 값을, 뒷부분에서는 ②가 더 높은 결과를 보이고 있다.

①, ④, ⑤의 전달손실을 살펴보면, 세번째 로브에서의 크기 차이가 나타나는데, ④의 경우가 가장 큰 값을 갖고, ①, ⑤의 순서로 작은 값을 보인다. 최대값을 갖는 주파수가 ④의 경우는 ①의 경우에 비하여 작아지고 ⑤의 경우는 커지는데, 유동이 증가함에 따라 이러한 경향은 약해진다.

그림 5 는 마하 수의 변화를 고려하여, 임피던스 모델로 예측한 각각의 공명기의 전달손실을 나

타내고 있다. 측정된 전달손실과 유사한 결과를 보이며, 2600 Hz 부근의 함몰은 모든 경우에 나타나는 것으로 봐서, 공명기의 기하학적 형상에 의한 것임을 알 수 있다.

3.2 배압

표 2 는 각각의 내부 관을 사용하여 세 번에 걸쳐서 측정된 배압 결과를 나타낸다. ⑤가 실험의 횟수와 유속에 관계없이 가장 큰 배압을 갖는 것을 알 수 있다. ①, ②에는 유사한 크기의 배압이 걸리고, ③, ④는 그에 비하여 작은 값을 갖고 유속이 0.085 인 경우에는 ③의 배압이 더 크고, 유속이 0.17 일 때는 ④의 배압이 더 크게 측정되었다.

FLUENT 로 모의 실험하여 예측한 배압 값을 표 3 에 나타내었다. 측정값과 마찬가지로 ⑤의 배압이 가장 큰 값을 갖고, ①, ②에는 비슷한 배압이 걸리게 되고, ③, ④는 그에 비하여 작은 값을 갖고, ③의 배압이 크지만, 유속이 증가함에 따라 ④의 배압이 더 큰 값을 갖게되는 경향을 보인다.

4. 결 론

본 연구에서는 동심관형 공명기의 내부 관에 존재하는 천공 요소의 분포 양상이 성능에 미치는 영향을 실험과 모의 실험을 통하여 살펴보았다. 천공율이 일정한 것을 비롯하여 다섯 가지의 공명기에 대하여 전달손실 및 배압이 변하는 양상을 보였다. 일반적으로 전달손실과 배압 사이에는 이윤 배반성 (trade off)의 관계가 있어서 전달손실을 증가시키기 위해서는 배압의 증가를 감수해야 한다. 천공 요소의 분포양상이 일정한 관 (①), 증가하는 관 (②), 그리고 감소하는 관 (③)을 비교하여 보면, ②, ③의 전달손실은 ①의 전달손실에서 나타나는 세 번째 로브가 2600 Hz 에서 발생하는 최저 점을 기준으로 두 부분으로 나뉘는 것을 볼 수 있다. 배압은 ①, ②에 비하여 ③이 작은 값을 갖는다. 따라서 전달손실 간에 큰 차이가 존재하지 않는다면 배압이 상대적으로 작은 ③의 설치가 바람직하다. 분포가 일정한 관 (①), 증가 후 감소하는 관 (④), 그리고 감소 후 증가하는 관 (⑤)을 보면, ④, ①, ⑤ 순으로 전달손실의 크기가 나타나고, 배압도 이와 같은 순서로 크기가 작아진다. 이로부터 배압의 증가를 감수하더라도 ④를 사용하면 높은 전달손실을 얻을 수 있다는 결론을 얻

을 수 있다. 소음기 내부에서 널리 사용되고 있는 천공요소는 보통 그 분포가 일정하지만, 앞에서 보인 바와 같이 분포양상을 변화시킴으로써 전달손실 및 배압을 향상 시킬 수 있다.

후 기

본 연구는 BK21 Project 및 NRL 의 일부 지원을 받았습니니다.

참고문헌

- (1) A. Delaigu, J.-G. Ih and J. L. Guyader, "Analysis of non-uniformly perforated muffler in concentric resonator type," 한국음향학회 추계학술대회지 (2001).
- (2) J. Y. Chung and D. A. Blaser, "Transfer function method of measuring in-duct acoustic properties. I. Theory," J. Acoust. Soc. Am. **68**, 907-913 (1980).
- (3) 강성우, 김양한, "두개의 음향 탐촉자를 이용한 소음기의 투과손실 측정과 오차해석", 한국소음진동공학회지 **2**, 181-192 (1992).
- (4) S.-H. Jang and J.-G. Ih, "On the multiple microphone method for measuring in-duct acoustic properties in the presence of mean flow," J. Acoust. Soc. Am. **103**, 1520-1526 (1998).
- (5) M. Abom and H. Boden, "Error analysis of two-microphone measurements in ducts with flow," J. Acoust. Soc. Am. **83**, 2429-2438 (1988).
- (6) M. L. Munjal, *Acoustics of Ducts and Mufflers*, John Wiley & Sons, Inc. (1987), Ch. 8.
- (7) 이성현, 이정권, "스치는 유동이 존재하는 원형 천공요소의 음향 임피던스의 실험적 모델," 한국음향학회 하계학술대회, 489-492 (2001).
- (8) K. Jayaraman and K. Yam, "Decoupling approach to modeling perforated tube muffler components," J. Acoust. Soc. Am. **69**, 390-396 (1981).
- (9) M. L. Munjal, K. N. Rao and A. D. Sahasrabudhe, "Aeroacoustic analysis of perforated muffler components," J. Sound. Vib. **114**, 173-188 (1987).
- (10) K. S. Peat, "A numerical decoupling analysis of perforated pipe silencer elements," J. Sound. Vib. **123**, 199-212 (1988).
- (11) P. T. Thawani and K. Jayaraman, "Modeling and applications of straight-through resonators," J. Acoust. Soc. Am. **73**, 1387-1389 (1983).

Type	Porosity (%)
①	10.3 (uniform)
②	5.7 - 14.9 (increase)
③	14.9 - 5.7 (decrease)
④	5.7 - 14.9 - 5.7
⑤	14.9 - 5.7 - 14.9

표 1. 동심관형 공명기 내부 관의 천공요소 분포 양상

Type M		①	②	③	④	⑤
		1st	0.085	284.5	281.5	274.7
	0.17	1098	1075	1053	1050	1123
2nd	0.085	279.6	282.5	276.6	269.8	284.5
	0.17	1074	1074	1056	1066	1125
3rd	0.085	280.6	280.6	274.7	269.5	282.5
	0.17	1074	1075	1048	1057	1118

표 2. 내부 관에 대하여 측정된 배압 (단위: Pascal).

Type M		①	②	③	④	⑤
		0.085	189.4	188.9	176.3	186.6
	0.17	714.0	716.4	696.9	700.7	728.2

표 3. 각각의 내부 관에 대하여 FLUENT로 예측한 배압 (단위: Pa).

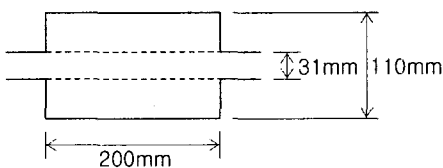


그림 1. 실험에 사용된 동심관형 공명기

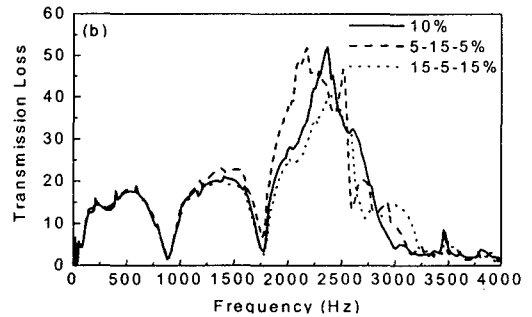
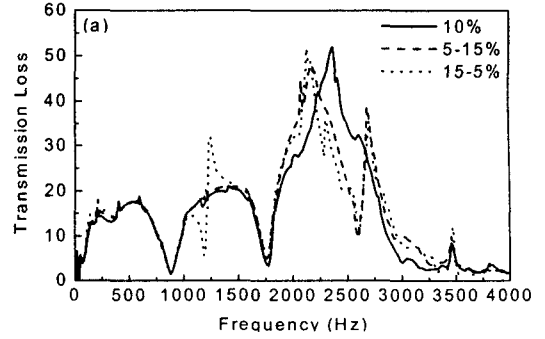


그림 2. 유동이 없는 경우, 천공요소의 분포 양상에 따른 측정된 전달손실. (a) ①, ②, ③ (b) ④, ⑤.

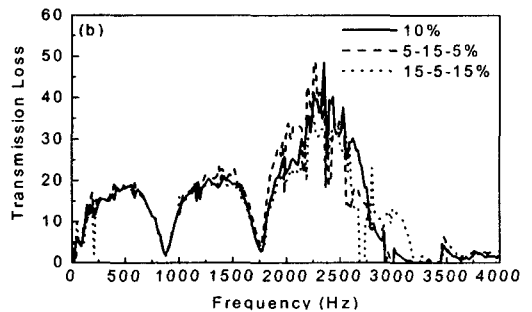
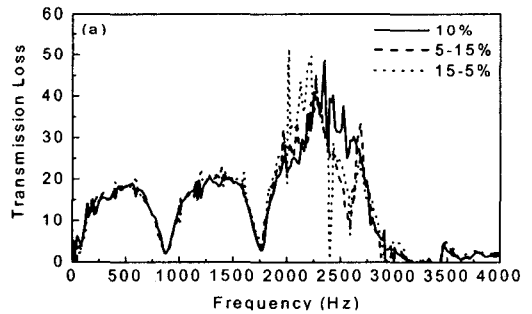


그림 3. 마하 수가 0.085인 경우, 천공요소의 분포 양상에 따른 측정된 전달손실. (a) ①, ②, ③ (b) ④, ⑤.

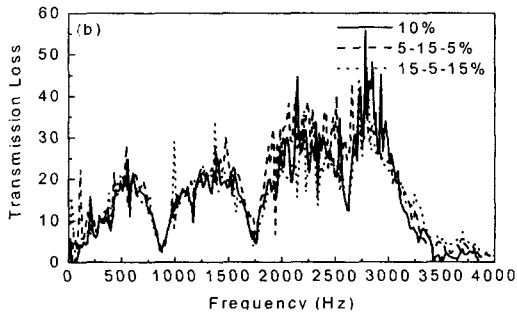
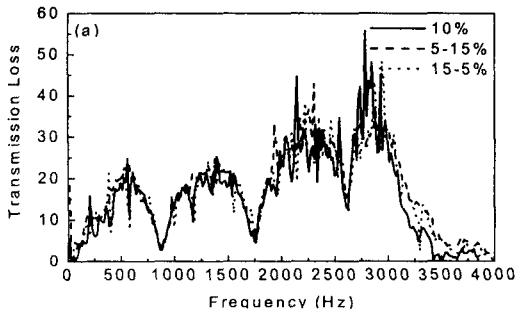


그림 4. 마하 수가 0.17인 경우, 천공요소의 분포 양상에 따른 측정된 전달손실. (a) ①, ②, ③ (b) ①, ④, ⑤.

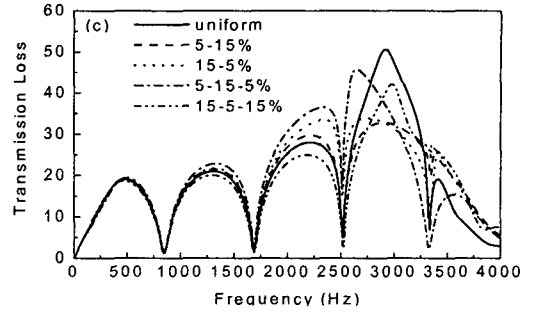


그림 5. 임피던스 모델을 이용하여 예측한 전달손실. (a) $M=0.0$, (b) $M=0.085$, (c) $M=0.17$.

