

〈논 문〉

# 원형단순확장관의 입·출구 위치와 단면 크기를 고려한 음향해석법

## Acoustic Analysis of Circular Simple Expansion Chamber with Arbitrary Location and Cross-Section Area of Inlet/Outlet

김 봉 준\* · 정 의 봉\*\* · 황 상 문\*\*

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

(1999년 3월 18일 접수 ; 1999년 7월 5일 심사완료)

**Key Words :** Simple Expansion Chamber Muffler(단순확장형 소음기), Transmission Loss(투과손실), Higher order Mode(고차 모드), Gauss Integration(가우스 적분), Bessel Function(베셀 함수)

### ABSTRACT

There are many theoretical investigations to analyze higher order mode of reactive type single expansion chambers with offset inlet/outlet locations. But the conventional method has the restriction that the ratio between the area of inlet(or outlet) pipe and that of chamber must be natural number. In this paper, a new method was suggested to apply the Kim's method to silencer with circular cross-section. Not only the offset location but also the magnitude of cross-section area of inlet/outlet pipe can be considered by the suggested method. The predictions by this new method also compared with those by the finite element method and Munjal's method in order to verify the accuracy of the suggested method presented here.

### 1. 서 론

관을 통하여 소음이 배출될 때 이를 줄이기 위하여 일반적으로 사용되는 대표적인 음향학적 기구로는 소음기가 있다. 소음기의 목적은 소음의 최대감소와 함께 최소의 부하상태를 가지는 것으로 이런 목적을 만족시키는 소음기를 설계하기 위해서는 소음기의 성능을 예측할 수 있는 방법이 필요하다. 단순확장형 소음기의 해석법은 평면파 이론을 이용하는 방법<sup>(1)</sup>과 고차모드를 고려하여 해석하는 방법<sup>(2~11)</sup>과 유한요소해석법<sup>(12)</sup>을 이용한 수치해석법이

있다.

고차모드를 고려한 해석법 중에서 입·출구의 위치가 편심된 경우를 해석한 연구로는 소음기내부의 속도포텐셜을 구하여 소음기의 특성을 해석한 Ih<sup>(5)</sup>의 연구와 그린함수(Green's function)를 이용하여 소음기의 내부음장을 유도하여, 입·출구가 중간확장덕트의 원통면에 위치한 경우의 소음기의 특성도 해석한 Kim<sup>(6,7)</sup>의 연구와 입·출구와 중간확장덕트가 만나는 단면을 채택모드의 개수와 맞도록 몇 개의 요소로 분할하여 소음기의 특성을 해석한 Munjal<sup>(8)</sup>의 연구가 있고, Kim<sup>(11)</sup>은 Munjal의 방법<sup>(8)</sup>이 가지는 문제점을 해결하여 사각형 단면 단순확장 소음기에서 임의의 크기를 가지는 입·출구가 임의의 위치에 존재할 때의 해석법을 제안하였다.

본 논문에서는 Kim<sup>(11)</sup>의 방법을 원형단면 단순확

\* 부산대학교 대학원 기계공학부

\*\* 정회원, 부산대학교 기계공학부 및 기계기술연구소

장 소음기에 적용할 수 있는 방법을 제시하고, 입·출구단면의 크기와 위치를 고려한 소음기의 음향해석법을 제시한다. 그리고 제안한 방법을 소음기 해석에 적용하여 그 유용성을 검증하고자 한다.

## 2. 원형단면 덕트의 음향해석법

원형단면 덕트의 음파 방정식 (1)은 다음과 같다.

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

단,

$$\nabla^2 = \frac{\partial^2}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} + \frac{1}{r^2} \frac{\partial^2}{\partial \theta^2} + \frac{\partial^2}{\partial z^2}$$

여기서  $a_0$ 는 음파의 위상속도이고  $p$ 는 음압이고  $t$ 는 시간이며,  $\theta$ 는 Fig. 1에서 원주방향이다. 그리고 입자속도와 음압의 관계식은 다음과 같다.

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

여기서  $\rho_0$ 는 밀도이다. 덕트의 벽에서는 그 표면에 수직인 방향의 입자속도가 0이어야 하므로 다음과 같은 경계조건을 가진다.

$$\frac{\partial p}{\partial r} = 0 \quad \text{at } r=R \quad (3)$$

여기서  $R$ 은 덕트의 반지름이다. 이때 음파방정식의 해는 다음 식과 같고

$$p(r, \theta, z, t) = \sum_m \sum_n \left[ \{ A_{m,n} e^{-jk_{z,m,n}z} + B_{m,n} e^{+jk_{z,m,n}z} \} \times J_m(k_{r,m,n}r) e^{jm\theta} \right] e^{j\omega t} \quad (4)$$

단,

$$k_{z,m,n}^2 = k_0^2 - k_{r,m,n}^2$$

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

여기서  $A_{m,n}$ ,  $B_{m,n}$ 은 반경방향으로  $m$ 차, 원주방향으로  $n$ 차모드의 입사파와 반사파의 진폭이다. 그리고  $k_{r,m,n}R$ 은 다음 식의 근이다.

$$\frac{dJ_m(x)}{dx} = 0 \quad (5)$$

여기서  $J_m$ 은  $m$ 차의 베셀함수이다.  $z$ 방향의 입자속도는 다음과 같이 된다.

$$u_z(r, \theta, z, t) = \sum_m \sum_n \left[ \frac{k_{z,m,n}}{\omega \rho_0} \{ A_{m,n} e^{-jk_{z,m,n}z} - B_{m,n} e^{+jk_{z,m,n}z} \} J_m(k_{r,m,n}r) e^{jm\theta} \right] e^{j\omega t} \quad (6)$$

### 2.1 Munjal의 방법<sup>(8)</sup>

Munjal은 덕트의 단면적이 갑자기 변하는 단면에서 경계조건을 적용할 18개의 점을 Fig. 1에서와 같이  $z$ 가 0일 때와  $z$ 가  $l_2$ 일 때의 중간확장챔버에 각각 9개씩 채택한 후 각 점에서 음압과 입자속도의 연속을 이용하여 다음과 같은 조건식을 구하였다. 즉  $z$ 가 0일 때의 입구와 연결된 점에서 음압의 연속조건으로부터

$$A_{3,0,0} + B_{3,0,0} = [p(r, \theta, z)]_{z=0} \quad (7)$$

입자속도의 연속조건으로부터

$$\frac{k_0}{\omega \rho_0} (A_{3,0,0} - B_{3,0,0}) = [u_z(r, \theta, z)]_{z=0} \quad (8)$$

의 조건식을 얻을 수 있다. 여기서  $A_{3,0,0}$ 와  $B_{3,0,0}$ 는 입구덕트에서 입사하는 평면파와 반사하는 평면파의 진폭이다. 그리고 벽면에서 입자속도가 0이라는 조건을 이용하여  $z$ 가 0일 때의 입구와의 연결점을 제외한 나머지 8개의 경계조건 적용점으로부터

$$[u_z(r, \theta, z)]_{z=0} = 0 \quad (9)$$

의 조건식을 얻을 수 있다.  $z$ 가  $l_2$ 일 때도 마찬가지로 다음의 조건식을 얻을 수 있다.

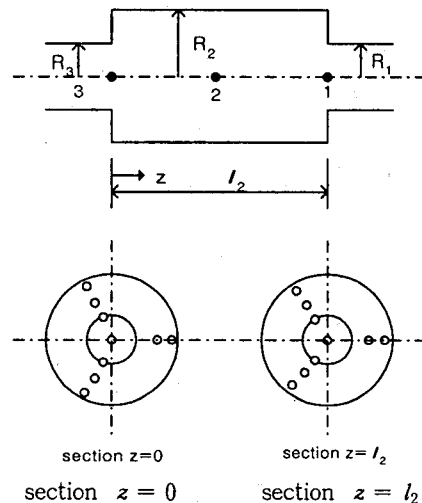


Fig. 1 An expansion chamber muffler with section details

$$[p(r, \theta, z)]_{z=l_2} = A_{1,0,0} + B_{1,0,0} \quad (10)$$

$$[u_z(r, \theta, z)]_{z=l_2} = \frac{k_0}{\omega\rho_0}(A_{1,0,0} - B_{1,0,0}) \quad (11)$$

$$[u_z(r, \theta, z)]_{z=l_2} = 0 \quad (12)$$

여기서  $A_{1,0,0}$ 와  $B_{1,0,0}$ 는 출구덕트에서 입사하는 평면파와 반사하는 평면파의 진폭이다. 이 식 (7)~(12)를 이용하여 미지수  $A_{1,0,0}, B_{1,0,0}, A_{3,0,0}, B_{3,0,0}, A_{2,m,n}, B_{2,m,n}$  ( $m, n=0\sim 2$ )을 계산하여 소음특성을 계산하였다. 여기서 아래첨자 1, 2, 3은 Fig. 1에서 점으로 표시된 지점 1, 2, 3을 의미한다. 하지만 Munjal의 방법은 입·출구와 중간확장덕트의 단면적비가 정수일 경우만 적용가능하고, 또한 연속조건 적용점의 개수는 입·출구와 중간확장덕트의 단면적비와 같아야 하므로 식 (7)~(12)로 얻을 수 있는 조건식의 개수가 정해져  $m$ 과  $n$ 이 고정되어 해석 가능 주파수 범위를 조절할 수 없는 단점이 있다.

### 2.2 제안하는 방법

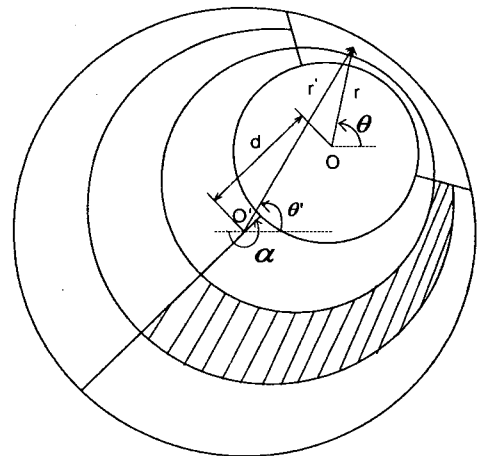
본 연구에서는 Munjal의 방법의 단점을 개선하기 위하여, 각 요소면적 전체를 고려하여 음압과 입사 속도의 연속조건 대신 힘과 체적속도 연속조건을 사용하여 입·출구와 중간확장덕트의 단면적비가 정수가 아닌 경우도 해석가능하도록 하였으며, 그 단면적비로부터  $m$ 과  $n$ 이 결정되는 단점을 개선하여 해석가능 주파수 범위를 조절할 수 있도록 하였다.

Fig. 2와 같이 입(출)구덕트의 반지름  $R_1$ , 중간확장 챔버의 반지름  $R_2$ , 입(출)구의 중심과 중간확장 챔버의 중심사이의 거리  $d$ , 각도가  $\alpha$ 만큼 떨어져 있는 소음기를 고려한다. Fig. 2와 같이 중간확장 챔버의 중심을 기준으로 하는 극좌표계를  $r', \theta'$ 라 정의하면 Fig. 2의 빗금친 부분과 같은 요소에서 음압에 의한 힘  $f(r', \theta', z)$ 은

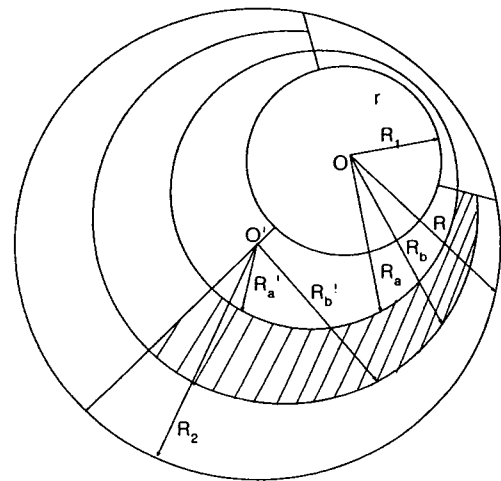
$$\begin{aligned} f(r', \theta', z) &= \int_{\theta'_a(r')}^{\theta'_b(r')} \int_{R'_a(\theta')}^{R'_b(\theta')} p(r', \theta', z) r' dr' d\theta' \\ &= \sum_m \sum_n \left\{ A_{m,n} e^{-jk_{z,m,n}z} + B_{m,n} e^{+jk_{z,m,n}z} \right\} \\ &\quad \times \int_{\theta'_a(r')}^{\theta'_b(\theta')} \int_{R'_a(\theta')}^{R'_b(\theta')} J_m(k_{r,m,n} r') e^{im\theta'} r' dr' d\theta' \end{aligned} \quad (13)$$

이고, 체적속도  $v_z(r', \theta', z)$ 는

$$v_z(r', \theta', z) = \int_{\theta'_a(r')}^{\theta'_b(\theta')} \int_{R'_a(\theta')}^{R'_b(\theta')} u_z(r', \theta', z) r' dr' d\theta'$$



(a) Coordinate system



(b) Nomenclature

Fig.2 Mesh diagram of cross-section

$$\begin{aligned} &= \sum_m \sum_n \left[ \frac{k_{z,m,n}}{\omega\rho_0} \{ A_{m,n} e^{-jk_{z,m,n}z} - B_{m,n} e^{+jk_{z,m,n}z} \} \right. \\ &\quad \left. \times \int_{\theta'_a(r')}^{\theta'_b(\theta')} \int_{R'_a(\theta')}^{R'_b(\theta')} J_m(k_{r,m,n} r') e^{im\theta'} r' dr' d\theta' \right] \end{aligned} \quad (14)$$

이 된다. 그러나 극좌표계  $r', \theta'$ 에서는 적분구간  $R'_a(\theta'), R'_b(\theta'), \theta'_a(r'), \theta'_b(r')$ 의 정의가 어렵다. 하지만 Fig. 2의 빗금친 부분에서 알 수 있듯이 입·출구 덕트의 중심을 기준으로 하는 극좌표계  $r, \theta$ 를 사용하면 적분구간을 쉽게 정의할 수 있음을 알 수 있다. 극좌표계  $r', \theta'$ 와 극좌표계  $r, \theta$ 사이에는 다음의 관계가 있다.

$$r'(r, \theta) = \sqrt{d^2 + r^2 + 2dr \cos(\alpha - \theta)} \quad (15)$$

$$\theta'(r, \theta) = \alpha - \sin^{-1} \left\{ \frac{r}{r'} \cos(\alpha - \theta) \right\} \quad (16)$$

여기서

$$q(r, \theta) = \frac{r \sin(\alpha - \theta)}{\sqrt{d^2 + r^2 + 2dr \cos(\alpha - \theta)}} \quad (17)$$

극좌표계  $r, \theta$ 를 사용했을 때 식 (13)과 식 (14)의 우변의 이중적분은 다음 식과 같이 된다.

$$I = \int_{\theta_a}^{\theta_b} G(\theta) d\theta \quad (18)$$

여기서

$$G(\theta) = \int_{R_a(\theta)}^{R_b(\theta)} F(r'(r, \theta), \theta'(r, \theta)) r dr \quad (19)$$

$$F(r', \theta') = J_m(k_{r,m,n} r') e^{jm\theta'} \quad (20)$$

식 (18)에서 적분구간이 상수  $\theta_a, \theta_b$ 로 정의되어 적분이 용이해짐을 알 수 있다.  $r, \theta$  좌표계의 원점에서  $\theta$ 에 따른 중간확장챔버의 반지름을 의미하는  $R(\theta)$ 는 다음 식과 같고

$$R(\theta) = -d \cos(\alpha - \theta) + \sqrt{R_2^2 - d^2 \sin^2(\alpha - \theta)} \quad (21)$$

Fig. 2에서 빗금 친 부분의 요소의  $r$ 에 대한 적분구간  $R_a(\theta), R_b(\theta)$ 는 다음 식 (22), 식 (23)과 같다.

$$R_a(\theta) = R_1 + \frac{1}{3}(R(\theta) - R_1) \quad (22)$$

$$R_b(\theta) = R_1 + \frac{2}{3}(R(\theta) - R_1) \quad (23)$$

식 (18)을 가우스 적분하면 다음과 같다.

$$\begin{aligned} I &= \int_{\theta_a}^{\theta_b} G(\theta) d\theta \\ &= \int_1^{-1} G(g(\omega)) \frac{\theta_b - \theta_a}{2} d\omega \\ &= \sum_{i=1}^{m_1} W_i G(g(\omega_i)) \frac{\theta_b - \theta_a}{2} \end{aligned} \quad (24)$$

여기서

$$\begin{aligned} \theta &= g(\omega) \\ &= \frac{\theta_b - \theta_a}{2} \omega + \frac{\theta_b + \theta_a}{2} \end{aligned} \quad (25)$$

이다. 한편 다음 식

$$\begin{aligned} r &= h(\chi) \\ &= \frac{R_b(\omega_i) - R_a(\omega_i)}{2} \chi + \frac{R_b(\omega_i) + R_a(\omega_i)}{2} \end{aligned} \quad (26)$$

과 같이 치환하고 식 (19)를 가우스 적분하면

$$\begin{aligned} G(g(\omega_i)) &= \int_{R_a(g(\omega_i))}^{R_b(g(\omega_i))} F(r'(r, g(\omega_i)), \theta'(r, g(\omega_i))) r dr \\ &= \int_{-1}^1 F(h(\chi), g(\omega_i)) h(\chi) \\ &\quad \times \frac{R_b(g(\omega_i)) - R_a(g(\omega_i))}{2} d\chi \\ &= \sum_{j=1}^{m_2} W_j F(h(\chi_j), g(\omega_i)) h(\chi_j) \\ &\quad \times \frac{R_b(g(\omega_i)) - R_a(g(\omega_i))}{2} \end{aligned} \quad (27)$$

이 된다. 식(27)을 식(24)에 대입하면 다음 식

$$\begin{aligned} I &= \sum_{i=1}^{m_1} \sum_{j=1}^{m_2} W_i W_j F(h(\chi_j), g(\omega_i)) h(\chi_j) \\ &\quad \times \frac{R_b(g(\omega_i)) - R_a(g(\omega_i))}{2} \frac{\theta_b - \theta_a}{2} \end{aligned} \quad (28)$$

이 된다. 여기서

$$\begin{aligned} F(h(\chi), g(\omega)) h(\chi) &= J_m(k_{r,m,n} \sqrt{v_1(\chi, \omega)}) \\ &\quad \times \text{EXP}[jm\{\alpha - \sin^{-1} v_2(\chi, \omega)\}] h(\chi) \end{aligned} \quad (29)$$

$$\begin{aligned} v_1(\chi, \omega) &= d^2 + \left( \frac{R_b(g(\omega)) - R_a(g(\omega))}{2} \chi \right. \\ &\quad \left. + \frac{R_b(g(\omega)) + R_a(g(\omega))}{2} \right)^2 \\ &\quad + 2d \left( \frac{R_b(g(\omega)) - R_a(g(\omega))}{2} \chi \right. \\ &\quad \left. + \frac{R_b(g(\omega)) + R_a(g(\omega))}{2} \right) \cos(\alpha - \theta_2) \end{aligned} \quad (30)$$

$$v_2(\chi, \omega) = \frac{v_3(\chi, \omega)}{v_1(\chi, \omega)} \quad (31)$$

$$\begin{aligned} v_3(\chi, \omega) &= \left( \frac{R_b(g(\omega)) - R_a(g(\omega))}{2} \chi \right. \\ &\quad \left. + \frac{R_b(g(\omega)) + R_a(g(\omega))}{2} \right) \sin(\alpha - \theta_2) \end{aligned} \quad (32)$$

이다. 식 (28)과 같이 이중적분이 계산되면 식 (13)의 요소에 작용하는 힘  $f(r', \theta', z)$ 와 식 (14)의 체적 속도  $v_z(r', \theta', z)$ 를 구할 수 있다.

단면적 불일치 부분을 Fig. 2와 같은 요소로 분할하고 입구덕트와 중간확장챔버가 만나는 요소와 출구덕트와 중간확장챔버가 만나는 요소에서는 힘과 체적속도 연속조건을, 그 외의 요소에는 체적속도가 0이 되는 조건을 사용한다. 먼저  $z$ 가 0일 때 입구덕트와 중간확장챔버의 힘의 연속조건을 적용하여

$$(A_{3,0,0} + B_{3,0,0})\pi R_3^2 = [f(r, \theta, z)]_{z=0} \quad (33)$$

의 조건식을 만들고, 입자속도의 연속조건으로부터

$$\frac{k_0}{\omega\rho_0}(A_{3,0,0} - B_{3,0,0})\pi R_3^2 = [v_z(r, \theta, z)]_{z=0} \quad (34)$$

을 만든다. 그리고 벽면에서 입자속도가 0이라는 조건을 이용하여  $z$ 가 0일 때의 중간확장챔버에서 입구덕트와의 연결요소를 제외한 나머지 8개의 요소에서의 체적속도가 0인 경계조건을 적용하여

$$[v_z(r, \theta, z)]_{z=0} = 0 \quad (35)$$

의 조건식을 얻을 수 있다. 그리고  $z$ 가  $l_2$ 일 때의 출구덕트와 중간확장챔버가 만나는 요소에서 힘의 연속조건을 적용하여

$$[f(r, \theta, z)]_{z=l_2} = (A_{1,0,0} + B_{1,0,0})\pi R_1^2 \quad (36)$$

의 조건식을 만들고, 입자속도의 연속조건으로부터

$$[v_z(r, \theta, z)]_{z=l_2} = \frac{k_0}{\omega\rho_0}(A_{1,0,0} - B_{1,0,0})\pi R_1^2 \quad (37)$$

의 관계식을 만든다. 그리고  $z$ 가  $l_2$ 일 때의 중간확장챔버에서 출구덕트와의 연결요소를 제외한 나머지 8개의 요소에서의 체적속도가 0인 경계조건으로부터

$$[v_z(r, \theta, z)]_{z=l_2} = 0 \quad (38)$$

의 조건식을 만든다.

그러므로 식 (13), 식 (14), 식 (28)을 이용하여 식 (33)~(38)의 조건식을 만든 후 미지수를 계산하면 소음기의 특성을 해석할 수 있다. 본 논문에서는 해석방법의 신뢰성을 검증하기 위하여 다음 식으로 정의되는 투과손실을 사용한다.

$$\begin{aligned} & \text{Transmission Loss [dB]} \\ & = 20 \log_{10} \left( \sqrt{\frac{S_3}{S_1}} \left| \frac{A_{3,0,0}}{A_{1,0,0}} \right|_{B_{1,0,0}=0} \right) \end{aligned} \quad (39)$$

### 3. 단순확장형 소음기에의 적용

Munjali의 방법으로 구한 소음기의 특성과 본 논문에서 제안 방법으로 구한 소음기 특성을 비교하기 위하여 식 (39)로 정의되는 소음기의 투과 손실을 계산하여 비교하였다.

Fig. 1과 같이 Munjali가 제안한 방법이 잘 적용되는 중간확장챔버의 길이  $l_2$ 는 0.225 m, 중간확장챔버의

반경  $R_2$ 는 0.075 m, 입·출구덕트의 반경  $R_1$ 은 0.025 m인 동심형 원형단면 단순확장 소음기에 대하여 적용하여 Munjali가 제안한 방법으로 구한 투과손실과 Fig. 3과 같이 요소를 나누어 본 논문에서 제안하는 방법으로 구한 투과손실을 Fig. 4에 나타내었다. Fig. 4에서 볼 수 있듯이 입·출구덕트의 단면적과 중

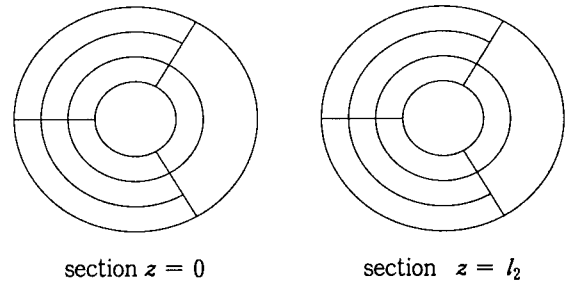
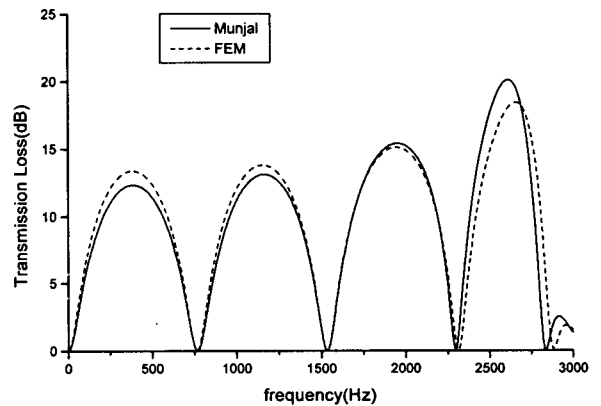
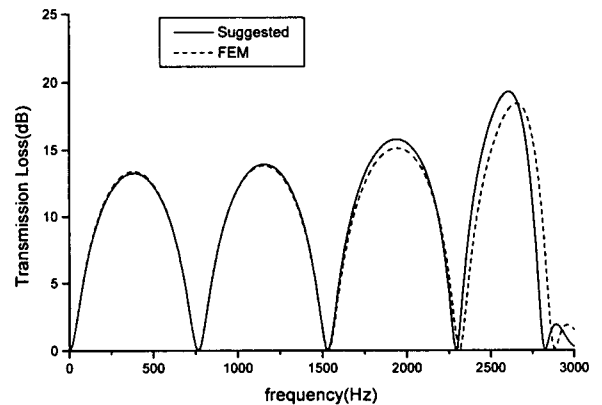


Fig. 3 Section details of an expansion chamber muffler with symmetrical inlet/outlet, and the area ratio is natural number



(a) Comparison of Munjal's method and FEM



(b) Comparison of suggested method and FEM

Fig. 4 Transmission loss of a model Fig. 3

간확장덕트의 단면적 비가 정수인 경우에는 Munjal의 방법과 제안하는 방법의 결과가 일치하며, 고려된 고차모드까지의 주파수 영역에서 유한요소법으로 구한 투과손실과도 잘 맞음을 알 수 있다.

이번에는 Fig. 5와 같이 Fig. 3에서 입·출구덕트

가 중간확장챔버의 중심으로부터 0.0375 m 떨어진 소음기에 적용하였다. Munjal이 제안한 방법으로 구한 투과손실과 본 논문에서 제안하는 방법으로 구한 투과손실을 비교하여 Fig. 6에 나타내었다. Fig. 6에서 볼 수 있듯이 첫 번째 원주방향 모드인 (1, 0)모

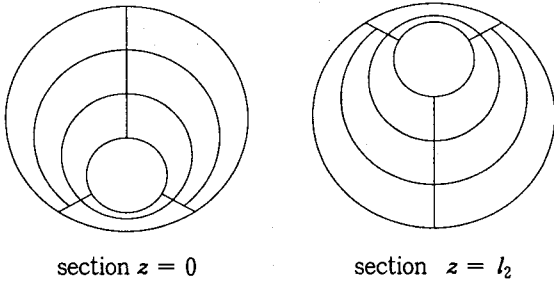


Fig. 5 Section details of an expansion chamber muffler with offset-inlet/offset-outlet, and the area ratio is natural number

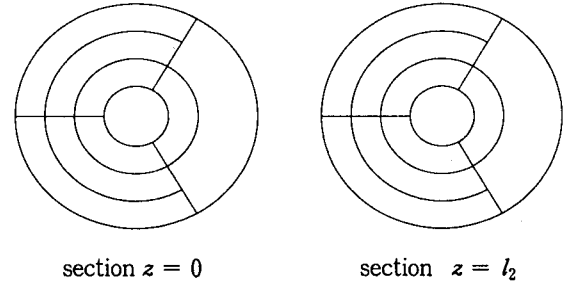
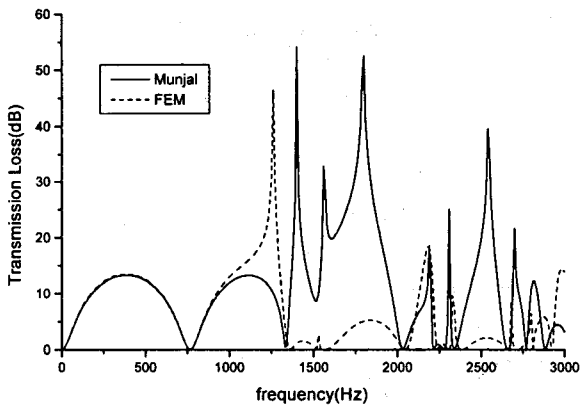
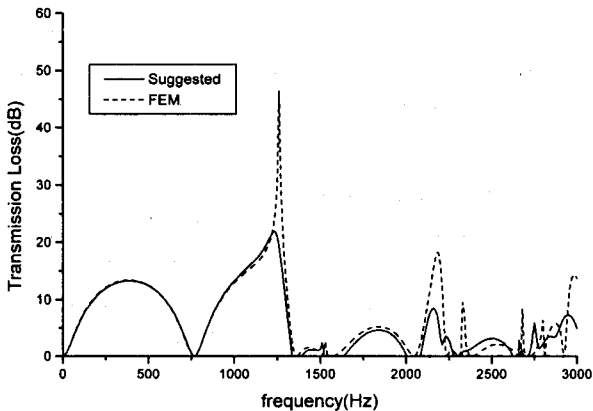


Fig. 7 Section details of an expansion chamber muffler with symmetrical inlet/outlet, but the area ratio is not natural number

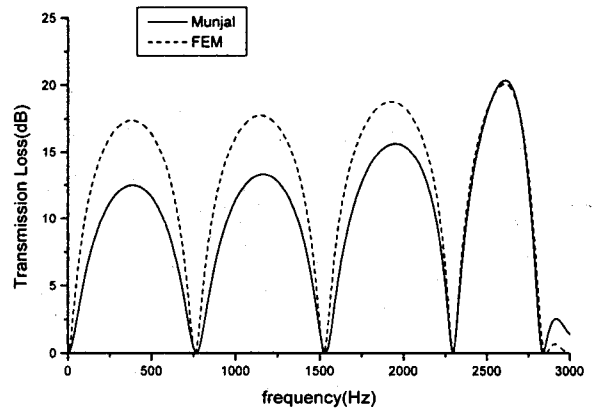


(a) Comparison of Munjal's method and FEM

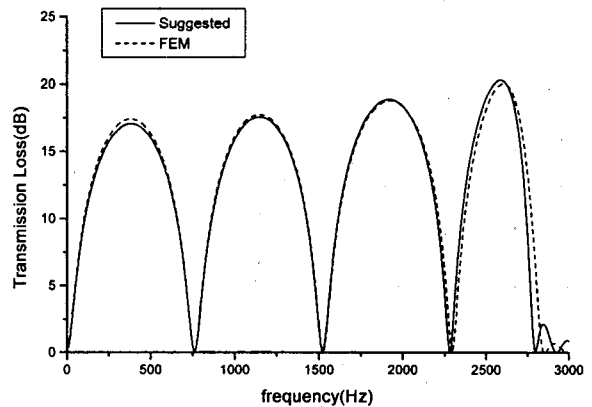


(b) Comparison of suggested method and FEM

Fig. 6 Transmission loss of a model Fig. 5



(a) Comparison of Munjal's method and FEM



(b) Comparison of suggested method and FEM

Fig. 8 Transmission loss of a model Fig. 7

드의 차단주파수인 1328 Hz에서부터 Munjal의 방법은 유한요소해석의 결과와 다름을 볼 수 있으나, 제안한 방법은 유한요소해석의 결과와 잘 일치함을 볼 수 있다. 그러므로 입·출구덕트가 중간확장덕트의 중심에 위치하지 않은 경우에는 Munjal의 방법으로는 원주방향모드의 영향을 고려할 수 없지만 본 논

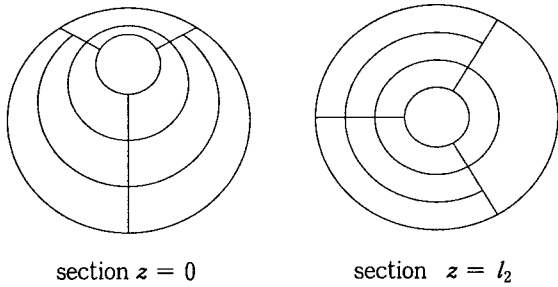
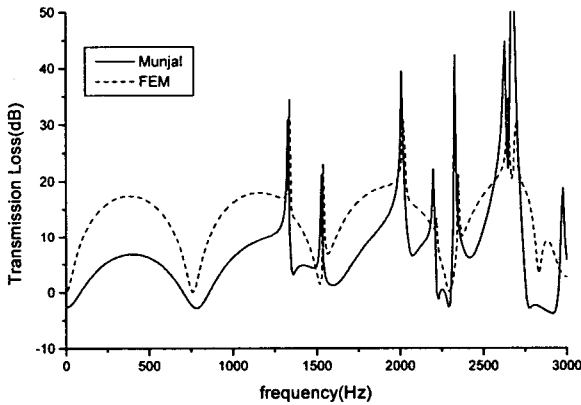
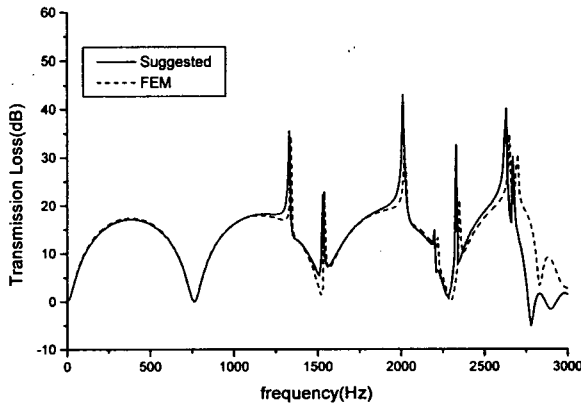


Fig. 9 Section details of an expansion chamber muffler with offset-inlet symmetrical-outlet, and the area ratio is not natural number



(a) Comparison of Munjal's method and FEM



(b) Comparison of suggested method FEM

Fig. 10 Transmission loss of a model Fig. 9

문에서 제안하는 방법으로 Munjal의 방법의 문제점을 해결할 수 있음을 알 수 있다.

다음은 Fig. 7에서 볼 수 있듯이 입·출구가 중간확장챔버의 중심에 위치하지만  $R_2$ 는 0.09 m이고  $R_1$ 은 0.02 m이어서 단면적 비가 정수배가 아닌 소음기에 적용하였다. Munjal이 제안한 방법과 본 논문에서 제안하는 방법으로 해석하여 그 결과를 Fig. 8에 나타내었다. Fig. 8에서 볼 수 있듯이 Munjal의 방법은 평면파 이론이 만족되어야 하는 (1, 0)모드의 차단주파수인 1328 Hz이하에서 유한요소해석의 결과와 차이가 많이 남을 볼 수 있지만, 제안한 방법은 유한요소해석의 결과와 잘 일치함을 볼 수 있다. 그러므로 입·출구덕트와 중간확장덕트의 단면적 비가 정수배가 아닌 경우 본 논문에서 제안하는 방법으로 Munjal의 방법의 문제점을 해결할 수 있음을 알 수 있다.

이번에는 Fig. 9와 같이 Fig. 7에서 입구덕트가 중심으로부터 0.0375 m 떨어져 있을 때, 즉 단면적 비가 정수배가 아니며 동심관이 아닌 덕트가 존재하는 소음기에 적용하였다. Munjal이 제안한 방법과 본 논문에서 제안하는 방법으로 해석하여 그 결과를 Fig. 10에 나타내었다. Fig. 10에서 볼 수 있듯이 Munjal의 방법은 전 주파수 영역에서 유한요소해석의 결과와 차이가 많이 남을 볼 수 있지만, 제안한 방법은 유한요소해석의 결과와 잘 일치함을 볼 수 있다. 그러므로 입·출구덕트와 중간확장덕트의 단면적 비가 정수배가 아니며 동심관이 아닌 덕트가 존재하는 경우 본 논문에서 제안하는 방법으로 Munjal의 방법의 문제점을 해결할 수 있음을 알 수 있다.

#### 4. 결 론

(1) Munjal 방법의 단점을 개선하여 원형단면 단순확장형 소음기에서 입·출구덕트의 위치와 면적의 제한과 주파수의 제한이 없는 고차모드를 고려하는 소음기의 음향특성 계산법을 제안하였다

(2) 단순확장형 소음기에 본 논문에서 제안하는 방법과 Munjal의 방법을 적용하고, 유한요소법의 결과와 비교하여 입·출구덕트의 위치와 면적의 제한을 가지는 Munjal의 방법의 문제점이 본 논문에서 제안하는 방법으로 개선됨을 검증하였다.

#### 참 고 문 헌

- (1) Munjal, M. L., 1987, Acoustics of Ducts and

Mufflers, New York

- (2) Miles, J., 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.
- (3) Okua, J., 1972, "Characteristics of the Cylindrical Chamber of the Expansion Chamber Type Muffler", *Journal of Sound and Vibration*, Vol. 29, pp. 199~206.
- (4) El-Sharkawy, A. I. and Nayfeh, A. H., 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.
- (5) Ih, J. G. and Lee, B. H., 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.
- (6) Kim, Y. H. and Kang, S. W., 1993, "Green Solution of Acoustic Wave Equation for Circular Expansion Chamber with Arbitrary Locations of Inlet, Outlet Ports and Termination Impedance", *Journal of the Acoustical Society of America*, Vol. 94(1), pp. 473~490.
- (7) Kim, Y. H. and Kang, S. W., 1995, "Green Function Analysis of the Acoustic Field in a Finite Three-Port Circular Chamber", *Journal of Sound and Vibration*, Vol. 181(5), pp. 765~780.
- (8) Munjal, M. L., 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.
- (9) Kergomard, J., Garcia, A., Tagut, G. and Dalmont, J. P., 1989, "Analysis of Higher Order Mode Effects in an Expansion Chamber using Modal Theory and Equivalent Electrical Circuits", *Journal of Sound and Vibration*, Vol. 129, pp. 457~475.
- (10) Åbom, M., 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.
- (11) 김봉준, 정의봉, 황상문, 1999, "고차모드를 고려한 사각형 단순 확장관의 간편음향해석법의 개선", *한국소음진동학회지*, 제 9 권, 제 2 호, pp. 340~347.
- (12) Peat, K. S., 1982, "Evaluation of Four-Pole Parameters for Ducts with Flow by the Finite Element Method", *Journal of Sound and Vibration*, Vol. 84, pp. 389~395.