

# 엔진 흡기계 공기 여과기의 음향 특성

## Acoustical Characteristics of Air Filter in the Engine Intake System

강 장 훈† · 이 정 권\*  
J.-H. Kang and J.-G. Ih

**Key Words:** Air Cleaner Filter, Intake Noise, Transmission Loss

### ABSTRACT

The air filter in engine intake system filters the dirt in the breathing air but also it attenuates the noise although the phenomenon has been regarded negligible. For the analysis of the acoustical performance of air filter, an acoustical model is suggested in this paper. The air filter consists of a porous filter element, which catches the particulate dirt, and a plastic filter box, which supports the filter element. Fibrous structure of the filter element is modeled as a micro-perforated panel using the flow resistivity and porosity. The pleated geometry of the filter element is modeled as two coupled ducts and a mathematical model is developed for the analysis of sound propagation. The filter box is modeled as a rigid rectangular box. By combining two models, a 4-pole transfer matrix for the air filter is derived. The transmission loss calculated using the transfer matrix of the suggested model is compared with the measured data. Reasonably good agreement is observed. The result can be improved by considering the visco-thermal effect in modeling, in particular at a frequency range near the troughs of TL curve.

## 1. 서 론

자동차의 흡기계와 배기계의 소음은 자동차에서 발생하는 주요 소음 원 중의 하나이다. 이러한 소음은 정책적으로 정해진 기준을 맞추기 위해서나 소비자들이 원하는 품질의 수준을 만족시키기 위해서 줄이거나 제어할 필요성이 있어왔다. 이 중 흡기계에서 발생하는 소음은 차량 내부의 승객에게 영향을 주는 주요한 소음 원으로 여겨지고 있다. 흡기계의 소음으로는 공기가 유입되는 부분에서의 소음, 흡기계의 각종 요소들, 즉 흡기계 관이나 공기 여과기 상자등의 표면 진동으로 인한 소음 등이 있다. 이러한 소음은 엔진의 진동이 전달되거나 흡기 밸브의 반복되는 동작으로 인한 공기의 유동에 의해서 생긴다. 이러한 흡기 소음을 제어하기 위해서는 흡기계의 각 구성 요소가 흡기 소음에 어떠한 영향을 미치는 지를 파악하고 정확히 예측하는 것이 필요하다.

흡기계 구성 요소 중 하나인 공기 여과기는 엔진으로 유입되는 공기의 불순물을 제거하는 기능을 주 목적으로 한다. 그러나 여과기 상자의 큰 부피와 여과재 자체의 저항성으로 인해 흡기 소음에도 어느 정도 영향을 주는 것으로 알려져 왔다. 따라서 본 연구에서는 공기 여과기의 흡기 소음에 대한 영향을 파악하고 어느 정도의 영향을 주는 지를 예측하고자 하였다. 이를 위해 공기 여과기

에 의해서 어느 정도의 전달 손실이 생기는 지를 예측하기 위한 모델을 적용하였고 실험을 통하여 모델의 타당성을 점검하였다.

## 2. 음향학적 해석 모델 적용

공기 여과기는 실제로 공기를 여과시키는 여과재 부분과 여과재 부분을 받치고 있는 여과기 상자로 구성되어 있다. 여과재는 일반적으로 종이류의 재질로 만들어져 있으며 주름 형상으로 접혀져 있다. 따라서 이러한 여과재의 재질과 형상에 대해서 음파가 어떻게 전파되는 지를 해석하기 위한 모델을 적용하였다. 그리고 여과기 상자의 경우는 연결된 흡기관에 비해서 크기가 매우 크고 직육면체에 가까운 형상을 하고 있기 때문에 단순한 사각 상자로 가정하였다. 이러한 모델을 통해서 최종적으로 공기 여과기 전체에 대한 전달 행렬을 구하였고, 이 전달 행렬을 이용하여 전달 손실을 예측하였다.

### 2.1 사각 채널 모델: 여과재에 대한 모델

음파의 전달을 해석하기 위한 모델을 적용하기 위해 먼저 여과재의 임피던스 계산을 위한 모델을 적용하였다. 여과재는 종이 재질을 재료로 하기 때문에 섬유 물질로 볼 수 있다. 이러한 여과재의 다공성을 같은 부피를 갖는 많은 수의 짧은 천공으로 대체하였다. 즉 여과재를 얇은 천공판으로 가정하였다. 일반적으로 얇은 천공판의 음향 임피던스는 천공 하나의 임피던스와 공극률을 알면 구할 수 있다. 따라서 이미 알려져 있는 짧은 천공의 임피던스 식과 여과재의 공극률( $\sigma$ )을 이용하면 여과재의

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

음향 임피던스를 다음과 같이 계산할 수 있다:

$$Z_m = Z_t / \sigma = \frac{j\omega\rho_0 t}{\sigma} \left[ 1 - \frac{2}{s\sqrt{-j}} \frac{J_1(s\sqrt{-j})}{J_0(s\sqrt{-j})} \right]^{-1}, \quad (1)$$

$$s = d\sqrt{\omega\rho_0/4\eta}. \quad (2)$$

$t$  는 여과재의 두께이고,  $d$  는 천공의 지름,  $\rho_0$  는 공기의 밀도,  $\eta$  는 공기의 점성도이다. 위 식에서 공극률과 여과재 두께는 측정이 가능하지만  $s$  를 계산하는 데 필요한 천공의 반지름은 측정이 불가능하다. 이는 섬유 가닥이 얽혀 있는 여과재의 내부를 가상의 천공으로 가정하였기 때문이다. 따라서 천공 반지름을 측정 가능한 인자인 유동 비 저항( $R$ )으로 다음과 같이 대체하였다:

$$s = d\sqrt{\omega\rho_0/4\eta} = \sqrt{\frac{8\omega\rho_0}{R\sigma}}. \quad (3)$$

식 (1), (3)과 여과재의 공극률 및 유동 비 저항을 이용하면 여과재의 음향 임피던스를 예측할 수 있다. 이러한 음향 임피던스 식은 음향 전파를 해석할 때 이용할 수 있다.

## 2.2 사각 채널 모델: 음향 전파 모델

앞에서 구한 여과재의 음향 임피던스 식을 이용하여 여과재의 주름 형상 내에서의 음향 전파에 대한 모델을 제안하였다. 여과재의 주름 형상은 일정한 모양이 반복 되므로 가장 간단한 형상을 대상으로 하여 음파의 전파를 해석하였다.

본 논문에서 대상으로 삼은 여과재의 형상은 그림 1 과 같다. 너비( $w$ )는 0.14 m , 주름의 길이( $L$ )는 0.039m 그리고 주름 사이의 간격( $d$ )은 0.002mm 이다. 주름의 길이에 비해서 간격이 매우 작음을 알 수 있다. 따라서 여과 면의 기울어진 각도가 매우 작다. 또한 접혀진 부분의 뾰족한 끝부분은 여과재가 접히는 공정 과정에서 압축이 되기 때문에 다른 부분에 비해서 투과성이 매우 낮다. 이러한 사실을 바탕으로 그림 1 과 같이 여과재의 접힌 형상을 사각 채널의 형태로 가정하였고 채널의 막힌 부분은 공기가 통과하지 않는다고 가정하였다.

이러한 사각 채널 모델은 두 덕트가 연성된 경우로 볼 수 있다. 따라서 동심관형 공명기나 디젤 매연 여과기의 해석에 쓰인 방법을 적용하였다.

우선 여과재 부분의 음파의 전달에 관한 지배 방정식을 유도하였다. 이를 위한 가정으로서 음압이나 입자의 속도가 단면에 대해서 공간적인 변화가 매우 적다고 하였고, 압력, 입자의 속도 그리고 밀도의 미세 변화가 평균값에 비해서 매우 작다고 가정하였다. 그리고 음파의 진행 방향에 대해서 평균 유속의 변화가 없다고 하였고 공기의 온도는 공

기 여과기내에서 어느 지점에서나 같다고 하였다. 또한 여과재를 통과하는 공기의 유속은 여과재 어느 지점에서나 일정하다고 가정하였고 여과재 부분에서 일어나는 과정은 모두 등엔트로피 과정으로 가정하였다.

이와 같은 가정하에서 그림 2 와 같이 체적 부피를 정하고 각 채널에서의 연속 방정식과 운동량 보존식을 적용하여 다음과 같은 지배 방정식을 구하였다:

$$\rho_0 \frac{\partial u'_i}{\partial x} + u_0 \frac{\partial \rho'_i}{\partial x} + \frac{\partial \rho'_i}{\partial t} = (-1)^i \frac{2\rho_0 u_w}{d}, \quad (4)$$

$$\rho_0 \left( \frac{\partial u'_i}{\partial t} + u_0 \frac{\partial u'_i}{\partial x} \right) = -\frac{\partial p'_i}{\partial x}, \quad i=1,2. \quad (5)$$

$p_i$  와  $u_i$  는 각 채널의 압력과 입자 속도의 미세변화량이다. 위 식에서  $u_w$  는 여과재를 지나는 유동의 공간에 대해 평균한 속도를 나타낸다. 2.1 절에서 구했던 음향 임피던스를 여기에 적용시키면  $u_w$  와  $p_i$  과  $p_2$  사이의 관계를 다음과 같이 나타낼 수 있다:

$$p_1 - p_2 = Z_m \cdot u_w. \quad (6)$$

위 식에서  $Z_m$  은 여과재 모델에서 계산했던 여과재의 음향 임피던스이다.

지금까지 구한 식을 이용해서 채널내의 음파의 거동을 기술하는 해를 구할 수 있다. 먼저 채널의 너비와 높이에 비해서 관심 주파수 내의 음파의 파장이 길기 때문에 각각의 채널에서의 음파를 평면파로 가정하였다. 그리고 압력과 입자 속도를 다음과 같이 시간에 대해서는 조화 함수로, 공간에 대해서는 전파 상수,  $\Gamma_i$  ( $i=1,2$ )를 이용하여 나타내었다. 편의상 시간에 대한 항은 표시하지 않았다:

$$p_i = A_i \exp(-j\Gamma_i kx), \quad (7)$$

$$u_i = B_i \exp(-j\Gamma_i kx). \quad (8)$$

위 두 식을 식 (8)에 대입하면 입자 속도에 대한 식을 다음과 같이 나타낼 수 있다:

$$u_i = \frac{\Gamma_i}{\rho_0 c_0 (1 - M_i \Gamma_i)} A_i \exp(-j\Gamma_i kx). \quad (9)$$

이제 식 (6)과 식 (7), 그리고 식 (9)를 식 (4)에 대입하면 다음과 같이 1 번 채널과 2 번 채널의 압력에 대한 관계식이 구해진다:

$$\begin{bmatrix} (K_1)_1 + (K_2)_1 & -(K_2)_1 \\ -(K_2)_2 & (K_1)_2 + (K_2)_2 \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} p_1 \\ p_2 \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} 0 \\ 0 \end{Bmatrix}. \quad (10)$$

여기서  $(K_1)_i, (K_2)_i$  는 다음과 같다:

$$(K_1)_i = -j \frac{k}{c_0} \left\{ M_i \Gamma_i + \frac{\Gamma_i}{(1 - M_i \Gamma_i)} - 1 \right\}, \quad (11)$$

$$(K_2)_i = \frac{2\rho_0}{dR_m}. \quad (12)$$

위 방정식이  $p_1=0, p_2=0$  이외의 해를 가지기 위해서는 위의 행렬의 행렬식이 0 이 되어야 한다. 이 행렬식의 해는 네 개의 전파상수에 해당된다. 이 전파상수를 식 (7), 식 (9)에 대입하면 원하는 지점에서의 음압과 입자 속도를 구할 수 있다. 이 수식을 이용해서 특정한 두 지점 사이의 전달 행렬을 구할 수 있다.

먼저 전달 행렬을 구하려면 상태 변수를 정해야 한다. 본 논문에서는 압력과 체적 속도를 상태 변수로 정하였다. 이 상태 변수에 대해서 전달 행렬은 다음과 같이 구해진다:

$$\begin{bmatrix} p_1 \\ V_1 \\ p_2 \\ V_2 \end{bmatrix}_{x=L} = T_{2,1} \begin{bmatrix} p_1 \\ V_1 \\ p_2 \\ V_2 \end{bmatrix}_{x=0} \quad (13)$$

$p_1$  과  $V_1$  은 1 번 채널에서의 압력과 체적 속도이고  $p_2$  와  $V_2$  는 2 번 채널에서의 압력과 체적 속도를 나타낸다.  $T_{2,1}$  은  $x=0$  과  $x=L$ , 두 지점을 연결해주는 전달 행렬이다.

식 (13)의 전달행렬에 이제 채널 양 끝단의 경계 조건을 적용해야 한다. 채널의 막혀 있는 부분의 체적 속도가 없다는 가정으로부터 다음의 경계 조건을 적용하였다:

$$\begin{cases} V_2 = 0 & \text{at } x=0, \\ V_1 = 0 & \text{at } x=L. \end{cases} \quad (14)$$

위의 경계 조건을 식 (13)에 적용하면 다음과 같이  $2 \times 2$  크기의 4 단자 정수 전달 행렬이 구해진다. 여기서  $T_{ij}$  는  $T_{2,1}$  의  $i$  번째 행,  $j$  번째 열의 원소를 나타낸다:

$$\begin{Bmatrix} p_1 \\ V_1 \end{Bmatrix}_{x=0} = T_{2,1} \begin{Bmatrix} p_2 \\ V_2 \end{Bmatrix}_{x=L} \quad (15)$$

$$T_{2,1} = \begin{bmatrix} T_{13} - \frac{T_{11}T_{33}}{T_{41}} & T_{14} - \frac{T_{11}T_{44}}{T_{41}} \\ T_{23} - \frac{T_{21}T_{33}}{T_{41}} & T_{24} - \frac{T_{21}T_{44}}{T_{41}} \end{bmatrix} \quad (16)$$

위에서 구한 4 단자 정수 전달 행렬은 반복되는 가장 기본적인 형상인 두 개의 채널에 대한 것이다. 따라서 전체에 대해서 기본 형상이  $N$  개 있다고 한다면 여과재 전체에 대한 4 단자 정수 전달 행렬은 다음과 같이 구해진다:

$$T_m = \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 1/N \end{bmatrix} T_{2,1} \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & N \end{bmatrix} \quad (17)$$

이렇게 구한 전달 행렬을 이용하면 여과재에 의한 전달 손실을 계산할 수 있다. 그러나 여과기 상자에 의한 전달 손실이 워낙 크기 때문에 여과재 자체에 의한 전달 손실만 고려하는 것은 큰 의미가 없다. 따라서 여과재와 여과기 상자를 함께 고려해

서 전달 손실을 예측해야 한다. 따라서 식 (17)의 4 단자 정수 전달 행렬을 이용하여 그림 3 과 같은 모델에서의 전달 손실을 계산하였다.

### 3. 전달 손실의 측정 및 비교

2 장에서 구한 모델의 타당성을 점검하기 위하여 실제 공기 여과기를 이용하여 실험을 하였다. 적용한 모델과 같은 형상의 실험 장치를 제작하여 그림. 4 와 같이 실험 장비를 구성하였다. 3 microphone method 를 이용하여 상단과 하단의 반사계수를 측정하였고 이를 이용하여 전달 손실을 계산하였다.

그림. 5 는 여과재를 넣은 경우와 넣지 않은 경우의 실험 결과이다. 여과재를 넣은 경우와 그렇지 않은 경우의 차이가 큰 것을 알 수 있다. 특히 저주파수 영역보다는 고차 모드가 생기는 영역에서의 차이가 컸다. 이를 통해서 여과재가 음향 전파에 미치는 영향을 무시할 수 없음을 알 수 있다.

그리고 그림. 5 은 2 장에서 적용한 모델로부터 계산한 전달 손실 결과와 실험을 통해서 구한 결과를 비교한 그래프이다. 전체 적으로 실험 결과와의 차이가 크지는 않았지만 trough 근처에서의 값을 보면 실험 값보다 예측 값이 많이 작은 것을 볼 수 있다. 이는 모델 과정에서 점성의 영향을 고려하지 않았기 때문으로 보인다. 결국 좀 더 정확한 예측을 위해서는 더 많은 요소들을 고려해야 할 것이다.

### 4. 결론

공기 여과기의 음향 특성 중 하나인 전달 손실을 정확히 예측하여 흡기 소음에 얼마나 영향을 주는지를 파악하고자 하였다. 이를 위해서 여과재 자체를 천공판으로 가정하고 여과재의 주름 형상을 단순화 하여 여과재 전체의 전달 행렬을 구하였다. 그리고 여과기 상자까지 고려한 공기 여과기 전체의 전달 행렬을 유도하였다. 이러한 모델과 같은 실험 장치를 제작하여 실제 전달 손실을 측정하였고 이를 예측한 결과와 비교하였다. 비교 결과 본 논문에서 적용한 모델이 trough 근처를 제외하고는 실험 결과와 일치하였다. 향후 점성이나 고차모드를 고려한 좀 더 향상된 모델을 적용할 계획이다. 이렇게 적용된 모델은 공기 여과기 관련 인자들이 전달 손실에 어떤 영향을 미치는지를 예측하는 데 이용할 수 있을 것이다.

## 감사의 글

본 연구는 BK21 에서 일부 재정 지원을 받았습니다.

## 참고문헌

- (1) Allam, S. and Abom, M., 2002, "On acoustic modeling and testing of diesel particulate filters", Proc. of Inter-Noise, N250.
- (2) Zwikker, C. and Kosten, C. W., 1949, Sound absorbing materials, Elsevier, NewYork, pp.1-40.
- (3) Sullivan, J. W. and Crocker, M. J., 1978, "Analysis of concentric-tube resonators having unpartitioned cavities", J. Acoust. Soc. Am. **64**, pp. 207-215
- (4) Allard, J. F., 1993, Propagation of sound in porous media, Elsevier, London, pp. 16-18, pp. 48-70.

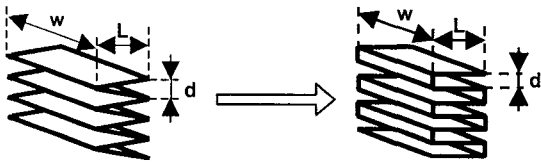


그림 1. 여과재 형상

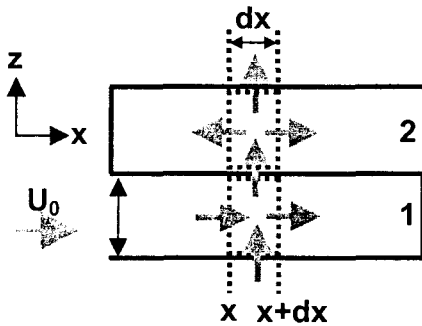


그림 2. 지배 방정식 유도를 위한 체적 부피

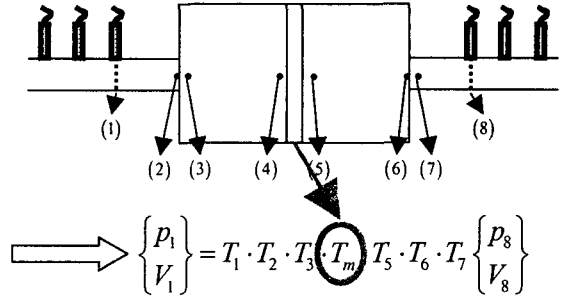


그림 3. 여과기 상자를 고려한 모델

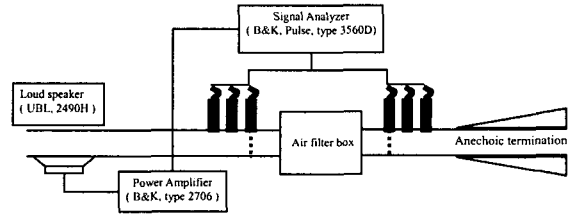


그림 4. 실험 장치 구성도

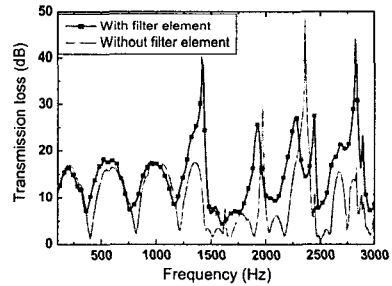


그림 5. 여과재를 넣은 경우와 넣지 않은 경우의 전달 손실 비교

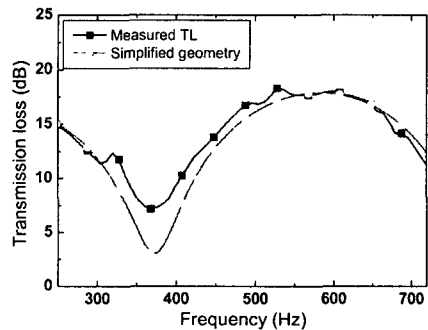


그림 6. 예측 결과와 측정 결과의 비교