

Styrene 농도에 따른 Core-Shell 구조의 Silica Aerogel-Polystyrene 입자 특성과 이를 이용한 복합 폴리우레탄 폼의 물성 연구

김미예[✉] · 김상범[†]

경기대학교 화학공학과

(2026년 5월 7일 접수, 2026년 5월 8일 수정, 2026년 5월 8일 채택)

Effect of Styrene Concentration on the Properties of Core-Shell Structured Silica Aerogel-Polystyrene Particles and Their Application in Polyurethane Foam Composites

Miye Kim[✉] and Sang-Bum Kim[†]

Department of Chemical Engineering, Kyonggi University, 154-42, Gwanggyosan-ro, Yeontong-gu, Suwon 16227, Korea

(Received May 7, 2026; Revised May 8, 2026; Accepted May 8, 2026)

초록: 본 연구는 경질 폴리우레탄 폼(RPUF)의 단열 성능과 기계적 성능을 향상시키기 위해 styrene의 농도에 따라 silica aerogel(SA)을 polystyrene(PS)으로 캡슐화하여 SA의 기공이 보존된 SA-PS 입자를 합성하였으며, 합성된 SA-PS 입자를 RPUF에 도입하여 복합 RPUF를 합성하였다. Styrene의 농도가 증가함에 따라 SA-PS 입자의 크기와 PS 코팅층의 두께가 증가함을 확인하였다. SA-PS를 RPUF에 도입한 결과 PS 코팅으로 SA의 기공이 보존되어 폼의 열전도율은 최대 11.2% 감소하였으며, 압축강도는 최대 3.5% 증가하였다. SA-PS의 캡슐화 및 styrene의 농도 변화를 통해 RPUF의 단열 및 기계적 특성 개선에 효과적임을 확인하였다.

Abstract: In this study, core-shell structured silica aerogel-polystyrene (SA-PS) particles were synthesized by encapsulating silica aerogel (SA) with polystyrene (PS) to enhance the thermal and mechanical properties of rigid polyurethane foams (RPUF). To preserve the inherent porosity of the SA, the encapsulation process was controlled by varying the styrene concentration. It was observed that both the particle size and the thickness of the PS coating layer increased with higher styrene concentrations. Incorporating SA-PS particles into RPUF significantly improved performance by preventing matrix penetration into SA pores, achieving a 11.2% reduction in thermal conductivity and a 3.5% increase in compressive strength, proving this encapsulation strategy effective for high-performance RPUF.

Keywords: silica aerogel, polymer coating, encapsulation, polyurethane foam, thermal conductivity, mechanical properties.

서론

폴리우레탄(PUs)은 밀도, 열 안정성, 내화학성 및 생체 적합성을 제어할 수 있고 우수한 가공성으로 전 세계적으로 다양하게 사용된다.¹⁻⁴ PUs 시장은 2023년에 약 780억 달러의 글로벌 시장 가치를 달성하였으며, 2024년부터 2030년까지 연평균 약 4.5%의 복합 성장률을 기록할 것으로 예상된다. PUs는 경질 폴리우레탄 폼(RPUF), 연질 폴리우레탄 폼 및 엘라스토머 등에 사용되고 RPUF의 생산량은 2022년에 생산된 PUs의 65%로 PUs 산업에서 가장 큰 부분을 차지한다.⁵

RPUF는 건축물의 에너지 효율과 보존을 향상시키는 효율적인 방법 중에 하나로 우수한 기계적 강도와 낮은 열전도율로 인해 널리 사용되고 있다.^{6,7} 열전달 이론에 따르면 다공성 복합재의 열전달 경로가 복잡할수록 낮은 열전도율을 가진다.^{7,8}

Silica aerogel은 낮은 밀도, 작은 기공 및 높은 기공률로 인해 낮은 열전도율을 가지며, 이를 폴리머 폼과 복합화할 경우 열전달 이론에 따라 열전도율의 감소를 기대할 수 있다.⁹⁻¹¹ 그러나 silica aerogel은 다공성 구조로 인해 낮은 기계적 성능을 가지며, 고분자 수지와와의 복합화 과정에서 기공으로 고분자 수지가 침투하여 기공이 붕괴될 수 있다.^{12,13} Silica aerogel의 기공으로 고분자 수지가 침투하게 되면 기공 속 공기가 고분자 수지로 대체되어 열전도율의 증가를 초래한다. 이러한 현상을 방지하기 위해 silica aerogel의 표면을 개질하거나 고분자로 코팅하는 등의 연구가 진행되고 있다.¹⁴⁻¹⁶

[†]To whom correspondence should be addressed.
ksb@kyonggi.ac.kr, ORCID[®] 0000-0001-6201-4078
©2026 The Polymer Society of Korea. All rights reserved.

Zhou 등은 아미노기를 갖는 APTES로 silica aerogel의 표면을 개질한 후 이를 RPUF에 도입하여 복합 발포체를 합성하였다. Silica aerogel의 표면에 아미노기를 도입함으로써 PU 발포 반응에 참여할 수 있는 활성점을 제공하여 silica aerogel과 매트릭스 간의 상호작용이 강화되었으며, 그 결과 열전도율은 17.6%, 압축 강도는 43.27% 향상되었다.¹⁵ Gupta 등은 에폭시 수지와 silica aerogel 복합체를 제조하는 과정에서 액상 수지가 aerogel의 나노 기공 내부로 침투하는 것을 방지하기 위해 용매 제거 기반의 코팅 기법을 적용하였다. 에폭시 수지와 아세톤을 희석한 뒤 silica aerogel을 분산시키고 가열 과정에서 아세톤을 제거함으로써 aerogel 입자 표면에 얇은 에폭시 막을 형성하였다. 이 방법을 통해 에폭시의 과도한 침투 없이 표면 코팅이 이루어졌으며, silica aerogel의 기공이 보존된 것을 확인하였다.¹⁶

Qian 등은 TEOS의 농도 변화를 통해 코팅 두께가 다른 중공형 SiO₂와 polystyrene/SiO₂를 합성하였으며, TEOS의 농도가 증가할수록 입자의 크기와 코팅 두께가 증가하는 것을 확인하였다. 그 결과 코팅 두께가 증가하면 부하가 분산되어 탄성계수가 증가하는 것을 확인하였다.¹⁷ 그러나 코팅 두께의 증가는 열전도율의 증가로 이어질 수 있다. Chen 등은 Ge 나노 와이어에 Si 코팅을 도입한 연구에서 얇은 코팅에서는 계면 산란으로 열전도율이 감소하였으나, 코팅 두께가 임계치를 넘으면 오히려 열전도율이 상승할 수 있음을 제시하였다.¹⁸

최근 본 연구팀은 RPUF의 단열 성능을 향상시키기 위해 계면활성제 함량을 달리하여 서로 다른 입자 크기를 갖는 core-shell 구조의 silica aerogel-polystyrene을 합성하였고, 이를 도입하여 복합 폴리우레탄 폼을 합성하였다. 계면활성제의 함량이 증가함에 따라 입자 크기는 최대 102.27 nm에서 86.06 nm로 감소하였으며, 복합 폴리우레탄 폼의 단열성능과 압축강도는 각각 8.4, 3.2% 향상하였다.¹⁹ 계면활성제의 함량 조절은 입자의 전체적인 크기를 조절할 수는 있지만 코팅층의 두께를 제어하기는 어렵다.

본 연구는 RPUF의 단열 성능과 기계적 성능의 향상을 위해

styrene의 농도를 달리하여 silica aerogel-polystyrene을 합성하고 입자의 특성을 고찰하였다. 또한, 합성된 silica aerogel-polystyrene을 RPUF에 도입하여 복합 폴리우레탄 폼을 합성하고 styrene의 농도가 RPUF의 물성에 미치는 영향을 분석하였다.

실 험

재료. Silica aerogel-polystyrene 합성을 위해 silica aerogel(SA)은 Cabot(미국)사의 공극률 95% 이상, 기공 크기 20-40 nm, 열전도율 12 mW/mK인 것을 전기로에서 400 °C로 4시간 열처리 후 사용하였다. styrene(≥99%), sodium dodecyl sulfate(SDS)(≥99%) 및 potassium persulfate(KPS)(≥99%)는 모두 Aldrich(독일)사에서 구입하여 사용하였으며, 이를 각각 monomer, 계면활성제 및 개시제로 사용하여 polystyrene(PS) 중합 반응을 진행하였다. RPUF 합성을 위해 BASF(독일)사에서 제공받은 polyol system(OH-V: 333 mgKOH/g)과 p-MDI(NCO%: 31.2%)를 사용하였으며, 물리적 발포제는 Honeywell(미국)사의 HFO-1233zd를 사용하였다.

Silica Aerogel-Polystyrene(SA-PS) 합성. SA-PS의 합성은 부반응을 억제하기 위해 N₂ 분위기에서 환류 냉각기와 열전대를 장착한 상태로 진행하였다. 물 150 g에 SDS 10 wt% 첨가하여 상온에서 교반하고 열처리한 SA 1 g을 첨가해 교반하였다. Styrene의 농도는 0.1-0.5 mol/L로 변화시켰으며 샘플

Table 1. SA-PS Samples According to Monomer Concentration

Sample	Styrene concentration (mol/L)
SA-PS(A)	0.1
SA-PS(B)	0.2
SA-PS(C)	0.3
SA-PS(D)	0.4
SA-PS(E)	0.5

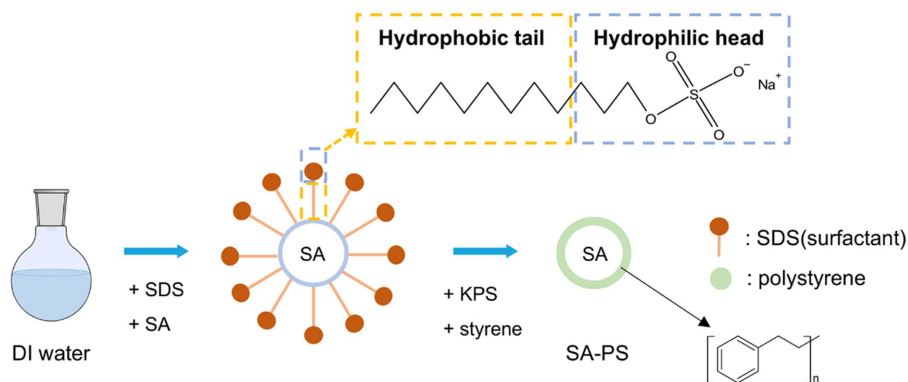


Figure 1. SA-PS encapsulation polymerization process schematic diagram.

명은 Table 1을 따른다. KPS는 0.1 g을 첨가하여 80 °C에서 24시간 동안 교반하였다.^{20,21} SA-PS의 합성 후 1500 rpm에서 에탄올로 원심분리 세척을 진행하여 미반응물과 SDS를 제거하였으며, 50 °C 대류 오븐에서 24시간 건조를 진행하였다.

SA-PS 복합 RPUF(SPF) 합성. 나노 입자를 복합화하여 RPUF를 합성하기 위해 SA와 SA-PS를 각각 polyol system에 0.3 wt%씩 첨가하여 초음파 분산을 진행하였다. 나노 입자가 첨가된 polyol system에 발포제를 포화시킨 후 p-MDI를 첨가하여 강하게 교반하였고 open mold에서 발포 반응을 진행하였다. RPUF의 샘플명은 나노 입자가 첨가되지 않은 RPUF를 NF, SA를 첨가한 RPUF를 SF, SA-PS(A)가 첨가된 RPUF를 SPF(A)라고 명명하였다.

기기분석. Bruker사(미국)의 Platinum-ATR을 사용해 SA와 SA-PS의 구조 분석을 진행하였으며, 400-4000 cm^{-1} 범위에서 확인하였다. Micromeritics(미국)사의 brunauer-emmett-teller (BET) 분석 장비인 ASAP 2010을 사용해 N_2 의 흡착/탈착에 따른 SA-PS의 비표면적을 측정하였다. JEOL(일본)사의 JSM-7610F PLUS를 이용해 field emission-scanning electron microscope(FE-SEM)을 촬영하였으며 SA와 SA-PS 입자의 형상은 15000배율, RPUF의 cell morphology는 40배율로 관찰하였다. PerkinElmer(미국)사의 TGA4000을 사용해 SA와 SA-PS의 열적 안정성을 확인하였으며, 승온 속도 10 °C/min으로 40-650 °C 까지 측정하였다. RPUF의 밀도는 KS M ISO845에 따라 50×50×50 mm 크기의 정육면체 시편의 겉보기 밀도를 측정하였으며, (주)테넨돌프(한국)사의 universal testing machine (UTM)을 사용해 ASTM-D1621에 따라 시편 10개를 측정하고 평균값을 계산하였다. TA instruments(미국)사의 FOX-304를 사용해 열전도도를 측정하였으며 ASTM C518에 따라 300×300×50 mm 크기의 시편을 측정하였다.

결과 및 토론

Styrene 농도에 따른 SA-PS의 합성 및 물성. Figure 2는 합성된 SA-PS의 FTIR 결과를 나타내었다. Figure 2(a)에서 SA의 특성 피크인 Si-O-Si 피크를 1080, 800, 460 cm^{-1} 에서 확인하였고, SA-PS로의 합성을 확인할 수 있는 (b), (c) 피크는 Figure 2(b)에서 확인할 수 있다. Styrene에서는 1629 cm^{-1} 와 1683 cm^{-1} 에서 vinyl group의 피크를 관찰할 수 있지만 중합 후인 SA-PS에서는 없어진 것을 확인할 수 있다. 또한, benzene의 C=C 결합 피크인 1452 cm^{-1} 와 1493 cm^{-1} 가 존재하고, styrene의 농도가 높아질수록 해당 피크의 크기가 증가하는 것을 통해 SA-PS의 PS의 중합이 이루어졌으며 PS 코팅의 두께 증가를 확인할 수 있다.

Figure 3은 styrene 농도에 따른 SA-PS의 입자 크기와 BET 측정 결과를 나타내었다. Styrene의 농도가 증가하면 입자의 크기가 증가하는 것을 확인할 수 있다. 이에 따라 styrene의

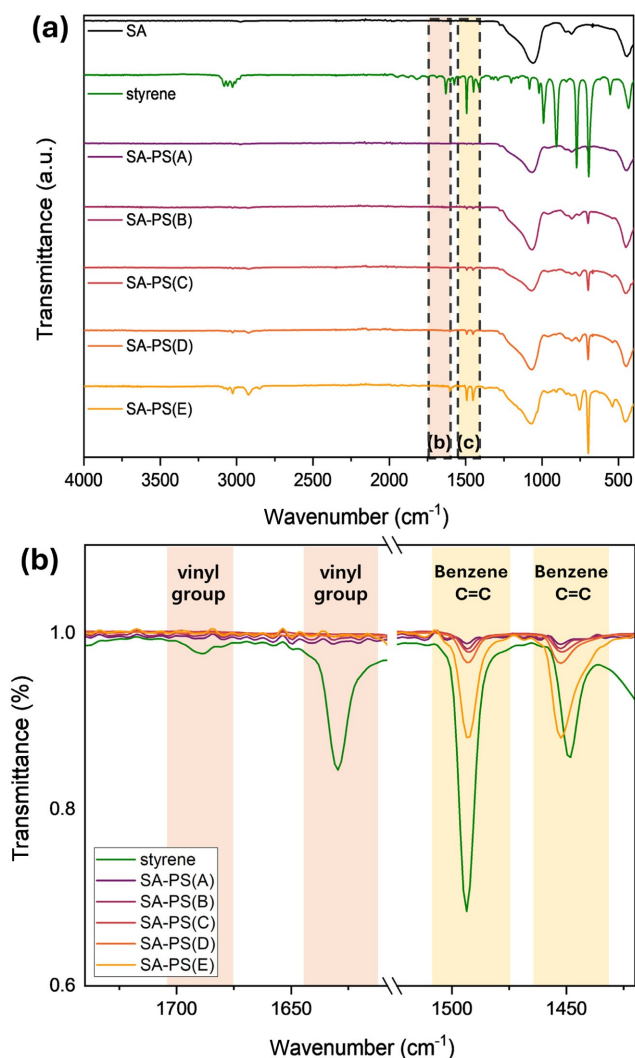


Figure 2. FTIR of SA-PS according to styrene concentration: (a) the region from 400 to 4000 cm^{-1} ; (b) from 1420 to 1740 cm^{-1} .

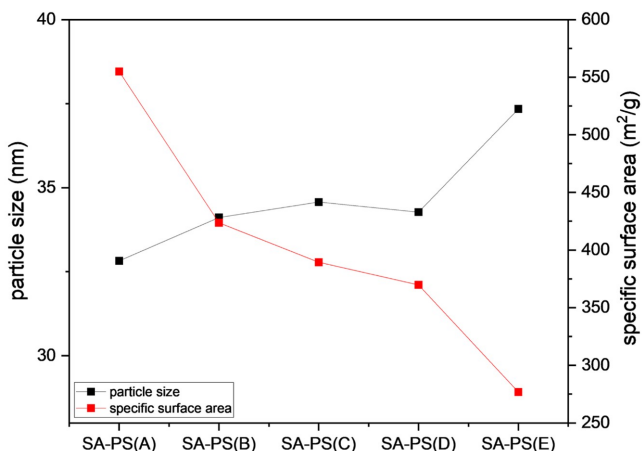


Figure 3. Particle size and specific surface area of SA-PS according to styrene concentration.

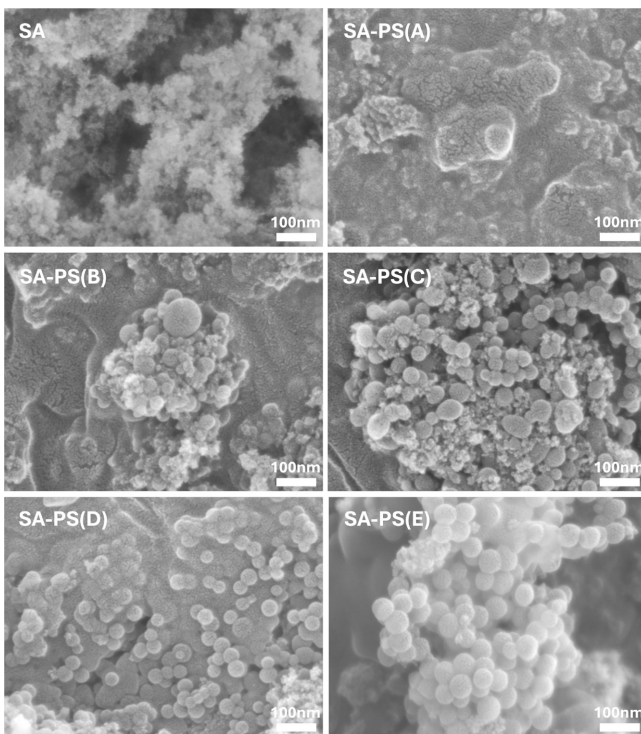


Figure 4. SEM of SA-PS particles according to SA and styrene concentration.

농도 증가는 코팅 두께를 증가시켜 입자 크기에 영향을 준 것으로 사료된다. 또한, 비표면적은 styrene 농도 증가에 따라 감소하고 있는데 이는 입자 크기의 증가 때문이다.¹⁹ Figure 4는 SA와 SA-PS 입자의 SEM을 촬영한 이미지이다. SA는 수십 나노미터의 입자가 느슨한 3차원 네트워크 구조를 이루고 있음이 확인된다. SA-PS의 경우 SA와 달리 구형의 모양을 보이며, styrene의 농도가 증가할수록 SA 입자의 코팅이 고르게 이루어지는 것을 확인하였다. 이를 통해 SA가 PS로 캡슐화 되었음을 확인하였다.

Figure 5는 SA-PS의 열적 특성을 분석한 결과이다. Figure 5(a)는 온도에 따른 SA-PS의 중량 감소를 나타낸 TGA 곡선으로 styrene의 농도가 증가할수록 잔여물의 양이 감소하는 것을 확인할 수 있다. 그 이유는 styrene의 농도가 증가하면서 Figure 2를 통해 PS의 코팅 두께가 증가하는 것을 확인할 수 있다. PS는 분해 후 휘발하는 휘발성 물질로 PS 양이 증가함에 따라 잔여물의 양이 점차 감소하게 된다. Figure 5(b)는 DTG 그래프로 PS의 코팅 두께가 증가함에 따라 SA-PS 입자 속 SA의 비율이 감소하여 styrene의 농도가 증가함에 따라 최대 분해 온도가 점점 감소하게 되었다.

Styrene 농도에 따른 SPF의 열전도율. Figure 6과 7 및 Table 2는 styrene 농도에 따른 RPUF의 열전도율과 cell 크기를 나타내었다. SF는 NF에 비해 열전도율이 증가하였다. 이는 SA의 기공 내 공기가 열전도율이 더 높은 고분자 수지로 대

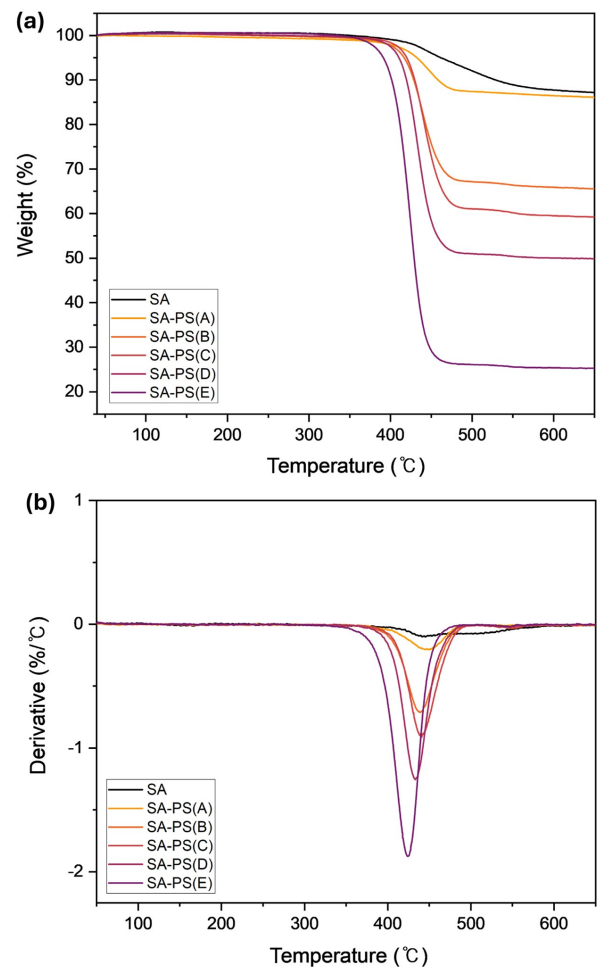


Figure 5. (a) TGA; (b) DTG of SA-PS according to styrene concentration.

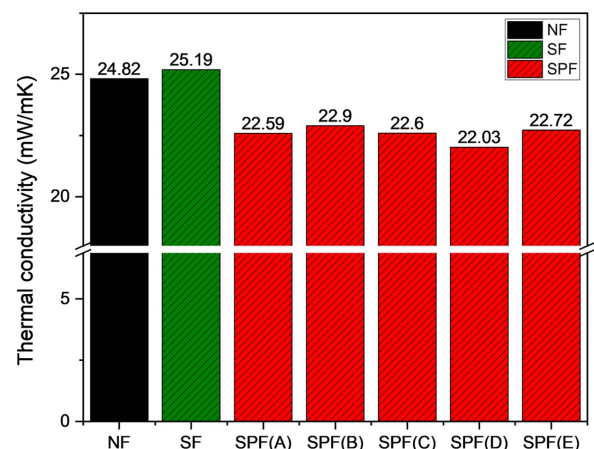
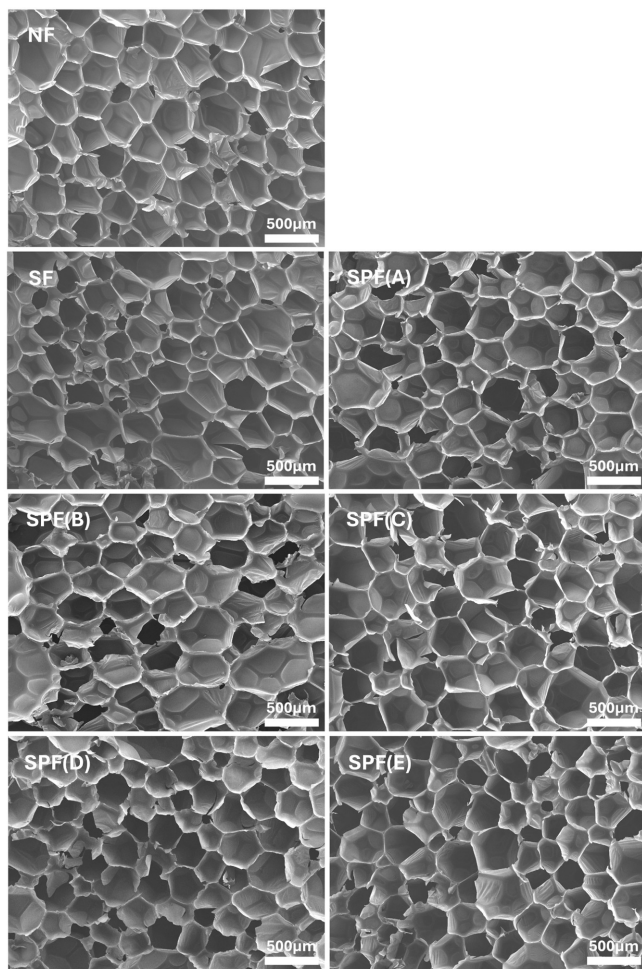


Figure 6. Thermal conductivity of SPFs according to styrene concentration.

체되면서 증가한 결과이다.^{22,23} SPF는 NF에 비해 열전도율이 최대 11.2% 감소하였다. 이는 SA-PS가 RPUF 형성 과정에서

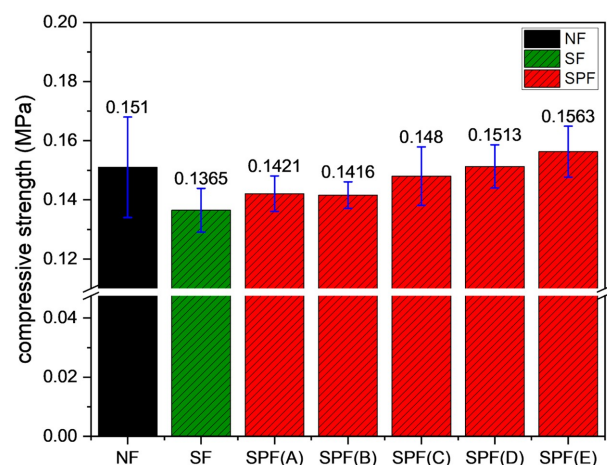
Table 2. Thermal Conductivity and Cell Morphology of SA-PS According to Styrene Concentration

	NF	SF	SPF(A)	SPF(B)	SPF(C)	SPF(D)	SPF(E)
Thermal conductivity (mW/mK)	24.82	25.19	22.59	22.9	22.6	22.03	22.72
Cell size (μm)	406.98	358.9	403.44	405.78	405.41	380.19	406.55
Standard deviation	60.14	68.66	45.06	55.21	46.61	42.85	52.73

**Figure 7.** SEM of SA-PS according to styrene concentration ($\times 40$).

핵제로 작용하여 균일한 cell의 형성을 유도하고, PS 코팅층이 SA의 기공을 보존함으로써 열전달 경로를 복잡하게 만든 결과이다.^{24,25} 또한 PS가 계면 열 저항 효과를 상승시켜 SPF의 열전도율이 감소할 수 있었다.²⁶

Styrene 농도에 따른 SPF의 압축강도. Figure 8은 styrene 농도에 따른 SPF의 압축강도를 나타낸 그래프이다. SF는 NF에 비해 압축강도가 크게 감소하였다. 그 이유는 SA의 다공성 구조와 낮은 기계적 강도로 인한 결과이다. SPF의 경우 NF에 비해 최대 약 3.5% 증가하였다. 이는 SA의 구조적 결함으로 인한 약한 기계적 성능을 PS로 캡슐화함으로써 극복할 수 있

**Figure 8.** Compressive strength of SPFs according to styrene concentration.

었다.¹⁹ Styrene의 농도가 증가할수록 SPF의 압축강도가 증가하며, 이는 styrene의 농도 증가에 따라 PS 코팅의 두께와 균일성이 증가하여 부하의 분산으로 인한 결과이다. 또한, cell의 표준 편차가 감소하여 고른 cell이 형성되며 압축 하중을 고르게 분산시킬 수 있었기 때문이다.

결론

RPUF의 단열 성능과 기계적 성능의 향상을 위해 styrene의 농도를 달리하여 core-shell 구조의 SA-PS를 합성하였으며, 이를 RPUF에 도입하여 복합 폴리우레탄 폼(SPF)을 합성하고, styrene의 농도가 RPUF의 물성에 미치는 영향을 고찰하였다.

Styrene의 농도가 증가할수록 SA-PS의 입자 크기가 증가하였으며, PS 코팅의 두께와 균일성이 증가하여 SA의 기공을 보존할 수 있었다. 이에 따라 SA 도입에 따른 폴리우레탄 폼의 물성 저하를 극복할 수 있었으며 본 연구에서는 NF 대비 단열 성능과 압축강도를 각각 11.2%와 3.5% 향상시킬 수 있었다.

SA-PS가 첨가된 복합 RPUF의 열전도율은 최대 11.2% 감소하였으며, 압축강도는 최대 3.5% 증가하였다.

감사의 글: 본 연구는 2023년도 경기대학교 교내연구 지원에 의해 수행되었음.

이해상충: 저자(들)는 이해상충이 없음을 선언합니다.

참 고 문 헌

- De Souza, F. M.; Sulaiman, M. R.; Gupta, R. K. Materials and Chemistry of Polyurethanes. In *Materials and Chemistry of Flame-Retardant Polyurethanes Volume 1: A Fundamental Approach*; American Chemical Society: Washington, DC, 2021; pp 1-36.
- Akindoyo, J. O.; Beg, M. D. H.; Ghazali, S.; Islam, M. R.; Jeyaratnam, N.; Yuvaraj, A. R. Polyurethane Types, Synthesis and Applications—A Review. *RSC Adv.* **2016**, 6, 114453-114482.
- Li, Y.; Zhao, L.; Huang, G.; Zhang, T.; Zhang, J. A Review on Room-Temperature Self-Healing Polyurethane: Synthesis, Self-Healing Mechanism and Application. *J. Leather Sci. Eng.* **2022**, 4, 24.
- Ren, H.; Liu, J.; Wang, J.; Wang, X. Cellulose Nanocrystal/Phytic Acid-Enhanced Non-Isocyanate Polyurethane Foams. *Polymer* **2025**, 334, 128740.
- Lim, C. C. N. D.; Samy, M. M.; Hussin, M. H. Emerging Trends in Nonisocyanate Polyurethane Foams: A Review. *ACS Eng. Au* **2024**, 4, 493-518.
- Wicklein, B.; Kocjan, A.; Salazar-Alvarez, G.; Carosio, F.; Camino, G.; Antonietti, M.; Bergström, L. Thermally Insulating and Fire-Retardant Lightweight Anisotropic Foams Based on Nanocellulose and Graphene Oxide. *Nat. Nanotechnol.* **2015**, 10, 277-283.
- Yu, N.; Li, X.; Chen, Y.; Zhang, Z.; Wang, Q. In-situ Packing Self-Intumescent Aerogel Particles in Rigid Polyurethane Foam Towards Thermal Insulation, Flame Retardance and Smoke Suppression. *Chem. Eng. J.* **2025**, 503, 158514.
- Qian, L.; Wang, J.; Yu, H.; Zhao, G. Theoretical Model and Finite Element Simulation on the Effective Thermal Conductivity of Particulate Composite Materials. *Compos. Part B: Eng.* **2017**, 116, 291-297.
- Dorcheh, A. S.; Abbasi, M. H. Silica Aerogel: Synthesis, Properties and Characterization. *J. Mater. Process. Technol.* **2008**, 199, 10-26.
- Rashid, A. B.; Islam, M. R.; Hasan, M. S.; Rahman, M. S. Silica Aerogel: Synthesis, Characterization, Applications, and Recent Advancements. *Part. Part. Syst. Charact.* **2023**, 40, 2200186.
- Gurav, J. L.; Jung, I. K.; Park, H. H.; Kang, E. S.; Nadargi, D. Y. Silica Aerogel: Synthesis and Applications. *J. Nanomater.* **2010**, 2010, 409310.
- Kim, H. M.; Lee, S. Y.; Kim, H. J.; Kim, Y. H.; Kim, S. Y. Silica Aerogel/Epoxy Composites with Preserved Aerogel Pores and Low Thermal Conductivity. *e-Polym.* **2015**, 15, 111-117.
- Vahtrus, M.; Püssa, K.; Krumme, A.; Krumme, K.; Pohlak, M. Mechanical and Thermal Properties of Epoxy Composite Thermal Insulators Filled with Silica Aerogel and Hollow Glass Microspheres. *Proc. Estonian Acad. Sci.* **2017**, 66, 409-420.
- Zhang, G.; Dass, A.; Rawashdeh, A. M. M.; Thomas, J. S.; Counsil, J. A. Isocyanate-Crosslinked Silica Aerogel Monoliths: Preparation and Characterization. *J. Non-Cryst. Solids* **2004**, 350, 152-164.
- Zhou, X.; Li, X.; Lei, X.; Wang, C. Enhanced Mechanical Property and Thermal Insulation of Modified Rigid Polyurethane Foams by Few Surface-Functional Silica Aerogel. *Cell. Polym.* **2024**, 43, 145-158.
- Gupta, N.; Ricci, W. Processing and Compressive Properties of Aerogel/Epoxy Composites. *J. Mater. Process. Technol.* **2008**, 198, 178-182.
- Chen, Y.; Qian, C.; Miao, N. Atomic Force Microscopy Indentation to Determine Mechanical Property for Polystyrene-Silica Core-Shell Hybrid Particles with Controlled Shell Thickness. *Thin Solid Films* **2015**, 579, 57-63.
- Chen, J.; Zhang, G.; Li, B. Impacts of Atomistic Coating on Thermal Conductivity of Germanium Nanowires. *Nano Lett.* **2012**, 12, 2826-2832.
- Kim, M. Y.; Kim, S. B. Study on the Characteristics of Silica Aerogel-Polystyrene Depending on the Surfactant Content and the Characteristics of Composite Polyurethane Foam Using It. *Polym. Korea* **2026**, 50, 136-143.
- Najjar, T. A.; Allam, N. K.; El Sawy, E. N. Anionic/Nonionic Surfactants for Controlled Synthesis of Highly Concentrated Sub-50 nm Polystyrene Spheres. *Nanoscale Adv.* **2021**, 3, 5626-5635.
- Ding, X.; Zhao, J.; Liu, Y.; Zhang, H.; Wang, Z. Silica Nanoparticles Encapsulated by Polystyrene via Surface Grafting and *In Situ* Emulsion Polymerization. *Mater. Lett.* **2004**, 58, 3126-3130.
- Liu, C.; Kim, J. S.; Kwon, Y. Comparative Investigation on Thermal Insulation of Polyurethane Composites Filled with Silica Aerogel and Hollow Silica Microsphere. *J. Nanosci. Nanotechnol.* **2016**, 16, 1703-1707.
- Krishnaswamy, S.; Hungerford, C.; Manoharan, M. P.; Kwon, Y. Morphological, Optical and Thermal Characterisation of Aerogel-Epoxy Composites for Enhanced Thermal Insulation. *J. Compos. Mater.* **2019**, 53, 909-923.
- Liu, S.; Mahalingam, S.; Kontopoulou, M.; Park, C. B. Silica-Assisted Nucleation of Polymer Foam Cells with Nanoscopic Dimensions: Impact of Particle Size, Line Tension, and Surface Functionality. *ACS Appl. Mater. Interfaces* **2017**, 9, 37929-37940.
- Liu, S.; Mahalingam, S.; Kontopoulou, M.; Park, C. B. Designer Core-Shell Nanoparticles as Polymer Foam Cell Nucleating Agents: The Impact of Molecularly Engineered Interfaces. *ACS Appl. Mater. Interfaces* **2021**, 13, 17034-17045.
- Hallim, Z. A. A.; Yajid, M. A. M.; Idris, M. H.; Hamdan, H. Physicochemical and Thermal Properties of Silica Aerogel-Poly vinyl alcohol/Core-Shell Structure Prepared Using Fluidized Bed Coating Process for Thermal Insulation Applications. *Mater. Chem. Phys.* **2018**, 215, 269-276.

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