

폴리머계 단일 및 이중구조 방음패널의 차음특성 비교분석 Comparison of Sound Transmission through Single and Double-layer Polymer Panels

김일호[†] · 이주행 · 손진희*
Il-Ho Kim[†] · Ju Haeng Lee · Jin-Hee Son*

한국건설기술연구원·과학기술연합대학원대학교 · *한국소음진동기술사회
Korea Institute of Civil Engineering and Building Technology·University of Science & Technology
*Korea Noise Vibration Professional Engineering Association

(Received March 14, 2014; Revised September 1, 2014; Accepted September 17, 2014)

Abstract : 본 연구에서는 PC, PMMA, HDPE, PP를 소재로 한 방음패널의 두께와 구조적 특성, 소재가 차음성능에 미치는 영향을 알아보았다. 각 소재로 구성된 단일 패널의 음향투과손실을 비교한 결과, PC, PMMA, HDPE, PP 순으로 음향투과손실이 높게 나타났으며, 질량법칙에 따르는 결과임을 확인하였다. 단일패널의 두께에 따른 투과손실을 비교해보면, 4 mm 단일패널에 비해 8 mm 두께의 투과손실이 약 5~6 dB(A) 크게 측정되었다. 또한 두께가 2배가 됨에 따라 일치효과 주파수가 낮아져 4,000~5,000 Hz에서 투과손실이 감소하는 영역이 발생하였으며, 4 mm 단일패널보다 투과손실이 작았다. 두 개의 4 mm 패널 사이에 공기층을 두어 이중으로 구성된 실험체를 대상으로 한 투과손실 실험 결과, 300 Hz 이하의 주파수에서는 동일한 두께인 8 mm의 단일패널과 효과가 비슷하였으며, 2,000 Hz 이상의 고주파수 대역에서 8 mm 단일패널에 비해 효과가 매우 뛰어났다. 반면 공명(resonance) 주파수와 인접한 500~630 Hz 대역에서 투과손실이 낮아지는 것을 알 수 있었다.

Key Words : 이중구조 방음패널, 방음벽, 음향차음특성, 음향투과손실

요약 : The aim of the present study is to compare sound performance depending on thickness, materials, and structure of polymer soundproof panels consisting of PC, PMMA, HDPE, and PP, respectively. As a result of comparing sound transmission loss (STL) of single layer panel made of four types of polymer, the better sound transmission loss was obtained in order of PC, PMMA, HDPE, and PP, which was obviously followed mass law. 8 mm of single panel showed 5~6 dB(A) greater STL than that of 4 mm panels and lower frequency for coincidence effect so that STL of 8 mm panels decreased around 4,000~5,000 Hz, indicating less STL of 4 mm panels than those of 8 mm. When it comes to structure, 4 mm panels with air layer appeared similar value of STL with 8 mm single panels under 300 Hz. In range of high frequency above 2,000 Hz, 4 mm panels with air layer performed better than 8 mm of single layer panel while resonance effects were observed at 500~630 Hz. It was found that these results could be practically utilized as fundamental data for noise barriers design considering the change to each condition.

주제어 : Double-layer Panel, Noise Barrier, Sound Insulation Properties, Sound Transmission Loss

1. 서론

비약적 산업발달로 인한 도시화는 소음이라는 심각한 환경, 사회문제를 야기하였다. 이러한 소음문제를 해결하기 위한 방안인 방음벽 설치는 보편적이며 경제적인 방법 중 하나이다. 국내에 시공된 방음벽은 금속계 재질과 콘크리트 재질이 주를 이루고 있어 주변경관과의 조화 및 시야확보가 어렵다는 문제가 있다.¹⁾ 최근 이러한 문제점을 해결할 수 있고 가공성 및 경량화 측면에서 폴리머계 재질의 방음패널의 사용이 증가하고 있다.

방음벽의 재료로 사용되기 위해서는 기본적으로 음향투과손실 성능기준을 만족해야 한다. Polycarbonate (PC)와 polymethylmethacrylate (PMMA)는 폴리머계 중 방음벽의 성능기준을 만족하는 재료로 방음패널에 사용되고 있다. 일반적으로 단일패널이 시공되고 있으나 이를 이중패널로 구성할 경우 단일패널과는 다른 차음특성을 가지게 되므로²⁾

더 뛰어난 차음성능을 기대할 수 있다. 이에 본 연구에서는 단일패널 또는 공기층이 존재하는 이중패널로 구성될 경우의 음향투과손실을 평가하였다. PC와 PMMA 외에도 polypropylene (PP)와 high-density polyethylene (HDPE)는 폴리머계 재료로서 다양한 상품의 재료로 많이 사용되고 있어 위 4개의 재료의 차음특성을 평가하였다. 단일패널과 이중패널의 경우 모든 물리량을 단순하게 가정한 경우 투과손실에 대한 기본적 이론이 존재하지만 현실적으로 다양한 물리적 변수들을 모두 반영하기에는 제한적이기 때문에 주로 실험결과를 이용한 연구가 보고되었다.²⁻⁴⁾ 방음패널의 투과손실은 패널 재료의 면밀도와 소음원의 주파수와 높은 상관관계가 있어²⁾ 방음벽 재료와 두께 선택시 소음원 주파수 특성을 고려해야 한다. 따라서 본 연구에서는 폴리머계인 PC, PMMA, PE, HDPP의 두께별, 재질별, 구조별(단일패널과 공기층이 있는 이중패널)음향 투과손실을 실험하여 이들 재료가 방음패널로 사용될 경우 음향 성능을 비교 평가하였다.

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

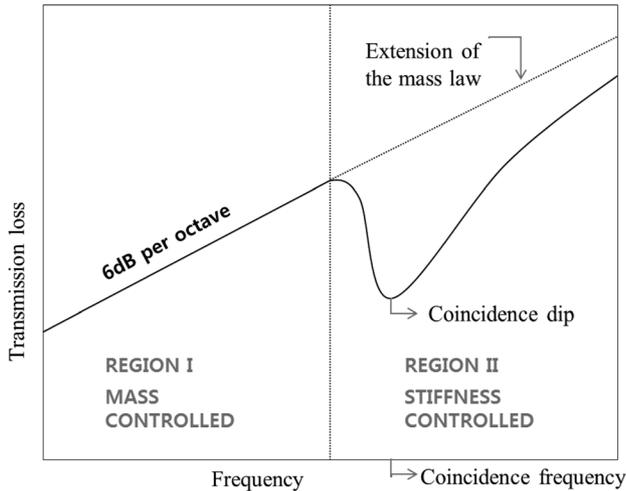


Fig. 1. Sound transmission characteristics of a single panel.⁴⁾

2. 이론적 배경

2.1. 단일 패널의 음향투과손실

음향투과손실(STL)이라는 용어는 통상적으로 패널이나 벽체를 투과하는 소음 저감량을 표현하는데 사용된다.³⁾ 단일 패널의 투과 손실은 Fig. 1과 같이 특징적으로 도식화될 수 있으며 주로 관심의 대상이 되는 질량 제어영역과 강성 제어영역으로 크게 2가지 영역으로 나눌 수 있다.³⁻⁶⁾ 질량 제어 영역에서는 질량이 2배가 되거나 주파수가 증가하면 투과손실이 6 dB증가하는데, 이를 ‘질량법칙’ 또는 ‘주파수 법칙’이라 한다. 입사음장이 확산음장일 때, 실용적으로 질량법칙은 식 (1)으로 표현된다.⁶⁾

$$STL = 20 \log(mf) - 47 \text{ dB} \quad (1)$$

영역 2에서는 투과손실이 약 15 dB가량 크게 저하되는 주파수가 발생하며 이는 입사음의 파장이 벽체의 굴곡과 파장과 일치할 때 생기는 공명현상으로, ‘일치효과’라 한다. 이러한 일치효과 주파수는 식 (2)와 같이 패널의 두께에 반 비례한다.⁶⁾

$$\text{Coincidence frequency} \propto \frac{1}{\text{Panel thickness}} \quad (2)$$

2.2. 이중 패널의 음향투과손실

단일패널의 두께가 2배가 되어도 질량법칙에 의해 투과손실은 6 dB밖에 증가하지 않는다. 공기층에 의해 분리된 이중패널은 각각의 단일패널의 효과가 합산되어 투과손실이 극대화된다. 이중패널은 (i) 이중패널의 공진(mass-air-mass resonance), (ii) 공기층의 공명(cavity resonances)에 의해 투과손실이 저하되는 특징적 주파수 영역을 가진다(Fig. 2). 약 20°C, 일반적인 습도에서 이중패널의 (i) 공진(mass-air-mass

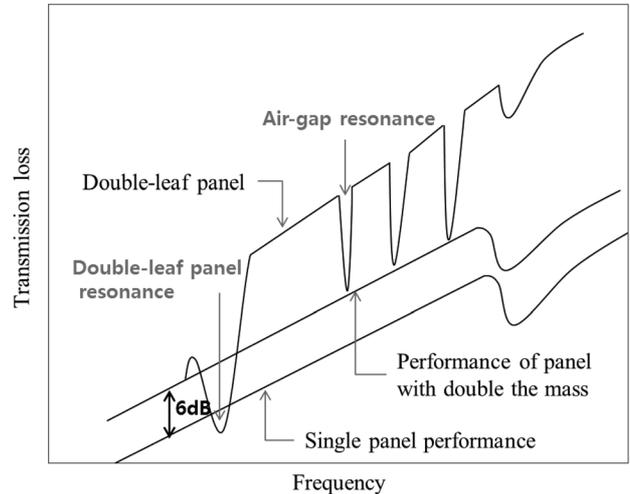


Fig. 2. Sound transmission characteristics of a double-layer panel.²⁾

resonance)에 의해 투과손실이 저하되는 주파수는 식 (3)과 같이 표현된다.³⁾

$$f_{res} = 59.8 \sqrt{\frac{1}{d} \left(\frac{1}{m_1} + \frac{1}{m_2} \right)} \quad (3)$$

여기서 d는 두 패널 사이의 공기층 두께, m₁는 이중패널 중 임의의 패널1의 면밀도, m₂는 이중패널 중 임의의 패널2의 면밀도를 의미한다.

3. 실험 개요

3.1. 패널의 재질

실험에 사용한 방음패널의 재료는 PC, PMMA, HDPE, 그리고 PP이다. PC, PMMA, HDPE, PP의 밀도는 각각 1,200, 1,190, 910 그리고 850 kg/m³이다. 패널의 크기는 가로 세로 각 1,000 mm이며, 두께는 3, 4, 5, 8 mm로 준비하였다. 패널이 관련규격⁷⁾에 비해 작은 크기이므로 측정결과는 시편의 주변 고정조건이나 음장의 국부적 변동에 민감하게 좌우하며 차음성능 자체도 시편의 크기에 따라 달라질 수 있어 분석결과는 각 재질 및 구조별 결과의 상대 비교를 목적으로 하며, 본 실험에 이용된 시편이 실제 도로 방음벽용 방음패널에 적합한지에 대해서는 별도의 실험이 요구된다.

3.2. 실험체

실험체는 단일층과 이중층구조로 제작되었다(Table 1). 단일층의 경우 각 재료별 4, 8 mm 두께의 패널을 이용하였다. 두 개의 우레탄코팅을 한 철판프레임(1,098 × 1,098 mm) 사이에 패널을 고정하여 단일층 실험체를 준비하였다. 이중층의 경우 3, 4, 5 mm의 두께를 갖는 패널을 이용하였다. 두 개의 폴리머 패널 사이에 실리콘 코팅된 금속프레임(두께 4 mm)을 끼워 공기층을 확보한 뒤 우레탄 코팅을 한 철판프레임으로 고정하였다(Fig. 3).

Table 1. Specimen preparation

Classification	Type	Material	Surface density (kg/m ²)	Thickness (mm)	
				Panel	Air gap
S4-PC	Single layer	PC	4.80	4	-
S8-PC	Single layer	PC	9.60	8	-
DA3-PC	Double layer	PC	3.60	3	4
DA4-PC	Double layer	PC	4.80	4	4
DA5-PC	Double layer	PC	6.00	5	4
S4-PMMA	Single layer	PMMA	4.76	4	-
S8-PMMA	Single layer	PMMA	9.52	8	-
DA3-PMMA	Double layer	PMMA	3.57	3	4
DA4-PMMA	Double layer	PMMA	4.76	4	4
DA5-PMMA	Double layer	PMMA	5.95	5	4
S4-PE	Single layer	HDPE	3.84	4	-
S8-PE	Single layer	HDPE	7.68	8	-
DA3-PE	Double layer	HDPE	2.88	3	4
DA4-PE	Double layer	HDPE	3.84	4	4
DA5-PE	Double layer	HDPE	4.80	5	4
S4-PP	Single layer	PP	3.64	4	-
S8-PP	Single layer	PP	7.28	8	-
DA3-PP	Double layer	PP	2.73	3	4
DA4-PP	Double layer	PP	3.64	4	4
DA5-PP	Double layer	PP	4.55	5	4

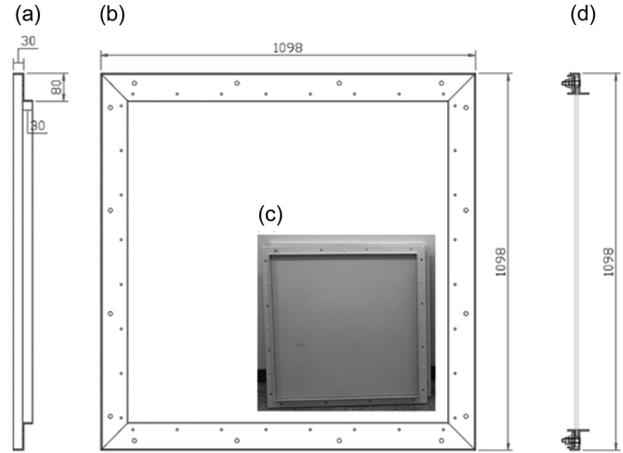


Fig. 3. Specimen image of air-gap double layer; (a) side view, (b) front view, (c) image of polypropylene, and (d) sectional view.

3.3. 실험방법

투과손실은 KS F 2808:2011 건물부재의 공기전달음 차단 성능 실험실 측정방법에 준하여 평가했다.⁷⁾ 실험체는 실험실 치용 개구부에 설치한 후 석고보드와 글라스울을 이용하여 실험체들과 실험체 사이의 틈새를 씌워서 실험하였다. 음원용과 수음용 잔향실의 체적은 각각 57, 52 m³이며, 이는 KS F

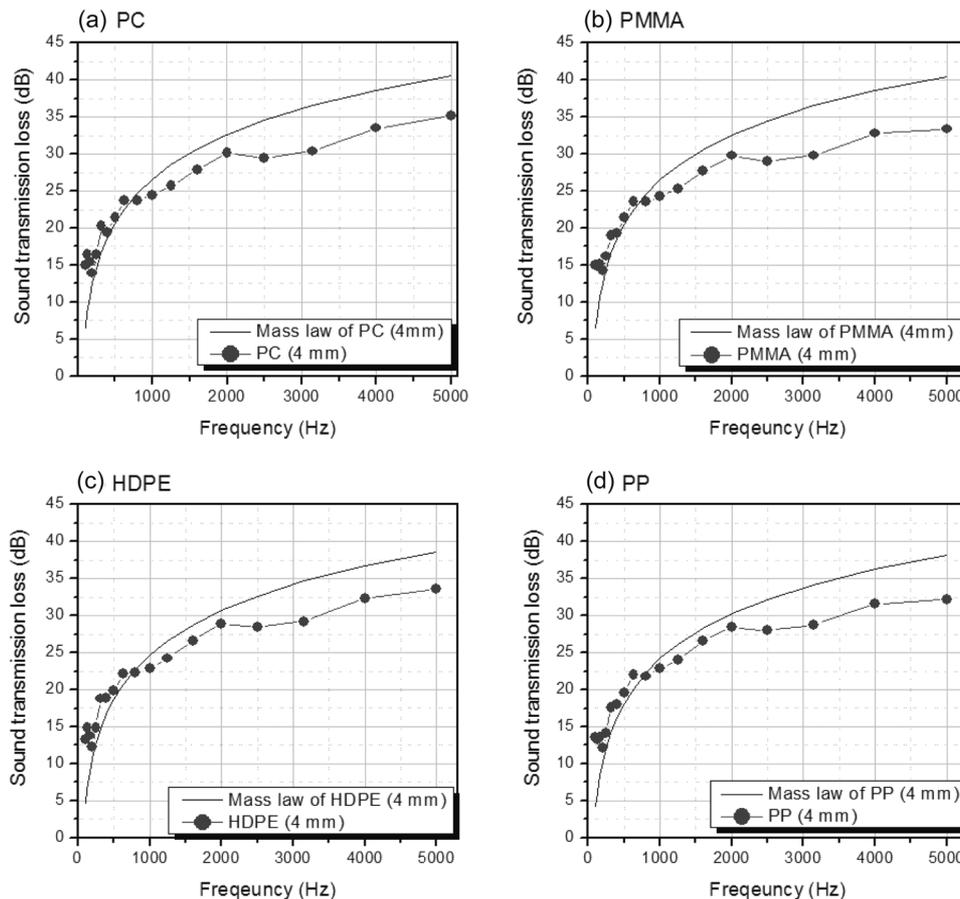


Fig. 4. Sound transmission loss of 4 mm thickness single panels with (a) PC, (b) PMMA, (c) HDPE, and (d) PP panels.

2860 건물 및 건물부재의 차음성능 측정방법-건물부재의 차음성능 표준 측정실 조건에 준한다.⁸⁾ 측정환경의 온도는 $20.0 \pm 2.0^\circ\text{C}$ 이고 상대습도는 $54.0 \pm 2.0\%$ R.H이다. 투과손실은 100 Hz부터 5 KHz까지 1/3옥타브밴드로 측정하였다.

4. 실험결과

4.1. 단일패널의 차음특성

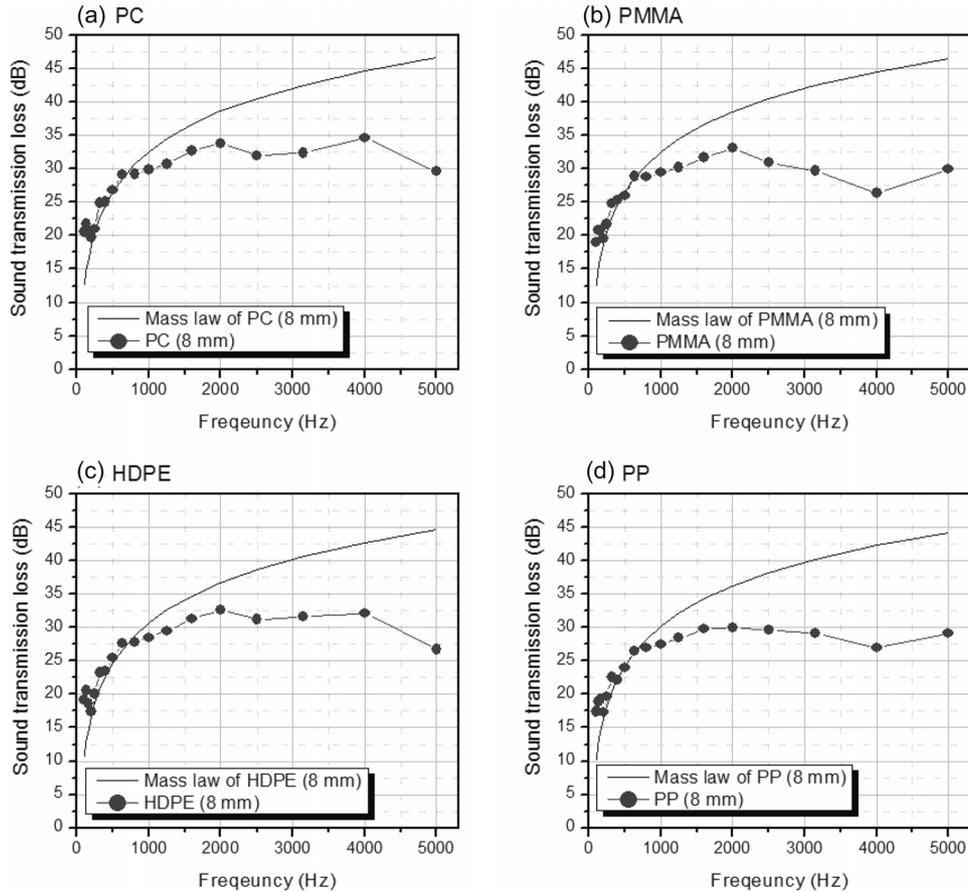


Fig. 5. Sound transmission loss of 8 mm thickness single panels with (a) PC, (b) PMMA, (c) HDPE, and (d) PP panels.

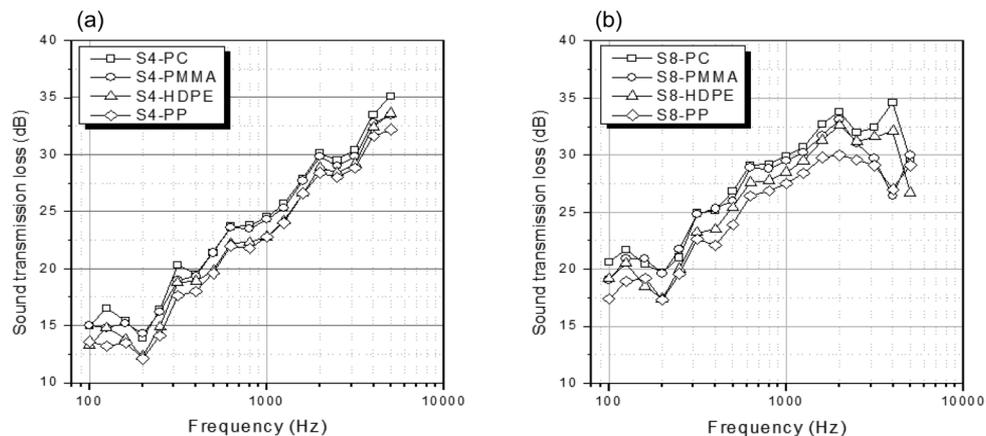


Fig. 6. Comparison of single panel transmission loss as materials; (a) 4 mm thickness and (b) 8 mm thickness panels.

Fig. 4-5는 4 mm와 8 mm 두께의 단일패널의 투과손실 실험결과와 식 (1)의 질량법칙에 따른 예측결과를 함께 나타낸 것이다. 실험결과와 이론식과 유사하지만 모든 변수를 단순하게 가정한 이론식과 일치하지는 않는다. 8 mm 패널의 실험결과는 4-5 kHz의 고주파수 영역에서 투과손실이 낮아지는데 이는 식 (2)의 이론과 같이 패널의 두께가 2배가 됨에 따라 coincidence frequency가 4 mm 패널보다 낮은 주파수로 이동했기 때문인 것으로 판단된다(Fig. 5).

Fig. 6은 4 mm와 8 mm 폴리머계 재료의 투과손실을 비

교한 것이다. 4 mm 실험체의 투과손실 결과의 경우 PC, PMMA, HDPE, PP의 순으로 투과손실이 크며 이는 식 (1)의 질량법칙과 같이 재료의 밀도에 비례했다. 8 mm 실험체는 PMMA와 PP가 4,000 Hz, PC와 PE가 5,000 Hz에서 투과손실이 저하되었으며 이는 coincidence frequency로 사료된다. 4,000~5,000 Hz 영역을 제외하면 역시 4 mm 실험체와 마찬가지로 투과손실은 재질별 밀도와 비례하여 PC, PMMA, HDPE, PP의 순으로 크다.

4.2. 이중패널의 차음특성

Fig. 7은 이중패널을 구성하는 폴리머 재료별, 두께에 따른 투과손실을 나타낸 것이다. 각 재질별로 3, 4, 5 mm 두께별 투과손실을 실험했으며 PMMA는 5 mm 시험체 데이터의 오류로 결과에서 제외하였다. 실험결과를 보면 1,000 Hz 이하 투과손실이 저하되는 영역을 제외하고 두께가 두꺼울수록 투과손실이 크다. 투과손실이 저하되는 1,000 Hz 이하의 주파수대역을 식 (3)에 의해 계산된 Table 2의 이중패널의 resonance frequency와 비교하였다. 3 mm 두께의 PC 시험체는 투과손실이 저하되는 630 Hz 주파수대역이 식 (3)에 의해 계산된 resonance frequency에 해당하여 일치하였으나, 이를 제외한 다른 시험체의 경우는 resonance fre-

Table 2. Resonance frequency of double-layer panel (unit: Hz)

Panel	Thickness		
	3 mm ^{a)}	4 mm ^{b)}	5 mm ^{c)}
PC	704,7	610,3	545,9
PMMA	710,7	615,5	550,5
HDPE	809,3	700,9	626,9
PP	837,4	725,2	648,6

^{a)} 3 mm double-layer with 4 mm air gap

^{b)} 4 mm double-layer with 4 mm air gap

^{c)} 5 mm double-layer with 4 mm air gap

quency에 해당하는 주파수대역의 인접주파수에서 투과손실이 저하되었다. 또한 투과손실이 저하되는 측정주파수는 Fig. 7에서와 같이 시험체의 두께가 두꺼워짐에 따라 낮아짐을 알 수 있다.

한편 같은 두께를 가진 재질별 이중패널의 투과손실의 경우 1,000 Hz 이하 저주파 대역의 투과손실 저하를 제외하면 전반적으로 주파수가 증가함에 따라 투과손실이 증가하였다. 재질에 따른 투과손실은 단일패널과는 달리 질량법칙을 따르지 않으며 재질별로 큰 차이를 보이지 않았다.

4.3. 단일 및 이중패널의 차음 성능 비교

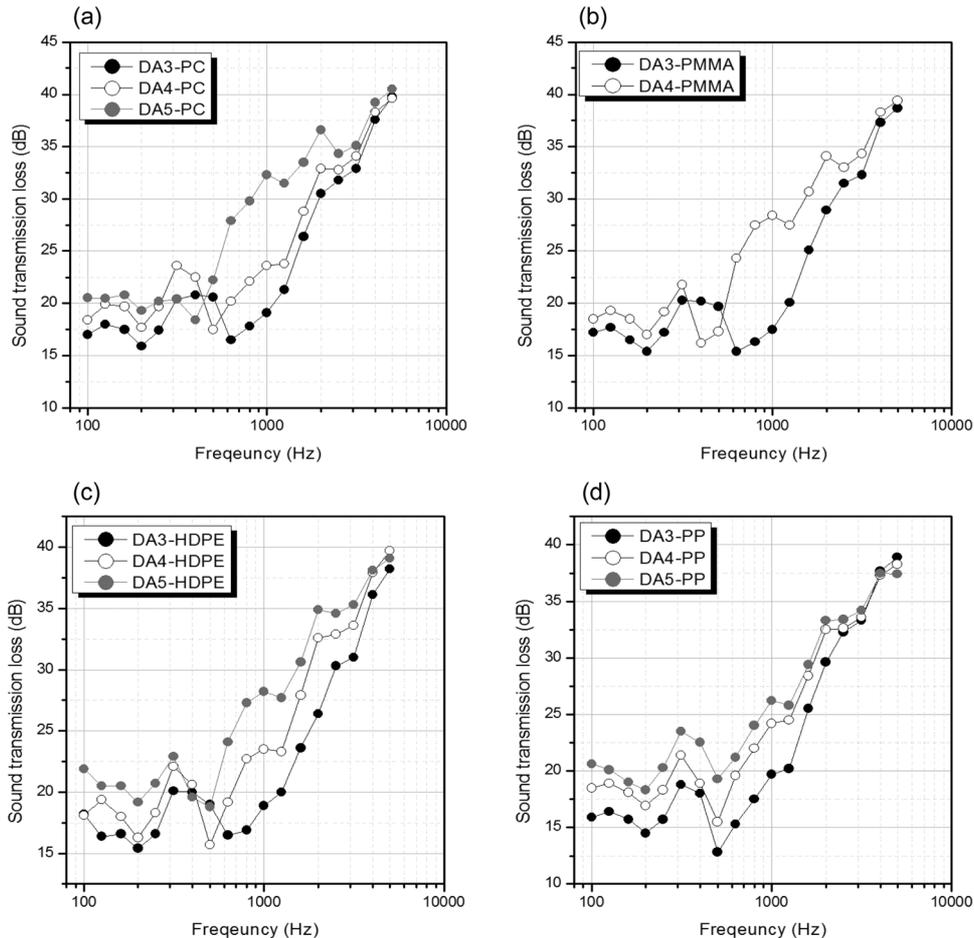


Fig. 7. Comparison of sound transmission loss according to double-layer panel thickness; (a) PC, (b) PMMA, (c) HDPE, and (d) PP.

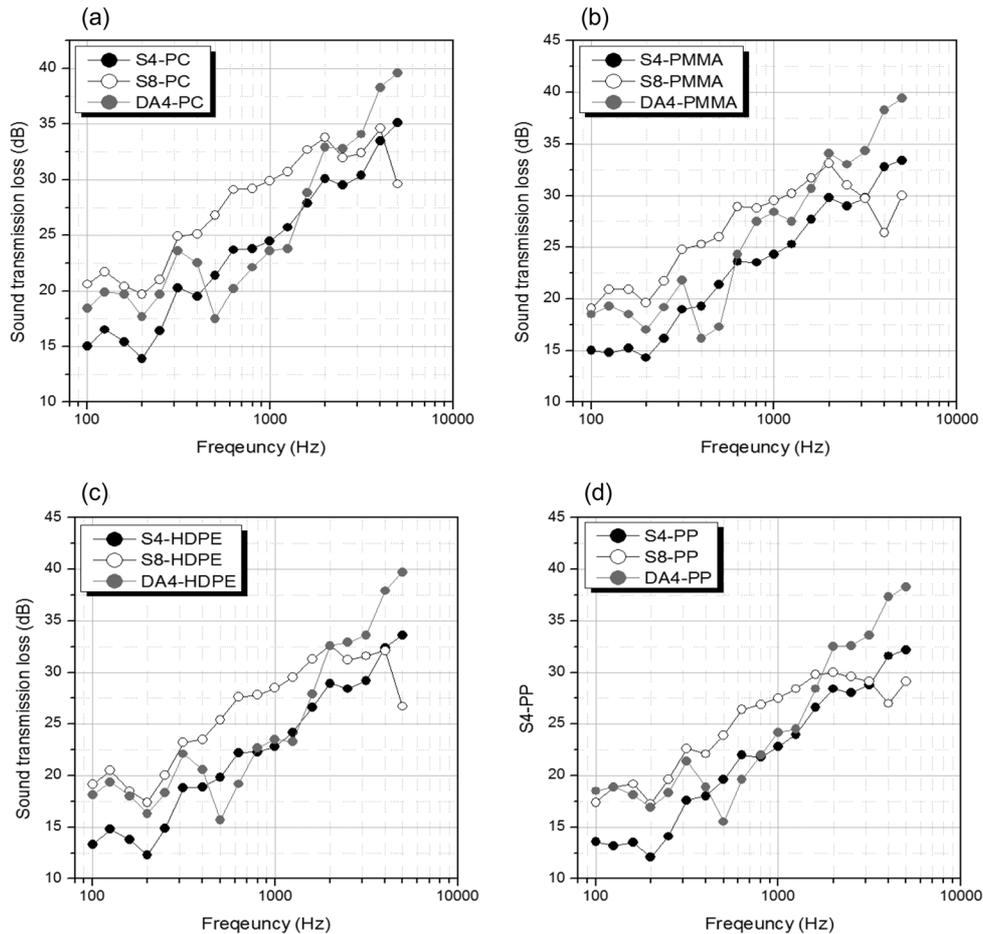


Fig. 8. Comparison of sound transmission loss with 4 mm, 8 mm-single and 4 mm double panel; (a) PC, (b) PMMA, (c) HDPE, and (d) PP.

시험체의 두께별, 구조별 차음성능 비교를 위해 재질별로 4 mm, 8 mm 단일패널과 4 mm 이중패널의 투과손실을 비교했다(Fig. 8). 단일패널의 두께별 비교를 보면 모든 재질의 8 mm 시험체가 4 mm 시험체의 투과손실에 비해 약 5 dB(A) 이상 크지만 두께가 2배가 됨에 따라 PC와 PE는 5,000 Hz, PMMA와 PP는 4,000 Hz대역에서 투과손실이 저하되어 8 mm 시험체가 4 mm 시험체의 투과손실보다 작아지는 것을 확인할 수 있었다. 이것은 coincidence effect로 예상되며 시험체의 두께가 2배가 됨에 따라 coincidence frequency는 두께에 반비례하여 작아지므로 투과손실이 감소하는 주파수가 작아지는 현상이다.

구조별 투과손실을 보면 공기층이 있는 4 mm 패널을 이중으로 구성한 시험체는 300 Hz 이하의 주파수에서는 동일한 두께인 8 mm의 단일패널과 효과가 비슷하며, 2,000 Hz 이상에서는 8 mm의 단일패널보다 투과손실이 5 dB(A) 이상 크며 5,000 Hz 까지 투과손실이 저하되는 영역이 발생하지 않는다. 다만 이중패널의 경우 식 (3)에 의해 계산된 resonance frequency 또는 인접 주파수 대역인 500~630 Hz 대역에서 투과손실이 저하되는 것을 확인할 수 있었다.

방음패널의 차음성능을 기준으로 보면 환경부고시 ‘방음벽의 성능 및 설치기준’에서의 ‘방음벽의 음향성능 및 재

질기준’에 따르면 500 Hz에서 25 dB(A) 이상, 1,000 Hz에서 30 dB(A) 이상의 투과손실을 표준으로 하고 있다.⁹⁾ 본 연구결과 4 mm 두께의 단일패널은 재료에 상관없이 모두 투과손실기준을 만족하지 못했다. 8 mm 두께의 단일패널은 PP를 제외한 PC, PMMA, HDPE가 500 Hz에서 모두 25 dB(A) 이상의 투과손실을 나타내었고, 1,000 Hz에서는 PC와 PMMA가 30 dB의 근사치로 방음벽의 성능기준을 만족하는 것으로 확인되었으나 3.1에 언급한 바와 같이 해당 패널은 KS 2808의 규격보다 작아 실험결과를 토대로 기준 만족 여부를 판단할 수는 없다. 반면 4 mm 두께의 이중패널은 500 Hz에서 투과손실이 현저히 낮아지는 현상이 발생되어 방음벽의 성능기준을 만족하지 못했다.

또한 도로교통소음의 90%가 250~4,000 Hz까지의 영역에 해당되므로¹⁰⁾ 해당 주파수범위 내에서 일치 효과나 공진 등이 발생하여 투과손실이 저하되지 않도록 방음패널을 두께 및 구조를 선택하는 것이 중요하다. 4 mm 두께의 단일패널은 모든 재질에서 해당 주파수 범위 내 투과손실이 저감되는 영역이 없으며, 8 mm 두께의 PC와 HDPE 단일패널도 해당 주파수 범위 내에서 일치효과가 발생하지 않아 투과손실이 감소하지 않았다. 그러나 8 mm PMMA와 PP 단일패널은 4,000 Hz에서 일치효과주파수로 판단되는 투과손

실 감소영역이 발생되어 해당주파수 대역에서 4 mm 패널보다 투과손실이 낮았다. 또한 4 mm 두께의 이중패널은 모든 재질이 500 Hz대역에서 resonance frequency로 판단되는 투과손실 감소영역이 발생되어 4 mm 단일패널보다 투과손실이 낮았다.

5. 결론

본 연구에서는 플라스틱 계열 방음패널로 활용 가능한 소재로 PC, PMMA, HDPE, PP의 두께별, 재료별, 구조별 차음성능을 비교하였다. 단일패널의 재질별 투과손실을 비교해보면 질량법칙에 의해 밀도가 높을수록 투과손실도 커서 PC, PMMA, HDPE, PP 순으로 효율이 좋은 것으로 나타났다. 단일패널의 두께별 투과손실을 비교해보면 8 mm 단일패널은 4 mm 단일패널에 비해 투과손실이 약 5~6 dB 정도 컸으나 두께가 2배가 됨에 따라 일치효과 주파수가 낮아져 4,000~5,000 Hz 부근에서 투과손실이 감소하는 영역이 발생하여 4 mm 단일패널보다 투과손실이 작아지는 것을 알 수 있었다. 구조별 투과손실을 보면 공기층이 있는 4 mm 패널을 이중으로 구성한 실험체는 300 Hz 이하의 주파수에서는 동일한 두께인 8 mm의 단일패널과 효과가 비슷하며, 2,000 Hz 이상의 고주파수 대역에서 8 mm 단일패널에 비해 효과가 매우 뛰어나지만 공명(resonance) 주파수와 인접한 500~630 Hz 대역에서 투과손실이 낮아졌다. 이상으로부터, 공기층을 갖는 이중구조의 방음패널을 도로 방음벽에 적용하고자 할 경우에는 일부 주파수 대역에서의 투과손실을 향상시킬 수 있는 추가적인 대책이 필요할 것으로 판단된다.

Acknowledgement

본 연구는 한국건설기술연구원 주요사업(2013-0048)의 연구비 지원에 의해 수행되었습니다.

KSEE

Reference

1. Kim, H. S., "An experimental study on the reduction effect of reflected sound and diffraction effect by types of noise barrier," *Transact. Kor. Soc. Noise Vibrat. Eng.*, **6**(2), 245~250(1996).
2. Norton, M. P., "Fundamentals of noise and vibration analysis for engineers," Cambridge University Press, New York, pp. 211~223(1989).
3. Wang, X., You, F., Zhang, F. S., Li, J. and Guo, S., "Experimental and Theoretic studies on sound transmission loss of laminated Mica-Filled Poly(vinyl chloride) composites," *J. Appl. Polym. Sci.*, **122**, 1427~1433(2011).
4. Tadeu, A. J. B. and Mateus, D. M. R., "Sound transmission through single, double and triple glazing. Experimental evaluation," *J. Appl. Acoustics*, **62**(3), 307~325(2001).
5. Beranek, L. L. and Ver, I. L., *Noise and vibration control engineering*, John Wiley & Sons, Inc., NewYork(1992).
6. Mehta, M., Johnson, J. and Rocafort, J., *Architectural acoustics: Principles and design*, Prentice-Hall PTR, New Jersey (1999).
7. KS F 2808, *Laboratory measurements of airborne sound insulation of building elements*(2011).
8. KS F 2860, *Measurement of sound insulation in buildings and of building elements-Requirements for laboratory test facilities with suppressed flanking transmission*(2001).
9. Ministry of environment, *Research on Soundproofing performance and installation standards*, Korea expressway corporation(2009).
10. Kim, C. H., Chang, T. C. and Kim, D. S., "Characteristics Analysis of Highway Traffic Noise," *Transact. Kor. Soc. Noise Vibrat. Eng.*, **22**(12), 1191~1198(2012).