

발포폴리스티렌이 폴리우레탄 폼의 흡음 특성에 미치는 영향

이정하 · 최현준 · 김정현[†]

서울시립대학교 화학공학과

(2022년 4월 13일 접수, 2022년 5월 19일 수정, 2022년 5월 19일 채택)

Effect of the Expandable Polystyrene on Acoustic Property of the Polyurethane Composite Foams

Jungha Lee, Hyeon Jun Choi, and Jung Hyeun Kim[†]

Department of Chemical Engineering, University of Seoul, 163 Seoulsiripdae-ro, Dongdaemun-gu, Seoul 02504, Korea

(Received April 13, 2022; Revised May 19, 2022; Accepted May 19, 2022)

초록: 폴리우레탄(PU) 폼은 차량 산업에서 흡음재와 쿠션재로 사용된다. 본 연구에서는 발포폴리스티렌 입자(expandable polystyrene, EPS)를 충전제로 사용하고, 함량을 변화시켜 폴리스티렌 입자가 폴리우레탄 폼의 흡음 성능에 미치는 영향을 조사하였다. EPS 입자의 약한 발포력은 폴리우레탄 폼 내벽의 변형을 야기시키지 않아, EPS 입자의 함량이 증가하더라도 PU 폼의 내부 모폴로지 변화는 거의 없었다. 하지만 폴리우레탄 폼 내부의 EPS 입자가 음파의 이동경로를 증가시키는 장애물로 작용하여, EPS 함량이 증가할수록 폴리우레탄 폼의 저음역대 흡음 성능은 증가하였다. 최종적으로, EPS 입자의 효과를 확인하기 위해 유기용매인 톨루엔을 이용하여 폴리우레탄 폼 내부의 EPS를 제거하였다. EPS 입자가 제거된 폴리우레탄 폼의 흡음 성능은 EPS 함량이 0 wt%인 폴리우레탄 폼 보다 낮은 흡음 성능을 보여 EPS가 폴리우레탄 폼 내부에서 흡음 성능을 향상시키는 역할을 한다고 할 수 있다.

Abstract: Polyurethane (PU) foams are used as a sound absorbing and cushioning materials in the automotive industry. In this study, expandable polystyrene (EPS) was used as a filler and the effect of EPS in PU foams on the acoustic property was investigated by varying its contents. Even if the content of EPS increased, there was little change in the internal morphology of PU foams, because the EPS could not cause the deformation of the inner wall. However, as the EPS content increased, the low-frequency sound absorption performance increased, because the EPS acted as an obstacle to increase the path of sound waves. Finally, to confirm the effect of EPS, EPS was removed using toluene. After removal, the sound absorption performance showed a lower than that of PU foam with an EPS content of 0 wt%. EPS plays a role in improving the sound absorption performance inside the PU foam.

Keywords: polyurethane foam, expandable polystyrene, sound absorption.

서 론

자동차 시장에서 소비자는 차량에서의 안락한 환경을 제공하는 제품을 선호하고, 기업은 이러한 소비자의 요구사항을 충족시키기 위해 차량의 시트재와 흡음재로 사용되는 폴리우레탄 폼(polyurethane foam, PU 폼)의 성능 향상 연구를 지속적으로 진행하고 있다.¹⁻³ 흡음 소재로 사용되는 PU 폼은 가벼운 재료의 특성과, 저음역대부터 고음역대까지 음파를 흡수할 수 있는 내부 모폴로지적 특성이 요구된다.⁴⁻⁸ 전체적인 음역대를 아우르는 우수한 흡음 성능의 PU 폼을 제작하기

위하여 PU 폼의 배합 처방을 변화시키고, 다양한 물질을 충전제로 사용하는 등의 생산 기술 연구가 활발하게 진행되고 있다.

흡음 소재는 재료에 따라 흡수하는 주파수의 영역이 존재한다. 일반적으로, 금속 소재는 0-1000 Hz 영역에서 가장 우수한 흡음 성능을 보이고, 폴리우레탄 폼은 2000-4000 Hz, 글라스울은 4000 Hz 이상에서 우수한 흡음 성능을 보인다. 이는 재료가 가진 고유 특성과 연관이 있다. 예를 들면, 금속 재료는 진동을 흡수하고 공명을 통한 흡음이 주로 진행되기 때문에 낮은 주파수에서 우수한 성능을 보인다. 보고된 바에 의하면 연철 PU 폼은 100-1000 Hz와 4000-6300 Hz 영역에서 비교적 낮은 흡음 계수를 갖는다. 차량에서 저음역대 소음은 로드노이즈 같은 차체 구조에 의해 발생되며 고음역대 소음은 엔진 소음에 기인하는 것으로 알려져 있다. 따라서 자

[†]To whom correspondence should be addressed.
jhkimad@uos.ac.kr, ORCID[®] 0000-0003-4550-5507
©2022 The Polymer Society of Korea. All rights reserved.

동차의 흡음재로 사용되는 PU 폼의 저음역대와 고음역대에 서의 흡음 성능 향상에 대한 연구가 많이 진행되고 있다.⁹⁻¹¹ PU 폼의 내부 모폴로지(공동, 미세구멍의 크기, 공동벽 면적 비 등)과 고분자 특성은 흡음 성능에 직접적인 연관이 있어 PU 폼의 내부 구조와 물질의 특성 변화를 연구한 논문들이 다수 존재한다.^{9,12,13} 주로, 원료의 처방 배합 비,^{11,14,15} 충전제의 첨가,^{3,16,17} 공정기술을 변수로 하는 연구가 진행되었고,^{18,19} Choi 등은 음역대 별 최적화된 내부 모폴로지와 이중층 소재로 저음역대와 고음역대의 흡음 성능을 향상시킨 연구를 발표하였다.²⁰ Park 등은 이번 실험에 사용된 것과 같은 폴리스티렌 소재가 일정 격자 규칙을 가지고 PU 폼 내부의 존재할 때 흡음 성능에 미치는 영향을 계산적으로 도출한 연구 결과를 발표하였다.⁷

발포폴리스티렌(expandable polystyrene, EPS)은 경질의 발포체로 낮은 밀도, 우수한 압축강도, 높은 가격 경쟁력 등의 특성으로 인해 널리 사용되고 있다. 본 연구에서는 다공성 물질인 EPS를 충전제로 사용하여, EPS 함량에 따른 PU 폼의 모폴로지 변화를 확인하고, 그에 따라 흡음 성능에 미치는 영향을 분석하였다. EPS 입자가 PU 폼 내부에 존재하는 형태를 확인하기 위해 주사전자현미경(scanning electron microscopy, SEM)을 이용하였고, impedance tube를 이용하여 흡음 성능과 흡음 지표의 변화를 관찰하였다. 마지막으로, EPS 입자 첨가의 효과를 직접적으로 검증하기 위해 유기용매인 톨루엔(toluene)을 사용하여 EPS 입자를 제거한 PU 폼의 흡음 성능 변화를 비교한 자료를 제시하였다.

실 험

실험 재료. 흡음 소재 PU 폼은 폴리에테르 폴리올 PPG-6000(수산기값: 28 ± 2 , M_w : 6000 g/mol, 관능기수: 3, 금호석유화학, Korea)과 toluene diisocyanate(TDI)와 methylene diphenyl diisocyanate(MDI)가 혼합된 혼합이소시아네이트 CG-7070S(%NCO: 36.8 ± 0.5 , 금호미쓰이화학, Korea)가 주재료로 사용되었다. 발포 전, 충전제인 EPS(expandable polystyrene, GN30HC, 입경: 0.55 ± 0.05 mm, 금호석유화학, Korea)를 사용하여 흡음 성능 변화를 유도하였다. 폼 형성과 발포 반응을 촉진시키기 위해 젤화 촉매로 DABCO 33LV(33% triethylenediamine, 67% dipropylene glycol, Air Products and Chemicals, USA), 발포화 촉매로 BL17(78% bis(dimethylaminoethyl)-etherformate dipropylene glycol solution, Air Products and Chemicals, USA)이 사용되었다. 발포 반응에 의한 CO₂ 생성을 유도하기 위해 화학 발포제로 탈이온수가 사용되었고, 고분자 사슬을 연장 및 연결하는 역할로 diethanolamine(DEA, M_w : 105.14 g/mol, Sigma-Aldrich, USA)이 사용되었다. 균일하고 안정적인 탈이온수의 분산을 위해 실리콘 계면활성제(L-3002, Momentive, USA)가 사용

되었고, EPS가 첨가된 PU 폼 내부의 EPS 입자를 제거하기 위한 세척용매로는 톨루엔(toluene anhydrous, 99.8%, Sigma-Aldrich, USA)이 사용되었다.

폴리우레탄 합성. 폴리올 시스템(폴리올, 수지화 촉매, 발포화 촉매, 가교제, 발포제, 정포제)과 이소시아네이트의 합성반응은 총 2단계로 구성되어 있다. 우선, Table 1의 처방에 따라 폴리올 시스템을 계량하고, 1차 혼합을 통해 균일하게 분산시킨다. 이소시아네이트는 NCO index 1.0에 맞추어 계량 후 2차 혼합으로 최종 반응을 유도한다. 폴리올 시스템의 1차 혼합은 1 L 종이컵에서 1700 rpm의 속도로 10분간 이루어지고, 2차 혼합은 균일한 혼합과 안정적인 발포를 위해 6000 rpm의 속도로 8초간 진행된다. 최종 반응한 PU 액을 60 °C의 알루미늄 주형(200 mm×200 mm×50 mm)에서 20분간 경화시킨 후 상대습도 50±10%의 상온에서 72시간 동안 보관하였다. 균일한 시편 제작을 위해 폼 표면층 10 mm를 제거한 뒤, 물성 평가용 시편을 제작하였다.

모폴로지 분석. PU 폼의 모폴로지 분석은 주사전자현미경(SNE3000M, SEC, Korea, at 15 kV, 30 kV)을 이용하여 이미지 표본을 얻고, 이미지 분석 프로그램 Image Pro Plus(Media Cybernetic, USA)를 통해 15개의 표본으로부터 공동(cavity)과 미세구멍(pore)의 크기 등을 측정하여 진행되었다. 선행 연구 내용을 바탕으로 공동벽 면적비를 계산하여 구체적인 내부 모폴로지 변화를 확인하였다.

흡음 성능 분석. PU 폼의 흡음 성능은 저·중주파와 고주파, 두 종류의 impedance tube(저·중주파 구간: SW420, BSWA, USA, 고주파 구간: SW470, BSWA, USA)와 1/4 inch microphone(MPA41, BSWA, USA)을 사용하여 측정하였다. 측정 샘플은 직경 100 mm(저·중주파, 63-1600 Hz), 직경 30 mm(고주파, 1000-6300 Hz)와 두께 20 mm의 규격으로 제작되었다. 흡음 성능 측정 결과는 VA-Lab software(BSWA, USA)를 이용하여 흡음 계수로 나타내었고, 추가적인 흡음 성능 분석의 지표로는 음향활성(acoustic activity, AA)과 소음

Table 1. Formulation Details for Fabrications of Flexible PU Foams Including EPS Beads

Materials	Contents (g)					
Polyol PPG-6000	100					
Gelling cat. 33LV	0.72					
Blowing cat. BL17	0.08					
Crosslinker DEA	0.60					
Blowing agent H ₂ O	3.00					
Surfactant L-3002	1.32					
Isocyanate CG-7070S ^a	44.84					
Filler ^b	0.0	2.0	4.0	6.0	8.0	10.0

^aNCO index: 1.0. ^bEPS GN30HC were provided KUMHO PETROCHEMICAL.

감소율(noise reduction coefficient, NRC)이 사용되었다.

톨루엔 세척. EPS가 첨가된 PU 폼에서 EPS 입자의 영향을 확인하기 위해 유기용매 톨루엔(toluene)을 사용하였다. PU 폼 내부의 EPS가 씻겨 나갈 정도의 충분한 양의 톨루엔으로 세척 진행 후 진공 오븐을 이용하여 60 °C에서 24시간 동안 건조시켰다. EPS 첨가 PU 폼의 세척 및 건조 진행 후 동일한 흡음 성능 분석으로 EPS 입자가 있는 경우와 없는 경우(세척 진행)를 비교하고, 그 결과를 그래프로 표현하였다.

결과 및 토론

모폴로지 분석. 다공성 고분자 소재는 특유의 내부 모폴로지 구조에 의해 흡음 성능의 변화를 나타낸다. 모폴로지 구조에 의한 흡음은 3가지의 메카니즘(재료 표면에서 입-반사에 의한 감쇄, 내부 공기 입자의 점성 저항, 내벽과의 공명 현상)을 통해 이루어진다. 이러한 흡음 메카니즘은 내부 모폴로지 특징(공동, 미세구멍의 크기와 형태)에 영향을 받아 결정된다. 파장이 길고 진동수가 낮은 저음역 음파는 일정 수준 이상의 개폐도와 작은 크기의 공동을 가질 때 단위 부피당 내벽의 수가 증가하여 흡음 성능이 향상된다. 이번 연구에서는 저음역대의 흡음 성능을 향상시키기 위하여 미세한 내부 셀을 갖는 EPS 입자를 PU 폼에 첨가하고, EPS의 첨가에 따라 변화되는 PU 폼의 모폴로지를 조사하였다.

Figure 1(a)와 (b)는 PU 폼 내부에 존재하는 EPS의 표면과 단면의 이미지이다. EPS 입자는 중합과정에서 함유된 펜테인(pentane)에 의해 폴리스티렌의 T_g 이상의 온도에서 발포가 진행된다.²¹⁻²³ PU 폼 합성시 내부 온도 향상에 따라 EPS 입자는 반응기(주형) 내부에서 충분한 발포가 진행된다. Figure 1(a)는 PU 폼 내부에서 발포된 EPS 입자의 표면의 일부가 뚫린 것을 확인할 수 있고, Figure 1(b)는 발포된 EPS의 내벽이 PU 폼의 내벽보다 상대적으로 얇다는 것을 확인할 수 있다. 이러한 EPS의 형상 이외의 모폴로지 변화에 의한 흡음 결

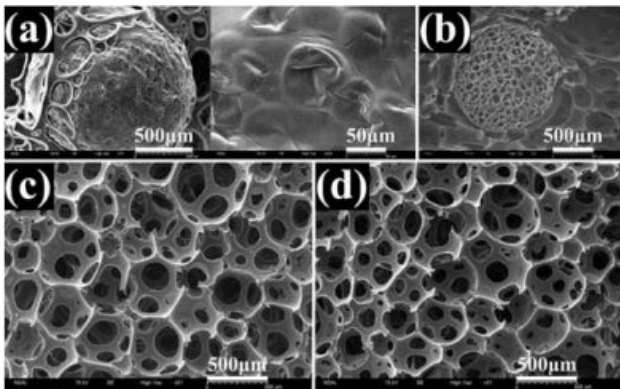


Figure 1. SEM images of the EPS beads in PU foams: (a) surface; (b) cross-section; PU foams at specific EPS contents: (c) 0 wt%; (d) 10 wt%.

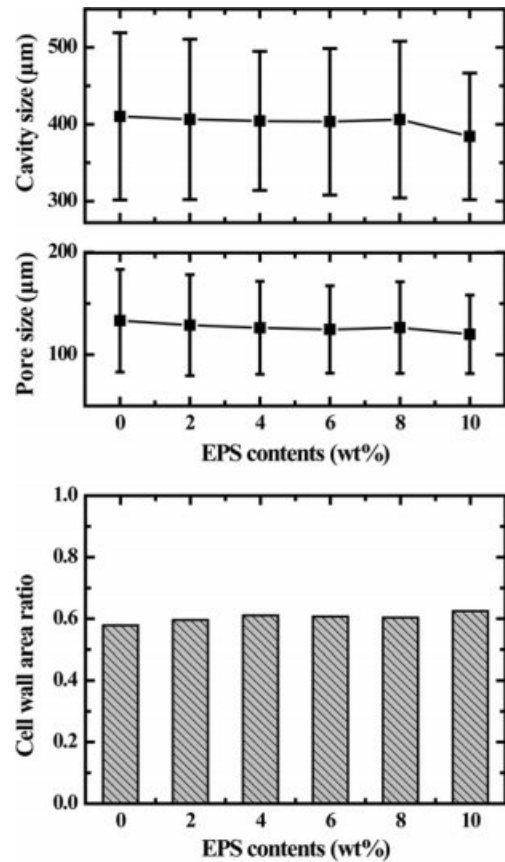


Figure 2. Cavity size, pore size, and cell wall area ratio of the PU foams including EPS beads.

과를 해석하기 위해 내부 모폴로지를 확인하였다. Figure 1(c)와 (d)는 EPS 함량이 0 wt%(reference), 10 wt%일 때의 내부 모폴로지 이미지이다. EPS 함량에 따른 PU 폼의 내부 모폴로지 변화를 이미지 분석을 통해 공동과 미세구멍의 크기, 공동벽 면적비로 수치화하여 Figure 2에 나타내었다. 선행 연구를 바탕으로 공동벽 면적비를 식 (1)과 같이 계산하고, 이를 바탕으로 내부 모폴로지 구조와 물리적 성질과의 관계를 해석하였다.^{24,25}

$$\text{Cell wall area ratio} = 1 - (\Sigma A_p / \Sigma A_c) \quad (1)$$

식 (1)에서 A_p , A_c 는 미세구멍과 공동의 면적을 나타낸다. 모폴로지 분석 결과, EPS 함량 변화에 따른 PU 폼의 공동 크기의 평균값(380-410 μm)과 미세구멍 크기의 평균값(120-130 μm)은 변화가 미미한 수준이며, 공동벽 면적비(0.58-0.62) 또한 변화가 크지 않은 것으로 확인되었다. EPS 입자가 PU 폼의 성장과 동시에 발포가 진행되지만, EPS 입자의 발포력은 PU matrix와 drainage flow를 변화시킬 만큼 크지는 못했다고 판단된다. 이는 Figure 1에서 PU 폼이 EPS 입자 주변 구조 수준에서 변형이 나타난 것으로 확인할 수 있다. 따라서, PU 폼 내부에서 발포된 EPS 입자는 폼의 내부 모폴로지

에는 거의 영향을 주지 않고 PU 폼의 흡음 성능 변화에 영향을 주기보다는 폼에 포함된 발포 EPS 입자 자체로부터 영향을 줄 것이라고 판단할 수 있다.

흡음 성능 분석. 음파는 공기 입자와 마찰, 내부 벽의 진동을 통해 소리에너지를 열에너지로 변환시킨다.^{5,26} 또, 음파의 이동 경로가 길어지면 음파의 내부 잔존 시간이 증가하여 에너지 변환률이 증가하게 되어 다공성 구조를 가진 PU 폼은 우수한 흡음 소재로 평가된다. 이러한 음파의 경로는 non acoustic parameter인 굴곡도(tortuosity)이며, 굴곡도가 증가하면 흡음 계수의 결과가 전체적으로 저음역 영역으로 편향된다. 추가적으로 공극률(porosity)이 증가하면 흡음 계수 결과값의 파동 형상에서 진폭이 좁아지고, 공기 흐름 저항성(air flow resistivity)이 증가하면 전체적인 흡음 성능이 증가한다고 이론적인 계산을 통해 확인할 수 있다.¹⁷

이번 연구에서는 EPS 입자의 함량에 따른 PU 폼의 흡음 성능을 확인하기 위해 impedance tube를 이용하여 흡음 계수(sound absorption coefficient)를 측정하였고, Figure 3에 그 결과를 나타내었다. Figure 3에서 EPS의 함량이 증가할수록 흡음 계수 최대값의 주파수가 저음역대로 이동하는 것을 볼 수 있다. Figure 1과 Figure 2에서 EPS 입자 포함에 따른 PU 폼의 내부 모폴로지 변화는 거의 없었음을 확인하였기에 이는 온전히 폼 내부에서 발포된 EPS 입자의 결과로 해석된다. 저주파는 파장이 길고 진동수가 낮기 때문에 장애물을 만나는 경우 회절성이 강해 반사보다 투과와 회절이 주로 일어난다. 반대로, 고주파는 파장이 짧고 진동수가 크기 때문에 직진성이 강해 회절과 투과보다 반사가 주로 일어난다는 특징이 있다. 이러한 음파의 특성을 고려하면 EPS 입자는 PU 폼 내부에서 저주파를 좀 더 효율적으로 흡수하고 이동 경로를 증가시키는 장애물로 작용한다. Figure 1(a)에서 EPS 입자의 표면 중 일부는 구멍이 있거나 틈이 존재하는 것을 확인할 수 있다. 따라서 EPS 입자를 첨가하여 표면의 균열을 통한

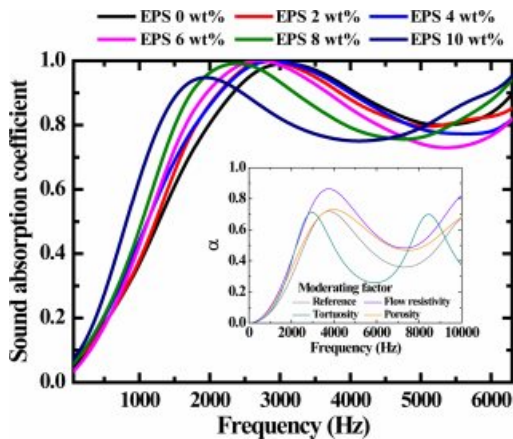


Figure 3. Sound absorption coefficient of the PU foams including various EPS contents.

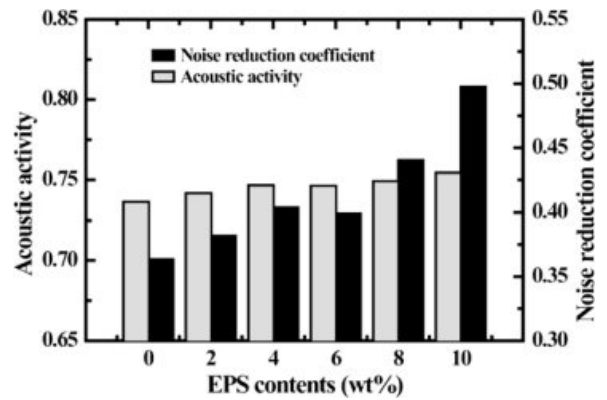


Figure 4. Acoustic activity and noise reduction coefficient of the PU foams including EPS beads.

흡음과, 장애물로 작용하여 굴곡도를 증가시키는 흡음으로 PU 폼의 흡음 성능을 향상시켰다고 판단된다.

흡음 성능 변화를 수치화하기 위해 음향 활성(acoustic activity, AA)과 소음 감소율(noise reduction coefficient, NRC)을 사용하였다. AA와 NRC는 전체적인 흡음 성능과 저음역대의 흡음 성능을 가장 쉽게 평가할 수 있는 지표로, 각각 전체 주파수에서 흡음 계수의 평균과, 250, 500, 1000, 2000 Hz에서 흡음 계수의 평균으로 계산된다. Figure 4는 EPS 함량이 0-

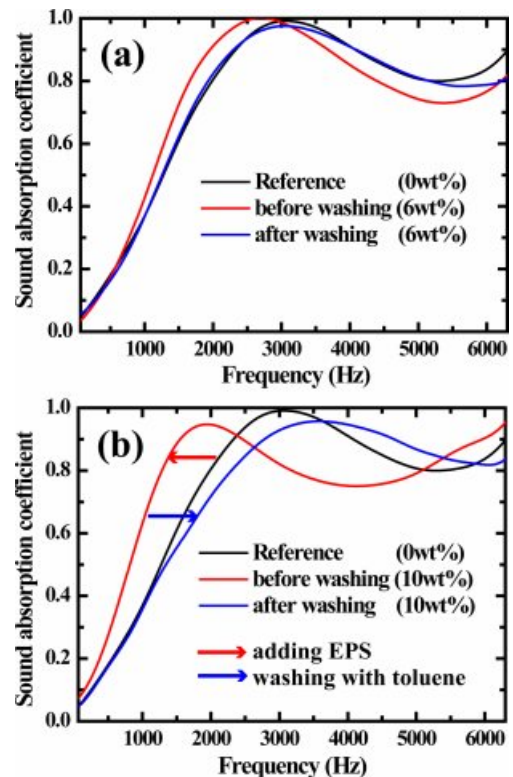


Figure 5. Sound absorption coefficient of the PU foams (a) with EPS beads; (b) without EPS beads after washing with toluene.

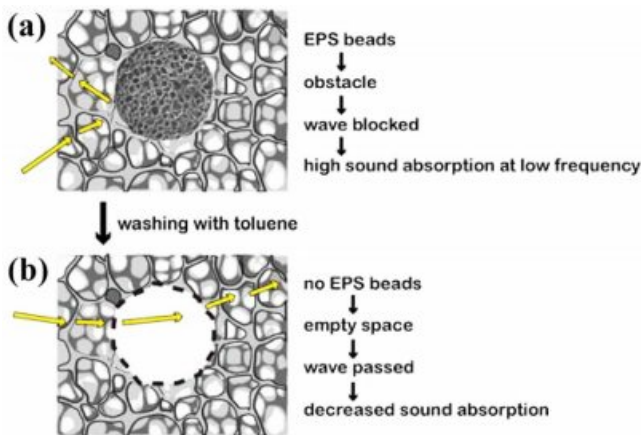


Figure 6. Illustrations of the sound absorption mechanisms of the PU foam (a) with EPS beads; (b) without EPS beads after washing with toluene.

10 wt%일 때, AA와 NRC를 나타낸 그래프이다. 흡음 계수의 최댓값이 저음역대로 이동한 결과, NRC는 0.36에서 0.49까지 증가하였다. 하지만 전체적인 음역대의 흡음 성능을 나타내는 AA 값의 변화는 0.73에서 0.75로 증가하며 미미한 변화를 나타내었다. 이는 흡음 계수가 저음역대에서는 증가하였지만 중음역대에서는 감소하여 생긴 그래프의 파동 개형에 의한 결과로 보인다.

EPS 입자의 효과를 명확하게 확인하기 위해 유기용매인 톨루엔으로 PU 폼 내부의 EPS 입자를 제거하고 흡음 계수를 반복하여 측정하였다. 폴리스티렌은 톨루엔에 쉽게 용해되고, 가교된 폴리우레탄은 톨루엔에 용해되지 않는다. 따라서 PU/EPS 소재에서 톨루엔 세척을 통해 EPS 입자가 제거된 PU 폼만 남는다. Figure 5에서 EPS 첨가 PU 폼의 톨루엔 처리 전, 후의 흡음 계수 값을 측정하여 비교하였다. 톨루엔 처리 전 PU 폼은 EPS 함량이 0, 6, 10 wt%일 때의 순서로 저음역대에서 우수한 흡음 성능을 나타내었다. 하지만, 톨루엔으로 EPS를 제거한 PU 폼의 흡음 계수는 반대로 고음역대로 이동하는 경향이 도출되었다. 이는 EPS 입자가 존재하던 PU 폼 내부의 공간이 빈 공간으로 대체되어 굴곡도와 공기 흐름 저항성이 급격하게 감소하여 나타난 현상으로 보인다. Figure 6에 EPS 입자 첨가 PU 폼의 톨루엔 세척 전, 후의 모습을 개략도로 나타내었다. EPS 입자 첨가로 PU 폼 내부에서 음파의 이동경로가 증가되어 나타난 저음역대의 높은 흡음 특성이 톨루엔 세척을 통해 EPS 입자가 제거되어 다시 고음역대의 흡음 성능으로 변화됨을 간접적으로 확인할 수 있었다.

결 론

본 연구에서는 PU 폼의 흡음 성능을 향상시키기 위해 발포 가능 폴리스티렌(EPS) 입자를 첨가하여 PU 폼을 제작하

였고, 이를 평가하기 위해 흡음 성능을 결정짓는 주파수 별 흡음 계수, 음향 활성, 소음 감소율을 측정하였다. EPS 입자는 PU 폼의 발포과정에서 발생하는 열로 충분한 발포가 가능하기 때문에 EPS 입자와 PU 폼을 동시에 혼합하여 제작이 가능하다. 하지만 EPS 입자의 발포력은 폼을 변형시킬 만큼 강하지 않아 EPS 입자를 첨가한 PU 폼의 morphology 변화는 거의 없었다. EPS 함량에 따른 흡음 계수 그래프의 개형은 저음역대로 이동됨을 보였고, 저음역대에서 우수한 흡음 성능을 나타내었다. 이는 EPS 입자가 PU 폼 내부에서 음파의 이동경로를 증가시키는 장애물 역할을 하고, EPS 표면에 존재하는 균열이 음파를 흡수하는 역할을 하였기 때문으로 판단되었다. AA는 EPS 함량 증가에 따라 다소 증가하는 경향을 보였고, NRC는 EPS 함량이 10 wt%일 때, 0.36에서 0.49까지 증가하였다. 이러한 EPS 입자의 효과를 알아보기 위해 톨루엔을 이용하여 PU 폼 내부의 EPS를 제거하였고, EPS가 제거된 PU 폼은 기존의 EPS 함량 0 wt%인 PU 폼과 유사수준의 흡음 성능을 보이는 것으로 나타났으며 EPS 입자가 PU 폼 내부에서 흡음 성능에 영향을 주는 것으로 확인되었다.

감사의 글: 이 논문은 2021년도 서울시립대학교 기초·보호 학문 및 융복합 분야 R&D 기반 조성 사업에 의하여 지원되었음. 본 결과물은 일부 환경부의 재원으로 한국환경산업기술원의 녹색 융합기술 인재 양성 특성화대학원의 지원을 받아 연구되었으며 이정하는 이에 감사드립니다.

이해상충: 저자들은 이해상충이 없음을 선언합니다.

참 고 문 헌

- Lee, B. Y.; Kim, S. Y.; Lee, K. H.; Jin, B. S. Microstructure-Sound Absorption Relationships of Polyurethane Foam and Application of Low Monol Polyol. *Polym. Korea* **2007**, 31, 289-296.
- Deng, R.; Davies, P.; Bajaj, A. K. Flexible Polyurethane Foam Modelling and Identification of Viscoelastic Parameters for Automotive Seating Applications. *J. Sound Vib.* **2003**, 262, 391-417.
- Sung, G.; Kim, J. W.; Kim, J. H. Fabrication of Polyurethane Composite Foams with Magnesium Hydroxide Filler for Improved Sound Absorption. *J. Ind. Eng. Chem.* **2016**, 44, 99-104.
- Nine, M. J.; Ayub, M.; Zander, A. C.; Tran, D. N. H.; Cazzolato, B. S.; Losic, D. Graphene Oxide-Based Lamella Network for Enhanced Sound Absorption. *Adv. Funct. Mater.* **2017**, 27, 1-10.
- Cao, L.; Fu, Q.; Si, Y.; Ding, B.; Yu, J. Porous Materials for Sound Absorption. *Compos. Commun.* **2018**, 10, 25-35.
- Jingfeng, N.; GuiPing, Z. Sound Absorption Characteristics of Multilayer Porous Metal Materials Backed with an Air Gap. *JVC/*

- J. Vib. Control* **2016**, 22, 2861-2872.
7. Park, J.; Yang, S. H.; Minn, K. S.; Yu, C. Bin; Pak, S. Y.; Song, Y. S.; Youn, J. R. Design and Numerical Analysis of Syntactic Hybrid Foam for Superior Sound Absorption. *Mater. Des.* **2018**, 142, 212-220.
 8. Hyuk, J.; Suh, K.; Rae, H.; Hyun, S.; Bin, C.; Yeol, S.; Sung, C.; Seok, Y.; June, Y.; Ryoum, J. Cell Openness Manipulation of Low Density Polyurethane Foam for Efficient Sound Absorption. *J. Sound Vib.* **2017**, 406, 224-236.
 9. Oh, J. H.; Kim, J. S.; Nguyen, V. H.; Oh, I. K. Auxetic Graphene Oxide-Porous Foam for Acoustic Wave and Shock Energy Dissipation. *Compos. Part B Eng.* **2020**, 186, 107817.
 10. Wang, Y.; Zhang, C.; Ren, L.; Ichchou, M.; Galland, M. A.; Bareille, O. Influences of Rice Hull in Polyurethane Foam on Its Sound Absorption Characteristics. *Polym. Compos.* **2013**, 34, 1847-1855.
 11. Kim, S. K.; Sung, G.; Gwon, J. G.; Kim, J. H. Controlled Phase Separation in Flexible Polyurethane Foams with Diethanolamine Cross-Linker for Improved Sound Absorption Efficiency. *Int. J. Precis. Eng. Manuf. - Green Technol.* **2016**, 3, 367-373.
 12. Choe, H.; Lee, J. H.; Kim, J. H. Polyurethane Composite Foams Including CaCO₃ Fillers for Enhanced Sound Absorption and Compression Properties. *Compos. Sci. Technol.* **2020**, 194, 108153.
 13. Zhang, C.; Li, J.; Hu, Z.; Zhu, F.; Huang, Y. Correlation between the Acoustic and Porous Cell Morphology of Polyurethane Foam: Effect of Interconnected Porosity. *Mater. Des.* **2012**, 41, 319-325.
 14. Gwon, J. G.; Kim, S. K.; Kim, J. H. Development of Cell Morphologies in Manufacturing Flexible Polyurethane Urea Foams as Sound Absorption Materials. *J. Porous Mater.* **2016**, 23, 465-473.
 15. Gwon, J. G.; Kim, S. K.; Kim, J. H. Sound Absorption Behavior of Flexible Polyurethane Foams with Distinct Cellular Structures. *Mater. Des.* **2015**, 387, 448-454.
 16. Sung, G.; Kim, J. H. Influence of Filler Surface Characteristics on Morphological, Physical, Acoustic Properties of Polyurethane Composite Foams Filled with Inorganic Fillers. *Compos. Sci. Technol.* **2017**, 146, 147-154.
 17. Choe, H.; Sung, G.; Kim, J. H. Chemical Treatment of Wood Fibers to Enhance the Sound Absorption Coefficient of Flexible Polyurethane Composite Foams. *Compos. Sci. Technol.* **2018**, 156, 19-27.
 18. Baek, S. H.; Choi, H. J.; Kim, J. H. Effects of Crushing Process and Aging Time on the Sound Absorption Properties of Polyurethane Foams. *Polym. Korea* **2020**, 44, 91-98.
 19. Sung, G.; Choe, H.; Choi, Y.; Kim, J. H. Morphological, Acoustical, and Physical Properties of Free-Rising Polyurethane Foams Depending on the Flow Directions. *Korean J. Chem. Eng.* **2018**, 35, 1045-1052.
 20. Choi, H. J.; Kim, J. H. Acoustic Properties of Polyurethane Foams Including Low Molecular Weight Polyol. *Polym. Korea* **2021**, 45, 143-149.
 21. Cao, B.; Gu, X.; Song, X.; Jin, X.; Liu, X.; Liu, X.; Sun, J.; Zhang, S. The Flammability of Expandable Polystyrene Foams Coated with Melamine Modified Urea Formaldehyde Resin. *J. Appl. Polym. Sci.* **2017**, 134, 1-8.
 22. Zhang, W.; Zhang, J.; Ding, Y.; He, Q.; Lu, K.; Chen, H. Pyrolysis Kinetics and Reaction Mechanism of Expandable Polystyrene by Multiple Kinetics Methods. *J. Clean. Prod.* **2021**, 285, 125042.
 23. Schellenberg, J. Dependence of Thermal Properties of Expandable Polystyrene Particle Foam on Cell Size and Density. *J. Cell. Plast.* **2010**, 46, 209-222.
 24. Choi, H. J.; Kim, J. H. Static and Dynamic Comfort Properties of Polyurethane Foams Including a Flexible Amine Crosslinker. *J. Ind. Eng. Chem.* **2020**, 90, 260-265.
 25. Choi, H. J.; Choe, H.; Seo, W. J.; Kim, J. H. Physical Properties of Flexible Polyurethane Foams Manufactured by Varying Toluene Diisocyanate Contents. *Polym. Korea* **2019**, 43, 532-539.
 26. Kim, J. M.; Kim, D. H.; Kim, J.; Lee, J. W.; Kim, W. N. Effect of Graphene on the Sound Damping Properties of Flexible Polyurethane Foams. *Macromol. Res.* **2017**, 25, 190-196.

출판자 공지사항: 한국고분자화학회는 게재된 논문 및 기관 소속의 관할권 주장과 관련하여 중립을 유지합니다.