

# 유동조건과 내부관 구멍형상의 변화에 따른 소음기의 소음저감 특성

정진년\*, 김원진\*, 조범래\*\*

## Characteristics of Noise Attenuation with the Variation of Flow Condition and Hole Shape of Perforated Intruding Tubes in Muffler

Jin-Nyon Jung\*, Won-Jin Kim\* and Bum-Rae Cho\*\*

### ABSTRACT

To propose a useful modelling method for an actual muffler, the noise attenuation effects of muffler was investigated according to the flow condition and the hole shape of tubes. In this work, the finite element method was used to calculate the transmission loss of muffler. The noise attenuation characteristics of four different types of muffler in the hole shape of tubes were compared mutually to find a more simple equivalent model. Analytical results showed that the overall value of transmission loss increases and the peaks of transmission loss curve shift to the low frequency with mean flow for the given muffler. Also the noise attenuation characteristics of the equivalent model having the split holes is almost the same as those of the actual muffler having many circular holes.

**Key Words :** Flow Condition(유동조건), Hole Shape of Intruding Tube(내부관의 구멍형상), Transmission Loss(투과손실), Finite Element Method(유한요소법), Frequency Response Analysis(주파수응답해석)

### 1. 서론

최근 들어 컴퓨터를 이용한 해석기술의 발달로 컴퓨터 해석을 통한 설계에 많은 관심이 집중되고 있다. 특히 자동차용 소음기의 성능 향상을 위하여 여러 가지 해석기법이 도입되고, 보다 정확한 해석을 수행하기 위해 컴퓨터를 이용한 연구가 많이 수행되고 있다<sup>1), 2)</sup>. 자동차 소음기는 부 소음기(sub muffler)와 주 소음기(main muffler)로 구성되어 있으며, 주요 소음의 감음 및 주파수 특성은 주 소음기에 의해 좌우된다. 주 소음기의 구조는 반사

형 구조로서 많은 구멍이 천공된 다공관과 칸막이(baffle)로 구성된다.

이러한 주 소음기의 소음저감 성능에 영향을 미치는 인자들은 소음기의 입·출구 관의 위치 및 크기, 길이, 공동 및 내부관의 단면형상과 크기 등과 같은 기하학적 형상과 내부의 유동속도 및 온도구배를 생각할 수 있다. 대부분의 설계와 마찬가지로 소음기에서도 위에 열거한 것처럼 소음기 성능이 영향을 끼치는 물리적 인자들이 다양하고 복잡적이므로 설계조건이 주어질 때 가장 적합한 소음기를 설계한다는 것은 대단히 어려운 일이다.

\* 계명대학교 자동차공학부

\*\* 계명대학교 화학재료공학부

이러한 다양하고 복잡한 인자들을 모두 고려하여 최적의 소음기를 설계하기 위해서는 모든 인자들이 소음 저감 특성에 미치는 영향을 구체적으로 파악해야 한다. 위의 여러 인자들 중 기하학적 형상에 따른 인자들에 관련된 연구는 많이 이루어졌으나, 대부분의 연구에서 내부 유동효과에 대한 고려를 하지 않고 매우 단순한 형태를 갖는 소음기를 대상으로 소음저감 특성 연구를 수행하였다<sup>[3, 4]</sup>. 실제 자동차 소음기는 내부 형상이 매우 복잡하고 내부 유동효과를 포함하고 있으므로 실제 자동차 소음기의 소음특성 해석에 이러한 연구 결과를 적용하면 상당한 오차를 수반하게 될 것이다.

따라서 본 연구에서는 소음기 내부의 유동과 실제 소음기의 복잡한 내부 형상을 최대한 고려하여 해석할 수 있는 방법을 제안하였다. 해석에 있어서는 내부 유동과 내부관의 구멍형상에 따른 소음저감 특성을 구분하여 해석하므로 각각의 변수가 결과에 미치는 영향을 분석하였다. 대상 소음기 모델은 내부관 구멍의 형상에 따른 소음저감 특성을 효과적으로 분석하기 위해 내부관에 구멍이 없는 형태와 구멍의 면적의 합은 동일하면서 구멍의 형상이 서로 다른 세 가지 형태로 구분하여 전체 네 가지의 모델로 선정하였다.

대상 소음기를 내부 음향문제에 일반적으로 많이 사용되는 유한요소법을 사용하여 모델링하였다<sup>[5]</sup>. 대상모델의 음향해석은 상용프로그램(SYSNOISE)을 이용하였으며, 주파수응답해석(frequency response analysis)을 통하여 투과손실(transmission loss)을 계산하였다.

내부 유동에 따른 소음저감 특성 분석 결과에서 유동이 투과손실 곡선에 미치는 영향은 확장관 내에서 음파의 천이현상을 일으켜서 투과손실곡선을 저주파 쪽으로 이동시킴을 알 수 있었다. 그리고 내부관의 구멍형상에 따른 소음저감 특성 분석 결과에서 내부관의 구멍 면적 합과 위치가 동일하면 주파수에 따른 투과손실 곡선이 매우 잘 일치함을 알 수 있었다. 기하학적 형상이 매우 복잡한 실제 대부분의 소음기의 경우 해석을 위해 모델링을 하게 되면 요소(element)의 수가 많아져 해석시간이 많이 소요되거나 해석이 불가능한 경우가 발생한다. 본 연구에서는 이러한 문제를 해결하기 위해서 복잡한 형태를 간단하게 모델링 할 수 있는 방법을 제시하였다. 여기서 제시된 방법을 이용하면 유동효과를 고려한 상태에서 복잡한 소음기를 단순

하게 모델링하여 해석할 수 있으므로 해석시간의 절약과 함께 나아가 실제 소음기의 내부구조를 간단하게 설계하는 방법을 제시할 수 있다.

## 2. 해석방법

### 2.1 소음기 모델링

유동 효과를 고려하여 소음기 내부관의 구멍형상에 따른 소음 특성을 효과적으로 분석하기 위하여 Fig. 1에서와 같이 네 가지 형태의 해석 대상 소음기를 선정하였다. 여기서 사용된 소음기의 공동부 단면의 모양은 장축 지름 280 mm 단축 200 mm인 타원형이고 공동의 길이는 480 mm이다. 입·출구관의 지름은 50 mm 돌출부의 길이는 50 mm 이다.

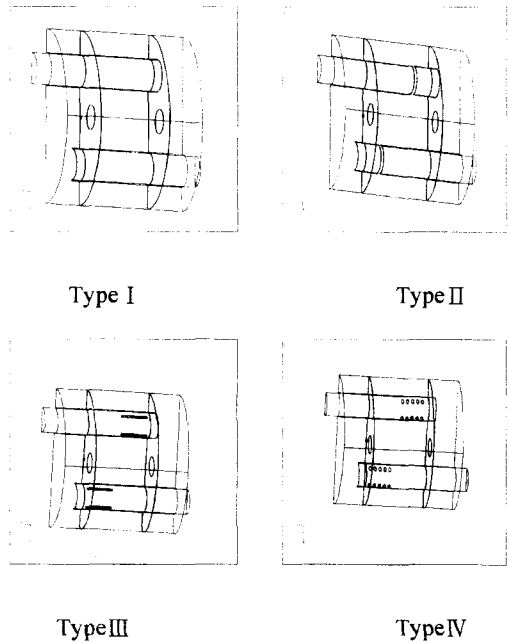


Fig. 1 Four different types of muffler

Fig. 1에서 Type I 은 소음해석에 있어서 기준이 되는 소음기로서 내부관에 구멍이 없는 단순한 형태의 소음기이고, Type II, III, IV는 구멍의 형상은 다르지만 구멍의 면적 합이 동일한 소음기이다. 여기서 Type II는 내부관에 원주 방향으로 절단된 구멍형상을 갖고, Type III은 Type IV에서의 구멍위치와 면적의 합이 동일한 직사각형의 스플릿(split) 형태의 구멍형상을 가진다. 그리고 Type IV는 실제

자동차에서 많이 사용하고 있는 소음기 형태로서 내부관이 천공된 다수의 구멍을 가지는 경우이다.

소음기의 투과손실을 근사적으로 계산하는 다음 식을 기초로 하여 Type II, III, IV의 소음기에서 내부관 구멍의 면적 합을 동일하게 지정하였다<sup>16)</sup>.

$$TL = 10 \log \left| 1 + \frac{\left( \frac{\sqrt{nVS_p/l_p}}{2S_o} \right)^2}{\frac{f_r - f_r}{f_r - f}} \right| \quad (1)$$

- 여기서  $TL$  : 투과 손실치(dB)
- $S_o$  : 소음기 출구의 단면적( $m^2$ )
- $f_r$  : 감음 대상 주파수(Hz)
- $f$  : 감음 대상 주파수(Hz)
- $n$  : 내관의 구멍 수
- $S_p$  : 내관 구멍 한 개의 단면적( $m^2$ )
- $V$  : 공동의 용적( $m^3$ )
- $l_p$  : 구멍의 유효길이(m)

식(1)에서 보면 투과손실 값은 다공관 내부의 구멍의 개수와 구멍의 면적에 의해 결정됨을 볼 수 있다. 소음기처럼 내부가 비어 있는 구조의 내부 음향문제를 효과적으로 풀기 위해 유한요소법이 주로 사용된다. 유한요소법은 요소의 크기, 형상을 임의로 설정할 수 있기 때문에 복잡한 소음기 같은 형상에 적용하기 쉽다. 따라서 대상소음기의 기하학적 형상을 고려하여 유한요소로 Fig. 2와 같이 모델링하였다.

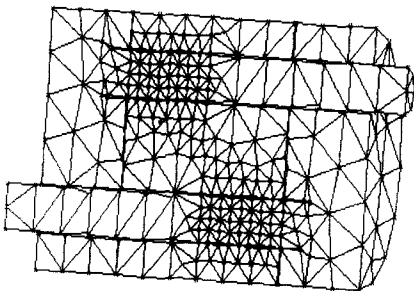


Fig. 2 FEM model

유한요소 모델링에서 모델링의 편의상 네 가지

형태 모두 사면체 요소를 사용하였으며, 완료된 모델의 요소 수는 Table 1에서와 같다.

Table 1 Element numbers of four different models

Type	I	II	III	IV
Number of Elements	1213	1315	2476	4155

Table 1에서 알 수 있듯이 Type I의 유한요소모델이 요소 수가 가장 작고 Type II에서 Type IV로 갈수록 요소 수가 증가됨을 알 수 있다. 특히 실제 자동차에 사용되는 소음기는 상당히 많은 수의 구멍이 천공된 내부관 형태를 가지므로 이상과 같이 네 가지 형태로 구분하여 모델링할 경우에 요소의 수 차이는 더욱 크게 나타난다.

이상의 네 가지 소음기는 모두 형상이 Fig. 1의 좌표축에서 XZ평면에 대해 대칭이므로 Fig. 1에서와 같이 소음기의 반단부만 모델링하여 해석이 가능하다.

## 2.2 이론식과 경계조건

### 2.2.1 지배방정식

온도구배와 유동이 존재하는 경우 3차원 소음기 모델의 이론적 음향 해석을 위해 다음과 같은 가정이 필요하다.

- 소음기내 기체의 성질은 균질하며 무점성
- 소음기내 기체는 이상기체의 성질을 따른다.
- 음압은 대기압에 비해 매우 적다.
- 소음기 벽은 강체이다.
- 소음기 내 유체의 온도는 정상상태

이러한 가정은 대부분의 실제 소음기 사용조건에 상당히 근사된다고 볼 수 있으며, 이러한 조건 하에서 임의의 온도에서의 음속은 다음과 같이 표현된다.

$$c = 331.42 + 0.6T \quad (2)$$

여기서  $c$  : 음속(m/s)  $T$  : 온도( $^{\circ}C$ )

유동효과를 고려한 해석에 있어서 속도 포텐셜 함수(velocity potential function)  $\psi(x, y, z, t)$ 는 다음과 같이 정의된다<sup>17)</sup>.

$$\psi = \psi_f + \psi_a \quad (3)$$

여기서  $\psi_f$  : 정상유동 포텐셜

$\psi_a$  : 음향변동 포텐셜

위의 식(3)을 이용하여 파동방정식을 표현하면 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$\nabla^2 \psi - \frac{1}{c^2} \frac{\partial^2 \psi}{\partial t^2} = 0 \quad (4)$$

여기서 조화함수 거동으로 가정하면 속도포텐셜은 식(5)로 다시 나타낼 수 있다.

$$\psi(x, y, z, t) = \Phi(x, y, z) \cdot e^{i\omega t} \quad (5)$$

여기서 식(5)를 식(4)에 대입하여 정리하면 다음과 같이 쓸 수 있다.

$$\nabla^2 \Phi + k^2 \Phi = 0 \quad (6)$$

여기서  $k$ 는 파수(wave number)이다. 그리고 음압과 함수  $\Phi$ 와의 관계는 다음과 같이 표현된다.

$$p = -\rho i \omega \Phi \quad (7)$$

식(7)을 식(6)에 대입하면 다음 같이 음압에 관한 식으로 표현할 수 있다.

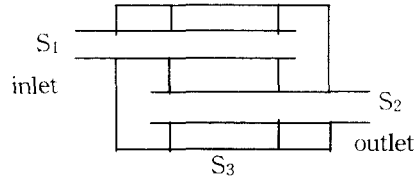
$$\nabla^2 p + k^2 p = 0 \quad (8)$$

여기서 식(8)를 경계조건을 고려한 상태에서 유한요소법으로 풀이하여 해를 구한다.

### 2.2.2 경계조건

Fig. 3과 같이 입·출구단( $S_1, S_2$ )에서의 압력은 영, 입·출구단을 제외한 경계부분( $S_3$ )에서는 속도를 영으로 고정시키므로 입·출구단은 열려 있음을 나타내고 경계부분은 막혀있음을 나타낼 수 있다. 유동효과를 주기 위해 입구 전면적( $S_1$ )에 유체의 속도를 일정하게 적용하였고, 출구 전면적( $S_2$ )에 속도포텐셜 값을 영으로 주었다. 소음기 내부에서 출

구단을 통하여 외부로 방사될 때 방사 임피던스(impedance)는 식(9)으로 계산하였다<sup>17, 8)</sup>.



$$\begin{aligned} p &= 0, V = \text{constant on } S_1 \\ p &= 0, p/V = Z \text{ or } V/p = A \text{ on } S_2 \\ V &= 0 \text{ on } S_3 \end{aligned}$$

Fig. 3 Boundary conditions for noise analysis

$$Z_r = \frac{p}{V} = [0.24(ka)^2 + j0.56ka] \cdot \rho_o c \quad (9)$$

여기서  $Z_r$  : 방사 임피던스

$k$  : 파수

$a$  : 출구단 반경(m)

$\rho_o$  : 밀도(kg/m<sup>3</sup>)

$c$  : 음속(m/s)

$V$  : 체적 속도(m/s · m<sup>2</sup>)

$p$  : 압력(N/m<sup>2</sup>)

$A$  : 어드미턴스(admittance)

그리고 임피던스와 어드미턴스의 관계는 다음과 같다.

$$A = \frac{V}{p} = \frac{1}{Z_r} \quad (10)$$

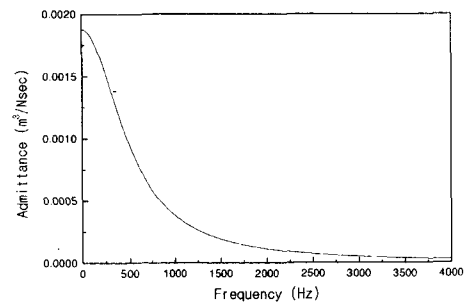


Fig. 4 Admittance values at outlet

식(10)에 의해 계산된 소음기 출구단의 어느비  
턴스 값은 Fig. 4와 같이 계산된다

### 2.3 해석방법

본 연구에서는 유한요소로 모델링한 모델을 음  
향해석 상용 프로그램(SYSNOISE)을 사용하여 주  
파수응답해석을 하였다. 투과손실은 직접 접근방  
법을 사용하여 계산하였다<sup>10)</sup>. 즉 해석과정에서 입구  
단과 출구단 음압을 도출하여 투과손실(TL) 값을  
계산하였다.

$$TL = 20 \log \left( \frac{p_{inlet}}{p_{outlet}} \right) \quad (11)$$

여기서  $p_{inlet}$  : 출구단 음압(N/m<sup>2</sup>)

$p_{outlet}$  : 입구단 음압(N/m<sup>2</sup>)

소음기의 내부의 온도는 입구단과 출구단의 온  
도의 평균인 400℃로 균일하다고 가정한다. 해석에  
서 온도는 내부기체의 밀도( $\rho = 0.525 \text{ kg/m}^3$ )와 식  
(2)에서 계산되는 음속( $c=533.8 \text{ m/s}$ )을 입력함으로  
고려된다. 소음해석은 내부 유동효과에 따른 소음  
특성 분석과 내부관의 구멍형상에 따른 소음특성  
분석을 구분하여 실시하였다. 내부유동 효과에 따  
른 소음특성 해석에 있어서는 실제 자동차용 소음  
기를 단순화시킨 TypeIV를 대상으로 하였으며, 유  
동속도가 0, 45, 100 m/s 인 세 가지 조건에 대해 음  
향해석을 수행하였다. 여기서 해석 주파수 범위는  
0~4000Hz로 두고 2Hz 간격으로 해석하였다. 내부  
관의 구멍형상에 따른 소음 특성 해석에 있어서는  
실제 보통 승용차 엔진의 운전상태를 고려한 45  
m/s의 유동조건에서 Fig. 1의 네 가지 형태의 소음  
기에 대한 해석을 수행하였다. 여기서 해석 주파수  
범위는 0~2000Hz로 두고 2Hz 간격으로 해석하였  
다.

## 3. 해석결과

### 3.1 내부유동에 따른 소음 저감 특성

Fig. 5에서 유동이 없는 경우의 투과손실 그래  
프는 골과 산이 날카롭게 많이 나타나는 것을 볼  
수 있는 반면 유속이 100 m/s인 경우에는 산과 골  
이 완만한 것을 볼 수 있다. 유속이 100 m/s인 경  
우 유동이 없는 경우에 비해 전 주파수대역에 대해  
상당히 양호한 투과손실 값을 보여주고 투과손실곡  
선이 전체적으로 저주파 쪽으로 이동되었다.

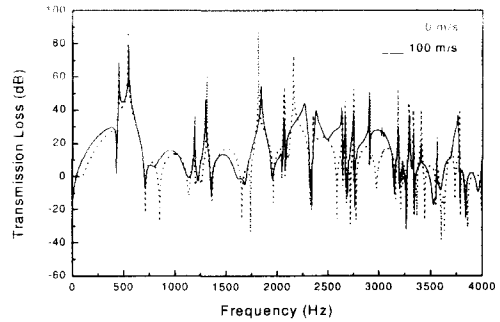


Fig. 5 Transmission loss values at the flow velocity  
of 0 m/sec and 100 m/sec

Fig. 6에서 유동이 없는 경우와 유속이 45 m/s인  
경우의 투과손실 곡선이 매우 유사함을 볼 수 있  
다. 두 조건 모두 투과손실 곡선의 산과 골이 비  
슷한 주파수에서 나타났고 유속 45 m/s인 경우 산과  
골이 유동이 없는 경우보다 완만하게 나타남을 알  
수 있다. 유동의 효과가 부분적으로 나타났지만  
그 차이가 미세하다.

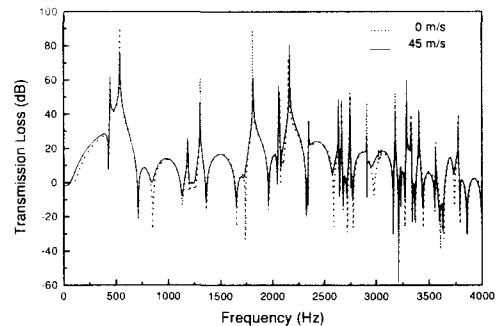


Fig. 6 Transmission loss values at the flow velocity  
of 0 m/sec and 45 m/sec

Fig. 5와 Fig. 6을 비교해 보았을 때 유동효과는  
어느 정도의 임계 값 이상에서 투과손실에 영향  
주는 것을 알 수 있다<sup>10)</sup>.

유동이 있을 경우가 투과손실 값이 상대적으로  
좋게 나타나는 것은 소음기 내부에서 유동에 의한  
음의 반사, 산란이 발생하여 음파간에 서로 상쇄  
되는 효과에 의한 것으로 판단된다.

### 3.2 내부관의 구멍형상에 따른 소음기의 소음 저감 특성

내부관의 구멍형상에 따른 소음저감 특성을 평가하기 위하여 실제 자동차 소음기를 단순화시킨 TypeIV의 소음저감 특성을 기준으로 나머지 세 가지 형태의 소음기에 대한 소음저감 특성을 비교 분석하였다.

Fig. 7은 Type I 과 TypeIV투과손실을 나타낸 것인데 내부관에 구멍이 있는 경우와 없는 경우에 소음저감 특성이 상당히 많이 달라짐을 알 수 있다.

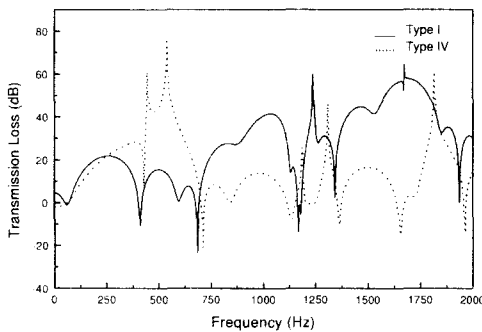


Fig. 7 Transmission loss values of Type I and TypeIV

Fig. 8에서 TypeII은 소음기 내부관에 구멍을 천공하는 대신 구멍 면적의 합과 동일 면적으로 관을 분리시켜 놓은 형태로서 기존의 해석방법에서 천공된 내부관에 대한 등가계로 많이 이용되었다. 이 결과에서 보면 투과손실 곡선이 서로 정확하게 일치하지는 않지만 비슷한 양상으로 나타남을 알 수 있다.

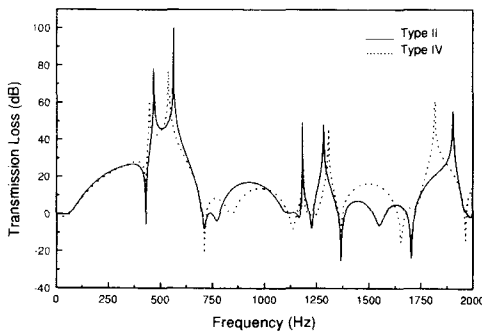


Fig. 8 Transmission loss values of Type II and TypeIV

Fig. 9에서 TypeIII은 TypeIV의 소음기 내부관의 구멍형태를 직사각형 모양으로 바꾸어 구멍 면적의 합과 구멍 위치를 동일하게 준 것이다. TypeIII와 TypeIV의 투과손실 값을 비교해 보면 동일한 형태를 해석한 것과 같은 아주 잘 일치된 소음저감 특성을 보여준다.

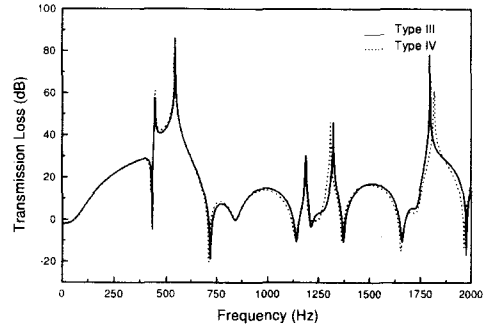


Fig. 9 Transmission loss values of Type III and Type IV

이상의 내부관 구멍 형상에 따른 소음해석 결과를 정리해 보면, 실제 자동차 소음기에 많이 이용되는 여러 개의 천공된 구멍을 갖는 내부관이 설치된 소음기는 구멍 면적의 합을 동일하게 고려한 단순 형태의 구멍을 갖는 내부관이 설치된 소음기와 유사한 소음저감 특성을 갖는 것을 알 수 있다.

특히 여러 개의 구멍이 천공된 내부관에서 구멍의 한 열을 같은 위치에서 동일면적을 갖는 직사각형 구멍으로 대체할 경우에는 Fig. 9에서 알 수 있듯이 매우 잘 일치되는 결과를 얻을 수 있다. 여기서 여러 개의 구멍이 천공된 내부관을 갖는 실제 소음기는 직사각형 모양의 스플릿 형태의 구멍이 천공된 내부관을 갖는 소음기로 등가시킬 수 있음을 알 수 있다. 그리고 해석대상 소음기 TypeIII와 TypeIV의 유한요소 모델의 요소 수를 살펴보면, TypeIII의 요소 수는 2476개인 반면 TypeIV은 Type III보다 형상이 더 복잡하여 요소 수는 4155개로 두 배 가까이 많다. 소음해석에 있어서 이러한 등가계의 도출은 유한 요소모델의 요소 수를 줄일 수 있기 때문에 실제 복잡한 소음기 해석에 매우 유용하다.

#### 4. 결론

본 연구에서는 실제 자동차 소음기를 단순화한 소음기의 내부 유동효과에 따른 소음저감 특성을 분석하고, 이 소음기를 기준으로 하여 세 가지 다른 형태의 내부관이 설치된 소음기의 소음저감 특성을 분석하였다.

내부 유동에 따른 소음저감 특성 분석결과에서 보면 유동이 투과손실에 미치는 영향은 확장관 내에서 음파의 천이현상을 일으켜서 투과손실 곡선을 저주파 쪽으로 이동시킴을 볼 수 있다. 주어진 대상 소음기의 해석결과를 보면, 유속이 빨라질수록 소음저감 효과는 높아지는 경향을 보인다. 이러한 현상은 공명형 소음기의 내부 유동이 음파를 간섭하여 음파 상호간의 상쇄작용을 상승시키는 것에 의해 유발되는 것으로 판단된다.

내부관의 구멍 형상에 따른 소음저감 특성은 내부관 구멍 면적의 합과 위치가 동일하면 투과손실 곡선의 차이가 없음을 볼 수 있다. 이와 같은 결과를 이용하면 실제 매우 복잡한 소음기를 단순하게 모델링하여 해석할 수 있으므로 실제 소음기의 형상을 고려한 모델링이 가능하며 해석 시간을 줄일 수 있다. 한편 실제 소음기의 내부구조를 간단하게 설계하는 방법을 제시하고 있기 때문에 시제품을 제작할 때나 실제 자동차 소음기를 생산할 때 기존의 형태를 간단하게 설계할 수 있게 되어 생산성과 작업 시간을 향상시킬 수 있을 것으로 기대된다. 앞으로 이러한 연구를 통하여 소음기를 구성하고 있는 각각의 물리적 인자가 소음감소 특성에 미치는 영향을 정성적 및 정량적으로 파악하여 이를 바탕으로 일반적 소음기의 설계방법을 제안할 수 있을 것이다.

#### 후 기

본 연구는 한국과학재단 지정 계명대학교 저공해자동차부품기술개발센터의 지원에 의한 것임이다.

#### 참고문헌

1. J.P. Coyette, K.R. Fyfe, C.F. McCulloch,

"Modeling Interior and Exterior Acoustics using Finite Element and Boundary Element Methods." SYSNOISE Application Note, Autotech '89, Birmingham, November 15, 1989.

2. Peter van Vooren, "Comparison of FEM and BEM calculations: Evaluation of the Directivity of Acoustic Fields Diffracted by a Thin Rectangular Screen," SYSNOISE Application Note, November 19, 1990.
3. 김양한, 최재웅, 김영, "복합형 반사형 소음기의 음향학적 특성과 설계방법," 한국소음진동공학회지 제1권 1호, pp. 29~38, 1991.
4. 정영두, 김양한, "동심관형 공명기에서의 보정 길이와 공명주파수," 대한 기계학회 1997년도 춘계학술대회 논문집 A pp. 391~396, 1997.
5. SYSNOISE - theoretical manual
6. Foreman., 『Sound Analysis and Noise control』
7. SYSNOISE Rev 5.3 users manual
8. Kinsler., 『Fundamentals of Acoustics』
9. Kwang Ha Suh, Hyeong Seok Kim., "Comparing Four Pole Parameter Method and Direct Approach" The Practical Application with SYSNOISE for Silencers, 1991.
10. Kim, Y.-H. et al., "Acoustic Characteristics of Expansion Chamber with Constant Mass Flow and Steady Temperature Gradient (Theory and Numerical Simulation)," J. of Vibration and Acoustics, Trans. of ASME, Vol. 112, No.4, Oct., pp. 460~467, 1990.