

## 동심 연장관형 소음기의 음향해석

### An Acoustic Analysis of Mufflers with a Concentric Extended Pipe

이 준 신,\* 이 정 권\*  
(Jun-Shin Lee and Jeong-Guon Ih)

#### 요 약

입력단 또는 출력단이 원형 확장관 안으로 돌출되어 있는 소음기가 관내 전달 소음저감을 위해 많이 쓰이고 있다. 저주파수 영역에서의 소음저감 효과는 음파 진행 단면의 확장-축소와 입력단-출력단의 상대적 위치 등으로 발생하는 소음기의 리액티브 성분으로 설명이 된다. 본 연구에서는 입력 혹은 출력단에 동심으로 배치된 한개의 연장관이 단순 팽창형 소음기에 삽입되어 있는 경우에 대한 음향해석을 수행하였다. 해석방법으로는, 음장을 분리좌표계로 표현될 수 있는 몇개의 경계 표면으로 나누고, 각 표면에서의 음압 및 입자속도를 정규화된 음향 고유 모드로 전개하여 간단한 대수식으로 표현하였다. 제안된 해석적인 방법을 사용하여 소음기의 투과손실을 예측하였으며, 실험과도 잘 일치함을 관찰할 수 있었다.

#### ABSTRACT

Cylindrical chamber mufflers with an extended inlet or outlet are extensively used in many application fields to reduce the propagated noise in ducts. The basic attenuation effectiveness in the low frequency region can be explained by the reactive wave action inside the expansion chamber associated with the geometric configurations of the inlet and outlet locations, and the area expansion of the jacket. In this study, an acoustic analysis is carried out for a concentric extended pipe inserted into a simple expansion chamber. An algebraic equation is derived by using the eigenfunction expansion and orthogonality principle in which the acoustic pressures and particle velocities defined on each subdivided surface are expressed by the separable coordinates. By using the proposed analytical method, transmission losses are predicted for several configurations of the concentric extended systems and they agree very well with experimental results.

#### I. 서 론

소음기는 그 형식이 반사형이건 소실형이건 간에, 저주파수 영역에서의 소음저감 성능은 음파 진행 단면의 확장-축소 그리고 입력단-출력단의 위치 등으로

발생되는 소음기의 리액티브 효과에 기인한다 할 수 있다. 따라서, 소음기 설계에 있어서 기본적인 인자는 팽창실 및 연결관의 직경, 길이, 입력 또는 출력단의 위치등과 같은 기하학적 변수들이라고 할 수 있다. 이러한 기하학적인 조건을 일반화 시킨 것으로서 Ih 등<sup>[1-3]</sup>과 Kim 등<sup>[4]</sup>의 결과가 있다.

특히 입력단 또는 출력단이 확장관 안으로 연장되

\*한국과학기술원 기계공학과 소음진동제어 연구센터  
접수일자: 1994년 9월 24일

어 있는 경우에는 그 길이가  $\lambda/4$ 에 해당하는 주파수에서 큰 감쇠를 얻게 되는데, 대부분의 실제 소음기는 약 20% 이상의 천공률을 갖는 천공교(perforated bridge)로 입출구를 연결하는 형태를 지니고 있고, 이는 음향학적으로 투명한 천공부의 특성으로 인해, 연장관이 있는 팽창실로 간주되고 있다. 연장관을 포함하는 단순팽창형 소음기는 그 기하형상이 복잡하므로, 정확한 음향성능을 평면파로만 해석하기에는 큰 오차를 유발하고 있었다.

이와 같은 어려움을 극복하기 위해 경계요소법(boundary element method) 또는 유한요소법(finite element method) 등의 수치해석 방법이 사용되어 왔다<sup>[5-6]</sup>. 이 방법들은, 일반적인 모양의 소음기에 적용이 가능하지만, 계산시간 등 여러가지 단점이 수반된다. 최근에, Åbom은 모든 매칭 방법<sup>[7]</sup> 이용하여 입력단 또는 출력단이 확장관 안으로 돌출되어 있는 경우의 소음기에 대한 해석을 행하였다<sup>[8]</sup>. 그러나, 이 방법은 면적 확장비가 클 경우 많은 음향모드가 해석시 필요하게 되는 단점이 있게 된다.

한편 진동-음향계(vibro-acoustic system)에 대하여, Dowell등<sup>[9]</sup>은 경계면의 진동과 내부음장과의 연성관계를 각 표면의 모드를 이용하여 해석하였고, 특히 외부 음장으로부터 발생하는 경계면의 진동 때문에 생기는 내부 음장에 관심을 두었다. 본 연구에서는 Dowell의 방법을 내부 음향계만으로 이루어진 시스템에 적용하여<sup>[10]</sup> 연장관이 입구나 출구측 한쪽에만 존재하는 소음기에 적용하였는데, 이 방법은 분리좌표계로 표현될 수 있는 음향계에만 적용가능한 단점이 있지만 외부음향 문제 및 내외부가 연성된 음장 해석에 매우 좋은 도구가 될 수 있다. 본 연구에서는 이를 "경계모드"해석 방법이라고 부른다.

## II. 경계모드를 이용한 일반적인 해법

임의의 한 주파수에 대한 선형화된 파동 방정식은 Green의 정리를 이용하며, 다음과 같이 잘 알려진 Kirchhoff-Helmholtz 적분 방정식으로 표현될 수 있다<sup>[11]</sup>.

$$c(\mathbf{r})p(\mathbf{r}) = \int_{S_b} [-i k \rho c u(\mathbf{r}_b) G(\mathbf{r}|\mathbf{r}_b) + p(\mathbf{r}_b) \partial G(\mathbf{r}|\mathbf{r}_b) / \partial n_b] dS_b \quad (1)$$

여기서  $p$ 는 음압,  $u$ 는 입자속도,  $c$ 는 음속,  $k$ 는 파수,  $\rho$ 는 매질의 밀도,  $S$ 는 면적, 아래첨자  $b$ 는 경계면, 그리고  $\partial/\partial n_b$ 는 경계면에서 음장 내부 방향으로의 수직 편미분을 나타낸다. Green 함수  $G(\mathbf{r}|\mathbf{r}_b)$ 는 점음원이 공간벡터  $\mathbf{r}_b$ 에 있을 때 계측좌표  $\mathbf{r}$ 에서의 음장 해이며,  $c(\mathbf{r})$ 은 경계면에 존재할 때 0.5의 값을, 그리고 경계면 안쪽에 존재하면 1의 값을 갖는다.

만일 Green 함수가 Neumann 경계조건  $\partial G(\mathbf{r}|\mathbf{r}_b) / \partial n_b = 0$ 을 만족하면, 식 (1)은 다음과 같은 Rayleigh 방정식으로 변형되게 된다.

$$p(\mathbf{r}) = -i k \rho c \int_{S_b} u(\mathbf{r}_b) G(\mathbf{r}|\mathbf{r}_b) dS_b \quad (2)$$

음장을 둘러싼 밀폐경계가 분리좌표로 표현되는  $N$ 개의 표면으로 나누어지면, 식 (2)는 분할된 표면을 이용하여 다음과 같이 표현될 수 있다.

$$p(\mathbf{r}) = \sum_{j=1}^N \int_{S_j} -i k \rho c u(\mathbf{r}_j) G(\mathbf{r}|\mathbf{r}_j) dS_j, \quad (3)$$

여기서 아래첨자  $j$ 는 나누어진 표면요소를 의미한다.

각 경계면에서 정의된 음압과 입자속도를 모드 함수를 이용하여 표현하면 다음과 같다:

$$p(\mathbf{r}_j) = \sum_{n=0}^{\infty} p_{jn} \Phi_n(\mathbf{r}_j), \quad u(\mathbf{r}_j) = \sum_{n=0}^{\infty} u_{jn} \Phi_n(\mathbf{r}_j), \quad (4)$$

여기서  $p_{jn}$ ,  $u_{jn}$ 는 각각  $j$ 번째 표면의  $n$ 번째 음압 및 입자속도에 대한 모드계수임을 나타내며,  $j$ 번째 표면에서 정의된 모드함수  $\Phi_n(\mathbf{r}_j)$ 는 다음의 단위 직교성(Orthonormality)을 만족한다.

$$\delta_{nm} = \int_{S_j} \Phi_m(\mathbf{r}_j) \Phi_n(\mathbf{r}_j) dS_j = \begin{cases} 1 & \text{for } m=n, \\ 0 & \text{for } m \neq n. \end{cases} \quad (5)$$

식 (4)를 식 (3)에 대입하고 식 (5)의 단위 직교성을 이용하여 모드계수  $p_{jm}$ 을 구하면 다음과 같다:

$$p_{jm} = \rho c \sum_{j=1}^N \sum_{n=1}^{\infty} (T_{j'})_{nm} u_{jn}, \quad (6)$$

여기서

$$(T_{j'})_{nm} = -i k \int_{S_j} \int_{S_j'} \Phi_m(\mathbf{r}_j) \Phi_n(\mathbf{r}_j') G(\mathbf{r}_j'|\mathbf{r}_j) dS_j' dS_j, \quad (7)$$

$(T_{jj})_{mn}$ 는  $j'$ 번째 경계표면의  $m$ 번째 음압모드와  $j$ 번째 경계표면의  $n$  입자속도모드 사이의 모드관계계수이다. 식 (6)을 행렬방정식으로 다시 표현하면 다음과 같다:

$$P_j = \rho c \sum_{j=1}^N T_{jj} U_j \text{ for } j'=1, 2, \dots, N, \quad (8)$$

여기서  $P_j$ 는  $j'$ 번째 음압모드 벡터,  $U_j$ 는  $j$ 번째 표면의 입자 속도모드 벡터,  $T_{jj}$ 는  $j'$ 번째 경계표면의 음압모드와  $j$ 번째 경계표면의 입자 속도모드들 사이의 관계행렬이다. 예를들어,  $p_{jn}$ 는 벡터  $P_j$ 의  $n$ 번째 열, 그리고  $(T_{jj})_{mn}$ 는 관계행렬  $T_{jj}$ 의  $m$ 번째 열과  $n$ 번째 행의 값을 의미한다.

### III. 소음기 해석에의 적용

본 연구에서는 연장관이 있는 단순팽창형 소음기의 가장 기본적인 단순한 형태로서, 입력단 혹은 출력단만이 팽창형 소음기 내부로 돌출되어 있고 서로 동심으로 배치되어 있는 형태에 대한 해석을 행한다. 입력 그리고 출력 단면을 제외한 모든 표면이 강체라고 가정하며,  $w_c$ ,  $w_l$  그리고  $w_o$ 는 확장관, 입력단 그리고 출력단의 반지름을 각각 나타내며,  $l_c$ 는 확장관의 길이를 표현한다. 확장관 면과 입력단 및 출력단이 경계면으로 이루어진 음장을 해석에 용이하게 영역 A와 B로 나누며, 이들의 길이를 각각  $l_A$ 와  $l_B$ 로 표현하기로 한다. 이 내부음장은 원통좌표계로 표현되는 몇개의 표면으로 나뉘며, 이때 입력단 표면을 표면 I, 입력단 전면에서 입력단 표면을 제외한 면이 어느 영역의 경계면(A 또는 B)에 속하느냐에 따라 표면 E 또는 E'라 정의하며, 출력단 표면을 표면 O라 표기한다.(Fig. 1 참조)

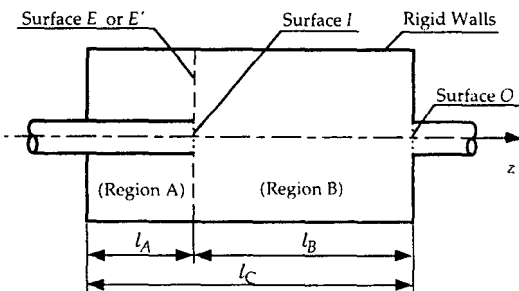


Fig. 1. 입력단 또는 출력단이 단순 팽창형 소음기 안으로 연장되어 있는 형태의 모식도.

영역 A에서는 표면 E를 제외한 모든 경계면이 강체이므로 식 (8)을 이용한 음장의 표현은 다음과 같다.

$$P_E = \rho c T_{EE} U_E. \quad (9)$$

반면, 영역 B에서는 표면 E', I 그리고 O를 제외한 모든 표면이 강체이므로, 표면 I와 O에서의 음압 벡터를 유도하기 위해 다음과 같은 행렬식이 필요하게 된다:

$$P_E = \rho c (T_{EE'} U_{E'} + T_{E'I} U_I + T_{E'O} U_O), \quad (10a)$$

$$P_I = \rho c (T_{IE'} U_{E'} + T_{II} U_I + T_{IO} U_O), \quad (10b)$$

$$P_O = \rho c (T_{OE'} U_{E'} + T_{OI} U_I + T_{OO} U_O). \quad (10c)$$

표면 E와 E'에서의 음압 및 입자속도 연속조건  $P_E = P_{E'}$  그리고  $U_E = -U_{E'}$ 를 이용하여 식 (9)-(10)을 정리하면 다음과 같다:

$$P_I = \rho c X_{II} U_I + \rho c X_{IO} U_O, \quad (11a)$$

$$P_O = \rho c X_{OI} U_I + \rho c X_{OO} U_O, \quad (11b)$$

여기서  $X_{jj}$ 는 음압과 입자속도 모드벡터들 간의 전달 행렬로 다음과 같이 정의된다:

$$X_{II} = T_{II} - T_{IE'} (T_{EE} + T_{E'E'})^{-1} T_{E'I}, \quad (12a)$$

$$X_{IO} = T_{IO} - T_{IE'} (T_{EE} + T_{E'E'})^{-1} T_{E'O}, \quad (12b)$$

$$X_{OI} = T_{OI} - T_{OE'} (T_{EE} + T_{E'E'})^{-1} T_{E'I}, \quad (12c)$$

$$X_{OO} = T_{OO} - T_{OE'} (T_{EE} + T_{E'E'})^{-1} T_{E'O}. \quad (12d)$$

여기서 윗 첨자 -1은 역행렬 연산자를 의미하며, 음향 상반성 원리(Acoustic reciprocity theorem)에 의해  $X_{IO}$ 는  $X_{OI}$ 의 전치행렬(Transpose matrix)과 같게 된다.(모드행렬에 대한 자세한 내용은 부록참조)

표면 I와 O에 평면파만이 존재한다고 가정하면, 식 (11)을 다음과 같은 행렬식으로 표현할 수 있다.

$$\begin{Bmatrix} \bar{P}_I \\ \bar{P}_O \end{Bmatrix} = \rho c \begin{bmatrix} -X_{II} & (S_O/S_I)^{1/2} X_{IO} \\ -(S_I/S_O)^{1/2} X_{OI} & X_{OO} \end{bmatrix} \cdot \begin{Bmatrix} V_I/S_I \\ V_O/S_O \end{Bmatrix}. \quad (13)$$

여기서  $\bar{P}_i$ 와  $V_i$ 는  $i$ 번째 표면 요소에 걸리는 평균압력 및 체적속도를 각각 의미하며, 행렬  $X_{jj}$ 의 첫번째 행과 열의 값을  $X_{jj}$ 로 표기하였고, 전술했듯이 음향상반성 원리에 의해  $X_{10}$ 는  $X_{01}$ 와 동일한 값을 가진다. 식 (13)을 입력단과 출력단 사이의 4단자 정수 형태(Four-pole parameters)로 표현하면 다음과 같다.

$$\begin{Bmatrix} \bar{P}_0 \\ V_0 \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} T_{aa} & T_{ab} \\ T_{ba} & T_{bb} \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \bar{P}_1 \\ V_1 \end{Bmatrix} = \frac{(S_0/S_1)^{1/2}}{X_{01}} \cdot \begin{bmatrix} (S_1/S_0)X_{00} & (X_{11}X_{00} - X_{01}X_{10}(\rho c/S_0)) \\ (S_1/\rho c) & X_{11} \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \bar{P}_1 \\ V_1 \end{Bmatrix} \quad (14)$$

이때, 출력단을 통하는 음파가 반사없이 전파된다고 가정하면, Fig. 1의 소음기 투과손실은 다음과 같이 표현된다.

$$TL = 20 \log \left\{ \left( \frac{S_0}{S_1} \right)^{1/2} \left| \frac{T_{aa} + T_{ab}(S_1/\rho c) + T_{ba}(\rho c/S_0) + T_{bb}(S_1/S_0)}{2} \right| \right\}$$

$$= 20 \log \left| \frac{1 + X_{11} - X_{01}X_{10} + X_{11}X_{00} + X_{00}}{2X_{01}} \right|. \quad (15)$$

#### IV. 결과 분석

소음기의 투과손실을 실험적으로 구하기 위해 두 개의 마이크로폰 방법을 사용하였으며<sup>[12]</sup>, 이때 두 개의 1/2인치 마이크로폰 (B&K 4134)에서 받은 신호는 신호분석기(HP 3562A)를 통과시켜서 PC상에서 처리를 하였다. 한편, 출력단의 끝부분에는 무반사 처리를 한 혼(Horn)을 달아서 음의 반사를 최소화 하였다.

Fig. 2는 소음기의 투과손실에 대한 이론과 실험의 비교로 양자가 잘 일치하는 것을 볼 수 있으며, 연장관이 없을 때의 단순평창형 소음기인 Fig. 2(a) 경우의 첫번째 및 세번째의 통과 대역에 맞게 연장관을 설치한 후 Fig.2(b)처럼 향상된 원인은 입력단면이 확장관 내의 고유모드 결점 근방에 위치했기 때문이

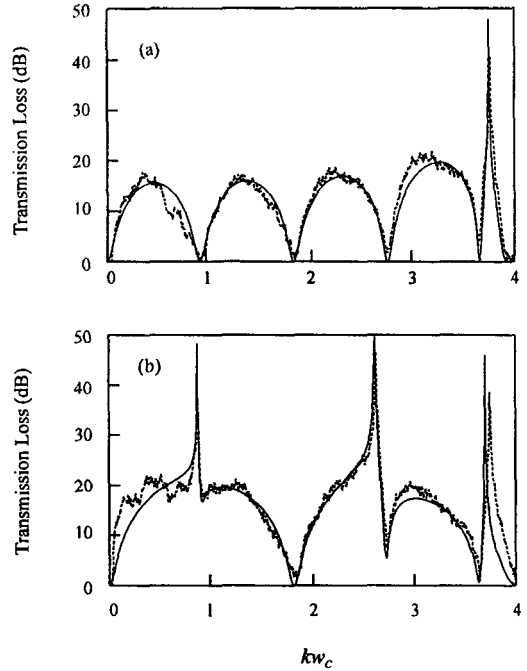


Fig. 2. 이론과 실험에 의한 투과손실의 비교 ( $l_c/w_c = 3.48$ ,  $w_1/w_c = w_0/w_c = 0.280$ ): —, 이론값; - - - - -, 실험값. (a)  $l_A/l_C = 0.0$ , (b)  $l_A/l_C = 0.465$ .

라 할 수 있다. 이때, 저주파수 대역에서 오차가 큰 이유는, 스피커의 저주파수 차단특성 및 끝단에서의 무반사 처리가 완전하지 못한 이유에 기인한다.

해석시 사용되는 모드 갯수는, 경계조건을 거의 만족하는 Green 함수가 사용됨으로 해서 음장을 표현하는데 많은 모드가 필요하지 않으므로, 각 표면에서 1개씩만을 이용하였으며, 갯수를 증가하여도 주파수가  $kw_c \leq 4.0$ 인 구간에서 투과 손실에 변화가 거의 없었음을 알 수 있었다. 확장관 안의 평면파 구간이  $kw_c \approx 3.83$ (원주 방향의 첫번째 고유진동수)보다 작음을 고려할 때,  $kw_c \leq 4.0$ 는 소음기의 고차모드와 관련된 여러가지 특성을 분석하는데 충분한 구간이라 할 수 있다. Fig. 3은 확장관 안에 평면파만이 전달된다고 가정하는 기존의 해석 방법과 경계 모드 방법을 비교한 결과이다. 입력단의 돌출 효과를 생각하지 않는다면, 입력단면이 확장관의 중간에 위치할 때, Fig. 2(a) 경우의 첫번째 및 세번째의 통과 대역은 Fig.3(a)의 평면파 해석 결과와 같이 억제대역으로 바뀌게 될 것이다. 그러나, 실제의 경우, Fig. 3(b)와 같이 확장관의 중간 위치보다 짧은 곳에서 이런 현상

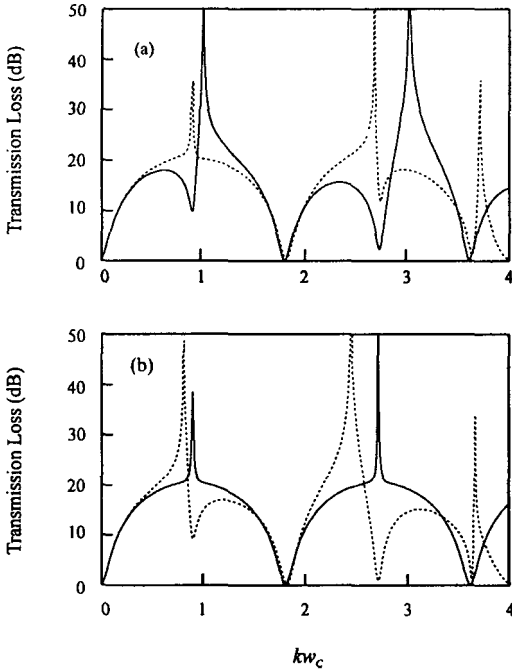


Fig. 3. 투과손실에 대한 평면파 해석법과 경계 모드 방법의 비교( $l_C/w_C = 3.48, w_I/w_C = w_O/w_C = 0.280$ ): ..... , 평면파 해석 방법; —, 경계모드방법. (a)  $l_A/l_C = 0.45$ , (b)  $l_A/l_C = 0.50$ .

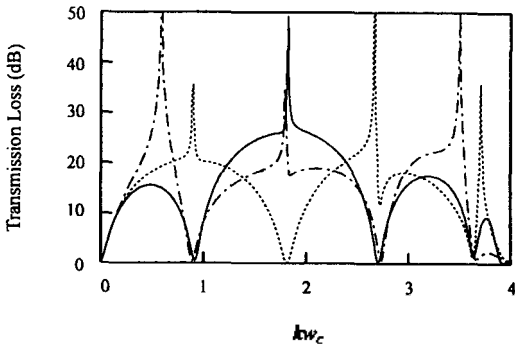


Fig. 4. 입력단 연장길이에 따른 소음기 투과손실 비교 ( $l_C/w_C = 3.48, w_I/w_C = w_O/w_C = 0.280$ ): —,  $l_A/l_C = 0.195$ ; ..... ,  $l_A/l_C = 0.45$ ; - - - - -,  $l_A/l_C = 0.65$ ; - · - · - ,  $l_A/l_C = 0.95$ .

이 나타나게 되며, 이는 입력단의 돌출 효과라 할 수 있다<sup>[10]</sup>. 여기서, 돌출효과라 함은, 연장관이 내부공간에 돌출될 때 생기는 불연속면에서 발생한 고차모드 음파가 출력단과의 거리가 짧기 때문에 감쇠(Decay)

되지 않고 출력단으로 통과되는 누설효과(Leakage effect)를 일컫는다. Fig. 4는 입력단면의 위치를 각 모드의 절점보다 약간 짧은 곳에 위치시켜 구한 투과손실로 위에서 설명한 내용을 입증하고 있다. 이 결과들로부터 입력단면이 어느 모드의 절점에 있느냐에 따라 소음기의 주파수 특성이 바뀐다는 점을 확인할 수 있었으며, 입력단의 돌출 효과를 본 연구에서 제안된 방법에 의해 효과적으로 처리할 수 있음을 보였다.

### V. 결 론

입력단 또는 출력단이 확장관 안으로 돌출되어 있는 소음기의 특성을 관찰하였고, 입력단 또는 출력단 위 위치를 적절하게 위치시켜 원하는 주파수 영역에서 소음제어 성능을 향상시킬 수 있음을 확인하였다. 제안된 경계모드 방법을 이용하여 본 연구에서 고찰한 소음기와 같이 복잡한 모양의 음장을 쉽게 표현할 수 있었으며, 실험을 통하여 이의 타당성을 검증하였다. 이 방법은 앞으로 양측에 연결관이 있고 그 위치가 임의로 주어진 일반적인 형태의 소음기의 해석에 적용될 것이며, 결과적인 4단체 정수는 기존의 소음기 해석 전용 프로그램에 삽입 될 경우, 실제 설계에 매우 유용하게 쓰일 수 있다고 사료된다.

#### 부록: 모드 관계 계수

각 표면 요소 경계 면상에서 강제벽 조건을 만족하는 고유함수를 구하면 다음과 같으며, 이때 입력단면과 출력단면은 같은 형태의 고유함수를 가지기 때문에 입력단면의 경우만 표현하였다:

$$\Phi_n(r_I) = J_0(\alpha_{0n} w/w_C) / [\pi^{1/2} w_I J_0(\alpha_{0n})], \quad (A1a)$$

$$\Phi_n(r_E) = \frac{\Lambda(\zeta_{0n} w/w_C)}{\{\pi(w_C^2 - w_I^2) [\Lambda^2(\zeta_{0n}) - (w_I/w_C)^2 \Lambda^2(\zeta_{0n} W_I)]\}^{1/2}}, \quad (A1b)$$

$$\Lambda(\zeta_{0n} w/w_C) = J_0(\zeta_{0n} w/w_C) - N_0(\zeta_{0n} w/w_C) J_0'(\zeta_{0n}) / N_0'(\zeta_{0n}), \quad (A2)$$

여기서,  $J_0$ 와  $N_0$ 는 각각 0차의 제1종 및 제2종 Bessel 함수를 나타낸다.

각 영역에서의 모든 표면이 강제인 조건을 만족하는 Green 함수와 식 (A1)을 이용하여 식 (8)의 모드 관계계수를 구하면 다음과 같다<sup>[9]</sup>:

$$(T_{ij})_{n_j n_j'} = ikH_j H_{j'} \sum_{n=0}^{\infty} \left[ \frac{\cos[s_{0n} l_{AB}(I - Z_{Dist})] I_{n n_j} I_{n n_j'}}{s_{0n} \sin(s_{0n} l_{AB}) I_{n n} \sqrt{I_{n_j n_j} I_{n_j' n_j'}}} \right], \quad (A3)$$

여기서  $H$ 는 각 표면요소의 반지름을 확장관의 반지름으로 무차원화 시킨 변수이며, 특별히 표면에서는  $w_j/w_c$ 의 값을 갖는다.  $l_{AB}$ 는 각 영역의 길이를 의미하며,  $Z_{Dist}$ 는 두표면간의 거리를 이들이 속한 영역의 길이로 무차원화 한 변수이고

$$s_{0n} = \begin{cases} \sqrt{k^2 - (\alpha_{0n}/w_0)^2} & \text{for region B,} \\ \sqrt{k^2 - (\xi_{0n}/w_0)^2} & \text{for region A} \end{cases} \quad (A4)$$

이다. 단,  $I$ 는 식 (A1)와 같은 각 표면의 고유함수에서 분자들 만의 표면 적분을 뜻한다. 예를들면, 표면  $E$ 와 표면  $O$  사이의 적분은 다음과 같이 나타내어진다:

$$I_{n_E n_O} = \int_{w_j/w_c}^1 A(\xi_{0n_E} W) J_m(\alpha_{0n_O} W) W dW, \quad (A5)$$

$$W = w/w_c. \quad (A6)$$

참 고 문 헌

1. J.-G. Ih and B.-H Lee, "Analysis of Higher-Order Mode Effects in the Circular Expansion Chamber with Mean Flow," *Journal of the Acoustical Society of America*, 77, 1377-1388(1985).
2. J.-G. Ih, "The Reactive Attenuation of Rectangular Plenum Chambers," *Journal of Sound and Vibration*, 157, 93-122(1992).
3. J.-G. Ih and J.-S. Lee, "Low Frequency Characteristics of Unlined End-in/Side-out Rectangular Plenum Chambers," *Noise Control Engineering Journal*, 40, 179-185(1993).
4. Y.-H. Kim and S.-W. Kang, "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*, 94, 473-490

- (1993).
5. C. I. Young and M. J. Crocker, "Prediction of Transmission Loss in Mufflers by the Finite Element Method," *Journal of the Acoustical Society of America*, 57, 144-148(1975).
6. A. F. Seybert and C. Y. R. Cheng, "Application of the Boundary Element Method to Acoustic Cavity Response and Muffler Analysis," *Transactions of the American Society of Mechanical Engineers, Journal of Vibration, Stress, and Reliability in Design*, 109, 15-21(1987).
7. R. Mittra and S.W.Lee, *Analytical Techniques in the Theory of Guided Waves*, Macmillan, New York, 1971, Chapter 2.
8. M. Åbom, "Derivation of Four-Pole Parameters Including Higher Order Mode Effects for Expansion Chamber Mufflers with Extended Inlet and Outlet," *Journal of Sound and Vibration*, 137, 403-418(1990).
9. E. H. Dowell, G. F. Gorman, III, and D. A. Smith, "Acoustoelasticity: General Theory, Acoustic Natural Modes and Forced Response to Sinusoidal Excitation, Including Comparison with Experiment," *Journal of the Acoustical Society of America*, 52, 519-542(1977).
10. J.-S. Lee and J.-G. Ih, "On the Method for Estimating the Volume Velocity of an Acoustic Source in a Chamber," *J. Sound Vib.* To appear in March 1995.
11. B. B. Baker and E. T. Copson, *The Mathematical Theory of Huygens' Principle*, Clarendon Press, Oxford, 1939, Chapter 1.
12. A. F. Seybert, "Two-Sensor Methods for the Measurements of Sound Intensity and Acoustic Properties in Duct," *Journal of the Acoustical Society of America*, 83, 2233-2239(1988).
13. M. Abramowitz and I.A. Stegun, *Handbook of Mathematical Functions*, Dover, New York, 1970, Chapters 9 and 11.

▲이 준 신



1985년 : 서울대학교 농기계학과  
(학사)

1988년 : 한국과학기술원 기계공  
학과(석사)

1988년~1991년 : 삼성전자(주)  
가전종합연구소

1991년~현재 : 한국과학기술원  
기계공학과 박사과정

▲이 정 권

11권4호 참조

현 한국과학기술원 기계공학과 교수