

〈論 文〉

두개의 음향탐촉자를 이용한 소음기의 투과손실 측정과 오차해석

Transmission Loss Measurement of Silencer with Two Microphones and Its Error Analysis

강 성 우* · 김 양 한*

Seong-Woo Kang and Yang-Hann Kim

(1992년 6월 29일 접수 ; 1992년 8월 4일 심사완료)

ABSTRACT

A method of measuring the transmission loss of silencer using two microphone technique is described. Two microphone method is used to eliminate the measurement error due to reflected wave spectra in inlet/outlet duct of silencer. Errors associated with the measurement method are studied. Henceforth the methods to effectively suppress the influence are presented. Based on these considerations, the appropriate procedure of experimental set-up to measure the transmission loss of silencer is described with experimental verifications.

1. 서 론

소음기의 음향학적 특성은 소음기의 기하학적 형성과 소음기내를 흐르는 유동 및 온도구배에 의하여 지배된다. 기하학적 형성이란 함은 소음기 자체의 직경 및 입,출구관의 길이와 직경, 또한 소음기와의 상대적 연결위치 등을 일컫는다. 또한 소음기 내부의 격벽과 공극관 및 흡음재 등의 요소들도 소음기내의 음파전달에 영향을 끼치며, 그 특성은 삽입손실, 투과손실 등으로 대표할 수 있다. 이 때 투과손실은 소음기 자체의 감음특성을 나타낸다는 사실과 이론적인 예측이 가능하다는 점에서 가장 널리 사용되고 있다. 그러나 소음기의 투과손실은 삽입손실보다는 좀 더 주의깊은 측정을 필요로 한다.

투과손실의 측정방법에 있어서 각 주파수별 정현파 가진에 의한 정재파비 방법(SWR; Standing Wave Ratio Method)^(1,2)은 전통적인 방법으로 인정받고

있으나, 임의의 한 주파수에 대하여 소음기 양단에서 관길이 방향으로의 많은 측정을 필요로 하므로 주파수영역에서 충분한 해상도의 투과손실선도를 얻기 위하여는 매우 많은 측정시간을 요하는 단점이 있다.

Singh와 Katra⁽³⁾는 투과손실을 측정하는데 있어서 임펄스기법을 제시하였다. 그러나 이 방법은 입력신호로 발생시킨 임펄스신호의 비균일 에너지성분에 의하여 제한된 동특성범위(Dynamic range)를 갖게 되며, 소음기양단 음향탐촉자 사이의 트리거링(Triggering)이 어렵다는 점과 비선형성에 의하여 제한된 적용범위를 갖는다는 단점이 있다. Lung과 Doige⁽⁴⁾는 소음기의 전달매트릭스 성분을 측정하는데 있어서 시간영역에서의 평균과도응답신호를 사용한 방법을 제시하였으며, 과도응답신호의 충분한 평균처리에 의해 신호대잡음비를 향상시키는데 성공하였다. 그러나 측정음향탐촉자 사이의 시간지연이 고려되어 있지 않아 측정시 트리거링(Triggering)문제는 임펄스기법과 마찬가지로 단점으로 지적되고 있다. 또한 입출구 양단의 무반사 처리에 의한, 하나의 음향탐촉자를 사

* 정회원, 한국과학기술원 기계공학과

용한 기존의 음압법(삽입손실의 측정으로 투과손실을 대치)은 입구측 확장덕트 내 반사파 등의 영향에 기인한 부정확성을 지니고 있다.

Seybert와 Ross⁽⁵⁾에 의해 최초로 제시된, 두개의 음향탐촉자를 사용한 음파분리이론은 덕트내 음향계의 제반특성을 빠르고 정확하게 측정할 수 있는 방법으로서, 소음기 투과손실측정에의 효과적인 응용가능성을 보여주었다. Seybert와 Ross이후 Chung과 Blaser⁽⁶⁾는 덕트내 음향계의 제 물리량을 측정할 수 있는 전달함수법을 제안하였다. 위 두 방법은 개념적으로 동일한 방법으로서 Seybert와 Ross의 음파분리이론으로부터 전달함수법은 유도되어질 수 있음이 Seybert에 의해 증명되었다⁽⁷⁾. 최근 두개의 음향탐촉자기법은 두 음향탐촉자 임피던스관법(Two-microphone impedance tube method)이란 공식명칭으로 ASTM(American society of testing materials) standard에 채택되었다.(ASTM E1050)

그러나 이 음파분리이론은 그 이론의 간단, 명료함에도 불구하고 실제 적용에 있어서는 많은 측정상의 주의와 오차요인을 내포하고 있다.

본 연구에서는 음파분리이론에 대한 기존의 정량적인 오차해석^(8~10)을 토대로 그 오차들의 물리적 의미와, 실제 측정 및 실험자료 처리시 고려되어야 할 기준 및 방법을 제시하고자 한다. 또한 소음기의 투과손실 측정에서의 응용방법을 살펴보고, 오차해석에 근거한 측정장치의 구성법을 제시, 그 타당성을 살펴보기 위하여 소음기의 투과손실 측정치와 이론해를 비교하였다.

2. 음파분리이론(Wave Decomposition Theory)

2.1 음파분리이론

Fig. 1과 같이 $X=-L$ 에 음원이 있고 $X=0$ 에 임의의 음향 임피던스를 갖는 음향계를 고려할 때, 평면파 영역내에서의 음장을 주파수 영역에서 보면 입사 스펙트럼 및 반사 스펙트럼($S_{AA}(f)$, $S_{BB}(f)$)과 입사파와 반사파의 크로스 스펙트럼($S_{AB}(f) = C_{AB} + jQ_{AB}$)으로 대표할 수 있다(Fig. 1 참조). 여기서 C_{AB} 와 Q_{AB} 는 각각 크로스 스펙트럼의 실수부와 허수부이다.

이 때 $S_{AA}(f)$, $S_{BB}(f)$, $S_{AB}(f)$ 는 임의의 두 지점에서의 스펙트럼인 $S_{11}(f)$, $S_{22}(f)$, $S_{12}(f)$ ($S_{12}(f) = C_{12}(f) + j \cdot Q_{12}(f)$)와 다음과 같은 관계를 가짐을 알 수 있다^(5,7).

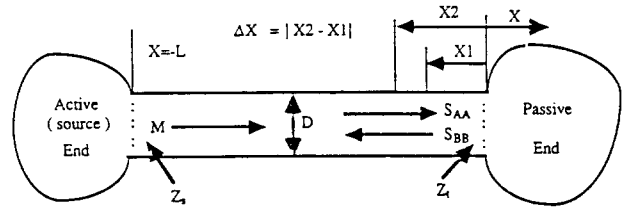


Fig.1 Wave decomposition in duct
 M; Mach number,
 D; Duct diameter,
 Z_s ; Acoustic impedance of source end,
 Z_t ; Acoustic impedance of passive end

$$[A] [S_{AA} \ S_{BB} \ C_{AB} \ Q_{AB}]^T = [S_{11} \ S_{22} \ C_{12} \ Q_{12}]^T \quad (1)$$

여기서 $[A]$ 는 k , X_1 , X_2 의 함수로 구성된 (4×4)행렬이며, 덕트 내 유동속도를 무시할 때 식 (1)을 $[S_{AA} \ S_{BB} \ C_{AB} \ Q_{AB}]^T$ 에 대하여 풀면 다음과 같은 결과를 얻을 수 있다. k 는 파수 즉, ω/c 를 표시하며, ω 와 c 는 각각 각속도(radian/sec)와 음속을 나타낸다.

$$S_{AA} = [S_{11} + S_{22} - 2C_{12} \cos k(X_1 - X_2) + 2Q_{12} \sin k(X_1 - X_2)] / 4 \sin^2 k(X_1 - X_2) \quad (2a)$$

$$S_{BB} = [S_{11} + S_{22} - 2C_{12} \cos k(X_1 - X_2) - 2Q_{12} \sin k(X_1 - X_2)] / 4 \sin^2 k(X_1 - X_2) \quad (2b)$$

$$C_{AB} = [-S_{11} \cos 2kX_2 - S_{22} \cos 2kX_1 + 2C_{12} \cos k(X_1 + X_2)] / 4 \sin^2 k(X_1 - X_2) \quad (2c)$$

$$Q_{AB} = [-S_{11} \sin 2kX_2 + S_{22} \sin 2kX_1 + 2C_{12} \sin k(X_1 + X_2)] / 4 \sin^2 k(X_1 - X_2) \quad (2d)$$

식 (2)로부터 반사단의 파워 반사계수 $\alpha_0(f)$, 음향임피던스 $Z_0(f)$ ($=R_0(f) + j \cdot X_0(f)$) 및 관 내 음향인텐시티 $I(f)$ 를 유추해 낼 수 있다⁽⁷⁾.

$$\alpha_0(f) = S_{BB}(f) / S_{AA}(f) \quad (3a)$$

$$R_0(f) = \rho c [S_{AA}(f) - S_{BB}(f)] / [S_{AA}(f) + S_{BB}(f) - 2C_{AB}(f)] \quad (3b)$$

$$X_0(f) = -2\rho c C_{AB}(f) / [S_{AA}(f) + S_{BB}(f) - 2C_{AB}(f)] \quad (3c)$$

$$I(f) = Q_{12}(f) / [\rho c \sin k(X_1 - X_2)] \quad (3d)$$

여기서 ρ 는 매질의 밀도(kg/m^3)를 표시한다.

식 (3)으로부터 임피던스 부정합으로 야기되는 반사파의 영향을 이론적으로 제거할 수 있을 뿐 아니라 음향계의 제 물리량을 측정을 통하여 도출할 수 있음을 알 수 있다.

2.2 임계주파수와 두 센서계의 교정

식 (1), (2)에서 쉽게 관찰될 수 있듯이 특정 주파수에서는 음파분리가 불가능한 사실에 주목할 필요가 있다. 수학적으로 보면 [A]의 역행렬이 존재하지 않는 경우이며 이 때의 주파수는 $k_{nth \text{ critical}} \cdot \Delta X = (n - 1)\pi$ ($n=1, 2, \dots$)를 만족시키게 되고 이를 임계주파수라 한다. 이 임계주파수에서 두 음향탐촉자 사이의 간격이 반파장의 정수배에 해당되게 되고 따라서 두 음향탐촉자에 측정되는 압력이 최소가 되는 경우이다.

또한 실제 적용시 두 센서와 각각의 증폭계는 각기 다른 전달함수를 지니고 있으므로, 음파분리원리를 적용하려면 반드시 두 센서계의 교정이 필요함을 알 수 있다. 이 경우의 교정은 동일한 상황에서의 두 센서계의 전달함수를 이용하여, 임의의 센서계 특성을 기준으로 또 다른 센서계에서의 정보를 보정하는 상대적 교정방법을 사용하는 것이 가능하다. 즉 측정하고자 하는 물리량, 투과손실은 입사음파와 투과음파의 상대적 비이므로 사용주파수 영역에서 음향탐촉자들의 크기비와 위상차에 대한 보정이 필요함을 이해할 수 있다.

3. 음파분리이론의 오차해석

음파분리 이론을 구현하는데 있어서의 오차는 측정계수(experimental parameter)인 다음과 같은 인자들에 의해 결정된다고 가상할 수 있을 것이다. 이를 함수형으로 표현하면 다음과 같다(Fig. 1 참조).

$$\text{음파분리 오차} = \text{오차}(L, D, \Delta X, X_1, Z_s, Z_r, \Delta f, r_{12}^2(f), \text{etc})$$

즉, 관의 기하학적 형상과 음향탐촉자의 측정위치, 입,출구단의 음향임피던스 및 측정된 신호의 상관관계 등에 의하여 측정오차가 영향을 받을 것이라 생각할 수 있다.

음파분리원리를 구현하는 데 있어 오차를 크게 두

가지로 대별하여 보면, 측정에 있어서의 스펙트럼 추정오차(Spectrum estimation error)와, 계산에 있어 수집된 스펙트럼 오차에 대한 음파분리 알고리즘 자체의 민감성과 관련된 오차(Algorithm sensitivity error)가 있다^(8,9). 스펙트럼 추정상의 오차는 다시 바이어스 오차와 랜덤오차로 나누어 생각할 수 있다⁽¹⁰⁾. 실제 구현시 각 오차성분에 영향을 끼치는 인자들의 기여를 최소화시키도록 제반 측정장치를 구성하여야 할 것이다.

3.1 바이어스 오차(Bias Error)

일반적으로 스펙트럼 추정 ($\hat{S}_{ii}(f)$)에 있어서의 바이어스 오차는 다음과 같이 정의된다⁽¹¹⁾.

$$b[\hat{S}_{ii}(f)] = E[\hat{S}_{ii}(f)] - S_{ii}(f) \quad (4a)$$

$$E[\hat{S}_{ii}(f)] = 1/\Delta f \int_{f-\Delta f/2}^{f+\Delta f/2} S_{ii}(\zeta) d\zeta \quad (4b)$$

덕트계(Fig. 1)에서의 스펙트럼은 평면파영역에서의 지배방정식과 양단의 경계조건(Z_s, Z_r)으로부터 다음과 같은, Z_s, Z_r, X_1, X_2, L 의 함수 형태로 구하여 질 수 있다⁽⁸⁾.

$$S_{ii}(f) = \frac{F_1(Z_s, e^{2jkX_1})}{F_2(Z_s, Z_r, e^{2jkL})} S_{\psi\psi}(f) \quad (i=1,2) \quad (5)$$

$S_{\psi\psi}(f)$: 음원의 파워 스펙트럼

이때, F_1, F_2 는 각각 관 내의 음향공진과 주파수영역에서의 정재파형태를 나타낸다.

이제 $S_{\psi\psi}(f), Z_s(f), Z_r(f)$ 의 주파수에 따른 변화가 작다고 가정하면, F_1, F_2 의 주파수 영역 내 주기가 주파수 분해도 Δf 보다 훨씬 클 경우 (4a), (4b) 식으로부터 바이어스 오차가 최소화됨을 알 수 있다. 즉, 바이어스 오차를 최소화시키기 위한 다음과 같은 조건식을 얻을 수 있다.

$$\frac{2\Delta f L}{c}, \frac{2\Delta f X_1}{c}, \frac{2\Delta f X_2}{c} \ll 1 \quad (6)$$

또한 크로스 스펙트럼의 경우, 다음과 같은 관계식에 의해 $S_{ii}(f)$ 에 대한 바이어스 오차해석을 그대로 적용할 수 있다⁽¹¹⁾.

$$b[\hat{S}_{ii}] = b[\hat{S}_{ii}] \quad (7a)$$

$$b[\angle \hat{S}_{ii}] \leq |b[\hat{S}_{ii}]| \quad (7b)$$

3.2 랜덤 오차(Random Error)

바이어스 오차가 없다고 가정할 때, 스펙트럼의 랜덤오차(ϵ)는 다음과 같이 주어진다⁽¹²⁾.

$$\epsilon [\hat{S}_{ii}(f)] \propto 1/\sqrt{n_d} \quad (8a)$$

$$\epsilon [|\hat{S}_{ii}(f)|] \propto 1/(|r_{ii}(f)| \cdot \sqrt{n_d}) \quad (8b)$$

$$\epsilon [|\hat{\Delta S}_{ii}(f)|] \propto \sqrt{\frac{1-r_{ii}^2(f)}{2n_d r_{ii}^2(f)}} \quad (8c)$$

$r_{ii}^2(f)$: 기여도 함수(Coherence function)

n_d : 스펙트럼 평균 횟수

즉, 측정시 스펙트럼 평균횟수를 증가시킴과 동시에 기여도 함수값을 1에 가깝게 유지시킴으로써 랜덤 오차를 줄일 수 있음을 알 수 있다.

이제 관내 음파분리계에의 적용을 위하여 Fig. 2와 같은 모델을 고려한다. 주음원($S(f)$)과 저변소음($N(f)$)이 서로 상관성이 없다고 가정할 때, 이 계의 기여도 함수는 다음과 같이 구하여 질 수 있다.

$$r_{i2}^2(f) = \frac{[S_{SS}^4 |H_{1S}|^2 |H_{2S}|^2 + 2S_{SS}^2 S_{NN}^2 \text{Re}\{H_{1S}H_{2S}H_{1N}H_{2N}^*\} + S_{NN}^4 |H_{1N}|^2 |H_{2N}|^2]}{[S_{SS}^4 |H_{1S}|^2 |H_{2S}|^2 + S_{SS}^2 S_{NN}^2 (|H_{1S}|^2 |H_{2N}|^2 + |H_{1N}|^2 |H_{2S}|^2) + S_{NN}^4 |H_{1N}|^2 |H_{2N}|^2]}$$

$r_{i2}^2(f)=1$ 일 조건은 다음과 같다.

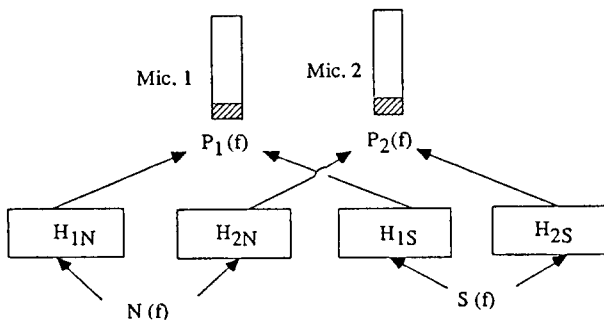


Fig.2 Wave decomposition model in duct
 $S(f)$; Fourier transform of main signal,
 $N(f)$; Fourier transform of noise signal,
 $P_i(f)$; Fourier transform of pressure signal at i -th microphone,
 $H_{ij}(f)$; transfer function between i -th microphone and signal j

i) $S_{NN} = 0, H_{1S} = H_{1N}, H_{2S} = H_{2N}$

ii) $S_{NN} = 0, H_{1S} = H_{2S}, H_{1N} = H_{2N}$

i) 조건은 주음원과 저변소음이 동일하고 경로까지 같아야 함을 의미하므로 현실적이지 못하여, ii) 조건으로부터 저변소음을 최소화시키고 두 음향탐촉자 간격(ΔX)를 작게 함에 의해 기여도 함수값을 1에 근접시킬 수 있음을 알 수 있다.

3.3 알고리즘상의 입력오차에 대한 민감성

식 (2)로부터 임계주파수 근방에서는 각 분모항이 아주 작은 값을 취하게 되어, 입력 데이터에 있어서의 작은 오차에 대하여도 민감한 오차를 유발시킬 수 있음을 알 수 있다.

그러므로 $(n + \epsilon_1)\pi \leq k\Delta x \leq (n + \epsilon_2)\pi$ ($n=0,1,2, \dots, \epsilon$; 신뢰상수) 영역 내에서의 해석이 신뢰성이 있다고 볼 수 있다. Åbom과 Bodén은 $\epsilon_1=0.1, \epsilon_2=0.8$ 을 제시하고 있다⁽⁹⁾.

4. 실제 구현시에 고려할 사항

4.1 음파 분리 이론 성립 요건을 만족시키는 측정 조건

음파분리이론은 근본적으로 평면파영역에서 성립하므로 이 사실과 임계 주파수를 고려하여 다음과 같은 조건식을 얻을 수 있다.

- i) 관 내 평면파 영역; $0 < f < f_{cut\ off}$
 - ii) 음파분리이론의 제2차 임계주파수; $f_{2nd\ critical} = c/(2\Delta X)$
 - iii) ΔX 에 대한 조건 유도; $f_{cut\ off} < f_{2nd\ critical}$
- 예> 원형덕트 (직경: D)의 경우; $\Delta X < 0.853D$

4.2 오차해석에 근거한 측정조건

3장에서 오차해석에 근거하여 실제 측정시에는 다음과 같은 고려가 필요할 것이다.

- i) 주파수 분해도 Δf 를 작게 한다.
- ii) 덕트 길이 L 을 작게 한다.
- iii) 반사단으로부터 첫번째 음향 탐촉자까지의 거리(X_1)을 작게 한다. 단, 측정에 있어서의 근장효과(Nearfield effect)를 배제할 수 있는 거리는 유지시켜야 할 것이다.
- iv) 저변 소음을 억제한다.
- v) 두 음향탐촉자 사이의 간격을 작게 한다. 이

때, 너무 작은 간격은 $k \Delta X \rightarrow 0$ 으로, 제1차 임계주파수로의 접근을 의미하므로 목적에 맞게 적절히 선정하여야 한다.

5. 실험적 고찰

5.1 실험장치

Fig. 3과 같은 실험 장치를 구성하여, 각 영향 인

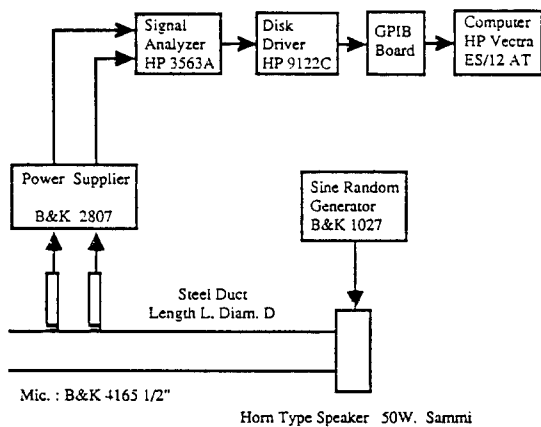


Fig.3 Experimental set-up to decompose the wave spectra in duct

자들에 대하여 열린 관단의 반사계수를 음파분리에 의해 측정하여 이론해^(1,2)와 비교하였다.

5.2 두 음향 탐촉자계의 특성차이에 의한 영향과 교정

실제 음파분리실험에서는 두 음향 탐촉자 뿐 아니라 음향 탐촉자, 음향 탐촉자의 파워 공급기(Power supplier)와 BNC 케이블까지의 특성비교를 할 필요

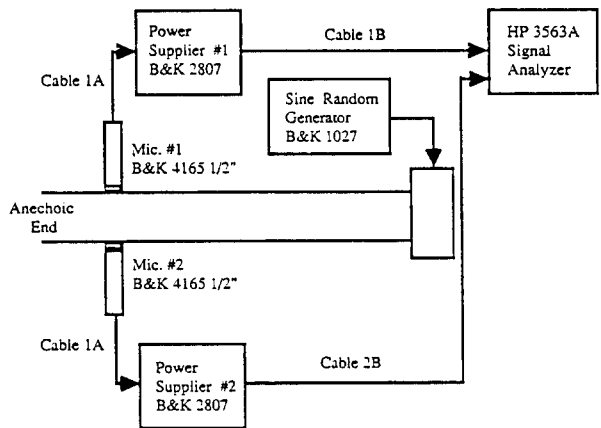


Fig.4 Experimental set-up to measure the transfer function of two microphone systems

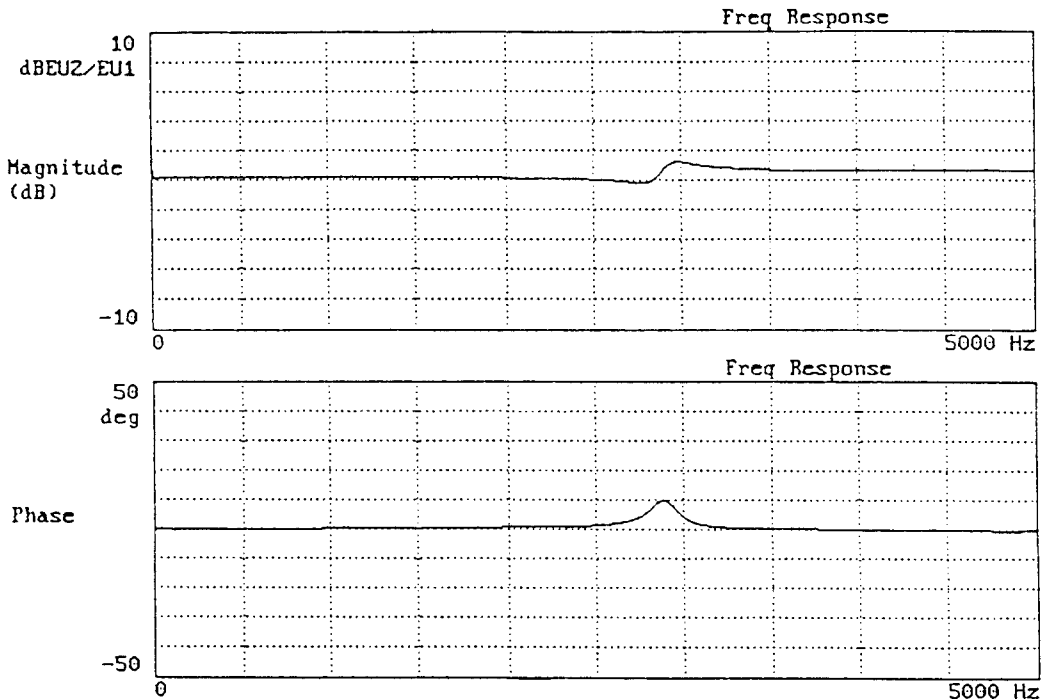
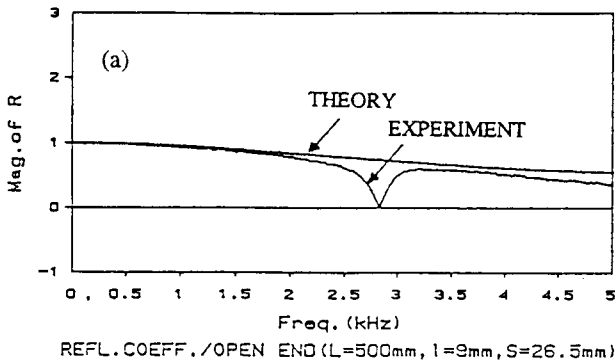
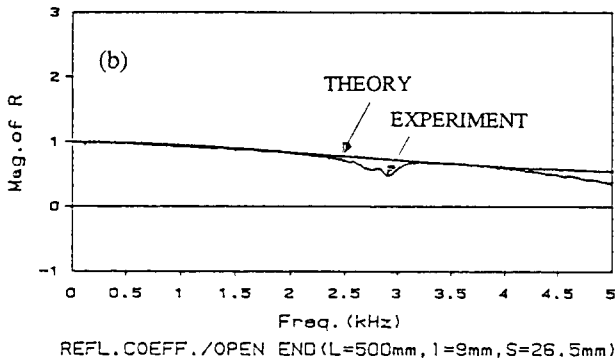


Fig.5 Measured transfer function of two microphone system (B & K 4165 1/2")



(a) Before the calibration,



(b) After the calibration

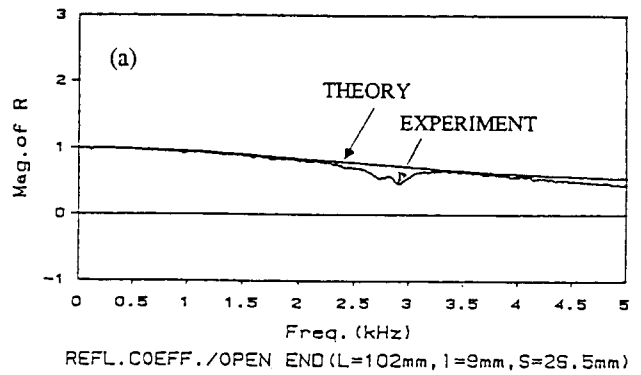
Fig.6 Effect of system calibration
($D=34$, $L=500$, $X_1=9$, $\Delta X=26.5$ (unit: mm))

가 있으므로 Fig.4에서와 같이 동일한 상황에서의 두 음향탐촉자계 사이의 전달함수를 조사하였다.

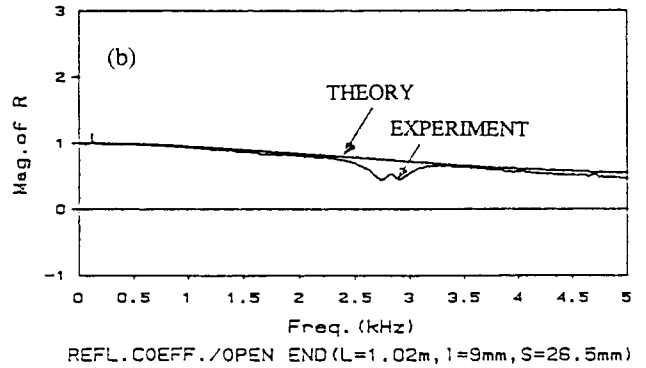
Figs. 5, 6에서 관찰할 수 있듯이 두 음향 탐촉자계의 작은 특성부정합도 큰 오차를 유발시킬 수 있음을 알 수 있으며, 특히 위상 부정합에 의한 차이를 보이는 것으로 보아 교정 데이터를 얻는 데 있어 매우 정교한 실험환경이 필요한 것으로 판단되어 진다.

5.3 덕트 길이(L) 변화의 영향

Fig. 7에서 보듯이 전반적으로 관 길이에 따른 큰 차이를 보이지 않고 있으며, 이로부터 다른 조건들이 양호한 경우 관 길이는 오차에 큰 영향을 끼치지 않는다고 볼 수 있다. 이는 관의 길이에 따른 음파의 감쇄현상이 극히 미미하므로 상식적인 예측과 일치한다. 즉, 평면파가 관내를 전진하는 경우 덕트길이의 영향은 고려할 필요가 없음은 물리적으로도 타당하다 할 것이다. 평면파이외의 음파 즉 관내의 고차모우드 형태를 가진 음파가 진행할 경우에는 관의 길이방향에 따른 각 음파성분의 배열이 다를 수 있으므로 길



(a) $L=102$,



(b) $L=1020$ (unit:mm)

Fig.7 Effect of duct length($D=34$, $X_1=9$, $\Delta X=26.5$)

이의 영향이 중요한 인자가 되어야 하나, 음파분리이론 자체의 가정인 평면파영역이외의 것이므로 무의미함을 이해할 수 있다.

5.4 반사단으로부터 첫번째 음향 탐촉자까지의 거리(X_1) 변화의 영향

Fig. 8에서 보듯이 반사단으로부터 첫번째 음향탐촉자까지의 거리가 늘어남에 따라 측정오차가 커짐을 볼 수 있으며, 이 사실은 이론적 오차해석 결과와도 잘 부합하고 있다. 이는 물리적으로 반사단으로부터 첫번째 음향탐촉자까지의 거리가 늘어남에 따라, 이론적으로 측정주파수 영역내에서 음압이 최소인 노우드(Node)지점에 음향탐촉자가 놓이게 될 가능성이 증가하게 되며, 음향탐촉자의 위치가 노우드 지점에 해당하는 정재파의 주파수성분들에 있어서는 측정오차가 증가하기 때문으로 설명될 수 있다.

5.5 음향 탐촉자 사이 간격(ΔX) 변화의 영향

Fig. 9에서 보듯이 ΔX 가 늘어남에 따라 임계주

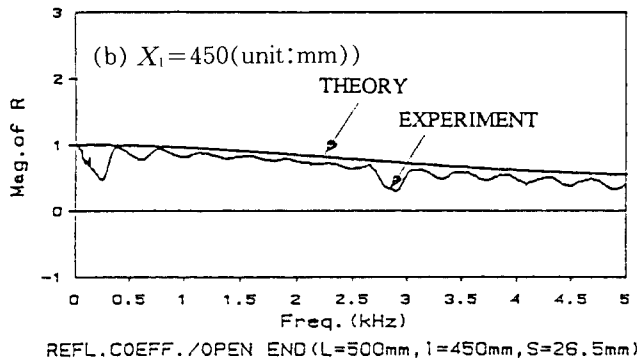
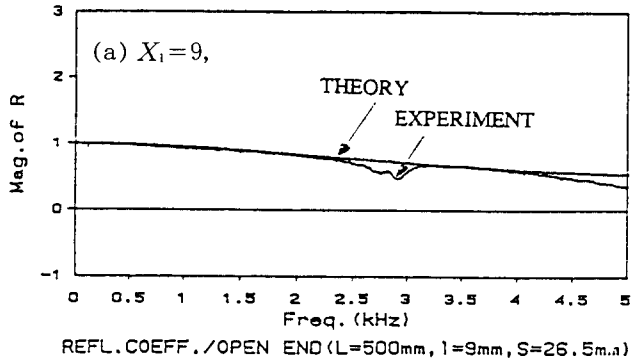


Fig.8 Effect of distance from reflected end to first microphone ($D=34$, $L=500$, $\Delta X=26.5$,

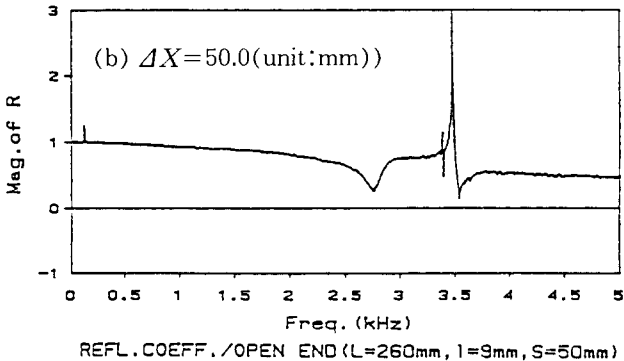
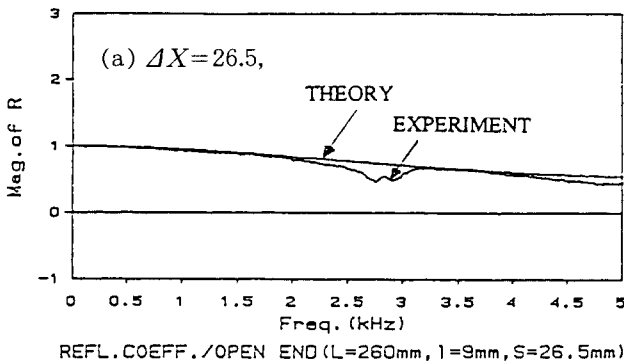
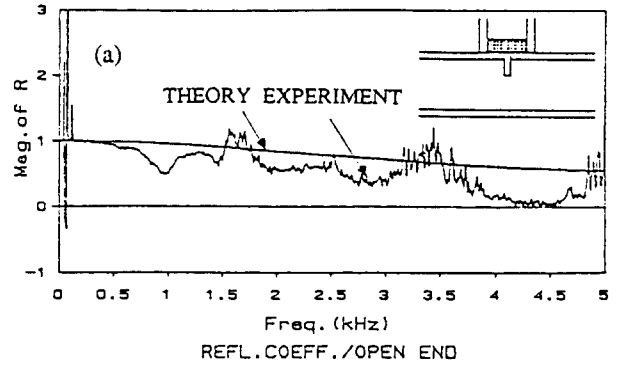
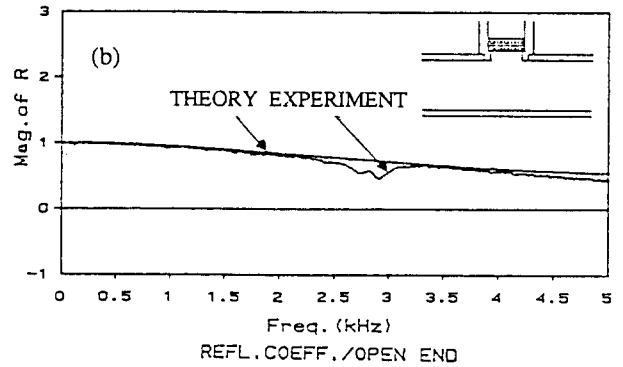


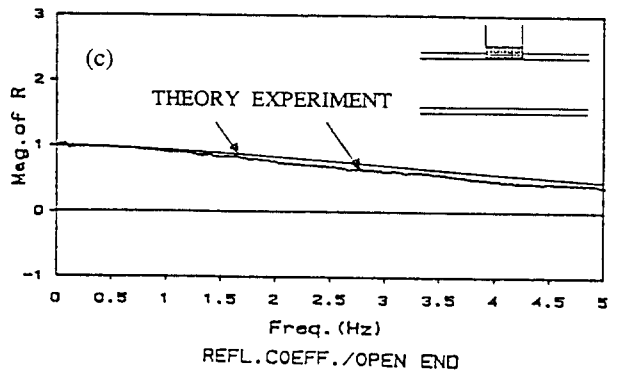
Fig.9 Effect of microphone spacing
 $D=34$, $L=500$, $X_1=9$,



(a) Inserting probe type into the duct wall



(b) Tube-case type on the duct wall



(c) Flush mounting type on the duct wall

Fig.10 Effect of signal acquisition method

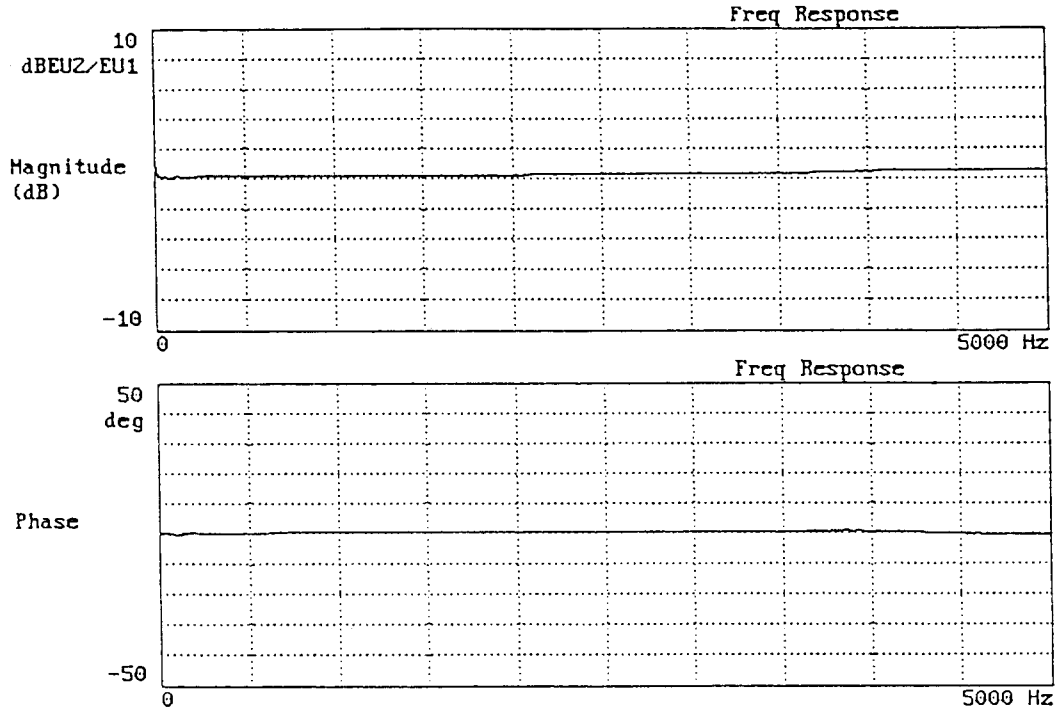


Fig.11 Transfer function of two microphone system in flush mounting type on duct wall

파수의 영향을 받고 있음을 알 수 있다. 실험결과에서의 특이점 위치는 3475Hz로서 이론적 2차 임계주파수 3470Hz에 근접하고 있으며, 임계주파수 근방의 주파수 대역에서 오차가 심함을 알 수 있다.

즉, 음향탐촉자 간격을 선정하는데 있어서는 덕트의 차단주파수와 임계주파수가 반드시 고려되어야 함을 확인할 수 있다(4.1절 참조).

5.6 신호수집방법에 따른 변화의 영향

덕트 내에서의 신호수집방법에 따른 변화를 조사하기 위하여 세 형태의 음향탐촉자에 대하여 각각 음파 분리실험을 행하였다(B & K 4165 1/2").

탐침을 사용할 경우(Fig. 10a) 음향탐촉자 내 가진막의 한정된 부분만을 가진함으로 인해 충분히 가진된 신호를 수집하지 못하기 때문에 여겨지며, 관벽 탈착형 프로우브(Fig. 10b)를 사용할 경우에는 가진막과 관벽사이의 공간격의 고유주파수에서 위상부정합(Fig. 5 참조)에 의한 오차에 의한 것으로 판단되어진다. 관벽밀착상태의 경우(Fig. 10c) 두 음향탐촉자 사이의 특정차이를 거의 볼 수 없으며(Fig. 11), 실험결과 역시 전 주파수 영역에 걸쳐 이론해에 근접함을 관찰할 수 있다.

결론적으로 관벽밀착상태에서의 신호수집이 가장

효과적이라고 할 수 있다.

6. 소음기의 투과손실 측정의 응용

6.1 음파 분리 이론을 응용한 소음기의 투과손실 측정 방법론

Fig. 12에서 볼 때, 입구측 덕트 내에서는 소음기로의 확장부분에서의 임피던스 부정합으로 인하여 임의의 정재파가 형성될 것이며, 출구측 덕트를 고려할 때 실제 무반사단 처리는 불완전하므로 출구측에서의

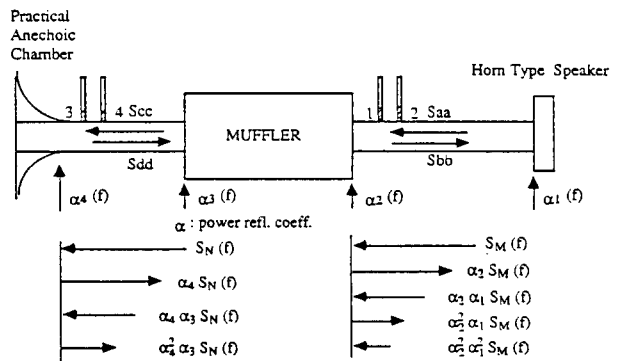


Fig.12 Transmission loss measurement using two microphone theory

반사파($S_{dd}(f)$) 역시 필연적으로 존재하게 된다. 이 때 음파분리과정을 통하여 입,출구 양단과 연결된 덕트에서의 진행과 스펙트럼은 다음과 같은 관계를 갖는다.

$$S_{aa}(f) = \frac{S_M(f)}{1 - \alpha_1(f)\alpha_2(f)} \quad (10a)$$

$$S_{cc}(f) = \frac{S_N(f)}{1 - \alpha_3(f)\alpha_4(f)} \quad (10b)$$

이제 투과손실의 정의(식 11 참조)에 근거할 때, 입구측에서는 소음기로 전파되어 들어오는 모든 입사 스펙트럼 $S_{aa}(f)$ 를 사용할 수 있으나, 출구측에서는 실제로 소음기를 통과하여 투과되는 스펙트럼 $S_N(f)$ 만이 고려되어야 할 것이다. 즉, 출구측에서의 반사파가 존재하는 경우의 투과손실식은 다음과 같이 수정되어야 할 것이다.

$$TL = 10\log_{10} \frac{S_{ii}(f)}{S_{ii}(f)} = 10\log_{10} \frac{S_{aa}(f)}{S_N(f)} \quad (11)$$

여기서 $S_{ii}(f)$ 와 $S_{ii}(f)$ 는 각각 입사 및 투과 스펙트럼을 의미한다.

식 (11)로부터 결국, 투과손실은 관내의 $S_{aa}(f)$, $S_N(f)$ 를 측정하는 일로 귀착된다. 이 때 $S_N(f)$ 가 구하여지기 위하여는 식 (10b)로부터 $S_{cc}(f)$, $\alpha_3(f)$, $\alpha_4(f)$ 가 측정되어야 함을 알 수 있으며, 실제 상황에서 반사스펙트럼 $S_{cc}(f)$ 와 파워 반사계수 $\alpha_4(f)$ 는 음파분리과정을 통하여 측정할 수 있다. 그러나 출구측 덕트계만을 고려할 때, $\alpha_3(f)$ 는 음원단에서의 파워반사계수의 의미를 가지며 실제상황에서 측정이 곤란한 미지수로 남게 된다.

결국 두 개의 음향탐촉자법을 사용한다 할지라도 출구측의 무반사단처리는 투과손실의 정의를 만족시키기 위하여 반드시 필요하다고 볼 수 있다. 또한 무반사단처리는 측정시 두 음향탐촉자 사이의 기여도함수값을 증대시켜 신호대 잡음비를 좋게 하는 역할도 하게 된다.

Fig. 13은 무반사처리단의 파워반사계수에 따른 투과손실측정에 있어서의 상대오차경향을 나타낸다. 이 경우 출구측 덕트에서의 α_3 는 1로 가정함으로써 측정오차의 상한성을 보여주고 있다(식 10b, 11 참조). 이상적인 무반사처리인 경우($\alpha_4=0$) 상대오차는 0%이며 반사계수값이 증가할수록 상대오차 역시 증가함을 볼 수 있다. 또한 투과손실의 참값이 작을수록 무반사처리단의 불완전성에 의한 오차가 민감함을 볼 수 있다. 예를 들어 투과손실의 참값이 10dB, 30dB, 50dB일 때 상대오차를 20% 이내로 하고자 한다면 무반사처리단의 파워반사계수는 각각 0.19, 0.47, 0.65 이하가 되도록 설계하여야함을 알 수 있다.

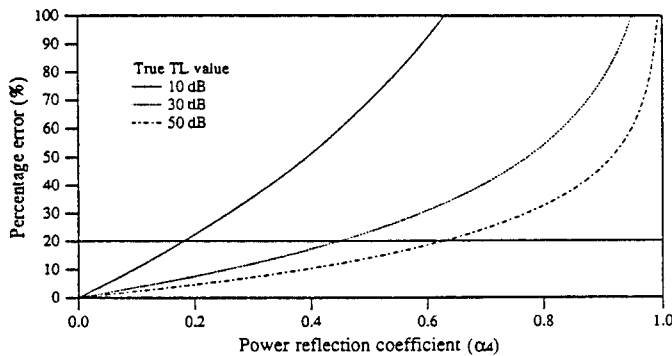


Fig.13 Percentage error of TL to reflection coefficient of terminal end when $\alpha_3 = 1$

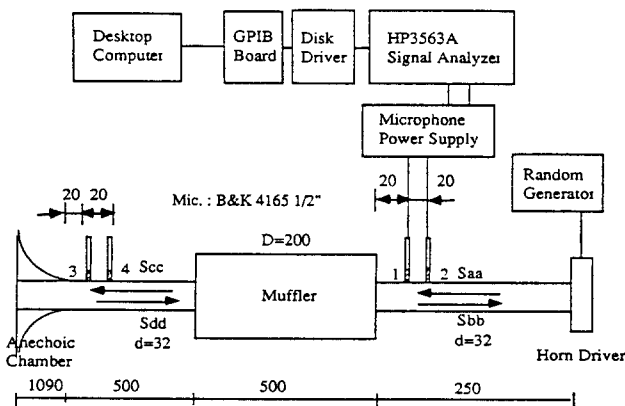


Fig.14 Experimental set-up to measure the transmission loss of silencer

6.2 측정 및 결과 고찰

출구측에 지수함수형태의 무반사단을 제작, 부착한 후, 음파분리이론을 적용하는 데 있어서의 오차를 최소화 시킬 수 있도록, 3, 4절에서 고찰된 사항을 고려하여 Fig. 14와 같은 투과손실 측정장치를 구성하였다. 측정 대상의 소음기가 주어졌을 때 측정장치 및 측정조건의 구성과정은 다음과 같다.

측정 대상의 소음기(직경 200mm, 길이 500mm, 입, 출구 직경 32mm)와, 입, 출구단에 연결된 덕트의 Cut-off 주파수는 각각 1kHz, 6.3kHz로서 음파분리가 가능한 주파수대역은 0~6.3kHz이다. 이 때, 음파분리의 임계주파수가 음파분리가능 주파수대역

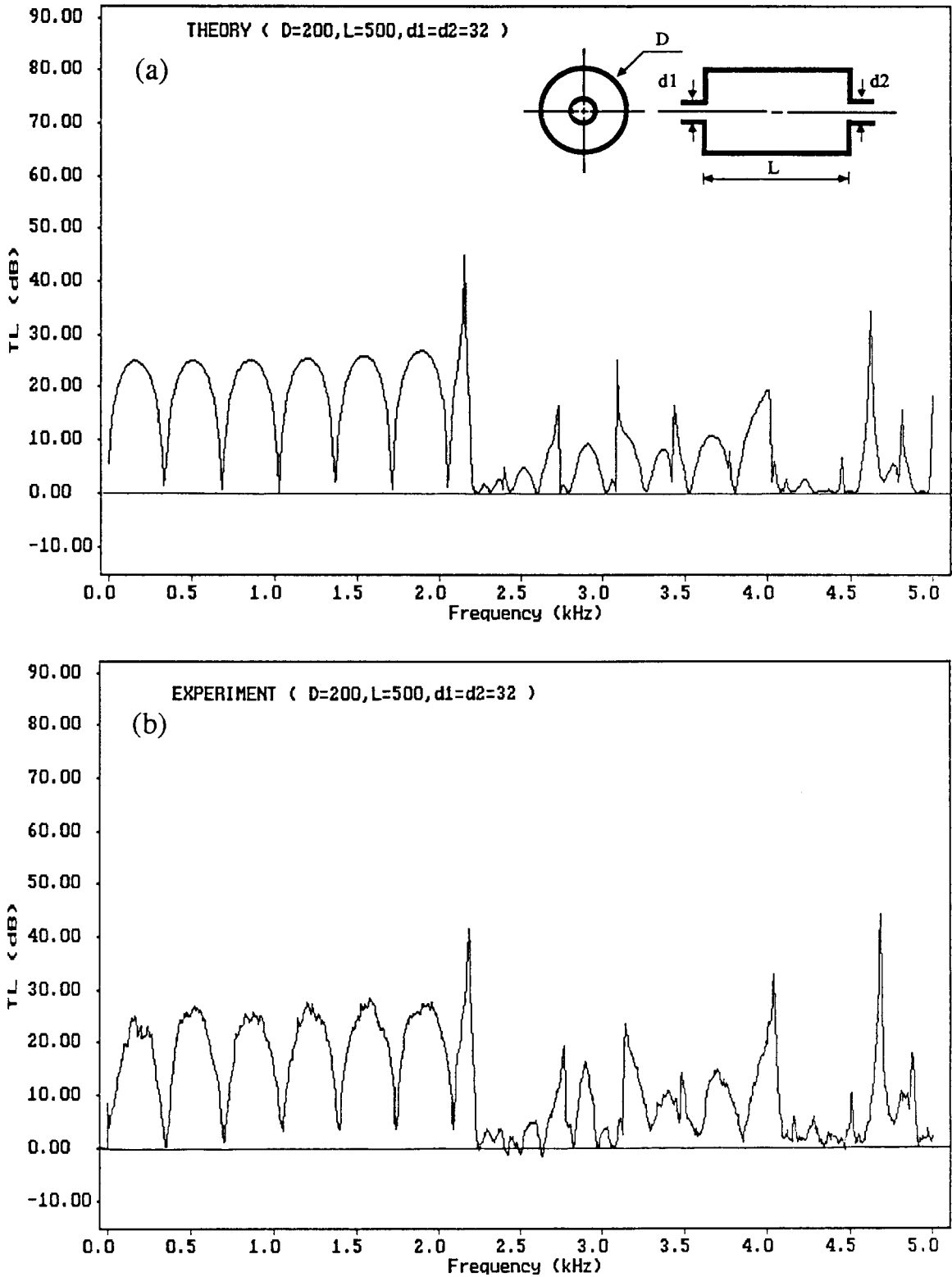


Fig.15 Theoretical and measured transmission loss using two microphone theory ($D=200, L=500$ (unit;mm), $D/d=5.94$)
 (a) Theoretical transmission loss (b) Measured transmission loss

내에 들어가지 못하도록 음향탐촉자 간격은 20mm로 선정한다. 이 경우의 2차 임계주파수는 8.6kHz로서 음파분리가 가능한 최대주파수 6.3kHz보다 큰 값을 가지게 된다. 또한 스펙트럼 추정에 있어서의 바이어스 오차를 줄이기 위하여, 주파수분해도, 덕트길이, 반사단으로부터 첫번째 음향탐촉자까지의 거리는 입,출구 덕트에 대하여 각각 6.25Hz, 250m, 20mm와 6.25Hz, 500mm, 20mm로 선정한다. 이 경우, 3.1절의 식 (5)는 $O(10^{-2}) \sim O(10^{-4}) \ll 1$ 로서 조건식을 충분히 만족한다고 볼 수 있다. 스펙트럼 추정에 있어서의 랜덤 오차를 줄이기 위하여 스펙트럼 평균횟수는 100회를 수행하였다. 음향탐촉자 장착방법은 5.6절에서의 고찰결과에 따라 관벽 밀착방법을 채택한다. 두 음향탐촉자계의 특성차이에 의한 오차를 줄이기 위하여는, Fig. 4와 같은 별도의 실험장치를 구성하여, 두 음향탐촉자계 사이의 전달함수에 근거하여 투과손실 측정시 스펙트럼 보정을 수행한다.

직경 200mm, 길이 500mm, 입, 출구 직경 32mm의 단순확장형 소음기에 대한 고차모드를 고려한 이론해는 Fig. 15a와 같으며 음파분리를 이용한 실험 결과는 Fig. 15b와 같다.

전반적으로 측정결과는 소음기의 평면과영역을 벗어난 고주파영역까지 이론해에 근접하고 있음을 볼 수 있으며, 이로서 음파분리이론을 이용한 소음기 투과손실의 정밀측정 가능성을 확인할 수 있다.

7. 결 론

소음기의 정확한 투과손실측정을 위하여 두개의 음향탐촉자를 이용한 음파분리이론을 적용하였다. 음파분리이론의 이론적 오차해석과 각 요차요인들의 실험적 고찰을 통하여, 음향탐촉자의 장착위치와 간격, 주파수 해상도, 신호수집방법, 소음기 양단덕트의 길이, 무반사처리단의 특성 및 음향탐촉자사이의 특성 교정 등이 투과손실의 측정오차에 영향을 끼침을 확인할 수 있었다. 그 결과들로부터 얻을 수 있는 측정방법을 간략하게 정리하면 다음과 같다.

음향탐촉자의 장착위치는 음파의 반사위치로부터 가깝게 위치시키고, 음향탐촉자사이의 간격은 소음기 양단 덕트의 Cut-off주파수가 음향탐촉자 사이간격에 의해 지배되는 음파분리의 임계주파수보다 작도록 설정한다. 소음기 양단덕트의 길이는, 이론적으로 짧을수록 오차가 감소하나 실제 측정결과 투과손실측정에 큰 영향을 끼치지 않음을 확인할 수 있었다. 스펙트럼 분석시에는 높은 주파수 해상도와 충분한 스펙트

럼 평균횟수를 유지하도록 한다. 신호수집은 측정위치에 있어서의 덕트 내 음장을 변형시키지 않도록 관벽밀착상태를 유지시키고, 투과손실의 정의를 만족시키기 위하여 소음기 출구측 덕트에는 무반사처리를 할 필요가 있다. 또한 두 음향탐촉자사이의 특성부정합은 음파분리시 오차를 유발시키며 특히 위상부정합은 각별한 주의를 갖고 교정할 필요가 있다. Seybert-Ross방법⁽¹⁾을 사용할 경우에는 한 음향탐촉자의 특성을 기준으로 또 하나의 음향탐촉자 특성을 맞추는 상대교정법을 하도록 하며, Chung-Blaser 방법⁽²⁾을 사용할 경우에는 음향탐촉자 교환법(Switching method)에 의해 교정하도록 한다.

위 측정조건들을 고려하여 소음기 투과손실 측정장치를 구성, 실험을 행하였으며 측정결과와 이론해와의 비교를 통하여 측정방법론의 신뢰성을 입증할 수 있었다.

따라서 이상과 같은 두개의 음향탐촉자기법을 사용한 투과손실 측정지침은 여러분야의 산업현장에서 각종 소음기의 특성측정시 유용하게 쓰일 수 있을 것이다.

후 기

본 연구는 생산기술연구원 위탁과제의 일부로 수행되었음을 밝히며 특히 이성일 박사 도움에 감사드립니다. 또한 실험결과에 대하여 많은 조언을 주신 이정권 교수께 감사사를 드립니다.

참 고 문 헌

- (1) P. M. Morse and K. U. Ingard, "Theoretical Acoustics", McGraw-Hill, 1968.
- (2) A. D. Pierce, "Acoustics ; Introduction to Its Physical Principles and Applications", McGraw-Hill, 1981.
- (3) R. Singh and T. Kutra, "Development of an Impulse Techniques for Measurement of Muffler Characteristics", J. Sound and Vib., 56, 1978, pp. 279~298.
- (4) T. Y. Lung and A. G. Doige, "A Time Averaging Transient Testng Method for Acoustic Properties of Piping Systems and Mufflers with Flow", J. Acoust. Soc. Am., 73, 1983, pp. 867~876.
- (5) A. F. Seybert and D. F. Ross,

“Experimental Determination of Acoustic Properties Using a Two-mic. Random Excitation Technique”, J. Acoust. Soc. Am., 61, 1977, pp.1362 ~1370.

(6) J. Y. Chung and D. A. Blaser, “Transfer Function method of Measuring in Duct Acoustic Properties. I. Theory, II. Experiment”, J. Acoust. Soc. Am., 68, 1980, pp.907~921.

(7) A. F. Seybert, “Two-Sensor Methods for the Measurements of Sound Intensity and Acoustic Properties in Duct”, J. Acoust. Soc. Am., 83, 1988, pp. 2233~2239.

(8) A. F. Seybert and Benjamin Soenarko, “Error Analysis of Spectral Estimates with Application to the Measurement of Acoustic Parameters Using Random Sound Fields in Ducts”, J. Acoust. Soc. Am., 69. 1981, pp.1190~1199.

(9) Hans Bodén and Mats Abom, “Influence of Errors on the Two-mic. Method for Measuring Acoustic Properties in Ducts”, J. Acoust. Soc. Am., 79,1986, pp.541~549.

(10) Mate Abom and Hans Bodén, “Error Analysis of Two-Microphone Measurements in Ducts with Flow”, J. Acoust. Soc. Am., 83, 1988, pp.2429~2438.

(11) J. S. Bendat and A. G. Piersol, “Random Data; Analysis and Measurements Procedures”, Wiley-Inter Science, 1986.

(12) Yang-Hann Kim and Seong-Woo Kang, “Transmission Loss Measurement of Silencer with Two Microphones and Its Error Analysis”, Proc. Korea. Soc. for Noise and Vib. Eng., Nov., 1991, pp.85~90.

(13) F. J. Fach, “Sound Intensity”, Elsevier Applied Science, 1989.