

공동주택 화장실 층간 소음 저감기 개발 Development of silencer for apartment floor between bathroom noise

김영수† · 이재국* · 김창열*

Young-Su Kim, Jae-Kuck Lee and Chang-Yeol Kim

Key Words : Reactive Type Silencer(반사형 소음기), Transfer Matrix Method(전달행렬법), Air Duct(에어덕트), Insertion Loss(삽입손실), Transmission Loss(투과손실), Housing Performance Grade Indication System(성능등급표시제도), Quadropole Parameter(4 단자 정수법)

ABSTRACT

공동주택에서의 음환경 성능은 실내환경의 질과 연관시켜 설계단계부터 충분한 검토가 필요한 성능항목이다. '국토해양부'는 '공동주택 성능등급 표시제도'에서 Air Duct를 통해 상하층간 전파되는 소음을 제어하기 위한 대책을 요구하고 있다. 이에 화장실에 적합한 구조 및 재질로 소음 저감기를 개발하고, 소음기 성능평가 장치를 구성하여 이론과 비교평가하고, 실제 현장에 설치 시 적용효과를 분석하였다.

———— 기호설명 ————

- L_{P1} : 소음기 설치 전 수음실의 음압레벨, dB
- L_{P2} : 소음기 설치 후 수음실의 음압레벨, dB
- L_{W1} : 소음기 입구의 음향파위레벨, dB
- L_{W2} : 소음기 출구의 음향파위레벨, dB
- ΔP : 정압손실 (Pressure Drop), mmAq
- k : 파수 (Wave Number)
- L : 팽창관 길이

1. 서론

환경요소 중에서 심리적인 건강이나 문화적 생활에 직접 영향을 미치는 것 중의 하나가 음 환경이라 할 수 있다. 공동주택에서의 음 환경 성능은 비록 눈에 보이지는 않지만 거주자의 쾌적성에 중요한 인자로서 작용한다. 이와 같이 음 환경은 심리적 건강과 프라이버시 확보에 밀접한 관계가 있는 성능항목으로서 그 중요성을 간과해서는 안되며, 실내환경의 질과 연관시켜 설계단계부터 충분한 검토가 필요한 성능항목이다.

2006년 국토해양부(구 건설교통부)에서 '공동주택 성능등급 표시제도'에서 음 환경 중 화장실 소음으로 Air Duct를 통한 소음제어의 필요성을 언급하였다. 화장실의 악취를 배기할 수 있도록 Air Duct가 설치되고 있는데 이들 Air Duct 공간이 상

하층간에 직접 연결되어 있어 화장실에서의 말소리나 위생기구 사용 음, 소변 등의 행위 음 등 발생한 소음이 인접한 층에 직접 전달되는 문제를 안고 있다. 따라서 상하층간에 직통하는 공간을 통한 소음 문제를 줄여주기 위해서는 전달경로상의 대책 수립이 필요하다.

화장실 통풍구를 통한 소음의 전달은 그 동안 구조적으로 발생할 수 밖에 없었음에도 불구하고, 화장실 통풍구에 설치되는 환풍기의 효율이나 습기에 대한 내구성 등의 문제로 흡음재 등의 사용에 제한을 받아왔다.

본 연구개발은 화장실 송풍기의 효율에 영향을 주지 않으며, 습기로 인한 성능저하가 없는 반사형 소음기를 개발함에 목적이 있다.

2. 개발 목표

2.1 소음기 설계 시 고려사항

소음기를 설계함에 있어 다음사항을 고려하였다.

- ① 화장실에 설치되는 배기 송풍기의 성능이 저하되지 않도록 소음기 설치에 의한 정압손실이 1mmAq 이하이어야 한다.
- ② 화장실 내에서 발생하는 수분에 부식되거나, 소음저감 성능에 저하가 없는 구조 및 재료이어야 한다.
- ③ 화장실에서 발생하는 소음은 랜덤(Random)한 소음으로 광대역 소음에 저감효과가 있어야 한다.

2.2 설계 목표치

본 제품개발은 <그림 1>과 <그림 2>에서 나타낸바와 같이 Air Duct를 통해 전파되는 공기전달음을

† 현대산업개발 기술연구소

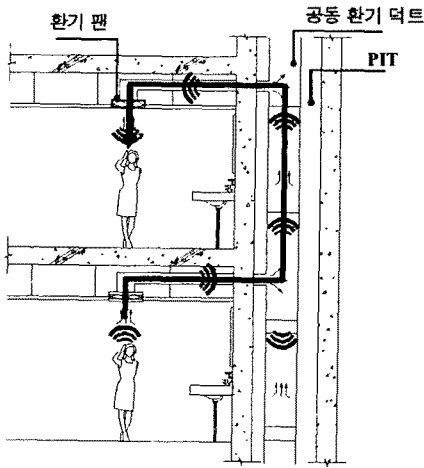
E-mail : tkfdgoqnseh@hanmail.net

Tel : 031-766-8595, Fax : 031-766-8598

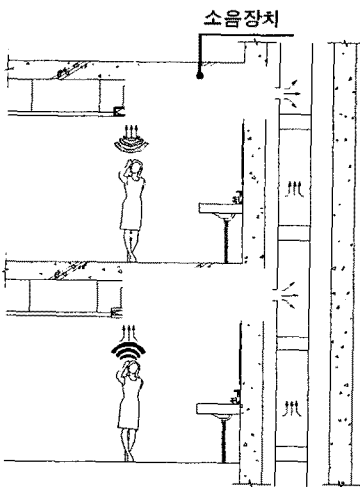
· 유노빅스이엔씨㈜ 기술연구소

감소시키는 것이 목적으로써 급배수 소음에 의한 고체전달음을 목적으로 하는 것이 아니다. 국토해양부의 '화장실 소음 차단성능 등급표시기준'에서 배기용 AD(Air Duct)를 통한 상하층간 소음전달 방지 대책의 수립만을 요구하고 있고, 필요한 저감량은 언급되어 있지 않다. 이는 화장실 구조 및 송풍기 위치, 덕트의 종류에 따라 차이가 크고, 소음발생량이 랜덤하기 때문에 필요감음량을 산정하지 않은 것으로 사료된다.

본 개발에서는 광대역 소음 저감에 목적으로 두어, 1/1 Octave Band 별 평균치로 10 dB(A) 저감하는 것으로 목표로 하였고, 정압손실은 1.0 mmAq 이하를 목적으로 소음기를 설계하였다.



<그림 1> 소음 전파 경로



<그림 2> 소음기 설치 위치

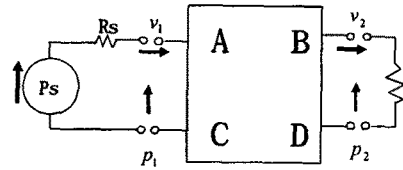
3. 관련 이론

3.1 임피던스법에 의한 소음기 해석

전기회로에 전압을 가하여 전류를 흐르게 하기 위해서는 2 개의 단자가 필요하듯 음향회로에 음압을 가하여 체적속도 또는 질량 속도를 유발하기 위해서는 1 개의 면이 필요하다. 음향회로의 입구 및 출구에 면이 있을 때 그 등가회로는 4 개의 단자를 지닌 회로가 요망되는 바 이런 회로를 4 단자 회로라 하며 4 개의 단자 회로에서 입구 및 출구의 음압과 질량속도를 P_1, V_1 과 P_2, V_2 라 할 때 아래 식으로 표현이 가능하고, 여기서

$$\begin{bmatrix} A & B \\ C & D \end{bmatrix}$$

를 요소의 전달행렬이라 하며 각 요소별 전달행렬은 다음과 같이 구한다.



$$\begin{bmatrix} P_1 \\ V_1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} A & B \\ C & D \end{bmatrix} \begin{bmatrix} P_2 \\ V_2 \end{bmatrix}$$

$$A = \left(\frac{P_1}{P_2} \right) V_2 : \text{개방 전달 계수}$$

$$B = \left(\frac{P_1}{V_1} \right) P_2 : \text{단락 전달 임피던스}$$

$$C = \left(\frac{V_1}{P_2} \right) V_2 : \text{개방 전달 어드미턴스}$$

$$D = \left(\frac{V_1}{V_2} \right) P_2 : \text{단락 전달 계수}$$

$$\begin{bmatrix} P_1 \\ V_1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos kL & j \frac{\rho C}{S} \sin kL \\ j \frac{\rho C}{S} \sin kL & \cos kL \end{bmatrix} \begin{bmatrix} P_2 \\ V_2 \end{bmatrix}$$

3.2 소음기 저감량 표시 방법

소음기 설치에 의한 저감량은 표시하는 방법은 크게 삽입손실과 투과손실로 나타낼 수 있다.

(1) 삽입손실 (IL, Insertion Loss)

삽입손실은 소음기 설치 전과 후의 수음점에서의 음압레벨차로 정의된다.

$$IL = L_{p1} - L_{p2}$$

삽입손실은 측정이 용이하고, 실제 소음저감량을 의미하기 때문에 현장에서 많이 사용되고 있으나, 수음점의 위치에 따라 저감량이 변화하는 단점이 있다.

(2) 투과손실 (TL, Transmission Loss)

투과손실은 소음기 입구와 출구의 음향과위 레벨차로 정의 된다.

$$TL = L_{w1} - L_{w2}$$

투과손실은 소음 저감의 음향학적 특성을 정확히 알 수 있기 때문에 소음기 단품의 성능을 표시하거나, 소음기를 설계할 때 적합하다.

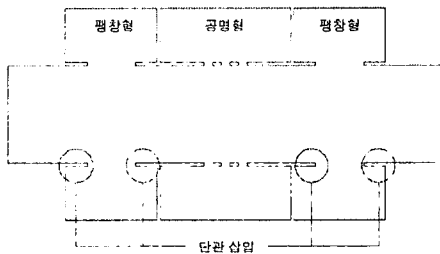
본 연구에서는 소음기 설계는 투과손실(TL)로 하고, 성능평가는 삽입손실(IL)로 측정하였다.

4. 소음기 설계

4.1 구조설계

화장실은 습기가 많아 섬유질 및 다공질 흡음재를 사용할 수 없다. 또한 소음기에 의한 정압손실이 크면, 환기 송풍기의 성능이 크게 저하하므로 정압손실이 최소화되는 구조이어야 한다. 이러한 점을 고려하여 단면 팽창에 의한 반사효과와 Helmholtz 에 의한 공명효과를 이용하는 반사형 소음기를 설계하였다. 아래 그림과 같이 감음량을 충분히 크게 하고, 감음주파수 범위를 늘리기 위해 다단팽창형 및 공명형을 조합한 구조로 설계하였으며, 정압손실을 최소화하기 위해 유동속도가 증가되지 않도록 단면적을 축소하지는 않았다.

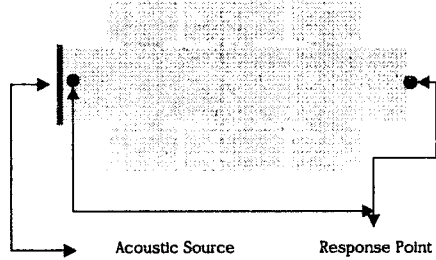
또한, 단관 삽입에 의한 효과로 감음주파수 대역을 넓히도록 하였다.



< 그림 3 > 소음기 내부 구조

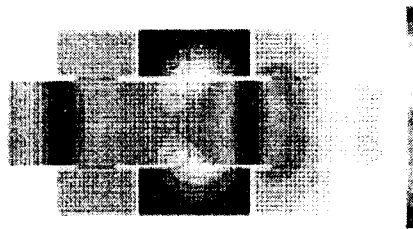
4.2 음향해석

경계요소법에 의한 상용프로그램인 SYSNOISE 5.5 를 이용하여 음향해석을 수행하였다.

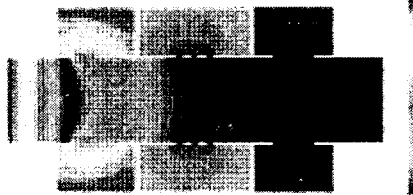


< 그림 4 > 음향 해석 Modeling

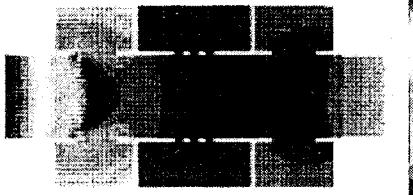
해석결과는 다음과 같다.



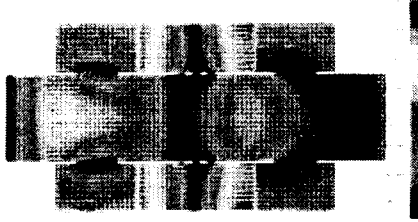
< 그림 5 > Acoustic Pressure at 500Hz



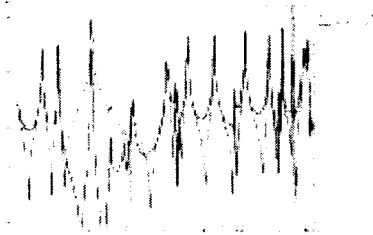
< 그림 6 > Acoustic Pressure at 800Hz



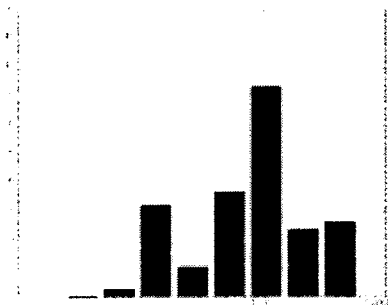
< 그림 7 > Acoustic Pressure at 1000Hz



<그림 8> Acoustic Pressure at 1500Hz



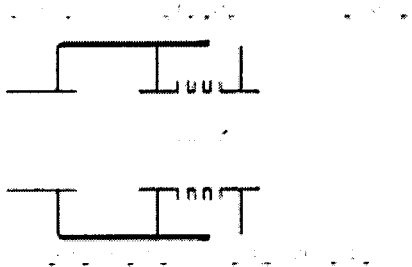
<그림 9> 해석결과 (Narrow Band)



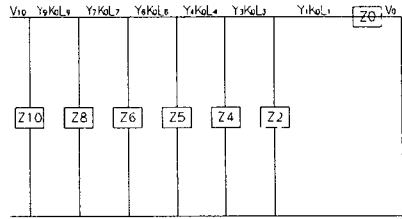
<그림 10> 해석결과 (1/1 Octave Band)

4.3 프로그래밍

최적설계를 위해 다음과 같이 변수를 지정하여 Matlab 을 이용하여 프로그래밍하였다.

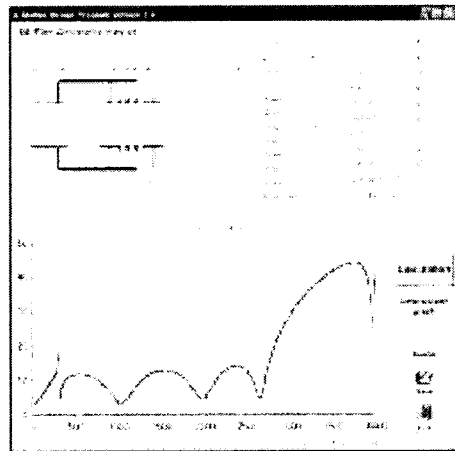


<그림 11> 소음기 각 부 설계 변수

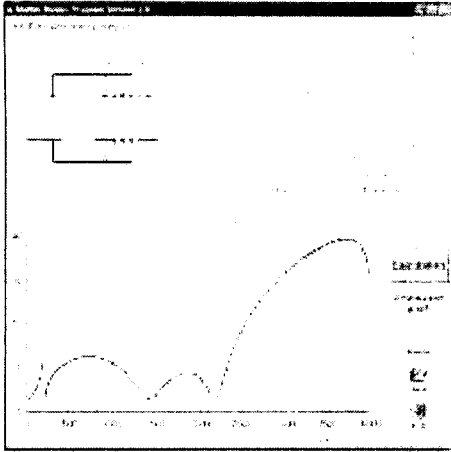


$$\begin{bmatrix} P_n \\ v_n \end{bmatrix} = [T_0][T_1][T_2][T_3][T_4][T_5][T_6][T_7][T_8][T_9][T_{10}] \begin{bmatrix} P_0 \\ v_0 \end{bmatrix}$$

$$\begin{bmatrix} P_{10} \\ v_{10} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos k_0 l_0 & -jY_0 \sin k_0 l_0 \\ \frac{j}{Y_0} \sin k_0 l_0 & \cos k_0 l_0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ \frac{1}{Z_0} & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \cos k_0 l_1 & -jY_1 \sin k_0 l_1 \\ \frac{j}{Y_1} \sin k_0 l_1 & \cos k_0 l_1 \end{bmatrix} \\ \times \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ \frac{1}{Z_1} & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \cos k_0 l_{n-1} & -jY_{n-1} \sin k_0 l_{n-1} \\ \frac{j}{Y_{n-1}} \sin k_0 l_{n-1} & \cos k_0 l_{n-1} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ \frac{1}{Z_{n-1}} & 1 \end{bmatrix} \\ \times \begin{bmatrix} \cos k_0 l_{n-1} & -jY_{n-1} \sin k_0 l_{n-1} \\ \frac{j}{Y_{n-1}} \sin k_0 l_{n-1} & \cos k_0 l_{n-1} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ \frac{1}{Z_n} & 1 \end{bmatrix} \\ \times \begin{bmatrix} \cos k_0 l_n & -jY_n \sin k_0 l_n \\ \frac{j}{Y_n} \sin k_0 l_n & \cos k_0 l_n \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ \frac{1}{Z_n} & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \cos k_0 l_n & -jY_n \sin k_0 l_n \\ \frac{j}{Y_n} \sin k_0 l_n & \cos k_0 l_n \end{bmatrix} \begin{bmatrix} P_0 \\ v_0 \end{bmatrix}$$



<그림 12> 고주파 감음용 소음기 설계



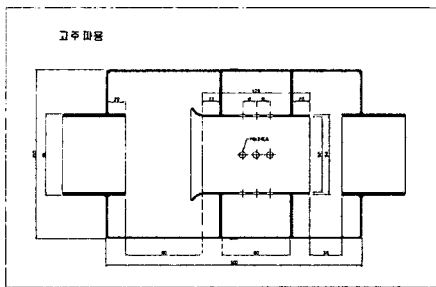
<그림 13> 저주파 감음용 소음기 설계

4.4 소음기 설계

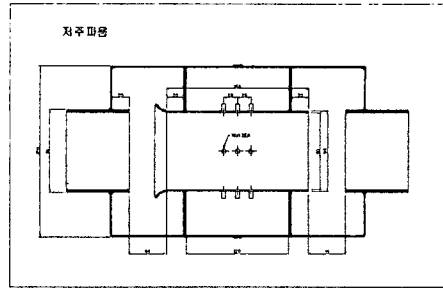
반사형 소음기는 흡음형과 달리 감음주파수 범위가 좁다는 단점이 있다. 이를 극복하고 감음주파수 범위를 넓게 하기 위해 격층으로 번갈아 감음특성이 다른 소음기를 설치하는 것을 모색하였다. 예를 들어 흡수층은 저주파 감음용 소음기를 설치하고, 작수층은 고주파 감음용 소음기를 설치하여 발생한 소음이 저주파 감음용 소음기와 고주파 감음용 소음기를 모두 거쳐 통과대역 주파수 범위를 넓게 하도록 2 가지 구조를 설치하는 방안이다.

소음기 내부 구조는 <그림 14>, <그림 15>와 같다. 저주파 감음용은 고주파와 달리 공명통을 크게 하고, 공명관 길이를 길게 하여 공명주파수를 고주파용에 비해 낮추었다.

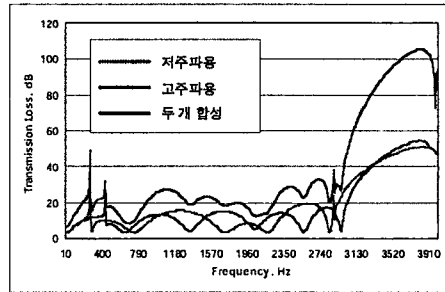
예상되는 감음량은 <그림 16>과 같다.



<그림 14> 고주파 감음용 소음기



<그림 15> 저주파 감음용 소음기

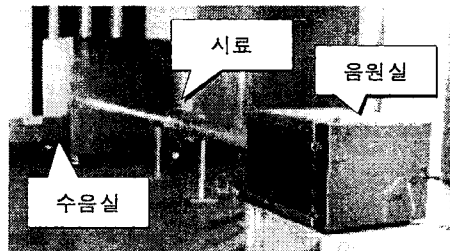


<그림 16> 투과손실 예측량

5. 소음기 성능평가

5.1 실험실에서의 성능평가

다음과 같이 삽입손실 실험장치를 구성하여 소음기 설치 전.후의 음압레벨차를 측정하였다.



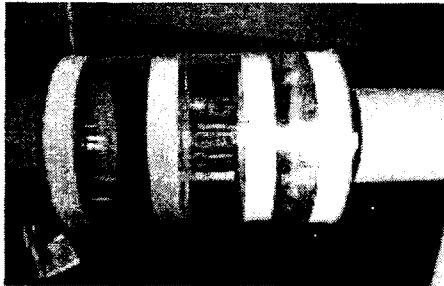
<그림 17> 실험장치 구성



<그림 18> 계측기 구성



<그림 19> 저주파용 소음기 측정장면



<그림 20> 고주파용 소음기 측정장면

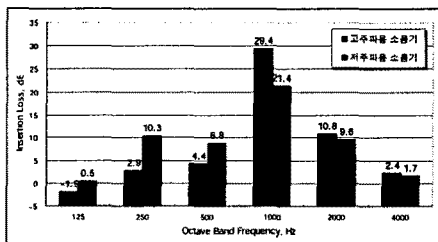
실험실에서 측정된 측정결과는 다음과 같다.

| 항목 | 1/1 Octave Band Frequency, Hz | | | | | |
|----------|-------------------------------|------|------|------|------|------|
| | 125 | 250 | 500 | 1000 | 2000 | 4000 |
| Empty | 50.2 | 51.7 | 48.9 | 49.1 | 50.8 | 52.6 |
| 고주파용 소음기 | 52.1 | 48.8 | 44.5 | 19.7 | 40.0 | 50.2 |
| 삽입손실 | -1.9 | 2.9 | 4.4 | 29.4 | 10.8 | 2.4 |

<표 1> 실험실에서 측정된 고주파용 소음기 삽입손실

| 항목 | 1/1 Octave Band Frequency, Hz | | | | | |
|----------|-------------------------------|------|------|------|------|------|
| | 125 | 250 | 500 | 1000 | 2000 | 4000 |
| Empty | 50.2 | 51.7 | 48.9 | 49.1 | 50.8 | 52.6 |
| 저주파용 소음기 | 49.7 | 41.4 | 40.1 | 27.7 | 41.2 | 50.9 |
| 삽입손실 | 0.5 | 10.3 | 8.8 | 21.4 | 9.6 | 1.7 |

<표 2> 실험실에서 측정된 저주파용 소음기 삽입손실



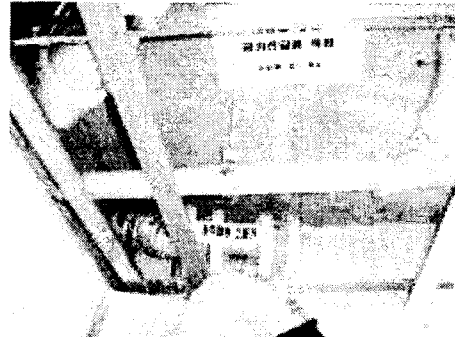
<그림 21> 소음기 삽입손실 실험실 측정결과

고주파용 소음기인 경우 125 Hz 에서는 공명에 의한 재방사음이 남아 소음이 오히려 1.9 dB 증가하였으나, 전반적으로 만족할만한 삽입손실을 얻었다.

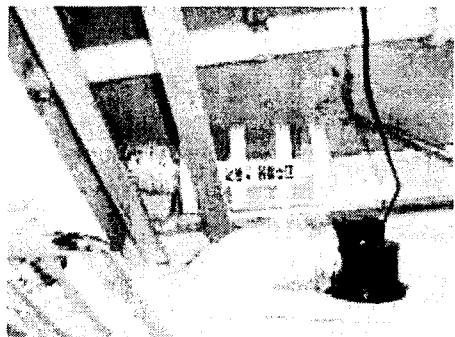
정압손실은 풍량 340 CMM, 유속 4.8 m/s 에서 0.7mmAq 로 측정되어 목표로 했던 1.0mmAq 이하를 만족하였다.

5.2 현장에서의 성능평가

현대산업개발 '하남 풍산지구' 에서 실제 소음기 설치 후 Air Duct 를 통해 전파되는 삽입손실 측정하였다. 측정결과는 다음과 같다.



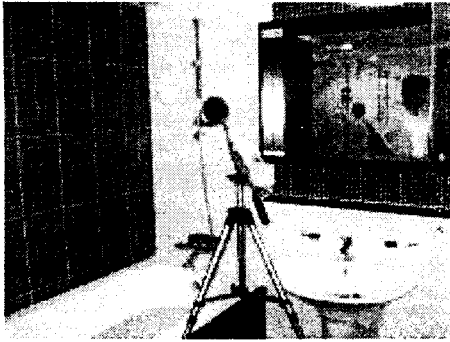
<그림 22> 저주파용 소음기 설치장면



<그림 23> 고주파용 소음기 설치장면



<그림 24> 무지향성스피커에 의한 소음 발생



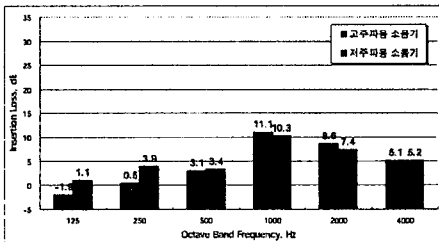
<그림 25> 수음실 Microphone 위치

| 항 목 | 1/1 Octave Band Frequency, Hz | | | | | |
|----------|-------------------------------|------|------|------|------|------|
| | 125 | 250 | 500 | 1000 | 2000 | 4000 |
| Empty | 38.1 | 49.5 | 52.7 | 56.6 | 64.5 | 56.4 |
| 고주파용 소음기 | 40.0 | 49.0 | 49.6 | 45.5 | 55.9 | 51.3 |
| 삽입손실 | -1.9 | 0.5 | 3.1 | 11.1 | 8.6 | 5.1 |

<표 3> 현장에서 측정한 고주파용 소음기 삽입손실

| 항 목 | 1/1 Octave Band Frequency, Hz | | | | | |
|----------|-------------------------------|------|------|------|------|------|
| | 125 | 250 | 500 | 1000 | 2000 | 4000 |
| Empty | 38.1 | 49.5 | 52.7 | 56.6 | 64.5 | 56.4 |
| 저주파용 소음기 | 37.0 | 45.6 | 49.3 | 46.3 | 57.1 | 51.2 |
| 삽입손실 | 1.1 | 3.9 | 3.4 | 10.3 | 7.4 | 5.2 |

<표 4> 현장에서 측정한 저주파용 소음기 삽입손실



<그림 26> 소음기 삽입손실 현장 측정결과

실험실에서 측정한 측정결과와 유사한 감음특성을 얻었으나, 1000Hz 에서의 삽입손실이 실험실과 크게 차이가 발생하였다. 이는 화장실의 Room Mode 에 의한 공명주파수에 의한 것으로 사료된다.

6. 결 론

공동주택 음환경 개선의 일환으로 Air Duct 를 통해 층간으로 전파되는 공기전달음을 감소시키기 위한 방안으로 소음기를 개발하였다.

감음효과는 소음기의 구조에 의한 것으로 흡음재 사용없이 단면변화와 공명에 의한 것으로 팽창형과

공명형을 조합한 반사형 구조이다.

화장실에서 발생하는 소음주파수 특성은 다양하기 때문에 고주파용과 저주파용을 각각 설계하여 감음대역폭을 넓히는 방안을 강구하였다. 그 결과 소음기에 의한 층간 전달소음을 주파수 평균 12 dB 감소할 수 있었으며, 정압손실은 0.7mmAq 로 화장실 환기 FAN 의 성능 저하에는 영향을 주지 않았다.

참 고 문 헌

- (1) M.L. Munjal, " Acoustics of ducts and mufflers with application to exhaust and ventilation system design" , John Wiley & Sons, inc., 1987
- (2) 주택건설기준 등에 관한 규정 제 8 조, 제 14 조.
- (3) 건설교통부, 2006, 주택성능등급 인정 및 관리기준 (건설교통부고시 제 2006-14 호)
- (4) 오진우, 이종석, 이장현, 이성춘, 2006, " 공동주택 층간소음 저감을 위한 환기장치용 소음기 개발" , 춘계학술대회논문집 소음진동공학회
- (5) 김형태, 정의봉, 김희원, 2006, " 유체유동을 포함한 소음기의 음향 특성 해석" , 추계학술대회논문집 소음진동공학회