

밀도 변화에 따른 연질 폴리우레탄 폼의 모폴로지 구조, 기계적 물성 및 흡음 특성

이주환 · 김정현[†] 

서울시립대학교 화학공학과

(2026년 4월 1일 접수, 2026년 4월 29일 수정, 2026년 4월 29일 채택)

Effect of Density Variation on the Morphological Structure, Mechanical Properties, and Sound Absorption Characteristics of Flexible Polyurethane Foams

Joohwan Lee and Jung Hyeon Kim[†] 

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

(Received April 1, 2026; Revised April 29, 2026; Accepted April 29, 2026)

초록: 본 연구에서는 동일한 조성의 연질 폴리우레탄(FPU) 폼을 몰드 투입량 조절을 통해 서로 다른 밀도로 제조하고, 밀도 변화에 따른 모폴로지 구조, 착좌감 관련 기계적 물성 및 음향 특성의 변화를 분석하였다. 밀도가 증가할수록 공동 크기, 미세구멍 크기 및 미세구멍 개폐도는 감소하였고, 공동 세포벽 면적비는 증가하여 셀 구조의 치밀화가 확인되었다. 꺼짐 인자는 밀도 증가에 따라 감소하였으며, 이력손실은 75 kg/m^3 에서 최대값을 나타내는 비단조적 거동을 보였다. 또한 최대 흡음계수, 음향 활성 및 소음 감소율은 밀도 증가에 비례하였다. 이상의 결과로부터 밀도는 FPU 폼의 셀 구조 변화를 유도함으로써 기계적 물성 및 음향 특성에 중요한 영향을 미치는 인자임을 확인하였다.

Abstract: Flexible polyurethane (FPU) foams with different densities were prepared by varying the pouring amount while maintaining the same formulation, and the effects of density on morphology, comfort-related mechanical properties, and acoustic performance were investigated. As the density increased, the cavity size, pore size, and open porosity decreased, whereas the cell wall area ratio increased, indicating progressive densification of the cellular structure. The sag factor decreased with increasing density, while hysteresis loss exhibited a non-monotonic behavior and reached a maximum at 75 kg/m^3 . In contrast, the maximum sound absorption coefficient, acoustic activity, and noise reduction coefficient increased with density. These results indicate that density is a key factor governing both the mechanical and acoustic properties of FPU foams through structural evolution.

Keywords: flexible polyurethane foam, sag factor, hysteresis loss, sound absorption coefficient, morphology.

서 론

연질 폴리우레탄(flexible polyurethane, FPU) 폼은 가볍고 성형성이 우수하여, 소파, 침대 매트리스, 차량용 내장재 등 다양한 분야에 널리 활용되는 대표적인 고분자 발포체이다. 특히 차량용 시트에 적용되는 FPU 폼은 탑승자의 신체를 지지하면서도 편안한 착좌감을 제공해야 하므로, 용도와 차량에 따라 요구되는 물성이 상이하다.

이에 따라 차량용 시트의 착좌감 향상을 위한 FPU 폼의 구조 및 물성 제어에 관한 연구가 지속적으로 이루어지고 있다.^{1,4} 차량용 시트는 단순히 정적인 승차감을 제공하는 것에 그

치지 않고, 주행 중 발생하는 진동과 충격을 완화하여 탑승자에게 전달되는 불쾌감을 줄일 수 있어야 한다. 이러한 기능은 차량의 noise, vibration, harshness(NVH) 성능과도 밀접한 관련이 있다. 또한 차량 실내의 정숙성은 탑승자의 승차감 인식에 중요한 요소이므로, 차량용 시트 소재의 흡음 성능 역시 함께 고려될 필요가 있다. FPU 폼은 다공성 구조를 가지므로 외부로부터 전달되는 음파 에너지를 일부 흡수할 수 있으며, 이에 따라 차량 실내 소음 저감 및 NVH 성능 향상에 기여할 수 있다. 따라서 우수한 시트용 FPU 폼은 적절한 착좌감을 제공함과 동시에, 차량에서 발생하는 진동 및 소음을 효과적으로 저감할 수 있는 특성을 함께 갖추어야 한다.⁵⁻⁷

시트용 FPU 폼의 착좌감 및 동적 거동을 평가하는 대표적인 지표로는 꺼짐 인자(sag factor)와 이력손실(hysteresis loss)이 있다. 꺼짐 인자는 만능재료시험기(UTM)를 이용하여 얻은 압축-응력 곡선으로부터 25% 변형률에서의 압축응력 대비

[†]To whom correspondence should be addressed.
jhkimad@uos.ac.kr, ORCID[®] 0000-0003-4550-5507
©2026 The Polymer Society of Korea. All rights reserved.

65% 변형률에서의 압축응력의 비로 산출되며, 초기 착좌 시의 부드러움과 고변형 영역에서의 지지 특성을 함께 반영하는 지표로 알려져 있다. 일반적으로 꺼짐 인자가 높을수록 표면은 상대적으로 부드럽게 느껴지면서도 큰 변형에서는 충분한 지지력을 제공할 수 있다. 반면 이력손실은 FPU 폼을 75% 변형률까지 압축한 뒤 회복시키는 과정에서 loading curve와 unloading curve 사이에 형성되는 에너지 차이로 정의되며, 압축 및 회복 과정에서 소산되는 에너지의 정도를 나타낸다. 이는 폼의 복원성뿐만 아니라 진동 및 충격 완화 특성과의 밀접하게 관련된다.⁸⁻¹⁰

이와 같이 꺼짐 인자와 이력손실은 차량용 시트의 정적 안락감과 에너지 소산 특성을 동시에 반영하는 중요한 물성 지표이며, 실제 시트 성능 확보를 위해서는 두 특성이 균형 있게 제어될 필요가 있다.¹¹ 이를 위해 기존 연구에서는 폴리올의 구조와 분자량,¹² 이소시아네이트의 종류,^{13,14} 가교제 및 촉매 조성,¹⁵ 첨가제(filler)의 종류와 전처리 방식,¹⁶⁻¹⁸ 그리고 모폴로지 구조와 같은 다양한 인자들이 FPU 폼의 물리적 특성과 흡음 특성에 미치는 영향을 검토해 왔다.¹⁹ 특히 원료의 화학 구조 및 조성 변화는 경질 분절과 연질 분절의 분포, 가교밀도, 모폴로지 특성에 영향을 미치며, 그 결과 꺼짐 인자와 이력손실의 변화로 이어질 수 있다.²⁰ 그러나 특정 물성의 향상을 위한 조성 제어가 다른 물성의 저하를 동반하는 경우가 많아, 차량용 시트에 요구되는 착좌감과 진동 감소 특성을 동시에 만족시키기 위한 연구는 여전히 중요하다.

한편, FPU 폼의 물성 조절에 관한 기존 연구들은 주로 원료 조성 변화나 첨가제 도입에 초점을 맞추어 수행되어 왔다. 반면, 추가적인 재료 변화 없이 발포 시스템의 투입량만을 조절하여 밀도를 변화시키고, 이에 따른 착좌감 관련 물성과 흡음 특성의 변화를 체계적으로 분석한 연구는 상대적으로 제한적이다. 밀도는 폼의 셀 구조, 기계적 물성, 그리고 음향 특성에 직접적인 영향을 미치는 핵심 인자이므로, 밀도 변화에 따른 구조-물성 상관관계를 규명하는 것은 차량용 시트 소재 설계 측면에서 중요한 의미를 가진다. 따라서 본 연구에서는 재료 조성의 변화 없이 몰드에 투입되는 우레탄 시스템의 양만을 조절하여 FPU 폼의 밀도를 변화시켰다. 이후 밀도 변화에 따른 모폴로지 구조 차이를 확인하기 위해 주사전자현미경(SEM) 분석을 수행하였으며, 만능재료시험기를 이용하여 꺼짐 인자와 이력손실을 평가하였다. 임피던스 튜브를 이용하여 흡음 성능을 분석함으로써, 밀도 변화가 FPU 폼의 착좌감 관련 물성 및 음향 특성에 미치는 영향을 종합적으로 고찰하고자 하였다.

실 험

실험재료. FPU 폼은 폴리에테르 폴리올 PPG-6000(수산기 함: 28 ± 2 , M_w : 6000 g/mol, 관능기수: 3, 금호석유화학, Korea)과

toluene diisocyanate(TDI)와, methylene diphenyl diisocyanate(MDI)가 혼합된 이소시아네이트 CG-7070S(%NCO: 36.8 ± 0.5 , 금호미쓰이화학, Korea)가 주재료로 사용되었다. 폼 형성과 발포 반응을 촉진시키기 위한 겔링 촉매로 DABCO 33LV(33% triethylenediamine, 67% dipropylene glycol, Air Products and Chemicals, USA), 블로잉 촉매로 BL-17(78% bis(dimethylaminoethyl)-etherformate dipropylene glycol solution, Air Products and Chemicals, USA)이 사용되었다. 고분자 사슬을 연장 및 연결하는 역할로 가교제인 diethanolamine(DEOA, M_w : 105.14 g/mol, Sigma-Aldrich, USA)이 사용되었다. 발포 반응 시 이산화탄소 생성을 유도하기 위한 보조 발포제로는 탈이온수가 사용되었고, 탈이온수의 균일하고 안정적인 분산을 위해 실리콘 계면활성제(L-3002, Momentive, USA)가 사용되었다.

폴리우레탄(Polyurethane, PU) 합성. FPU 폼은 폴리올 시스템과 이소시아네이트 시스템이 혼합되어 합성된다. 폴리올 시스템은 베이스 폴리올, 겔링 촉매, 블로잉 촉매, 가교제, 보조 발포제 그리고 실리콘 계면활성제로 구성되어 있다. 먼저 Table 1의 처방에 따라 폴리올 시스템을 측량한 후, 32 oz 종이컵에서 1800 rpm의 속도로 10분간 혼합하여 균일하게 분산시킨다. 그리고 균일하게 분산된 폴리올 시스템에 NCO index 1.0에 맞추어 계량한 이소시아네이트를 투입하여 6000 rpm의 속도로 10초간 혼합한다. 폴리올 시스템과 이소시아네이트가 혼합된 액체를 60 °C의 알루미늄 주형($200 \times 200 \times 50$ mm)에서 20분간 탈형한 후 상대습도 $50 \pm 10\%$ 의 상온에서 3일 동안 경화시켰다.

모폴로지 분석. PU 폼의 모폴로지 분석은 주사전자현미경(SNE3000M, SEC, Korea, at 15 kV)을 이용하여 사진을 얻고, 이미지 분석 프로그램 Image Pro Plus(Media Cybernetic, USA)를 통해 15개의 표본으로부터 공동(cavity)과 미세구멍(pore)의 크기 등을 측정하였다. 열린형(open), 부분적으로 열린형(partially open), 폐쇄형(closed) 등 미세구멍의 형태에 따라 개수를 세어 미세구멍 개폐도(open porosity)를 분석하였다. 그리고 공동 세포벽 면적비(cell wall area ratio)를 분석하여 고분자 골격이 차지하는 비율을 분석하였다.

Table 1. Formulation of Polyurethane Foams

Materials		Contents (g)
Polyol system	Base polyol (PPG-6000)	100
	Gelling catalyst (33LV)	0.72
	Blowing catalyst (BL-17)	0.08
	Cross-linker (DEOA)	0.6
	Blowing agent (H ₂ O)	3
	Surfactant (L-3002)	1.32
Isocyanate ^a		CG-7070S
		44.71

^aNCO index 1.0

물리적 특성. PU 폼 샘플($50 \times 50 \times 25$ mm)을 제조한 후, 만능재료시험기(LS1, Lloyd Instruments Ltd., UK)를 이용하여 100 mm/min의 속도로 예비 압축(3회)을 통해 폼의 안정화를 거친 후 물성분석을 실시하였다. 만능재료시험기로 폼을 압축하고 이완하여 얻어지는 이력곡선에서 꺼짐 인자와 이력손실을 분석하였다.²¹

흡음 성능 분석. FPU 폼의 흡음 성능은 저주파, 중주파, 그리고 고주파 영역에서 평가할 수 있다. 이를 위해 두 종류의 임피던스 튜브(저·중주파 구간: SW420, BSWA, USA, 고주파 구간: SW 470, BSWA, USA)를 사용하여 측정하였다. 샘플의 직경은 주파수 영역에 따라 다르게 측정하였다. 각각 100 mm(저·중주파 구간, 63-1600 Hz)와 30 mm(고주파 구간, 1000-6300 Hz)이고 두께는 20 mm이다. 흡음 성능 측정 결과는 VA-Lab software(BSWA, USA)를 이용하여 흡음 계수(Sound absorption coefficient)로 나타내었으며, 추가적인 흡음 성능 지표로는 음향활성(Acoustic activity, AA)과 소음 감소율(Noise Reduction Coefficient, NRC)로 나타났다.

결과 및 토론

모폴로지 분석 및 실제 밀도 측정. PU 폼 제조 과정에서 밀도를 조절하기 위해 몰드에 투입되는 우레탄 시스템의 양을 달리하였다. 목표 밀도의 재현성을 확인하기 위해 각 목표 밀도별로 폼을 3회 반복 제조하였으며, 각 시편의 밀도를 측정 한 결과 모든 밀도 범위에서 목표 밀도 대비 평균 오차율은 1.30%로 나타났다. 이는 본 실험에서 설정한 밀도가 안정적으로 구현되었음을 나타낸다.

이후 밀도 변화에 따른 폼의 모폴로지 특성을 분석하였다. Figure 1은 각 밀도 조건에서 관찰한 SEM 이미지를 나타낸 것이며, 이를 바탕으로 공동과 미세구멍의 크기, 미세구멍의 개폐도, 그리고 공동 세포벽 면적비를 분석하여 Figure 2에 정리하였다. Figure 2는 밀도 변화에 따른 폼의 모폴로지 구조 특성 변화를 나타낸다. Figure 2(a)에서 확인할 수 있듯이,

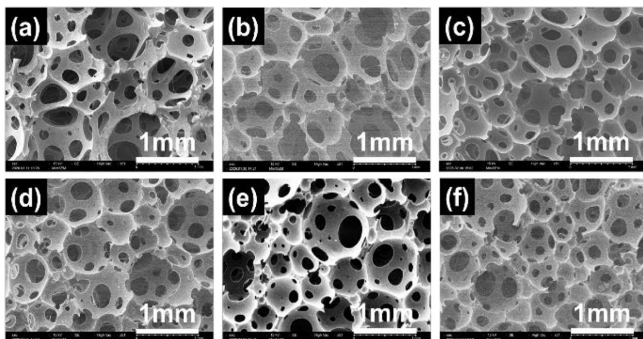


Figure 1. SEM analysis of PU foams at various densities (kg/m^3): (a) 65; (b) 70; (c) 75; (d) 80; (e) 85; (f) 90.

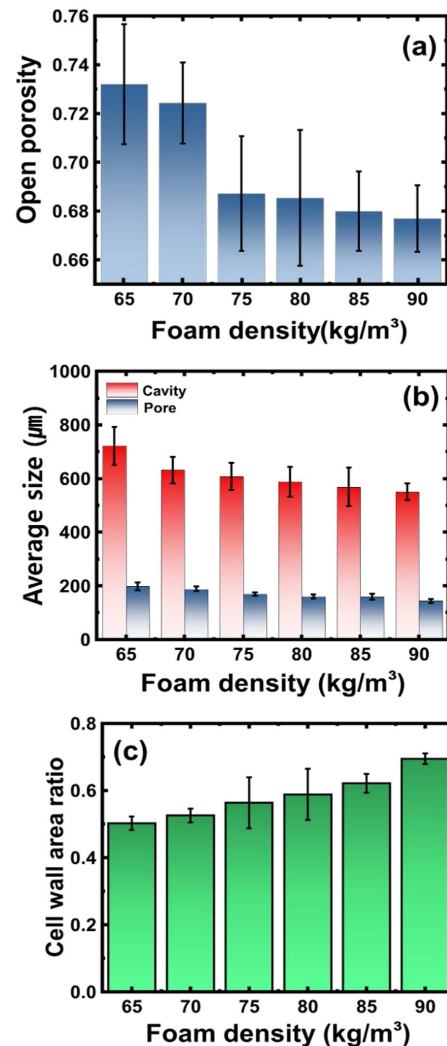


Figure 2. Morphological parameters of PU foams: (a) open porosity; (b) cavity and pore sizes; (c) cell wall area ratio at various densities.

밀도가 증가할수록 미세구멍 개폐도는 감소하는 경향을 보였으며, 이는 인접 셀 간 연결성이 점차 저하되었음을 시사한다.^{22,23} 또한 Figure 2(b)에서 공동과 미세구멍의 크기 역시 밀도 증가에 따라 감소하였는데, 이는 폼 내부의 셀 구조가 더 치밀하게 형성되었음을 시사한다. 이러한 경향과 일치하게 Figure 2(c)에서는 공동 세포벽 면적비가 증가하는 것으로 나타났다. 이는 밀도 증가에 따라 기공이 차지하는 상대적 면적은 감소하고 고분자 골격이 차지하는 비율은 증가하였기 때문으로 해석된다.

종합적으로 볼 때, 밀도 증가에 따라 폼 내부의 공동 및 미세구멍의 크기가 감소하고 셀 간 연결성이 낮아졌으며, 반대로 세포벽이 차지하는 비율은 증가하였다. 이러한 결과는 밀도 증가가 폼의 미세구조를 전반적으로 치밀화시키는 방향으로 작용하였음을 시사한다.²²⁻²⁴

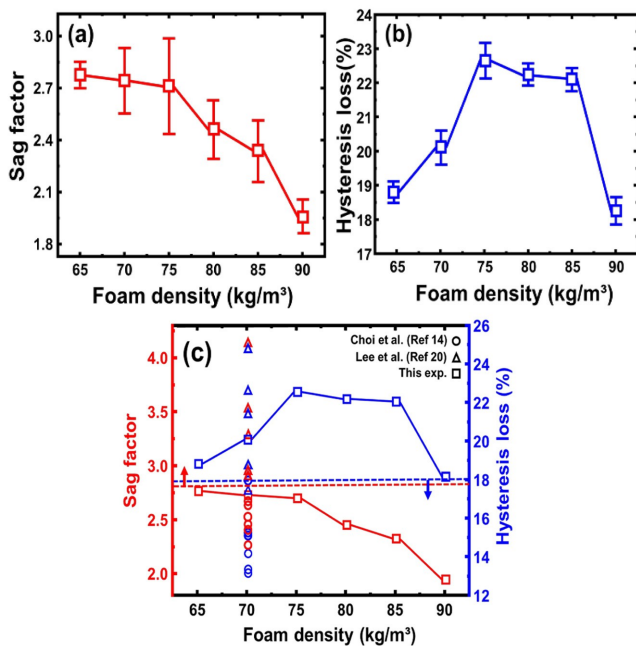


Figure 3. (a) Sag factor; (b) Hysteresis loss as a function of foam density; (c) comparison of the obtained values with previously reported data.

물리적 특성 분석. 밀도 변화에 따른 PU 폼의 착좌감 관련 물성인 꺼짐 인자와 이력손실을 분석하였다. Figure 3(a)는 밀도 변화에 따른 꺼짐 인자의 변화를 나타낸 것으로, 밀도가 증가할수록 꺼짐 인자가 감소하는 경향을 보였다. 이에 대한 보다 구체적인 해석을 위해 Figure 4에 꺼짐 인자 산출에 사용되는 25% 및 65% 변형률에서의 압축 응력을 함께 나타냈다. Figure 4에서 확인할 수 있듯이, 밀도가 증가함에 따라 25% 및 65% 변형률에서의 압력은 모두 증가하였다. 그러나 25% 변형률에서의 압력 증가율이 65% 변형률에서의 압력 증가율보다 더 크게 나타났으며, 이로 인해 밀도가 증가할수록 꺼짐 인자는 감소하는 경향을 나타냈다.

Figure 3(b)는 밀도 변화에 따른 이력손실 값을 나타낸다. 이력손실은 밀도 증가에 따라 단조롭게 변화하지 않고, 증가 후 감소하는 비단조적 거동을 나타냈다. 저밀도 영역에서는 밀도 증가에 따라 이력손실이 증가하였으며, 75 kg/m³에서 최댓값을 나타냈다. 이는 단위 부피당 고분자 골격의 비율 증가로 인해 압축 및 회복 과정에서 내부 마찰과 점탄성적 손실이 증대되었기 때문으로 판단된다.^{10,25} 그러나 75 kg/m³ 이상의 고밀도 영역에서는 이력손실이 다시 감소하였으며, 특히 최고 밀도 조건에서 현저한 감소가 관찰되었다. 이는 밀도 증가에 따라 셀 구조가 지나치게 치밀해지고 셀 벽이 두꺼워지면서 과도한 셀 벽 굽힘이나 붕괴가 제한되었기 때문으로 해석된다. 실제로 고밀도 폼에서는 미세구멍 개폐도와 공동 및 미세구멍의 크기가 감소하고 공동 세포벽 면적비가

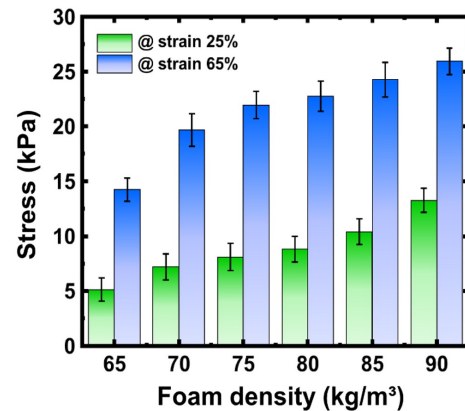


Figure 4. Effect of various densities on the compressive stresses of polyurethane foams at 25% and 65% strain.

증가하는 경향을 보였으며, 이는 셀 골격이 보다 두껍고 조밀한 구조로 변화했음을 의미한다. 이러한 구조에서는 압축 시 셀 벽이 크게 변형되며 에너지를 소산하기보다는, 고분자 골격이 하중을 보다 탄성적으로 지지하고 회복하는 거동이 우세해질 수 있다. 그 결과 반복 압축 시 loading curve와 unloading curve 사이의 면적 차이가 감소하여 이력손실이 낮아진 것으로 판단된다.^{26,27}

한편, 셀 내부의 공기 흐름 저항 또한 이력손실에 영향을 줄 수 있다.²⁸ 본 연구에서 밀도 증가에 따라 음향 활성화와 소음 감소율이 증가한 것은 고밀도 폼에서 보다 조밀한 셀 구조로 인해 공기 흐름 저항과 음향 에너지 소산이 증가했음을 간접적으로 시사한다. 그러나 이력손실은 75 kg/m³ 이후 오히려 감소하였으므로, 본 압축 시험 조건에서 고밀도 영역의 이력손실 감소는 공기 흐름 저항보다는 고분자 골격 및 셀 벽의 점탄성 변형·회복 거동 변화에 더 크게 지배된 것으로 판단된다.^{25,28}

Figure 3(c)는 본 연구에서 얻은 꺼짐 인자와 이력손실 값을 기존 연구 결과와 비교하여 나타낸 것이다. 본 연구에서는 꺼짐 인자 2.8 이상과 이력손실 18% 이하를 동시에 만족하는 샘플의 구현 가능성을 확인하고자 하였다.^{4,20,29} 비교 결과, This exp.는 별도의 필터 첨가나 원료 조성 변화 없이 밀도 조절만으로 얻어진 기준 데이터로서, 기존 조성 설계 연구들과 비교할 때 상대적으로 단순한 변수 제어에 따른 물성 변화를 보여준다. Figure 3(c)에서 This exp.는 일부 밀도 조건에서 이력손실 18% 기준선에 근접하였으나, 꺼짐 인자가 2.8 이상인 영역과 동시에 겹치지는 않았다. 이는 밀도 조절만으로는 꺼짐 인자 향상과 이력손실 저감을 동시에 달성하는 데 한계가 있음을 의미한다. 반면, 기존 연구에서 보고된 필터 첨가, 폴리올 구조 제어, 이소시아네이트 조성 변화 데이터는 목표 영역에 보다 근접한 분포를 보였으며, 이는 최적의 착좌감 특성 구현을 위해 밀도 제어뿐만 아니라 복합적인 조성 설계가 필요함을 시사한다.³⁰⁻³²

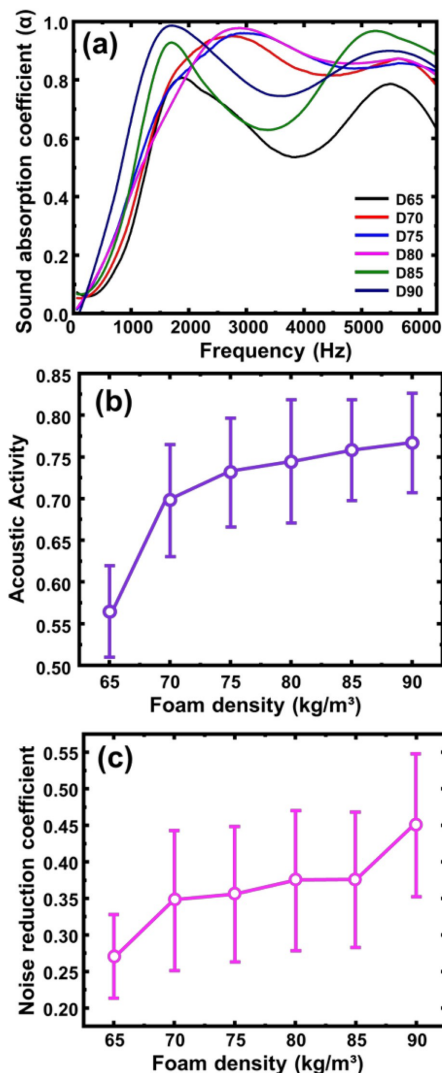


Figure 5. Density-dependent acoustic properties of polyurethane foams: (a) sound absorption coefficient; (b) acoustic activity; (c) noise reduction coefficient (NRC).

흡음 특성 분석. 밀도 변화에 따른 PU 폼의 흡음 특성을 관찰하였으며, Figure 5에는 각각 흡음 계수, 음향 활성(acoustic activity), 그리고 소음 감소율(noise reduction coefficient, NRC)을 나타냈다. Figure 5(a)에서 밀도가 증가할수록 흡음 계수의 최대 피크가 증가하는 경향을 나타냈다. 이는 밀도 증가에 따라 폼 내부의 셀 구조가 더욱 치밀해지고 단위 부피당 고분자 골격 비율이 증가하면서, 음파가 내부 공극을 통과하는 과정에서 점성 마찰 및 열 손실이 더욱 커졌기 때문으로 해석된다. 또한 Figure 2에서 확인한 바와 같은 공극 구조의 치밀화, 기공 크기의 감소, 그리고 공동 세포벽 면적비의 증가는 음파의 전달 및 감쇠 거동에 복합적으로 작용하여 내부 점성 마찰 및 열 손실을 증대시켰고, 그 결과 최대 흡음 피크가 향상된 것으로 판단된다.^{23,24,33}

Figure 5(b)의 음향 활성은 측정 주파수 범위 전반에서의 평균 흡음계수를 의미하며, 재료의 전반적인 흡음 성능을 평가하는 지표로 사용될 수 있다. 음향 활성 역시 밀도가 증가할수록 증가하는 경향을 나타내었는데, 이는 고밀도화에 따라 폼 내부 구조가 치밀해지고 음파 전달 과정에서의 점성 마찰 및 열 손실이 증가하여 전 주파수 영역에서의 평균적인 음향 감쇠 성능이 향상되었기 때문으로 해석된다.³⁴⁻³⁶

Figure 5(c)의 소음 감소율(NRC)은 250, 500, 1000, 2000 Hz에서 측정된 흡음계수의 평균값으로, 재료의 대표적인 중주파 영역 흡음 성능을 나타내는 지표이다. 소음 감소율 역시 밀도가 증가함에 따라 증가하는 경향을 보였으며, 이는 밀도 증가에 따른 셀 구조의 치밀화와 내부 마찰 및 열 손실의 증가로 인해 해당 주파수 영역에서의 음향 감쇠가 향상되었기 때문으로 판단된다.^{37,38} 그러나 밀도 증가에 따른 흡음 성능 향상은 일정 범위 내에서만 유효할 수 있다. 밀도 증가에 따른 기공 크기 감소와 공기 흐름 저항 증가는 음파의 점성 마찰 및 열 손실을 증가시켜 흡음 성능을 향상시킬 수 있지만, 과도한 고밀도화는 미세구멍 개폐도를 지나치게 감소시키고 공기 흐름 저항을 과도하게 증가시켜 음파의 내부 침투를 제한할 수 있다. 이 경우 표면 반사가 증가하고 음향 임피던스 불일치가 발생하여 흡음 성능이 포화되거나 감소할 수 있다. 기존 연구에서도 FPU 폼의 흡음 특성은 기공 구조와 유동 흐름 저항의 균형에 의해 결정되며, 폐쇄형 미세구멍의 비와 특정 유동 흐름 저항이 과도하게 증가한 조건에서는 흡음 효율이 감소할 수 있음이 보고되었다. 따라서 본 연구에서 90 kg/m³까지 소음 감소율과 음향 활성이 증가한 것은 해당 밀도 범위가 아직 임계 영역에 도달하지 않았기 때문으로 판단된다.^{12,39}

결론

본 연구에서는 몰드에 투입되는 우레탄 시스템의 양을 조절하여 서로 다른 밀도의 FPU 폼을 제조하고, 이에 따른 모폴로지 구조, 착좌감 관련 물성 및 흡음 특성의 변화를 분석하였다. 실제 밀도는 목표 밀도 대비 평균 오차율 1.30% 이내로 구현되어, 밀도 제어가 안정적으로 이루어졌음을 확인하였다.

밀도가 증가할수록 공동 및 미세구멍의 크기와 미세구멍의 개폐도는 감소하였고, 공동 세포벽 면적비는 증가하여 폼 내부 구조가 점차 치밀해지는 경향을 나타냈다. 이러한 구조 변화에 따라 꺼짐 인자는 감소하였으며, 이력손실은 중간 밀도 구간에서 최댓값을 나타낸 후 고밀도 구간에서 감소하는 비단조적 거동을 보였다. 이는 밀도 증가에 따른 고분자 골격의 발달과 과도한 고밀도화에 따른 셀 변형 거동의 제한이 복합적으로 작용한 결과로 판단된다. 또한 흡음계수의 최대 피크, 음향 활성 및 소음 감소율은 모두 밀도 증가에 따라 증가하였다.

따라서 밀도 변화는 FPU 폼의 미세구조를 변화시키고, 이에 따라 착좌감 관련 물성 및 흡음 특성에 직접적인 영향을 미치는 주요 인자임을 확인하였다. 그러나 본 연구와 같은 단순한 밀도 조절만으로는 꺼짐 인자와 이력손실을 동시에 최적화하는 데 한계가 있었다. 따라서 향후에는 선행연구에서 보고된 가교제 조절과 같은 조성 설계 인자와 밀도 제어를 함께 고려한 접근이 필요할 것으로 판단된다.

감사의 글: 이 논문은 2025년도 서울시립대학교 기초·보호 학문 및 융복합 분야 R&D 기반조성사업에 의하여 지원되었음.

이해상충: 저자들은 이해상충이 없음을 선언합니다.

참고문헌

- White, S. W.; Kim, S. K.; Bajaj, A. K.; Davies, P.; Showers, D. K.; Liedtke, P. E. Experimental Techniques and Identification of Nonlinear and Viscoelastic Properties of Flexible Polyurethane Foam. *Nonlinear Dyn.* **2000**, 22, 281-313.
- 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.
- Lee, B. J.; Lee, S. H.; Choi, K. Y.; Kim, S. B. Effect of Change in Water Content and NCO Index on the Static Comfort of Polyurethane Seat Foam Pad for Automobiles. *Appl. Chem. Eng.* **2017**, 28, 57-63.
- 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.
- Zhang, X.; Qiu, Y.; Griffin, M. J. Transmission of Vertical Vibration Through a Seat: Effect of Thickness of Foam Cushions at the Seat Pan and the Backrest. *Int. J. Ind. Ergon.* **2015**, 48, 36-45.
- Álvarez-Láinez, M.; Rodríguez-Pérez, M. A.; De Saja, J. A. Acoustic Absorption Coefficient of Open-cell Polyolefin-based Foams. *Mater. Lett.* **2014**, 121, 26-30.
- Lee, J.; Kim, J. H. Performance Evaluations of Flexible Polyurethane Foams Manufactured with Castor Oil-based Bio-polyol. *Polym. Test.* **2023**, 124, 108069.
- Moon, J.; Sinha, T. K.; Kwak, S. B.; Ha, J. U.; Oh, J. S. Study on Seating Comfort of Polyurethane Multilayer Seat Cushions. *Int. J. Automot. Technol.* **2020**, 21, 1089-1095.
- Moon, J.; Kwak, S. B.; Lee, J. Y.; Kim, D.; Ha, J. U.; Oh, J. S. Synthesis of Polyurethane Foam from Ultrasonically Decrosslinked Automotive Seat Cushions. *Waste Manag.* **2019**, 85, 557-562.
- Scarfato, P.; Di Maio, L.; Incarnato, L. Structure and Physical-mechanical Properties Related to Comfort of Flexible Polyurethane Foams for Mattress and Effects of Artificial Weathering. *Compos. B Eng.* **2017**, 109, 45-52.
- Wada, H.; Toyota, Y.; Horie, A.; Sasaki, T.; Suzuki, C.; Fukuda, H. Automotive Seating Foams with Excellent Riding Comfort Prepared by a Novel Polypropylene Glycol. *Polym. J.* **2008**, 40, 842-845.
- Choi, H. J.; Kim, J. H. Acoustic Properties of Polyurethane Foams Including Low Molecular Weight Polyol. *Polym. Korea* **2021**, 45, 143-149.
- Choe, H.; Kim, J. H. Reactivity of Isophorone Diisocyanate in Fabrications of Polyurethane Foams for Improved Acoustic and Mechanical Properties. *J. Ind. Eng. Chem.* **2019**, 69, 153-160.
- 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.
- Dworakowska, S.; Bogdał, D.; Zaccheria, F.; Ravasio, N. The Role of Catalysis in the Synthesis of Polyurethane Foams Based on Renewable Raw Materials. *Catal. Today* **2014**, 223, 148-156.
- 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.
- Yun, D.; Kim, J. H. Performance Enhancements of PU Composite Foams Reinforced with Starfish Particles Chemically Treated by Silane Derivatives. *Adv. Powder Technol.* **2024**, 35, 104349.
- 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.
- Choi, H. J.; Kim, J. H. Sound Absorption Improvement of Polyurethane Foam Through Sequential Arrangement of Its Cellular Morphology. *Korean J. Chem. Eng.* **2022**, 39, 1072-1077.
- Lee, J.; Chang, J.; Kim, J. H. Comparative Analysis of Static and Dynamic Properties of Polyurethane Foams Fabricated Using Polycarbonate Diol and Isophorone Diisocyanate. *Korean J. Chem. Eng.* **2025**, 42, 3293-3302.
- ASTM D3574-17, Standard Test Methods for Flexible Cellular Materials-Slab, Bonded, and Molded Urethane Foams; ASTM International: West Conshohocken, PA, 2017.
- Lan, Z.; Daga, R.; Whitehouse, R.; McCarthy, S.; Schmidt, D. Structure-properties Relations in Flexible Polyurethane Foams Containing a Novel Bio-based Crosslinker. *Polymer* **2014**, 55, 2635-2644.
- Park, J. H.; Minn, K. S.; Lee, H. R.; Yang, S. H.; Yu, C. B.; Pak, S. Y.; Oh, C. S.; Song, Y. S.; Kang, Y. J.; Youn, J. R. Cell Openness Manipulation of Low Density Polyurethane Foam for Efficient Sound Absorption. *J. Sound Vib.* **2017**, 406, 224-236.
- Zhang, C.; Li, J.; Hu, Z.; Zhu, F.; Huang, Y. Correlation Between the Acoustic and Pore Morphology of Polyurethane Foam: Effect of Interconnected Porosity. *Mater. Des.* **2012**, 41, 319-325.
- Mills, N. J.; Lyn, G. Modelling of Air Flow in Impacted Polyurethane Foam. *Cell. Polym.* **2002**, 21, 343-368.
- Belsare, N.; Nandi, S. Sustainable Polyurethane Foam Formulation with Bio-polyol Blends for Automotive Seating Applications. *Ind. Crops Prod.* **2025**, 226, 120672.
- Abdullah, M.; Ramtani, S.; Yagoubi, N. Mechanical Properties of Polyurethane Foam for Potential Application in the Prevention and Treatment of Pressure Ulcers. *Results Eng.* **2023**, 19, 101237.
- Mills, N. J. Finite Element Models for the Viscoelasticity of

- Open-cell Polyurethane Foam. *Cell. Polym.* **2006**, 25, 293-316.
29. Mills, N. J. *Polymer Foams Handbook: Engineering and Biomechanics Applications and Design Guide*; Elsevier: Oxford, 2007.
 30. Prociak, A.; Malewska, E.; Kurańska, M.; Bąk, S.; Budny, P. Flexible Polyurethane Foams Synthesized with Palm Oil-based Bio-polyols Obtained with the Use of Different Oxirane Ring Opener. *Ind. Crops Prod.* **2018**, 115, 69-77.
 31. Singh, V.; Gopalasamudram, M. N.; Maitra, J. Impact of Ambient and Vacuum Pressure on the Physico Mechanical Properties of Flexible Polyurethane Foam Reinforced with CaCO₃. *Polym. Adv. Technol.* **2024**, 35, e6313.
 32. Prociak, A.; Malewska, E.; Bąk, S. Influence of Isocyanate Index on Selected Properties of Flexible Polyurethane Foams Modified with Various Bio-components. *J. Renew. Mater.* **2016**, 4, 78-85.
 33. Mahasaranon, S.; Horoshenkov, K. V.; Khan, A.; Benkreira, H. The Effect of Continuous Pore Stratification on the Acoustic Absorption in Open Cell Foams. *J. Appl. Phys.* **2012**, 111, 084901.
 34. Ning, J.; Zhao, G.; He, X. Non-acoustical Parameters and Sound Absorption Characteristics of Porous Polyurethane Foams. *Phys. Fluids* **2019**, 31, 032108.
 35. Trinh, V. H.; Nguyen, T. V.; Nguyen, T. H. N.; Nguyen, M. T. Design of Sound Absorbers Based on Open-cell Foams via Microstructure-based Modeling. *Arch. Acoust.* **2022**, 47, 501-512.
 36. Mohammadi, B.; Ershad-Langroudi, A.; Moradi, G.; Safaiyan, A.; Habibi, P. Mechanical and Sound Absorption Properties of Open-cell Polyurethane Foams Modified with Rock Wool Fiber. *J. Build. Eng.* **2022**, 48, 103872.
 37. Cops, M. J.; McDaniel, J. G.; Magliula, E. A.; Bamford, D. J. Analysis of Thermal and Viscous Boundary Layers in Acoustic Absorption by Metallic Foam. *J. Acoust. Soc. Am.* **2019**, 146, 649-655.
 38. Cops, M. J.; McDaniel, J. G.; Magliula, E. A.; Bamford, D. J.; Bliefnick, J. Measurement and Analysis of Sound Absorption by a Composite Foam. *Appl. Acoust.* **2020**, 160, 107138.
 39. Sung, G.; Kim, J. S.; Kim, J. H. Sound Absorption Behavior of Flexible Polyurethane Foams Including High Molecular-weight Copolymer Polyol. *Polym. Adv. Technol.* **2018**, 29, 852-859.

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