

입 · 출구의 고차모드를 고려한 사각형 단순확장관의 음향해석

김봉준* · 이정환* · 정의봉**

ACOUSTIC ANALYSIS OF RECTANGULAR SIMPLE EXPANSION CHAMBER WITH CONSIDERATION OF HIGHER ORDER MODE OF INLET/OUTLET

B. J. Kim · J. H. Lee · W. B. Jeong

Key words : Simple Expansion Chamber(단순확장형 소음기), Higher Order Mode(고차모드), Transmission Loss(투과손실), Mode Matching Technique(모드매칭법)

Abstract

The acoustic performance of reactive type single expansion chamber can be calculated theoretically by plane wave theory. But higher order modes should be considered to widen the frequency range. Munjal has suggested the method for analyzing the acoustic properties of simple expansion chamber with taking into consideration of higher order mode of inlet/outlet. But, his method cannot predict the acoustic properties exactly when the dimensions of inlet/outlet and expansion chamber have not integer multiples.

In this paper, the new method was suggested to overcome the shortcomings of Munjal's method. The predictions by this method were also compared with those by the finite element method.

1. 서 론

소음기의 음향특성을 해석하는 가장 간단한 방법은 소음기내의 음파를 평면파로 가정하여 해석하는 것이다. 하지만 이 가정으로 인하여 중간확장관의 차단주파수 이상의 주파수에서는 예측된 소음기의 성능을 신뢰할 수 없다. 이를 해결하기 위해 많은 사람들이 중간확장관의 고차모드를 고려할 수 있는 소음기 음향특성 해석법을 연구해왔다.

Miles(1)는 원형관의 단면적 변화에 기인한 음장을 해석하였고, El-Sharkawy(2)는 이를 동심원형 소음기에 적용하고 실험으로 검증하였다. 이 방법은 소음기의 해석시 고차모드를 고려할 수 있는 최초의 방법이다. 하지만 이들의 연구는 입 · 출구의 위치가 중간확장관의 중심에 있지 않으면 해석하기가 어려운 단점이 있다. Lee^{(3)~(6)}는 임의의 입 · 출구 위치를 가지는 소음기의 4단지정수를 계산하여 음향특성을 해석하였고, Y.-H. Kim^{(7),(8)}은 그

* 부산대 기계공학부 대학원(원고접수일 : 99년 6월)

** 부산대 기계공학부

린함수(Green function)를 이용하여 소음기내의 음장을 해석하였다. 그리고 Abom⁽⁹⁾은 입 · 출구가 연장된 동심원형 소음기의 음향해석을 하였고, Munjal⁽¹⁰⁾은 덕트의 단면적을 몇 개의 요소로 분할하여 적합조건을 이용하여 고차모드를 고려한 4단 자정수 계산법을 제시하였고, B.-J. Kim⁽¹¹⁾은 입 · 출구 단면적과 중간덕트의 단면적이 정수배일 경우만 적용할 수 있는 Munjal⁽¹⁰⁾의 방법을 개선하였다. 하지만 여러 선행 연구에서 El-Sharkawy⁽²⁾와 Munjal⁽¹⁰⁾의 연구를 제외하면 모두 입 · 출구에서의 음파를 평면파로 가정하였다. 입 · 출구를 평면파로 가정하여 해석하면 중간확장관에 고차모드를 많이 고려하더라도 입 · 출구의 차단주파수의 한계때문에 고주파수에서 입 · 출구에 고차모드를 고려한 경우에 비해 투과손실이 잘 맞지 않을 것이다. 그러므로 입 · 출구가 큰 경우나 혹은 좀더 고주파수까지의 해석을 원하면 입 · 출구에도 고차모드를 고려하여 해석하는 것이 바람직하다.

본 논문에서는 입 · 출구에 고차모드를 고려했을 때 Munjal⁽¹⁰⁾의 방법이 가지는 문제점을 지적하고 해결할 수 있는 방법을 제시하고 사각형 단순확장형 소음기에 적용하여 검증하고자 한다.

2. Munjal이 제안한 음향해석법

사각형단면 덕트의 음파 방정식⁽¹²⁾은 다음과 같다.

$$\frac{\partial^2 p}{\partial t^2} - a_0^2 \nabla^2 p = 0$$

단,

$$\nabla^2 = \frac{\partial^2}{\partial x^2} + \frac{\partial^2}{\partial y^2} + \frac{\partial^2}{\partial z^2} \quad (1)$$

여기서 a_0 는 음파의 위상속도이고 p 는 음압이고 t 는 시간이며, x, y, z 좌표계는 Fig.1과 같다. 그리고 입자속도 u 와 음압 p 의 관계식은 다음과 같다.

$$p_0 \frac{\partial u}{\partial t} + \nabla p = 0 \quad (2)$$

여기서 α_0 는 밀도이다. 덕트의 벽에서는 그 표면 에 수직인 방향의 입자속도가 0이어야 하므로 다

음과 같은 경계조건을 가진다.

$$\frac{\partial p}{\partial t} = 0 \text{ at } x=0 \text{ and } x=b$$

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

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

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

단,

$$k_{z,m,n}^2 = k_0^2 - \left(\frac{m\pi}{b}\right)^2 - \left(\frac{n\pi}{h}\right)^2, \quad k_0 = \frac{\omega}{a_0}$$

과 같고, z 방향의 입자속도는 다음과 같이 된다.

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

예를들어, Fig.1과 같은 소음기에 대하여 입 · 출구에 고차모드(0~1까지 고려)를 고려한 경우 Munjal⁽¹⁰⁾방법은 각 단면에서 음압과 입자속도의 연속식을 이용하여 각 요소에서 한 점씩을 채택하여 다음과 같은 조건식을 구하였다. 즉 입구 덕트의 경계조건에서

$$A_{3,0,0} + \sum_m \sum_n \left[B_{3,m,n} \cos\left(\frac{m\pi}{b_3} x_q\right) \cos\left(\frac{n\pi}{h_3} y_q\right) \right] = \sum_m \sum_n \left[\{A_{2,m,n} + B_{2,m,n}\} \cos\left(\frac{m\pi}{b_2} x_q\right) \times \cos\left(\frac{n\pi}{h_2} y_q\right) \right] \quad q = \langle 1 \rangle \sim \langle 4 \rangle \quad (6)$$

$$A_{3,2,0,0} + A_{3,0,0} - \sum_m \sum_n \left[k_{3,z,m,n} B_{3,m,n} \cos\left(\frac{m\pi}{b_3} x_q\right) \cos\left(\frac{n\pi}{h_3} y_q\right) \right] = \sum_m \sum_n \left[k_{2,z,m,n} \{A_{2,m,n} - B_{2,m,n}\} \times \cos\left(\frac{m\pi}{b_2} x_q\right) \cos\left(\frac{n\pi}{h_2} y_q\right) \right] \quad q = \langle 1 \rangle \sim \langle 4 \rangle \quad (7)$$

벽면조건에서

$$\sum_{\pi} \sum_{\pi} \left[k_{2,m,n} \{A_{2,m,n} - B_{2,m,n}\} \cos\left(\frac{m\pi}{b_3} x_q\right) \cos\left(\frac{n\pi}{h_3} y_q\right) \right] = 0$$

$$q = \langle 5 \rangle \sim \langle 16 \rangle \quad (8)$$

$$\sum_{\pi} \sum_{\pi} \left[k_{2,z,m,n} \{A_{2,m,n} e^{+jk_{2,z,m,n} z} - B_{2,m,n} e^{+jk_{2,z,m,n} z}\} \right. \\ \left. \cos\left(\frac{m\pi}{b_2} x_q\right) \cos\left(\frac{n\pi}{h_2} y_q\right) \right] = 0$$

$$q = \langle 17 \rangle \sim \langle 28 \rangle \quad (9)$$

출구 덕트의 경계조건에서

$$\sum_{\pi} \sum_{\pi} \left[A_{2,m,n} e^{+jk_{2,z,m,n} z} - B_{2,m,n} e^{+jk_{2,z,m,n} z} \right] \cos\left(\frac{m\pi}{b} x_q\right) \\ \cos\left(\frac{n\pi}{h^2} x_q\right) = \sum_{\pi} \sum_{\pi} \left[A_{1,m,n} \cos\left(\frac{m\pi}{b_1} x_q\right) \right. \\ \left. \times \cos\left(\frac{n\pi}{h_1} y_q\right) \right] + B_{1,0,0}$$

$$q = \langle 29 \rangle \sim \langle 32 \rangle \quad (10)$$

$$\sum_{\pi} \sum_{\pi} \left[k_{2,z,m,n} \{A_{2,m,n} e^{+jk_{2,z,m,n} z} - B_{2,m,n} e^{+jk_{2,z,m,n} z}\} \right. \\ \left. \cos\left(\frac{m\pi}{b^2} x_q\right) \cos\left(\frac{n\pi}{h_2} y_q\right) \right] = \sum_{\pi} \sum_{\pi} \left[k_{1,z,m,n} A_{1,m,n} \right. \\ \left. \times \cos\left(\frac{m\pi}{b_1} x_q\right) \cos\left(\frac{m\pi}{h_1} y_q\right) \right] - k_{1,z,0,0} B_{1,0,0}$$

$$q = \langle 29 \rangle \sim \langle 32 \rangle \quad (11)$$

의 관계식이 성립한다. 식(6)~(11)을 이용하여 40개의 미지수 $B_{3,m,n} (m, n = 0 \sim 1)$, $A_{2,m,n}, B_{2,m,n} (m, n = 0 \sim 3)$, $A_{1,m,n} (m, n = 0 \sim 1)$ 을 계산할 수 있다. 음향투과손실(Transmission Loss)은 다음과 같다.

$$TL[dB] = 20 \log_{10} \left(\sqrt{\frac{S_3}{S_1}} \left| \frac{A_{3,0,0}}{A_{1,0,0}} \right|_{B_{1,0,0}=0} \right) \quad (12)$$

여기서 아래첨자 1, 2, 3은 각각 출구, 중간확장관, 입구를 의미한다.

3. 제안하는 방법

관심주파수가 고주파여서 입·출구에도 고차모드를 고려하여야 할 경우 Munjal⁽¹⁰⁾의 방법은 식(6),(7),(10),(11)에서 볼 수 있듯이 입구와 출구의 경계조건 적용시에 중간확장관의 좌표계(x,y,z)를

적용하였다. 그러나 입·출구는 중간확장관과 단면적이 다르므로 입·출구 단면에 대한 경계조건을 만족하는 모드를 사용해야 한다. 그러므로 입·출구에서는 중간확장관의 좌표계(x,y,z)를 사용하지 않고, 입구에는 입구의 좌하측 모서리를 원점으로 하는(x',y',z)좌표계를, 출구에는 출구의 좌하측 모서리를 원점으로 하는(x'',y'',z)좌표계를 사용하였다. 즉, 식(6)과 식(7)의 좌변에서 x_q 대신 x'_q, y_q 대신 y'_q 를 사용하고, 식(10)과 식(11)의 우변에서 x_q 대신 x''_q, y_q 대신 y''_q 를 사용하였다.

한편, B.-J. Kim⁽¹¹⁾은 경계조건 적용 시 요소내의 한 점이 아닌 요소면적 전체를 고려하여 음압과 입자속도의 연속조건 대신 힘과 체적속도의 연속조건을 사용하면 Munjal⁽¹⁰⁾의 방법보다 정확한 해석이 가능함을 보였다. 따라서 본 논문에서도 힘과 체적속도의 연속조건을 사용하였다. Fig.1과 같이 요소를 나누었을 때 각 요소에서 음압에 의한 힘은

$$f(x,y,z) = \int_{x_1}^{x_2} \int_{y_1}^{y_2} p(x,y,z) dx dy = \{A_{0,0} e^{-jk_{x,0} z} + B_{0,0} e^{+jk_{x,0} z}\} (x_2 - x_1)(y_2 - y_1) \\ + \sum_{n=1}^i \left[\{A_{0,n} e^{-jk_{x,n} z} + B_{0,n} e^{+jk_{x,n} z}\} \frac{h}{n\pi} \left\{ \sin\left(\frac{n\pi}{h} y_2\right) - \sin\left(\frac{n\pi}{h} y_1\right) \right\} (x_2 - x_1) \right] \\ + \sum_{n=1}^i \left[\{A_{0,m} e^{-jk_{x,m} z} + B_{0,m} e^{+jk_{x,m} z}\} \frac{b}{m\pi} \left\{ \sin\left(\frac{m\pi}{b} x_2\right) - \sin\left(\frac{m\pi}{b} x_1\right) \right\} (y_2 - y_1) \right] \\ + \sum_{m=1}^i \sum_{n=1}^i \left[\{A_{m,n} e^{-jk_{x,m} z} + B_{m,n} e^{+jk_{x,m} z}\} \frac{bh}{mn\pi^2} \left\{ \sin\left(\frac{m\pi}{b} x_2\right) - \sin\left(\frac{m\pi}{b} x_1\right) \right\} \right. \\ \left. \times \left\{ \sin\left(\frac{n\pi}{h} y_2\right) - \sin\left(\frac{n\pi}{h} y_1\right) \right\} \right] \quad (13)$$

이고, 체적속도의 식은

$$v_z(x,y,z) = \int_{x_1}^{x_2} \int_{y_1}^{y_2} u_z(x,y,z) dx dy = \frac{1}{\omega \rho_0} k_{z,0,0} \{A_{0,0} e^{-jk_{x,0} z} - B_{0,0} e^{+jk_{x,0} z}\} (x_2 - x_1)(y_2 - y_1) \\ + \frac{1}{\omega \rho_0} \sum_{n=1}^i \left[k_{z,0,n} \{A_{0,n} e^{-jk_{x,n} z}\} \frac{h}{n\pi} \left\{ \sin\left(\frac{n\pi}{h} y_2\right) - \sin\left(\frac{n\pi}{h} y_1\right) \right\} (x_2 - x_1)(y_2 - y_1) \right]$$

$$\begin{aligned}
 & + \frac{1}{\omega\rho_0} \sum_{n=1}^i [k_{z,m,0} \{A_{m,0} e^{-jk_{z,m}z} - B_{m,0} e^{-jk_{z,m}z}\} \\
 & \quad \frac{b}{m\pi} \left\{ \sin\left(\frac{m\pi}{b}x_2\right) - \sin\left(\frac{m\pi}{b}x_1\right) \right\} (y_2 - y_1)] \\
 & + \frac{1}{\omega\rho_0} \sum_{n=1}^i \sum_{n=1}^i [k_{z,m,n} \{A_{m,n} e^{-jk_{z,m}z} - B_{m,n} e^{+jk_{z,m}z}\} \\
 & \quad \frac{bh}{mn\pi} \left\{ \sin\left(\frac{m\pi}{b}x_2\right) - \sin\left(\frac{m\pi}{b}x_1\right) \right\} \\
 & \quad \times \left\{ \sin\left(\frac{n\pi}{h}y_2\right) - \sin\left(\frac{n\pi}{h}y_1\right) \right\}] \quad (14)
 \end{aligned}$$

이다. 단면적 불일치 부분에서의 경계조건식은 입구덕트의 경계조건에서

$$\begin{aligned}
 [f_3(x', y', z)]_{z=0} &= [f_2(x, y, z)]_{z=0} \\
 \text{element} &= \langle 1 \rangle \sim \langle 4 \rangle \quad (15)
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 [v_{3,z}(x', y', z)]_{z=0} &= [v_{2,z}(x, y, z)]_{z=0} \\
 \text{element} &= \langle 1 \rangle \sim \langle 4 \rangle \quad (16)
 \end{aligned}$$

벽면조건에서

$$\begin{aligned}
 [v_{2,z}(x, y, z)]_{z=0} &= 0 \\
 \text{element} &= \langle 5 \rangle \sim \langle 16 \rangle \quad (17)
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 [v_{2,z}(x, y, z)]_{z=L} &= 0 \\
 \text{element} &= \langle 17 \rangle \sim \langle 28 \rangle \quad (18)
 \end{aligned}$$

출구덕트의 경계조건에서

$$\begin{aligned}
 [f_2(x, y, z)]_{z=L} &= [f_1(x'', y'', z'')]_{z=L} \\
 \text{element} &= \langle 29 \rangle \sim \langle 32 \rangle \quad (19)
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 [v_{2,z}(x, y, z)]_{z=L} &= [v_{1,z}(x'', y'', z'')]_{z=L} \\
 \text{element} &= \langle 29 \rangle \sim \langle 32 \rangle \quad (20)
 \end{aligned}$$

와 같이 표현되어진다. 식(15)~(20)의 경계조건을 사용하여 미지수를 계산한 후 식(12)를 사용하여 투과손실을 예측할 수 있다.

4. 입 · 출구에 고차모드를 고려했을 때 여러가지 경우에 대한 검증

Fig.1과 같은 사각형 단순확장관에 대한 투과손실을 Fig.2에 나타내었다. 이 경우는 Munjal¹⁰⁾의 방법과 제안한 방법 모두 유한요소법과 비교해 잘 맞는 것을 알 수 있다. 특히, Munjal¹⁰⁾의 방법으로 도 잘 맞는 이유는 Fig.1의 입 · 출구의 단면 크기

와 중간확장관의 단면 크기가 정수배이므로, 중간확장관에 대한 전역좌표를 사용하여도 입 · 출구의 모드와 중간확장관의 모드가 같아지는 위치에 있기 때문이다. 한편, 입 · 출구의 단면 크기와 중간확장관의 단면 크기는 정수배이지만, 입 · 출구의 모드와 중간확장관의 모드가 같아지지 않는 위치인 Fig.3과 같은 소음기에 대해서 Munjal¹⁰⁾의 방법으로 구한 투과손실을 Fig.4에, 제안한 방법으

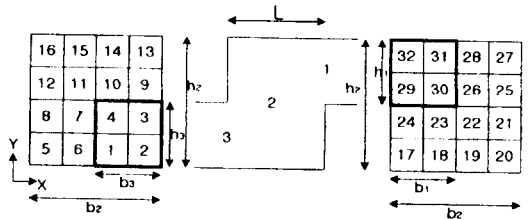


Fig. 1 An expansion chamber muffler with section details

$$\begin{aligned}
 [b_3=h_3=b_1=h_1=0.08m, \\
 b_3=h_3=0.16m, L=0.225m]
 \end{aligned}$$

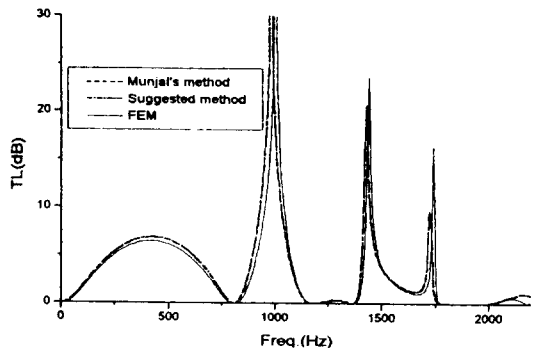


Fig. 2 Transmission Loss of Fig.1 by Munjal's method (Both Munjal's method and suggested method show good agreement with FEM)

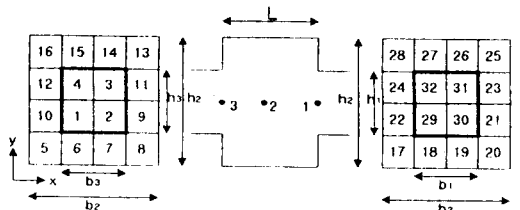


Fig. 3 An expansion chamber muffler with section details

$$\begin{aligned}
 [b_3=h_3=b_1=h_1=0.08m, \\
 b_3=h_3=0.16m, L=0.225m]
 \end{aligned}$$

로 구한 투과손실을 Fig.5에 나타내었다. Fig.4와 Fig.5에서 볼 수 있듯이 Munjal⁽¹⁰⁾의 방법으로는 투과손실을 전혀 예측할 수 없고, 제안한 방법은 잘 예측하는 것을 볼 수 있다. 이는 Fig.1의 형상과는 달리 Fig.3의 형상은 입·출구의 모드와 중간확장관의 모드가 같아지지 않기 때문이다. 그리고 입

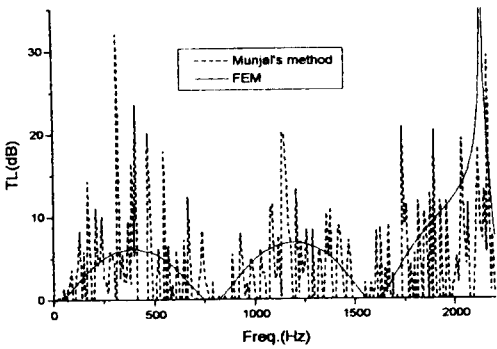


Fig. 4 Transmission Loss of Fig.3 by Munjal's method (Munjal's method shows disagreement with FEM)

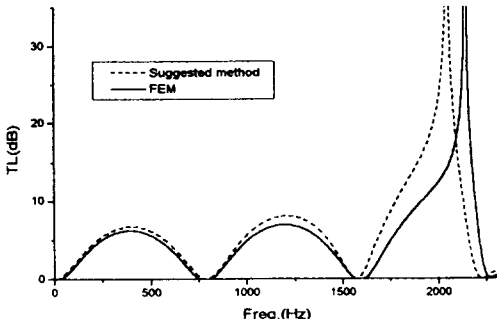


Fig. 5 Transmission Loss of Fig.3 by suggested method

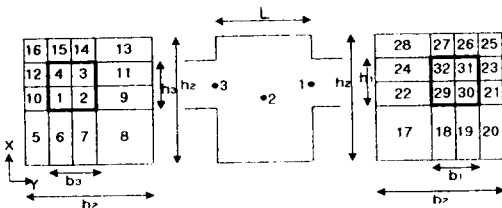


Fig. 6 An expansion chamber muffler with section details

$$\left[\begin{array}{l} b_3 = h_3 = b_1 = h_1 = 0.08m, \\ b_3 = h_3 = 0.16m, L = 0.225m \end{array} \right]$$

·출구의 단면 크기와 중간확장관의 단면 크기가 정수배가 아니고, 입·출구의 모드와 중간확장관의 모드가 같아지지 않는 위치인 Fig.6과 같은 소음기에 대해 Munjal⁽¹⁰⁾의 방법으로 구한 투과손실을 Fig.7에 나타내었고, 음압과 입자속도의 연속조건을 이용하여 제안한 방법으로 구한 투과손실을 Fig.8에 나타내었다. Fig.7과 Fig.8에서 볼 수 있듯이 Fig.6과 같은 입·출구의 위치를 가진 소음기의 경우 그 음향특성을 Munjal⁽¹⁰⁾의 방법으로는 예측할 수가 없고, 제안한 방법으로는 비교적 잘 예측하는 것을 알 수 있다. 그러나 평면파 이론이 적용되는 저주파수 영역에서 투과손실의 크기의 차이가 약간 존재함을 알 수 있는데, 그 원인은 음압과 입자속도의 경계조건을 사용하기 때문인 것으로 판단된다. 따라서 힘과 체적속도의 연속조건

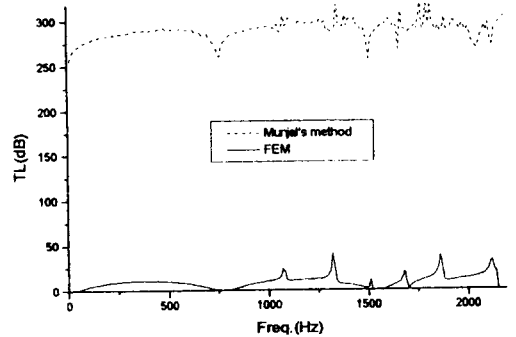


Fig. 7 Transmission Loss of Fig.6 by Munjal's method (Munjal's method shows disagreement with FEM)

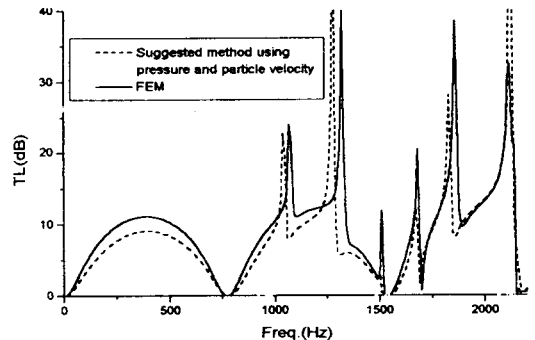


Fig. 8 Transmission Loss of Fig.6 by suggested method using pressure and particle velocity

을 이용하여 제안한 방법으로 구한 투과손실을 Fig.9에 나타내었다. Fig.8과 비교해보면 고주파수 영역에서는 예측결과가 거의 같지만 저주파수에서 힘과 체적속도 연속조건을 사용한 예측결과가 유한요소해석 결과와 잘 일치함을 알 수 있다. 따라서 음압과 입자속도의 연속조건보다 힘과 체적속도의 연속조건을 사용하는 것이 타당함을 알 수 있다. Fig.10은 입·출구를 평면파로 가정하여 해석한 것과 입·출구에 고차모드를 고려하여 해석한 결과를 비교한 것이다. Fig.6에서 입·출구의 차단주파수는 대략 2800Hz이다. 입·출구에 고차모드를 고려하면 이 차단 주파수보다 높은 주파수 성분도 고려가 가능하다. Fig.10에서 볼 수 있듯이 차단 주파수보다 조금 낮은 주파수인 2200Hz 이하의 주파수에서의 결과는 비슷하나 2200Hz 이상의 주파수에서는 투과손실이 차이가 나고 입·출

구에 고차모드를 고려한 결과가 유한요소법의 결과와 잘 맞음을 알 수 있다. 즉, Fig.10에서 볼 수 있듯이 고주파수에서의 정확한 해석을 하기 위해서는 입·출구에 고차모드를 고려하는 것이 필요하다는 것을 알 수 있다.

4. 결 론

- 1) 입·출구에 고차모드를 고려할 경우, 입·출구에서 중간확장관과 동일한 좌표계를 사용하는 Munjal의 방법의 문제점을 제시하였다.
- 2) 입·출구에 고차모드를 고려한 경우 입·출구에 국부좌표계를 사용해야만 소음기의 음향특성을 정확히 예측할 수 있다는 것을 보였다.
- 3) 입·출구와 중간확장관의 연속조건으로 음압과 입자속도의 연속조건을 사용하는 것보다 힘과 체적속도의 연속조건을 사용하는 것이 타당함을 보였다.
- 4) 고주파수까지의 해석을 원할 경우에는 입·출구에도 고차모드를 고려해야 한다는 것을 보였다.
- 5) 소음기 음향특성의 예측결과를 유한요소해석 결과와 비교 검증하였다.

참고문헌

- 1) 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.
- 2) 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.
- 3) 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.
- 4) J.-G.Ih and B.-H. Lee, 1987, "Theoretical Prediction of Transmission Loss of Circular Reversing Chamber Mufflers", *Journal of Sound and Vibration*

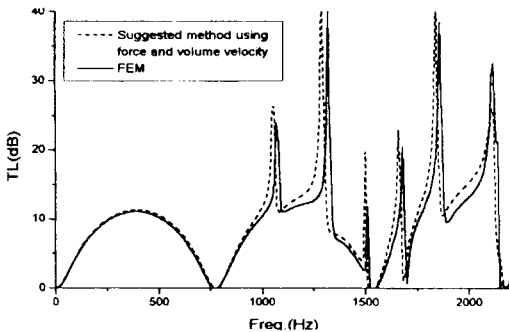


Fig. 9 Transmission Loss of Fig.6 by suggested method using force and volume velocity

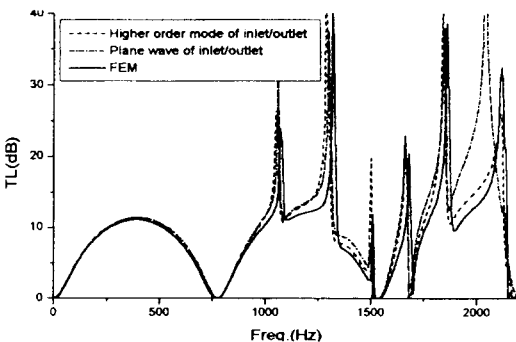


Fig.10 Comparison of Transmission Loss of Fig.6 by taking into consideration of plane wave and higher order mode of inlet/outlet

tion, Vol. 112, pp. 261~272.

- 5) S.I.Yi and B.H.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.
- 6) S.I.Yi and B.H.Lee, 1987, "Three Dimensional Acoustic Analysis of Circular Expansion Chamber with a Side Inlet and a End Outlet", *Journal of the Acoustical Society of America*, Vol. 81, pp. 1279~1287.
- 7) Y.-H. Kim, J.-W. Choi and B.-D. Lim, 1990, "Acoustic Characteristics of an Expansion with Constant Mass Flow and Steady Temperature Gradient (Theory & Numerical Simulation)", *Trans. J. Vib. Acoust. ASME* Vol. 81, pp. 460~467.
- 8) Y.-H. Kim and S.-W. Kang, 1993, "Green's Solution of the Acoustic Wave Equation for a Circular Expansion Chamber with Arbitrary Locations of Inlet, Outlet Port, and Termination Impedance", *Journal of the Acoustical Society of America*, Vol. 94, pp. 473~490.
- 9) M. Åbom, 1990, "Derivation of Four-Pole Parameters including Higher Order Mode Effects for Expansion Chamber Muffler with Extended Inlet and Outlet", *Journal of Sound and Vibration*, Vol. 137, pp. 403~418.
- 10) M.L.Munjaj, 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.
- 11) 김봉준, 정의봉, 황상문, 1999, "고차모드를 고려한 사각형 단순 확장관의 간편음향해석법의 개선", 한국소음진동공학회지, 제9권, 제2호, pp. 340~347
- 12) M.L.Munjaj, 1987, *Acoustics of Ducts and Mufflers*, New York

저 자 소 개



정의봉(鄭義峰)

1955년 12월생. 1978년 서울대학교 조선공학과 졸업. 1980년 한국과학기술원 기계공학과 졸업(석사). 1990년 동경공업대학교 기계공학과 졸업(박사). 1980년~현재 부산대학교 기계공학부 교수.



김봉준(金奉俊)

1969년 3월생. 1994년 부산대학교 정밀기계공학과 졸업. 1996년 부산대학교 대학원 정밀기계공학과 졸업(석사). 2000년 부산대학교 대학원 정밀기계공학과 졸업(박사). 2000년~현재 부산대학교 항공우주공학과 post-Doc.



이정환(李積桓)

1974년 10월생. 1998년 부산대학교 정밀기계공학과 졸업. 1998년~현재 부산대학교 대학원 기계설계공학과 석사과정.