

입출구가 연장된 동심형 소음기의 음향해석

Acoustic Characteristics of Mufflers with an Extended Inlet and Outlet

이 준 신*
(Jun-shin Lee*)

*한국전력공사 전력연구원 원자력연구실

(접수일자: 2002년 3월 18일; 채택일자: 2002년 5월 16일)

입력단 및 출력단이 동심을 이루어 원형 확장관 안으로 연장되어 있는 소음기가 관내 전달 소음저감을 위해 널리 사용되고 있다. 이 소음기의 저주파수 영역에서의 소음저감 효과는 음파 진행 단면의 확장-축소와 입력단 및 출력단의 상대적 위치 등으로 발생하는 소음기의 리액티브 성분에 의해 설명이 된다. 본 논문에서는 입력단 및 출력단에 동심으로 배치된 연장관이 단순 팽창형 소음기 내부에 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. 이 해석적인 방법을 사용하여 소음기의 투과손실을 예측하였으며, 실험과도 잘 일치함을 관찰할 수 있었다.

핵심용어: 소음기, 동심형 소음기, 음향해석, 경계모드방법

투고분야: 소음 및 공력음향 분야 (10.3)

Cylindrical chamber silencers with an extended inlet and 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.

Keywords: Silencer, Concentric type silencer, Acoustic analysis, Boundary mode method

ASK subject classification: Noise and aeroacoustics (10.3)

1. 서론

소음기는 여러 종류의 기계장치에서 발생하는 흡기, 배기 또는 고압증기를 대기 중으로 배출할 때 발생하는 기류음을 감소시킬 때 널리 사용되며 음의 흡수, 팽창, 간섭의 원리로 소음을 감소시키는 기구이다. 소음기의

저주파수 영역에서의 일반적인 소음저감 성능은 음파 진행 단면의 확장-축소 및 소음기 입력단-출력단의 위치 등의 함수인 소음기의 리액티브 효과에 기인한다. 즉 소음기 설계에 있어서 기본적인 인자는 팽창실 및 연결관의 직경, 길이, 입력 및 출력단의 위치 등과 같은 기하학적 변수들이라고 할 수 있다[1-4].

리액티브형 소음기 중 입력단과 출력단이 동심으로 되어 있는 소음기는 유동저항을 작게 만들 수 있으며 제작·설치의 편의성 때문에 실제로 산업현장에 많이 사용되고

책임저자: 이준신 (ijs@kepri.re.kr)
305-380 대전광역시 유성구 문지동 103-16
한국전력연구원 원자력연구실
(전화: 042-865-5524; 팩스: 042-865-5514)

있다. 특별한 예로서 쓰레기 조각장과 같이 배출가스의 유독성분에 의한 소음기의 부식문제가 심각한 곳에서는 유등저항을 적게 만들어 부식환경을 최대한 줄여줘야 함은 물론 부식에 약한 소실형 흡음재(유리섬유 등)를 사용할 수 없는 경우가 있다. 이 경우 스테인레스 스틸 (stainless steel)만으로 제작된 리액티브형 소음기를 통해 고주파수 영역까지 소음저감을 할 필요가 발생하게 된다. 이는 입출구가 동심인 소음기의 음향특성을 매우 정밀하게 구해야 할 필요성을 의미한다.

입출구가 동심인 소음기는 입출구를 소음기 팽창실로 연장시켜 연장된 길이의 $\lambda/4$ 에 해당하는 주파수 근방에서 큰 소음저감효과를 얻게 되는데, 정확한 음향성능을 평면파로만 해석하기에는 큰 오차를 유발하고 있다. 이와 같은 어려움을 극복하기 위해 경계요소해석 (boundary element method) 또는 유한요소해석 (finite element method) 등의 수치해석 방법이 사용되어졌다[5,6]. 이 방법들은 일반적인 모양의 소음기에 적용이 가능하지만, 계산시간 등 여러 가지 단점이 수반된다.

Abom은 모드 매칭 방법을[7] 이용하여 입력단 또는 출력단이 확장관 안으로 돌출되어 있는 경우의 소음기에 대한 해석을 행하였다[8]. 하지만 이 방법은 음장해의 수렴을 위해 경계면에서 많은 모드들이 필요로 하는 단점을 수반한다. 한편 진동-음향계 (vibro-acoustic system)에 대하여, Dowell 등[9]은 경계면의 진동과 내부음장과의 연성관계를 각 표면의 모드를 이용하여 해석하였고, 특히 외부 음장으로부터 발생하는 경계면의 진동 때문에 생기는 내부 음장에 관심을 두었다. 이를 기반으로 Lee 등[10,11]은 경계면에서의 음압 및 입자속도를 음향모드로 전개하여 음향장을 표현하는 경계모드 방법을 제안하였으며, 이 방법을 사용하여 입력단이 확장관 안으로 돌출된 형태인 체적속도 계측시스템 및 음원이 부분적으로 차폐되는 음향장의 해석을 수행하였다. 또한, 내부 음향계만으로 이루어진 시스템으로 확장하여 연장관이 입구 또는 출구측 한쪽에만 존재하는 동심형 소음기에 적용하여 소음기의 특성을 고찰하였다[12]. 본 연구에서는 이를 확장하여 연장관이 입출구측에 동시에 존재하는 동심형 소음기의 음향학적 특성을 살펴보기로 한다.

II. 수학적 표현

Neumann 경계조건을 만족하는 Green의 함수를 사용하는 경우, 임의의 주파수에 대한 선형화된 파동 방정식

은 다음과 같이 잘 알려진 Rayleigh 적분 방정식으로 표현될 수 있다[13]:

$$p(r) = -ik\rho c \int_{S_b} u(r_b) G(r|r_b) dS_b \quad (1)$$

여기서 p 는 음압, u 는 입자속도, c 는 음속, k 는 파수, ρ 는 매질의 밀도, S 는 면적, 아래첨자 b 는 경계면을 나타낸다. 그린의 함수 $G(r|r_b)$ 는 점음원이 공간벡터 r_b 에 있을 때 계측좌표 r 에서의 음장 해이다.

음장을 둘러싼 밀폐경계가 분리좌표로 표현되는 N 개의 표면으로 나누어지면, 식 (1)은 분할된 표면을 이용하여 다음과 같이 표현될 수 있다:

$$p(r) = \sum_{j=1}^N \int_{S_j} -ik\rho c u(r_j) G(r|r_j) dS_j \quad (2)$$

여기서 아래첨자 j 는 나누어진 표면요소를 의미한다. 각 경계면에서 정의된 음압과 입자속도를 모드 함수를 이용하여 표현하면 다음과 같다:

$$p(r_j) = \sum_{m=0}^{\infty} p_m \Phi_m(r_j), \quad u(r_j) = \sum_{m=0}^{\infty} u_m \Phi_n(r_j) \quad (3)$$

여기서 P_m, u_m 은 각각 j 번째 표면의 n 번째 음압 및 입자속도에 대한 모드계수임을 나타내며, j 번째 표면에서 정의된 모드함수 $\Phi_n(r_j)$ 는 다음의 단위 직교성 (Orthonormality)을 만족한다:

$$\delta_{mn} = \int_{S_j} \Phi_m(r_j) \Phi_n(r_j) dS_j = \begin{cases} 1 & \text{for } m=n, \\ 0 & \text{for } m \neq n \end{cases} \quad (4)$$

식 (3)을 (2)에 대입하고 식 (4)의 단위 직교성을 이용하여 모드계수 P_{jm} 을 구하면 다음과 같다:

$$p_{jm} = \rho c \sum_{j=1}^N \sum_{n=0}^{\infty} (T_{jj})_{mn} u_{jn} \quad (5)$$

여기서

$$(T_{jj})_{mn} = -ik \int_{S_j} \int_{S_j} \Phi_m(r_j) \Phi_n(r_j) G(r_j|r_j) dS_j dS_j \quad (6)$$

$(T_{jj})_{mn}$ 은 j 번째 경계표면의 m 번째 음압모드와 j 번째 경계표면의 n 번째 입자속도모드 사이의 모드관계계수이다. 식 (5)를 행렬방정식으로 다시 표현하면 다음과 같다:

$$P_j = \rho c \sum_{j=1}^N T_{jj} U_j \quad \text{for } j=1, 2, \dots, N \quad (7)$$

여기서 P_j 는 j 번째 표면의 음압모드 벡터, U_j 는 j 번째 표면의 입자 속도모드 벡터, T_{ji} 는 j 번째 경계표면의 음압모드와 i 번째 경계표면의 입자 속도모드들 사이의 관계행렬이다. 예를 들어, p_m 는 벡터 P_j 의 m 번째 열, 그리고 $(T_{ji})_{mn}$ 은 관계행렬 T_{ji} 의 m 번째 열과 n 번째 행의 값을 의미한다.

결과적으로 식 (5)에 의해 해석하고자 하는 음향장의 해가 표현되며 해당 음향장의 모드관계계수 $(T_{ji})_{mn}$ 이 계산되면 음장의 해가 구해지게 된다. [($T_{ji})_{mn}$ 에 대한 자세한 사항은 부록참조]

III. 소음기 해석에의 적용

그림 1과 같은 연장관이 있는 단순팽창형 소음기 중에 입력단 및 출력단이 팽창형 소음기 내부로 돌출되어 있고 서로 동심으로 배치되어 있는 형태에 대한 해석을 행한다. 입력 및 출력 단면을 제외한 모든 표면이 강체라고 가정하며, w_i, w_o 그리고 w_c 는 입력단, 출력단 및 확장관의 반지름을 각각 나타내며, l 은 확장관의 길이를 표현한다. 확장관 면과 입력단 및 출력단의 경계면으로 이루어진 음장을 해석하기 용이하게 영역을 a, b 와 c 로 나누며, 이들의 길이를 각각 l_a, l_b 와 l_c 로 표현하기로 한다. 내부음장은 원통 좌표계로 표현되는 몇 개의 표면으로 나누며, 입력단 표면을 표면 I 로, 입력단 전면에서 입력단 표면을 제외한 면이 어느 영역의 경계면에 속하느냐에 따라 표면 A 또는 A' 라 하며, 같은 방법으로 출력단

표면 O 및 B, B' 를 정의한다.

이상에서 정의된 변수와 식 (7)을 이용하여 그림 1의 동심형 소음기에 대한 음장을 표현하기로 한다. 먼저 영역 a 에서는 표면 A 만이 강체가 아니며 영역 c 에서는 표면 B 만이 강체가 아니므로 영역 a 와 c 에서의 모드관계 행렬식은 다음과 같이 표현된다:

$$P_A = -\rho c T_{A'A} U_A \tag{8a}$$

$$P_B = -\rho c T_{B'B} U_B \tag{8b}$$

이때, 입자속도는 편의상 영역 b 로 향하는 방향을 양의 방향으로 한다.

영역 b 에서는 표면 I, O, A 및 B 를 제외한 모든 표면이 강체이므로 표면 I 와 O 에서의 음압 벡터를 유도하기 위해 다음과 같은 행렬식이 필요하게 된다:

$$P_A = \rho c (T_{AA} U_A + T_{AB} U_B + T_{AI} U_I + T_{AO} U_O) \tag{9a}$$

$$P_B = \rho c (T_{BA} U_A + T_{BB} U_B + T_{BI} U_I + T_{BO} U_O) \tag{9b}$$

$$P_I = \rho c (T_{IA} U_A + T_{IB} U_B + T_{II} U_I + T_{IO} U_O) \tag{9c}$$

$$P_O = \rho c (T_{OA} U_A + T_{OB} U_B + T_{OI} U_I + T_{OO} U_O) \tag{9d}$$

표면 A 와 A' 및 B 와 B' 에서의 음압 및 입자속도 연속조건

$$P_A = P_{A'}, U_A = U_{A'} \tag{10a}$$

$$P_B = P_{B'}, U_B = U_{B'} \tag{10b}$$

을 이용하여 식 (8), (9)를 정리하면 다음과 같다:

$$P_I = \rho c Z_H U_I + \rho c Z_{IO} U_O \tag{11a}$$

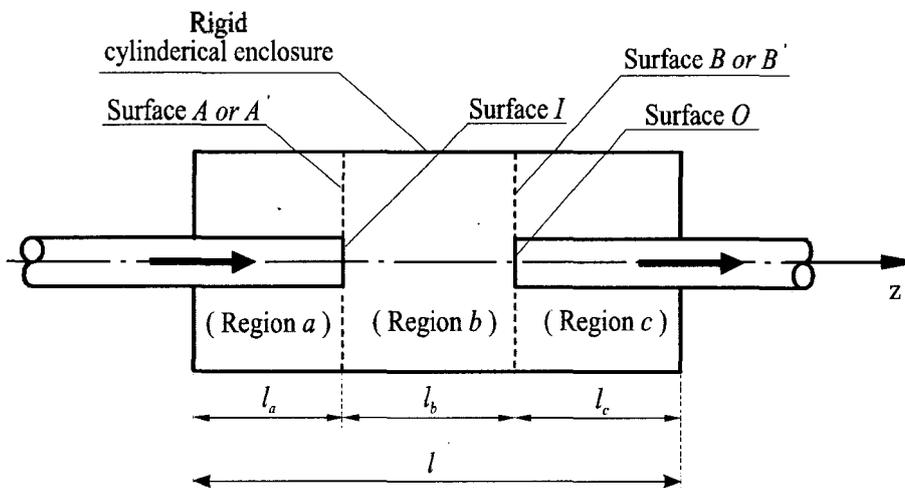


그림 1. 입출구가 연장된 원통형 소음기
Fig. 1. Cylindrical silencer with an extended inlet and outlet.

$$P_o = \rho c Z_{oi} U_i + \rho c Z_{oo} U_o \quad (11b)$$

여기서 $Z_{\alpha\beta}$ 는 음압과 입자속도 모드벡터들 간의 전달 행렬로서 다음과 같이 쓸 수 있다:

$$Z_{II} = X_{II} - T_{IB}(T_{BE} + X_{BB})^{-1}X_{BI} \quad (12a)$$

$$Z_{IO} = X_{IO} - T_{IB}(T_{BE} + X_{BB})^{-1}X_{BO} \quad (12b)$$

$$Z_{OI} = X_{OI} - T_{OB}(T_{BE} + X_{BB})^{-1}X_{BI} \quad (12c)$$

$$Z_{OO} = X_{OO} - T_{OB}(T_{BE} + X_{BB})^{-1}X_{BO} \quad (12d)$$

식 (12)의 행렬 X 는 다음과 같으며

$$X_{\alpha\beta} = T_{\alpha\beta} - T_{\alpha\beta}(T_{AA'} + T_{AA})^{-1}X_{BB} \quad (13)$$

여기서 α 또는 β 는 표면 $A, A', B, B', I,$ 또는 O 중의 하나가 된다.

표면 I 와 O 에 평면파만이 존재한다고 가정하면 식 (11)을 다음과 같은 행렬식으로 표현할 수 있다:

$$\begin{Bmatrix} \bar{P}_I \\ \bar{P}_O \end{Bmatrix} = \rho c \begin{bmatrix} -Z_{II} & \sqrt{\frac{S_o}{S_I}} Z_{IO} \\ \sqrt{\frac{S_I}{S_o}} Z_{OI} & Z_{OO} \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} V_I / S_I \\ V_O / S_O \end{Bmatrix} \quad (14)$$

여기서 \bar{P}_i 와 V_i 는 i 번째 표면 요소에 걸리는 평균압력 및 체적속도를 각각 의미하며, 행렬 Z_{ij} 의 첫번째 행과 열의 값을 Z_{ij} 로 표기하였다. 식 (14)를 변형하여 입력단과 출력단 사이의 사단정수 형태로 표현하면 다음과 같다:

$$\begin{aligned} \begin{Bmatrix} \bar{P}_O \\ V_O \end{Bmatrix} &= \begin{bmatrix} T_{aa} & T_{ab} \\ T_{ba} & T_{bb} \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \bar{P}_I \\ V_I \end{Bmatrix} \\ &= \frac{\sqrt{\frac{S_o}{S_I}}}{Z_{OI}} \begin{bmatrix} \sqrt{\frac{S_o}{S_I}} Z_{OO} & (Z_{II}Z_{OO} - Z_{OI}Z_{IO}) - \frac{\rho c}{S_o} \\ \frac{S_I}{\rho c} & Z_{II} \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \bar{P}_I \\ V_I \end{Bmatrix} \end{aligned} \quad (15)$$

이때 출력단을 통하는 음파가 반사없이 전파된다고 가정하면, 그림 1의 소음기 투과 손실 (TL: Transmission Loss)은 다음과 같이 표현된다:

$$\begin{aligned} TL &= 20 \log \left| \left(\frac{S_o}{S_I} \right)^{1/2} \left| \frac{T_{aa} + T_{ab} \frac{S_I}{\rho c} + T_{ba} \frac{\rho c}{S_I} + T_{bb} \frac{S_I}{S_o}}{2} \right| \right| \\ &= 20 \log \left| \frac{1 + Z_{II} - Z_{OI}Z_{IO} + Z_{II}Z_{OO}}{2Z_{OI}} \right| \end{aligned} \quad (16)$$

결과적으로 경계모드 방법에 의해 표현된 연장관형 소

음기의 음장 지배방정식인 식 (11)에서 $Z_{\alpha\beta}$ 의 첫번째 행과 열의 값들을 구하면 소음기의 투과손실을 구할 수 있게 된다.

IV. 결과 및 고찰

본 장에서는 경계모드 방법을 통해 구한 동심 연장관형 소음기의 해석해를 실험을 통해 입증한 후, 각 변수 변화에 의한 소음기의 특성을 살펴보기로 한다. 소음기의 투과손실을 실험적으로 구하기 위해 그림 2와 같이 두개의 마이크로폰 방법을 사용하였으며[14], 네 개의 1/2 인치 마이크로폰 (B&K 4135)에서 받은 음압신호는 신호분석기 (HP 35670A)를 통과시켜서 PC상에서 처리를 하였다. 출력단의 끝 부분에는 무반사 처리를 한 지수혼 (Exponential Horn)을 달아서 음의 반사를 최소화 하였다.

그림 3은 소음기의 투과손실에 대한 이론과 실험의 비교로 절대값들은 약간의 차이가 존재하지만 결과들의 전체적인 경향은 양자가 잘 일치하는 것을 볼 수 있다. 저주파수 대역에서 오차가 큰 이유는 스피커의 특성 및 끝단에서의 무반사 처리가 완전하지 못한 이유에서 발생한다.

연장관이 없을 때의 단순팽창형 소음기인 그림 3(a) 경우의 첫번째 및 세번째의 통과 대역에 맞게 연장관을 설치한 후에 그림 3(b)의 투과손실이 향상된 원인은 입력 단면이 확장관 내의 고유모드 절점 근방에 위치했기 때문이라 할 수 있다. 추가로 출력단을 두번째 및 네번째 고유모드 절점에 위치시키면 그림 3(c)와 같이 관심주파수 전 반적으로 투과손실이 향상됨을 알 수 있다. 다시 말해 입력단과 출력단을 확장관 안의 고유모드 절점들에 위치시키게 되면 중·고파수 영역까지 높은 투과손실을 기대할 수 있게 된다.

해석시 사용되는 모드 갯수는 경계조건을 거의 만족하

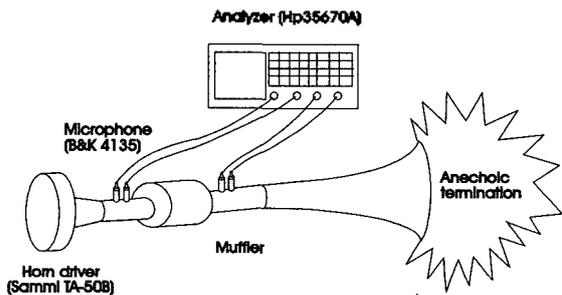


그림 2. 시험장치 개략도
Fig. 2. Schematic diagram of experimental apparatus.

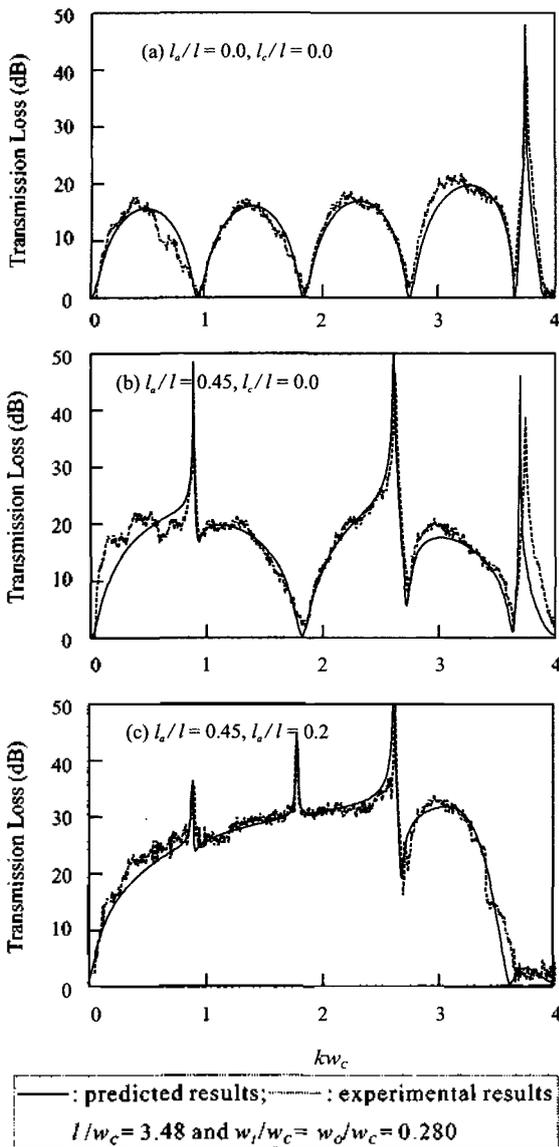


그림 3. 실험치와 예측치의 비교
Fig. 3. Comparison of the experimental results with the predicted ones.

는 Green의 함수를 사용함으로써 해석 음장을 표현하는 데 많은 모드가 필요하지 않았다. 각 표면에서 1개씩의 모드만을 이용하였으며, 모드갯수를 증가하여도 주파수가 $kw_c \leq 4.0$ 인 구간에서 투과 손실에 변화가 거의 없음을 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 여러 가지 특성을 분석하는데 충분한 구간이라 할 수 있다.

그림 4는 입력단만이 확장관 안으로 연장되어 있는 경우 확장관 안에 평면파만이 전달된다고 가정하는 기존의 해석 방법 (PWA: Plane Wave Approach)과 본 연구에서 제안된 방법인 경계 모드 방법 (BMM: Boundary Mode

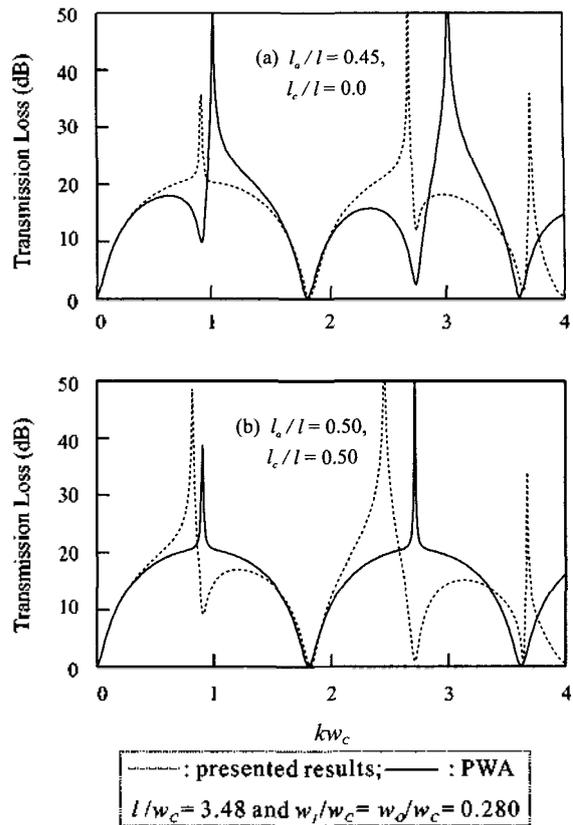


그림 4. 평면파 해석방법과 제안된 방법의 결과 비교
Fig. 4. Comparison between the results of PWA and the present method.

Method)을 비교한 결과이다. 입력단의 돌출 효과를 생각하지 않는다면 입력단면이 확장관의 중간에 위치할 때, 그림 3(a) 경우의 첫번째 및 세번째의 통과 대역은 그림 4(a)의 평면파 해석 결과와 같이 억제대역으로 바뀌게 될 것이다. 그러나 실제의 경우, 그림 4(b)와 같이 확장관의 중간 위치보다 짧은 곳에서 이런 현상이 나타나게 되며, 이는 입력단의 돌출 효과라 할 수 있다. 그림 5는 입력단면의 위치를 각 모드의 절점보다 약간 짧은 곳에 위치시켜 구한 투과 손실로 위에서 설명한 내용을 입증하고 있다.

그림 6은 입력단의 위치를 첫번째 및 세번째의 통과 대역인 $l_o/l=0.45$ 에 고정시키고 출력단의 위치를 변화시켜가면서 구한 결과로서 출력단의 위치가 두번째 및 네번째 통과 대역에 위치시킬 때 주파수 영역 전반적으로 높은 투과손실 얻을 수 있음을 보여준다. 이 경우에서도 출력단의 돌출효과가 나타남을 알 수 있었다.

이 결과들로부터 입력단면이 어느 모드의 절점에 있는가에 따라 소음기의 주파수 특성이 바뀐다는 점을 확인할 수 있었으며, 입력단의 돌출 효과를 본 연구에서 제안된 방법에 의해 효과적으로 처리할 수 있음을 보였다.

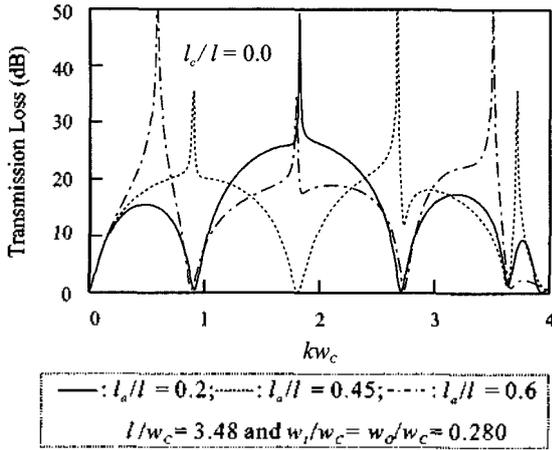


그림 5. 입력단 삽입길이변화에 따른 예측치의 비교
Fig. 5. Comparison between the predicted results of different inlet insertion lengths.

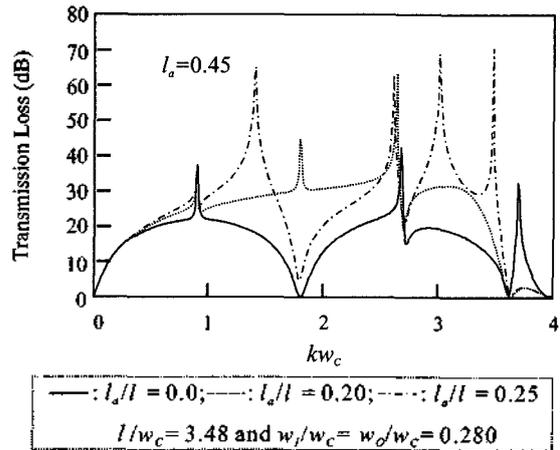


그림 6. 출력단 삽입길이변화에 따른 예측치의 비교
Fig. 6. Comparison between the predicted results of different outlet insertion lengths.

V. 결론

입력단 및 출력단이 확장관 안으로 돌출되어 있는 소음기의 특성을 관찰하였고, 입력단 및 출력단의 위치를 적절하게 위치시켜 원하는 주파수 영역에서 소음제어 성능을 향상시킬 수 있음을 확인하였다. 경계에서의 모드 관계를 이용하여 동심 연장관형 소음기와 같이 복잡한 모양의 음장을 쉽게 표현할 수 있었으며, 평면파 만의 해석결과와 실제 음향특성과의 오차를 줄일 수 있었다. 실험을 통하여 이 결과들의 타당성을 검증하였으며, 결과적으로 동심연장관형 소음기의 4단자 정수가 기존의 소음기 해석 전용 프로그램에 삽입 될 경우 실제 설계에 매우 유용하게 쓰일 수 있을 것으로 판단된다.

부록 : 모드 관계 계수

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

$$\Phi_n(r_i) = J_0(\alpha_{0n} w / w_c) / [\pi^{1/2} w_i J_0(\alpha_{0n})] \quad (A1a)$$

$$\Phi_n(r_o) = \frac{A(\xi_{0n} w / w_c)}{\{\pi(w_c^2 - w^2)[A^2(\xi_{0n}) - (w_i/w_c)^2 A^2(\xi_{0n} W_i)]\}^{1/2}} \quad (A1b)$$

$$A(\xi_{0n} w / w_c) = J_0(\xi_{0n} w / w_c) - N_0(\xi_{0n} w / w_c) J_0'(\xi_{0n}) / N_0'(\xi_{0n}) \quad (A2)$$

여기서, J_0 와 N_0 는 각각 0차의 제 1종 및 제 2종 Bessel 함수를 나타낸다[15].

각 영역에서의 모든 표면이 강제인 조건을 만족하는 Green의 함수와 식 (A1) 을 이용하여 식 (8)의 모드관계 수를 구하면 다음과 같다:

$$(T_{ij})_{n_i, n_j} = ikH_j H_i \sum_{n=0}^{\infty} \left[\frac{\cos[s_{0n} l_{AB}(1 - Z_{Dist})]}{s_{0n} \sin(s_{0n} l_{AB})} \frac{I_{n_i} I_{n_j}}{I_{n_i} I_{n_j} \sqrt{I_{n_i} I_{n_j}}} \right] \quad (A3)$$

여기서 H 는 각 표면요소의 반지름을 확장관의 반지름으로 무차원화시킨 변수이며, 특별히 표면에서는 w_i/w_c 의 값을 갖는다. l_{AB} 는 각 영역의 길이를 의미하며, Z_{Dist} 는 두 표면 간의 거리를 이득이 속한 영역의 길이로 무차원화한 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)과 같은 각 표면의 고유함수에서 분자들만의 표면 적분을 뜻한다. 예를 들면, 표면 B 와 표면 O 사이의 적분은 다음과 같이 나타내어진다:

$$I_{n_i n_o} = \int_{w_i/w_c}^1 A(\xi_{0n} W) J_m(\alpha_{0n} W) W dW \quad (A5)$$

참고 문헌

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, Chapter 2, 1971.
8. M. Abom, "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, "Acousto-elasticity: 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," *Journal of Sound and Vibration*, **182** (4), 505-522, 1990.
11. J.-S. Lee and J.-G. Ih, "Reactive characteristics of partial screens for a sound source mounted in an infinite baffle," *Journal of Acoustical Society of America*, **98** (2), 1008-1016, 1995.
12. 이준신, 이정권, "동심 연장관형 소음기의 음향해석," *한국음향학회지*, **14** (1), 108-114, 1994.
13. B. B. Baker and E. T. Copson, *The Mathematical Theory of Huygens' Principle*, Clarendon Press, Oxford, 1939, Chapter 1.
14. A. F. Seybert, "Two-sensor methods for the measurements sound intensity and acoustic properties in duct," *Journal of the Acoustical Society of America*, **83**, 2233-2239, 1988.
15. M. Abramowitz and I. A. Stegun, *Handbook of Mathematical Functions*, Dover, New York, Chapters 9 and 11, 1970.

저자 약력

● 이 준 신 (Jun-shin Lee)



1985년 2월: 서울대학교 농업기계과 (농학사)
 1988년 2월: KAIST 기계공학과 (공학석사)
 1995년 2월: KAIST 기계공학과 (공학박사)
 1996년 10월~현재: 전력연구원 근무