

# 저주파수 흡음을 위한 헬름홀쯔 공명기 배열형 패널

## A Helmholtz Resonator Array Panel for Low Frequency Sound Absorption

김 상 렬\* · 김 양 한\*\*

SangRyul Kim and Yang-Hann Kim

(2005년 3월 23일 접수 : 2005년 7월 25일 심사완료)

**Key Words :** Helmholtz Resonator Array Panel(헬름홀쯔 공명기 배열형 패널), Absorption Coefficient(흡음률), Resonator Arrangement(공명기 분포), Resonance Frequency(공명 주파수)

### ABSTRACT

Sound absorptive materials have good performance in high frequency range, not at low frequencies. Therefore it has been great challenge to develop a sound absorbing structure that is good at low frequency. We propose to use a Helmholtz resonator array panel for this purpose. A Helmholtz resonator is one of noise control elements widely used in many practical applications. The resonator is a simple structure composed of a rigid-walled cavity with a neck, but it has very high performance at resonance frequency. This paper discusses the sound absorption of Helmholtz resonator array panels at normal and random incidence. First, various experimental results are introduced and studied. Secondly, we theoretically predict the absorptive characteristics of the resonator array panel. The theoretical approach is based on the Fourier analysis for a periodic absorber. We believe that this method can be used to design a panel for low frequency noise control.

### 기 호 설 명

$a, l$  : 공명기 목 단면의 반경과 목의 길이  
 $a_c, L_c$  : 실린더형 공동의 반경 및 공동의 깊이  
 $\alpha_{\theta\phi}$  : 경계면의 경사입사 흡음률  
 $\alpha_{st}$  : 경계면의 랜덤입사 흡음률  
 $c$  : 공기에서의 음속(sound speed)  
 $\delta_e$  : 공명기 목에서의 외부보정길이  
 $\delta_i$  : 공명기 목에서의 내부보정길이  
 $d_v$  : 공기의 점성경계층두께(viscous boundary layer thickness,  $d_v = \sqrt{2\nu/\omega}$ )  
 $G(x, y)$  :  $\rho_c$ 로 정규화된 경계면의 비음향 어드미

턴스 (specific acoustic admittance)

$k$  : 파수(=  $\omega/c$ )  
 $L_x, L_y$  : 공명기배열의 공간주기(spatial period)  
 $\nu$  : 공기의 동점성계수( $\approx 15 \times 10^{-6}$  m<sup>2</sup>/sec)  
 $\phi$  :  $xy$ 평면에서  $x$ 축에 대한 입사파의 입사각도  
 $\rho$  : 공기의 밀도  
 $\theta$  :  $z$ 축에 대한 입사파의 입사각도  
 $V$  : 공명기 공동의 체적(=  $\pi a_c^2 L_c$ )  
 $x_h, y_h$  : 공명기 목 단면의 중심점 좌표  
 $Z_h$  : 공명기 입구에서의 임피던스

### 1. 서 론

일반적인 다공성 흡음재는 저주파수에서 흡음성능이 현저하게 떨어진다. 이를 보완하기 위하여 다양한 흡음 시스템들이 개발되어 왔으나, 현재까지 알려진 대부분의 저주파수 흡음 시스템은 후면 공기층의 공

† 책임저자 : 정희원, 한국기계연구원 음향그룹  
 E-mail : srkim@kimm.re.kr  
 Tel : (042) 868-7466, Fax : (042) 868-7440  
 \* 정희원, 한국과학기술원 기계공학과

명현상을 이용함으로써 전체 시스템의 두께가 두꺼워지는 단점을 가지고 있다.<sup>(1)</sup> 반면 덕트 혹은 공동 내에서의 저주파수 소음제어요소로 널리 사용되는 헬름홀츠 공명기는 하나의 공동과 목으로 이루어진 단순한 구조로 되어 있으나 공명 주파수에서 높은 흡음성을 가진다. 더구나 헬름홀츠 공명기의 공명 주파수가 공동의 깊이가 아닌 공동의 체적과 관련이 있기 때문에 패널의 전체두께를 줄일 수 있는 가능성이 있다. 따라서 다수의 헬름홀츠 공명기가 배열된 패널 형태의 흡음 시스템(공명기 배열형 패널)은 특정 주파수에서 높은 작동소음이 발생하는 생산공장이나 위성로켓 내부에서와 같이 다공성 흡음재의 낮은 저주파수 흡음특성을 보완하는 흡음패널로 사용할 수 있을 것이다.<sup>(2,3)</sup>

이 논문에서는 먼저 헬름홀츠 공명기 배열형 패널의 저주파수 흡음성능을 살펴보고자 한다. 이를 위해서는 실제 공명기 배열형 패널의 흡음률을 측정할 필요가 있다. 측정된 랜덤입사/수직입사 흡음률은 공명기 배열형 패널의 흡음특성과 더불어 실제 문제의 적용 가능성을 보여줄 것이다. 공명기 배열형 패널을 다양한 실제 문제에 적용하기 위해서는 원하는 사양으로 설계할 수 있는 이론 모델이 반드시 필요하다. 따라서 이 논문의 두 번째 주제로 공명기 배열형 패널의 이론적 해석방법을 다루고자 한다. 이 방법은 주기적인 경계면의 푸리에 해석방법을 적용한 것으로 실험결과와 예측결과와의 비교를 통하여 예측모델의 유용성을 확인할 것이다.

## 2. 공명기 배열형 패널의 흡음성능 측정

### 2.1 랜덤입사 흡음률

#### (1) 실험장치 및 시편

실험을 위하여 제작된 공명기 배열형 패널에는 전체 두께 50 mm인 총 144개의 동일한 공명기들이 가

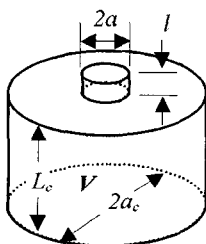


Fig. 1 Cylinder-type Helmholtz resonator

로, 세로 80 mm 간격으로 배열되어 있다. 각 공명기는 제작 편의상 Fig. 1과 같이 실린더 형태의 목과 공동을 가지고 있으며 PVC재질로 되어있다. 실험은 체적 6.46 m<sup>3</sup>의 소형 잔향챔버를 이용하여 잔향실험<sup>(4)</sup>에 따라 수행하였으며, 공간내의 잔향시간은 총 20개 지점에서 측정한 후 평균하여 사용하였다. Fig. 2는 측정장치와 시편의 개략도를 보여주고 있다.

#### (2) 실험결과 및 고찰

Fig. 3은 각각의 1/3 옥타브 밴드에서 측정된 공명기 배열형 패널의 랜덤입사 흡음률과 빈방의 흡음률을 비교한 것이다. 그림에서 공명기 배열형 패널은 특정 주파수(315 Hz)에서 최대값을 가지는 피크 형태의 흡음 특성을 보이고 있다. 여기서 최대 흡음률은 동일 두께의 일반적인 다공성 흡음재에 비하여 월등히 높은 값은 아니다.<sup>(1)</sup> 그러나 공명기 배열형 패널이 공명 주파수에서 최대 흡음성능을 나타내고 측정치가 1/3 옥타브밴드에서의 평균값인 점을 생각하면

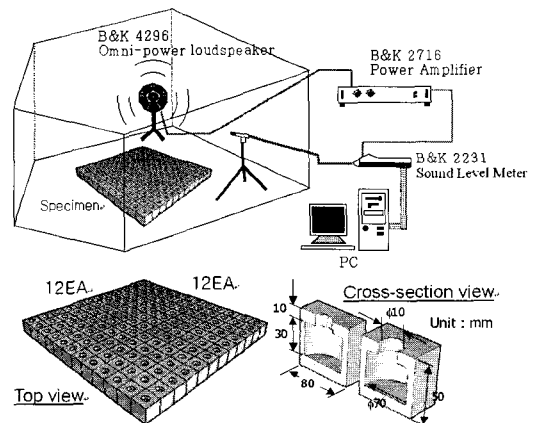


Fig. 2 Test specimen and experimental setup

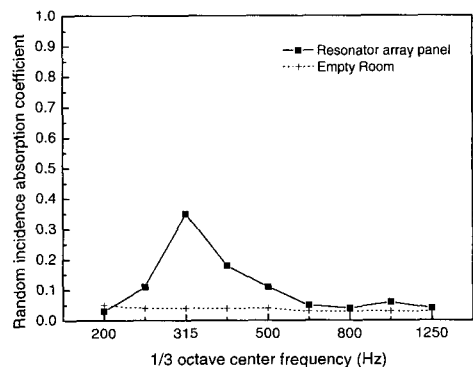


Fig. 3 Random incidence absorption coefficient of resonator array panel

공명 주파수에서의 흡음률은 훨씬 높은 값일 것으로 추정할 수 있다. 이를 확인하기 위해서는 흡음률의 협대역 계측이 필요하지만, 잔향실법<sup>(4)</sup>으로는 계측할 수 없으므로 임피던스튜브를 이용한 전달함수법<sup>(5)</sup>에 따라 수직입사흡음률을 대신 계측하려 한다.

## 2.2 수직입사 흡음률

### (1) 실험장치 및 시편

Fig. 4는 계측에 사용된 장비와 시편의 형상을 보여주고 있다. 시편은 20 mm 두께의 알루미늄 판에 총 4개의 동일 공명기가 삽입되는 구조로, 각각의 공명기 대신 구멍이 없는 PVC 블록으로 대체하게 되면 다양한 공명기 배열을 모사할 수 있도록 되어 있다. 공명기를 설치할 때 설치위치 변화에 따른 영향을 제거하기 위하여 No.1 공명기는 No.1 위치에만 삽입하는 방식으로 각각의 공명기가 부착되는 위치를 항상 동일하게 유지하도록 하였다.

흡음률 실험에 앞서, 먼저 제작된 공명기들이 모두 동일한 지를 확인하기 위하여 각 공명기의 공명 주파수를 계측할 필요가 있다. 공명기의 공명 주파수는 1개의 공명기만을 해당 부착 위치에 설치한 후(나머지 위치는 PVC 블록을 삽입함) 임피던스튜브를 이용한

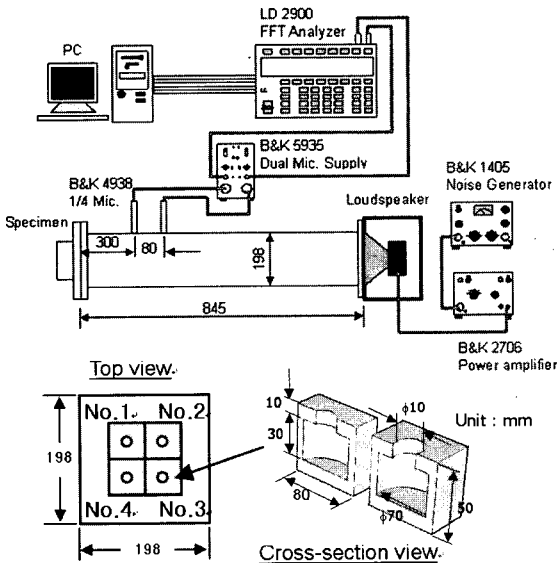


Fig. 4 Test specimen and experimental setup

Table 1 Resonance frequencies of resonators

Resonator No.	No.1	No.2	No.3	No.4
Resonance frequency (Hz)	333.0	333.3	332.8	332.9

전달함수법<sup>(5)</sup>에 따라 시편의 표면 임피던스를 계측함으로써 측정할 수 있다. 이때 시편 표면은 1개의 구멍만 존재하는 형태이므로 공명기의 공명 주파수는 계측된 표면 임피던스의 허수부가 0이 되는 주파수와 동일하게 된다. 계측된 공명 주파수는 Table 1에 수록되어 있다. 계측된 공명 주파수의 차이는 최대 0.6 Hz로 공명기들이 매우 동일하게 제작되었음을 확인할 수 있다.

### (1) 실험 결과 및 고찰

Fig. 5는 공명기 배열형 패널의 수직입사 흡음률 계측결과를 나타낸다. 그림에서 각각의 그래프는 공명기가 설치되지 않은 경우(no resonator)와 해당 번호의 공명기들이 설치되었을 때 측정된 결과들이다. 공명기가 설치된 경우 흡음률은 특정주파수에서 최대 값을 가지는 피크형태를 보이고 있으며 최대 흡음률은 일반적인 다공성 흡음재의 저주파수 흡음률보다 상당히 높은 0.8 이상의 값을 보이고 있다. 그러나 계측된 흡음률은 공명기 배열형태에 따라 최대 흡음률,

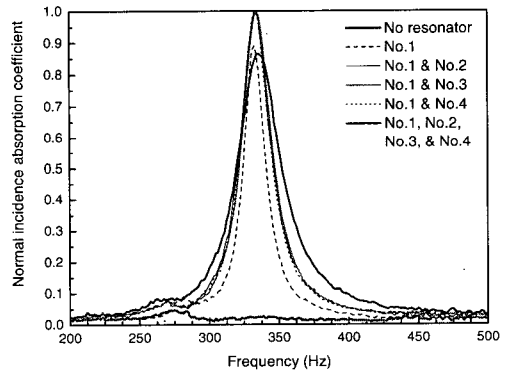


Fig. 5 Normal incidence absorption coefficient of resonator array panels

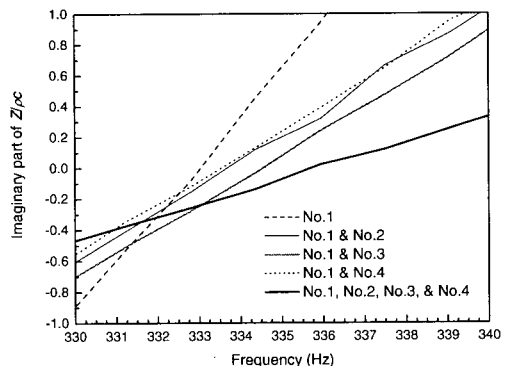


Fig. 6 Resonance frequency shift according to array variation

곡선의 피크폭 및 피크 주파수 등이 다소 달라짐을 볼 수 있다. 2개의 공명기가 설치된 경우 최대 흡음률이 거의 1에 근접하지만 공명기의 개수가 많아지거나 작아질 경우 최대 흡음률이 감소함을 볼 수 있다. 따라서 최대 흡음률 1을 얻을 수 있는 최적의 공명기 배열이 존재함을 유추할 수 있다.

또한 설치된 공명기의 개수가 증가할수록 공명주파수가 다소 증가함을 발견할 수 있는데, 이를 더 자세히 관찰하기 위하여 Fig. 6에 공명기 배열형태에 따른 표면 임피던스의 허수부를 비교하였다. 그림에서 하나의 공명기가 설치된 경우에 비하여 다수의 공명기가 설치된 경우 표면 임피던스의 허수부가 0인 공명 주파수가 증가함을 볼 수 있다. 동일 공명기 개수라 하더라도 공명 주파수 증가량은 공명기 배열에 따라 달라지는데, No.1과 No.2 공명기가 설치된 경우는 대칭 형태인 No.1과 No.4가 설치된 경우와 비슷한 공명 주파수를 보이지만, No.1과 No.3이 설치된 경우보다는 낮은 공명주파수를 나타내고 있다. 이러한 공명 주파수의 변화는 다수의 공명기가 배열될 경우 각각의 공명기 입구에서의 음향방사에 의한 상호작용<sup>(6)</sup>으로 공명기 입구에서의 외부보정길이가 변화하기 때문으로 판단된다.<sup>(7)</sup>

### 3. 흡음성능의 이론적 예측

#### 3.1 해석 시스템 정의

Fig. 7과 같이 무한 평면 위에  $x$ 축과  $y$ 축으로 각각  $L_x$ 와  $L_y$ 의 공간주기(spatial period)로 공명기들이 반복적으로 배열되어 있는 경우를 생각해보자. 이때 공간주기 내에는 다수의 공명기가 존재할 수 있다고 하자. 또한 공명기 목 입구를 제외한  $z=0$ 인 표면은 모두 강체라고 하고, 공명기들의 크기는 관심 주파수에서의 파장에 비하여 매우 작다고 가정하자. 이러한

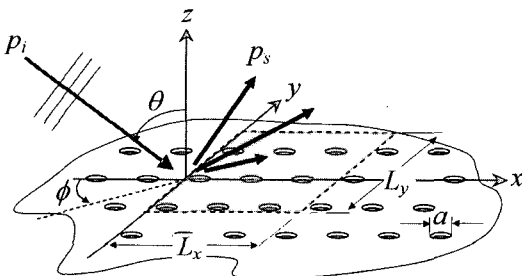


Fig. 7 Theoretical model of resonator array panel

공명기 배열형 패널의 표면은  $x$ 축과  $y$ 축을 따라 표면 임피던스가 주기적으로 변화하는 경계면으로 고려할 수 있으므로 경계면 위의 음장은 푸리에 해석 방법<sup>(8)</sup>으로 해석 가능하다. 다음은 그 해석방법을 정리한 것이다.

#### 3.2 흡음성능의 이론적 예측방법

Fig. 7과 같은 서로 다른 임피던스가 주기적으로 배열된 경계면에 평면파  $p_i$ 가 입사할 때 경계면 위( $z \geq 0$ )의 음장  $p$ 는 입사파  $p_i$ 와 경계면에 의하여 산란되는 음파  $p_s$ 의 합으로 표현할 수 있다.

$$p(x, y, z) = p_i(x, y, z) + p_s(x, y, z) \quad (1)$$

$$p_i(x, y, z) = P_i e^{-j(k_x x + k_y y - k_z z)} \quad (2)$$

$$p_s(x, y, z) = \sum_{m=-\infty}^{\infty} \sum_{n=-\infty}^{\infty} A_{mn} e^{-j(\alpha_m x + \beta_n y + \gamma_{mn} z)} \quad (3)$$

여기서  $k_x = k \sin \theta \cos \phi$ ,  $k_y = k \sin \theta \sin \phi$ ,  $k_z = k \cos \theta$ 이고 시간인자  $e^{j\omega t}$ 는 편의상 생략한다. 식 (3)에서 경계면의 주기성으로 인하여

$$\alpha_m = k_x + 2m\pi/L_x \quad (4a)$$

$$\beta_n = k_y + 2n\pi/L_y \quad (4b)$$

이고, 파동 방정식으로부터  $\gamma_{mn}$ 은 다음과 같다.

$$\gamma_{mn}^2 = k^2 - \alpha_m^2 - \beta_n^2, \quad \gamma_{mn} = -j\sqrt{\alpha_m^2 + \beta_n^2 - k^2} \quad (4c)$$

경계면의 단위면적을 통과하는 음향 에너지  $\Pi$ 는 음압  $p$ 와 표면에 수직인 방향의 입자속도  $v_z$ 로부터 다음과 같이 계산할 수 있다.

$$\Pi = \frac{1}{L_x L_y} \int_0^{L_x} \int_0^{L_y} \frac{1}{2} \operatorname{Re} \{ p \cdot v_z^* \} dx dy \quad (5)$$

여기서 \*는 켈레 복소수를 나타낸다. 따라서 입사파에 의해 표면에 입사되는 음향 에너지  $\Pi_i$

$$\Pi_i = \frac{\cos \theta}{2\rho c} |P_i|^2 \quad (6)$$

와 경계면에서 반사되는 음향 에너지  $\Pi_r$ ,

$$\Pi_r = \frac{1}{2\rho c} \sum_{m=-\infty}^{\infty} \sum_{n=-\infty}^{\infty} \frac{\operatorname{Re} \{ \gamma_{mn} \}}{k} |A_{mn}|^2 \quad (7)$$

로부터 경계면의 흡음률  $\alpha_{\theta\phi}$ 는

$$\alpha_{\theta\phi} = \frac{\Pi_i - \Pi_r}{\Pi_i} = 1 - \frac{1}{\cos\theta} \sum_{\text{Re}\{\gamma_{mn}\}} \frac{\gamma_{mn}}{k} \left| \frac{A_{mn}}{P_i} \right|^2 \quad (8)$$

로 표현된다. 여기서 합기호  $\sum_{\text{Re}\{\gamma_{mn}\}}$ 는  $\gamma_{mn}$ 이 실수인 모든  $m$ 과  $n$ 에 대하여 수행함을 나타낸다. 랜덤입사 흡음률  $\alpha_{st}$ 는 식 (8)을 아래의 적분식에 대입하여 계산할 수 있다.

$$\alpha_{st} = \frac{1}{\pi} \int_0^{2\pi} \int_0^{\pi/2} \alpha_{\theta\phi} \cos\theta \sin\theta \, d\theta \, d\phi \quad (9)$$

한편 경계면에서의 정규화된 비음향 어드미턴스  $G(x, y)$ 는 주기함수이므로 다음의 푸리에 급수 형태로 나타낼 수 있다.

$$G(x, y) = \sum_{m=-\infty}^{\infty} \sum_{n=-\infty}^{\infty} g_{mn} e^{-j\left(\frac{2m\pi}{L_x}x + \frac{2n\pi}{L_y}y\right)} \quad (10a)$$

$$g_{mn} = \frac{1}{L_x L_y} \int_0^{L_x} \int_0^{L_y} G(x, y) e^{j\left(\frac{2m\pi}{L_x}x + \frac{2n\pi}{L_y}y\right)} \, dx \, dy \quad (10b)$$

식 (1)과 식 (10)을  $z=0$ 인 지점에서의 경계조건

$$G(x, y)p(x, y, 0) = \left. \frac{1}{jk} \frac{\partial p}{\partial z} \right]_{z=0} \quad (11)$$

에 대입하고 양변에  $e^{j(2m\pi x/L_x + 2n\pi y/L_y)}$ 를 곱한 후 공간주기  $L_x$ 와  $L_y$ 에 대하여 적분하면 산란음장  $p_s$ 의 푸리에 계수  $A_{mn}$ 에 대한 무한 연립방정식을 얻을 수 있다. 이 연립방정식의 해를 식 (8)과 (9)에 대입하면 원하는 흡음률을 계산할 수 있다.

$$\sum_{m=-\infty}^{\infty} \sum_{n=-\infty}^{\infty} A_{mn} \left( g_{m'-m, n'-n} + \delta_{m'm} \delta_{n'n} \frac{\gamma_{m'n'}}{k} \right) = P_i (\delta_{m_0} \delta_{n_0} \cos\theta - g_{m'n'}) ; \quad m', n' = 0, \pm 1, \pm 2, \dots \quad (12)$$

여기서  $\delta_{mn} = \begin{cases} 1 & \text{if } m=n \\ 0 & \text{if } m \neq n \end{cases}$ 이다. 식 (12)의 무한 연립방정식의 실제 계산은 해의 수렴이 보장되는 유한 개수로 제한하여 풀어야 할 것이다.<sup>(8)</sup>

Fig. 7과 같은 원형단면 목을 가진 공명기 배열의 경우 표면 어드미턴스  $G(x, y)$ 는

$$G(x, y) = \begin{cases} \rho c / Z_h & \text{part of the hole} \\ 0 & \text{another part of the surface} \end{cases} \quad (13a)$$

이므로  $G(x, y)$ 의 푸리에 계수는 베셀함수의 적분표현<sup>(9)</sup>과 미분공식<sup>(10)</sup>을 이용하면 쉽게 구할 수 있다.

$$g_{mn} = \sum_{hole} \frac{\rho c}{Z_h} \cdot \frac{\pi a^2}{L_x L_y} \cdot F_{mn} \cdot e^{j\left(\frac{2m\pi}{L_x}x_h + \frac{2n\pi}{L_y}y_h\right)} \quad (13a)$$

$$F_{mn} \equiv \frac{2J_1\left(a\sqrt{(2m\pi/L_x)^2 + (2n\pi/L_y)^2}\right)}{a\sqrt{(2m\pi/L_x)^2 + (2n\pi/L_y)^2}} \quad (13b)$$

여기서 합기호  $\sum_{hole}$ 은 공간주기내의 모든 공명기 입구에 대하여 계산함을 나타내고  $J_1$ 는 1차의 제 1종 베셀함수이다.

### 3.3 헬름홀츠 공명기의 입구 임피던스

헬름홀츠 공명기 입구에서의 임피던스  $Z_h$ 는 Fig. 1과 같이 하나의 목과 하나의 공동으로 이루어진 경우 다음과 같이 표현된다.<sup>(11, 12)</sup>

$$\frac{Z_h}{\rho c} = kd_v \left( 2 + \frac{l}{a} \right) + j \left[ k \left\{ l + \delta_e + \delta_i + d_v \left( 2 + \frac{l}{a} \right) \right\} - \frac{\pi a^2}{kV} \right] \quad (14)$$

여기서 내부보정길이  $\delta_i$ 는 공명기 목에서 공동내부로 음향방사에 의한 영향으로 공명기의 내부형상과 관련이 있으며 Kergomard와 Garcia<sup>(13)</sup>는 Ingard<sup>(11)</sup>의 근사식보다 향상된 결과를 보여주는 다음과 같은 근사식을 제시하였다.

$$\delta_i \approx \frac{8}{3\pi} a \left( 1 - 1.30 \frac{a}{a_c} \right) \quad \text{for } \frac{a}{a_c} < 0.3 \quad (15)$$

외부보정길이  $\delta_e$ 는 공명기 목에서 외부음장으로의 음향방사와 관련된 항으로 Fig. 6에서 확인하였듯이 외부음장의 조건, 특히 패널표면의 경계조건에 따라 변화하게 된다. 그러나 앞의 3.2절에서 설명한 이론적

해석방법은 공명기 배열형 패널 위의 전체 음장을 먼저 구하는 방법을 취하기 때문에 공명기입구에서의 외부음장 영향을 별도로 고려할 필요가 없다. 따라서 식 (13)의 경계조건에서 공명기 입구 임피던스  $Z_h$ 로는 외부보정길이가 제외된 다음의 형태가 사용되어야 한다.

$$\frac{Z_h}{\rho c} = kd_v \left( 2 + \frac{l}{a} \right) + j \left[ k \left\{ l + \delta_i + d_v \left( 2 + \frac{l}{a} \right) \right\} - \frac{\pi a^2}{kV} \right] \quad (16)$$

Fig. 8은 공명기입구임피던스로 외부보정길이가 포함된 식 (14)을 사용한 경우와 이를 제외한 식 (16)을 사용한 경우의 예측결과를 보여주고 있다. 여기서 식 (14)식의 외부보정길이로는 플랜지가 된 공명기

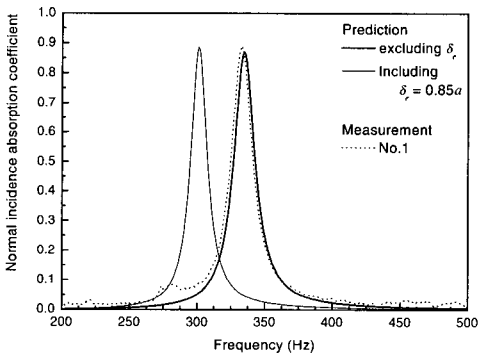


Fig. 8 Theoretical and experimental results of normal incidence absorption coefficient in No.1 case of Fig. 4

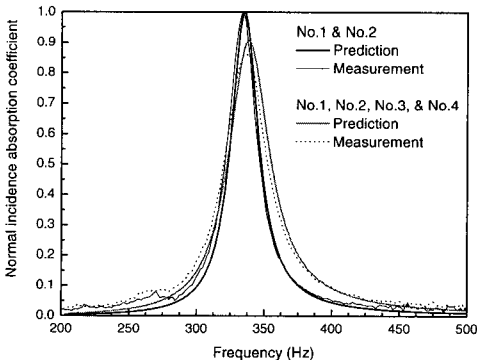


Fig. 9 Theoretical and experimental results of normal incidence absorption coefficient in case of Fig. 4

입구의 근사식<sup>(12)</sup>  $\delta_i \approx 8a/3\pi$ 를 사용하였다. 그림에서 외부보정길이를 포함한 경우는 측정결과에 비하여 예측된 공명 주파수가 감소함을 확인할 수 있다.

### 3.4 예측결과와 실험결과와의 비교

2장에서 계측된 실제 공명기 배열형 패널에 대하여 이론적으로 흡음성능을 예측하였다. 이때 공명기 입구에서의 임피던스로는 식 (16)을 사용하였으며 그 결과가 Fig. 8~10에 나타나 있다. Fig. 8~9는 Fig. 4의 공명기 배열에 대한 수직입사 흡음률을 예측한 결과를 보여주고 있다. 여기서 No.1과 No.1 & No.2의 경우 설치된 공명기들의 입구가 덕트단면의 장 중앙에 대하여 대칭이 아니기 때문에 각각의 이론모델은 덕트 측벽의 가상 음원 효과(mirror imaging effect)<sup>(14)</sup>를 고려하여야 하며, 이는 공간주기로 덕트단면 폭의 2배가 되는 공명기 배열형 패널이 된다. 그림에서 예측결과는 모든 시편에 대하여 실험결과와 매우 잘 일치하고 있음을 볼 수 있다.

Fig. 10은 Fig. 2의 공명기배열형 패널에 대한 랜덤 입사 흡음률을 예측한 결과를 나타내고 있다.

그림에는 각각의 주파수에서 예측한 결과와 함께 1/3 옥타브밴드에서의 평균값을 수록하여 측정결과와 비교하였다. 그림에서 이론적 예측결과는 측정결과와 상당히 유사함을 확인할 수 있다.

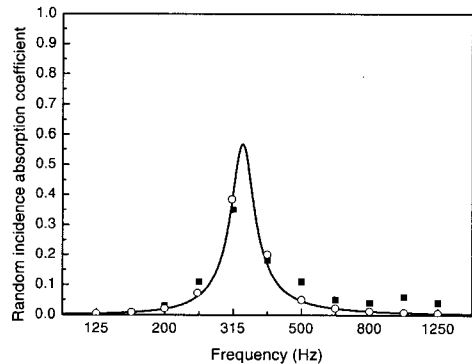


Fig. 10 Theoretical and experimental results of random incidence absorption coefficient in case of Fig. 2. (solid line—): predicted results at each frequency; open circle(○): mean value in each 1/3 octave band of the predicted results; solid square(■): experimental results in each 1/3 octave band using reverberation room method)

#### 4. 결 론

이 논문에서는 헬름홀츠 공명기 배열형 패널의 주파수 흡음특성을 살펴보았다. 먼저 실제 제작된 패널에 대한 실험결과로부터 공명 주파수에서 매우 높은 흡음률을 가짐을 확인하였으며 공명기의 배열형태에 따라 흡음률뿐만 아니라 공명 주파수도 변화함을 관찰하였다. 공명기간의 거리가 가까울수록 공명 주파수의 변화는 증가하였고, 최대 흡음률을 위한 적절한 공명기 간격이 존재하였다.

또한 주기적 경계면의 푸리에 해석방법에 근거한 공명기배열형 패널의 이론모델로 실험결과와 매우 일치하는 예측결과를 얻을 수 있었다. 따라서 이 해석 방법은 공명기 배열형 패널의 설계시 유용한 설계도구가 될 수 있을 것으로 기대된다.

#### 후 기

이 논문은 SK건설과 교육인적자원부의 BK21사업에 의한 연구지원으로 수행되었습니다.

#### 참 고 문 헌

(1) Douglas D. Reynolds, 1981, Engineering Principles of Acoustics: Noise and Vibration Control, Allyn and Bacon, Inc., Appendix IV.  
 (2) Defosse, H. and Hamdi, M. A., 2000, "Vibro-acoustic Study of Ariane V Launcher During Lift-off," Proc. of Internoise 2000, Paper IN2000/486.  
 (3) 서상현, 김양한, 2004, "공명기 배열을 이용한 소음기의 음향학적 특성", 한국소음진동공학회논문집, 제 14 권, 제 10 호, pp. 975~982.  
 (4) ISO 354, 2003, Acoustics-Measurement of

Sound Absorption in Reverberation Room.

(5) ISO 10534-2, 1998, Acoustics-Determination of Sound Absorption Coefficient and Impedance in Impedance Tubes, Part 2: Transfer-Function Method.

(6) Mechel, F. P., 1988, "Note on the Radiation Impedance, Especially of Piston-like Radiators," J. of Sound and Vibration, 123(3), pp. 537~572.

(7) Kim, S. R., Kim, M. -S., Kim, Y. -H. and Kim, Y. -W., 2000, "Absorptive Characteristics of Resonator Panel for Low Frequency Noise Control, and its Applications," Proc. of Internoise 2003, Paper No. N932.

(8) Mechel, F. P., 1990, "Sound Fields at Periodic Absorbers," J. Sound and Vibration, 136(3), pp. 379~412.

(9) Watson, G. N., 1966, A Treatise on the Theory of Bessel Functions, Second Edition, Cambridge University Press, Eq(5), pp. 20.

(10) Watson, G. N., 1966, A Treatise on the Theory of Bessel Functions, Second Edition, Cambridge University Press, Eq(5), pp. 18.

(11) Ingard, U., 1953, "On the Theory and Design of Acoustic Resonators," J. Acoust. Soc. Am. 25, pp. 1037~1061.

(12) Beranek L. L. and Ver, I. L., 1992, Noise and Vibration Control Engineering, John Wiley & Sons, Inc., Chap. 8

(13) Kergomard, J. and Garcia, A., 1987, "Simple Discontinuities in Acoustic Waveguide at Low Frequencies: Critical Analysis and Formulae," J. Acoust. Soc. Am., 114, pp. 465~479.

(14) Wu, T., Cox, T. J. and Lam, Y. W., 2000, "From a Profiled Diffuser to an Optimized Absorber," J. Acoust. Soc. Am., 108 (2), pp. 643~650.