

표면에 다수의 구멍을 뚫고 차단 주파수 영역의 선택이 가능한 풍압저감형 방음벽

김상훈* · 이돈출**

Kim, Sang-Hoon*, Lee, Donchool**

Wind Pressure Reducing Soundproof Wall Which Has Many Holes on the Surface and Selectable Stop-Frequency Ranges

ABSTRACT

Applying diffraction of waves and muffler principle, the theory of macroscopic air ventilation with soundproofing was explained. Soundproofing frequency range can be selected by this method. The sound wave was attenuated at the resonator located between double-layered walls. A soundproof plate was designed and the experiment was processed. There are two air holes of diameter of 5cm and thickness of 8cm on the surfaces per each soundproofing cell. There was a transmission loss of about 25dB and it is more than at least 10dB compared with that of the Connex technology of wave cancellation by air holes in Japan. Furthermore, there was no soundproof frequency selection in the Connex technology.

Key words : Acoustics, Soundproof, Wind pressure, Stop-band

초 록

파동의 예들이와 공명식 머플러 원리를 이용하여 통풍형 방음을 구현하고 그 이론을 설명하였다. 이 방음기술은 차단하고자 하는 주파수영역의 선택이 가능하다. 방음벽을 이중으로 만들고 그 사이를 비워, 방음벽의 구멍을 통해 들어온 음파가 내부에서 공진하여 소멸되도록 하였다. 두께 8cm인 공간통마다 직경 5cm의 공기구멍을 2개씩 뚫고 실험한 결과 넓은 주파수영역대서 평균 25dB정도의 차음효과가 있었다. 일본 컴넥스사의 산란에 의한 투과손실만 있는 경우와의 차음효과를 비교한 결과 같은 통풍능력인 경우에 적어도 10dB이상 차음효과가 높았다. 또한 컴넥스사의 기술은 차음주파수 영역을 선택할 수 없다는 한계가 있었다.

검색어 : 음향학, 방음, 풍압, 차음주파수대

1. 서론

도로를 달리는 차량에 의한 소음을 줄이는 첫 단계는 저소음 차량을 생산하는 것이고, 그 다음이 저소음 도로를 건설하는 것이다(Jo et al., 2013). 최근에는 저소음 도로인 녹색도로에 관한 논의들이 활발히 이루어지고 있다(Hyun et al., 2013). 하지만 이것으로도 막을 수 없는 소음은 불가피하게 방음벽이나 방음터널로 차단한다. 그런데 방음벽이나 방음터널은 여러 문제점을 내포한다. 강한 바람이 불거나 하면 방음벽이 풍압으로 파손되어 보수가 필요하다. 고속열차 철로 주변에 설치하는 방음벽도 고속열차가 통과하면 풍압이

* 정회원 · 교신저자 · 목포해양대학교 기관공학부 (Corresponding Author · Mokpo National Maritime University · shkim@mmu.ac.kr)

** 목포해양대학교 기관공학부 (Mokpo National Maritime University · ldcvib@mmu.ac.kr)

Received April 8, 2015/ revised September 2, 2015/ accepted January 1, 2016

발생하여 방음벽이 진동하게 되고, 이는 방음벽의 수명을 단축시킨다. 방음벽이나 방음터널의 건설은 동식물의 이동을 방해하는 생물학적 단절효과를 가져와 환경단체들로부터 많은 반대에 직면한다. 방음터널은 또한 환기를 어렵게 하여 강제 공기순환장치를 설치해야 하며, 순환이 되지 않을시 인명사고의 위험도 내포한다.

이런 문제점들을 종합적으로 해결하는 가장 좋은 방법은 공기는 통과시키고 소리만 차단하는 통풍형 방음벽을 개발하는 것이다. 이런 기술들은 방음벽에 통풍이 가능한 정도의 상당한 크기의 구멍을 뚫어 방음하는 것인데, 최근의 연구들은 이런 통풍형 방음벽에 대한 가능성을 보여주고 있다(Connex, 2012; Nguyen et al., 2009; Nguyen et al., 2012; Yuya et al., 2010). 나아가 통풍과 동시에 원하는 주파수 영역대의 소리만 선택적으로 차단할 수 있는 음향튜너기술이 개발되고 있다(Kim and Lee, 2014; Lee et al., 2014).

이 논문은 바람의 입장에서 볼 때 투명한 방음벽에 관한 것이다. 음파에서 매질과 공기를 분리하여 공기는 통과시키고 소리만, 그것도 원하는 주파수 영역대의 소리만 선택하여 차단하는 기술에 관한 것이다. 이 기술은 최근에 각광을 받는 음향메타물질에 기반을 두고 있는 것으로서, 기본적으로 공진형 머플러 기술을 발전시킨 것이다. 이 기술의 원리를 소개하고, 실험을 통하여 최근 일본 컴넥스사에서 개발한 산란관을 이용한 통풍형 방음벽(Connex, 2012) 기술과 성능을 비교하였다.

2. 원리

소리를 차단하는 것은 빛을 차단하는 것 보다 어렵다. 방에 있는 사람에게 북에서 이야기하는 사람들의 모습은 보이지 않지만 그들의 목소리는 들린다. 이는 파동이 자신의 파장보다 작은 구멍을 통과할 때 직진하는 대신에 옆으로 퍼지는 에돌이(회절, diffraction) 현상 때문이다. 즉 빛의 파장은 문의 틈새 길이에 비하여 짧아 직진하므로 쉽게 차단되나, 소리는 파장이 길어 틈새를 통과하며 주변으로 퍼지므로 쉽게 차단되지 않는다. 따라서 차음이 라면 무엇보다 작은 구멍이라도 안 생기게 하는 것이 중요하다고 생각한다. 하지만 역으로 이를 이용하면 구멍을 크게 뚫어 통기와 차음을 동시에 할 수 있다. 이 원리는 판에 아주 미세한 구멍을 다수 뚫어 많은 소리를 통과시키는 기술과는 반대다(Wang, 2010).

방음판을 이중으로 만들어 그 가운데를 비우고 공진장치를 하면 방음판에 구멍을 뚫었을 때 그 구멍의 크기가 소리의 파장보다 작으면 음파가 들어와 직진하지 않고 옆으로 퍼질 때 공명흡음으로 잡아낼 수 있다. 음파의 파장은 충분히 길기 때문에 방음벽에 통풍이 가능한 정도의 구멍을 뚫을 수 있다. 예를 들면, 1,000Hz의 음파는 파장이 대략 34cm이므로 이론적으로는 직경 34cm까지의 구멍을

뚫고도 차음이 가능하다. 하지만 방음벽의 두께의 한계 등 여러 가지 복합적 요인으로 인하여 실제 설치할 경우에는 공기구멍의 직경이 파장의 1/3보다 작아야 실용적이다(Kim and Lee, 2014).

음파의 속력은 $v = \sqrt{\frac{B}{\rho}}$ 로 주어진다. B는 매질인 공기의 부피탄성률이고, ρ 는 매질의 밀도다. 만일 밀도나 탄성률 중에 하나가 음수가 되면 속력이 허수가 되어 파동의 진폭이 지수적으로 감소한다. 여기서는 탄성률을 특정한 주파수 구간에서 음으로 만드는 데 그 방법은 다음과 같다(Fang, 2006; Lee et al., 2014). 부피탄성률 B는 압력변화에 따른 부피변화의 비로서 다음처럼 정의된다 (Kim and Das, 2013; Kim and Das, 2012).

$$\Delta P = -B \frac{\Delta V}{V} \quad (1)$$

B 앞에 -를 붙여 정의하는 이유는 부피에 압력을 가하면 부피가 줄어 $\Delta V < 0$ 이기 때문이다. 음의 탄성률을 가지려면 압력을 가할 때 부피가 늘어나야 한다. 이런 경우는 Fig. 1(a)의 헬름홀츠(Helmholtz) 공진기로 설명이 가능하다. 공진기 구멍에 외부에서 파동에 의한 압력이 가해지는 경우, 내부에 쌓인 파동이 공명에 의한 위상차로 인하여 마치 부피가 팽창하는 것과 같은 효과를 나타낸다. 이를 유효탄성률이 음이 되었다고 하는데 자동차의 공진형 머플러와 원리가 유사하다.

양쪽이 열린 관은 유도기에 해당하고 한쪽만 열린 관은 축전기에

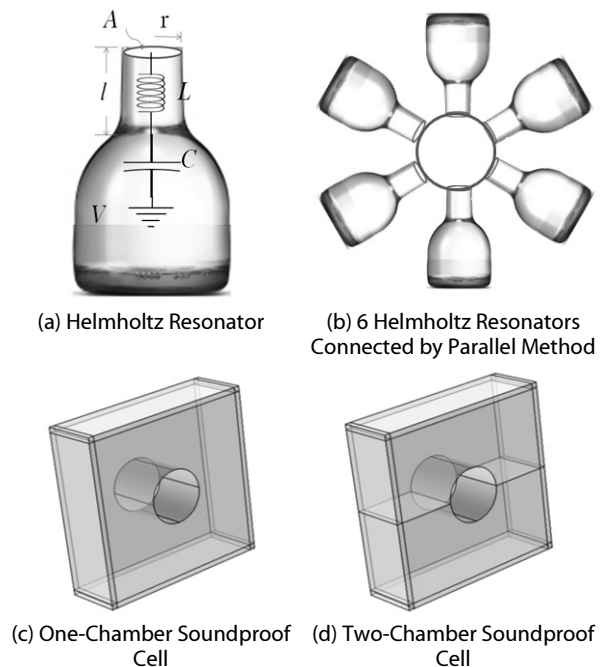


Fig. 1. Evolution of a Diffraction Resonator

해당하기 때문에 헬름홀츠 공진기는 Fig. 1(a)처럼 전기공학의 RLC 공진회로를 기계공학적으로 구현한 것에 해당한다. 다수의 공진기를 병렬로 연결하여 둥글게 말면 Fig. 1(b)처럼 된다. 이것을 다시 중간의 벽을 허물면 Fig. 1(c)와 같은 중앙에 구멍이 뚫린 에돌이형 공진기(diffraction resonator), 즉 공진통과 통풍을 위한 공기구멍을 가진 통풍형 공진통이 만들어진다. 에돌이가 강력할수록, 즉 공진통에 뚫린 구멍의 직경이 음파의 파장에 비하여 작을수록 처음에는 효과적이나 통풍에는 불리하다. 공진통의 모양은 빈 통에 구멍이 뚫린 모양이면 모두 가능하며, 재료는 공기보다 임피던스가 아주 큰 것은 무엇이나 가능하다.

파동의 속력이 허수가 되면 파동벡터도 허수가 되어 파동의 진폭이 다음처럼 지수적으로 감소한다(Kim and Lee, 2014; Kim, 2014).

$$\begin{aligned} \exp(ikx) &= \exp(2\pi inx/\lambda) \\ &= \exp(-2\pi n|x/\lambda) \\ &\equiv \exp(-\kappa x). \end{aligned} \tag{2}$$

λ 는 파동의 파장이며, n 은 굴절률이고, κ 는 $\kappa = \frac{2\pi n|x}{\lambda}$ 로 정의되는 감쇠계수다. 파동의 이동거리 x 가 방음벽의 두께에 해당 하는데 진폭이 지수적으로 감소하므로 두께가 2배가 된다고 하여 감쇠도 2배가 되지는 않는다. 그리고 두께가 너무 두꺼우면 방음에는 유리하나 통풍에는 불리하므로 주어진 소음환경에 맞는 규격을 가진 공진통을 적용해야 한다.

공진통에 공명이 일어나면 여러 개의 공진주파수 모드가 형성되는데 그 중에 가장 낮은 공진주파수가 처음의 주력 주파수가 된다. 이 주파수는 다음처럼 헬름홀츠 공진기의 공진주파수로부터 구할 수 있다(Beranek, 1986).

$$f_o = \frac{v}{2\pi} \sqrt{\frac{S}{VL_e}} \tag{3}$$

v 는 음속, S 는 공진통 입구의 면적, V 는 공진통의 부피, L_e 는 공진통의 유효목길이다(effective neck length). Fig. 1(c)의 공진통은 Fig. 1(a)같은 자체의 목 부분은 없으나 입구의 표면이 반경에 비례하여 진동하므로 이것이 유효목길이가 되어 다음처럼 입구의 유효반경에 비례한다(Beranek, 1986; Kinsler, 1999). $L_e \approx 0.85r_e$. 유효반경 r_e 는 공진통의 공기구멍이 직경이 D 이고 두께가 t 일때 다음과 같이 구할 수 있다. $S = \pi Dt \equiv \pi r_e^2$.

방음 주파수 영역은 공진주파수 f_o 부터 위쪽이다.

$$f_o < f < \sqrt{1+F} f_o. \tag{4}$$

F는 방음판의 구조에 따라 결정되는 기하학적 요소(geometric factor)로써 근사적으로 공진통 부피를 공기통로의 부피로 나눈 값이다(Fang et al., 2006; Kim, 2015). 예를 들어 공진통의 10%를 잘라 공기구멍을 만들었다면 90%가 공진통 부피가 되므로 F=9다. 이 주파수 영역이 음파가 진행할 수 없는 소리의 차단띠(stop-band)에 해당한다. 단 소리의 진폭이 감소될 수 있는 두께가 확보되어야 실제로 유효한 차음이 일어난다.

차음주파수대가 저주파일수록 공기구멍의 직경이 크고, 공진통의 부피가 크고, 두께가 두꺼워야 하며, 고주파일수록 공기구멍의 직경이 작고, 공진통의 부피도 작으며 두께도 얇아도 된다. 차음주파수 영역이 다른 두 개의 판을 앞뒤로 붙이면 2개의 주파수 영역이 차단된다(Kim and Lee, 2014). 따라서 차음영역을 자유롭게 선택할 수 있다.

이 차음원리는 전산모사를 통한 소리의 압력분포로도 확인할 수 있다. Fig. 2처럼 방음판 2개를 70mm 간격으로 떼어놓고 그 사이를 비웠다. 직경 50mm의 구멍이 뚫린 2차원 공진통 3개가 직렬로 연결되고 왼쪽에서 음파를 보낸 후 음압분포를 살펴보았다. 빨간색과 파란색의 차이가 소리의 진폭에 비례한다. (a)처럼 저주파인 f=500Hz에서는 방음이 안 되나, (b)처럼 중간주파수인 1,200Hz에서는 방음이 되고, (c)처럼 f=2,500Hz인 파장이 아주 짧은 고주파

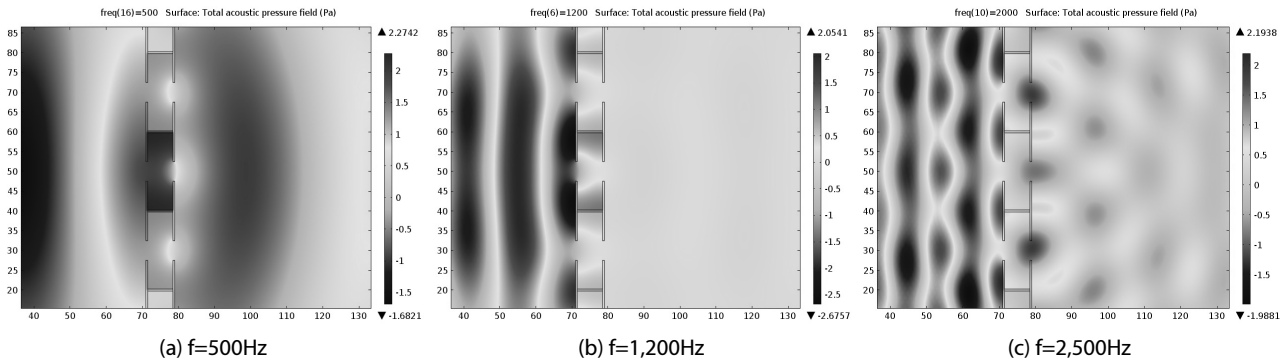


Fig. 2. Acoustic Waves Comes from the Left and Moves to the Right (Unit : cm)

가 되면 다시 방음이 안 되기 시작한다. 즉 특정 주파수대에 차음구간 존재한다. 실제로는 가장 낮은 주파수의 주 차음구간 외에도 공진통 내부에서 발생하는 모든 공진모드마다 약간씩의 차음구간이 다 존재한다.

3. 모형실험

이 공진을 이용한 통풍형 방음효과를 2012년에 컴덱스에서 개발된 산란형 방음기술과 비교하기 위하여 Fig. 3과 같이 두께 5mm의 투명 아크릴을 잘라서 외부 규격이 1200mm x 1000mm x 80mm로 되게 하고, 동일한 9개의 공진통으로 분할하여 공진통마다 직경 50mm의 통기구멍을 2개씩 뚫었다. 공진통 한 개의 외부 규격은 400mm x 330mm x 80mm다. 방음판의 외부 두께를 80mm로 했는데 두꺼울수록 Eq. (2)에 의해 음파가 지수적으로 감소하는 영역이 길어져 방음효과가 커지나 통풍성과 설치성 등 실용성은 떨어진다.

동일한 조건을 만들고 비교하기 위하여 공진통마다 직경 50mm의 2개의 구멍을 뚫어, 한 번은 구멍 2개를 모두 공기와 입피던스가 일치하는 에어필터로 막고, 다른 한 번은 구멍 하나는 에어필터로 다른 하나는 공진이 일어나지 못하도록 두꺼운 보드 종이로 막고, 마지막으로 구멍 2개를 모두 보드 종이로 막고 동일한 조건에서 차음효과를 실험하였다. 대전에 소재한 기계연구원(Korea Institute of Machinery and Materials, KIMM)의 축소잔향실로 구성된 미니챔버(mini-chamber)를 이용하였으며 실험장치 모습은 Fig. 4와 같다. 미니챔버의 음원실에 2대의 스피커를 설치하여 음원을 공급하였으며, 음원실 및 수음실에서 각각 6지점의 음압레벨과 수음실의 잔향시간을 이용하여 차음성능을 측정하였다.

Fig. 5는 세 가지로 구분하여 통풍형 방음판의 투과손실을 측정한 결과다. 컴덱스의 기술은 구멍 2개를 모두 도화지로 막은 경우에 해당하는데 이것은 소리가 공기구멍에서 산란하여 서로

상쇄되는 효과만을 이용한 것이다. 반면에 본 기술은 산란에 의한 상쇄효과 외에 공진에 의한 소멸효과를 더한 것이다. Fig. 5에서 보는 바와 같이 공진형 방음판이 넓은 주파수대에서 25dB 정도의 차음효과를 보여 산란만을 이용한 방음판에 비하여 10dB이상 차음 효과가 높음을 알 수 있다. 구멍 2개 중 하나는 보드 종이로 막고 다른 하나는 에어필터로 막은 경우는 대략 2가지 경우의 중간정도 또는 그 이하의 차음성능을 보였다. 400Hz부터 측정된 이유는 미니챔버가 400Hz이상에 대해서만 성능이 공인되었기 때문이다.

공진통의 주 방음역역은 Eq. (3)에 의하여 추정이 가능하다. 공진통에서 아크릴 두께를 빼면 방음을 위한 유효두께는 70mm다. 공진통 부피에서 2개의 공기구멍 부피를 뺀 부피가 V 이므로 $V = 8,530cm^3$ 다. S 는 2개의 공기구멍의 둘레 면적과 같으므로 $S = 220cm^2$ 다. 따라서 이 2개의 면적에 해당하는 원의 유효반경은 $r_e = 84mm$ 다. 끝으로 기하학적 요소 F 는 공진통 1개의 부피를 공기구멍 부피 2개의 합으로 나눈 값으로 약 33이다. 그러면 흡음이



(a) Air Transparent Soundproof Plates with Filters (b) Inside of the Mini-Chamber with A Microphone

Fig. 4. Experiment at KIMM

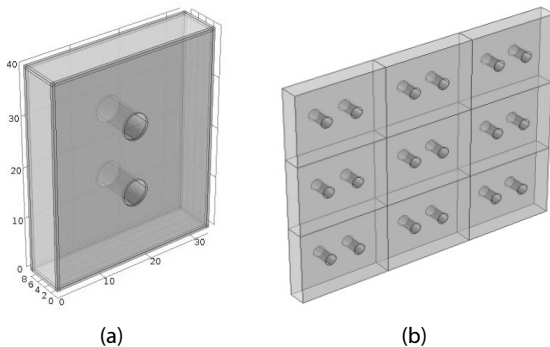


Fig. 3. Soundproof Plate Model. The Diameter of the Air Hole is 5cm and the Thickness of the Window is 8cm

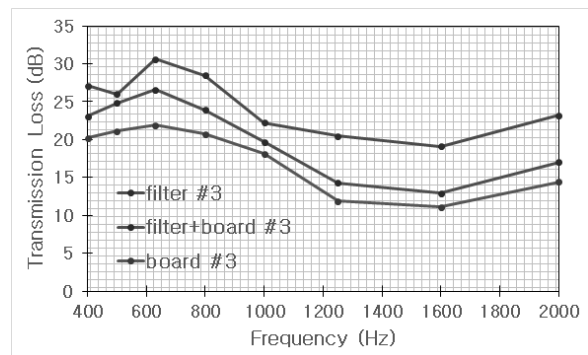


Fig. 5. Transmission Loss. The Red One is for Filtered for Two Holes Both. The Purple One is One Hole is Filtered and the Other Hole is Blocked by Board Paper. The Blue One is Blocked by Board Papers for Two Holes Both

일어나기 시작하는 공진주파수 f_0 는 대략 330Hz이며 주 차음구간은 330~1,900Hz이다. 하지만 감쇠를 위한 어느 정도의 두께가 필요한데 저주파일수록 두꺼워야 한다.

공진통의 유효두께가 140mm로 2배가 되면 차음성능은 향상되지만 Fig. 5의 2배가 되지는 않는다. 그 이유는 Eq. (2)처럼 두께가 선형 증가할 때 음파의 진폭은 지수적으로 감소하며, 공진에 의한 공진음이 기본 소음으로 존재하기 때문이다. 공진시 방음판 가까이 귀를 기울여보면 붐 소리가 나는데, 마치 바닷가에서 소리굽질을 귀에 대고 있을 때 나는 소리와 비슷하다.

이 실험결과는 기본적으로 이전에 했던 두 번의 실험과 같다 (Kim and Lee, 2014; Lee et al., 2014). 또한 최근에 영국의 사우스뱅크 대학에서 본 실험처럼 복수의 방음판에 구멍을 뚫고 그 공간을 비워 공진효과를 가지도록 방음판을 만들어 차음 및 풍압저감효과 실험을 하였다(Weber et al., 2015). 차음효과에 대해서는 본 연구단의 실험과 거의 동일한 결과를 얻었다.

4. 결론 및 과제

과동의 에들이 현상을 이용하여 방음과 통풍이 동시에 가능함을 보였다. 또한 방음할 주파수 영역을 선택하는 방법을 소개하였다. 차단 주파수영역이 각기 다른 복수의 방음판을 중첩하면 여러 파장의 음파를 선택하여 차단할 수 있다. 방음벽 가운데가 비어있어 가볍기 때문에 높게 설치할 수 있으며, 전체가 세포구조라서 조립하여 설치하기가 용이하고, 부분적으로 파손되더라도 해당부분만 교체하면 되기 때문에 유지보수가 쉽다. 또한 세포구조라 철거가 용이하고 철거 후 재사용도 가능하다. 구멍이 뚫려있어서 곤충은 물론이고 작은 새나 동물이 지나다닐 수 있어서 친환경적이다. 이 원리를 이용한 방음판은 도로변 주택이나 상가 혹은 사무실에도 설치가 가능한데 주택에 설치하여 약 1년 이상 관찰한 결과 아직까지는 큰 문제점은 나타나지 않았다(Kim, 2014).

하지만 이 방음벽 기술이 상용화되기 위해서는 앞으로는 많은 현장실험을 통한 개선이 필요하다. 청결유지를 위하여 내구성을 가진 필터가 장착되어야 하는데 공기와 임피던스가 일치해야 한다. 또한 방음에 영향을 안 주면서 방수를 위한 배수구를 어떻게 설치할 것인가도 중요하다.

도로에서 발생하는 소음의 주파수대는 차량의 종류나 타이어 및 노면상태에 따라 다르지만 대개 400Hz에서 2,500Hz 사이에 넓게 분포한다. 이 중에 파장이 짧은 2,000Hz이상의 고주파영역은 음원과 수음지역의 거리가 긴 경우 파동이 진행하는 동안 대부분 소실되므로 큰 문제가 안 되고, 파장이 긴 저주파 영역이 방음의 주요 대상이다.

이 기술은 모든 주파수 영역을 차단하지 못하고 특정한 주파수

구간만 차단할 수 있다. 또한 파장보다 큰 직경의 통기구멍을 만들 수 없다. 차음을 하더라도 공명에 의한 소음이 배경음으로 존재한다. 2개의 주파수대를 차단하려면 2장의 방음판을 겹쳐야 한다. 또한 차단하고자 하는 주파수대가 저주파일수록 방음판을 상당히 두껍게 하거나 통기구멍을 비스듬히 뚫어 통로길이를 증가시켜야 한다. 반면에 고주파인 경우에는 두께는 얇아도 되나 통기구멍의 직경을 작게 뚫어야 한다. 풍압을 얼마나 낮출 수 있는가에 관해서는 아직 정확한 실험이 이루어지 않았다. 충분한 실험이 이루어지면 이에 관련한 보고서나 논문을 발표할 예정이다.

감사의 글

본 연구는 국토교통과학기술진흥원(KAIA, 2014-2015)의 지원으로 이루어졌다.

References

- Beranek, L. L. (1986). *Acoustics*, AIP, New York, pp. 128-143.
- Connex CO. (2012). "Soundproofing with miracle holes." Available at: <https://www.youtube.com/watch?v=n7DqvNCr4d8> (Accessed: March 2, 2015).
- Fang, N., Xi, D., Xu, J., Ambati, M., Srituravanich, W., Sun, C. and Zhang, X. (2006). "Ultrasonic metamaterials with negative modulus." *Nature Mater.*, Vol. 5, No. 6, pp. 452-456.
- Hyun, T. J., Hong, S. J., Kim, H. B. and Lee, S. (2013). "Estimation of tire-pavement noise for asphalt pavement by mean profile depth." *Journal of the Korean Society of Civil Engineering*, Vol. 33, No. 4, pp. 1631-1638 (in Korean).
- Jo, S. H., Jang, J. S., Kim, W. S. and Kim, N. (2013). "A study on noise reduction of quiet pavement through the noise level prediction and the economic analysis." *Journal of the Korean Society of Civil Engineering*, Vol. 33, No. 3, pp. 1143-1151 (in Korean).
- Kim, S. H. (2014). "Air transparent soundproof window 4." Available at: <http://www.youtube.com/watch?v=VZ36PqHT9iw> (Accessed: March 2, 2015).
- Kim, S. H. and Das, M. P. (2012). "Seismic waveguide of metamaterials." *Modern Physics Letters B*, Vol. 26, No. 17, p. 1350140 (8 pages).
- Kim, S. H. and Das, M. P. (2013). "Artificial seismic shadow zone made of acoustic metamaterials." *Modern Physics Letters B*, Vol. 27, No. 20, p. 1350140 (9 pages).
- Kim, S. H. and Lee, S. H. (2014). "Air transparent soundproof window." *AIP Advances*, Vol. 4, p. 117123 (8 pages).
- Kinsler, L. E., Frey, A. R., Coppens, A. B. and Sanders, J. V. (1999). *Fundamentals of Acoustics, 4th ed.*, Wiley, New York. pp. 284-288.
- Lee, Y. M., Kim, S. H. and Lee, S. H. (2014). "A soundproof window that is transparent to air flow by acoustic metamaterials." *New Physics: Sae Mulli*, Vol. 64, No. 9, pp. 940-945 (in Korean).

- Nguyen, H., Sohei, N., Tsuyoshi, N. and Takashi, Y. (2009). "Sound propagation in soundproofing casement windows." *Applied Acoustics*, Vol. 70, pp. 1160-1167.
- Nguyen, H., Yusuke, T., Yuya, N., Sohei, N., Tsuyoshi, N. and Takashi, Y. (2012). "Prediction and experimental study of the acoustic soundproofing windows using a parallelepiped SVU." *The Open Acoustics Journal*, Vol. 5, pp. 8-15.
- Wang, X. (2010). "Acoustical mechanism for the extraordinary sound transmission through subwavelength apertures." *Appl. Phys. Lett.*, Vol. 96, No. 13, p. 134104.
- Weber, L. and Gomez-Agustina, L. (2015). "Investigation into the application of an acoustic metamaterial for sound attenuation with air-flow." *ICSV22 Proc.*, Florence, Italy, paper No. 52-2015-0508105747633, pp. 1-8.
- Yuya, N., Quang, N. H., Sohei, N., Tsuyoshi, N. and Takashi, Y. (2010). "The acoustic design of soundproofing doors and windows." *The Open Acoustics Journal*, Vol. 3, pp. 30-37.