

# 소음기의 감음 성능 평가

°김 석 홍° 이 흥 기° 이 상 업° 이 규 배° 이 규 섭°

Kim, Seok-Hong Lee, Hong-Gi Lee, Sang-Yub Lee, Kyu-Bae Lee, Gyu-Seop

( Evaluation of the Performance of Silencer )

## 1. 연구의 배경 및 목적

소음기의 감음성능<sup>1)</sup>은 부과손실(TL; Transmission Loss), 삽입손실(IL; Insertion Loss), 음향감쇠(Att; Attenuation), 소음저감량(NR; Noise Reduction)등 여러가지의 정의에 따라 평가되고 있으나 이들 상호간의 관계는 잘 밝혀져 있지 않은 상황이다. 또한 이론해석에 의한 감음성능은 일반적으로 부과손실로 표현되는 것에 반하여 기존의 음압법을 이용하여 부과손실을 측정하게 되면 덕트내 반사파등의 영향으로 측정치에 오차가 발생할 수 있으며 대부분의 기존 감음성능 측정자료가 삽입손실, 음향감쇠 등으로 되어 있어 이론해석과 병행한 소음기의 성능평가 및 개선에 어려움이 있는 실정이다.

본 연구에서는 덕트내 입사파와 반사파의 분리가 가능한 2계 마이크로폰법(Two-sensor Method)<sup>2), 3)</sup>의 입사파와 반사파의 분리측정 정밀도를 확인하고 이방법에 따라 입사파 음향인텐시티<sup>4), 5)</sup>만을 분리 측정하여 부과손실을 구하고 이 값과 ASTM E 477규격<sup>6)</sup>에 따른 삽입손실 측정값을 상호 비교검토하고자 한다.

## 2. 이론적 고찰

### 2.1 2계 마이크로폰법

#### 2.1.1 Decomposition Theory

유체가 균일하게 흐르는 관내에 부가된 1차원정재파 음향장은 입사파의 파워스펙트럼  $S_{AA}(f)$ , 반사파의 파워스펙트럼  $S_{BB}(f)$  및 입사파와 반사파의 크로스 파워스펙트럼  $S_{AB}(f)=C_{AB}(f)+jQ_{AB}(f)$ 로 분리하여 해석 할

수 있다. 이들의 크기는 그림 1. 과 같은 음향장의 임의의 두 점에서 측정된 파워스펙트럼과 크로스 파워스펙트럼에 의해 아래식으로 표시된다.

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

위 식에서  $S_{11}(f)$ 와  $S_{22}(f)$ 는 각각 임의점  $x_1$ 과  $x_2$ 에서 측정된 음압의 파워스펙트럼이고  $S_{12}(f)=C_{12}(f) + jQ_{12}(f)$ 는 이 두점에서 측정된 음압 사이의 크로스 파워스펙트럼이다.

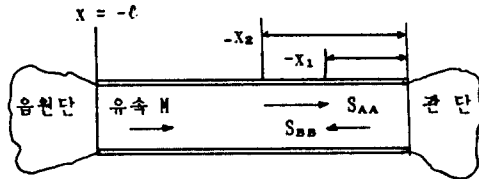


그림 1. 임의 측정점  $x_1, x_2$  의 덕트

식 (1)에서 A 행렬의 요소들은 다음과 같이 된다.

$$\begin{aligned} a_{11} &= a_{12} = a_{21} = a_{22} = 1, \\ a_{13} &= 2\cos(k_1 + k_r)x_1, \\ a_{14} &= 2\sin(k_1 + k_r)x_1, \\ a_{23} &= 2\cos(k_1 + k_r)x_2, \\ a_{24} &= 2\sin(k_1 + k_r)x_2, \\ a_{31} &= \cos k_1(x_1 - x_2), \\ a_{32} &= \cos k_r(x_1 - x_2), \\ a_{33} &= \cos(k_r x_1 + k_1 x_2) + \cos(k_1 x_1 + k_r x_2), \\ a_{34} &= \sin(k_r x_1 + k_1 x_2) + \sin(k_1 x_1 + k_r x_2), \\ a_{41} &= \sin k_1(x_1 - x_2), \\ a_{42} &= -\sin k_r(x_1 - x_2), \\ a_{43} &= \sin(k_1 x_1 + k_r x_2) - \sin(k_r x_1 + k_1 x_2), \\ a_{44} &= \cos(k_r x_1 + k_1 x_2) - \cos(k_1 x_1 + k_r x_2). \end{aligned} \text{(2)}$$

위 식에서  $K_1 = K/(1+M)$ ,  $K_r = K/(1-M)$ ,  $K = 2\pi f/C$  이며 C는 음속, M은 정상유동의 마하수이다. 식(1)을 풀면 파동 스펙트럼 행렬은 식 (3)으로 표시된다.

\* 유니슨 산업 주식회사 부설 유니슨 기술연구소

$$[S_{AA}(f) S_{BB}(f) C_{AB}(f) Q_{AB}(f)]^T$$

$$= \delta [B] [S_{11}(f) S_{22}(f) C_{12}(f) Q_{12}(f)]^T \quad (3)$$

여기서  $\delta[B]$ 는 A 행렬의 역행렬로서 다음과 같다.

$$\delta[B] = \delta \begin{pmatrix} 1 & 1 & -2a_{32} & -2a_{42} \\ 1 & 1 & -2a_{31} & -2a_{41} \\ -a_{23}/2 & -a_{13}/2 & a_{33} & a_{43} \\ -a_{24}/2 & -a_{14}/2 & a_{34} & a_{44} \end{pmatrix} \quad (4)$$

$$\text{단, } \delta = 1/4 \sin^2 [(k_1 + k_r)(x_1 - x_2) / 2]$$

식 (3), (4)를 이용하면 정상 랜덤 음장을 입사파와 반사파의 파동스펙트럼 성분으로 직접 분리할 수 있다.

2.1.2 유동이 있는 덕트내부에서의 음향 인텐시티 관내 입사파, 반사파 스펙트럼의 음향 인텐시티  $I_1$  와  $I_r$ 은 각각 식 (5), (6)과 같이 표시되며 식 (3), (4)를 이용하여 정리하면 식 (7), (8)과 같이 된다.

$$I_1 = (1 + M)^2 S_{AA}/\rho C \quad (5)$$

$$I_r = (1 - M)^2 S_{BB}/\rho C \quad (6)$$

$$I_1 = \delta(1 + M)^2 [S_{11} + S_{22} - 2C_{12} \cos k_r(x_1 - x_2) + 2Q_{12} \sin k_1(x_1 - x_2)] / \rho C \quad (7)$$

$$I_r = \delta(1 - M)^2 [S_{11} + S_{22} - 2C_{12} \cos k_1(x_1 - x_2) - 2Q_{12} \sin k_1(x_1 - x_2)] / \rho C \quad (8)$$

관단 방향의 총 음향 인텐시티  $I = I_1 - I_r$  은 식 (7), (8)로부터  $S_{22} = |S_{12}|^2 / S_{11}$ 의 관계를 이용하여 정리하면 다음 식과 같이 된다.

$$I = (\delta S_{11} / \rho C) \{ (1+M)^2 |(S_{12}/S_{11}) - \exp[-jk(x_1 - x_2)]|^2 - (1-M)^2 |(S_{12}/S_{11}) - \exp[jk_1(x_1 - x_2)]|^2 \} \quad (9)$$

$M = 0$  인 경우 식 (9)는 다음식과 같이 표시된다.

$$I = Q_{12} / \rho C \sin k(x_1 - x_2) \quad (10)$$

## 2.2 소음기 감음능의 정의

### 2.2.1 부과손실

소음기에 입사하는 음향파워  $W_1$ 와 소음기를 통과하여 나온 음향파워  $W_0$ 와의 비율 dB로 표시한 것이다.

$$TL = 10 \log \frac{W_1}{W_0} = PWL_1 - PWL_0 \text{ [dB]} \quad (11)$$

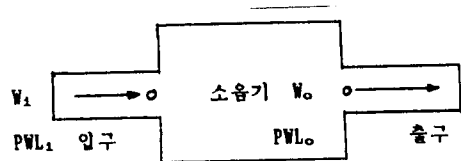


그림 2. 부과손실의 정의

### 2.2.2 삽입손실

측정점과 음원 사이에 삽입하는 소음기 출구쪽의 동일점에서 측정된 소음기설치전후의 음향 파워레벨, 음향 인텐시티레벨의 차로부터 다음과 같이 정의된다.

$$IL = PWL' - PWL = SIL' - SIL \text{ [dB]} \quad (12)$$

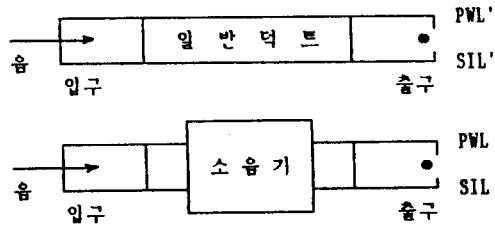


그림 3. 삽입손실의 정의

## 3. 측정개요 및 방법

### 3.1 측정개요

2개 마이크로폰법을 이용한 입사파와 반사파 음향 인텐시티 분리 측정시의 입사파, 반사파 분리 정밀도를 검토하기 위하여 무향실에서 2개 마이크로폰(인텐시티 프로브; B&K Type 3520)을 중심으로 대향의 2개 스피커를 설치하고 스피커 작동 상황별로 입사파와 반사파의 음향 인텐시티를 측정하였으며 또한 강관에서 관단의 조건에 따른 관내 입사파와 반사파의 변화를 검토하기 위하여  $\phi 155$  강관의 관단조건을 변화시키며 관내 입사파와 반사파의 음향인텐시티를 측정하였다.

2개 마이크로폰법에 의한 소음기의 부과손실 측정치와 ASTM E477 규격에 따른 삽입손실 측정치를 상호 비교 검토하기 위하여 관내 유속이 없는 상태에서 소음기의 부과손실과 삽입손실을 측정하였다. 실험에 이용한 샘플 소음기의 길이는 1.2m로 단면구조는 그림 4.와 같다.

기 설치 전후의 잔향실내 음압레벨을 측정하고 이들의 차로부터 삽입손실을 산정하였다.

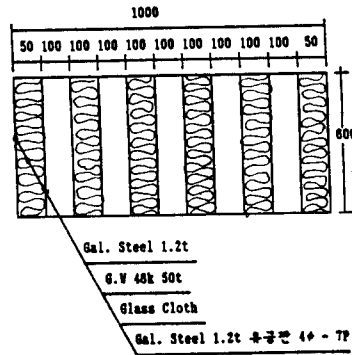


그림 4. 샘플 소음기의 단면구조

### 3.2 2개 마이크로폰법에 의한 입사파, 반사파의 분리

#### 3.2.1 무향실내 입사파, 반사파 분리 정밀도 측정

2개 마이크로폰법에 의해 입사파와 반사파의 음향인텐시티를 분리하여 측정할 때의 분리 정밀도를 검토하기 위하여 그림 5.와 같이 무향실내에서 2개 마이크로폰을 중심으로 양쪽에 다른 주파수특성을 갖는 스피커를 설치하고 음파의 입사, 반사방향을 그림 5.와 같이 설정하여 각각의 스피커를 작동한 경우와 모두 가동한 경우에 대해서 입사파, 반사파의 음향인텐시티를 측정하였다.

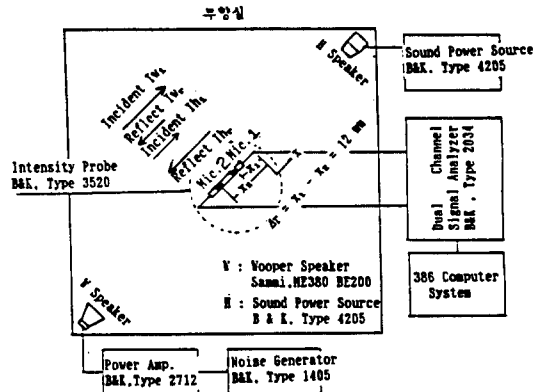


그림 5. 무향실내 입사파, 반사파 음향인텐시티 측정장치 구성도

#### 3.2.2 관단조건에 따른 관내 입사파, 반사파 음향인텐시티 측정

관단조건에 따른 관내 입사파, 반사파의 음향인텐시티의 변화를 이론적으로 예측되는 경향과 상호 비교고찰함으로써 2개 마이크로폰법에 의한 관내 입사파, 반사파 분리 측정 가능성을 검토하기 위하여 그림 6.과 같은 실험장치를 구성하여 관단을 개방한 경우, 소노로 흡음처리한 경우 및 감철판으로 반사처리한 경우에 대해, 관내의 입사파, 반사파 음향인텐시티를 측정하였다.

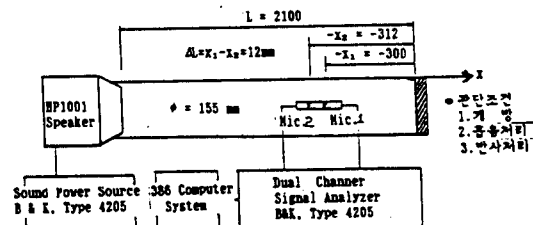


그림 6. 관내 입사파, 반사파 음향인텐시티 측정장치 구성도

### 3.3 2개 마이크로폰법에 의한 부과손실 측정

소음기의 부과손실을 구하기 위하여 그림 7.과 같이 소음기 입구와 출구에서 입사파 음향인텐시티를 측정하고 이로부터 소음기 입사파위레벨과 부과 파워레벨을 산정하여 식 (11)에 의해 부과손실을 산정하였다.

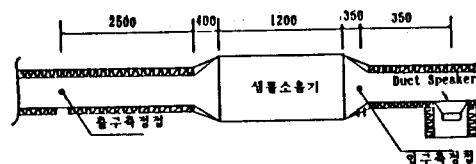


그림 7. 소음기의 부과손실 측정장치 구성도

### 3.4 ASTM 규격에 따른 소음기의 삽입손실 측정

ASTM E 477 규격에 따라 그림 8. 과 같은 삽입손실 측정설비를 사용하여 관내 유속이 없는 상태에서 소음

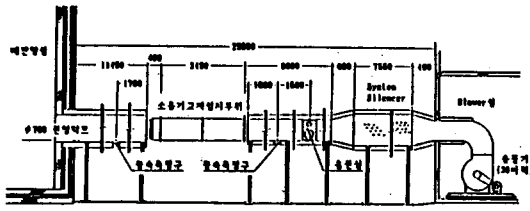


그림 8. 공조용 소음기 삽입손실 측정설비

#### 4. 측정결과 및 고찰

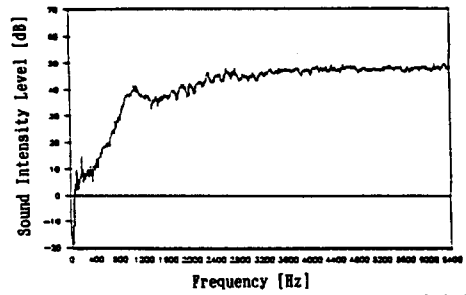
##### 4.1 2개 마이크로폰법에 의한 입사파, 반사파의 분리

##### 4.1.1 무향실에서의 입사파와 반사파 음향인텐시티 레벨의 분리측정 정밀도

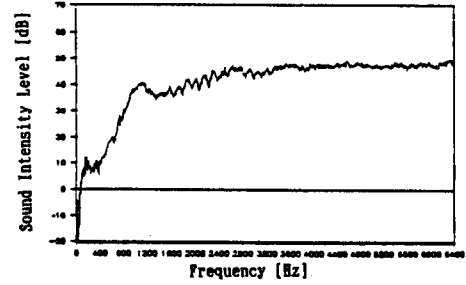
그림 9.의 (A)는 그림 5.의 실험장치에서 W, H 2개 스피커를 동시에 작동시킨 상태에서 측정한 반사파 음향인텐시티레벨, (B)는 W, H 스피커를 각각 작동했을 때의 반사파 음향인텐시티  $I_{Wr}$ 와  $I_{Hr}$ 를 합한 음향인텐시티레벨, (C)는 (A)와 (B)의 음강도레벨 차를 나타낸다. 그림 9.의 (C)에서 보는 같이 (A)와 (B)의 차이가 400Hz 이하의 주파수에서는 최대  $\pm 8\text{dB}$ , 400Hz 이상의 주파수에서는 최대  $\pm 3\text{dB}$  이내로 나타나 비교적 정밀한 입사파와 반사파의 음향인텐시티 분리측정이 가능함을 알 수 있었으며 400 Hz 이하의 일부 주파수에서 8dB정도의 큰 오차를 보이는 것은 저주파수에서 불안정한 음원 특성 때문이라 판단된다.

##### 4.1.2 관단조건에 따른 관내 입사파, 반사파의 변화

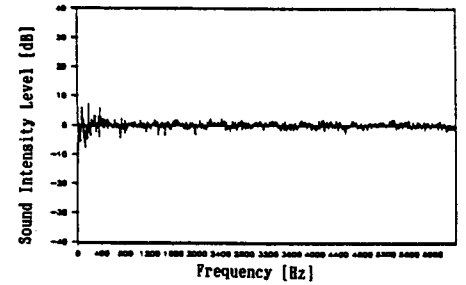
그림 10.은 관단을 개방, 소노 흡음처리, 강판 반사처리한 각각의 경우에 대한 입사파와 반사파의 음향인텐시티를 상호 비교하여 나타낸 것이다. 실험에 이용한  $\phi 155$  관관의 한계 주파수는 1284 Hz로 한계 주파수의 2배 주파수인 2568 Hz까지는 주파수별로 관단조건에 따라 일정한 변화를 보이고 있으나 2568 Hz 이상의 주파수에서는 관단조건에 따라 주파수 특성이 크게 변하고 있다. 이는 한계주파수 이상에서 발생하는 관내 크로스모드의 영향 때문이라 판단되며 여기서는 한계주파수의 2배 주파수인 2568 Hz 이하의 주파수에 대해서 고찰하기로 하고 이 이상 주파수에 대해서는 이후의 연구에서 검토하기로 한다.



(A) W, H 스피커 동시 가동시 반사파 음향인텐시티



(B) W, H 스피커 각각 가동시 반사파 음향인텐시티의 합



(C) (A) - (B)

그림 9. 2개 마이크로폰법에 의한 무향실내 반사파

입사파의 음향인텐시티는 개방단에 비하여 흡음처리한 경우 거의 같은 크기를 보이고 반사처리한 경우에는 약간 증가하고 있는 것으로 나타났다. 반사파 음향인텐시티는 개방단에 비하여 흡음처리한 경우 약간 증가하며 반사처리한 경우에는 크게 증가하여 이론적으로 예측되는 경향과 잘 일치 하는 것으로 나타났다.

또한 관단을 반사처리한 경우 반사파 음향인텐시티는 입사파 음향인텐시티와 비슷한 주파수 특성을 가지며 크기가 약간 감소한 것으로 나타나 관내에서도 입사파와 반사파의 분리측정이 가능할 것으로 판단된다.

##### 4.2 부과손실과 삽입손실의 비교

그림 11.은 샘플 소음기에 대해 2개 마이크로폰법에 의해 측정된 부과손실값과 ASTM E477 규격에 따른 삽

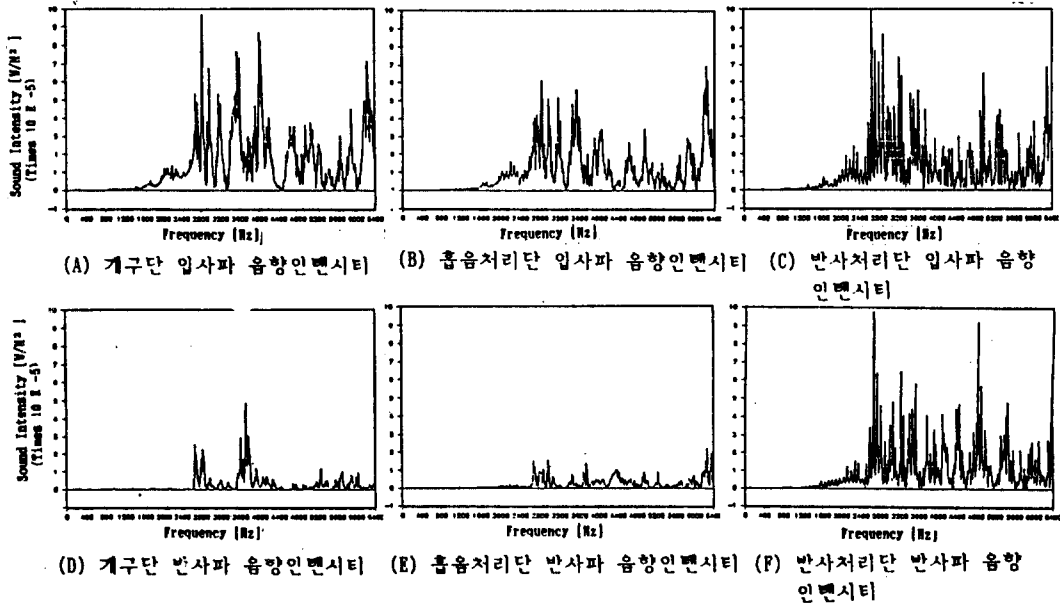


그림 10. 관단조건에 따른 관내 입사파, 반사파 음향 인텐시티의 변화

입손실값 및 이들의 차를 헵대역 주파수별로 나타낸 것이며, 그림 12.는 1/3 옥타브 대역별로 나타낸 것이다. 부과손실값은 삽입손실값에 비하여 복잡한 주파수 특성을 보이고 있으며 그림 11.의 (C)에서 보는바와 같이 부과손실값이 삽입손실값보다 대부분의 주파수에서 최대 6dB 까지 높게 나타나고 있으나, 2dB 정도 낮게 나타나는 주파수도 있어 두 값사이에 일정한 경향은 보이지 않고 있다. 부과손실값이 삽입손실값에 비하여 대부분의 주파수에서 높게 나타나는 것은 삽입손실 측정시 소음기 입구와 출구의 부과손실 측정점 사이 나덕트에서의 자연감음에 의한 영향때문이라 사료되고 1개의 샘플 소음기만을 대상으로 한 본 실험결과만으로는 부과손실과 삽입손실 사이의 관계를 정량화 하는것은 어려운 것으로 판단되며 이에 대해서는 앞으로 더 많은 연구가 진행되어야 할 것으로 생각된다.

### 5. 결론

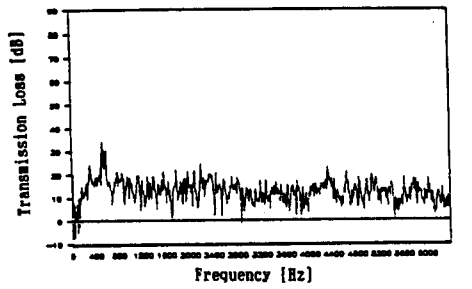
1) 무향실에서 2개 마이크로폰법에 의해 입사파와 반사파의 음향인텐시티 분리측정 정밀도를 측정 평가한

결과  $\pm 3\text{dB}$  이내의 오차 범위에서 입사파와 반사파 음향인텐시티의 분리가 가능함을 알 수 있었다.

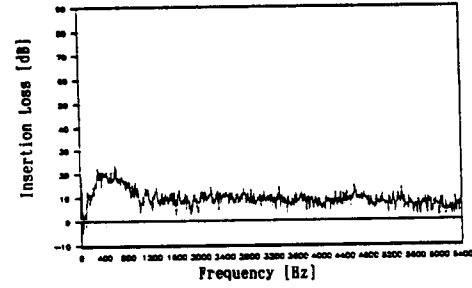
2) 관단조건에 따른 관내 입사파와 반사파의 음향인텐시티 측정결과 이론해석치와 정량적인 비교 평가는 하지 못하였으나 관단의 조건에 따른 일반적인 이론적 예측경향과 잘 일치 하는 것을 알 수 있었으며 2개 마이크로폰법은 관내 입사파와 반사파 분리측정에 유효한 방법이 될 수 있을 것으로 판단된다.

3) 2개 마이크로폰법에 의해 측정한 부과손실은 ASTM 규격에 의해 측정한 삽입손실보다 대부분의 주파수에서 약간 높게 나타났으며 부과손실과 삽입손실간의 관계를 유도하기 위해서는 보다 더 많은 연구가 이루어져야 할 것으로 판단된다.

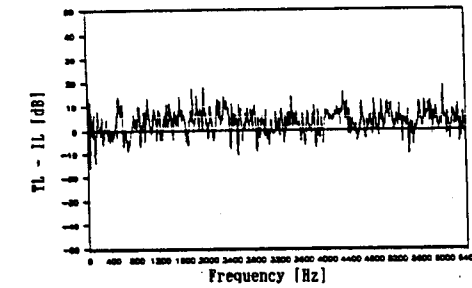
본 연구에 자료제공등 많은 도움을 주신 한국과학기술원 기계공학과 김 양 한 교수님께 감사드립니다.



(A) 부과손실

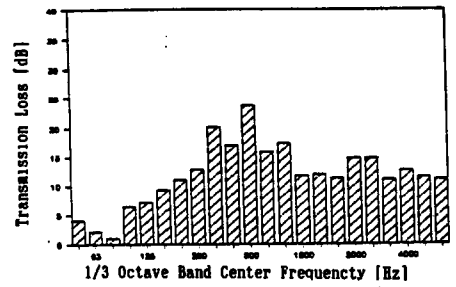


(B) 삽입손실

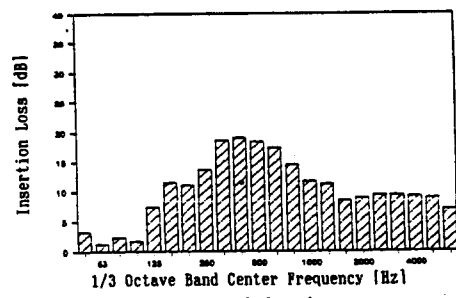


(C) 부과손실과 삽입손실의 차

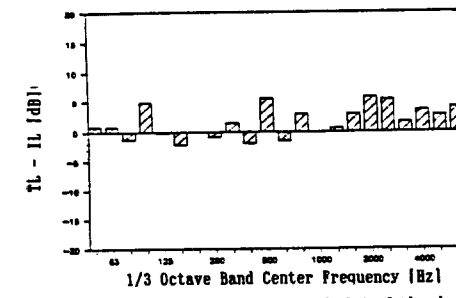
그림 11. 협대역별 부과손실과 삽입손실의 비교



(A) 부과손실



(B) 삽입손실



(C) 부과손실과 삽입손실의 차

그림 12. 1/3 옥타브 대역별 부과손실, 삽입손실의 비교

참고문헌

- 1) 김석홍, 손장영의 2인 : 음향 인텐시티법에 의한 공조설비 소음장치의 감음성능 평가에 관한 연구, 대한건축학회논문집, 제 3 권 제 6 호, 1987. 12.
- 2) A.F. Seybert : "Two-sensor methods for the measurement of Sound intensity and acoustic Properties in ducts", J. Acoust. Soc. Am. 83(6), PP. 2233-2239 (1988)
- 3) A.F. Seybert : "Experimental determination of acoustic properties using a two - microphone random - excitation technique", J. Acoust. Soc. Am. 61(5) PP. 1362-1370 (1977)

- 4) F. J. FAHY : Measurement of Acoustic Intensity Using the Cross Spectral Density of two Microphone Signals, Vol. 62, No. 4, pp. 1057 - 1059 (1977)
- 5) T. J. Schultz, et al. : Measurement of Sound Intensity in Reactive Sound Field, J.A.S.A., 57, 1263, (1975)
- 6) ASTM E 477:Standard Method of Testing Duct Linner Materials and Prefabricated Silencers for Acoustical and Airflow Performance, American Society for Testing and Materials, PP. 998-1006 (1980)