

한개의 마이크로폰에 의한 음향 전달함수 측정

°정갑철* 임정빈* 권영필**

(Measurement of Acoustic transfer function by one microphone)

°G.C.Jeong* J.B.Im* Y.P.Kwon**

1. 서 론

열기관이나 공조시스템등의 흡배기계에서 발생되는 높은 소음을 저감시키기 위하여 여러가지 형태의 소음기가 사용되고 있으며 이러한 소음기의 종류에는 반사형, 흡음형 및 조합형이 있다. 그 조합형 소음기는 흡기팬, 공기 압축기 및 자동차의 흡입계통에 사용되고 있으며 팽창실내에 흡음격벽을 부착함으로써 소음을 줄이거나, 공급되는 신기에서 먼지를 제거하기 위해 삽입된 각종 필터가 흡음재로서의 역할을 하고있다. 이와같은 조합형 소음기의 성능을 파악하기 위해서는 소음기 자체뿐만 아니라 소음기내에 삽입되는 흡음재등의 음향학적 특성을 파악할 필요가 있다.

흡음재의 음향특성을 찾아내기위한 방법 중 가장 고전적인 방법은 정재파법으로서 임피던스관내의 음압의 최대치와 최소치의 비율인 복소반사계수를 구한 후 재료의 수직입사흡음율과 임피던스등을 찾아내는 방법이다. 근래에는 FFT와 같은 분석장치의 발전에 의하여 이러한 음향특성의 파악이 더욱 신속하고 용이해졌다. FFT를 이용하여 관내의 음향특성을 파악하는 방법중 대표적인 것은 두개의 마이크로폰을 이용하는 방법으로서 Seybert와 Ross^[1]가 음파분리이론에 의거하여 처음 제시한 이후로 Chung과 Blaser^[2]가 이를 더욱 개선하여 전달함수를 이용하는 보다 간단한 방법으로 발전시켜왔다. 또한, 최근에 Chu^[3]는 한개의 마이크로폰으로 전달함수를 측정하여 음향특성을 구하는 방법을 제시하였다.

정재파법은 측정장치가 단순하고 신뢰성이 있으나 순음을 사용해야 하기 때문에 많은 측정시간을 필요로 하고 고주파와 저주파에서는 파장의 길이

때문에 음압의 최소, 최대치를 찾아내기가 어려운 단점이 있다. 전달함수법은 전 주파수대역을 한번에 측정할 수 있으므로 측정이 용이하고 측정시간이 대폭 짧아지는 장점이 있다. 전달함수법중 두개의 마이크로폰을 사용하는 경우에는 마이크로폰과 앰프의 특성이 서로 일치하지 않는 경우에 오차가 발생할 수 있으므로 이에 대한 교정이 필요하게 된다. 반면에, 한개의 마이크로폰에 의한 측정법은 음원이 ergodic하고 stationary하다고 가정하면 두 지점에서 순차적으로 측정하여도 무관하므로 이 방법은 두개의 마이크로폰법이 갖는 장치상의 오차를 극복할 수 있다.

따라서 본 실험에서는 한개의 마이크로폰만을 이용하여 소음기내에 삽입된 재료의 흡음율을 임피던스관에서 전달함수기법으로 측정하고 측정값의 정확성을 확인하기 위하여 정재파법으로 측정 한 결과와 비교하여 보았다. 또한 이 측정법을 단순팽창형 소음기에 적용하여 소음기의 투과손실을 측정 한 후, 이론과 비교하여 측정의 정확성을 검토하였고 소음기내에서의 흡음재의 위치에 따른 투과손실의 변화에 대해서도 이론과 비교 검토하였다.

2. 이론적 전개

2-1. 한개의 마이크로폰을 이용한 전달함수 기법

단면이 일정한 임피던스관내의 두 지점 1, 2 에서의 전달함수 $H_{12}(f)$ 를 이용하여 복소반사계수 $R(f)$ 를 구하면 다음과 같다.

* 숭실대학교 대학원
** 숭실대학교 기계공학과

$$R(f) = \frac{H_{12}(f) - e^{ks}}{e^{ks} - H_{12}(f)} e^{2kl} \quad (1)$$

여기서, k 는 파동정수이고, l 은 시료와 1번 마이크론 사이의 거리, s 는 두 마이크로폰 사이의 거리이다.

$H_{s1}(f)$ 를 음원과 1번 지점 사이의 전달함수, $H_{s2}(f)$ 를 음원과 2번 지점 사이의 전달함수라고 하면 $H_{12}(f)$ 는 다음 식으로 표현된다.

$$H_{12}(f) = \frac{H_{s2}(f)}{H_{s1}(f)} \quad (2)$$

복소반사계수를 이용하여 수직입사흡음율을 구하면 다음과 같다.

$$\alpha = 1 - |R|^2 \quad (3)$$

따라서, 음원과 측정점 사이의 전달함수를 측정하면 재료의 흡음율을 구할 수 있다.

Fig.1과 같은 소음기가 있는 경우 상류와 하류에서의 자기상관함수를 S_{uu} , S_{dd} , 단면적을 A_u , A_d , 복소반사계수를 R_u , R_d 라고 하면 입사음과 투과음의 음향파위는 다음과 같다.

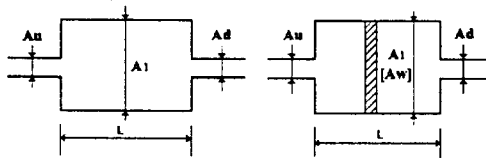
$$W_i = S_{uu} A_u / (\rho c |1 + R_u|^2)$$

$$W_t = S_{dd} A_d / (\rho c |1 + R_d|^2) \quad (4)$$

따라서 하류측의 끝단을 무반사단으로 하면 소음기의 투과손실은 다음과 같다.

$$TL = 20 \log_{10} \left| \frac{H_r - H_{12}^u}{H_r - H_{12}^d} \right| - 20 \log_{10} |H_t| + 10 \log_{10} \left(\frac{A_u}{A_d} \right) \quad (5)$$

$$\text{여기서 } |H_t| = \left| \frac{S_{dd}}{S_{uu}} \right|^{1/2}, H_r = e^{ks}$$



(a)

(b)

Fig.1. Schematic diagram of Simple expansion chamber muffler

음파분리이론은 근본적으로 평면파영역내에서 성립하므로 측정가능 주파수영역은 평면파의 차단 주파수이내로 해야한다. 덕트의 단면이 원형일 경우와 사각형일 경우의 평면파의 차단주파수는 다음 식과 같다.^[5]

$$\text{상한 주파수 : 원형관 : } f_h < 0.586C/d$$

$$\text{사각관 : } f_h < 0.5C/d \quad (6)$$

$$\text{하한 주파수 : } 3\lambda/4 < L - d$$

반사단으로부터 첫번째 측정위치까지의 거리가 멀어지면 측정주파수 영역내에서 음압의 node지점에 마이크로폰이 위치하게되어 측정시 오차가 증가하게될 가능성이 있으므로 근음장(nearfield)의 영향을 받지 않는 한도내에서 최대한 반사단에 가깝게 첫번째 측정위치를 선정해야 한다. 한편, 양측 측정 위치간의 거리가 반파장의 정수배가 됨으로써 음압이 최소가 되는 임계주파수는 $f=c/2s$ 에 의하여 구할 수 있으므로 이 임계주파수가 식(6)에서 구한 상한주파수보다 크게끔 s 를 선정하여야 한다. Chu^[3]는 가장 적당한 마이크로폰의 간격을 다음과 같이 제시하였다.

$$s = 0.7(c/2f_m) \quad (7)$$

여기서 f_m 은 측정하고자 하는 상한주파수이다.

2-2. 단순 팽창형 소음기의 해석

Fig.2(a)와 같은 단순 팽창형 소음기에 대해 파동방정식을 이용해서 투과손실을 구하면 다음과 같다.^[6]

$$TL = 10 \log \left(1 + \frac{1}{4} \left(m - \frac{1}{m} \right)^2 \sin^2 kl \right) \text{ dB} \quad (8)$$

여기서 m 은 팽창비(A_1/A_u)이다.

팽창관 내부에 Fig.2(b)와 같이 흡음재를 삽입하면 투과손실은 다음과 같다.

$$TL = 10 \log \left(1 + \frac{1}{4} \left(m - \frac{1}{m} \right)^2 \sin^2 kl + \frac{\alpha A_w}{A_u} \right) \text{ dB} \quad (9)$$

여기서 α 는 흡음율이고 A_w 는 흡음면적이다.

식(9)에서 앞의항은 단순 팽창형 소음기의 단면 확대형상에 따른값이고, 뒤의항은 흡음재 삽입에 따른 소음기내의 흡음력 증가에 의한 값이다.

식(8)에서 투과손실은 관의 팽창비, 소음기 길이 및 주파수 특성에 따라 좌우된다. 특히 $\sin^2 kl$ 의 값이 1일때 투과손실이 최대가 되고 0일때 투과손실도 0이 된다. 이와는 달리 식(9)에서는 $\sin^2 kl$ 의 값이 1일때 투과손실은 흡음력값이 합산됨에 따라 최대값이 증대되고, $\sin^2 kl$ 의 값이 0일때 투과손실은 흡음력에 의한 투과손실만을 가지게 된다. 즉 식(8)에서는 끝에서의 투과손실이 0이지만 식(9)에

서는 끝의 깊이를 완화시키는 역할을 한다.

3. 실험

3-1. 흡음을 측정 방법

Fig.2는 한개의 마이크로폰을 이용하는 전달함수법에 의하여 흡음을 측정하기 위한 실험장치도이다. 임피던스관은 8mm 두께의 아크릴판으로 제작하였으며, 관의 단면은 60 x 60(mm) 이고 덕트의 길이는 570mm이다. 식(6)에 의거하면 이 장치의 상한 주파수는 2830Hz 이므로 s 는 식(7)에 의하여 40mm로 하였고 L 은 133mm로 하였다. 음원으로는 pseudo random noise를 이용하였고, random 오차를 최소화하기 위하여 50회의 평균을 취하였다. 또한 각각의 측정위치에서 마이크로폰은 덕트 내의 음장을 변화시키지 않도록 관벽에 밀착시켜 측정하였다.

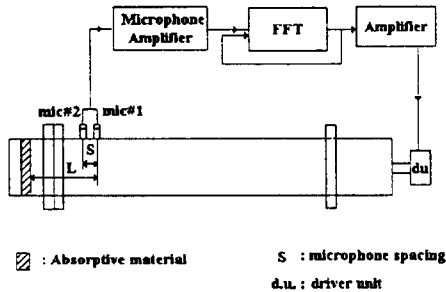


Fig.2. Schematic diagram of the experimental apparatus for absorption coefficient using transfer function method

Fig.3은 전달함수법에 의하여 얻은 결과를 검증하기 위하여 제작한 ASTM C 384 규정에 따른 정재파법의 흡음을 측정장치이다. 이 장치는 8mm 두께의 아크릴판으로 제작하였고, 관의 단면은 85 x 85(mm)이고 길이는 1100mm이다. 이 방법에서는 탐침관을 이용하여 음압의 최대 최소치를 찾아야 하므로 관의 길이에 의하여 측정가능한 하한주파수가 제한된다. 따라서 식(6)에 의거한 이 실험 장치의 상한 주파수는 2000Hz이고 하한 주파수는 251Hz가 된다. 음원으로는 측정대상 주파수의 순음을 이용하였고 탐침관을 움직여 최대 최소 음압의 위치를 찾아 3회 반복 실험하여 산술평균하였다.

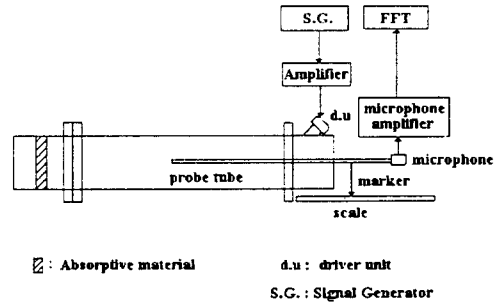


Fig.3 Schematic diagram of the experimental apparatus for absorption coefficient using probe tube method.

3-2. 투과손실 측정 방법

한개의 마이크로폰을 이용하여 소음기의 투과손실을 측정하기 위한 실험장치는 Fig.4와 같다. 입출구 연결관의 내경은 33mm이고, 팽창부의 내경은 120mm이며 길이는 305mm이다. 또한, 마이크로폰 사이의 간격은 20mm이고 반사단과 1번 마이크로폰과의 거리는 56mm로 하였다. 한편, 측정시 기여도합수를 좋게하여 오차를 줄일 수 있도록 1200mm길이의 관내에 흡음재를 충전한 후 무반사단으로 사용하였다.

식(6)에 의하면 연결관의 상한주파수는 6030Hz이고 팽창관의 상한주파수는 1660Hz이다.

음원으로는 pseudo random noise를 이용하였고 1/4" 마이크로폰(B&K 4135)을 사용하여 4개지점에서 각각의 전달함수와 파워 스펙트럼을 구하였다. 이때, 측정값은 50회의 평균을 취하였다.

투과손실의 측정은 단순 팽창형 소음기에 대한 경우와 소음기에 흡음재를 삽입한 경우에 대해서 수행하였고 흡음재의 위치는 출구측 벽면에 부착시킬때와 중앙에 위치시킬때의 두 경우에 대해서 실시하였다.

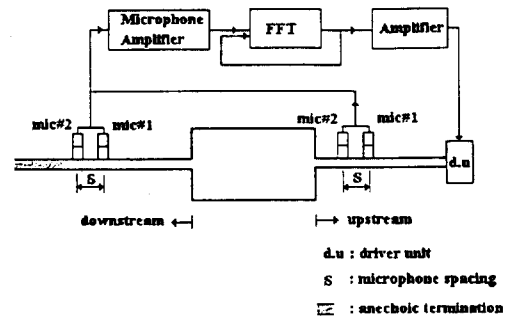


Fig.4. Schematic diagram of the experimental apparatus for the TL of absorptive materials.

4. 측정 결과

4-1. 흡음율

Fig.5는 전달함수법으로 시료의 흡음율을 측정 한 후 정재파법을 이용하여 비교측정한 결과이다. 실험대상 흡음재는 밀도가 80kg/m^3 , 두께는 33mm인 재료와 밀도가 60kg/m^3 , 두께가 15mm인 두 경우를 실험하였고, 배후 공기층을 25mm로 주었다. Fig.5의 측정결과에서 표시한 바와 같이 비교대상 주파수영역에서 전달함수법으로 측정한 결과와 정재파법으로 측정한 결과가 잘 일치하고 있음을 알 수 있다. 따라서 한개의 마이크로폰만을 이용한 전달함수 기법이 흡음율 측정방법으로서 정확함을 확인할 수 있었다. 그러나 약 300Hz이하의 저주파 영역에서는 전달함수법으로 측정한 결과가 좋지 않음을 알 수 있는데 이는 마이크로폰사이의 간격과 반사면에서부터의 거리등에 의한 영향이라고 볼 수 있다. 하지만 이러한 간격을 넓힘으로서 저주파 부분의 결과는 좋게 할 수 있으나 반대로 고주파 부분의 결과가 나쁘게 되므로 적당한 간격을 설정해야 한다.

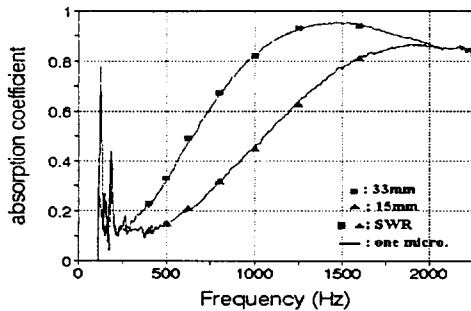


Fig.5. Comparison between the SWR method and one microphone method

Fig.6은 배후 공기층과 흡음율과의 관계를 확인 하기 위하여 Fig.5에서 사용한 33mm 두께의 동일한 흡음재를 사용하고 배후공기층의 두께만 변화 시키면서 조사한 결과이다. 측정 결과 배후공기층이 커짐에 따라 저주파에 대한 흡음특성이 좋아지고 있음을 알 수 있었고, 배후 공기층과 시료두께를 합한길이가 $\lambda/4$ 로 되는 주파수에서 입자속도가 가장 커지므로 흡음율이 최대치를 나타내고 $\lambda/2$ 를 주기로하는 주파수 대역에서 입자속도가 최소가 되어 흡음율도 최소치가 되고 있음을 확인할 수 있었다.

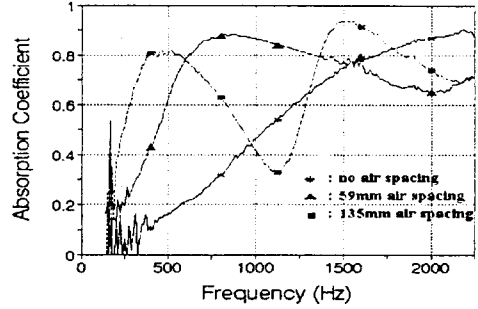


Fig.6. The effect on the absorption coefficient of the air spacing

4-2. 투과손실

(1) 단순 팽창형 소음기

Fig.7은 단순 팽창형 소음기의 투과손실에 대해 한개의 마이크로폰을 이용하는 전달함수 기법으로 측정한 결과와 식(8)의 이론을 이용하여 구한 결과를 비교한 것이다. 대체적으로 평면파영역에서는 이론값과 일치하고 있음을 확인할 수 있었으나 흡음율 측정시와 마찬가지로 저주파영역에서는 약간 오차가 발생하였다.

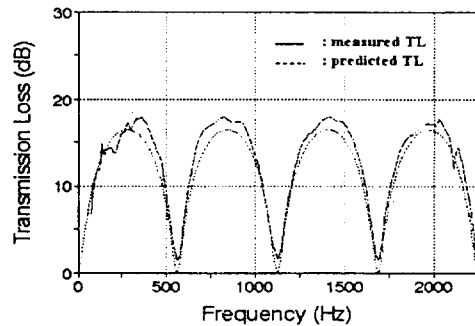


Fig.7 Comparison between the predicted TL and the measured TL of a simple expansion chamber muffler

본 실험에서 사용한 무반사단의 흡음율특성은 Fig.8과 같다.

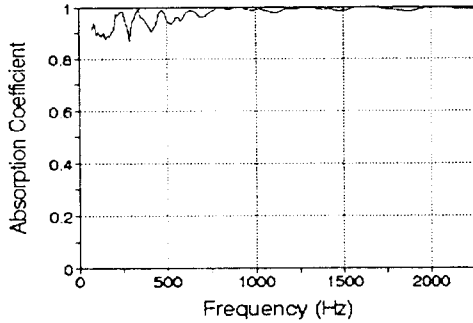


Fig.8. Absorption coefficient of the anechoic termination

(2) 흡음재를 삽입한 단순 팽창형 소음기

Fig.9과 Fig.10은 단순 팽창형 소음기의 내부에 흡음재를 삽입하고 측정된 결과를 식(9)의 이론과 비교한 것이다. ①은 흡음재를 소음기 내부로 삽입함에 따른 소산(dissipation) 효과이고 ②는 이론적인 단순 팽창형 소음기의 효과이며 ③은 Fig.6의 공기층 두께별 흡음을 측정값을 식(9)에 대입하여 구한, 즉 ①과 ②가 합산된 결과이고 ④는 실험으로 구한 값이다.

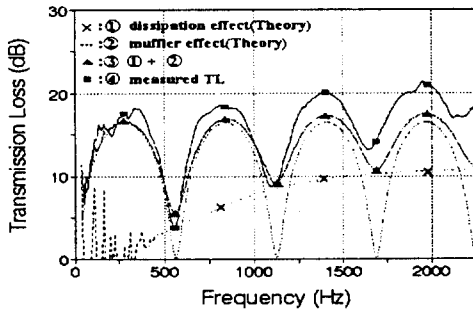


Fig.9 Transmission loss with absorptive material placed at inlet or outlet

Fig.9는 흡음재를 팽창관의 출구면에 부착했을 때의 실험 결과로서 $f=c/4L$ 의 홀수배에서는 단순 팽창형 소음기의 차단효과가 최대가 되어 흡음재가 없을 때와 동일한 거동을 하며, $f=c/4L$ 의 짝수배에서는 단순 팽창형 소음기의 차단효과가 최소가 되므로 흡음재의 음향에너지 소산효과에 의해 골의 높이가 변화되고 있음을 보여주고 있다.

Fig.10은 흡음재를 팽창관의 중앙에 위치시키고 측정된 결과로서 이론치에서 구한 흡음재의 음향에너지 소산효과와 단순 확대 소음기의 각각의 효과가 결합된 이론값이 실험으로 구한 결

과와 대체로 잘 일치되고 있음을 보여주고 있다.

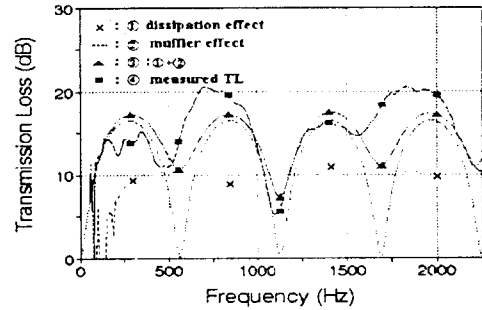


Fig.10. Transmission loss with absorptive material placed at the center

5. 결론

한개의 마이크로폰법에 의해 측정된 결과와 정재파법에 의해 측정된 결과가 잘 일치하였다. 또한, 이 방법을 이용하여 흡음재를 삽입한 단순 팽창형 소음기의 투과손실을 측정된 결과 이론과 잘 일치하였다.

따라서 한개의 마이크로폰만을 사용해서 간단하게 관내 음향특성의 파악이나 소음기의 성능을 시험할 수 있음을 확인하였다.

참고 문헌

1. A.F.Seybert and D.F.Ross, "Experimental determination of acoustic properties using a two-microphone random-excitation technique", J. Acoust. Soc. Am. 61, 1362-1370 (1977)
2. 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(3), 907-921 (1980)
3. W.T.Chu, "Transfer function technique for impedance and absorption measurements in an impedance tube using a single microphone", J. Acoust. Soc. Am. 80(2), 555-560 (1986)
4. ASTM C 384, "Standard Test Method for Impedance and Absorption of Acoustic Materials by the Impedance Tube Method"
5. ASTM E 1050, "Standard Test Method for Impedance and Absorption of Acoustic Materials using a Tube, Two microphones and a Digital Frequency Analysis System"
6. Dolald E. Baxa, 1982 "Noise Control in Internal Combustion Engines", John Wiley & Sons