J. Kor. Soc. Environ. Eng., 35(8), 592~597, 2013
Original Paper
ISSN 1225-5025

폴리머 계열 방음패널의 차음특성 비교 분석

Sound Insulation Properties of Polymer Soundproof Panels

이우미* · 이주행** · 손진희*** · 김일호*,**† · 박재로*,** · 김광수*,**
Woo-Mi Lee* · Ju Haeng Lee** · Jin-Hee Son*** · Il-Ho Kim*,**†
Jae-Roh Park*,** · Kwang Soo Kim*,**

*한국건설기술연구원 환경연구실 · **과학기술연합대학원대학교 건설환경공학과 · ***(사)한국소음진동기술사회
*Environmental Engineering Research Division, Korea Institute of Construction Technology
**Department of Construction Environmental Engineering, University of Science and Technology
***Korea Noise Vibration Professional Engineer Association

(2013년 7월 8일 접수, 2013년 8월 29일 채택)

Abstract : It is widely known that the sound insulation of soundproof panel is highly correlated to two factors, surface density of material and the frequency of noise. Accordingly, the character of traffic noise released in actual situation is important requisite for determining thickness to determine surface density and material of soundproof panel. This present study selected polymer panel with advantage of light weight and workability and evaluates according to frequency of traffic noise. Polypropylene (PP) and high-density polyethylene (HDPE) were selected as subjects based on economic valuation and efficiency. The sound transmission loss of selected polymer panels were compared with the currently used panels such as polycarbonate (PC) and polymethyl methacrylate (PMMA) depending on thickness and materials. As a result, PC showed the highest sound transmission loss followed by PMMA, HDPE, and PP in range of mass law. In terms of acoustic performance on thickness, the transmission loss increased with thickness of soundproof panel meanwhile coincidence dip was observed in lower frequency where had reduced transmission loss. Therefore, it is suggested that after determining target frequency, the kind of materials and thickness of soundproof panel need to be designed so that traffic noise can be more efficiently reduced.
Key Words : *Noise Barrier, Soundproof Panel, Sound Transmission Loss, Sound Insulation Properties*

요약 : 방음패널의 차음특성은 재료의 면밀도와 소음의 주파수와 높은 상관관계가 있으므로 방음패널의 두께 및 재료의 선택에 있어 실제 도로소음의 특성을 반영하는 것은 매우 중요하다. 본 연구에서는 재료의 경량 및 시공측면에서 수요가 증가하고 있는 플라스틱 소재 중 방음패널로 활용 가능한 소재를 선정하여 도로교통 소음의 주파수에 따른 차음특성을 평가하였다. 대상 패널은 물리적 특성을 조사하여 효율성 및 경제성 평가를 통해 polypropylene (PP)과 high-density polyethylene (HDPE)를 선정하였고 현재 방음패널의 재료로 사용되고 있는 polycarbonate (PC)와 polymethyl methacrylate (PMMA)와의 재료 및 두께에 따른 차음특성을 비교하였다. 그 결과 방음패널의 차음특성은 재료의 면밀도에 비례하여 PC, PMMA, HDPE, 그리고 PP순으로 높은 투과손실치를 나타내었다. 두께별 차음특성의 경우, 방음패널 두께에 비례하여 투과손실이 증가하나 일치효과로 인해 투과손실이 감소하는 주파수가 낮아짐을 확인할 수 있었다. 결론적으로, 저감하고자 하는 소음의 주파수대역을 먼저 파악하고 방음패널의 재질과 두께에 따른 주파수별 차음특성을 파악하여 적용한다면 효과적으로 소음을 저감할 수 있을 것으로 판단된다.
주제어 : 방음벽, 방음패널, 음향투과손실, 차음특성

1. 서 론

도시화가 증가함에 따라 도로교통 소음에 대한 피해가 점차 증가하고 있는 추세이다. 소음은 인간의 건강과도 직결되는 사회문제로 WHO에 따르면 유럽인구의 44% 이상이 잠재적으로 인체건강에 위해를 야기할 수 있는 수준의 소음(55 dB(A)에 노출되어 있다고 한다.[1] 우리나라의 경우 전 국민의 52.7%가 도로교통소음에 노출되어있어 지속적인 민원이 발생함에 따라 국민권익위원회에서는 도로교통 소음 피해 민원 대책을 수립한바 있다.[2] 특히 이러한 도로소음 피해는 야간에 더 증가하는 것으로 조사되었으며 '환경정책기본법'에서 정하고 있는 우리나라의 현행 도로변 실외 소음기준(주거지역 기준으로 주간: 65 dB(A), 야간: 55 dB(A))은 WHO의 소음권고안(주거지역의 실외기준으로 35 dB(A))보다 높은 기준을 적용하고 있어 국민건강의 피해가 우려된다. WHO에서 제시하고 있는 환경별 소음수준과 인체건강 관련 가이드라인에 따르면 55 dB(A)의 소음은 인체에 심각한 스트레스를 야기할 수 있으며 30 dB(A)의 소음은 불면증을 유발한다고 언급되어 있다.[3]

방음벽은 도로소음 저감을 위해 가장 보편적으로 사용되는 방법 중의 하나로 방음패널을 구성하는 재질에 따라 금속재, 콘크리트, 목재, 유리, 플라스틱 방음벽 등으로 구분할 수 있다. 특히 플라스틱 재료를 사용한 방음패널의 경우 같은 두께의 유리보다 경량이고 시공이 용이하며 유연한 특성

† Corresponding author E-mail: ihkim@kict.re.kr Tel: 031-910-0649 Fax: 031-910-0291

으로 가공이 쉽다는 장점 때문에 그 수요가 증가하고 있다.[4] 현재 많이 사용되고 있는 플라스틱 방음패널의 재료로는 폴리머계인 polycarbonate (PC)와 polymethyl methacrylate (PMMA)가 있다. 방음패널의 차음특성은 재료의 면밀도 및 소음의 주파수와 높은 상관관계가 있으므로[5] 방음패널의 두께 및 재료의 선택에 있어서 실제 도로소음의 특성을 반영하는 것은 매우 중요하다. 도로교통소음의 90%는 250 Hz~4 kHz 범위에 포함되므로,[6] 해당 주파수 영역의 차음성능이 우수한 방음패널을 선정해야 한다. 따라서 본 연구에서는 현재 통용되고 있는 PC와 PMMA의 차음특성을 실험적으로 평가하여 도로소음의 주파수 특성과 비교하고, 그 외에 방음패널로 활용이 가능한 플라스틱 소재의 물리적 특성을 조사하여 효율성 및 경제성이 상대적으로 우수한 소재를 선정한 후 실험을 통해 차음특성을 비교 평가하였다. 이와 같은 플라스틱 소재별 방음패널의 두께 및 도로소음 주파수에 초점을 맞춘 차음특성 분석 결과는 향후 방음벽 설계시 사용될 수 있는 기초자료가 되도록 하고자 하였다.

2. 이론적 배경

일반적으로 재료의 차음성능 평가는 음원실과 수음실 사이에 일정한 규격의 재료로 막아 놓고 음원실과 수음실의 음을 측정하여 성능을 평가하게 되는데 이를 투과손실(Transmission loss, TL)로 나타낸다. 투과손실은 입사음의 세기(I_i)과 투과음의 세기(I_t)의 비(투과율)에 로그함수를 취한 값으로 나타내며 식 (1), (2)와 같다.[5]

$$\text{투과율} : \tau = \frac{I_t}{I_i} \tag{1}$$

$$\text{투과손실} : TL = 10\log\left(\frac{1}{\tau}\right) \tag{2}$$

단일패널의 차음특성은 주파수에 따라 다음과 같이 4개의 영역으로 나뉘게 된다(Fig. 1).[5,7] 첫 번째 영역은 사용자재의 강성에 지배되는 강성제어영역(Stiffness controlled region)으로, 강성이 클수록 투과손실이 감소하여 옥타브당 6 dB씩 낮아진다. 두 번째 영역은 공진제어영역(Resonance controlled region)으로 차음벽과 이를 지지하는 구조체에 공진이 발생하여 투과손실이 증가하거나 감소하는 영역이다. 세 번째는 질량제어영역(Mass controlled region)으로 투과손실이 옥타브당 6 dB씩 증가하는 영역이다. 단일패널의 투과손실은 이 영역에서 다음의 식 (3)과 같은 상관관계를 가지며 m와 f는 각각 면밀도(kg/m^2)와 주파수(Hz)를 나타낸다.

$$TL = 20\log(mf) - 47 \tag{3}$$

질량법칙에 의하면 질량(두께) 또는 주파수가 2배가 되면 투과손실이 6 dB 증가한다. 따라서 방음패널의 투과손실은 재료의 면밀도와 높은 상관관계를 가지게 된다. 네 번째로 차음벽의 굴곡파와 입사파간 일종의 공진현상에 투과손실이 저하되는 영역으로 일치효과영역(Coincident effect controlled region)이라고 한다. 일치효과 주파수는 다음의 식 (4)와 같이 패널의 두께에 반비례한다.[8]

$$\text{Coincidence frequency} \propto \frac{1}{\text{panel thickeness}} \tag{4}$$

단일판으로 구성된 방음패널의 설계시 세 번째 질량제어

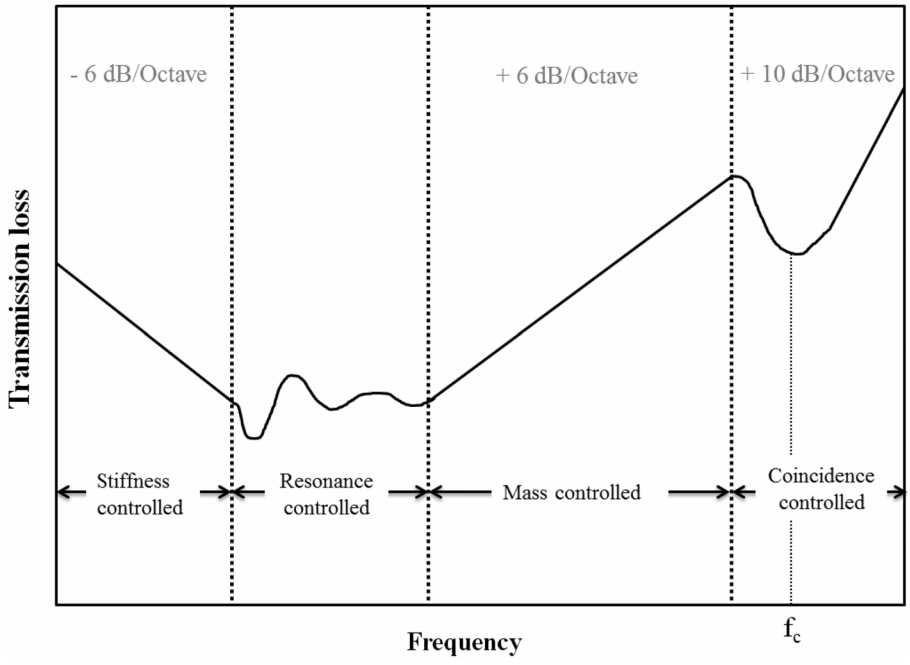

Fig. 1. Characteristic transmission loss of a bounded, homogeneous, single panel.[5]

영역과 네 번째 일치효과영역이 중요한 요인으로 작용한다. 따라서 패널의 두께를 설계할 때 질량법칙에 의해 두께가 2배가 되면 차음효과가 6 dB 커지지만 일치효과주파수는 패널의 두께에 반비례하기 때문에 투과손실이 저하되는 주파수가 낮아지게 되므로 패널의 두께를 증가시킬 때는 차음하고자 하는 소음이 일치효과영역 주파수에 해당하여 투과손실이 저하되지 않도록 주의해야 한다.

3. 재료 및 방법

3.1. 시험재료 선정

차음특성평가에 앞서 방음패널로 이용 가능한 소재들을 조사하여 효율성 및 경제성 측면에서 활용 가능한 소재를 추출하였다. 현재 방음패널의 재료로 사용되고 있는 PC, PMMA와 동일한 폴리머계소재인 polypropylene (PP)와 high-density polyethylene (HDPE) 그리고 불소수지계인 ethylene chloro-trifluoroethylene (ECTFE)와 ethylene tetra fluoro ethylene (ETFE) 등을 효율성 및 경제성 측면에서 방음패널로의 활용성을 비교하였다(Table 1). ECTFE와 ETFE의 경우 경량이고 내구성도 좋으나 고비용으로 경제적 측면에서 활용성이 낮았다. 반면 PP와 HDPE는 물성특성 및 비용측면에서 PC 및 PMMA와 비슷한 것으로 조사되었다. 따라서 PP와 HDPE를 선정하고 이 두 재료의 차음특성은 현재 방음패널의 재료로 사용되고 있는 PC, PMMA의 차음특성과 비교하여 기존 재료들 대비 방음패널로의 활용성을 평가하였다.

3.2. 시험체 준비

시험에 사용한 방음패널은 PC (1.2 g/cm^2), PMMA (1.19 g/cm^2), PP (0.91 g/cm^2), 그리고 HDPE (0.96 g/cm^2)로 각 패널은 가로, 세로 각각 1,000 × 1,000 mm 크기이며, 패널두께를 4 mm, 8 mm로 준비하였다. 각 재료별 4, 8 mm의 두께를 갖는 패널은 두 개의 우레탄코팅을 한 철제프레임(가로 1,098 × 세로 1,098 mm) 사이에 패널을 고정하여 실험체를 준비하였다(Fig. 2).

3.3. 음향투과손실음 측정

투과손실음은 KS F 2808:2011 건물부재의 공기전달음 차단 성능 실험실 측정방법[9]에 준하여 평가되었다. 실험체는 실험설치용 개구부에 설치한 후 석고보드와 glass wool을 이용하여 실험체틀과 실험체 사이의 틈새를 차단하여 실험하

Table 1. Characteristics of candidate materials as soundproofing panel

Classification		PC	PMMA	PP	HDPE	ECTFE	ETFE
Properties	Distortion temperature (℃)	134-140	74-99	95	130 (melting point)	77-116	270 (melting point)
	Coefficient of linear expansion (mm/m℃)	6-7	7-8	11	0.2	0.8	-
	Tensile strength (MPa)	58.8-68.6	48.0-75.5	33	31.4	41.1-48.0	40-45
Economics	Price	20,000 won/m^2	52,000 won/m^2	10,000 won/m^2	20,000 won/m^2	3,000,000 won/m^2	80,000~90,000 won/m^2

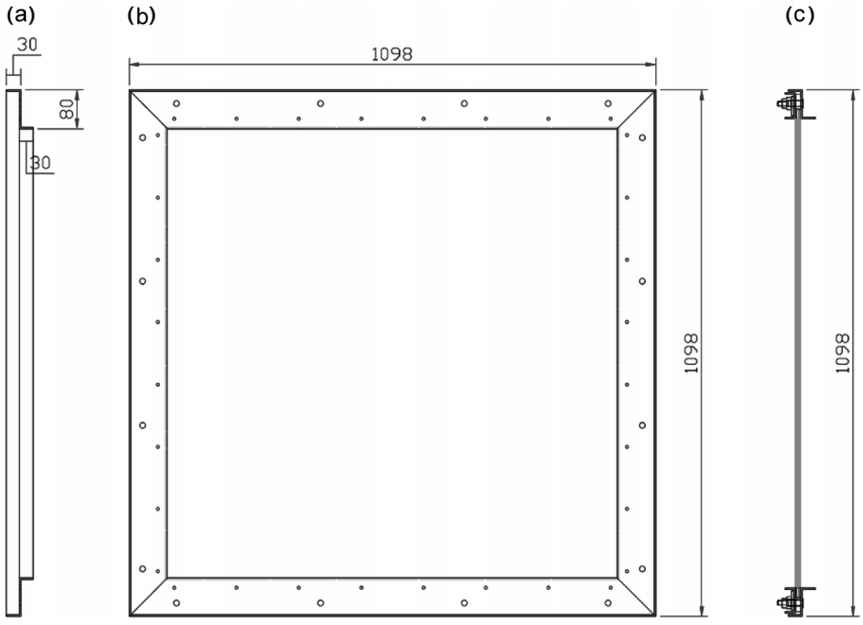

Fig. 2. Specimen image for sound transmission loss measurement; (A) side view, (B) front view, and (C) sectional view.

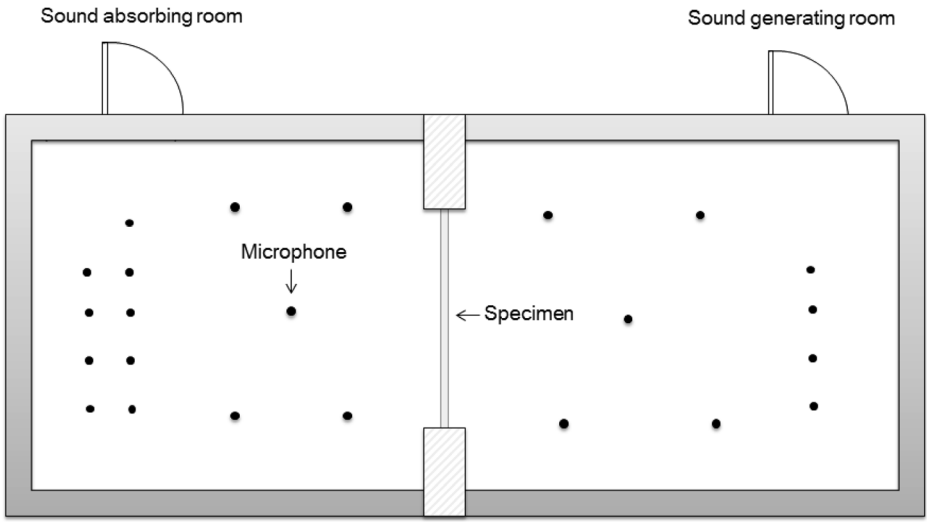

Fig. 3. Scheme of the acoustical laboratory.

였다. 음원용과 수음용 잔향실의 체적은 각각 57, 52 m^3이며(Fig. 3), 측정환경의 온도는 20.0 ± 2.0℃이고 상대습도는 54.0 ± 2.0% R.H이다. 투과손실음은 100 Hz부터 5 KHz까지 1/3옥타브밴드로 측정하였다.

4. 결과 및 고찰

4.1. 방음패널 재질별 차음특성

Fig. 4는 4 mm 두께의 PC, PMMA, HDPE 그리고 PP의

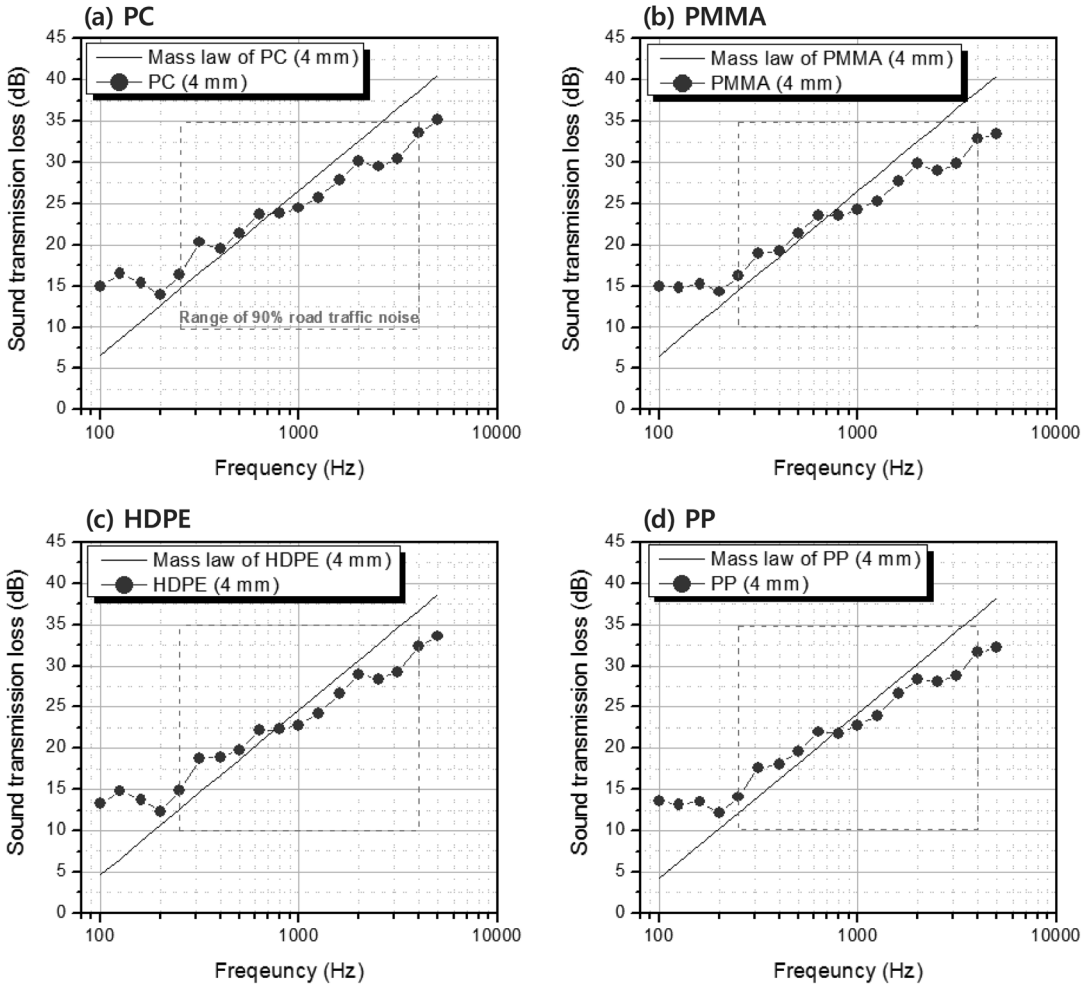

Fig. 4. Sound transmission loss of 4 mm thickness panels with (A) PC, (B) PMMA, (C) HDPE, and (D) PP panels.

음향투과손실치를 나타낸 것이다. 4개 재료 모두 800 Hz 이하의 주파수 대역에서는 질량법칙에 따른 이론적 투과손실치보다 더 높은 투과손실치를 나타내었다. 반면 800 Hz 이상의 고주파수영역에서는 4개 재료 모두에서 이론적 질량법칙에 준한 투과손실치보다 실측한 투과손실치가 낮게 나타났다. 도로교통소음의 90%에 해당하는 주파수범위인 250 Hz~4 KHz까지 차음특성을 분석하였을 때,[6] 250 Hz와 도로교통소음의 영역의 에너지가 가장 높은 1 KHz에서 PC와 PMMA 그리고 HDPE와 PP의 투과손실치가 각각 비슷한 수준으로 확인되었다. 4개의 재료중 전 주파수영역대에서 투과손실치가 가장 높은 PC를 기준으로 각 재질별 투과손실치를 비교했을 때 PMMA는 PC와 비슷한 수준이었고 HDPE와 PP는 PC에 비해 각각 평균 1 dB(A), 2 dB(A) 정도 투과손실치가 낮았다(Table 2). 한편 8 mm 두께의 패널의 경우도 4 mm 두께의 패널과 동일하게 모든 재료에서 800 Hz를 기준으로 질량법칙보다 투과손실이 감소하는 것이 확인되었다(Fig. 5). PC기준으로 HDPE와 PP의 차음성능은 각각 2 dB(A)와 3 dB(A) 감소하였다(Table 2). 한편 각 재료별 투과손실치는 4 mm와 8 mm 모두 현재 투명형 방음패널의 재료로 사용되고 있는 PC가 가장 높았으며 그 뒤로 PMMA > HDPE > PP순으로 높은 투과손실치를 나타냈다. 본 연구에

Table 2. Sound transmission loss of PC, PMMA, HDPE, and PP panels with thickness

Frequency (Hz)	4 mm thickness (dB(A))				8 mm thickness (dB(A))			
	PC (4.80 kg/m^2)[a)]	PMMA (4.76 kg/m^2)	HDPE (3.84 kg/m^2)	PP (3.64 kg/m^2)	PC (9.6 kg/m^2)	PMMA (9.52 kg/m^2)	HDPE (7.68 kg/m^2)	PP (7.28 kg/m^2)
100	15.0	15.0	13.3	13.6	20.6	19.0	19.2	17.4
125	16.5	14.8	14.8	13.2	21.7	20.9	20.5	18.9
160	15.4	15.2	13.8	13.5	20.4	20.9	18.5	19.2
200	13.9	14.3	12.3	12.1	19.7	19.6	17.4	17.3
250	16.4	16.2	14.9	14.1	21.0	21.7	20.0	19.6
315	20.3	19.0	18.8	17.6	24.9	24.8	23.2	22.6
400	19.5	19.3	18.9	18.0	25.1	25.3	23.5	22.1
500	21.4	21.4	19.8	19.6	26.8	26.0	25.4	23.9
630	23.7	23.6	22.2	22.0	29.1	28.9	27.6	26.4
800	23.8	23.5	22.3	21.8	29.2	28.8	27.8	26.9
1000	24.5	24.3	22.8	22.8	29.9	29.5	28.5	27.5
1250	25.7	25.3	24.2	24.0	30.7	30.2	29.5	28.4
1600	27.9	27.7	26.6	26.6	32.7	31.7	31.3	29.8
2000	30.1	29.8	28.9	28.4	33.8	33.1	32.6	30.0
2500	29.5	29.0	28.4	28.0	32.0	31.0	31.2	29.6
3150	30.4	29.8	29.2	28.8	32.4	29.7	31.6	29.1
4000	33.5	32.8	32.4	31.6	34.6	26.4	32.1	27.0
5000	35.1	33.4	33.6	32.2	29.6	30.0	26.7	29.1

[a)] Surface density of each materials with thickness

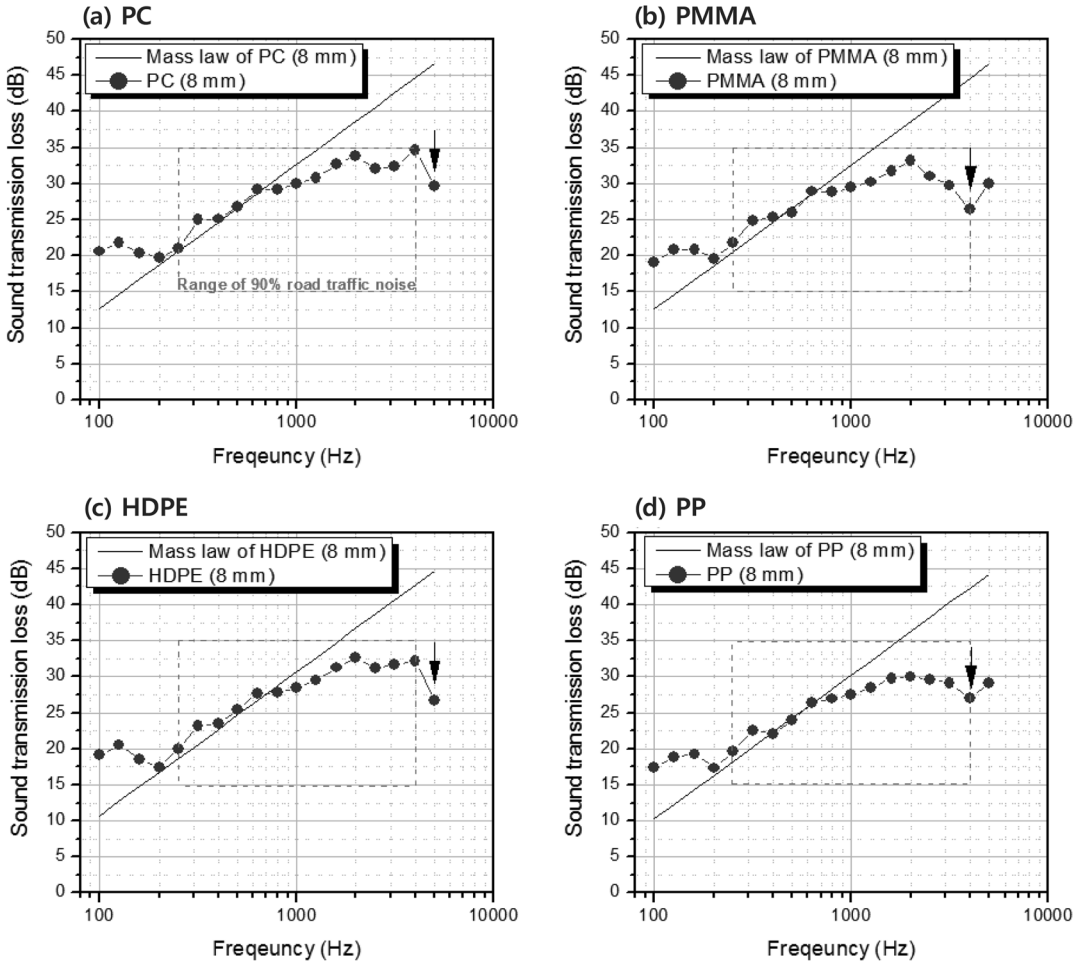

Fig. 5. Sound transmission loss of 8 mm thickness panels with (A) PC, (B) PMMA, (C) HDPE, and (D) PP panels.

서 사용한 패널의 재료별 면밀도는 4 mm패널 기준으로 PC (4.8 kg/m^2) > PMMA (4.76 kg/m^2) > HDPE (3.84 kg/m^2) > PP (2.73 kg/m^2)순으로 높으며 다시 한 번 차음성능이 재료의 면밀도와 비례함을 확인하였다.

4.2. 방음패널 두께별 차음특성

두께별 차음특성 비교시 모든 재료에서 4 mm보다 8 mm 패널의 투과손실치가 높은 것을 확인하였다(Table 2). PC, PMMA, HDPE, PP의 방음패널은 대체로 1,600 Hz까지 4 mm패널보다 8 mm패널에서 약 5~6 dB(A) 정도 투과손실치가 높았다. 4 mm패널은 PC, PMMA, HDPE, PP 모두 100 Hz에서 5,000 Hz까지 주파수 증가에 따라 투과손실치가 증가하였으나 8 mm패널의 경우 약 3,150 Hz 이상에서 4 mm 패널에 비해 투과손실치가 오히려 감소하는 현상이 관찰되었다. PC는 5,000 Hz에서, PMMA는 3,150 Hz에서, PP와 HDPE는 4,000 Hz에서 4 mm패널보다 8 mm패널의 투과손실치가 감소하는 역전현상이 나타났다. 이러한 현상은 두께가 4 mm패널에 비해 2배가 됨에 따라 일치효과주파수는 패널의 두께에 반비례하여 낮아지므로 투과손실이 감소하는 주파수 영역이 낮아진 것으로 판단된다. 이를 통해 특정주파수범위내에서는 방음패널의 두께에 비례하여 투과손실이 증가하나 일치효과로 인해 투과손실이 감소하는 주파수 영역이 낮아지므로 방음패널의 두께를 선정할 때는 도로소음의 주파수 범위 내에서 투과손실이 저감되지 않도록 주의할 필요가 있다.

4.3. 차음성능 비교

PC, PMMA, HDPE, PP의 재료 및 두께별 차음성능을 비교하였다. 환경부고시 '방음벽의 성능 및 설치기준'에서의 '방음벽의 음향성능 및 재질기준'에 따르면 500 Hz에서 25 dB(A) 이상, 1,000 Hz에서 30 dB(A) 이상의 투과손실을 표준으로 하고 있다. 본 연구결과 4 mm 두께의 패널은 재료에 상관없이 모두 투과손실기준을 만족하지 못하였다. 그러나 8 mm 두께의 PC, PMMA, HDPE, 그리고 PP는 500 Hz에서 각각 26.8, 26.0, 25.4, 그리고 23.9 dB(A)의 투과손실을 나타내어 PC, PMMA, HDPE재질이 방음벽 성능기준을 만족하였다. 1,000 Hz에서는 PC, PMMA, HDPE, 그리고 PP 순으로 29.9, 29.5, 28.5, 그리고 27.5 dB(A)로 PC와 PMMA가 근사치로 방음벽의 성능기준을 만족하는 것으로 확인되었다. 따라서 기준에 적합한 방음벽의 재료로 사용하기 위해서는 PC, PMMA, 그리고 HDPE는 최소 8 mm 이상 두께의 패널을 사용해야 함을 확인하였다. 또한 도로교통소음의 90%에 해당하는 주파수범위인 250 Hz~4 KHz까지 차음성능으로 보면 PC와 HDPE는 해당 주파수 범위 내에서 일치효과주파수가 발생하지 않아 투과손실이 감소하지 않으나 PMMA는 4 KHz에서 일치효과주파수로 판단되는 투과손실 감소영역이 발생되어 해당주파수 대역에서 4 mm 패널보다 투과손실이 낮음을 감안해야 한다.

5. 결 론

본 연구에서는 플라스틱 계열 방음패널로 활용 가능한 소재를 조사하여 PP와 HDPE를 선정하고 현재 방음패널의 재료로 사용되고 있는 PC, PMMA와의 차음특성을 비교하여 다음과 같은 결론을 얻었다. 재료별 차음특성의 경우, 4개 재료 중 현재 방음패널의 재료로 사용되고 있는 PC의 투과손실치가 가장 높았으며 그 뒤로 PMMA > HDPE > PP순으로 높은 투과손실치를 나타내었고 이는 재료의 면밀도와 비례하는 것을 확인하였다. 두께별 차음특성의 경우, 방음패널 두께에 비례하여 투과손실이 증가하나 일치효과로 인해 투과손실이 감소하는 주파수가 낮아짐을 확인할 수 있었다. 결론적으로, 저감하고자 하는 소음의 주파수대역을 먼저 파악하고 방음패널의 재질과 두께에 따른 주파수별 차음특성을 파악하여 적용한다면 효과적으로 소음을 저감할 수 있을 것으로 판단된다.

사 사

본 연구는 한국건설기술연구원 주요사업(2013-0048)의 연구비 지원에 의해 수행되었으며 이에 감사합니다.

KSEE

참고문헌

1. CE Delft, Traffic noise reduction in Europe(2007).
2. ACRC (Anti-Corruption and Civil Rights Commission of Korea), Prevention plan for civil complaint on traffic noise damage(2011).
3. WHO, Guidelines for community noise(1999).
4. Ministry of Environment/Korea Expressway Corporation, Performance and standard of establish of soundproof system (2009).
5. Norton, M. P., "Fundamentals of noise and vibration analysis for engineers," Cambridge University Press, New York, pp. 211~223(1989).
6. Kim, C., Chang, T. Kim, D.S. Kim, D.-J. and Chang, S. I., "A study on the test method for noise reduction devices installed on the noise barriers," *Transact. KSNVE*, **20**, 791~796(2010).
7. Beranek, L. L. and Ver, Istvan L., "Noise and vibration control engineering," John Wiley, New York, pp. 281~304(1992).
8. Mehta, M., Johnson, J. and Rocafort, J., "Architectural acoustics: Principles and design," Prentice-Hall, New Jersey, pp. 90~99(1992).
9. KS (Korean Standard), Field measurements of airborne sound insulation of buildings, KS F 2809:3022(2011).