

다공형 소음기의 성능에 관한 연구

A Study on the Performance of the Perforated-Tube Muffler

권 영 필*, 현 길 학**, 이 동 훈**, 서 기 원***
 Y. P. Kwon, G. H. Hyun, D. H. Lee, G. W. Suh

ABSTRACT

The object of this study is to develop the computer program to predict the transmission loss of a perforated tube muffler with mean flow, and to investigate the influence of porosity and mean flow on the performance of the muffler.

The numerical model is made by dividing the muffler into small segments and estimating the transfer matrices for each segment. The computer program is developed for the calculation of the transmission loss of a through-or cross-flow perforated muffler.

The experiment is performed for the measurement of the transmission loss and/or the pressure drop for various porosity and flow velocity. From the comparison between computation and experiment, it is known that the numerical model agrees well with the experimental result. The effect of porosity and flow velocity on the acoustic performance and the flow resistance of a muffler is presented.

약 어 설 명

A : 어드미턴스 (admittance)
 a : 비어드미턴스 (specific admittance)
 c : 음 속
 f : 주파수
 i : $\sqrt{-1}$
 k : 파동정수, ω/c
 L : 소음기 길이
 M : 마하 (Mach) 수
 P^+ : 진행 파음압의 복소진폭

P^- : 반사파음압의 복소진폭
 S : 단면적
 t : 시간 (sec)
 TL : 투과손실 (transmission loss)
 u : 음의 입자속도 (particle velocity) (m/s)
 U : 소리의 체적속도의 복소진폭 (m^3/s)
 ω : 각진동수
 x : 좌표계
 Z : 음향 임피던스 (impedance), $\rho_0 \cdot c/S$
 z : 비음향 임피던스, $\rho_0 \cdot c$
 ρ_0 : 공기 밀도

* 경희원, 숭실대학교 기계공학과
 ** 숭실대학교 대학원 기계공학과
 *** 대림공업전문대학 전속설비과

σ : 유공률 (porosity)

1. 서 론

오늘날 차량소음은 심각한 환경문제를 야기시키고 있으며, 차량소음의 다양한 원인중 배기계를 통하여 배출되는 소음은 가장 중요한 음원의 하나가 되고 있다. 이러한 배기소음은 각종 소음기 (silencer)에 의하여 적절한 수준으로 억제될 수 있다. 그러나 자동차공업이 고도로 발전하였음에도 불구하고 소음기의 설계는 아직도 경험과 시행착오적인 방법에 주로 의존하고 있다. 다양한 설계조건 변화에 대응한 최적설계를 위해서는 음향학적 및 유체역학적인 연구가 필요하다.

소음기는 소리의 전파를 차단 및 에너지를 흡수하는 장치로서 소음의 원리를 크게 분류할 때 반사 (reflective)형과 흡음 (dissipative)형으로 나눌 수 있으며¹⁾ 가장 간단한 소음기는 단순 팽창형의 반사형 소음기이며 이것의 해석은 고전적인 문제로서 최근 유동을 고려한 2차원 엄밀 해석에 이르기까지 발전되었다.²⁾ 그러나, 실제 소음기는 반사형과 흡음형이 복합되어 있으며 널리 사용되고 있는 요소는 관에 많은 구멍을 뚫어 만든 다공형 요소이다. 다공형 소음기는 반사특성과 함께 구멍에서 소리 에너지가 열에너지로 소산되는 흡음특성을 지니므로 흡음재를 부착하는 경우에 발생하는 오염이나 내구성 문제가 없는 장점이 있다.

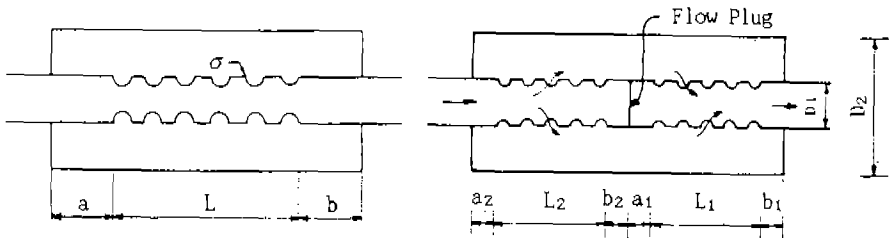
구멍이 집중되어 있는 경우에는 공간을 하나의 Helmholtz 공명기로 취급할 수 있으며

로 매우 간단히 해석될 수 있다.³⁾ 그러나 구멍이 분산되어 분포된 다공형 관의 경우는 해석이 다소 복잡하게 되며 최근에는 Sullivan Crocker⁴⁾, Thawani와 Jayaraman⁵⁾에 의하여 해석적 연구가 시작되었다. 그러나 기류가 있거나 음압이 높은 경우에는 비선형 해석이 필요하므로 엄밀한 해석이 곤란하게 된다. 이에 대하여 Sullivan^{6,7)}은 관을 여러 개의 요소로 분할하여 계산할 수 있는 수치 해석의 알고리즘을 발표하였다.

본 논문은 다공형 소음기중 그림 1의 (a)와 (b)에 도시한 바와 같은 관동형 소음기 (through-flow type muffler)와 연결형 소음기 (cross-flow type muffler)에 관하여 Sullivan^{6,7)}의 알고리즘을 바탕으로 소음성능의 예측을 위한 컴퓨터 프로그램을 개발하였다. 또한, 성능예측 프로그램을 검증하기 위하여 유공률 및 유속을 변화시키면서 소음성능을 측정하여 수치계산 결과와 비교 평가하였으며, 소음기를 통과하는 공기의 유속에 따른 압력 손실도 측정하고 토의하였다.

2. 수치 모델^{6,7)}

다공 공명형 소음기는 그림 2와 같이 비음향 어드미턴스 (specific admittance) $a(x)$ 인 다공면에 의하여 내관과 외관이 연결되어 있는 것으로 볼 수 있다. 관 1은 단면적이 S_1 이고 임의의 끝단임피던스 $Z_1(0)$, $Z_1(L)$ 을 갖고 관 2의 경우에도 그림에서 보는 바와 같이 관 1과 같은 형의 매개변수를 정의할 수 있다. 관에 유동이 존재하면 관 1과 관 2사이



(a) Through-flow chamber configuration

(b) Cross-flow chamber configuration

Fig. 1 Perforated tube mufflers

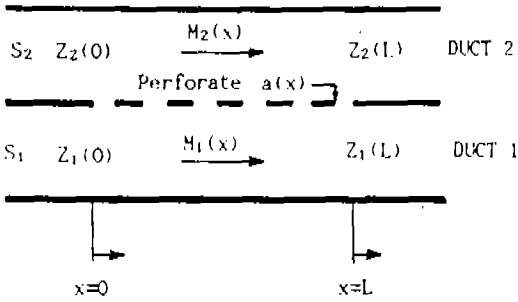


Fig. 2 Two duct elements coupled by a perforated surface

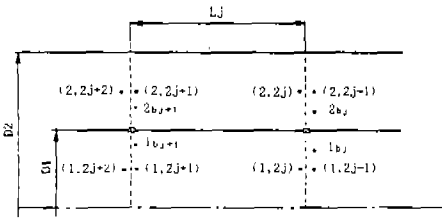


Fig. 3 Numerical model for a segment of perforated tube muffler

에 유동의 교환이 있으므로 유동의 마하수는 관의 위치에 따라 변하게 된다. 구멍이 있는 곳을 그림 3 과 같이 분지점을 경계로 $N-1$ 개의 요소로 분할하고 한 요소내의 모든 구멍은 분지점에 모여 있는 것으로 가정한다. 이때 분지점을 통과하여 관 1에서 관 2로 흐르는 유동의 마하수 M_{bj} 는 다음식으로 계산할 수 있다.

$$M_{bj} = (M_{1, j+1} - M_{1, j}) \cdot (S_1 / S_{bj}) \quad (1)$$

$$= (M_{2, j} - M_{2, j+1}) \cdot (S_2 / S_{bj}) \quad (2)$$

분지점에서 관 1과 관 2에서의 음압 (P_1, P_2), 체적속도 (U_1, U_2), 구멍의 양측에서 음압 (P_{b1}, P_{b2}) 및 구멍을 통한 체적속도 U_b 등 7개의 변수를 취하고 여기에 엔탈피(enthalpy)와 질량(mass) 보존식을 적용하면 다음 방정식들을 얻을 수 있다.

$$\begin{aligned} P_{1, 2j} + Z_1 \cdot M_{1, j+1} \cdot U_{1, 2j} \\ = P_{1bj} + Z_{bj} \cdot M_{bj} \cdot U_{bj} \\ = P_{1, 2j-1} + Z_{1, j} \cdot M_{1, j} \cdot U_{1, 2j-1} \end{aligned} \quad (3)$$

$$\begin{aligned} U_{1, 2j} + Z_1^{-1} \cdot M_{1, j+1} \cdot P_{1, 2j} \\ = (U_{1, 2j-1} + Z_1^{-1} \cdot M_{1, j+1} \cdot P_{1, 2j-1}) \\ + (U_{bj} + Z_{bj}^{-1} \cdot M_{bj} \cdot P_{1bj}) \end{aligned} \quad (4)$$

$$\begin{aligned} P_{2, 2j} + Z_2 \cdot M_{2, j+1} \cdot U_{2, 2j} \\ = P_{2bj} + Z_{bj} \cdot M_{bj} \cdot U_{bj} \\ = P_{2, 2j-1} + Z_2 \cdot M_{2, j} \cdot U_{2, 2j-1} \end{aligned} \quad (5)$$

$$\begin{aligned} U_{2, 2j} + Z_2^{-1} \cdot M_{2, j+1} \cdot P_{2, 2j} \\ = (U_{2, 2j-1} + Z_2^{-1} \cdot M_{2, j+1} \cdot P_{2, 2j-1}) \\ - (U_{bj} + Z_{bj}^{-1} \cdot M_{bj} \cdot P_{2bj}) \end{aligned} \quad (6)$$

여기서 $Z_1 = \rho_0 \cdot c / S_1, Z_2 = \rho_0 \cdot c / S_2, Z_{bj} = \rho_0 \cdot c / S_{bj}, U = u \cdot S$ 이다. 또한 분지점의 어드미턴스 A_j 는 비어드미턴스와 면적의 곱 $A_j = a(x) \cdot S_{bj}$ 에 의하여 구할 수 있고, 임피던스 Z_b 와의 관계 및 무차원화된 레지스탕스(resistance) θ 와 리액턴스(reactance) X 에 의하여 다음 식으로 표현할 수 있다.

$$A_j^{-1} = Z_j = \rho_0 c (\theta_j + i X_j) / S_{bj} \quad (7)$$

레지스탕스 θ_j 와 리액턴스 X_j 의 유공율 σ 와의 관계는 다음과 같다.⁷⁾

$$\theta_j = \theta_0 / \sigma \quad (8)$$

$$X_j = X_0 / \sigma \quad (9)$$

$$\theta_0 = \begin{cases} 6.0 \times 10^{-3}, & U_0 < U_{cr}^{(\theta)} \\ 2.0 \times 10^{-3} \cdot U_0, & U_0 > U_{cr}^{(\theta)} \end{cases} \quad (10)$$

$$X_0 = \begin{cases} 4.80 \times 10^{-6} \cdot f, & U_0 < U_{cr}^{(x)} \\ 2.24 \times 10^{-6} \cdot f^{(1.514)} \cdot U_0^{(-0.333)}, & U_0 > U_{cr}^{(x)} \end{cases} \quad (11)$$

여기서 $U_{cr}^{(\theta)} = 3.0 \text{ m/s}, U_{cr}^{(x)} = 1.02 \times 10^{-4} \cdot f^{(1.541)} \text{ m/s}$ 이다.

분지의 어드미턴스를 이용하면 관 1과 관 2 사이의 다음과 같은 연성식(coupling equation)이 얻어진다.

$$P_{2bj} = P_{1bj} - U_{bj} \cdot A_j^{-1} \quad (14)$$

이상의 식(3)~(6) 및 식(14)의 7개의 방정식을 이용하면 3개의 변수, (P_{b1}, P_{b2})와 U_{bj} 를 소거할 수 있고 다음과 같은 전달행렬식을 얻을 수 있다.

$$\begin{bmatrix} P_{1,2j} \\ U_{1,2j} \\ P_{2,2j} \\ U_{2,2j} \end{bmatrix} = [G_j] \begin{bmatrix} P_{1,2j-1} \\ U_{1,2j-1} \\ P_{2,2j-1} \\ U_{2,2j-1} \end{bmatrix} \quad (15)$$

전달행렬 $[G]$ 의 요소는 부록 A1에 상술되어 있다.

분지점과 분지점 사이에 대해서는 단단한 (rigid) 벽으로 된 관으로 가정하면 1차원 파동방정식으로부터 음압과 체적속도 사이에 다음 관계식을 얻을 수 있다.

$$P(x) = P^+ \cdot e^{-ikx} + P^- \cdot e^{ikx} \quad (16)$$

$$U(x) = \left(\frac{S}{\rho_0 \cdot C} \right) \left(P^+ \cdot e^{-ikx} - P^- \cdot e^{ikx} \right) \quad (17)$$

여기서 $k = \frac{\omega}{c}$, $k^+ = \frac{k}{(1+M)}$ 그리고 $k^- = \frac{k}{(1-M)}$ 이다.

분지점 j 와 $j+1$ 에 대해서 전달행렬을 얻기 위하여 식(16)과 식(17)를 점 $x = x_j$, $x = x_{j+1}$ 에서 내관과 외관에서의 값에 대한 각각 4개의 식을 얻고 P^+ 와 P^- 를 소거하면 다음과 같은 분지점과 분지점 사이의 전달행렬을 얻을 수 있다.

$$\begin{bmatrix} P_{1,2j+1} \\ U_{1,2j+1} \\ P_{2,2j+1} \\ U_{2,2j+1} \end{bmatrix} = [H_j] \begin{bmatrix} P_{1,2j} \\ U_{1,2j} \\ P_{2,2j} \\ U_{2,2j} \end{bmatrix} \quad (18)$$

전달행렬 $[H]$ 의 요소는 부록 A 2에 상술되어 있다.

각 분할요소에 대해서 전달행렬을 모두 계산한 다음 $x=0$ 와 $x=L$ 사이에 다음과 같이 전달행렬 $[T]$ 를 구할 수 있다.

$$\begin{bmatrix} P_{1,2N} \\ U_{1,2N} \\ P_{2,2N} \\ U_{2,2N} \end{bmatrix} = [T] \begin{bmatrix} P_{1,1} \\ U_{1,1} \\ P_{2,1} \\ U_{2,1} \end{bmatrix} \quad (19)$$

$$[T] = [G_N] \sum_{K=1}^{N-1} [H_K] [G_K] \quad (20)$$

2.1 관통형 (through-flow)의 경우

그림 1(a)와 같은 관통형일 경우에 관 2의 양끝의 임피던스

$$Z_{2,2N} = \frac{P_{2,2N}}{U_{2,2N}} = i \left(\frac{\rho_0 \cdot c}{S_2} \right) \cot ka \quad (21)$$

$$Z_{2,1} = \frac{P_{2,1}}{U_{2,1}} = -i \left(\frac{\rho_0 \cdot c}{S_2} \right) \cot kb \quad (22)$$

를 이용하여 식(19)에서 $P_{2,1}$ 을 소거하면 다음과 같은 관통형 소음기의 4단자 행렬식 $[S]$ 를 얻을 수 있다.

$$\begin{bmatrix} P_{1,2N} \\ U_{1,2N} \end{bmatrix} = [S] \begin{bmatrix} P_{1,1} \\ U_{1,1} \end{bmatrix} \quad (23)$$

여기서 4단자 행렬의 각 요소는 다음과 같다.

$$\begin{aligned} S_{11} &= T_{11} + A \cdot B/E, & S_{12} &= T_{12} + A \cdot C/E \\ S_{21} &= T_{21} + D \cdot B/E, & S_{22} &= T_{22} + D \cdot C/E \end{aligned} \quad (24)$$

윗 식에서 계수는 다음과 같다.

$$\begin{aligned} A &= T_{14} + Z_{2,1} \cdot T_{13} \\ B &= T_{31} - Z_{2,2N} \cdot T_{41} \\ C &= T_{32} - Z_{2,2N} \cdot T_{42} \\ D &= T_{24} + Z_{2,1} \cdot T_{23} \\ E &= (T_{44} + T_{43} \cdot Z_{2,1}) \cdot Z_{2,2N} \\ &\quad - (T_{34} + T_{33} \cdot Z_{2,1}) \end{aligned}$$

2.2 연결형 (cross-flow)의 경우

그림 1(b)와 같이 연결형인 경우에 막힌 곳을 중심으로 좌우로 크게 나누어 좌측 부분에서 구한 확대유동의 전달행렬 $[C]_e$ 와 우측부분에서 구한 축소유동의 전달행렬 $[C]_c$ 를 곱하여 전체적인 전달행렬 $[C]$ 를 구할 수 있다. 즉,

$$[C] = [C]_e [C]_c \quad (25)$$

우측부분, 즉 축소유동이 되는 곳에서 외관을 기호 1, 내관을 기호 2로 하여 계산하는 것이 편리하며 이때 끝단의 임피던스는 각각 다음과 같다.

$$Z_{2,2n} = i \left(\frac{\rho_0 \cdot c}{S_1} \right) \cot k a_1 \quad (26)$$

$$Z_{1,1} = -i \left(\frac{\rho_0 \cdot c}{S_2} \right) \cot k b_1 \quad (27)$$

한편 좌측, 즉 축소유동이 있는 곳에서는 내관을 기호 1, 외관을 기호 2로 하면 편리하며 끝단의 임피던스는 다음과 같다.

$$Z_{2,2n} = i \left(\frac{\rho_0 \cdot c}{S_2} \right) \cot k a_2 \quad (28)$$

$$Z_{1,1} = -i \left(\frac{\rho_0 \cdot c}{S_1} \right) \cot k b_2 \quad (29)$$

식에서 $S_1 = \pi \cdot D_1^2 / 4$, $S_2 = \pi \cdot (D_2^2 - D_1^2) / 4$ 이다.

이상의 식들을 이용하면 다음과 같은 4 단자 행렬식을 얻을 수 있다.

$$\begin{bmatrix} P_{1,2n} \\ U_{1,2n} \end{bmatrix} = [C] \begin{bmatrix} P_{2,1} \\ U_{2,1} \end{bmatrix} \quad (30)$$

여기서 4 단자 행렬의 각 요소는 다음과 같다.

$$\begin{aligned} C_{11} &= T_{13} + A \cdot B / E, & C_{12} &= T_{14} + A \cdot C / E \\ C_{21} &= T_{23} + D \cdot B / E, & C_{22} &= T_{24} + D \cdot C / E \end{aligned} \quad (31)$$

윗 식에서 계수는 다음과 같다.

$$\begin{aligned} A &= T_{12} + Z_{1,1} \cdot T_{11} \\ B &= T_{33} - Z_{2,2n} \cdot T_{43} \\ C &= T_{34} - Z_{2,2n} \cdot T_{44} \\ D &= T_{22} + Z_{1,1} \cdot T_{21} \\ E &= (T_{42} + T_{41} \cdot Z_{1,1}) \cdot Z_{2,2n} \\ &\quad - (T_{32} + T_{31} \cdot Z_{1,1}) \end{aligned}$$

위와 같은 방법으로 확대유동 및 축소유동부의 4 단자 행렬 $[C]_e$ 와 $[C]_c$ 를 계산하면 식(29)에 의하여 관통형 소음기의 $x=0$ 와 $x=L$ 사이의 총체적인 4 단자 전달행렬 $[C]$ 를 구할 수 있다.

이상과 같이 관통형의 경우는 식(29), 연결형의 경우는 식(30)에서 행렬 $[S]$ 와 $[C]$ 의 요소는 사단자정수 (four-pole parameter) 가 되고 다음과 같이 투과손실을 구할 수 있다.

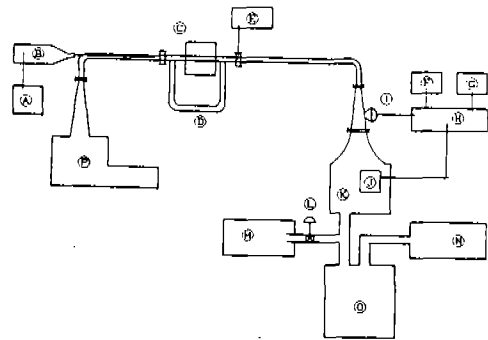
$$TL = 20 \log_{10} \left\{ \frac{1}{2} \left| SC_{11} + \frac{S_2}{\rho_0 \cdot c} SC_{12} + \frac{\rho_0 \cdot c}{S_1} SC_{21} + SC_{22} \right| \right\} \quad (32)$$

식에서 SC 는 행렬 $[S]$, $[C]$ 에 각각 대응되는 행렬요소이다.

3. 실험

실험장치의 개략도를 그림 4에 도시하였다. 관은 외경 22mm, 두께 1mm인 스테인레스 관이며 관의 지지를 위해서 높이 50cm의 지지대를 설치하였고 관끝에는 소음상자를 달았다. 관내의 정재파음을 측정하기 위해서 양쪽의 관을 90°로 구부리고 소음계와 연결된 탐침관을 관 내부로 삽입시켜 위치를 이동하면서 음압을 측정할 수 있도록 하였다.

이때 탐침관의 단면적이 관의 단면적의 5% 이하가 되도록 지름 2mm의 관을 소켓(socket)으로 소음계와 연결하여 음압을 측정하였다. 유속이 빠를 경우에는 유동의 영향을 줄이기 위해서 탐침관의 끝을 막고 측면



- | | |
|----------------------|---------------------|
| ① F.F.T Analyzer | ⑩ Driver Unit |
| ② Sound Level Meter | ⑪ Sound Source |
| ③ Test Section | ⑫ Inlet Chamber |
| ④ U - Tube | ⑬ By - Pass Valve |
| ⑤ Microanometer | ⑭ By - Pass Chamber |
| ⑥ Oscillator | ⑮ Suction Chamber |
| ⑦ Sound Power Source | ⑯ Blower |
| ⑧ Amplifier | ⑰ Exhaust Chamber |

Fig. 4 Schematic diagram of the experimental apparatus

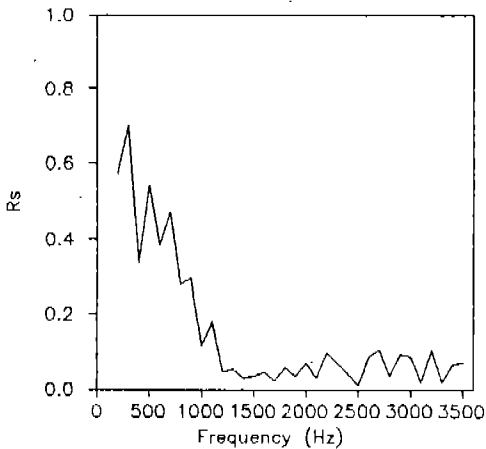
에 지름 1mm 구멍 3개를 뚫어 음압을 측정하였으며, 1024회 측정된 것의 스펙트럼의 평균을 취하였다.

유속을 측정하기 위하여 외경 2mm인 피토관 (pitot tube)을 소음기의 입구에 설치하였고 소음기에서의 압력강하를 측정하기 위하여 소음기의 전후 33mm 위치에 내경 1.5mm의 U튜브를 연결하였다.

음원은 순음 (pure tone), 대역음 (band noise) 또는 백색잡음 (white noise)을 사용하였으며 실험에 사용한 계측장비를 Table 1에 요약하였다.

투과손실 (transmission loss)은 소음기 전후의 연결관의 반사율이 작은 경우에 삽입손실 (insertion loss)과 같으므로, 본 연구에서 투과손실 TL 의 실험치는 삽입손실의 측정으로 구한 것이다. 즉, 소음기 후미의 관 내부에서 소음기가 있을 때의 음압레벨과 소음기가 없을 때의 음압레벨의 차를 구한 것이다.

길이 160mm, 내경 21mm, 외경 71mm인 연결형 소음기는 유공율이 4.44, 5.04, 5.75, 6.30%인 경우에 대하여 실험하였고, 같은 내경과 외경에 대하여 길이가 200mm인 관통형 소음기는 유공율이 각각 2.76, 3.27, 3.91, 5.22%인 경우에 대해서 실험하였으며 길이 160mm인 단순팽창형 소음기에 대해서도 실험하였다.



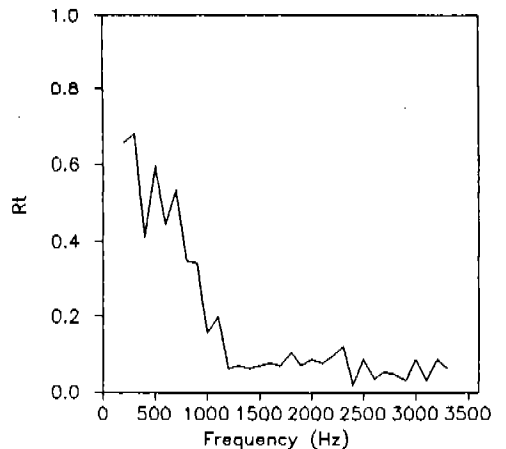
(a) Inlet

Table 1 Details of the measuring equipments

F.F.T analyzer	CF-3000	ONOSOKKI
Sound level meter	Type 1015	JEIC
Driver unit	SU-35B	SAMMI Co.
Amplifier	Mc-2125 A	NCLNTOSH
Blower	ET	을 지 전 기
RC oscillator	Model 4188	KIKUSUI
Sound power source	Type 4205	B & K
Micromano-meter	FC 014	Bexhill

4. 결과 및 고찰

다공형 소음기의 투과손실에 관한 수치계산 모델로부터 컴퓨터 프로그램을 만들어 투과손실을 계산하고 실험하여 그 결과를 비교하고 고찰하였다. 먼저 소음기의 앞과 뒤에 이어지는 입구 (inlet) 측과 출구 (outlet) 측 관의 반사율을 정재파법 (standing wave method)으로 측정된 결과를 그림 5에 도시하였다. 그림에서 보는 바와 같이 700 Hz 이하의 저주파 영역에서는 반사율은 0.4에서 0.7 사이이고 1100 Hz 이상의 고주파 영역에서는 0.1 이하로서 거의 무반사단이라고 할 수 있다.



(b) Outlet

Fig. 5 Reflection coefficient of the inlet and outlet pipe system

실험의 신뢰도를 검증하기 위해서 단순팽창형 소음기의 삽입손실을 측정하여 그 결과를 1차원 음향 해석으로 얻을 수 있는 이론값⁹⁾과 비교하여 그림 6에 나타내었다. 그림에서 측정치와 이론치는 전반적으로 잘 맞는다고 할 수 있으나 주파수가 낮을 때 다소의 오차가 있는 것은 끝단의 반사효과 때문이라고 할 수 있다. 또한, 5800 Hz 정도부터 전혀 맞지 않는 것은 고차 모우드가 나타나기 때문이며, 원형관에서 차단주파수는 제 1차 원형대칭모드 (first circularly symmetric mode)가 여기될 때 임을 알 수 있다. 왜냐하면, 다음식으로 주어지는 5800 Hz는 제 1차 원형대칭

모드의 차단주파수이기 때문이다.⁹⁾

$$f = \frac{3.83 c}{\pi \cdot D} \quad (33)$$

그림 7은 관통형 소음기의 경우에 백색잡음

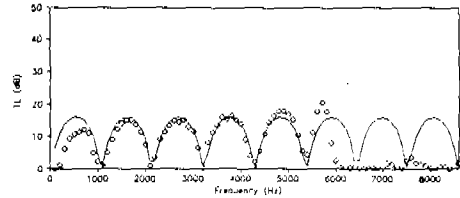
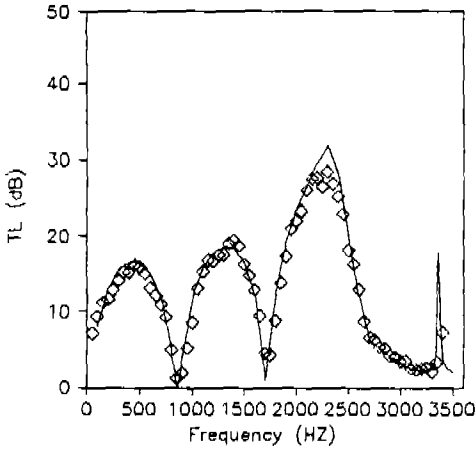
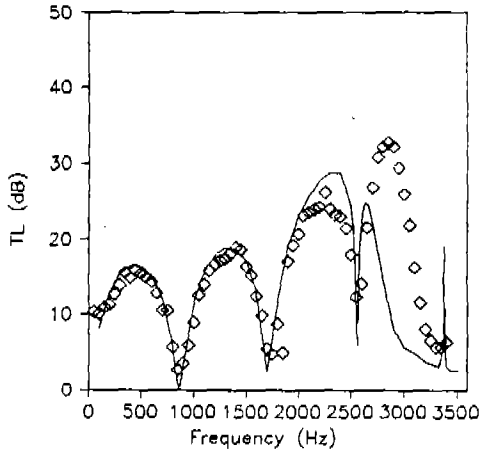


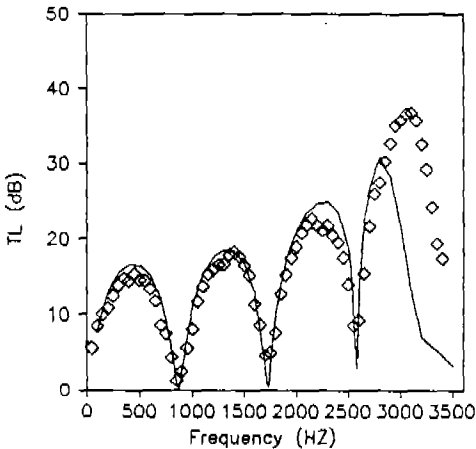
Fig. 6 Comparison of TL between the predicted (—) and measured (◇) of a simple expansion chamber for M=0



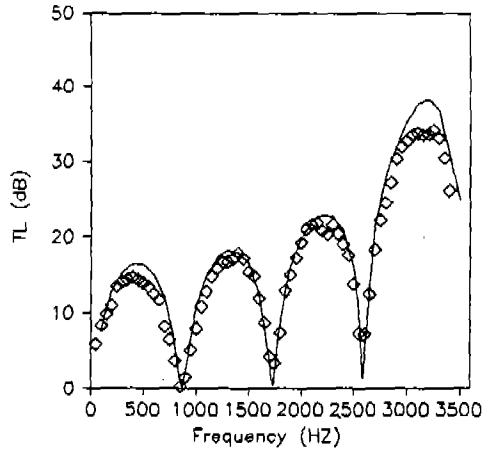
(a) $\sigma = 2.76 \%$



(b) $\sigma = 3.27 \%$



(c) $\sigma = 3.91 \%$



(d) $\sigma = 5.22 \%$

Fig. 7 Comparison of TL between the predicted (—) and measured (◇) of a through-flow perforated muffler for M=0

(white noise)을 음원으로 하여 소음기 출구측의 고정점에서 소음기가 있을 때와 없을 때의 음압을 측정하여 구한 투과손실과 계산으로 구한 것을 비교하여 나타낸 것이다. 이론예측과 실험결과는 잘 부합되나 3000 Hz 부근에서 유공율의 변화에 따른 과도적인 부분에서 다소 일치하지 않는 점이 있음을 알 수 있다. 그림에서 유공율이 증가함에 따라, 최대성능을 나타내는 주파수영역이 점차 고주파 영역으로 옮겨가는 것을 알 수 있으며 유공율이 증가함에 따라 단순팽창형 소음기가 가까게 되는 것을 알 수 있다.

그림 8은 유속이 없을 때와 유속이 22m/s 일 때에 각각 측정된 투과손실을 비교 도시한 것이다. 유동이 있을 때, 유동이 없을 때보다 전체적으로 삽입손실이 증가하고, 특히 고주파 영역에서 현저히 증가함을 알 수 있다. 관통형에서 유동이 있는 경우에 이론모델을 적용하려면 구멍을 통한 유속이 알려져야 하나 현재로는 실험을 통하여 유속을 직접 구할 수 밖에 없다.

그림 9는 연결형 소음기에서 유동이 없는 경우에 투과손실을 대역소음 (band noise)을 음원으로 하여 측정된 것과 계산값을 비교

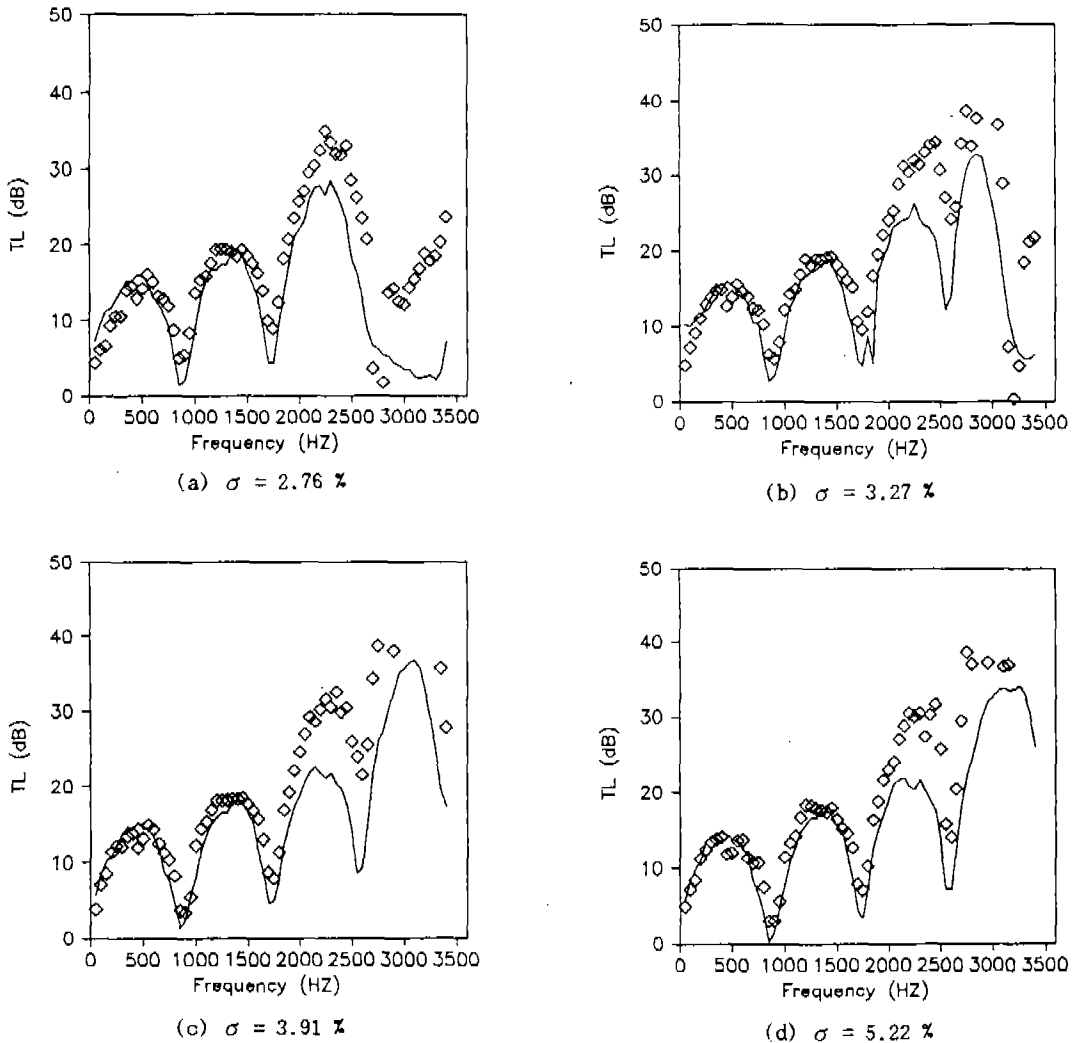


Fig. 8 Comparison between the measured TL for $M=0$ (—) and for $M=0.064$ (\diamond) of a through-flow perforated muffler

도시하였다. 그림에서 알 수 있듯이 저주파영역에서 다소의 오차를 제외하면 측정값과 이론값은 매우 잘 일치함을 알 수 있다. 특히, 연결관의 반사율이 낮은 1000 Hz 이상에서는 투과손실에 관한 이론예측이 실험결과와 매우 잘 부합한다고 할 수 있다. 그러나, 저주파수 영역에서 이론 투과손실보다 측정된 삽입손실이 다소 낮게 나타나는 것을 알 수 있다.

그림 10은 소음기 통과유속이 20m/s ($M=0.0584$)인 경우에 백색잡음을 음원으로 실험하여 계산값과 비교 도시하였다. 연결형 소

음기의 경우 유동이 있을 때에도 이론예측은 실험결과와 잘 부합된다고 할 수 있으나 다소 주파수가 높은 영역에서는 이론예측 보다 더 큰 투과손실이 나타나는 것을 알 수 있다.

실험에 사용한 각 소음기의 통과유속에 따른 압력강하를 측정하여 결과를 그림 11에 표시하였다. 관통형일 경우 유공율이 증가할수록 압력강하가 커지고 연결형일 경우에는 유공율이 증가할수록 압력강하가 적어지는 것을 확인할 수 있다. 같은 유속에서는 관통형의 압력강하가 단순쌍창형보다 낮고 연결형은 현저하게 압력강하가 커지는 것을 알 수 있다.

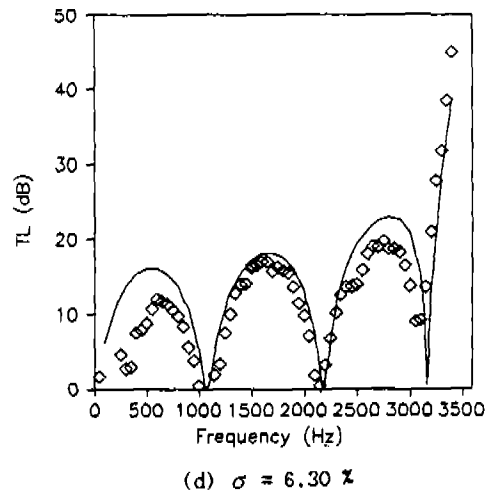
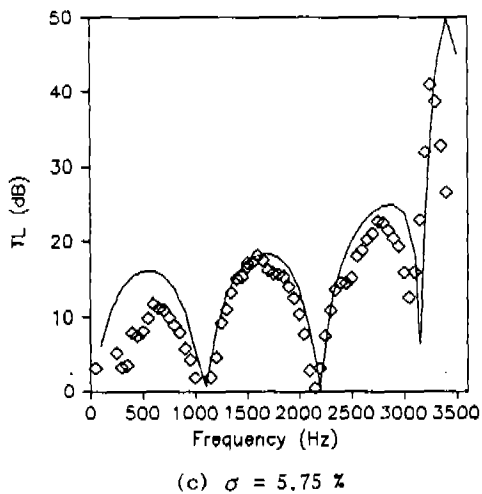
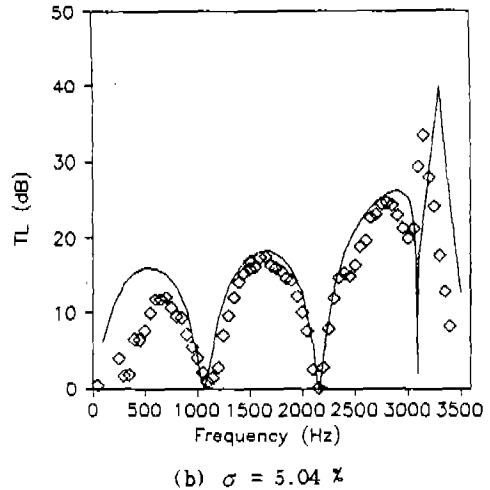
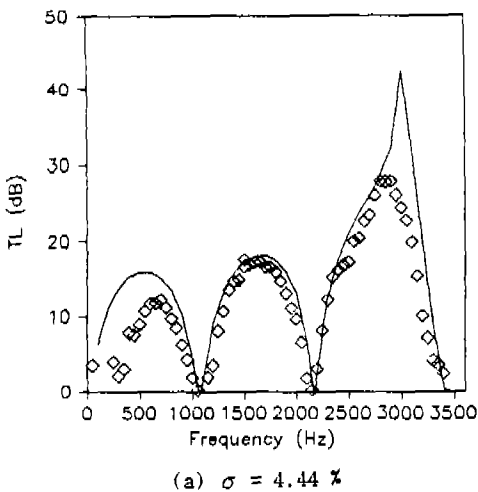
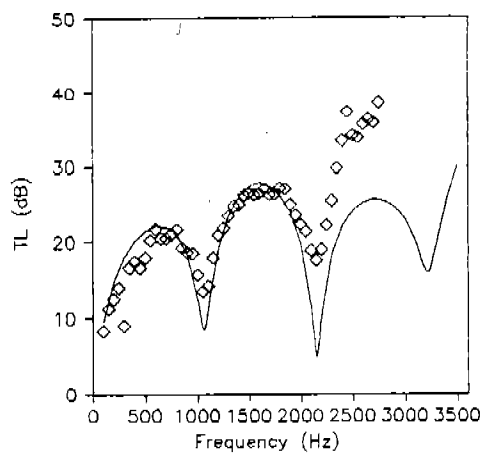
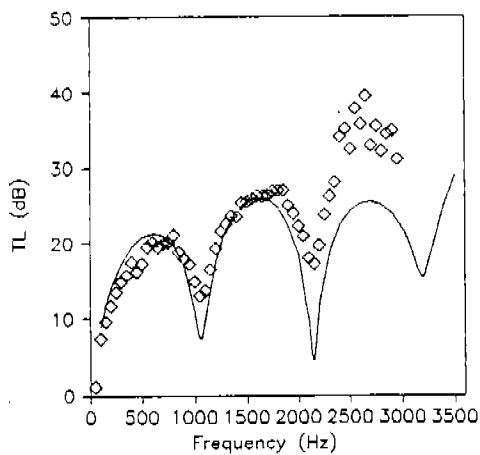


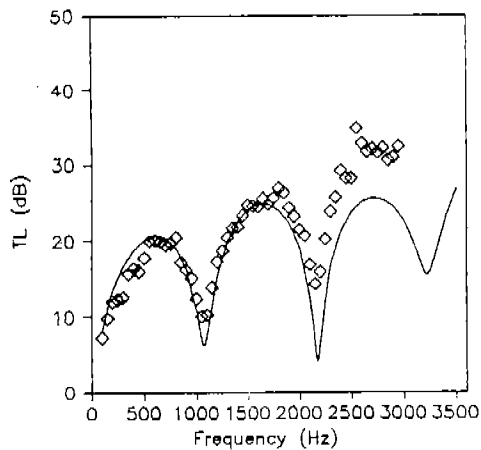
Fig. 9 Comparison of TL between the predicted (—) and measured (◇) of a cross-flow perforated muffler for $M=0$



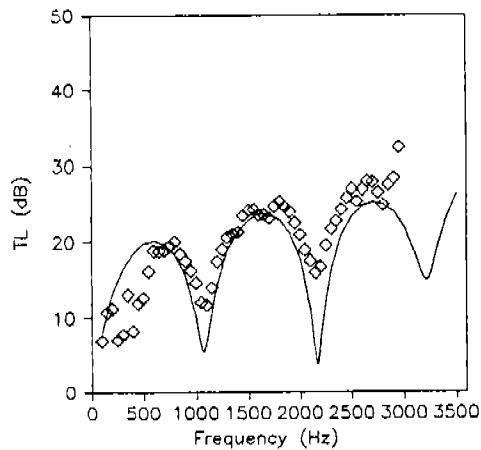
(a) $\sigma = 4.44 \%$



(b) $\sigma = 5.04 \%$

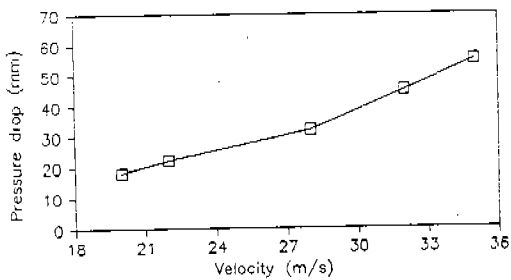


(c) $\sigma = 5.75 \%$

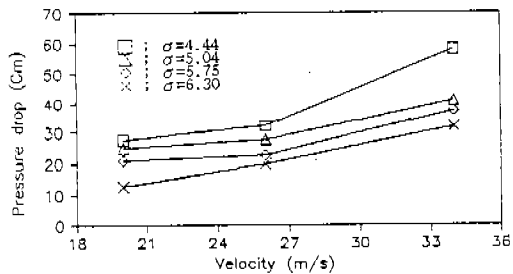


(d) $\sigma = 6.30 \%$

Fig.10 Comparison of TL between the predicted (—) and measured (◇) of a cross-flow perforated muffler for $M=0.058$



(a) Simple expansion chamber



(b) Cross-flow type muffler

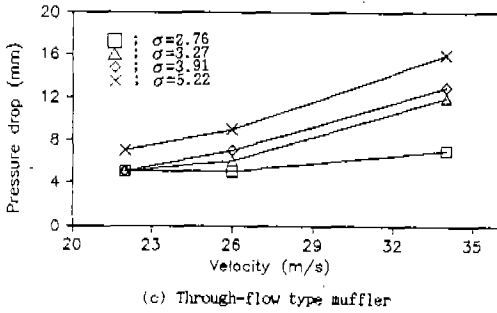


Fig.11 Pressure drop of the mufflers

이상의 결과에서 관통형과 연결형 소음기를 비교하면 그림 7과 그림 9 및 그림 8과 그림 10을 볼 때 연결형이 관통형보다 소음성능은 다소 낮다고 할 수 있다. 그러나 그림 11의 유동저항을 보면 연결형이 관통형에 비하여 유동저항이 현저하게 크기 때문에 유동저항의 측면에서 본다면 관통형이 더 낮다고 할 수 있다.

5. 결 론

이상과 같이 다공 공명형 소음기의 성능계산 및 실험결과 다음 결론을 얻을 수 있다.

첫째, 다공형 소음기중 연결형과 관통형의 투과손실을 구할 수 있는 컴퓨터 프로그램이 개발되었으며 계산결과는 실험결과와 비교적 잘 부합된다.

둘째, 관통형 소음기의 경우 공기의 유동에 의하여 투과손실이 다소 증가하며, 특히 고주파 영역에서 현저하다.

세째, 연결형 소음기의 경우 공기의 유동에 의한 투과손실의 증가는 관통형에서 보다 현저하며 이론예측보다 더 높게 나타난다.

네째, 연결형 소음기가 관통형에 비하여 소음성능은 다소 좋으나 유동저항은 10 배 이상 크게 된다.

후 기

본 연구는 한국학술진흥재단의 1989년도 자유공모 학술연구 조성비의 지원으로 수행된 것으로 동 재단에 감사하는 바이다.

REFERENCES

1. Lewis H. Bell, "Industrial Noise Control", Marcel Dekker, 1982.
2. Jeong-Guon Ih and Byung-Ho Lee, J. Acous. Soc. Am. 77(4), pp. 1377-1388, April, 1985.
3. Lawrence E. Kinsler, "Fundamentals of Acoustics", John Wiley & Sons, 1982.
4. J.W. Sullivan and M.J. Croker, "Analysis of concentric-tube resonators having unpartitioned cavities", J. Acous. Soc. Am. 64 pp. 207-215, 1978.
5. P.T. Thawani and Jayaraman, "Modeling and applications of straight-through resonators", J. Acous. Soc. Am. 73(4), pp. 1387-1389, 1983.
6. J.W. Sullivan, "A method for modeling perforated tube muffler components. I. Theory", J. Acous. Soc. Am. 66, pp. 722-778, 1979.
7. J.W. Sullivan, "A method for modeling perforated tube muffler components. II. Application", J. Acous. Soc. Am. 66, pp. 779-788, 1979.
8. 송대원, "단순팽창형 소음기에 관한 연구", 숭실대학교 석사학위논문, 1988.
9. M.L. Munjal, "Acoustics of Ducts and Muffler with application to exhaust and ventilation system design", Johnwiley & Sons 1987.
10. Leo, L. Beranek, "Noise Reduction", McGraw-Hill.
11. Larry J. Eriksson, "Noise Control in Internal Combustions".

부 록

A-1 전달행렬 [G]의 계수

식(15)에 나타난 관 1과 관 2 사이의 전달행렬식 [G]의 계수는 다음과 같다.

$$\begin{bmatrix} P_{1, 2j} \\ U_{1, 2j} \\ P_{2, 2j} \\ U_{2, 2j} \end{bmatrix} = [G_j] \begin{bmatrix} P_{1, 2j-1} \\ U_{1, 2j-1} \\ P_{2, 2j-1} \\ U_{2, 2j-1} \end{bmatrix}$$

$$\begin{aligned} G_{11} &= [1 - B_3 \cdot (2 \cdot B_4 + B_5 - B_2)] / E_1 \\ G_{12} &= \{ B_1 - B_3 \cdot [1 + B_1 (B_4 + B_5 - B_2)] \} / E_1 \\ G_{13} &= B_3 \cdot B_5 / E_1 \\ G_{14} &= B_3 \cdot C_1 \cdot B_5 / E_1 \\ G_{21} &= (B_5 + B_4 - B_2) / E_1 \\ G_{22} &= [1 + B_1 \cdot (B_5 - B_2)] / E_1 \\ G_{23} &= -B_5 / E_1 \\ G_{24} &= -C_1 \cdot B_5 / E_1 \\ G_{31} &= C_3 \cdot B_5 / E_2 \\ G_{32} &= B_1 \cdot C_3 \cdot B_5 / E_2 \\ G_{33} &= [1 - C_3 \cdot (2 \cdot C_4 - C_2 + B_5)] / E_2 \\ G_{34} &= \{ C_1 - C_3 \cdot [1 + C_1 \cdot (C_2 + B_5 - C_4)] \} / E_2 \\ G_{41} &= -B_5 / E_2 \\ G_{42} &= -B_1 \cdot B_5 / E_2 \\ G_{43} &= (B_5 - C_2 + C_4) / E_2 \\ G_{44} &= [1 + C_1 \cdot (B_5 - C_2)] / E_2 \end{aligned}$$

여기서

$$\begin{aligned} B_1 &= M_{1, j} \cdot Z_1 & B_2 &= M_{1, j} \cdot Z_1^{-1} \\ B_3 &= M_{1, j+1} \cdot Z_1 & B_4 &= M_{1, j+1} \cdot Z_1^{-1} \\ B_5 &= A_j \cdot [1 - (M_{1, j+1} - M_{1, j})^2 \cdot Z_{b_j}^2 \cdot Z_1^{-2}] \\ C_1 &= M_{2, j} \cdot Z_2 & C_2 &= M_{2, j} \cdot Z_2^{-1} \\ C_3 &= M_{2, j+1} \cdot Z_2 & C_4 &= M_{2, j+1} \cdot Z_2^{-1} \\ E_1 &= 1 - (M_{1, j+1})^2 & E_2 &= 1 - (M_{2, j+1})^2 \end{aligned}$$

A-2 전달행렬 [H]의 계수

식(18)의 분지점과 분지점 사이의 전달행렬 [H]의 계수는 다음과 같다.

$$\begin{bmatrix} P_{1, 2j+1} \\ U_{1, 2j+1} \\ P_{2, 2j+1} \\ U_{2, 2j+1} \end{bmatrix} = [H_j] \begin{bmatrix} P_{1, 2j} \\ U_{1, 2j} \\ P_{2, 2j} \\ U_{2, 2j} \end{bmatrix}$$

$$\begin{aligned} H_{11} &= F_1 \cdot \cos \alpha_1 \\ H_{12} &= i \cdot F_1 \cdot Z_1 \cdot \sin \alpha_1 \\ H_{13} &= H_{14} = 0 \\ H_{21} &= i \cdot F_1 \cdot Z_1^{-1} \cdot \sin \alpha_1 \\ H_{22} &= F_1 \cdot \cos \alpha_1 \\ H_{23} &= H_{24} = 0 \\ H_{31} &= H_{32} = 0 \\ H_{33} &= F_2 \cdot \cos \alpha_2 \\ H_{34} &= i \cdot F_2 \cdot Z_2 \cdot \sin \alpha_2 \\ H_{41} &= H_{42} = 0 \\ H_{43} &= i \cdot F_2 \cdot Z_2^{-1} \cdot \sin \alpha_2 \\ H_{44} &= F_2 \cdot \cos \alpha_2 \end{aligned}$$

여기서

$$\begin{aligned} \alpha_1 &= k \cdot L_j \cdot E_1^{-1} & \alpha_2 &= k \cdot L_j \cdot E_2^{-1} \\ F_1 &= \cos (M_{1, j+1} \cdot \alpha_1) - i \cdot \sin (M_{1, j+1} \cdot \alpha_1) \\ F_2 &= \cos (M_{2, j+1} \cdot \alpha_2) - i \cdot \sin (M_{2, j+1} \cdot \alpha_2) \end{aligned}$$