

〈논 문〉

자동차 흡기 소음 저감을 위한 다공질 관의 적용

The Application of a Porous Duct for Reducing the Intake Noise of Vehicle

이 장 명* · 한 성 수**

Chang-Myung Lee and Sung-Su Han

(2000년 4월 20일 접수 ; 2000년 11월 21일 심사완료)

Key Words : Intake Noise(흡기소음), Porous Duct(다공질 관), Porosity(저항도), Transmission Loss(투과손실)

ABSTRACT

Recently, the porous duct is becoming one of possible ways to reduce the intake noise of an automobile instead of using resonators. In this article, acoustic characteristic of the porous duct is investigated theoretically and experimentally. Futhermore, 4-pole parameter of the porous duct is introduced to predict transmission loss of it for various case. Acoustic efficiency of the porous duct is shown with experimental result using a car.

1. 서 론

자동차 회사들이 자동차의 실내 소음 저감을 위하여 부단히 노력하여 온 결과 과거에 비해 상대적으로 실내소음이 상당히 감소하였다. 하지만, 그 동안 큰 소음원들에 감추어져 비교적 등한시되었던 소음들이 중요한 소음원으로 되는 경우가 발생하고 있다. 이러한 종류의 소음원들 중에 대표적인 것이 흡기소음이다. 흡기소음이 문제시되었을 경우 흡기소음을 저감하기 위한 수단으로 흡기계 외부에 공명기를 부착하는 것이 일반화되어 왔고, 또한 공명기가 흡기소음을 저감하는데 중요한 역할을 하여왔다. 따라서, 흡기계 외부에 어떤 크기의 공명기를 어떤 위치에 부착하는 것이 좋은가에 대하여 많은 연구를 하여왔다.^(1,2) 하지만 흡기계 외부에 공명기를 부착하는 방향으로만 흡기소음을 저감하기 위해서는 엔진룸 내에 많은 공간을 필요로 한다. 이로 인하여 흡기계 외부에 공명기가 많이 설치된 경우에는 엔진룸의 여유공간이 협소하여 엔진의 정비성을 저하시키며 결국 자동차의 상품성을 떨어뜨린다. 또한, 여러 종류의 공명기 부착은 자동차 생산단가를 상승시킨다.

앞에 언급한 문제들을 해결하기 위해 선진 자동차 회사들은 외부에 노출된 공명기를 없애거나 에어클리너 안에 설치하는 등의 새로운 개념의 흡기계를 장착하고 있다. 다공질 관 또한 이러한 문제 해결을 위해 자동차의 흡기계에 새롭게 적용되고 있는 요소들 중의 하나이다.

본 논문에서는 다공질 관의 음향학적 특성을 이론적으로 예측하고, 단품 실험을 통해 검증하였다. 또한, 최종적으로 실차 실험을 통해 실제 주행 상태에서의 성능을 알아보았다.

2. 다공질 관

2.1 다공질 관

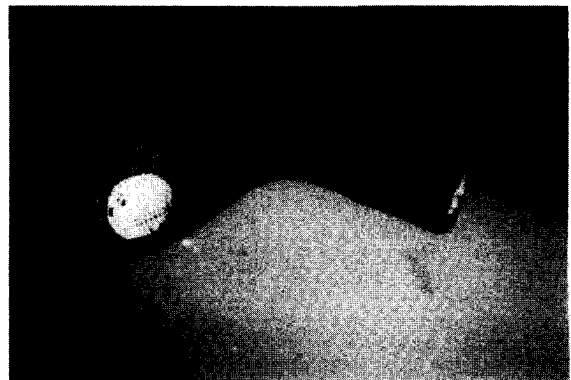


Fig. 1 Porous duct

* 정희원, 울산대학교 공과대학 자동차공학과

E-mail : cmlee@scien.co.kr

Tel : (052)259-2851, Fax : (052)277-3522

** 울산대학교 대학원 자동차공학과

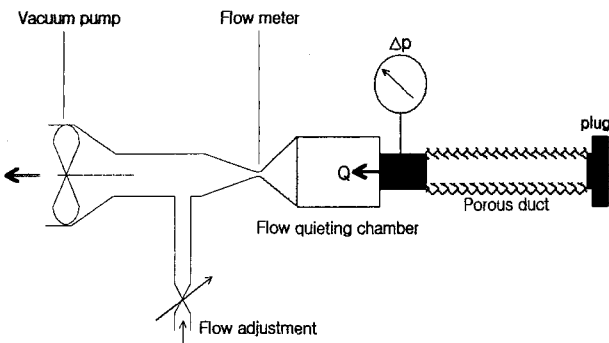


Fig. 2 Porosity measurement device

Fig. 1에 도시된 바와 같이 다공질 관은 벽이 짜여진 직물에 와이어가 보강된 원형단면의 덕트이다.

다공질 관의 음향학적 특성을 나타내는 지표로 저항도 (f_0)를 사용한다. 이 값은 실험을 통해 결정되며 주파수의 단위인 'Hz'와 같은 차원을 가지므로 'Hz'의 단위를 사용한다. 다공질 관의 저항도를 측정하기 위한 실험장치는 Fig. 2와 같으며, 다음 실험식 (1)에 의하여 계산되어진다.

$$f_0 = \frac{\gamma P_{atm}}{2\pi VZ} \quad (1)$$

여기서, γ = 비열비 (공기의 경우 1.4)

V = 다공질 관의 체적

$$Z = \frac{\Delta P}{Q} \quad (Q \text{는 유량})$$

2.2 다공질 관의 소음 저감

Fig. 3은 일반 PVC 직선관과 다공질 관의 입구와 출구 부분에서 각각 측정한 음압값의 차이이다. 측정에 사용된 덕트의 길이는 620 mm이고, 직경은 55 mm이다. 일반 PVC

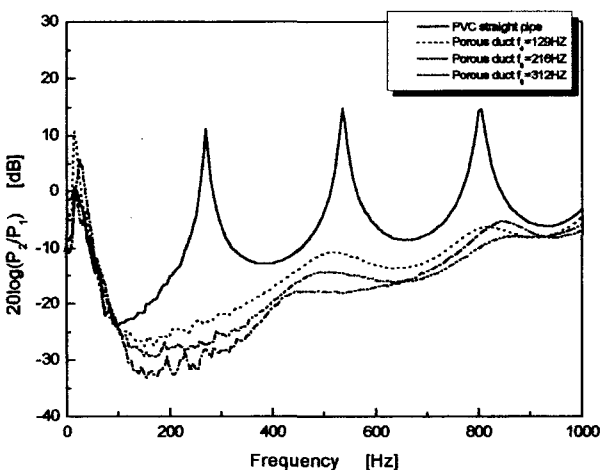


Fig. 3 Comparison of acoustic characteristic between PVC pipe and porous ducts

직선관은 그 길이와 $\lambda/2$ 의 정수배가 일치하는 주파수에서 음향 공진이 일어난다. 이에 반해, 다공질 관의 경우에는 덕트의 길이에 의한 공진주파수에서 음압값이 크게 감소된다. 이 공진주파수에 해당하는 음의 일부가 덕트 벽과의 마찰저항에 의해 열에너지로 소비되기 때문이다. 감소량은 다공질 관의 저항도가 높을수록 더 큰 것을 볼 수 있다.

3. 다공질 관의 투과손실

3.1 4단자 정수법

음향요소의 성능을 평가하는데 4단자 정수법을 통해 쉽게 예측할 수 있는 투과손실(TL : transmission loss)이 많이 쓰인다. 이 방법은 행렬의 계산이 간단하고, 임의의 형태로 조합된 경우에도 적용할 수 있어 많이 이용되고 있다.

음압 P 와 체적속도 v 를 상태변수로 두고, 덕트의 양 끝면의 상태 변수 사이의 관계를 표현하면 다음과 같은 행렬을 얻을 수 있다.^(2,4,5) 여기서, 첨자 1과 2는 각각 입구 부분과 출구부분을 나타낸다.

$$\begin{bmatrix} P_1 \\ v_1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} A & B \\ C & D \end{bmatrix} \begin{bmatrix} P_2 \\ v_2 \end{bmatrix} \quad (2)$$

위 식의 4단자 정수들을 다음 식에 대입하면 투과손실을 구할 수 있다.

$$TL = 20 \log \left[\frac{1}{2} \left(\left| A + \frac{B}{\rho c} + C \rho c + D \right| \right) \right] \quad (3)$$

3.2 임피던스 행렬식

앞에서 언급된 4단자 정수법을 이용하여 다공질 관의 투과손실을 구하기 위해서는 다공질 관의 4단자 정수가 계산되어야 한다.

다공질 관의 4단자 정수는 다음과 같은 가정을 통하여 구할 수 있다.

- 덕트 벽을 통한 음향 유출은 1차원으로 간주한다.
- 흐름에 있어 교란의 크기는 미약하여 무시할 수 있다.
- 덕트 벽에서의 마찰은 무시할 수 있다.
- 흐름은 가역적이고 단열이다.

전기-음향 유사 원리에 의해 식 (4)의 다공질 관의 임피던스 Z 와 어드미턴스 Y 를 전기회로의 음향 임피던스 행렬에 대입하면 다공질 관의 임피던스 행렬을 식 (5)와 같이 구할 수 있다.⁽³⁾ 식 (5)의 Q_1 , Q_2 는 각각 다공질 관 입·출구의 단면적과 체적속도의 곱인 유량을 나타낸다.

$$Z = j\omega \frac{\rho l}{s} \quad (4)$$

$$Y = j\omega \frac{sl}{\rho c^2} + \frac{1}{\zeta}$$

$$\begin{bmatrix} P_1 \\ P_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} A^* & B^* \\ C^* & D^* \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} Q_1 \\ Q_2 \end{bmatrix} \quad (5)$$

$$A^* = \frac{\rho c}{\sqrt{1 + \frac{\omega_0}{j\omega}}} \coth\left(j \frac{\omega l}{c} \sqrt{1 + \frac{\omega_0}{j\omega}}\right),$$

$$B^* = -\frac{\rho c}{\sqrt{1 + \frac{\omega_0}{j\omega}}} \frac{1}{\sinh\left(j \frac{\omega l}{c} \sqrt{1 + \frac{\omega_0}{j\omega}}\right)},$$

$$C^* = \frac{\rho c}{\sqrt{1 + \frac{\omega_0}{j\omega}}} \frac{1}{\sinh\left(j \frac{\omega l}{c} \sqrt{1 + \frac{\omega_0}{j\omega}}\right)},$$

$$D^* = -\frac{\rho c}{\sqrt{1 + \frac{\omega_0}{j\omega}}} \coth\left(j \frac{\omega l}{c} \sqrt{1 + \frac{\omega_0}{j\omega}}\right)$$

여기서, $\omega_0 = \frac{\rho c^2}{sl\zeta} = 2\pi f_0$

- ζ = 다공질 관 벽의 임피던스
- c = 음속
- ρ = 공기밀도
- s = 다공질 관의 단면적
- l = 다공질 관의 길이

식 (2)와 같은 형태로 만들기 위해 식 (4)를 정리하면 다음과 같다.⁽⁶⁾

$$\begin{bmatrix} P_1 \\ Q_1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{A^*}{C^*} & B^* - \frac{A^* D^*}{C^*} \\ \frac{1}{C^*} & -\frac{D^*}{C^*} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} P_2 \\ Q_2 \end{bmatrix} \quad (6)$$

위의 임피던스 행렬에서 나타나는 3개의 항은 다음과 같은 다공질 관의 음향 특성을 나타낸다.

$$\frac{\rho c}{s} : \text{덕트 단면의 음향임피던스} \quad (7)$$

$$\frac{\omega l}{c} = O_0 : \text{무차원수, 주파수와 관련된 항}$$

$$\frac{\omega_0 l}{c} = \rho \frac{c}{sl\zeta} : \text{무차원수, 저항도에 관련된 항}$$

식 (7)에서 규정한 무차원수 O_0 를 사용해 모든 다공질 관을 일반화시킬 수 있다. 이 무차원수 O_0 는 다공질 관의 음향강도에 대한 저항도의 효과이다.

3.3 투과손실 측정

계산된 다공질 관의 4단자 정수에 대한 검증을 위한 실

험으로 Seybert와 Ross가 제시한 투마이크로폰측정방법을 사용하였다.⁽⁷⁾ 실험장치의 구성은 Fig. 4와 같다. 음원은 120 Hz~6 kHz까지 선형성을 가진 드라이브 유닛으로, 최대 75 W의 음을 발생시킬 수 있다. 음원으로부터 백색 잡음을 발생시켜 주파수 특성을 파악하였다. 출구측에는 무반사단의 설치로 반사파를 영향을 줄여 정재파에 의한 노드가 생기지 않도록 하였다.

Fig. 5는 일반 PVC 직선관의 투과손실을 이론과 실험을 통해 구한 결과이다. 일반적으로 알려진 바와 같이 일반 PVC 직선관은 거의 전 주파수 범위에서 투과손실이 0에 가까운 값을 보인다. 이 결과를 통해 실험 장치가 만족할 만한 성능을 가지는 것을 알 수 있다.

Fig. 6~8은 다공질 관의 여러 인자들 즉, 저항도, 길이, 직경 등의 변화에 따른 투과손실의 예측과 실험 결과를 비교한 것이다.

Fig. 6은 저항도의 변화에 따른 다공질 관의 투과손실을 측정된 결과로, Fig. 5의 일반 PVC 직선관에 비해 전주파수 영역에서 투과손실이 큰 값을 보인다. 이는 저항도가

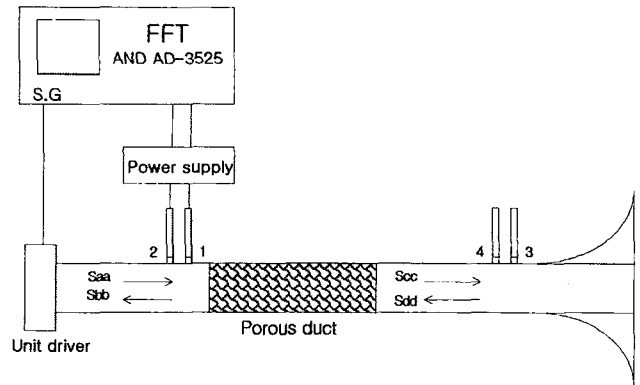


Fig. 4 TL measurement device

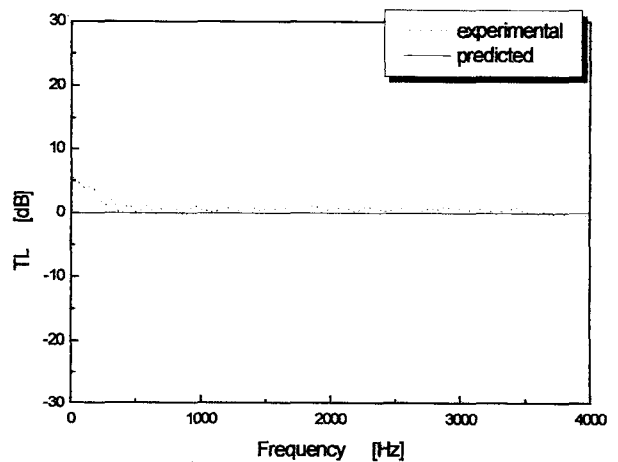


Fig. 5 TL of straight PVC pipe ($L=350$ mm, $D=38$ mm)

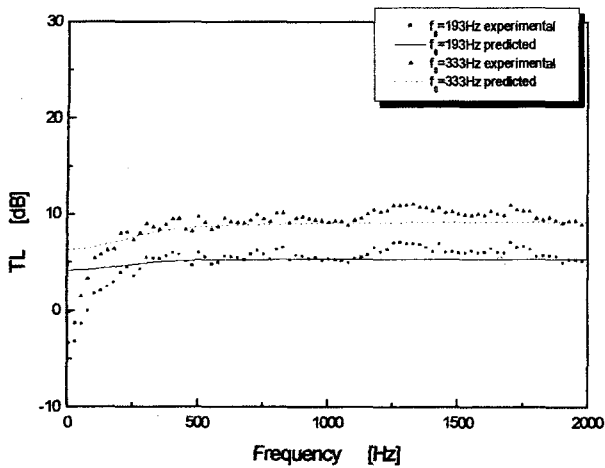


Fig. 6 TL of various porosities of the porous duct ($L=350$ mm, $D=50$ mm)

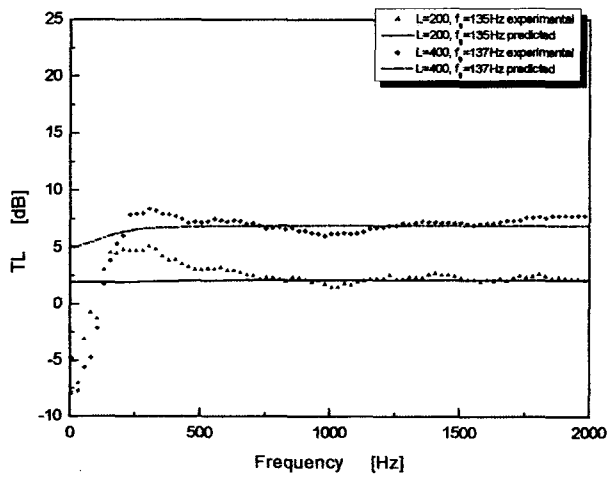


Fig. 7 TL of the porous duct for various length ($D=38$ mm)

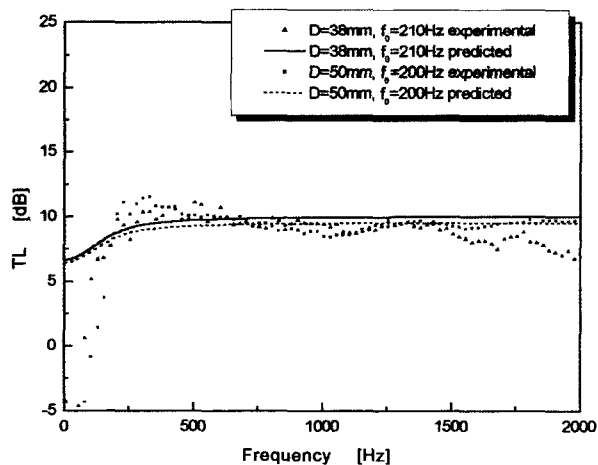


Fig. 8 TL of the porous duct for various diameter ($L=800$ mm)

커질수록 벽을 통한 음방사가 커짐으로 인해 투과손실이 더 커지는 것이다.

Fig. 7은 길이 변화에 따른 다공질 관의 투과손실로 길이가 증가할수록 투과손실이 커지는 현상을 볼 수 있다.

Fig. 8은 직경 변화에 따른 다공질 관의 투과손실로 직경 변화에는 거의 영향을 받지 않는 사실을 확인할 수 있다.

4. 에어클리너 입구의 다공질 관

자동차의 경우에는 Fig. 9와 같이 에어클리너 입구에 다공질 관을 응용할 수 있다. 이 때 나타나는 음향학적 특성을 이론과 실험을 통해 알아보았다.

4.1 입구소음

입구부분에서 거리 d 만큼 떨어진 위치에 설치된 마이크로폰에서 측정된 소음은 다음 (8)식과 같이 출구부분에서의 유량 Q_2 의 함수로 표현된다.⁽⁸⁾

$$P_{in} = 0.13 \frac{\omega Q_2}{d} \quad (8)$$

덕트의 출구부분의 압력 P_2 는 대기에 노출되기 때문에 0에 가깝다고 가정할 수 있다. $P_2=0$ 일 때, 식 (4)의 임피던스 행렬을 사용하여 Q_2 를 계산할 수 있다.

$$\left(\frac{Q_2}{P_1} \right)_{P_2=0} = \frac{\sqrt{1 + \frac{\omega_0 l / c}{j \omega l / c}}}{\frac{\rho c}{s}} \times \frac{1}{\sinh \left(j \frac{\omega l}{c} \sqrt{1 + \frac{\omega_0 l / c}{j \omega l / c}} \right)} \quad (9)$$

식 (8)과 식 (9)를 이용하여 주파수 변화에 따른 P_1 에 대한 P_{in} 의 비를 구할 수 있다.

4.2 덕트 벽의 음향 유출로 인한 방사소음

다공질 관의 내부 압력은 입사파와 반사파의 합으로 나타난다.

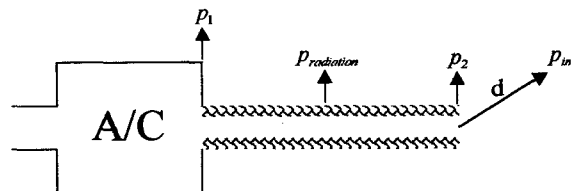


Fig. 9 Porous duct in front of an air cleaner

$$P = P_i e^{-j\frac{\omega}{c}x\sqrt{1+\frac{\omega_0}{j\omega}}} + P_r e^{j\frac{\omega}{c}x\sqrt{1+\frac{\omega_0}{j\omega}}} \quad (10)$$

$x=0$ 에서 $P=P_i$ 이고, $x=l$ 에서 $P=0$ 인조건을 적용하면,

$$P_i = P_1 e^{l\Lambda} / (e^{l\Lambda} - e^{-l\Lambda}) \quad (11)$$

$$P_r = -P_1 e^{-l\Lambda} / (e^{l\Lambda} - e^{-l\Lambda})$$

F_i 와 P_r 을 식 (10)에 대입하면 다음과 같다.

$$P = P_1 \times \left(\frac{e^{-j\omega\frac{(x-l)}{c}\sqrt{1+\frac{\omega_0}{j\omega}} - e^{j\omega\frac{(x-l)}{c}\sqrt{1+\frac{\omega_0}{j\omega}}}}{e^{j\omega l/c\sqrt{1+\frac{\omega_0}{j\omega}}} - e^{-j\omega l/c\sqrt{1+\frac{\omega_0}{j\omega}}}} \right) \quad (12)$$

구변의 $\left(\frac{e^{-j\omega\frac{(x-l)}{c}\sqrt{1+\frac{\omega_0}{j\omega}} - e^{j\omega\frac{(x-l)}{c}\sqrt{1+\frac{\omega_0}{j\omega}}}}{e^{j\omega l/c\sqrt{1+\frac{\omega_0}{j\omega}}} - e^{-j\omega l/c\sqrt{1+\frac{\omega_0}{j\omega}}}} \right)$ 를 $f(x)$ 로

두면 덕트 벽 전체를 통하여 유출되는 유량의 최종 에너지 식은 아래와 같이 덕트의 전체 표면에 대하여 적분한 형태로 나타난다.

$$Qf = \sqrt{\int_0^l \Lambda \frac{dqf}{dx} \left| \frac{dqf}{dx} \right|^2 dx} \quad \frac{dqf}{dx} = \frac{P}{\zeta l} \quad (13)$$

그러면,

$$Qf = \frac{P_1}{\zeta} \sqrt{\int_0^l |f(x)|^2 dx} \quad (14)$$

결론적으로 식 (8)과 식 (14)를 이용하여 덕트 벽에서의 음향 유출로 인한 방사소음을 다음과 같이 구할 수 있다.

$$P_{radiation} = \frac{\Lambda \omega}{d\zeta} \sqrt{\int_0^l |f(x)|^2 dx} \frac{P_1}{l} \quad (15)$$

4.3 실험결과

에어클리너 입구에 저항도가 각각 190 HZ, 490 HZ인 다공질 관을 설치한 후 10 mm 떨어진 지점에서의 입구소음, 방사소음, 전체소음을 측정하여 이론값과 비교하였다. 실험에 사용된 에어클리너의 부피는 1.8 l 이고, 다공질 관의 길이는 380 mm, 반경은 25 mm이다.

Fig. 10은 입구소음으로 덕트의 길이와 $\lambda/2$ 의 정수배가 일치하는 주파수에서 공진이 나타나는데, 저항도가 높을수록 그 진폭의 크기는 작아진다.

Fig. 11은 다공질 관 벽에서의 음향 유출로 인한 방사소음으로 저항도가 크면 음압값이 더 높다는 사실을 확인할 수 있다. 입구소음과 마찬가지로 저항도가 높으면 덕트 길이와 $\lambda/2$ 의 정수배가 일치하는 주파수에서 음향 공진의

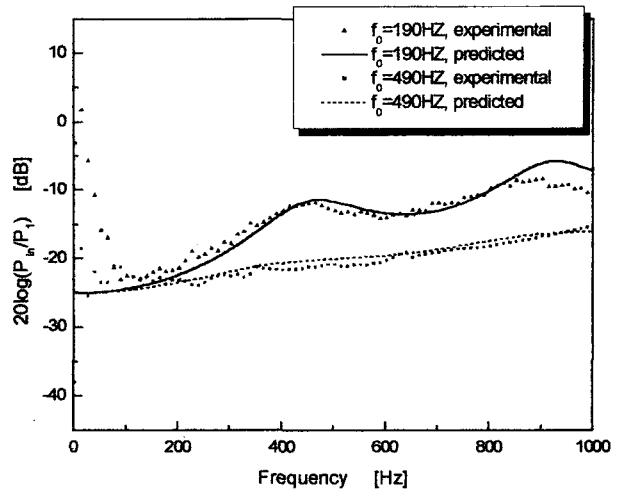


Fig. 10 Discharged noise of the porous duct at entrance

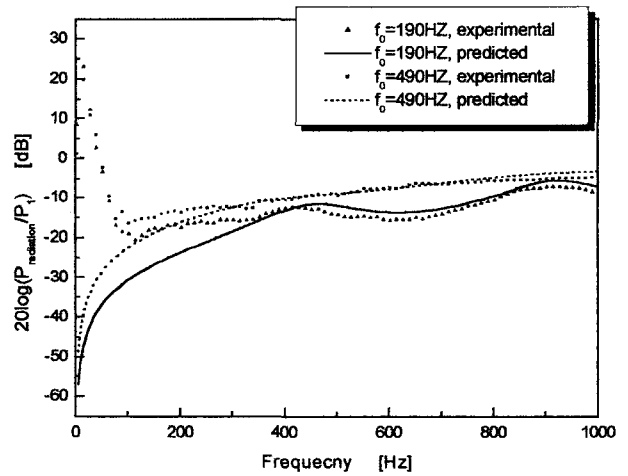


Fig. 11 Radiation noise of the porous duct through wall

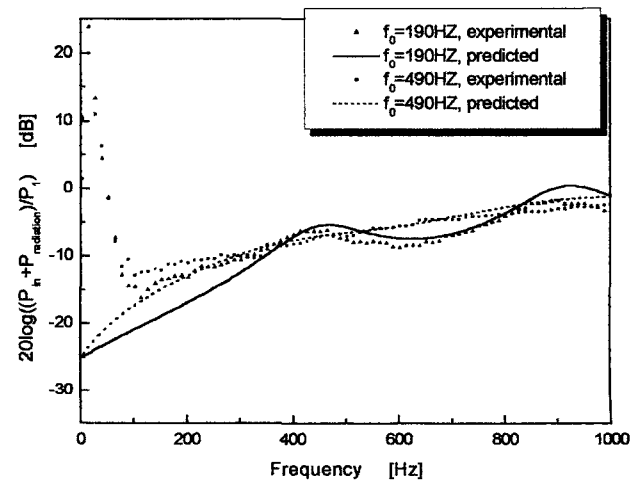


Fig. 12 Total noise of the porous duct

진폭이 크게 나타난다.

Fig. 12는 입구소음과 덕트 벽의 음향 유출로 인한 방사소음의 합인 전체소음이다.

5. 실차에서의 효과

에어클리너 입구에 다음과 같은 일반 PVC 직선관과 다공질 관을 설치하여 실차 시험을 수행하였다.

Fig. 13은 입구소음을 측정된 결과로 전주파수 범위에서 소음 저감 효과를 보인다. 특히, 3500 rpm 부근에서 6차 성분(350 Hz)의 감소가 두드러진다. 이 현상은 다공질 관이 덕트 길이에 의해 발생하는 공진의 진폭을 감소시키기 때문이다. 유속의 영향으로 인하여 감소되는 영역이 저주파 쪽으로 다소 이동되는 현상을 보인다.

입구소음만 고려한다면 다공질 관이 일반 PVC 직선관보다 우수한 음향특성을 보인다. 그러나, 다공질 관의 경우에는 덕트 벽의 음향 유출로 인한 방사소음의 영향도 함께 고려되어야 한다. 1/2 위치에서 수직으로 1m 떨어진 거리에서 음압값을 측정된 결과 Fig. 14에서 보는바와 같이 덕트 벽을 통한 유출로 인한 소음의 음압값은 다른 큰 소음원들에 비해 상대적으로 작아 무시될 수 있다.

Table 1 Dimension of straight pipe & porous duct for intake noise test with car

	일반 PVC 직선관	다공질 관
직경(mm)	60	60
길이(mm)	400	400
저항도(HZ)	0	143

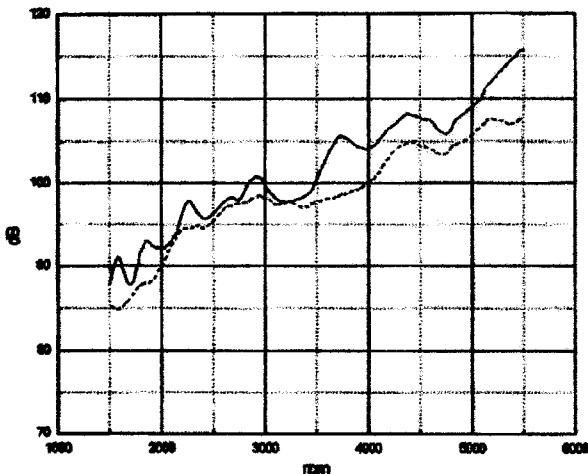


Fig. 13 Intake noise of a car at entrance of the intake system(——PVC pipe,Porous duct)

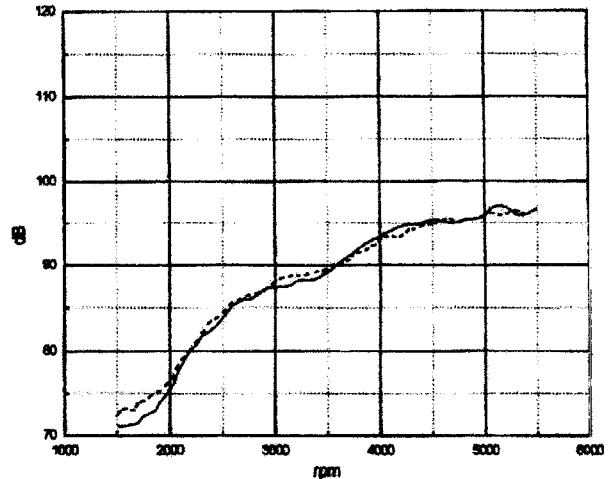


Fig. 14 Radiation noise of the intake system of a car(——PVC pipe,Porous duct)

6. 결 론

본 논문에서는 다공질 관의 음향학적 특성을 이론과 실험을 통해 알아보고, 자동차의 흡기계에 적용하였다.

(1) 다공질 관은 덕트 벽의 음향 유출로 인하여 일반 PVC 직선관에 비하여 덕트 입구에서의 소음이 전반적으로 작게 나타나며 특히, 덕트 길이에 의한 음향 공진주파수에서 음압값의 저감효과를 얻을 수 있다. 따라서, 자동차 흡기계의 경우 소음 저감을 위하여 일반 PVC 직선관을 사용할 때보다 공명기의 갯수를 줄일 수 있다.

(2) 전기-음향 상사 관계를 이용하여 예측된 포러스 덕트의 투과손실을 실험을 통해 검증하였다. 포러스 덕트의 투과손실은 저항도가 크고, 길이가 길수록 커진다. 반면에, 덕트 직경 변화에는 거의 영향이 없다. 계산된 4단자 정수는 다공질 관이 적용된 자동차 흡기계의 전체 음향성능을 예측하는데 사용될 수 있다.

(3) 다공질 관이 에어클리너 입구에 설치되었을 경우의 입구소음, 방사소음, 전체소음을 이론적으로 예측하고, 실험을 통해 검증하였다.

후 기

본 연구는 한국과학재단 지정 울산대학교 지역 협력 연구센터(RRC)의 지원에 의한 것입니다.

참 고 문 헌

(1) Kostun, J. D. & Lin, J. S., 1994, "Effect of

Resonator Location on Resonator Effectiveness using NASTRAN Mode Shape Prediction Analysis and LAMPS Acoustic Model", SAE 940614, pp. 1368~1400

(2) 이장명, 임학중, 1997, "자동차 흡기계 공명기 위치 결정을 위한 이론적 접근", 한국소음진동공학회, 제 7권 제 4호, pp. 701~708

(3) 1997, "CONDUITS POREUX", Westaflex Automobile, Internal Report

(4) Jeong-Guon Ih, Byung-Ho Lee., 1985, "Analysis of higher-order mode effects in the circular expansion chamber with mean flow", J. Acoust. Soc. Am. 77(4),

pp. 1377~1388

(5) Yang-Hann Kim, Jae-Woong Choi., 1990, "Acoustic Characteristics of an Expansion Chamber with Constant Mass Flow and Steady Temperature Gradient(Theory and Numerical Simulation)", ASME, Vol. 112, pp. 460~467

(6) Prasad, M. G. & Crocker, Malcolm. J., 1981, "Evaluation of four-pole parameters for a straight pipe with a mean flow and a linear temperature gradient", J. Acoust. Soc. Am. 69(4), pp. 916~921