

통기형 방음벽의 음향감쇠 특성에 대한 실험적 분석

An experimental analysis of the sound reduction characteristics of air transparent noise barriers

박찬재, 지용수*, 임재현*, 한찬훈†

(Chan-Jae Park, Yong-Soo Ji,* Jae-Hyun Lim,* and Chan-Hoon Haan†)

충북대학교 건축공학과, *(주)에스코알티에스

(Received October 31, 2016; accepted November 25, 2016)

초 록: 본 논문에서는 공기를 통과시켜 풍압을 저감하면서 소음을 제어할 수 있는 새로운 개념의 방음벽의 음향감쇠 특성을 분석하였다. 통기형 방음벽의 소음저감 특성을 조사하기 위하여 우선 개구부의 크기 및 공명기의 체적 등을 변화시켜 총 17가지 방음벽 모델의 음향감쇠계수를 측정하였다. 실험결과 공명기의 체적과 개구부의 면적에 따라 음향감쇠계수 값이 달라지고 있으며, 목표 주파수대역(400 ~ 1250 Hz)에서 단일 방음벽보다 이중 방음벽의 음향감쇠계수가 더 높게 나타났다. 이를 통해 개구부 및 공명기의 물리적 특성이 통기형 방음벽의 차음특성에 영향을 미친다는 점을 밝혀냈다.

핵심용어: 통기형 방음벽, 개구부, 공명기, 음향감쇠계수, 음향실험

ABSTRACT: The present study describes the acoustical characteristics of the new noise barriers which can control not only noise but also wind pressure by allowing air flow through barriers. In order to investigate the sound reduction index of the air transparent noise barrier, 17 models in total were examined with various size of openings and the volume of the resonators. As a result, it was found that the sound reduction index varies with the volume of the resonator and the area of the openings. Also, it was revealed that double layer of units has more sound reduction index than the single layer of unit at the frequency band from 400 Hz to 1250 Hz. This denoted that physical features of openings and resonators affect the sound reduction index of the air transparent noise barrier.

Keywords: Air transparent noise barrier, Opening, Resonator, Sound reduction index, Acoustic experiment

PACS numbers: 43.50.Gf, 43.55.Ti

1. 서 론

현대 사회가 발전될수록 도시의 인구 증가와 함께 운송수단의 수 또한 증가하고 있다. 이로 인해 도시의 환경 소음이 날로 증가하고 있는 추세이다.

이를 위해 대한민국 정부에서도 소음을 제어하기 위한 다양한 규제 및 시책을 운영하고 있다. 그 일환으로서 대한민국, 환경부는 국민으로 하여금 정온한 환경에서 생활할 수 있도록 하기 위해 1990년 “소음·

진동 규제법”을 제정하여 1991년부터 현재까지 시행하고 있으며^[1] 1990년 “중앙환경분쟁조정위원회”를 설립하여 다양한 환경관련 민원 및 분쟁을 해결하기 위해 노력하고 있다.^[2]

대한민국 정부의 이러한 노력에도 불구하고 생활 소음에 대한 국민의 피해는 증가하고 있다. 그 중에서도 주거지역의 소음 피해가 매우 심각한 수준으로 일반지역 내 전용주거지역의 경우 전국 44개 도시 중 낮에는 75%, 밤의 경우는 86%의 도시에서 환경기준을 초과하는 것으로 나타났으며 도로변지역 내 전용주거지역에서는 낮의 경우는 36%, 밤에는 68%의 도시에서 환경기준을 초과하고 있다.^[3] 이러한 이

†Corresponding author: Chan-Hoon Haan (chhaan@chungbuk.ac.kr)
Department of Architectural Engineering, Chungbuk National University, 1 Chungdae-ro, Seowon-gu, Cheongju, Chungbuk 28644, Republic of Korea
(Tel: 82-43-261-2438, Fax: 82-43-260-2438)

유로 대한민국에서는 매년 소음 관련 민원이 크게 증가하고 있는 추세이다. 특히 2014년도 소음·진동 관련 민원은 전년 대비 21% 증가하였으며 이는 대한민국의 환경분야 전체 민원의 45.9%를 차지하고 있을 만큼 그 심각성이 크다.^[4]

이러한 교통소음을 제어하고 관련 민원에 대응하기 위해 대한민국 정부는 방음벽에 2014년의 경우 약 750억, 2015년의 경우 약 900억 원의 막대한 예산을 투자하고 있다. 그 밖에도 방음벽 등으로 소음을 저감하기 어려운 지역의 도로교통소음을 줄이기 위해 2004년부터 약 124억 원의 예산을 투자해 저소음노면 포장도로를 설치하고 있으며 2015년에도 91억 원의 예산을 투자하고 있다.^[4,5]

하지만 저소음노면 포장도로의 경우 소음저감 효과가 약 5 dB로 비교적 낮을 뿐만 아니라 유지보수가 어렵다는 단점이 있다. 한편 방음벽 및 방음터널의 경우 소음저감 효과는 약 30 dB로 매우 높지만 그 특성상 매우 방대한 길이에 걸쳐 높게 설치해야하기 때문에 비용적인 부담이 크게 발생하는 것이 사실이다. 또한 근자에 들어 고층화된 아파트로 인해 보다 높은 방음벽이 요구되고 있는데 방음벽이 높아질수록 시공 및 공간적 제약이 발생하며 설치비용이 급격히 상승하고 무엇보다 파손에 의한 위험도가 증가하게 된다. 이러한 경우 방음벽의 구조적 문제로서 강풍이 발생할 경우 수직으로 설치된 방음벽에 가해지는 높은 풍압으로 인해 파손될 수 있다. 실제로 태풍에 의한 방음벽 파손사례가 매년 발생하고 있으며 이로 인한 2차 사고가 발생할 수 있어 이를 위한 대책이 필요한 실정이다.

한편 최근 공기를 통과시키면서 소음을 저감하는

방음벽 기술 개발이 활발히 진행되고 있다. 이 기술은 벽체에 헬름홀츠 공명기를 설치하여 확산 및 흡음을 통해 음향 메타물질을 분리해냄으로써 소음을 제어하는 방식이다. 당초 이 기술은 창호 혹은 벽체에 설치하여 실외에서 실내로 들어오는 생활소음을 제어하기 위해 개발되었으나 최근 이를 방음벽에 적용한다면 공기를 통과시켜 풍하중을 최소화시키고 소음을 제어할 수 있을 것으로 판단되어 현재 연구 개발 중에 있다.^[6]

본 논문에서는 공기를 통과시켜 풍하중을 최소화하면서도 높은 방음성능을 갖춘 통기형 방음벽의 음향감쇠 특성을 분석하기 위하여 공명기의 개구부 크기 및 공명기 체적을 변화시킨 뒤 음향감쇠계수를 측정해 분석하였다.

II. 통기형 방음벽의 차음 원리

통기형 방음벽의 기본 구성 원리는 Fig. 1에 나타난 바와 같다. 먼저 Fig. 1(a)와 같이 기본적인 형태의 헬름홀츠 공명기가 있다고 가정할 때 다수의 헬름홀츠 공명기를 Fig. 1(b)에 도식화한 바와 같이 중앙부가 상의 원형 개구부를 중심으로 배열할 수 있다. 이를 무한히 연결시킨다면 Fig. 1(c)와 같이 공명기는 하나의 체적을 갖는 형태로 통합될 수 있다. 이렇게 생성된 특수한 형태의 공명기를 Fig. 1(d)와 같이 시공이 용이한 육면체의 형태로 변형시킨 것이 바로 Fig. 1(e)와 같은 통기형 방음벽 단위개체(unit)인 것이다.

모든 단위 개체는 Fig. 2에 나타난 바와 같이 공기가 통과하는 원형 혹은 반원형의 ㉠ 통기부(surface)와 공기가 입사하여 공진함으로써 음에너지를 감쇠

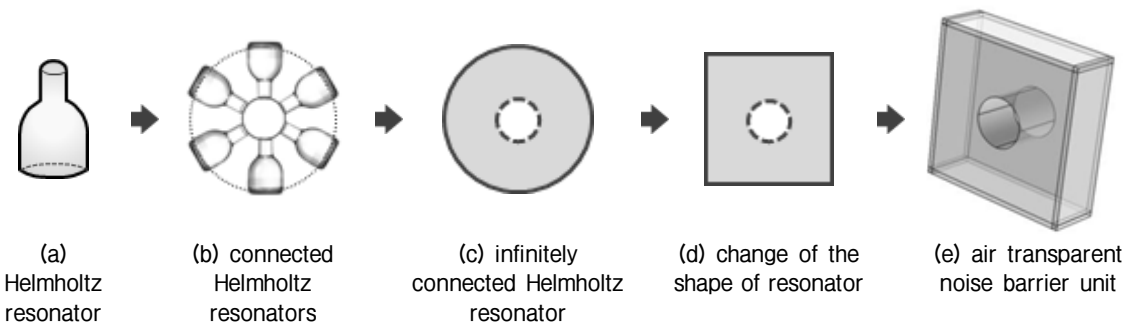


Fig. 1. Basic theory of the air transparent noise barrier unit design.

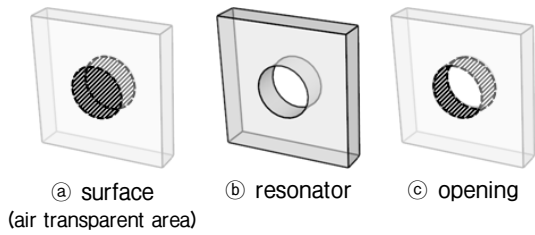


Fig. 2. The name of each part of the air transparent noise barrier unit.

시키는 사각형의 ① 공명기(resonator), 통기부와 공명기 사이에서 음에너지를 입사시키는 연결부인 ② 개구부(opening)로 나뉘어져 있다. 따라서 모든 통기형 방음벽 단위 개체의 개구부를 통해 입사된 공기는 주변부의 공명기로 유입될 수 있다.

한편 이렇게 생성된 단위개체는 수평 및 수직방향으로 연결되어 무한히 연장이 가능하다. 따라서 방음벽 시공현장에 필요한 길이를 산정하여 설치할 수 있다. 이렇게 설치된 통기형 방음벽은 공기 및 음에너지가 각각의 개구부를 통과할 때 표면에 가해지는 풍압을 제어함과 동시에 개구부 주변의 공명기로 음에너지가 유입되어 소음을 저감할 수 있다.

근자에 들어 유사한 형태의 차음 시스템이 개발되고 있는 추세이다. 특히 음향 루우버라는 이름을 가진 일부 시스템의 경우 사각형의 본체와 원형의 통기부를 가진다는 점에서 본 논문에서 제시하고 있는 통기형 방음벽과 외관상 유사한 형태를 갖고 있다. 그러나 음향 루우버의 경우 개구부에 파이프 등을 설치한 뒤 본체의 내부에 발포 폴리에틸렌 등을 채워 음에너지가 유입되지 않는 폐쇄형 구조로 만들어져있는 반면,^[7] 본 통기형 방음벽 시스템은 음에너

지가 개구부를 통해 본체인 공명기로 유입되는 개방형 구조라는 점에서 매우 큰 차이점이 있다. 즉, 음향 루우버의 주요한 차음 원리는 파이프 내부에서의 마찰에 의한 음에너지 저감으로 예상되며, 통기형 방음벽의 경우 공명기 내부에서의 공진에 의한 음에너지 저감으로 유추된다.

최근 연구결과에 따르면 고속도로의 주행소음은 일반적으로 저주파수대역에서 낮으며 주파수대역이 높아질수록 점차 상승하다가 1000 Hz 대역에서 최고점을 보인 뒤 그 이상의 고주파수대역으로 갈수록 다시 낮아지는 경향을 보이는 것으로 알려져 있다. 특히 콘크리트 노면을 가진 고속도로의 경우 대부분 1000 Hz 대역에서 소음의 최고점이 나타나지만 아스팔트 및 저소음 노면을 가진 고속도로의 경우 800 Hz부터 1000 Hz 까지 소음 최고점이 다양하게 분포하고 있다.^[8] 한편 대한민국 환경부에서 고시한 ‘방음벽의 성능 및 설치기준’에서는 방음벽을 구성하는 방음판의 음향성능에 대해 500 Hz의 경우 25 dB, 1000 Hz는 30 dB 이상의 음향감쇠계수를 만족할 수 있도록 명시하고 있다.^[9] 따라서 본 연구에서는 통기형 방음벽의 차음성능이 대한민국 환경부에서 고시한 ‘방음벽의 성능 및 설치기준’을 만족하는지 알아보기 위하여 목표 차음 주파수대역을 400 Hz에서 1250 Hz로 설정하였다.

본 논문에서는 크게 개구부의 형상 및 공명기의 체적, 방음벽의 적층 형태에 따른 음향감쇠계수의 변화를 알아보려고 한다. Fig. 3은 본 연구에 사용된 다양한 형태의 통기형 방음벽 단위개체의 형상을 표시한 것이다. Fig. 3 중 (a)부터 (c)는 단일형 방음벽으로써 C 타입인 (a)의 경우 중앙의 개구부가 완벽히 원

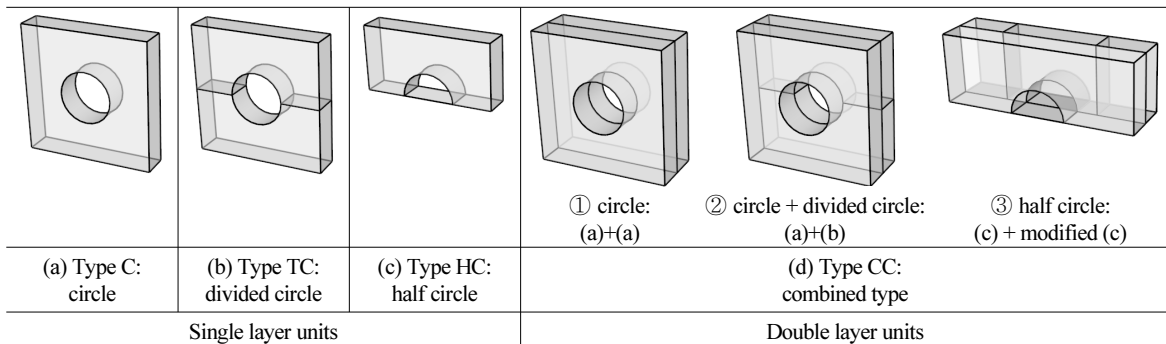


Fig. 3. Shape of the air transparent noise barrier units.

Table 1. List of the size of the air transparent noise barrier units.

Type	Opening			Resonator				Layer	Note	
	Shape	Radius	Area (S)	Width	Height	Depth	Volume (V)			
C-01	circle	0.050 m	0.008 m ²	0.386 m	0.327 m	0.035 m	0.0041 m ³	1		
C-02	circle	0.050 m	0.008 m ²	0.386 m	0.327 m	0.053 m	0.0062 m ³			
C-03	circle	0.050 m	0.008 m ²	0.386 m	0.327 m	0.070 m	0.0083 m ³			
C-04	circle	0.075 m	0.018 m ²	0.386 m	0.327 m	0.070 m	0.0076 m ³			
C-05	circle	0.050 m	0.008 m ²	0.386 m	0.327 m	0.130 m	0.0154 m ³			
C-06	circle	0.050 m	0.008 m ²	0.274 m	0.327 m	0.070 m	0.0057 m ³			
C-07	circle	0.075 m	0.018 m ²	0.270 m	0.230 m	0.100 m	0.0044 m ³			
TC-01	divided circle	0.050 m	0.004 m ²	0.386 m	0.161 m	0.070 m	0.0041 m ³			
TC-02	divided circle	0.050 m	0.004 m ²	0.274 m	0.161 m	0.070 m	0.0028 m ³			
TC-03	divided circle	0.075 m	0.009 m ²	0.270 m	0.110 m	0.100 m	0.0021 m ³			
HC-01	half circle	0.050 m	0.004 m ²	0.386 m	0.161 m	0.070 m	0.0041 m ³			
HC-02	half circle	0.086 m	0.012 m ²	0.386 m	0.327 m	0.070 m	0.0080 m ³			
CC-01	circle	0.050 m	0.008 m ²	0.386 m	0.327 m	0.070 m *	0.0083 m ³ [0.0083 m ³]		2	circle
CC-02	combined type	0.050 m	0.004 m ²	0.386 m	0.327 m	0.070 m *	0.0129 m ³ [0.0044 m ³]			circle+divided circle
CC-03	combined type	0.050 m	0.004 m ²	0.274 m	0.327 m	0.070 m *	0.0091 m ³ [0.0031 m ³]	circle+divided circle		
CC-04	combined type	0.075 m	0.009 m ²	0.270 m	0.230 m	0.100 m *	0.0083 m ³ [0.0031 m ³]	circle+divided circle		
CC-05	combined type	0.130 m	0.027 m ²	0.452 m	0.194 m	0.118 m *	0.0129 m ³ [0.0057 m ³]	half circle		

* : depth of single unit, [] : volume of rear resonator

형을 갖추고 있다. 한편 (b)에 도식된 TC 타입의 경우 C타입의 공명기를 반으로 분할한 형태이지만 개구부의 형태는 여전히 원형을 갖는다. 그러나 HC 타입인 그림 (c)의 경우 개구부 및 공명기 모두 C 타입을 반으로 분할한 형태로서 반원형의 개구부를 갖고 있다. 그림 (d)인 CC 타입은 단위 개체를 2겹으로 적층한 형태로서 각 개체의 체적은 공유되지 않는다. 다만 모델에 따라 다양한 형태의 개구부를 갖고 있다. 실험에 사용된 모든 통기형 방음벽 단위개체의 개구부 및 공명기의 크기, 각 부위의 사이즈와 같은 세부적인 내용은 Table 1에 자세히 명기되어 있다.

III. 통기형 방음벽의 음향감쇠계수

3.1 음향감쇠계수의 측정방법

목표 주파수대역의 차음을 위해 설계된 통기형 방음벽의 실제 음향감쇠계수를 평가하기 위하여 실험을 수행하였다. 모든 실험은 KS F 2808:2011^[10]의 건물 부재의 공기전달음 차단 성능 실험실 측정 방법을 준수하여 진행하고 평가 되었으며 보다 정확한

측정을 위하여 국가공인 시험기관인 한국건설생활시험연구원에 의뢰하여 시험을 수행하였다.

음향감쇠계수 측정이 수행된 장소는 충북 오창에 위치한 음향감쇠계수 측정용 잔향실로써 그 형상은 Fig. 4에 나타난 바와 같다. 즉, ISO 10140-5^[11]에 의거해 직육면체 형태로 제작되었으며 공진 및 정재파를 제어하기 위하여 내부에 다양한 크기의 확산체를 불균등하게 설치하였다. 시험실은 2개의 잔향실을 연결한 형태로써 격벽에 시료를 설치한 후 음원실에서 방사한 소리를 수음실에서 측정하는 방식으로 진행된다. 이때 공간에 의한 영향을 최소화하기 위하여 음원실 및 수음실의 평균 음압레벨 및 잔향시간 등을 측정해 보정함으로써 음향감쇠계수를 산출한다. 측정용 마이크로폰은 음원실 및 수음실 모두 5개씩 설치되어 있으며 모든 측정은 1/3 옥타브밴드로 이루어졌으며 100 Hz에서 5000 Hz의 중심주파수 대역으로 표시되었다. 시험에 사용된 장비의 종류 및 시험실의 건축적 제원은 Table 2에 나타난 바와 같다.

Fig. 5는 실제 실험 수행시 음향감쇠계수 시험실에 설치된 통기형 방음벽 시료의 모습을 보여주고 있

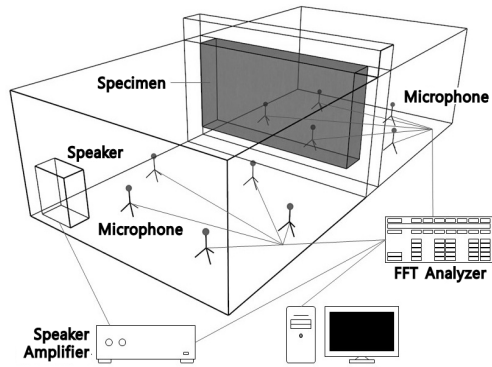


Fig. 4. Setup of sound reduction index measurement devices.

다. 시험 수행시 모든 방음벽 시료는 실제 규격에 맞게 제작되었으며 단위개체를 수평 및 수직으로 연결함으로써 너비와 높이를 조정하였다. 실제 시험실에 설치된 시료의 크기는 가로 1.96m, 세로 1.005m로 면적은 약 1.97m²이며 시료의 두께는 0.035m부터 0.24m로 매우 다양하다. 방음벽 시료는 시료대에 칸막이 벽체를 설치한 뒤 중앙부에 시험체를 고정시켰으며 주변부를 실란트로 마감하였다.

시험일시는 2015년 3월 24일부터 2015년 11월 27일에 걸쳐 총 30회 이상의 시험이 진행되었다. 실험시 수음실의 중간주파수대역 잔향시간 평균(RT_{mid})은 약 1.72s이며 배경소음은 500 Hz 및 1000 Hz 대역에서 평균 14.1 dB과 14.8 dB으로 나타났다.

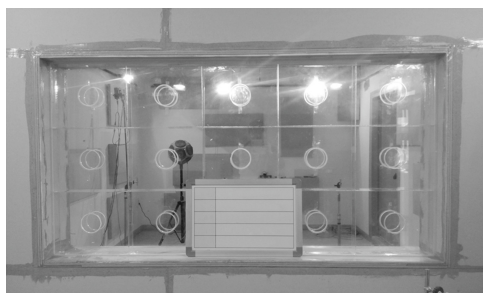


Fig. 5. Picture of the installed air transparent noise barrier in the reverberation chamber.

3.2 방음벽의 입구 개폐 방식에 따른 음향감쇠계수

통기형 방음벽의 구조적·물리적 특성에 따른 음향감쇠계수 값을 알아보기 위하여 개구부의 개폐방

Table 2. Measurement devices for sound reduction index test.

No.	Device	Model
1	Real time analyzer	PAK MK II, MÜLLER-BBM
2	1/2" condenser mic.	40AE, G.R.A.S.
3	Sound level calibrator	Cal-02, 01 dB
4	Power amplifier	CONA V2-5000, Inter-M
5	Loud speaker	DO12, FALM / SRX 725, JBL
6	Control PC	Workstation Xeon 4
7	Reverberation chamber	Rectangular type (ISO 10140-5 type)
		Reinforced concrete structure
		Wall thickness: 250 mm
		Volume
		sound source room: 57.02 m ³
		receiver room: 57.02 m ³

식에 따른 음향감쇠계수를 알아보았다. Fig. 6은 실험에 사용된 통기형 방음벽 단위개체의 개구부 개폐 방식을 도식화 한 것이다. Fig. 6 중 ㉠는 방음벽의 입구인 통기부가 폐쇄된 형태로 각 단위개체는 6면이 모두 폐쇄된 직육면체의 형태를 갖고 있다. Fig. 6의 ㉡는 공명기의 입구인 개구부가 폐쇄된 형태이며, ㉢는 일반적인 통기형 방음벽으로써 공명기의 개구부와 통기부가 개방된 형태를 나타내고 있다. 개구부 및 통기부를 폐쇄할 때 사용된 자재는 단위개체의 본체와 동일한 재료를 사용하였다. 다음 Fig. 7은 방음벽의 입구 개폐 방식에 따른 음향감쇠계수 측정 결과를 비교한 것이다.

측정 결과 단위 개체 표면의 통기부를 폐쇄한 ㉠의 경우 160 Hz 이상의 주파수대역에서 높은 음향감쇠계수를 나타내고 있음을 알 수 있었다. 특히 500 Hz에서 27.9 dB, 1000 Hz에서 34.3 dB로 나타나 대한민국 환경부에서 고시한 방음벽의 성능 및 설치기준^[11]을 만족하고 있다.

모든 입구를 개방한 ㉢의 경우 목표 주파수대역인 400 Hz부터 1250 Hz까지의 음향감쇠계수가 상대적으로 높게 나타났다. 이것은 ㉢가 ㉠와 달리 중앙의 통기부를 통해 공기 및 음에너지가 통과되어 공명기로 전달되어 공진되기 때문인 것으로 판단된다. 즉, ㉢의 경우 통과되는 음에너지가 공명기에 입사됨에 따라 마치 헬름홀츠 공명기와 같은 역할을 해 음 에너지를 저감시키기 때문에 해당 주파수대역의 음향감쇠계수가 높은 것으로 판단된다. 반면, 250 Hz 이

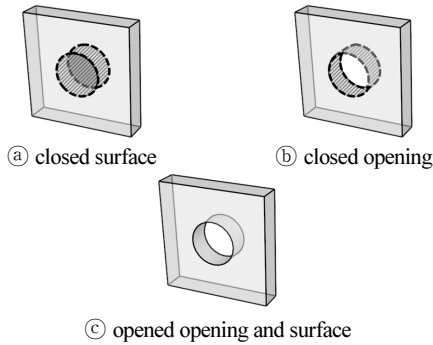


Fig. 6. Opening type of the air transparent noise barrier units.

하의 주파수대역에서 음향감쇠계수가 10 dB 이하로 낮게 나타나는데 이것은 해당 주파수대역이 투과됨으로써 나타나는 현상으로 사료된다. 또한 1600 Hz 이상의 주파수대역에서 음향감쇠계수가 약 15 dB 정도로 상대적으로 낮게 나타났는데, 이것은 고주파수대역의 직진성에 의해 일부 음에너지가 공명기로 유입되지 않고 통기부를 통해 그대로 통과되기 때문으로 보인다.

이러한 결과는 공명기의 개구부를 개방 혹은 폐쇄한 ①와 ②의 음향감쇠계수 측정결과를 비교함으로써 다시 한번 검증할 수 있다. 즉, 통기부는 개방시키고 공명기의 개구부를 폐쇄한 ②의 경우 전주파수대역에서 15 dB 이하의 낮은 음향감쇠계수를 보이고 있는데, 이것은 통기부를 통해 입사된 음에너지가

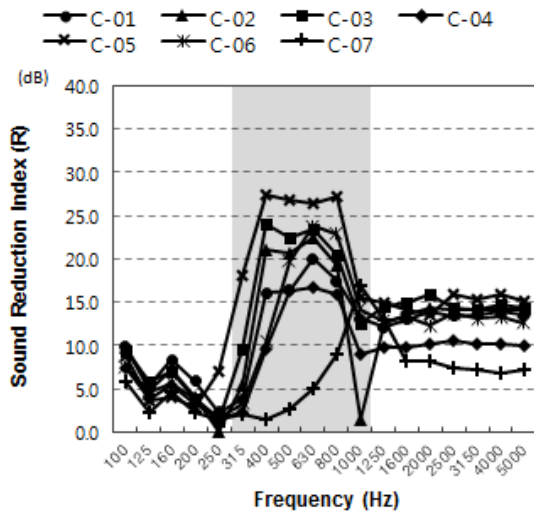


Fig. 8. Comparison of the sound reduction index of type C.

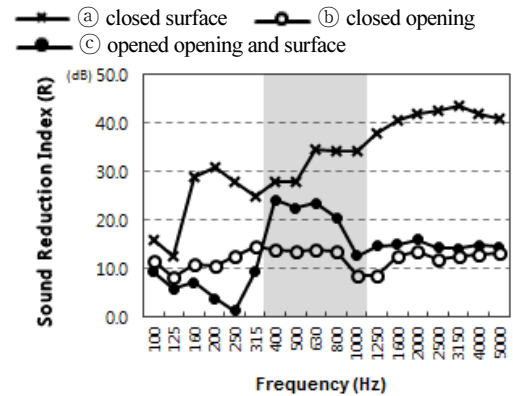


Fig. 7. Comparison of the sound reduction index by opening type.

개구부를 통해 공명기에 유입되지 못해 발생된 결과로 볼 수 있다. 다만 250 Hz 대역에서 ③의 음향감쇠계수가 0 dB에 가깝게 나타난 것을 볼 수 있는데, 이것은 공명기 내부로 유입된 음에너지가 체적 등에 영향을 받아 증폭된 것으로 보인다.

3.3 원형 개구부를 가진 단일 방음벽의 음향감쇠계수

Fig 8은 개구부의 형상이 원형인 단일형 방음벽인 C 타입의 음향감쇠계수 측정 결과를 주파수대역별로 도식화하여 비교한 것이다. 그림 중 회색 음영지역은 당초 설정한 목표 차음 주파수대역을 의미한

Table 3. Measurement result of the sound reduction index of type C.

Frequency (Hz)	Model of the specimen						
	C-01	C-02	C-03	C-04	C-05	C-06	C-07
100	9.8	9.8	9.3	7.4	8.8	7.6	5.8
125	5.5	4.9	5.8	3.9	3.6	4.6	2.3
160	8.3	7.3	7.1	5.5	4.1	5.7	4.7
200	5.9	4.0	3.8	3.2	2.9	3.9	2.2
250	2.3	0.0	1.3	1.6	7.1	1.7	1.4
315	3.8	5.4	9.5	2.2	18.2	3.3	2.1
400	16.1	21.0	24.1	9.5	27.4	10.4	1.5
500	16.4	20.6	22.4	16.4	26.8	19.7	2.6
630	20.0	22.5	23.4	16.7	26.5	23.8	5.1
800	17.5	19.2	20.4	16.0	27.2	22.9	8.9
1000	13.1	1.4	12.6	8.9	15.6	14.2	17.0
1250	12.1	12.5	14.6	9.7	15.0	12.8	12.9
1600	13.0	13.6	15.0	9.8	14.2	13.3	8.1
2000	13.9	14.4	15.9	10.2	13.6	12.3	8.2
2500	13.4	14.1	14.3	10.5	15.9	13.7	7.5
3150	13.6	14.2	14.1	10.1	15.3	13.1	7.3
4000	14.0	14.2	14.7	10.1	15.9	13.3	6.9
5000	13.5	14.2	14.4	9.9	15.2	12.6	7.2

다. Table 3는 C 타입의 음향감쇠계수 측정결과를 수치로써 보여주고 있다. 음향감쇠계수가 가장 높은 주파수대역을 보다 용이하게 확인하기 위하여 최고 값을 음영과 굵은 외곽선으로 표시하였다.

측정결과, 당초 계획한 바와 같이 모든 모델에서 희망 차음 주파수대역인 315Hz부터 1000Hz 대역에서 가장 높은 값을 나타내고 있었다. 이것은 당초 예측한 목표 차음주파수대역의 범위가 400 Hz부터 1250 Hz인 것과 연관성이 있다고 볼 수 있다. 한편 315 Hz 이하의 주파수대역에서 음향감쇠계수가 10 dB보다 낮게 나타났는데 이것은 동일 두께의 반사형 방음벽과 비교해 보아도 낮은 수치이다. 이것은 방음벽 시험체에 사용된 재료인 PMMA(Poly Methyl MethAcrylate)의 밀도가 낮고 중앙의 통기형 개구부로 음에너지가 직접 통과되어 발생한 현상으로 보인다. 반면 모든 모델에서 1250Hz 대역 이상의 음향감쇠계수가 상대적으로 높게 나타난 것을 알 수 있다. 이것은 방음벽의 표면에 의해 고주파수대역의 음에너지가 반사된 결과로 판단된다.

한편 C-07을 제외한 대부분의 방음벽 모델에서 특정 주파수대역에서만 최고값이 나타나는 것이 아니라 500Hz에서 1000Hz의 범위에 걸쳐 높은 음향감쇠계수가 나타나고 있는 것을 확인할 수 있다. 이것은 공명기의 형태가 사각형인 관계로 변 및 모서리의 체적이 서로 달라 다양한 고유진동수가 발생한 결과

로 유추된다. 그러나 C-07의 경우 공명기의 한 변의 길이가 각각 0.27 m, 0.23 m인데 비해 개구부의 지름이 약 0.15 m로 상대적으로 매우 큰 관계로 유효 공명기의 체적 또한 작기 때문인 것으로 판단된다.

3.4 반원형 개구부를 가진 단일 방음벽의 음향 감쇠계수

개구부의 형상이 반원형인 방음벽으로는 TC 타입과 HC 타입이 있다. 이 두 타입의 가장 큰 차이점은 HC 타입의 경우 반원형의 개구부 아래쪽에 격벽을 갖는다는 점이다. 또한 TC 타입의 경우 반원형 개구부를 서로 마주보고 설치하지만 HC 타입의 경우 반원형의 단면이 모두 하단에 설치하는 것 또한 중요한 차이점이다. 따라서 공명기에만 격벽을 갖는 TC 타입의 경우 정면에서 볼 때 개구부는 완벽히 원형으로 보이지만 HC 타입의 경우 개구부가 반원형으로 보여진다.

Fig. 9은 반원형의 개구부를 가진 방음벽인 TC와 HC 타입의 음향감쇠계수 측정 결과를 비교한 것이다. 그림에서 실선은 TC의 결과를 나타내며 점선은 HC의 측정 결과를 보여주고 있다. 또한 회색 음영은 목표 차음 주파수대역을 의미한다. Table 4는 TC 및 HC 타입의 음향감쇠계수 측정결과를 수치로써 보여주

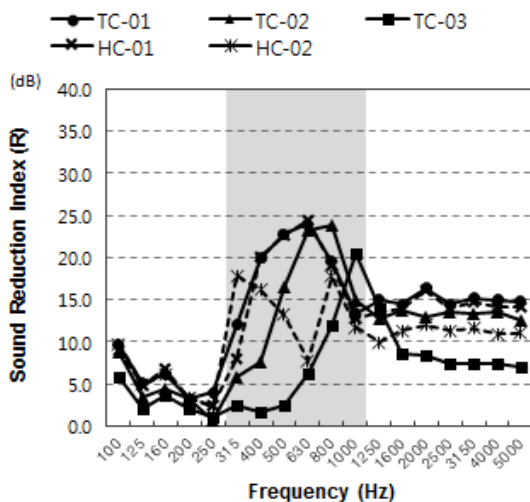


Fig. 9. Comparison of the sound reduction index of type TC and HC.

Table 4. Measurement result of the sound reduction index of type TC and HC.

Frequency (Hz)	Model of the specimen				
	Type TC			Type HC	
	TC-01	TC-02	TC-03	HC-01	HC-02
100	9.6	8.8	5.9	8.9	9.8
125	5.1	3.5	2.1	4.9	4.9
160	6.2	4.5	3.6	6.9	6.2
200	3.2	3.2	2.0	3.2	3.4
250	4.0	0.7	1.0	2.5	2.3
315	12.0	5.8	2.4	8.1	17.8
400	19.9	7.7	1.6	20.0	16.2
500	22.8	16.5	2.4	22.7	13.2
630	24.0	23.2	6.3	24.4	7.8
800	19.5	23.8	11.9	19.2	17.8
1000	13.4	15.0	20.4	12.8	11.8
1250	15.0	12.7	14.0	13.6	10.0
1600	14.5	13.7	8.6	14.0	11.3
2000	16.4	12.9	8.3	16.2	12.0
2500	14.5	13.5	7.5	13.9	11.3
3150	15.2	13.3	7.5	14.7	11.6
4000	15.0	13.6	7.5	14.2	10.9
5000	14.8	12.6	7.0	14.1	11.0

고 있다. 표의 내용 중 회색 음영과 굵은 선으로 표시된 수치는 측정된 음향감쇠계수의 최고점을 나타낸다. 다만 음향감쇠계수의 편차가 1 dB 미만인 경우 두 값을 모두 표기하였다.

그래프 분석 결과, C 타입과 마찬가지로 TC 및 HC 타입 모두 315 Hz부터 1000 Hz 대역 내에서 높은 차음성능을 나타내고 있었다. 또한 C 타입과 마찬가지로 250 Hz 이하의 저주파수대역에서 차음성능이 매우 낮고 1600 Hz 이상의 고주파수대역의 차음성능이 상대적으로 높은 것 또한 통기형 방음벽의 전반적인 특성으로 보인다.

한편 모델 TC-01과 HC-01의 경우 전주파수대역에서 음향감쇠계수가 매우 유사한 것으로 나타났다. 두 모델은 개구부가 완전히 개방된 TC-01과 달리 HC-01은 원형의 개구부 내부에 격벽이 설치되어 있는 형태이다. 즉 개구부의 내부에 설치된 격벽의 유무를 제외하고 개구부 넓이 및 공명기 체적이 동일하다. 따라서 이 결과를 통해 반원형의 통기부 내부의 격벽은 음향감쇠계수에 큰 영향을 미치지 않음을 알 수 있다.

모델 TC-03의 경우 1000 Hz에서 음향감쇠계수의 최고점을 보이고 있지만 다른 주파수대역에서는 상대적으로 낮은 것을 알 수 있다. 이것은 원형 개구부를 가진 모델 중 C-07의 주파수특성과 유사한 경향을 보이고 있다. 실제로 TC-03은 모델 C-07의 공명기 내부에 격벽을 설치한 모델로써 따라서 공명기에 비해

개구부의 크기가 커 발생한 현상으로 판단된다.

3.5 이중 방음벽의 음향감쇠계수

Fig. 10과 Table 5는 이중형 방음벽의 음향감쇠계수 측정결과를 각각 그래프 및 수치로 정리한 것이다. 그림 및 표에 표시되어 있는 음영 및 표 내부의 굵은 선은 단일형 방음벽의 분석에서 수행한 방법과 동일하다.

이중 방음벽의 음향감쇠계수 측정결과 중간주파수대역의 음향감쇠계수가 크게 향상된 것을 알 수 있었다. 특히 500 Hz를 기준으로 볼 때 단일형 방음벽(C-05)의 최대값이 26.8 dB인데 반해 이중형 방음벽(CC-05)의 경우 34.6 dB로 약 12.2 dB이 커진 것을 알 수 있다. 또한 1000 Hz를 기준으로 비교해 볼 때 단일형 방음벽(TC-03)이 20.4 dB, 이중형 방음벽(CC-04)이 31.6 dB로 나타나 약 11.2 dB의 큰 편차를 보이고 있다. 이것은 통기형 방음벽의 공명기를 2중으로 배치함으로써 공명현상 또한 2중으로 발생함에 따라 그 효과가 더욱 커진 것으로 평가된다. 그러나 저주파수대역의 음향감쇠계수가 낮고 고주파수대역에서 높은 주파수특성은 단일형 방음벽과 유사한 것으로 나타났다.

한편 모델 CC-05의 경우 음향감쇠계수의 최고점이 500 Hz와 630 Hz와 같은 상대적으로 낮은 주파수

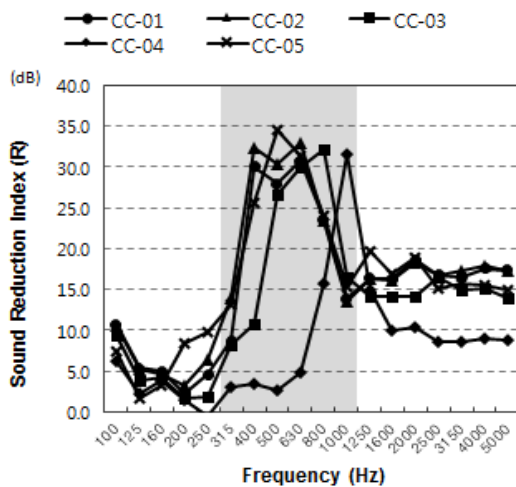


Fig. 10. Comparison of the sound reduction index of type CC.

Table 5. Measurement result of the sound reduction index of type CC.

Frequency (Hz)	Model of the specimen				
	CC-01	CC-02	CC-03	CC-04	CC-05
100	10.7	10.5	9.4	6.3	7.5
125	5.4	5.2	3.9	2.3	1.7
160	5.0	4.6	4.3	3.9	3.3
200	2.3	3.2	1.6	1.4	8.5
250	4.6	6.4	1.8	-0.5	9.7
315	8.7	13.9	8.1	3.0	13.2
400	30.0	32.4	10.7	3.4	25.7
500	28.0	30.3	26.6	2.7	34.6
630	30.7	33.0	29.9	4.8	31.5
800	23.6	23.5	32.2	15.8	24.1
1000	13.9	13.6	16.6	31.6	15.4
1250	16.4	16.4	14.1	14.9	19.6
1600	16.3	16.2	14.2	10.0	16.8
2000	18.7	18.4	14.1	10.4	19.0
2500	16.8	16.8	16.5	8.5	15.2
3150	16.6	17.3	15.0	8.6	15.7
4000	17.6	18.0	15.1	9.0	15.5
5000	17.4	17.4	14.0	8.7	14.8

대역에서 나타나고 있음을 알 수 있다. 이것은 CC-05의 단위 개체가 개구부의 면적은 크지만 공명기의 세로에 비해 가로 길이가 상대적으로 매우 길어 유효 공명기 체적이 크기 때문일 것으로 사료된다. 또한 공명기의 깊이가 0.13 m로 가장 깊어 상대적으로 저주파수대역에서의 공명현상이 충분히 발생되었기 때문인 것으로 판단된다. 이러한 현상은 단일 방음벽에서도 발견되는데, 개구부의 면적은 동일하지만 공명기의 깊이가 0.07 m인 C-03과 0.13 m인 C-05의 측정결과에서 알 수 있다. 모델 C-05의 경우 400 Hz부터 1250 Hz 대역에서 C-03 보다 평균적으로 약 3.5 dB 상승한데 반해 저주파수대역인 315 Hz 대역의 경우 8.7 dB로 크게 상승했기 때문이다.

또한 모델 CC-01과 CC-02의 음향감쇠계수 결과 비교를 통해 같은 단위개체를 2중으로 연결하는 것보다 서로 다른 단위개체를 연결하는 것이 동일 주파수대역(415 ~ 630 Hz)의 음향감쇠계수를 평균적으로 약 2.3 dB 향상시키는 것을 알 수 있었다.

IV. 결 론

본 연구는 방음벽의 구조체가 공기를 통과시킴으로써 표면에서 발생하는 풍압을 현저히 저감시키고 동시에 소음을 제어할 수 있는 새롭고 창의적인 방식의 방음벽을 제안하고 그 성능을 검증하였다. 특히 특정 주파수대역에서의 높은 음향감쇠계수를 유도하기 위해 개구부의 크기, 공명기의 체적 및 깊이의 변화에 따른 차이를 분석하였다. 본 연구의 결과를 요약하면 아래와 같다.

- 1) 공명기의 체적과 개구부의 면적에 따라 음향감쇠계수 값이 달라지며 최대값이 나타나는 주파수대역 또한 달라진다.
- 2) 목표 주파수대역(400 ~ 1250 Hz)에서 단일 방음벽보다 이중 방음벽의 음향감쇠계수가 더 높게 나타났다.
- 3) 이중형 방음벽의 경우 음향감쇠계수의 최고점이 2개 이상의 주파수대역에서 발생하거나, 넓은 주파수대역에 걸쳐 있는 것으로 나타났다.

본 논문은 현재 개발 중인 통기형 방음벽의 차음 성능을 분석하며 방음벽으로써의 가능성을 제시하고 나아가 개선방안에 대해 논의하는데 그 목적이 있다. 그러나 현재까지 개발된 통기형 방음벽은 대한민국 환경부에서 제시한 방음판의 성능기준을 만족하지 못하고 있다는 한계를 가지고 있다. 따라서 본 연구의 내용을 바탕으로 통기형 방음벽의 지속적인 개선을 진행할 예정이며 이를 통해 실제 현장에 적용 가능한 성능을 확보하고자 한다.

감사의 글

본 연구는 국토교통부 국토교통기술사업화지원 사업의 연구비지원(과제번호 15TBIP-C081926-02)에 의해 수행되었다.

References

1. Ministry of Environment of Korea, *Noise and Vibration Control Act* (in Korean), Act No.13805, 2016.
2. *Environmental Dispute Resolution Commission*, <http://ecc.me.go.kr>, 2016.
3. Ministry of Environment of Korea, "Operating report for environmental noise measuring network in 2013," (in Korean) Ministry of Environment, 2014.
4. Ministry of Environment of Korea, "Noise and vibration management policy: The actual progress report for local government in 2014," (in Korean) Ministry of Environment, 2016.
5. Ministry of Environment of Korea, "Noise and vibration management policy: The actual progress report for local government in 2004," (in Korean) Ministry of Environment, 2005.
6. S. H. Kim and S. H. Lee, "Air transparent soundproof window," *AIP Advances*, 1-4 (2013).
7. T. M. Kim and J. T. Kim, "Noise protection roof: Partial opening effect for noise reduction" (in Korean), *J. Kr. Soc. Railway*, **18**, 522-532 (2015).
8. C. H. Kim, T. S. C, and D. S. Kim, "Characteristics analysis of highway traffic noise" (in Korean), *KSNVE*, **22**, 1191-1198 (2012).
9. Ministry of Environment of Korea, *Standard of the acoustical performance and installation of noise barrier* (in Korean), Notification No.2002-184, 2002.
10. KS F 2808, *Laboratory Measurements of Airborne Sound Insulation of Building Elements* (in Korean),

Korea Standard, 2011.

11. ISO 10140-5, *Acoustics - Laboratory Measurement of Sound Insulation of Building Elements*, American National Standard, 2010.

저자 약력

▶ 박 찬 재 (Chan-Jae Park)



2006년 2월: 충북대학교 건축공학과 학사
2009년 2월: 충북대학교 건축공학과 석사
2014년 2월: 충북대학교 건축공학과 박사
2014년 3월 ~ 현재: 충북대학교 건축음향 연구실 연구원

▶ 지 용 수 (Yong-Soo Ji)



1998년 2월: 인천대학교 토목공학과 학사
2000년 2월: 인천대학교 토목공학과 석사
2016년 8월: 인천대학교 토목공학과 박사
2002년 ~ 현재: 에스코알티에스 이사

▶ 임 재 현 (Jae-Hyun Lim)



2008년 2월: 충북대학교 구조시스템공학과 학사
2015년 2월 ~ 현재: 에스코알티에스 선임연구원

▶ 한 찬 훈 (Chan-Hoon Haan)



1983년 2월: 홍익대학교 건축학과 학사
1985년 2월: 연세대학교 건축공학과 석사
1993년 12월: University of Sydney 박사
1994년 9월 ~ 현재: 충북대학교 건축공학과 교수