

< 논 문 >

고차모드를 고려한 사각형 단순 확장관의 간편음향해석법의 개선

A Modified Simple Acoustic Analysis of Rectangular Simple Expansion Chamber with Consideration of Higher Order Modes

김 봉 준* · 정 의 봉** · 황 상 문**

Bong-Jun Kim, Weui-Bong Jeong and Sang-Moon Hwang

(1998년 11월 23일 접수 ; 1999년 2월 19일 심사완료)

Key Words : Simple Expansion Chamber Muffler(단순확장형 소음기), Four-Pole Parameters(4단자 정수), Higher Order Mode(고차 모드), Mode Matching Technique(모드 매칭법), Transmission Loss(투과손실)

ABSTRACT

The acoustic performance of reactive type single expansion chamber can be calculated theoretically by plane wave theory. But higher order model should be considered to widen the frequency range. Mode matching method has been developed to consider higher order modes, but very complicated algebra should be used. Munjal suggested a numerical collocation method, which can overcome the shortcomings of mode matching method, using the compatibility conditions for acoustic pressure and particle velocity at the junctions of area discontinuities. But the restriction of Munjal's method is that the ratio between the area of inlet(or outlet) pipe and that of chamber must be natural number.

In this paper, the new method was suggested to overcome the shortcomings of Munjal's method. The predictions by this method was also compared with those by the finite element method and Munjal's method in order to demonstrate the accuracy of the modified method presented here.

1. 서 론

일반적으로 흡·배기계에 사용되는 소음기는 반사형(reactive type)과 소실형(dissipative type)이 있다. 반사형은 단면적의 불연속으로 인한 임피던스 부정합(impedance mismatch)에 의하여 음향에너

지를 반사시켜 소음의 저감을 얻는 방식이고, 소실형은 소음기 내부에 흡음재를 사용하여 음향에너지를 열에너지로 전환시켜 소음의 저감을 얻는 방식이다. 이중 반사형 소음기의 음향특성을 조사하기 위하여 임피던스 부정합에 의한 음의 반사량을 계산하기 위한 많은 연구가 진행되어 왔는데, 덕트내의 음파를 평면파로 가정하여 단면적 불연속면에서 음의 반사량과 투과량을 계산하는 방법⁽¹⁾과 덕트내부 음파의 고차모드를 고려한 모드 매칭법⁽²⁾을 이용하는 방법, 그리고 경계요소해석법, 유한요소해석법 등의

* 부산대학교 대학원 기계공학부

** 정회원, 부산대학교 공과대학 기계공학부

수치해석 방법이 있다. 덕트내의 음파를 평면파로 가정할 경우 그 계산은 간편하지만 평면파 가정이 만족되지 않는 고주파 부분에서는 소음기의 특성을 예측할 수 없다는 단점이 있고, 유한요소해석과 경계요소해석은 계산시간이 긴 단점이 있다. 이의 해결책으로 모드매칭법을 이용하여 고차모드를 고려한 소음기의 음향해석기법에 관한 연구가 활발히 진행되어 왔다. Miles⁽³⁾는 단면적 불연속 부분에서 고차모드를 고려할 때의 반사계수를 계산하였으며, Cummings^(4~6)는 90° 와 180° 로 굽은 덕트에서 음의 투과량을 계산하였으며, El-Sharkwy⁽⁷⁾는 Miles⁽³⁾의 이론을 동심관형 단순확장 소음기에 적용하고 실험으로 이를 검증하였다. Ih와 Lee⁽⁸⁾ 그리고 Yi와 Lee^(9~11)는 임의의 입구와 출구 위치를 가지는 원통형 소음기의 4단자 정수를 계산하였고, Å bom⁽¹²⁾은 입·출구가 연장된 동심관형 소음기의 4단자 정수를 계산하였고, Ih⁽¹³⁾는 임의의 입구와 출구 위치를 가지는 사각단면 소음기의 4단자 정수를 계산하였다. 한편 Munjal⁽¹⁴⁾은 덕트의 단면적을 몇 개의 요소로 분할하여 모드매칭법이 갖는 복잡한 계산식을 피하고 비교적 간편하며 계산시간을 단축할 수 있는 고차모드를 고려한 4단자 정수 계산법을 개발하였다. 그러나 Munjal의 방법⁽¹⁴⁾은 입·출구의 단면적과 중간확장덕트의 단면적 비가 정수이어야 하고, 중간확장덕트를 그 정수로 분할한 요소중의 한 요소에 입·출구가 위치하여야 하는 제한이 있다. 따라서 본 논문은 Munjal의 방법이 가지는 문제점을 개선하여 입·출구의 단면적과 중간확장덕트의 단면적의 비가 정수가 아닌 경우에도 적용 가능한 방법을 제시하였으며, 이를 사각 단면 단순 확장형 소음기에 적용하여 4단자 정수로부터 투과손실을 구

하고 그 유용성을 검증하고자 한다.

2. 사각형단면 덕트의 음향해석법

사각형단면 덕트의 음파 방정식⁽¹⁾은 다음과 같다.

$$\frac{\partial^2 p}{\partial t^2} - a_0^2 \nabla^2 p = 0 \quad (1)$$

단,

$$\nabla^2 p = \frac{\partial^2}{\partial x^2} + \frac{\partial^2}{\partial y^2} + \frac{\partial^2}{\partial z^2}$$

여기서 a_0 는 음파의 위상속도이고 p 는 음압이고 t 는 시간이며, x, y, z 좌표계는 Fig. 1과 같다. 그리고 입자속도와 음압의 관계식은 다음과 같다.

$$\rho_0 \frac{\partial \vec{u}}{\partial t} + \nabla p = 0 \quad (2)$$

여기서 ρ_0 는 밀도이다. 덕트의 벽에서는 그 표면에 수직인 방향의 입자속도가 0이어야 하므로 다음과 같은 경계조건을 가진다.

$$\frac{\partial p}{\partial x} = 0 \quad \text{at } x=0 \text{ and } x=b \quad (3)$$

$$\frac{\partial p}{\partial y} = 0 \quad \text{at } y=0 \text{ and } y=h$$

여기서 b 는 덕트 단면적의 높이이고 h 는 덕트 단면적의 폭이다. 이때 음파방정식의 해는 다음식과 같다

$$p(x, y, z, t) = \sum_m \sum_n [\{ A_{m,n} e^{-jk_{z,m,n}z} + B_{m,n} e^{+jk_{z,m,n}z} \} \times \cos\left(\frac{m\pi x}{b}\right) \cos\left(\frac{n\pi y}{h}\right)] e^{j\omega t} \quad (4)$$

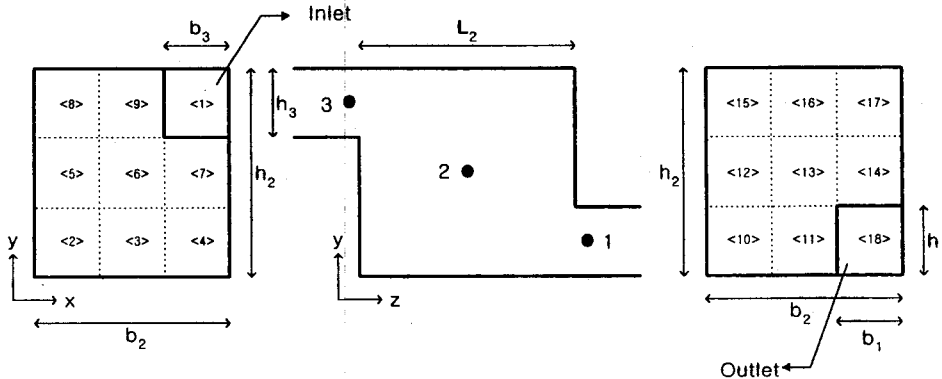


Fig. 1 An expansion chamber muffler with section details

$$(b_2 = h_2 = 3b_1 = 3h_1 = 3b_3 = 3h_3)$$

단,

$$k_{z,m,n}^2 = k_0^2 - \left(\frac{m\pi}{b}\right)^2 - \left(\frac{n\pi}{h}\right)^2$$

$$k_0 = \frac{\omega}{a_0}$$

z방향의 입자속도는 다음과 같이 된다.

$$u_z(x, y, z, t) = \sum_m \sum_n \left[\frac{k_{z,m,n}}{\omega \rho_0} \{ A_{m,n} e^{-jk_{z,m,n}z} - B_{m,n} e^{+jk_{z,m,n}z} \} \cos\left(\frac{m\pi x}{b}\right) \cos\left(\frac{n\pi y}{h}\right) \right] e^{j\omega t} \quad (5)$$

2.1 Munjal의 방법⁽¹³⁾

Munjal은 Fig. 1과 같이 덕트의 단면적을 9개의 요소로 분할한 후 각 단면에서 음압과 입자속도의 연속식을 이용하여 각 요소에서 한 점씩을 채택하여 다음과 같은 조건식을 구하였다. 즉 입구 덕트의 경계조건에서

$$A_{3,0,0} + B_{3,0,0} = \sum_m \sum_n \left[\{ A_{2,m,n} + B_{2,m,n} \} \times \cos\left(\frac{m\pi}{b_2} x_q\right) \cos\left(\frac{n\pi}{h_2} y_q\right) \right] \quad q = \langle 1 \rangle \quad (6)$$

$$k_0(A_{3,0,0} - B_{3,0,0}) = \sum_m \sum_n \left[k_{2,z,m,n} \{ A_{2,m,n} - B_{2,m,n} \} \cos\left(\frac{m\pi}{b_2} x_q\right) \cos\left(\frac{n\pi}{h_2} y_q\right) \right] \quad q = \langle 1 \rangle \quad (7)$$

벽면조건에서

$$\sum_m \sum_n \left[k_{2,z,m,n} \{ A_{2,m,n} - B_{2,m,n} \} \cos\left(\frac{m\pi}{b_2} x_q\right) \times \cos\left(\frac{n\pi}{h_2} y_q\right) \right] = 0 \quad q = \langle 2 \rangle \sim \langle 9 \rangle \quad (8)$$

$$\sum_m \sum_n \left[k_{2,z,m,n} \{ A_{2,m,n} e^{-jk_{2,z,m,n}l_2} - B_{2,m,n} e^{+jk_{2,z,m,n}l_2} \} \times \cos\left(\frac{m\pi}{b_2} x_q\right) \cos\left(\frac{n\pi}{h_2} y_q\right) \right] = 0 \quad q = \langle 10 \rangle \sim \langle 17 \rangle \quad (9)$$

출구 덕트의 경계조건에서

$$\sum_m \sum_n \left[\{ A_{2,m,n} e^{-jk_{2,z,m,n}l_2} + B_{2,m,n} e^{+jk_{2,z,m,n}l_2} \} \times \cos\left(\frac{m\pi}{b_2} x_q\right) \cos\left(\frac{n\pi}{h_2} y_q\right) \right] = A_{1,0,0} + B_{1,0,0} \quad q = \langle 18 \rangle \quad (10)$$

$$\sum_m \sum_n \left[k_{2,z,m,n} \{ A_{2,m,n} e^{-jk_{2,z,m,n}l_2} - B_{2,m,n} e^{+jk_{2,z,m,n}l_2} \} \times \cos\left(\frac{m\pi}{b_2} x_q\right) \cos\left(\frac{n\pi}{h_2} y_q\right) \right] = k_0 \{ A_{1,0,0} - B_{1,0,0} \} \quad q = \langle 18 \rangle \quad (11)$$

의 관계식을 구하고 이 식 (6)~(11)을 이용하여 미지수 $A_{3,0,0}$, $B_{3,0,0}$, $A_{2,m,n}$, $B_{2,m,n}$ ($m, n = 0 \sim 2$), $A_{1,0,0}$, $B_{1,0,0}$ 을 계산하여 소음특성을 계산하였다. 여기서 아래첨자 1, 2, 3은 Fig. 1에서 점으로 표시된 지점 1, 2, 3을 의미한다. 하지만 Munjal의 방법은 입·출구덕트와 중간확장덕트의 면적비가 정수이고 이 정수로 중간확장덕트를 분할한 요소중의 한곳에 입·출구덕트가 위치할 경우에는 잘 적용되지만 입·출구덕트의 위치가 분할한 요소중의 한 요소와 일치하지 않을 경우에는 음압과 입자속도가 일치시키는 점의 선택에 따라 그 결과가 달라지며, 식 (6)~(11)에서 볼 수 있듯이 Munjal의 방법으로는 입·출구의 단면적을 고려할 수 없어서 입·출구덕트와 중간확장덕트의 면적비가 정수가 아닐 경우에는 적용할 수 없는 단점이 있다.

2.2 제안하는 방법

Munjal의 방법의 단점을 개선하기 위하여 경계조건 적용 시 요소내의 한 점이 아닌 요소면적 전체를 고려하여 음압과 입자속도의 연속조건 대신 힘과 체적속도 연속조건을 사용하였다. 각 요소에서 음압에 의한 힘은

$$f(x, y, z, t) = \int_{x_1}^{x_2} \int_{y_1}^{y_2} p(x, y, z, t) dx dy = \{ A_{0,0} e^{-jk_{z,0,0}z} + B_{0,0} e^{+jk_{z,0,0}z} \} (x_2 - x_1)(y_2 - y_1) + \sum_{n=1}^2 \left[\{ A_{0,n} e^{-jk_{z,0,n}z} + B_{0,n} e^{+jk_{z,0,n}z} \} \frac{h}{n\pi} \times \left\{ \sin\left(\frac{n\pi}{h} y_2\right) - \sin\left(\frac{n\pi}{h} y_1\right) \right\} (x_2 - x_1) \right] + \sum_{m=1}^2 \left[\{ A_{m,0} e^{-jk_{z,m,0}z} + B_{m,0} e^{+jk_{z,m,0}z} \} \frac{b}{m\pi} \times \left\{ \sin\left(\frac{m\pi}{b} x_2\right) - \sin\left(\frac{m\pi}{b} x_1\right) \right\} (y_2 - y_1) \right] + \sum_{m=1}^2 \sum_{n=1}^2 \left[\{ A_{m,n} e^{-jk_{z,m,n}z} + B_{m,n} e^{+jk_{z,m,n}z} \} \times \frac{bh}{mn\pi^2} \left\{ \sin\left(\frac{m\pi}{b} x_2\right) - \sin\left(\frac{m\pi}{b} x_1\right) \right\} \times \left\{ \sin\left(\frac{n\pi}{h} y_2\right) - \sin\left(\frac{n\pi}{h} y_1\right) \right\} \right] \quad (12)$$

이고, 체적속도의 식은

$$\begin{aligned}
 v_z(x, y, z) &= \int_{x_1}^{x_2} \int_{y_1}^{y_2} u_z(x, y, z, t) dx dy \\
 &= \frac{1}{\omega\rho_0} k_{z,0,0} \{A_{0,0} e^{-jk_{z,0,0}z} - B_{0,0} e^{+jk_{z,0,0}z}\} \\
 &\quad \times (x_2 - x_1)(y_2 - y_1) + \frac{1}{\omega\rho_0} \sum_{n=1}^{\infty} [k_{z,0,n} \{A_{0,n} \\
 &\quad \times e^{-jk_{z,0,n}z} - B_{0,n} e^{+jk_{z,0,n}z}\} - \frac{h}{n\pi} \left\{ \sin\left(\frac{n\pi}{h} y_2\right) \right. \\
 &\quad \left. - \sin\left(\frac{n\pi}{h} y_1\right) \right\} (x_2 - x_1)] \\
 &\quad + \frac{1}{\omega\rho_0} \sum_{m=1}^{\infty} [k_{z,m,0} \{A_{m,0} e^{-jk_{z,m,0}z} - B_{m,0} e^{+jk_{z,m,0}z}\} \\
 &\quad \times \frac{b}{m\pi} \left\{ \sin\left(\frac{m\pi}{b} x_2\right) - \sin\left(\frac{m\pi}{b} x_1\right) \right\} (y_2 - y_1)] \\
 &\quad + \frac{1}{\omega\rho_0} \sum_{m=1}^{\infty} \sum_{n=1}^{\infty} [k_{z,m,n} \{A_{m,n} e^{-jk_{z,m,n}z} - B_{m,n} \\
 &\quad \times e^{+jk_{z,m,n}z}\} - \frac{bh}{mn\pi^2} \times \left\{ \sin\left(\frac{m\pi}{b} x_2\right) - \sin\left(\frac{m\pi}{b} x_1\right) \right\} \\
 &\quad \times \left\{ \sin\left(\frac{n\pi}{h} y_2\right) - \sin\left(\frac{n\pi}{h} y_1\right) \right\}] \quad (13)
 \end{aligned}$$

이 된다.

Fig. 1과 같이 요소를 분할하고 입구와 가운데 덕트가 만나는 요소와 가운데 덕트와 출구가 만나는 요소에서는 힘과 체적속도 연속조건을 그 외의 요소에는 체적속도가 0이 되는 조건을 사용하면 단면적 불일치 부분에서의 경계조건식은 입구덕트의 경계조건에서

$$(A_{3,0,0} + B_{3,0,0})b_3 h_3 = [f(x, y, x)]_{z=0} \quad \text{element} = \langle 1 \rangle \quad (14)$$

$$\frac{k_0}{\omega\rho_0} (A_{3,0,0} - B_{3,0,0})b_3 h_3 = [v_z(x, y, x)]_{z=0} \quad \text{element} = \langle 1 \rangle \quad (15)$$

벽면조건에서

$$[v_z(x, y, x)]_{z=0} = 0 \quad \text{element} = \langle 2 \rangle \sim \langle 9 \rangle \quad (16)$$

$$[v_z(x, y, x)]_{z=l_2} = 0 \quad \text{element} = \langle 10 \rangle \sim \langle 17 \rangle \quad (17)$$

입구덕트의 경계조건에서

$$[f(x, y, x)]_{z=l_2} = (A_{1,0,0} + B_{1,0,0})b_1 h_1 \quad \text{element} = \langle 18 \rangle \quad (18)$$

$$[v_z(x, y, x)]_{z=l_2} = \frac{k_0}{\omega\rho_0} (A_{1,0,0} - B_{1,0,0})b_1 h_1 \quad \text{element} = \langle 18 \rangle \quad (19)$$

와 같이 표현되어진다.

한편 Fig. 1과 같은 단순 확장형 소음기의 4단자 정수는 다음 식 (20)과 같이 나타내어진다.

$$\begin{bmatrix} p_3 \\ Y_3 w_3 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} T_{11} & T_{12} \\ T_{21} & T_{22} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} p_1 \\ Y_1 w_1 \end{bmatrix} \quad (20)$$

여기서 아래 첨자 1과 3은 Fig. 1의 1 지점과 3 지점을 의미하며, w 는 질량속도이고, Y 는 특성 임피던스(characteristic impedance)로 $\frac{a_0}{S}$ 인데 S 는 덕트의 단면적이다. 식 (20)에서 p 와 w 는 식 (4)와 식 (5)에서 평면파만을 고려할 경우를 이용하여 나타내면 다음과 같이 되고

$$\begin{aligned}
 p_3 &= \frac{1}{S_3} \int \int \sum_m \sum_n p_{3,m,n}(x, y) dx dy \\
 &= p_{3,0,0} = A_{3,0,0} + B_{3,0,0} \quad (21)
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 p_1 &= \frac{1}{S_1} \int \int \sum_m \sum_n p_{1,m,n}(x, y) dx dy \\
 &= p_{1,0,0} = A_{1,0,0} + B_{1,0,0} \quad (22)
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 w_3 &= \rho_0 \int \int \sum_m \sum_n u_{3,m,n}(x, y) dx dy \\
 &= \frac{S_3}{a_0} (A_{3,0,0} - B_{3,0,0}) \quad (23)
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 w_1 &= \rho_0 \int \int \sum_m \sum_n u_{1,m,n}(x, y) dx dy \\
 &= \frac{S_1}{a_0} (A_{1,0,0} - B_{1,0,0}) \quad (24)
 \end{aligned}$$

ξ_1 을 출구덕트($z = l_2$)에서의 고유 음향임피던스(specific acoustic impedance)라 하면 4단자 정수의 계산법은 다음과 같으므로

$$T_{11} = \left(\frac{p_3}{p_1} \right)_{\xi_1 \rightarrow \infty} = \left(\frac{A_{3,0,0} + B_{3,0,0}}{2A_{1,0,0}} \right)_{B_{1,0,0} = A_{1,0,0}} \quad (25)$$

$$T_{12} = \left(\frac{p_3}{Y_1 w_1} \right)_{\xi_1 \rightarrow 0} = \left(\frac{A_{3,0,0} + B_{3,0,0}}{2A_{1,0,0}} \right)_{B_{1,0,0} = -A_{1,0,0}} \quad (26)$$

$$T_{21} = \left(\frac{Y_3 w_3}{p_1} \right)_{\xi_1 \rightarrow \infty} = \left(\frac{A_{3,0,0} - B_{3,0,0}}{2A_{1,0,0}} \right)_{B_{1,0,0} = A_{1,0,0}} \quad (27)$$

$$T_{22} = \left(\frac{Y_3 w_3}{Y_1 w_1} \right)_{\xi_1 \rightarrow 0} = \left(\frac{A_{3,0,0} - B_{3,0,0}}{2A_{1,0,0}} \right)_{B_{1,0,0} = -A_{1,0,0}} \quad (28)$$

식 (14)~(19)을 이용하여 식 (25)~(28)의 4단자 정수를 구할 수 있다.

투과손실은 4단자 정수를 이용하여 식 (25)~(28)을 다음 식 (29)에 대입하여 구하거나

$$\text{Transmission Loss[dB]} = 20 \times \log_{10} \left\{ \sqrt{\frac{Y_1}{Y_3}} \left| \frac{T_{11} + T_{12} + T_{21} + T_{22}}{2} \right| \right\} \quad (29)$$

무반사 조건에 의하여 다음 식 (30)을 이용하여 구할 수 있다.

$$\text{Transmission Loss[dB]} = 20 \log_{10} \left(\sqrt{\frac{S_3}{S_1}} \left| \frac{A_{3,0,0}}{A_{1,0,0}} \right|_{B_{1,0,0}=0} \right) \quad (30)$$

3. 단순확장형 소음기에의 적용

Munjal의 방법으로 구한 4단자 정수와 본 논문에서 제안하는 4단자 정수를 비교하기 위하여 식 (29)를 이용하여 소음기의 투과 손실을 계산하여

비교하였다.

Fig. 1 ($L_2 = 0.225$ m, $b_2 = h_2 = 0.18$ m)과 같이 Munjal이 제안한 방법이 잘 적용되는 입·출구덕트의 크기와 위치를 가진 단순확장형 소음기의 투과손

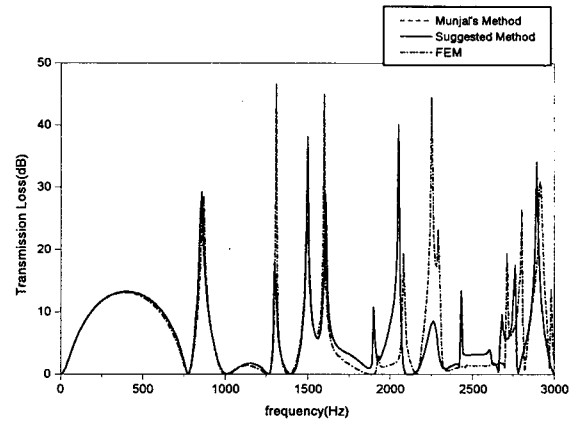


Fig. 2 Transmission Loss of an expansion chamber muffler of Fig. 1 (The result of suggested method is coincident with that of Munjal's method)

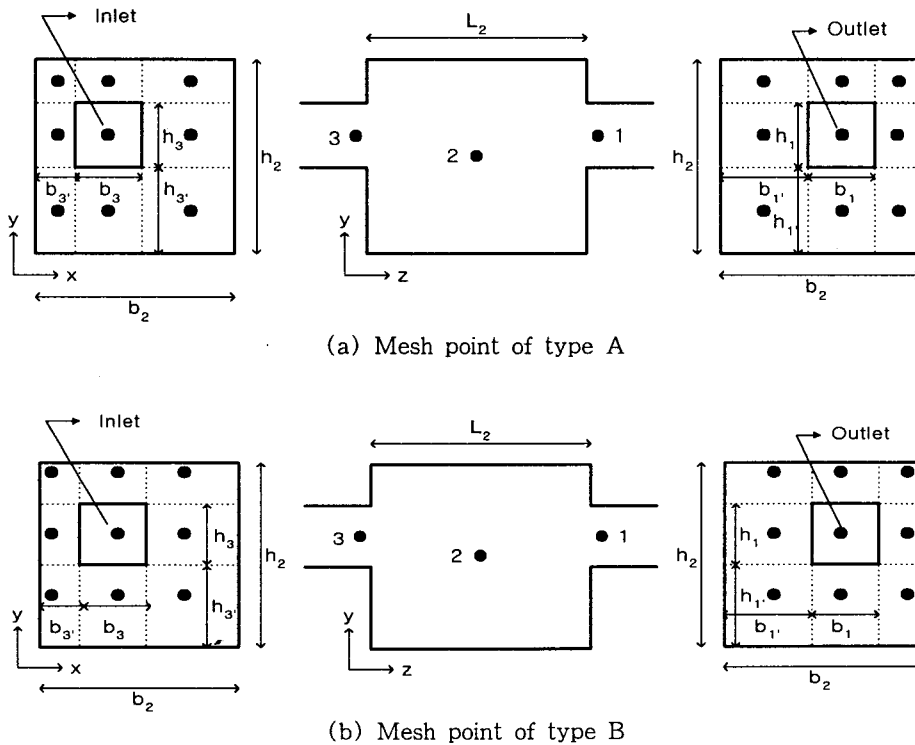


Fig. 3 An expansion chamber muffler with section detail

$$\begin{aligned} & (b_2 = h_2 = 3b_1 = 3h_1 = 3b_3 = 3h_3) \\ & \left(= \frac{9}{4} b_1 = \frac{9}{4} h_1 = \frac{9}{2} b_3 = \frac{9}{4} h_3 \right) \end{aligned}$$

실을 계산하고 그 결과를 Fig. 2에 나타내었다. Fig. 2에서 볼 수 있듯이 Munjal의 방법과 제안하는 방법이 완전히 일치하며 유한요소법으로 구한 투과손실과도 잘 맞음을 알 수 있다. 그러므로 입·출구덕트와 확장덕트의 단면적 비가 정수배이고 확장덕트를 그 정수로 나눈 요소와 입·출구덕트의 위치가 일치할 때는 Munjal의 방법과 제안하는 방법이 모두 단순확장형 소음기의 음향특성을 잘 예측함을 보여준다.

Fig. 3 ($L_2 = 0.225 \text{ m}$, $b_2 = h_2 = 0.18 \text{ m}$)과 같이 입·출구덕트의 위치가 확장덕트를 그 정수로 나눈 요소와 일치하지 않을 때에는 경계조건식 (6)~(11)을 적용시키는 각 요소의 점을 선택하여야 한다. Fig. 3(a)의 점과 Fig. 3(b)의 점을 이용한 경우를 Fig. 4에서 비교하였는데 점의 선택에 따라 그

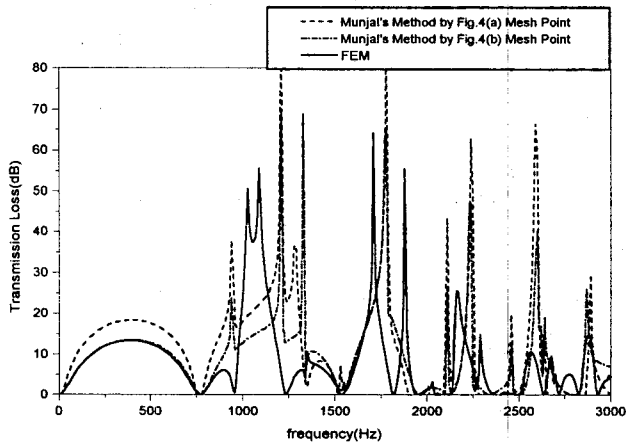


Fig. 4 Contradiction of Munjal's method (Transmission Loss of an expansion chamber muffler of Fig. 3)

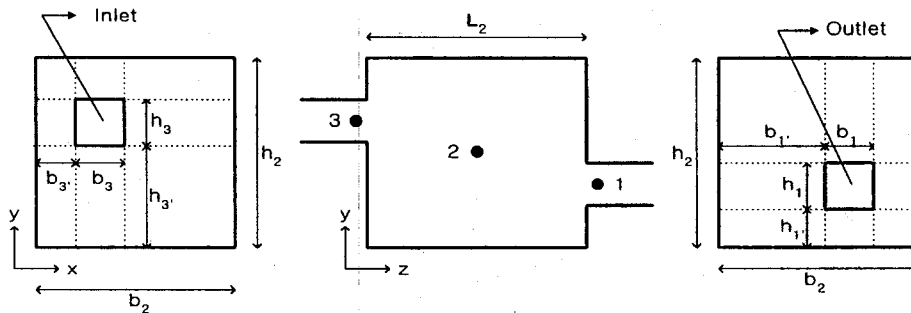
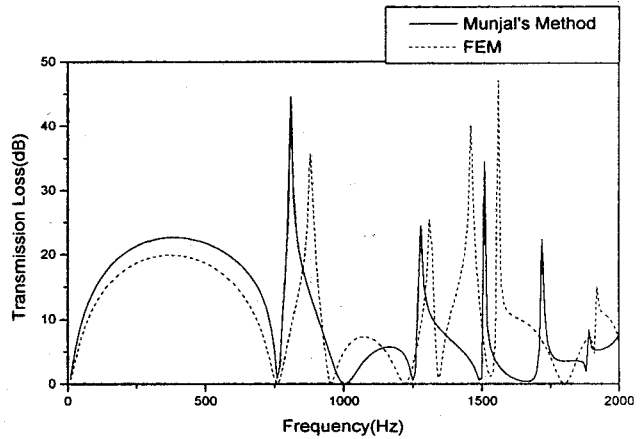


Fig. 5 An expansion chamber muffler with section detail

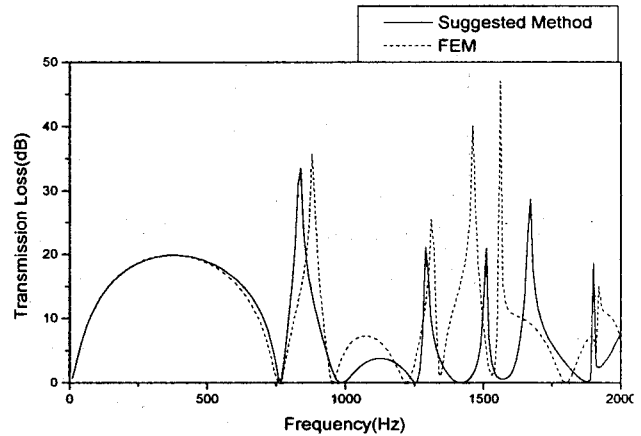
$$\left(\begin{aligned} b_2 = h_2 = \frac{9}{2} b_1 = \frac{9}{2} h_1 = \frac{9}{2} b_3 = \frac{9}{2} h_3 \\ = \frac{18}{11} b_1 = 6 h_1 = \frac{18}{11} b_3 = 6 h_3 \end{aligned} \right)$$

투과손실이 다르게 계산되어지는 모순이 발생하는 것을 알 수 있다.

Fig. 5 ($L_2 = 0.225 \text{ m}$, $b_2 = h_2 = 0.18 \text{ m}$)와 같이 입·



(a) Comparison of Munjal's method and FEM



(b) Comparison of suggested method and FEM

Fig. 6 Transmission Loss of an expansion chamber muffler of Fig. 5

출구덕트의 단면적이 0.0016 m^2 이고 확장덕트의 단면적이 0.0324 m^2 이어서 단면적의 비가 정수배가 아닌 경우의 투과손실을 계산하고 그 결과를 Fig. 6에 나타내었는데 Munjal의 방법을 사용한 경우 평

면파 이론이 적용되는 (0,1)모드 차단주파수인 944 Hz 이하에서 유한요소해석 결과와 많은 차이를 보이는데, 제안하는 방법은 유한요소해석 결과와 잘 맞음을 보인다.

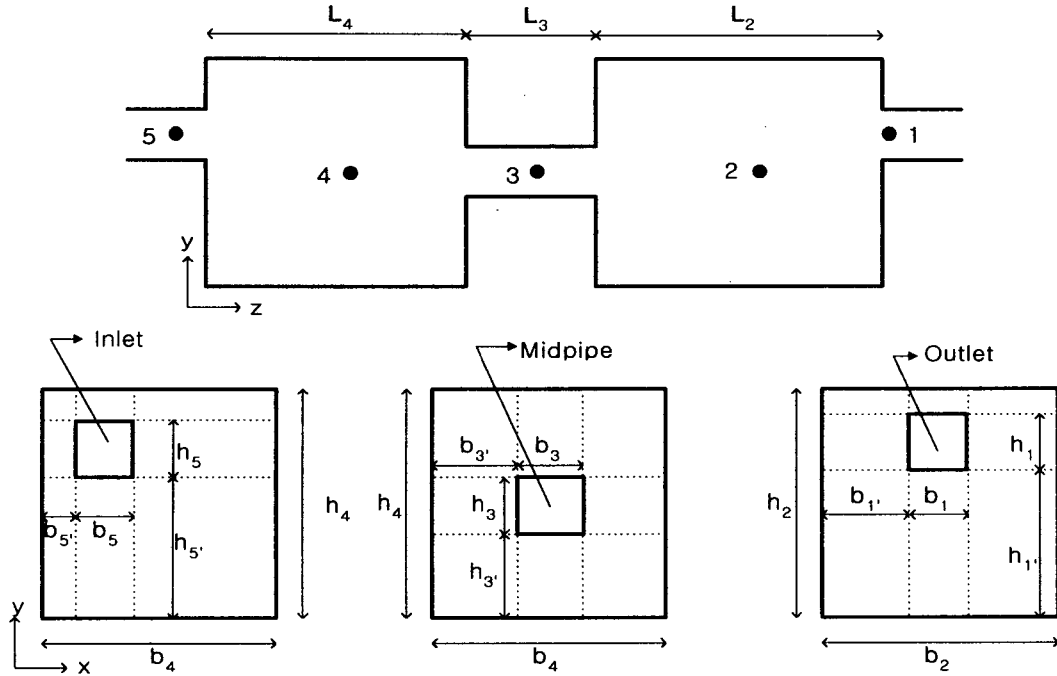
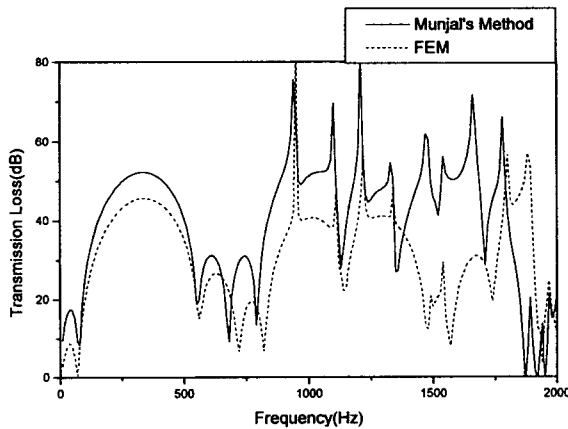
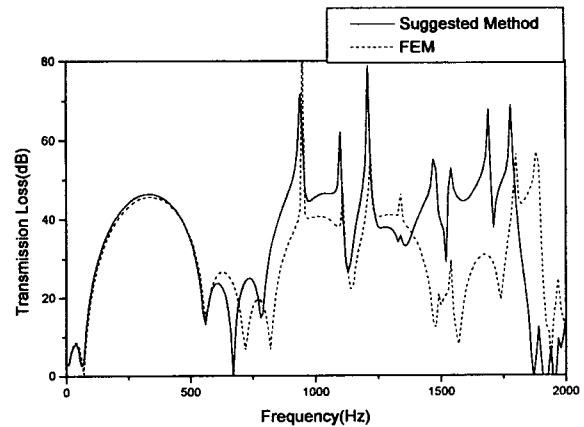


Fig. 7 An expansion chamber muffler with section detail

$$\left(\begin{aligned} b_2 = h_2 = b_4 = h_4 &= \frac{9}{2} b_1 = \frac{9}{2} h_1 \\ &= \frac{9}{2} b_3 = \frac{9}{2} h_3 = \frac{9}{2} b_5 = \frac{9}{2} h_5 = \frac{18}{7} b_1 \\ &= \frac{18}{11} h_1 = \frac{18}{7} b_3 = \frac{18}{7} h_3 = 6 b_5 = \frac{18}{11} h_5 \end{aligned} \right)$$



(a) Comparison of Munjal's method and FEM



(b) Comparison of suggested method and FEM

Fig. 8 Transmission Loss of an expansion chamber muffler of Fig. 7

2단 단순확장형 소음기의 경우도 Munjal의 방법과 제안하는 방법을 적용하여 비교하였다. Fig. 7 ($L_2=0.3$ m, $L_3=0.2$ m, $L_4=0.225$ m, $b_2=h_2=0.18$ m)과 같이 단면적의 비가 정수비가 아닌 2단 단순확장형 소음기의 투과손실을 Fig. 8에 나타내었는데 이 경우도 Munjal의 방법보다 제시하는 방법이 유한요소해석 결과와 더 잘 일치함을 알 수 있고, 특히 단면적 비가 정수비가 아닌 경우 (0,1) 모드 차단주파수이하에서 Munjal의 방법이 가지는 문제점을 본 논문에서 제안하는 방법으로 해결할 수 있음을 볼 수 있다.

4. 결 론

(1) Munjal 방법의 단점을 개선하여 사각형 단순 확장형 소음기에서 입·출구덕트의 위치와 면적의 제한 없이 고차모드를 고려하는 소음기의 음향특성 계산법을 제안하였다

(2) 1단, 2단 단순확장형 소음기에 본 논문에서 제안하는 방법과 Munjal의 방법을 적용하여 유한요소법의 결과와 비교하여 Munjal의 방법의 문제점이 본 논문에서 제안하는 방법으로 개선됨을 검증하였다.

후 기

이 논문은 교육부 학술연구조성비에 의한 대학부설 중점연구소 과제의 일부로 연구되었습니다. 관계자 여러분께 감사드립니다.

참 고 문 헌

- (1) M. L. Munjal, 1987, *Acoustics of Ducts and Mufflers*, New York.
- (2) R. Mittra and S.W.Lee, 1971, *Analytical Techniques in the Theory of Guided Waves*, Macmillan, New York.
- (3) J. Miles, 1944, "The Reflection of Sound due to Change in Cross Section of a Circular", *Journal of the Acoustical Society of America*, Vol. 16, pp. 14~19.
- (4) A. Cummings, 1974, "Sound Transmission in Curved Duct Bends", *Journal of Sound and Vibration*, Vol. 35, pp. 451~477.
- (5) A. Cummings, 1975, "Sound Transmission in

180° Duct Bends of Rectangular Section", *Journal of Sound and Vibration*, Vol. 41, pp. 321~334.

- (6) A. Cummings, 1975, "Sound Transmission in a Folded Annular Duct", *Journal of Sound and Vibration*, Vol. 41, pp. 375~379.
- (7) A. I. El-Sharkawy and A.H.Nayfeh, 1978, "Effect of an Expansion Chamber on the Propagation of Sound in Circular Ducts", *Journal of the Acoustical Society of America*, Vol. 63, pp. 667~674.
- (8) Jeong-Guon Ih and Byung-Ho Lee, 1985, "Analysis of Higher-Order Mode Effects in the Circular Expansion Chamber with Mean Flow", *Journal of the Acoustical Society of America*, Vol. 77, pp. 1377~1388.
- (9) Sung-Il Yi and Byung-Ho Lee, 1986, "Three-Dimensional Acoustic Analysis of Circular Expansion Chamber with a Side Inlet and a Side Outlet", *Journal of the Acoustical Society of America*, Vol. 79, pp. 1299~1306.
- (10) Sung-Il Yi and Byung-Ho Lee, 1987, "Three-Dimensional Acoustic Analysis of Circular Expansion Chamber with Side Inlet and End Outlet", *Journal of the Acoustical Society of America*, Vol. 81, pp. 1279~1287.
- (11) J. G. Ih and B. H. Lee, 1987, "Theoretical Prediction of Transmission Loss of Circular Reversing Chamber Mufflers", *Journal of Sound and Vibration*, Vol. 112, pp. 261~272.
- (12) M. Abom, 1990, "Derivation of Four-Pole Parameters Including Higher Order Mode Effects for Expansion Chamber Mufflers with Extended Inlet and Outlet", *Journal of Sound and Vibration*, Vol. 137, pp. 403~418.
- (13) J. G. Ih, 1992, "The Reactive Attenuation of Rectangular Plenum Chambers", *Journal of Sound and Vibration*, Vol. 157, pp. 93~122.
- (14) M. L. Munjal, 1987, "A Simple Numerical Method for Three-Dimensional Analysis of Simple Expansion Chamber Mufflers of Rectangular as well as Circular Cross-section with a Stationary Medium", *Journal of Sound and Vibration*, Vol. 116, pp. 71~88.