

# 공기층을 갖는 실제덕트 구조물에서의 소음저감에 관한 연구

김찬목\* · 이두호\* · 방극호\*\*

## A study on the noise reduction of practical duct system with the air cavity

Chan-Mook Kim · Doo-Ho Lee · Keuk-Ho Bahng

### ABSTRACT

In this paper, experimental methods to find acoustic characteristics of acoustically treated air-conditioning duct system are proposed. Existing methods to analyze acoustic properties of duct with absorbent material have a dilemma which has to assume the wave in duct to be a plane wave. Under this assumption, applicable frequency limitation makes accurate analysis of practical air-conditioning system impossible. In order to analyze the properties of in-lined treated absorbent with high degree of accuracy, in this experiments the range of exciting frequency of sound source is broadband, which means that source speaker excites higher mode of in-duct sound field. Also, to define the relations of air cavity to the acoustic characteristics, acoustic experiments on ducts with air cavity of different depth are operated.

In conclusion, air-cavity makes the absorbing ability of duct improved in low frequency range. Due to the interactions between the air cavity depth and the depth of absorbents, according to depth of cavity, the magnitude of absorption coefficients vs frequencies in specific range is changed. In lower frequency range, the absorption of sound energy by air cavity is more dominant than by absorbent itself, in higher range, the inversion is true.

### 1. 서 론

덕트 내의 유동에 의해 발생하는 소음을 저감시키기 위해 여러 방법이 제안되고 있으나, 고전적이기는 하나, 널리 사용되고 있는 방법이 흡음재를 이용하는 방법이다. 흡음재의 음향학적 특성을 규명하기 위하여 여러 가지 방법이 제안되어 왔다.

왔다. 특히, 일정한 직경을 갖는 임피던스 튜브를 이용한 정상파비 방법과 두 개의 마이크로폰을 이용하여 두 마이크로폰에서 채집된 신호의 자기 스펙트럼과 상호 스펙트럼을 이용하여 음파를 입사파와 반사파로 분해하여 음향특성을 분석하는 방법 등이 널리 사용되어 왔다. 그러나, 상기 방법들은 수직입사와 1차원 평면파 조건이므로, 1차원 해석을 적용할 수 있는 주파수 범위가 매우 제한적이고, 덕트의 크기가 한정되어야 한다. 자동차 머

\* 국민대학교 자동차공학 전문대학원

\*\* 대림대학 건축설비과

플러등과 같이 출구, 입구부분의 단면적이 평면과 조건을 만족시킬 수 있을 만큼 충분히 작은 경우에는 유효하나, 공조설비 덕트 구조물과 같이 출구와 입구의 단면적이 비교적 큰 구조물의 경우 적용할 수 있는 주파수 범위가 낮아질 수밖에 없고, 이러한 경우 평면과 조건을 만족하는 주파수 범위는 수백 Hz에 지나지 않는다. 실제로 공조설비의 소음은 팬소음 등의 영향으로 진 주파수 범위에 걸쳐 있기 때문에 1차원 평면과 해석에 의한 방법은 공조설비 덕트 시스템에 적용하기에는 다소 무리가 있다고 판단되고, 또한 공조 설비에 사용되는 흡음덕트의 흡음재 부착 방법은 입사파에 대해서 평행한 방향인 덕트 벽면에 부착되고 있다. 따라서, 기 적용된 1차원 평면과조건 하에서 구하여진 값들은 실제 계의 값들과는 차이가 있을 것으로 판단된다. 따라서, 실제 크기의 덕트와 입사파에 대해서 평행한 상태로 부착된 흡음재의 흡음 특성을 만족시키는 새로운 실험 방법의 제안이 필요하다고 생각되어 덕트내의 음에너지 분포를 고려하여 흡음재 미 부착시를 입사파로, 흡음재 부착시를 투과파로하고, 일정 간격으로 3~5개의 마이크로폰을 장착하여 삽입손실과 흡음성능 등의 음향학적 특성을 구하는 실험적 방법을 제안하고자 한다. 또한, 저주파 대역의 흡음성능을 향상시키기 위해 덕트 벽면과 흡음재 사이에 공기층을 둔 경우 흡음재의 재질과 밀도, 두께에 따른 영향과 공기층 두께 변화에 따른 효과를 고찰하고 흡음형 소음기 설계를 위한 자료를 제공하고자 한다.

## 2. 실험장치의 구성

본 논문의 실험에 사용된 덕트 시스템은 대형 건축물 공조 시스템에서 일반 사용자에게 노출되어 민감한 소음문제를 유발하는 공조 시스템의 말단부 치수에 해당한다.

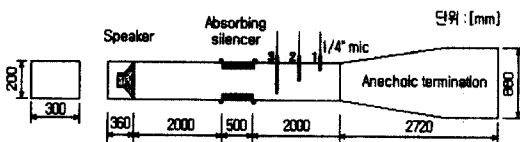


Fig.1 Dimension of duct system

## 2.1 지지대 설치

Fig.1에서 볼 수 있듯이 총 길이가 8m에 해당하고, 덕트를 구성하는 합석의 두께가 1mm이다. 이는 소음원에 의한 구조소음의 발생이 문제가 될 수 있음을 암시하고, 실제 스피커에 의한 가진시 상당한 진폭을 갖고 덕트 표면이 진동하여 구조진동으로 인한 소음이 덕트 내의 스피커의 입사음과 연성하여 정확한 흡음재의 음향특성 분석이 어려워진다. 그래서, 덕트 벽면에 충분한 질량효과를 부과하여 완전 강체로 이상화하기 위하여 고무판을 사면에 부착하였다. 또, 구조진동에 의한 소음을 최소화하기 위해 시스템 전체의 진동형 분석을 실시하였다. 스팅어(stinger)가 장착된 가진기와 단축 가속도계를 길이 방향에 수직하게 부착하여 문제의 소지가 있는 덕트의 굽힘 진동형을 분석하였다. 진동형 분석 후 최대 진폭이 나타나는 반절점(anti-node)에 지지대를 설치하였다.

## 2.2 무향단(anechoic chamber)

본 실험은 실제 공조계의 음향특성 분석이 목적이므로 무향덕트의 가정을 충족하여야 한다. 이와 같은 가정을 위해 ISO 7235 규정에 따라 무향단을 설치하였다.

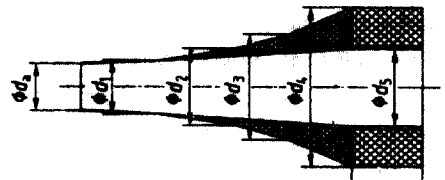


Fig.2 Anechoic chamber

실험에 사용된 무향단 내부는 지수함수의 변화를 갖고 일단 입사된 음이 다시 덕트 내부로의 반사를 막는 형태이어야 하나, 이는 제작상의 난관이 따른다. 그리하여 무향단의 성능시험이 필요하게 되고 그 기준은 각 주파수 대역별 반사계수로 정해진다. 본 실험에 사용된 무향단은 이 기준을 충족하여 무향단을 통과한 음의 반사는 무시해도 좋았다.

## 2.3 소음원 및 측정장치

본 실험에서 사용된 음원발생 장치로는 고주파음 발생장치인 트위터(tweeter)와 저주파음 방사를 위한 우퍼(woofer)가 일체형인 원형 스피커(speaker)

를 사용하였다. 이 때, 스피커 특성곡선을 고려하여 관심주파수 영역에서 주파수별 음압차가 10 dB 가 넘지 않도록 주파수 대역을 선정해야 하는데, 본 실험은 위와 같은 사항을 염두하며 250 Hz~4 kHz의 대역에서 수행되었다.

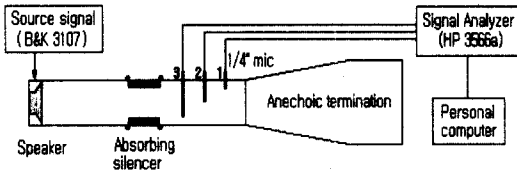


Fig.2 Block Diagram of Experiment Set-up

가진 신호는 랜덤신호(Random signal)를 이용하였는데, 신호발생기로 B&K 3170 장치를 이용하여 덕트 끝단의 음원실에 설치된 스피커로 전송하였다. 또, 스피커 자체 진동에 의한 구조소음을 최소화하기 위해 스피커 주변을 절연체로 감싸, 음원을 덕트와 고립(isolation)시켰다. 음압신호 채집을 위해 1/4" ICP 타입의 마이크로폰을 이용하였다. 서론에서 언급한 바와 같이 본 실험은 평면파 발생 주파수 영역으로 제한된 것이 아니라, 실제 공조계의 주파수 영역에 대한 실험으로 고주파 영역에서의 음의 고차모드도 고려해야 하는데, 기존의 덕트 표면에만 마이크로폰을 체결하는 방식으로는 정확한 결과 값을 유추할 수 없었다.

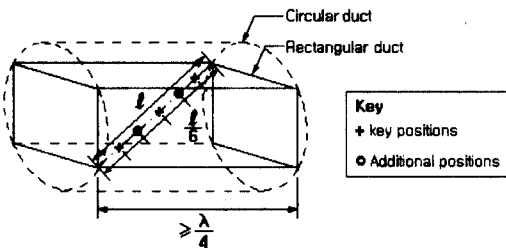


Fig.3 Microphone Positions

그러므로, 본 실험에서는 고차모드에서의 흡음재의 물성치를 측정하기 위해 Fig.3 과 같이 ISO 7235 규정에 따라 무향단과 시편사이에 3지점을 선정하였다. 마이크로폰(Microphone) 사이의 간격은 최저관심주파수의 1/4파장 길이로 하였다. 마이크로폰(Microphone)간의 음압차가 최고 10dB를 초과할 경우에는 3개의 마이크로폰사이에 2개를 더

추가하도록 되어 있으나 본 실험에서는 3개의 마이크로폰으로도 충분한 것을 확인하였다.

각 마이크로폰에서 측정된 신호는 HP 3566a 신호 분석기로 전송되어 처리된다.

### 2.4 흡음재의 선정

일반적으로 건축설비에서 많이 사용되는 흡음재를 선택하였다. 먼저, 고가의 흡음재인 폴리우레탄 폼(Polyurethane Foam)계열의 흡음재와 저가의 범용 단열재인 유리섬유(Glass wool)를 밀도별로 3 종류 선택하고, 각 종류별로 두께를 5mm부터 30mm 까지 5mm간격으로 증가시켜 실험을 하였다.

Table.1 Properties of Test Specimens

종류	유리섬유 (Glass wool)			폴리우레탄 폼 (Polyurethane Foam)		
	A	B	C	A(White)	B(IR)	C(RA)
밀도 (kg/m <sup>3</sup> )	24	40	48	15.8	26.4	38.0

또, 흡음재와 덕트면 사이에 공기층(Air gap)을 두어 배후 공기층의 영향에 따른 흡음재의 음향특성 변화를 관찰하기 위한 시험도 실시하였다. 공기층의 두께는 25, 50, 100 mm이며, 흡음재의 종류는 이전의 시험과 같다.

## 3. 실험

스피커의 주파수 성능특성을 고려한 주파수 영역의 랜덤신호는 신호발생기에서 전송되며 시편이 부착된 시험덕트(Test duct)를 통과한 음압신호는 3개의 마이크로폰에 의하여 채집되게 된다. 이때, 신호분석기는 각 마이크로폰의 신호를 100회 평균하여 안정된 신호를 얻으려 했으며, 이와 같은 실험을 하나의 흡음재에 대해 3회 실시, 평균하였다. 덕트의 흡음재 부착에 따른 기본적인 흡음 성능평가 지표인 삽입손실(Insertion loss)이 먼저 구해졌다. 삽입손실은 식 (1)과 같은 관계에 의해 평가된다.

$$D = L_{w2} - L_{w1} \quad (1)$$

위의 관계식에 볼 수 있듯이 삽입손실이라 함은 흡음재의 유,무에 따른 음향파워 레벨의 차가 된다. 삽입손실의 정의에 따라, 먼저, 흡음재가 부착

되지 않은 덕트 내부에서의 음향파위 레벨이 측정되어 이를 기준값으로 하고 종류별 흡음재 부착에 따른 음향파위 레벨과의 차를 구해 주파수별 삽입 손실을 구하였다.

두 번째 실험은 흡음재의 주파수별 흡음계수(Absorption coefficient) 산출이었다. 흡음계수는 정의에 다음과 같은 관계를 갖는다.

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

여기서,  $R$ 은 반사계수이며 식 (3)과 같이 정의할 수 있다.

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

여기서,  $S_{AA}(f)$ ,  $S_{BB}(f)$  는 덕트 내에서 측정된 입사파와 반사파의 시간영역상의 신호를 푸리에 변환(Fourier transform)한 주파수 영역상의 음압 신호이다. 그러나, 이와 같은 관계를 이용하기 위해서는 측정된 음압신호에 대한 음파분리(Signal decomposition) 이론이 적용되어야 하는데 음파분리 이론은 평면파 조건이라는 가정 하에 정의된 이론으로 본 실험에서 사용하는데 난관이 있었다.

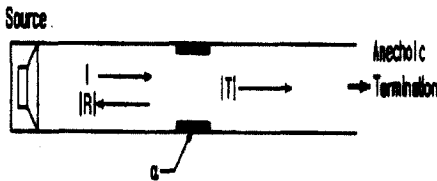


Fig.4 Sound field in the duct

Fig.4에서 알 수 있듯이 음향특성 파악이 요구되는 미지의 계(Unknown system)인 시험덕트를 중심으로 전 덕트(Pre-duct)에는 반사파가, 후 덕트(Post-duct)에는 투과파가 존재하게 되며, 일부의 음에너지가 흡음재에 흡수되게 된다. 음원에서 방사되는 총 에너지를 1(unity)로 보는 경우 다음과 같은 관계로 Fig.4를 정리할 수 있겠다.

$$1 = |R|^2 + \alpha + |T|^2 \quad (4)$$

그런데, 전 덕트에 존재하게 되는 반사파는 덕트 단면적에 대한 흡음재의 면적비중과 덕트 면에 거칠기를 고려해 볼 때, 무시해도 좋을 정도로 작으며, 실험을 통해 250 Hz이상의 주파수 영역에서는 전음향에너지(Total sound power)에 그 영향이 약 3%이하였다. 이와 같은 사실을 토대로 식 (4)는 다음과 같다.

$$\alpha = 1 - |T|^2 \quad (5)$$

흡음계수를 산출하기 위하여, 먼저, 흡음재를 부착하지 않은 상태에서의 음압을 측정하였다. 이때, 측정된 음압은 입사음에 해당하며, 기준값으로 이용되었다. 다음에는 흡음재 부착 후의 음압이 측정되는데, 이 음압이 투과음압이 되어 흡음계수가 구해진다.

공기층 영향을 검토하기 위하여, 3 종류의 공기층을 갖는 시험덕트를 제작하였다. 이때, 공기층 유무의 영향을 비교하기 위해, 이전의 시험과 동일한 유로면적을 확보하였다. 또, 흡음재의 마감을 위해 다공판을 이용하였는데, 다공판의 개공율은 흡음에 중요한 영향을 미치는데, 일반적으로 30%의 개공율은 완전 개방과 같은 음의 투과를 허용하므로, 이를 염두하며 마감재를 선택하였다. 공기층 시험도 이전의 시험과 동일한 방법과 이론을 이용하여 주파수별 음향성능을 분석하였다.

#### 4. 실험결과 및 고찰

현장에서 범용으로 사용되고 있는 흡음재의 종류별, 두께별 실험이 이루어 졌으며, 저주파 흡음성능 향상을 위한 공기층(air cavity)의 두께별 영향을 검토하였다.

##### 4.1 글라스 울 (Glass wool)

Fig.5~7을 보면 공기층 두께가 25 mm인 경우 글라스 울의 흡음률은 밀도와 두께에 관계없이 흡음재의 덕트표면밀착시 보다 흡음효과가 떨어진다. 이는 흡음재 밀도가 증가할수록 흡음성능이 저감되는 것으로 보아 흡음재와 덕트 표면의 공간에서 공명현상을 일으켜 흡음성능이 감소되는 것으로 판단되며, 두께가 증가하면 글라스 울 자체에서 흡음되는 에너지량이 커지기 때문에 이러한 현상은 사라지는 것을 알 수 있었다. 또, 공기층 두께가

50 mm인 경우가 25 mm인 경우보다 대략 1.5 kHz 이하의 영역에서는 흡음특성이 향상되지만 덕트 표면 밀착 시와 비교하면 거의 같거나 약간 낮은 흡음특성이 나타남을 알 수 있었다.

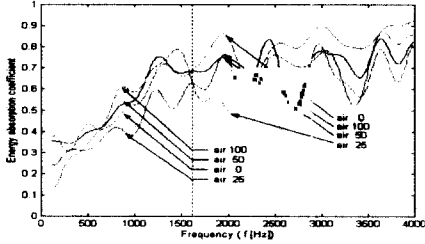


Fig.5 absorption coefficient vs frequency (glass wool, density: 24k, thickness 10 mm)

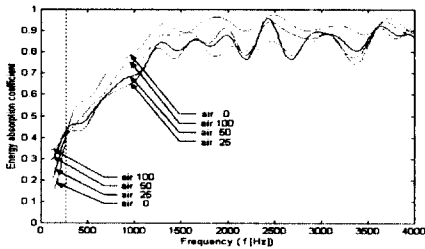


Fig.6 absorption coefficient vs frequency (glass wool, density: 24k, thickness 30 mm)

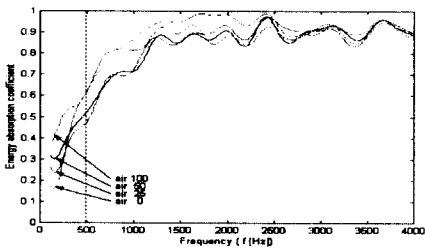


Fig.7 absorption coefficient vs frequency (glass wool, density: 48k, thickness 30 mm)

이 주파수 영역에서 100 mm 공기층의 경우에는 공기층과 글라스 울에 의한 흡음효과는 덕트표면 밀착시보다 크게 나타나는데, 이와 같은 결과로부터 공기층의 두께증가는 저주파 소음저감 성능 향상에 큰 영향을 갖고있음을 알 수 있다.

또, 공기층을 갖는 시험덕트는 단순 확장관의 형

태를 갖는데, 이미 정형화 되어있는 단순 확장관의 공명주파수와 파장과의 관계를 고려하면서, Fig. 8을 보면 약 340 Hz의 주기를 갖고 흡음성능의 최대점이 나타나고 있음을 알 수 있다. 이는 공기층의 두께가 음의 파장의 1/4의 홀수 배인 공명주파수에 해당되기 때문으로 생각된다.

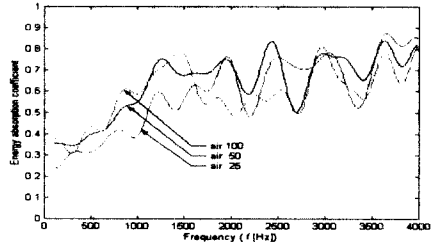


Fig.8 absorption coefficient vs frequency (glass wool, density: 24k, thickness 10 mm)

#### 4.2 폴리우레탄 (Poly Urethane)

Fig.9와 10은 폴리우레탄의 대표적인 시험결과를 나타낸 것이다.

흡음재를 덕트표면 밀착시와 공기층을 두었을 경우를 비교해 보면, 흡음재 두께를 증가시킬 때, 흡음재 두께가 얇은 경우에는 공기층의 영향으로 두 1.7 kHz이하의 주파수 영역에서는 공기층을 갖는 경우가 흡음특성이 우수함을 알 수 있으나, 흡음재의 두께를 증가시킬수록 공기층의 영향은 두드러지지 않아 흡음성능 향상에 기여하는 바가 작았고, 공기층의 효과를 보이는 주파수 영역도 저주파쪽으로 하향변화 되고있음을 알 수 있다.

또, 공기층의 두께를 증가하면 1.6 kHz 이하의 영역에서는 흡음 효과가 좋으나 1.6 kHz~2.7 kHz의 특정 구간에서 흡음효과가 떨어지며 흡음재 두께가 두꺼워 질수록 공기층 변화에 대한 흡음효과가 감소함을 알 수 있다.

고주파영역에서 흡음재의 두께가 10mm와 15mm인 얇은 흡음재를 갖는 경우 비교적 얇은 공기층을 둔 경우가 공기층을 갖지 않는 경우에 비하여 흡음효과가 감소되는데, 이는 고주파영역에서 덕트내의 음과 배후 공기층과의 공명현상으로 인해 흡음효과가 떨어지는 것으로 생각되며, 흡음재의 두께가 증가하면 이러한 현상은 사라지게 된다.

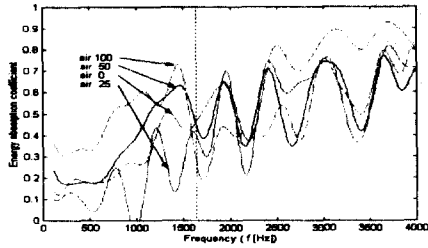


Fig.9 absorption coefficient vs frequency  
(poly-urethane, density: 15k, thickness 10 mm)

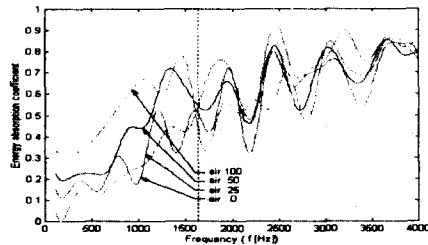


Fig.10 absorption coefficient vs frequency  
(poly-urethane, density: 15k, thickness 15 mm)

## 5. 결론

실제 공조계의 소음저감을 위한 설계방안을 제시하기 위하여 덕트와 평행하게 부착된 흡음재에 대하여 실험을 실시하였다. 그 결과 흡음재의 주파수별 흡음율에 대하여 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다.

1. 저주파영역에서 공기층의 영향이 두드러지나, 흡음재 별로 일정 주파수를 넘어 고주파 영역으로 갈수록 공기층의 효과보다는 흡음재 자체의 흡음 효과가 더 우수하다.
2. 동일 밀도의 흡음재에서 두께가 증가할수록 저주파 영역에서의 공기층의 효과는 감소한다.
3. 전 주파수 영역에 걸쳐 흡음재의 종류와 관계없이 공기층의 두께가 얇은 경우, 오히려 공기층이 없는 경우보다 흡음성능이 떨어진다.
4. 공기층을 갖는 덕트는 팽창형 소음기 효과에 의해 주파수 별 최대흡음과 최소흡음이 일정한 주기를 갖고 나타난다.

## 6. 참고문헌

[1] 木村翔, “건축음향과 소음방지계획” 國社刊, 1993, pp. 139~172.

[2] Lawrence E. Kinsler, 1982, Fundamentals of Acoustics, John Wiley & Sons, pp98 ~ pp162

[3] ISO 7235, 1991, Acoustics-Measurement procedures for ducted, silencers Insertion loss, flow noise and pressure loss, International Organization for Standardization

[4] M. L. Munjal, 1987, Acoustics of Ducts and Mufflers, John Wiley & Sons, pp55~pp5

[5]ASTME 1050 - 90, 1990, Standard Test Method for Impedance and Absorption of Acoustical Microphone, and a Digital Frequency Analysis System, American Society of Testing and Materials.

[6] A. F. Seybert, D. F. Ross.1997,“Experimental Determination of Acoustical Properties Using a Two Microphone Random-Excitation Technique”, J. Acoust. Soc. Am., Vol.61, pp1362~pp1370

[7] “흡음덕트에 의한 팬소음의 저주파역 저감”, 일본기계학회논문집(B편), 60권, 580호, pp. 141~146.

[8] 西林正治의 4인. “내장덕트의 감음량에 관한 연구”, vol. 15. No.3, 1978-5, pp.297~309.