

< 논 문 >

다입력/다출력관을 갖는 확장관의 투과손실 해석

Transmission Loss Analysis of Simple Expansion Chambers with Multiple Inlets and Outlets

박기춘*, 김양한**

Ki-Chun, Park and Yang-Hann, Kim

(1998년 3월 6일 접수 : 1998년 6월 15일 심사완료)

Key Words : Transmission Loss(투과손실), Expansion Chamber(확장관), Multiple Inlet/Outlet Ports(다입-출력관), Higher Order Mode(고차모드), Green's Function(그린함수), Transfer Matrix(전달행렬)

ABSTRACT

Transmission loss of the simple expansion chamber with multiple inlet and outlet ports is obtained. Transfer matrices which represent the relation between the power variables(pressure and velocity) of inlets and outlets depend on the input relations as well as the acoustic system parameters(i.e. geometry of the chamber, wall admittance, etc.). The analysis has been performed analytically, including the effects of higher order modes for the 2-inlet/1-outlet, 1-inlet/2-outlet and 2-inlet/2-outlet systems. This study yields that phase difference between the inlet ports can significantly increase the transmission loss in low frequency range.

1. 서 론

자동차와 같은 내연기관의 배기구에서 방출되는 소음을 효과적으로 차단하기 위한 소음기가 다양한 구성요소들을 이용하여 설계, 개발되고 있다. 또한 보다 효율적인 소음기 설계를 위하여 각종 기본요소들의 음향학적 특성에 관한 연구가 활발하게 진행되고 있다. 관련된 연구를 살펴보면 국내에서는 이정권, 이병호^(1,2)는 유속이 존재하는 단순확장관과 역류형 확장관에서, 입-출력관이 확장관 단면내의 임의의 위치에 놓여 있을 경우, 고차 음향모드를 고려한 투

과손실의 이론적 해석을 수행한바 있고, 김양한, 최재웅, 임병덕^(3,4)은 유속의 존재와 더불어 길이방향의 온도구배가 존재하는 단순확장관과 역류형 확장관에 대한 투과손실을 이론적으로 해석하였다. 김양한, 강성우^(5,6)는 입력관 단순확장관의 표면에 임의로 위치할 경우, 그린함수(Green's function)을 이용한 확장관의 내부음장을 유도하고, 특히 원통면에 입력관과 출력관이 위치할 때의 투과손실을 해석하였으며, 세계의 관을 갖는 확장관에 대한 내부음장의 엄밀해를 유도하였다. 국외의 경우 훨씬 풍부하고 다양한 연구가 이루어져 왔으며, 많은 연구결과가 참고문헌 (7)에 잘 정리되어 있다. 이들은 주로 하나의 입력관과 출력관을 갖는 단순확장관의 경우에 대해, 고차모드를 고려한 투과손실을 해석한 경우가 대부분이었다. 그러나, 다양한 엔진의 개발과 배

* 기아 테크니컬센터

** 정회원, 한국과학기술원 기계공학과

기계의 적정 배치기법의 발달로 여러개의 배기구를 갖는 차량이 등장하고 있으며, 이로 인해 다입력/다출력관을 갖는 소음기가 제작되고 있어 이에 대한 좀더 명쾌한 이해가 필요하다. 특히 다입력/다출력 시스템의 투과손실이 평면파 영역에서 현실적으로 고려할 가치가 있을 정도의 영향이 있는지 여부와 해석상의 의문점, 즉 입력의 갯수가 출력의 갯수보다 적을때 나타나는 비유일성 문제의 처리방법이 관심의 대상이다.

본 논문에서는 다입력/다출력관을 갖는 소음기의 음파전달 특성을 고차모드의 영향을 고려하여 해석하는 수학적 방법을 제시하고, 관련된 특이문제를 다루고 있다. 응용대상으로는 2-입력관/1-출력관, 1-입력관/2-출력관, 2-입력관/2-출력관을 갖는 단순 확장관을 선정하고, 각각의 경우 투과손실을 예측하고 실험을 통해 그 타당성을 검증하고 있다.

2. 확장관 내부음장의 해석

일반적으로 임의의 경계조건을 갖는 영역 내에서의 음장은 다음의 헬름홀츠식(Helmholtz Eq.)을 만족한다.

$$\nabla^2 \phi(\vec{r}) + k^2 \phi(\vec{r}) = -q(\vec{r}_0) \quad (1)$$

여기서, $\phi(\vec{r})$ 는 음원 $q(\vec{r}_0)e^{-i\omega t}$ 에 의해 생성된 음장의 속도포텐셜(velocity potential)로 입자속도 $\vec{V}(\vec{r})$ 와 음압 $P(\vec{r})$ 와는 아래와 같은 관계를 갖으며,

$$\vec{V}(\vec{r}) = \nabla \phi(\vec{r}) \quad (2.a)$$

$$P(\vec{r}) = -j\omega\rho\phi(\vec{r}) \quad (2.b)$$

여기서, ρ 는 매질의 밀도이고, 각주파수 ω , 음파속도 c 일때 파수 k 는 ω/c 이다. 이때, \vec{r}_0 에 위치한 단위음원에 의한 \vec{r} 에서의 음장을 표현하는 그린함수(Green's function) $G_k(\vec{r}|\vec{r}_0)$ 를 이용하면, 경계영역 안의 임의의 위치에서의 $\phi(\vec{r})$ 는 아래의 키르히호프-헬름홀츠 적분식(Kirchhoff-Helmholtz integral Eq.)으로 표현될 수 있다.

$$\begin{aligned} \phi(\vec{r}) = & \iint_{\partial V} \left\{ G_k(\vec{r}|\vec{r}_0) \frac{\partial \phi(\vec{r}_0)}{\partial n} - \phi(\vec{r}_0) \frac{\partial G_k(\vec{r}|\vec{r}_0)}{\partial n} \right\} dS_0 \\ & + \iiint_V \rho(\vec{r}_0) G_k(\vec{r}|\vec{r}_0) dV_0 \end{aligned} \quad (3)$$

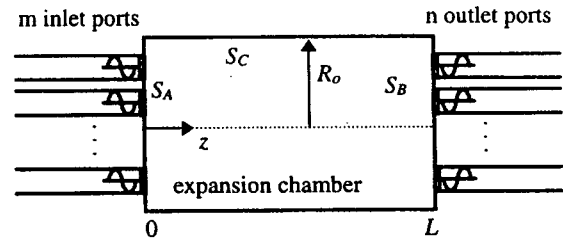


Fig. 1 Expansion chamber with multiple inlet/outlet ports

이때, 확장관 내부에 음원이 존재하지 않을 경우, 경계면에서의 구배(gradient)가 영(0)인 그린함수를 선정한다면, 식 (3)에서 첫째항만 남게 된다.

Fig. 1의 다입력/다출력관을 갖는 확장관의 경계조건을 생각해보면, 입-출력관이 위치한 면에서는 가상 피스톤의 조화운동(harmonic motion)으로 가정하고, 그외의 확장관면에서는 강체라 가정할 수 있다. 따라서,

$$S_A : \left. \frac{\partial \phi}{\partial z} \right|_{z=0} = \sum_i^m V_i H_i(r, \theta) \quad (4.a)$$

$$S_B : \left. \frac{\partial \phi}{\partial z} \right|_{z=L} = \sum_i^n V_i H_i(r, \theta) \quad (4.b)$$

$$S_C : \left. \frac{\partial \phi}{\partial r} \right|_{r=R_0} = 0 \quad (4.c)$$

여기서, V_i 는 i 번째 관에서의 입자속도(가상 피스톤의 속도)를, $H_i(r, \theta)$ 는 i 번째 관이 위치한 면에서는 1, 나머지 영역에서는 0의 값을 갖는 헤비사이드(heviside)함수이다. 식 (4)의 경계조건을 식 (3)에 대입하여 정리하면,

$$\begin{aligned} \phi(\vec{r}) = & \sum_i^m \iint_{S_{A_i}} \{ G_k(\vec{r}|\vec{r}_0) V_i H_i(\vec{r}_0) \} dS_0 \\ & + \sum_i^n \iint_{S_{B_i}} \{ G_k(\vec{r}|\vec{r}_0) V_i H_i(\vec{r}_0) \} dS_0 \\ = & \sum_i^m \phi_{i,S_A}(\vec{r}) + \sum_i^n \phi_{i,S_B}(\vec{r}) \end{aligned} \quad (5)$$

이 된다. 이는 물리적으로, 확장관 내부의 전체 음장은 각 입-출력관에서의 가진으로 인해 생성된 각각의 음장들의 합으로 구성되어짐을 의미한다. 이때 식 (5)의 동차노이만 경계조건(homogeneous Neumann B.C.)을 만족하는 그린함수는 내부음장의 고유함수들의 조합으로 구할 수 있으며⁽⁸⁾, 원형확장관일 경우 내부음장의 고유함수 $\phi_{mnp}(\vec{r})$ 는

$$\phi_{mnp}(r) = J_m(k_{r_{mn}} r) \cos(m\theta) \cos(k_{z_p} z) \quad (6)$$

으로 나타내진다. 여기서, J_m 은 m 차 1종 베셀함수 (bessel function)이고, 식 (4)의 경계조건들에 의해

$$k_{r_{mn}} = \frac{\lambda_{mn}}{R_0} \quad \{J_m(\lambda_{mn}) = 0\}, \quad k_{z_p} = \frac{p\pi}{L} \quad (7)$$

$$k_{mnp}^2 = k_{r_{mn}}^2 + k_{z_p}^2 \quad (8)$$

의 고유치(eigenvalue)와 관계식이 얻어진다. 여기서, (m, n, p) 는 각각 원주방향, 반지름방향, 길이방향의 모드를 가리키는 지수로 0,1,2,...의 정수이다. 그리고, 식 (6)를 이용하여 동차노이만 경계조건을 만족하는 그린함수를 유도해보면 다음과 같다.

$$G_k(\vec{r} | \vec{r}_0) = \sum_{m,n,p} G_{mnp}(k) \phi_{mnp}(\vec{r}) \phi_{mnp}(\vec{r}_0) \quad (9)$$

$$G_{mnp}(k) = \frac{\varepsilon_m \varepsilon_p (k_{r_{mn}} + \mu_{mn})^2}{\pi L [(k_{r_{mn}} + \mu_{mn})^2 R_0^2 - m^2] J_m^2(k_{r_{mn}} R_0) (k_{mnp}^2 - k^2)},$$

$$\mu_{mn} = \begin{cases} 1 & \text{when } m = n = 0 \\ 0 & \text{otherwise} \end{cases} \quad \varepsilon_m, \varepsilon_p = \begin{cases} 1 & \text{when } m = p = 0 \\ 2 & \text{otherwise} \end{cases}$$

이때, 수학적으로는 (m, n, p) 에 대한 무한합이 되어야 하지만, 확장관의 크기와 관심 주파수영역에 따라 값이 수렴하는 범위에서 유한합을 취할 수 있다. 식 (9)의 그린함수를 식 (5)의 적분식에 대입하고 그라프 합정리(Grafs addition theorem)⁽⁹⁾를 사용하여 정리하면,

$$\phi_j(\vec{r}) = - \sum_{m,n,p} 2\pi V_j G_{mnp}(k) \phi_{mnp}(\vec{r}) \Omega_{mnp}(\vec{r}_j) \quad (10)$$

$$\Omega_{mnp}(\vec{r}_j) = \frac{[J_1(k_{r_{mn}} r_j) + \mu_{mn}] J_m(k_{r_{mn}} \delta_j) \cos(m\theta_j)}{k_{r_{mn}} r_j + 2\mu_{mn}}$$

이 되고, 이는 j 번째 관의 가진에 의해 생성된 음장을 나타낸다. 이때, j 번째 관의 가진에 의한 i 번째 관이 접한 면에서의 평균음압을 P_{ij} 라고 하면, 식 (2.a)으로부터 다음과 같이 구할 수 있다.

$$P_{ij} = -j\omega\rho \cdot \left(\frac{1}{S_i} \iint_{S_i} \phi_j(\vec{r}) dS_o \right) \\ = \frac{ik\rho c}{\pi r_i^2} \sum_{m,n,p} 4V_j \Omega_{mnp}(\vec{r}_i) \Omega_{mnp}(\vec{r}_j) \quad (11)$$

따라서, i 번째 관이 접한 면에서의 평균음압 P_i 는 각 입-출력관에서의 가진으로 인해 생성된 음압의 선형조합으로 얻어질 수 있다.

$$P_i = \sum_j P_{ij} = \sum_j Z_{ij} U_j \quad (12)$$

여기서, U_j 는 j 번째 관에서의 체적속도로서 $U_j = V_j \pi r_j^2$ 이고, Z_{ij} 는 j 번째 관에서의 체적속도에 대한 i 번째 관에서의 생성음압의 비로 정의된 임피던스(impedance)로 P_{ij}/U_j 이다. 이를 이용해 확장관의 내부음장을 묘사할 수 있다.

3. 투과손실의 예측 및 실험결과

식 (12)에서 입-출력단의 파워변수인 음압벡터와 체적속도벡터를 행렬식으로 표현하면

$$\begin{bmatrix} P_i \\ P_o \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} Z_{ii} & Z_{io} \\ Z_{oi} & Z_{oo} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} U_i \\ U_o \end{bmatrix} \quad (13)$$

이 된다. 여기서, P 는 음압벡터, U 는 체적속도벡터를 나타내고, (i, o) 는 각각 입력관과 출력관을 표현한다. 그러나, 전달행렬을 구성하기 위해서는 입력단과 출력단의 변수들을 다음과 같이 분리해야만 한다.

$$\begin{bmatrix} P_i \\ U_i \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} T_{pp} & T_{po} \\ T_{op} & T_{oo} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} P_o \\ U_o \end{bmatrix} \quad (14)$$

다입력/다출력관을 갖는 확장관의 예로서, 실제로 많은 응용예가 있는 2-입력관/1-출력관, 1-입력관/2-출력관, 2-입력관/2-출력관의 경우에 대해 고찰하면 다음과 같다.

2-입력관/1-출력관을 갖는 확장관:

입력관의 갯수가 출력관보다 많은 경우의 예로서, 2-입력관/1-출력관을 갖는 단순확장관을 들 수 있다. 입력관을 각각 1과 2, 출력관을 3으로 표기하면, 식 (13)과 (14)로부터

$$\begin{bmatrix} P_1 \\ U_1 \\ P_2 \\ U_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} T_{11} & T_{12} \\ T_{21} & T_{22} \\ T_{31} & T_{32} \\ T_{41} & T_{42} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} P_3 \\ U_3 \end{bmatrix} \quad (15)$$

의 전달행렬식이 얻어진다. 이때, 행렬요소 T_{ij} 는 임피던스 Z_{ij} 와 두 입력관 간의 체적속도의 비 $U_2/U_1 = A \exp(i\phi)$ 의 함수로 구성된다⁽¹⁰⁾. 즉, 확장관의 형상에 의해 결정되는 임피던스와 함께 입력관 간의 상호정보(체적속도 비)를 알아야만 전달행렬식

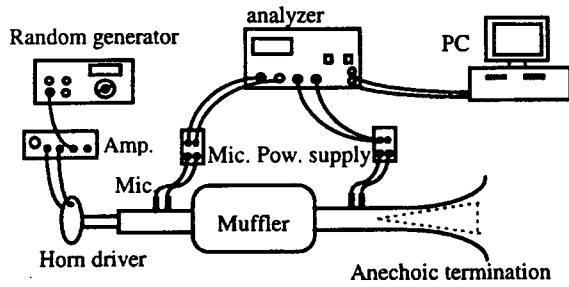


Fig. 2 Experiment setup for measuring the transmission loss of a muffler

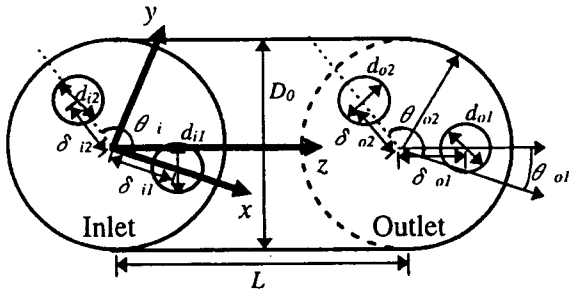


Fig. 3 Coordinate and configuration of expansion chamber

으로 변환시킬 수 있는 것이다. 이와같이, 입력관 개수가 출력관보다 많은 일반적인 경우에서의 전달행렬 요소는 입력관 간의 체적속도 크기비와 위상차를 포함하게 된다.

확장관의 소음저감 특성을 살펴보기 위해서, 각 입력관으로 입사된 전체 입사파와 각 출력관으로 투과된 전체 투과파의 비로 정의된 투과손실을 이용하기로 한다. 투과손실의 측정을 위한 실험장치는 Fig. 2와 같다.

단일 입-출력관을 갖는 소음기의 투과손실을 측정할때와 유사하게, 각 출력관에는 무반사 처리를 하고, 각 입력관에는 동일한 신호로 가진되는 혼드라이버(horn driver)를 설치하였으며, 각 입-출력관마다 두개의 마이크로폰을 장착하여 음파분리법⁽¹¹⁾으로 입-출력파를 계산하여 투과손실을 구했다. 이론적 해석시 필요한 확장관의 형상변수와 좌표는 Fig. 3과 같다.

Fig. 4(a)는 2-입력관/1-출력관을 갖는 확장관의 투과손실의 예측결과와 실험결과인데, 서로 잘 일치하고 있음을 알 수 있다. 그리고, Fig. 4(b)는 두 입력관에 대해 등가면적을 갖는 단일 입력관이 동일한 오프셋 위치($\delta_i = \delta_{1,2}$)에 있는 경우의 투과손실을

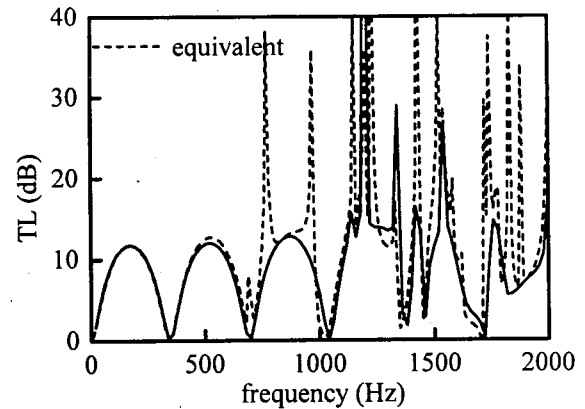
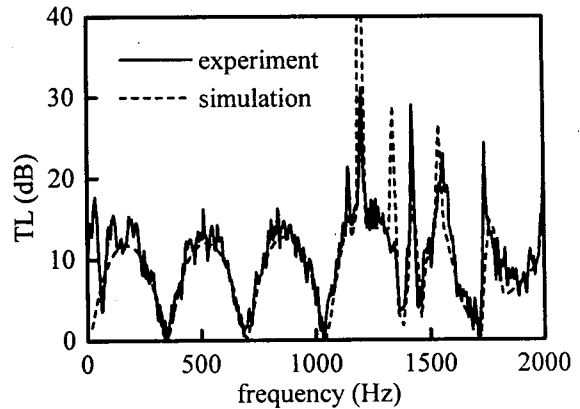


Fig. 4 Transmission loss of the 2-inlet/1-outlet-port chamber : $L=0.5$ m, $D_0=0.29$ m, $\delta_i=0.08$ m, $\delta_o=0$, $d_i=0.074$ m, $d_o=0.106$ m.

나타내는데(그림에서 equivalent), 평면파 주파수 영역(690 Hz 이하)에서는 두 경우가 서로 비슷한 특성을 보이나, 고차모드(1, 0, 0)가 전파하는 690 Hz이상의 영역에서는 큰 차이가 있음을 알 수 있다. 그러나, 입력관 간의 체적속도 크기차이와 위상차가 존재하지 않는다면, 평면파 영역에서는 등가의 모델로 해석할 수 있음을 알 수 있다. Fig. 5는 출력관이 단면의 중심에 위치했을 경우, 입력관의 편심 정도에 따른 투과손실의 예측결과를 보여준다. Fig. 5(b)와 같이 입력관이 (0, 1, 0)모드의 노드선에 위치할 경우($\delta_i = 0.313 D_0$), 1440~1600 Hz영역에서 큰 투과손실이 존재하는데, 이는 (0, 1, 0)모드가 가진되지 않았음을 의미한다. Fig. 6은 입력관 간의 음파의 크기비가 존재할 경우 투과손실의 예측치이며, 음압구배로 인해 입사파가 큰 쪽에서 작은 쪽으로 입사파의 일부가 입력관으로 빠져 나감으로인

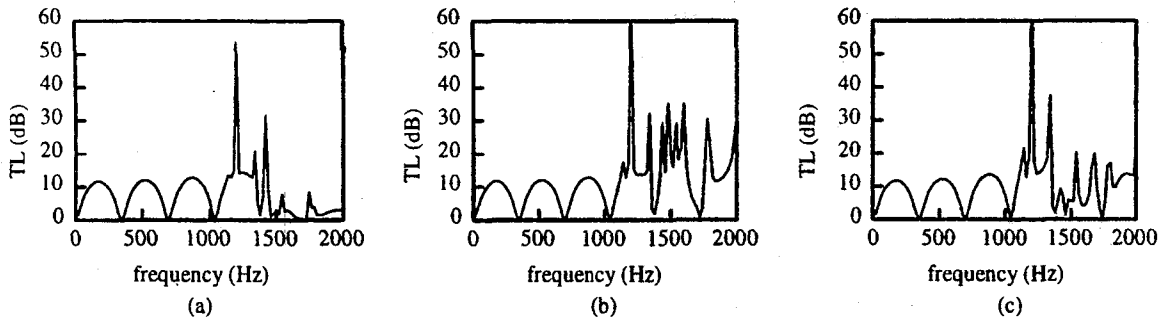


Fig. 5 Transmission loss of the 2-inlet/1-outlet-port chamber with varying the eccentricities of inlet ports :
 (a) $\delta_i = 0.213 D_o, \theta_i = 180^\circ, \theta_o = 0^\circ$ (b) $\delta_i = 0.313 D_o, \theta_i = 180^\circ, \theta_o = 0^\circ$ (c) $\delta_i = 0.413 D_o, \theta_i = 180^\circ, \theta_o = 0^\circ$

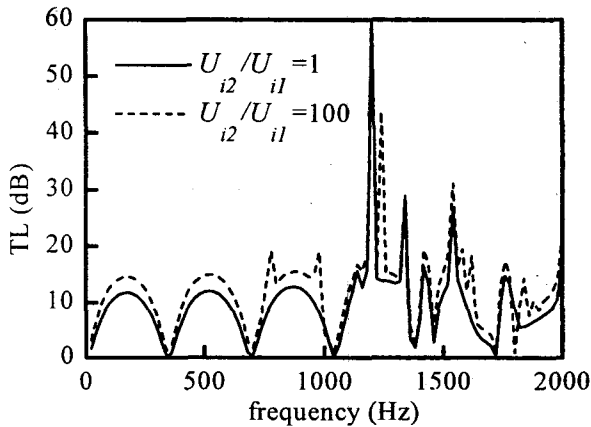


Fig. 6 Transmission loss of the 2-inlet/1-outlet port chamber with varying the ratio of volume velocity between inlet ports

해 투과손실이 커지는 현상이 나타난다. Fig. 7은 입력관의 길이차이를 이용하여 확장관에 입사되는 음파에 위상차를 준 경우이다. 본 실험에서는 입력관간의 길이차이(0.75 m)에 의해 $f = 228$ Hz 성분과 $3f, 5f, 7f$ 성분의 음파가 역위상(180°)으로 확장관에 입사되고, 이때 입사음파 간의 상쇄간섭으로 인해 그 주파수에서는 큰 투과손실이 유발됨을 보여준다.

1-입력관/2-출력관을 갖는 확장관:

입력관의 갯수가 출력관보다 적은 경우의 예로서, 1-입력관/2-출력관을 갖는 단순확장관을 생각할 수 있다. 입력관을 1, 출력관을 2와 3이라 하면,

$$\begin{bmatrix} P_1 \\ U_1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} T_{11} & T_{12} & T_{13} & T_{14} \\ T_{21} & T_{22} & T_{23} & T_{24} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} P_2 \\ U_2 \\ P_3 \\ U_3 \end{bmatrix} \quad (16)$$

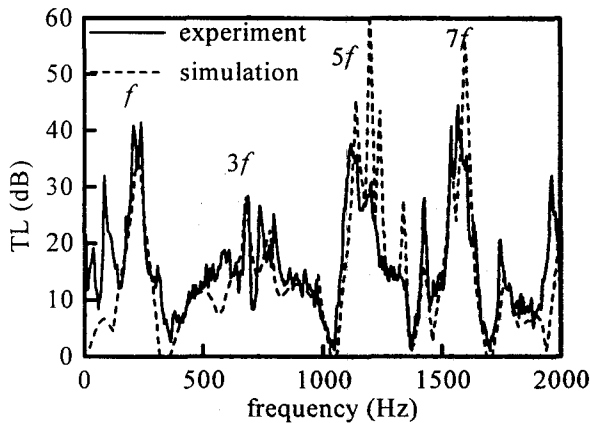


Fig. 7 Transmission loss of the 2-inlet/1-outlet port chamber, which is excited with the different phase volume velocity between inlet ports

으로 전달행렬식을 표현할 수 있는데, 이때는 2-입력관/1-출력관을 갖는 확장관의 경우와 마찬가지로 임피던스 Z_{ij} 의 정보 뿐만 아니라 출력관 간의 상호관계가 필요하게 된다. 그러나, 일반적으로 출력관 간의 체적속도비를 알 수 없을 경우가 대부분이므로, 경계조건과 상관없이 확장관만의 음향특성을 나타내는 유일한(unique) 전달행렬을 구할 수는 없다. 따라서, 출력단의 경계조건을 적절히 가정한 후, 내부음장을 해석하여 전달행렬을 구성해야 한다. 본 연구에서는 편의상 두 출력관의 끝단이 무반사조건을 만족한다고 가정하였다. Fig. 8은 입력관이 중심으로부터 0.08 m편심되어 있고, 출력관은 중심으로부터 서로 대칭적(180°)으로 위치하며 그 중 하나는 입력관 서로 평행할 경우의 투과손실을 나타낸다. Fig. 4와 비교하면 평면파 영역(680 Hz 이하)에

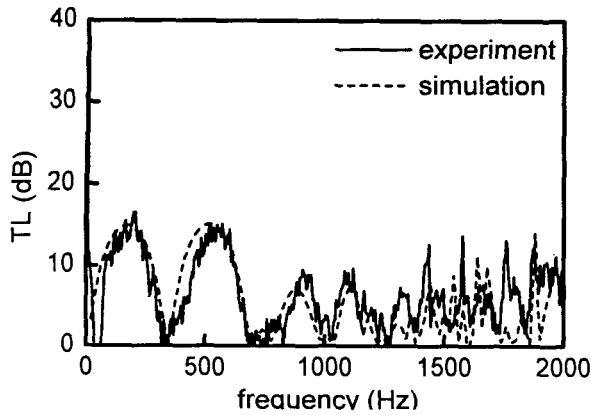


Fig. 8 Transmission loss of the 1-inlet/2-outlet port chamber : $d_i = 0.074$ m, $d_o = 0.084$ m, $\delta_{i,o} = 0.08$ m

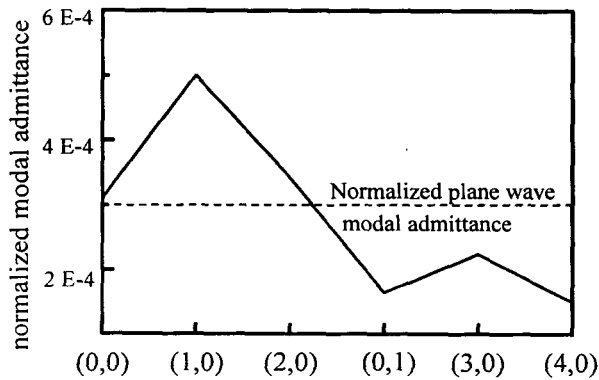


Fig. 9 Modal admittance at the end wall of the 1-inlet/2-outlet port chamber : $d_o = 0.084$ m, $\delta_o = 0.08$ m, $\theta_o = 180^\circ$

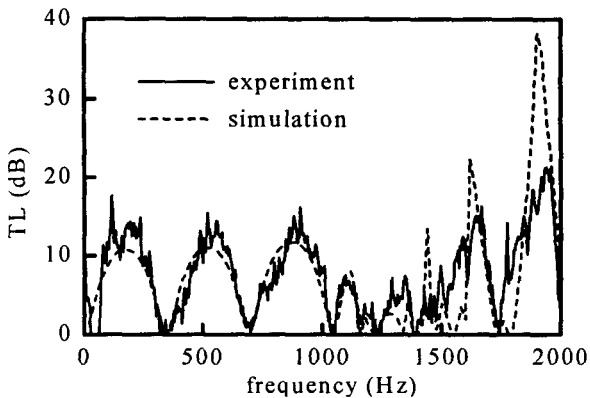


Fig. 10 Transmission loss of the 2-inlet/2-outlet port chamber : $d_i = 0.074$ m, $d_o = 0.084$ m, $\delta_{i,o} = 0.08$ m

서는 비슷하나 그 이상의 주파수영역에서는 투과손실이 전체적으로 줄어들었음을 볼 수 있다. Fig. 9는 실험에 사용된 확장관 형상에 근거해서 이론적으로 계산된 확장관 끝단에서의 모드 어드미턴스(modal admittance)를 나타낸다. 이때 (1, 0, 0), (2, 0, 0), (3, 0, 0)의 원주방향의 모드에서 큰 어드미턴스 특성을 갖고, (0, 1, 0)의 반경방향의 모드는 작은 어드미턴스를 갖는데, 이는 출력관이 원주방향의 모드를 잘 통과시키고 있음을 의미한다.

2-입력관/2-출력관을 갖는 확장관:

입력관과 출력관의 갯수가 같은 다입력/다출력관의 예로서, 2-입력관/2-출력관을 갖는 확장관을 생각할 수 있다. 이 경우의 전달행렬식은, 입력관을 각각 1과 2로, 출력관을 3과 4이라 하면,

$$\begin{bmatrix} P_1 \\ U_1 \\ P_2 \\ U_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} T_{11} T_{12} T_{13} T_{14} \\ T_{21} T_{22} T_{23} T_{24} \\ T_{31} T_{32} T_{33} T_{34} \\ T_{41} T_{42} T_{43} T_{44} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} P_3 \\ U_3 \\ P_4 \\ U_4 \end{bmatrix} \quad (17)$$

으로 표현된다. 여기서, T_{ij} 는 앞의 두 경우와 달리 임피던스 Z_{ij} 만의 조합으로 이루어지며, 이는 전달행렬을 구성함에 있어 입-출력관 간의 상호관계가 전제되지 않아도 된다는 의미이다. 즉, 확장관의 기하학적 형태에 따라 유일한 전달행렬을 구할 수 있는 것이다.

Fig. 10은 2-입력관/2-출력관을 갖는 확장관의 투과손실로서, 예측결과와 실험결과가 서로 잘 일치함을 볼 수 있으나, Fig. 4와 비교해보면 투과손실면에서는 이득이 없음을 알 수 있다.

5. 결 론

다입력관/다출력관을 갖는 확장관의 내부음장에 대해 고차모드를 고려한 3차원적 해석으로 수식화하고, 각각의 경우에 대한 전달행렬을 구성해 보았다. 특히, 2-입력관/1-출력관, 1-입력관/2-출력관, 2-입력관/2-출력관을 갖는 확장관에 적용하여 내부음장을 해석하였으며, 투과손실을 구해봄으로써 확장관의 소음저감 특성을 알아보고, 실험을 통해 타당성을 검증하였다. 그 결과, 입력관이나 출력관의 위치가 소음저감 특성에 큰 영향을 미치고 있음을 확인하였고, 입력관에서의 속도차이가 있을 경우에 큰 투과손실을 얻을 수 있음을 알았다. 그러나, 만일 각 입력관이나 출력관에서 서로간에 속도차나 압력차가

없을 경우에는 동일 체적면의 단일 입-출력관을 갖는 등가의 확장관으로 모델링해도 저주파수 영역에서는 비슷한 결과를 얻을 수 있음을 확인하였다. 그리고, 이를 바탕으로 일반적인 다입력/다출력관을 갖는 소음기의 설계나 해석에 그 응용성이 있음을 보였다.

참 고 문 헌

- (1) Ih, J.-G., and Lee, B.-H., 1985, Analysis of Higher Order Mode Effects in the Circular Expansion Chamber with Mean Flow, *J. Acoust. Soc. Am.*, Vol. 77, pp. 1377~1388.
- (2) Ih, J.-G., and Lee, B.-H., 1987, Theoretical prediction of the transmission loss for the circular reversing chamber muffler, *J. Sound and Vib.*, Vol. 112(2), pp. 261~272.
- (3) Kim, Y.-H., Choi, J.-W., and Lim, B.-D., 1990, Acoustic Characteristics of an Expansion Chamber with Constant Mass Flow and Steady Temperature Gradient (Theory and Numerical Simulation), *Trans. J. Vib. Acoust. ASME.*, Vol. 112(4), pp. 460~467.
- (4) Kim, Y.-H., and Choi, J.-W., 1991, General Solution of Acoustic Wave Equation for Circular Reversing Chamber with Temperature Gradient, *Trans. J. Vib. Acoust. ASME.*, Vol. 113(4), pp. 543~550.
- (5) Kim, Y.-H., and Kang, S.-W., 1993, Greens Solution of the Acoustic Wave Equation For a Circular Expansion Chamber With Arbitrary Locations of Inlet, Outlet Port and Termination Impedance, *J. Acoust. Soc. Am.*, Vol. 94(1), pp. 473~490.
- (6) Kang, S.-W., and Kim, Y.-H., 1995, Green Function Analysis of the Acoustic Field in a Finite Three-Port Circular Chamber, *J. Sound and Vib.*, Vol. 181(2), pp. 765~780.
- (7) Munjal, M. L., 1987, *Acoustics of ducts and mufflers*, John Wiley & Sons.
- (8) Morse, P. M., and Ingard, K. U., 1968, *Theoretical Acoustics*, McGraw-Hill.
- (9) Watson, G. N., 1966, *A Treatise on the Theory of Bessel Functions*, Cambridge University Press.
- (10) 박기춘, 1996, 다입력 다출력관을 갖는 확장관의 전달손실해석, 한국과학기술원 석사학위논문.
- (11) 강성우, 김양한, 1992, 두개의 음향 탐촉자를 이용한 소음기의 투과 손실 측정과 오차 해석, 한국소음진동공학회지, 제 2권, 제 3호, pp.85~90.