



배포 일자
2026.9.1.(화)

보도 희망 일시	☒ 엠바고 없음(즉시)		☐ 엠바고 별도 기재		
연구참여 (문의)	소속	성명	저자구분	연락처	이메일
	농업생명과학대학 농림생물자원학부	신성철	교신저자	880-4623	sungssc@snu.ac.kr

□ 연구 제목/부제

제목	농업생명과학대학 신성철 교수팀 오징어뼈·목재 구조 모사한 다축 정렬 에어로젤 개발
	- 순차적 동결주조 기술로 다공성 소재의 정렬각과 기계적 특성 제어 - - 경량 구조재·충격 흡수 소재·유체 수송 소재 응용 가능성 제시, Advanced Science 게재 및 Front Cover 선정 -

□ 연구 요약

서울대학교 농업생명과학대학은 농림생물자원학부 신성철 교수 연구팀이 오징어뼈와 목재 등 생체소재의 다축 정렬 구조에서 영감을 받아, 기계적 안정성과 유체 수송 기능을 동시에 조절할 수 있는 다축 정렬 에어로젤 제조 기술을 개발했다.

연구팀이 개발한 순차적 침투 및 동결주조 기반 기술인 SHIFT는 먼저 일방향으로 정렬된 1차 에어로젤을 만든 뒤, 내부 기공에 2차 고분자 용액을 침투시키고 원하는 방향으로 다시 동결주조하는 방식이다. 이를 통해 0도에서 90도까지 2차 정렬각을 제어할 수 있으며, 기존 일방향 동결주조 구조의 한계였던 횡방향 기계적 취약성을 보완하고 반복 압축 회복성과 다방향 유체 수송 기능을 구현했다.

이번 연구성과는 세계적 학술지 Advanced Science에 게재됐으며, 해당 연구를 바탕으로 제작된 커버 이미지가 Advanced Science 전면 표지(front cover)로도 선정됐다.



▲ 생체소재를 모사한 다축 정렬 에어로젤
(Advanced Science Vol. 13, No. 48 Front Cover)

연구 필요성	에어로젤과 같은 다공성 소재는 가볍고 내부 공간이 넓어 단열재, 흡착재, 촉매 지지체, 조직공학용 스캐폴드 등 다양한 분야에 활용될 수 있으며, 동결주조 기술은 얼음 결정의 성장 방향을 따라 고분자나 입자를 정렬시킬 수 있어 생체 다공성 구조를 모사하는 유망한 제조 기술로 주목받고 있다. 기존 동결주조 공정은 대부분 단일 온도구배에 의해 일방향 정렬 구조만 형성하므로, 정렬 방향으로는 우수한 기계적 특성을 보이지만 횡방향 하중에는 쉽게 휘거나 무너지는 한계가 있다. 연구진은 이를 극복하기 위해 오징어뼈의 수직·벽·수평 격벽 구조와 목재의 수직·방사형 수송 구조처럼 서로 다른 방향의 구조가 하나의 재료 안에 결합된 자연계 다축 정렬 구조에 주목하였으며, 생체소재처럼 기계적 안정성과 기능성을 동시에 구현할 수 있는 새로운 다축 정렬 다공성 소재 제조 플랫폼 개발에 나섰다.
연구성과/ 기대효과	신성철 서울대학교 교수 연구팀은 순차적 침투 및 동결주조 기반의 새로운 다축 정렬 에어로젤 제조 기술인 SHIFT를 개발하였다. 이 기술은 먼저 일방향으로 정렬된 1차 에어로젤 구조를 만들고, 내부 기공에 2차 고분자 용액을 침투시킨 뒤 원하는 방향으로 다시 동결주조하는 방식이다. 이를 통해 1차 구조를 기하학적 템플릿으로 활용하면서 새로운 방향의 2차 정렬 구조를 삽입할 수 있으며, 연구진은 0도에서 90도까지 2차 정렬각을 조절할 수 있는 다축 정렬 에어로젤을 구현하였다. 개발된 다축 정렬 에어로젤은 기존 일방향 동결주조 구조의 횡방향 취약성을 보완하고, 오징어뼈와 유사한 수준의 낮은 기계적 이방성을 나타냈다. 또한 30도에서 60도 사이의 경사 정렬 구조에서는 반복 압축 후 회복성이 향상되었으며, 수직 방향과 방사형 방향의 동결주조 전략을 결합해 목재의 물질 수송 구조와 유사한 다방향 유체 수송 기능도 구현하였다. 이번 연구는 생체소재와 유사한 다축 정렬 구조를 인공 다공성 소재로 확장한 성과로, 향후 경량 구조재, 충격 흡수 소재, 유체 수송 소재, 촉매 지지체, 조직공학용 스캐폴드 등 다양한 기능성 다공성 소재 개발에 활용될 것으로 기대된다.
Abstract (영문)	Professor Shin's team at SNU developed programmable multi-axially aligned aerogels using sequential freeze-casting, achieving cuttlebone-like mechanical balance, enhanced cyclic recovery, and multidirectional fluid transport.

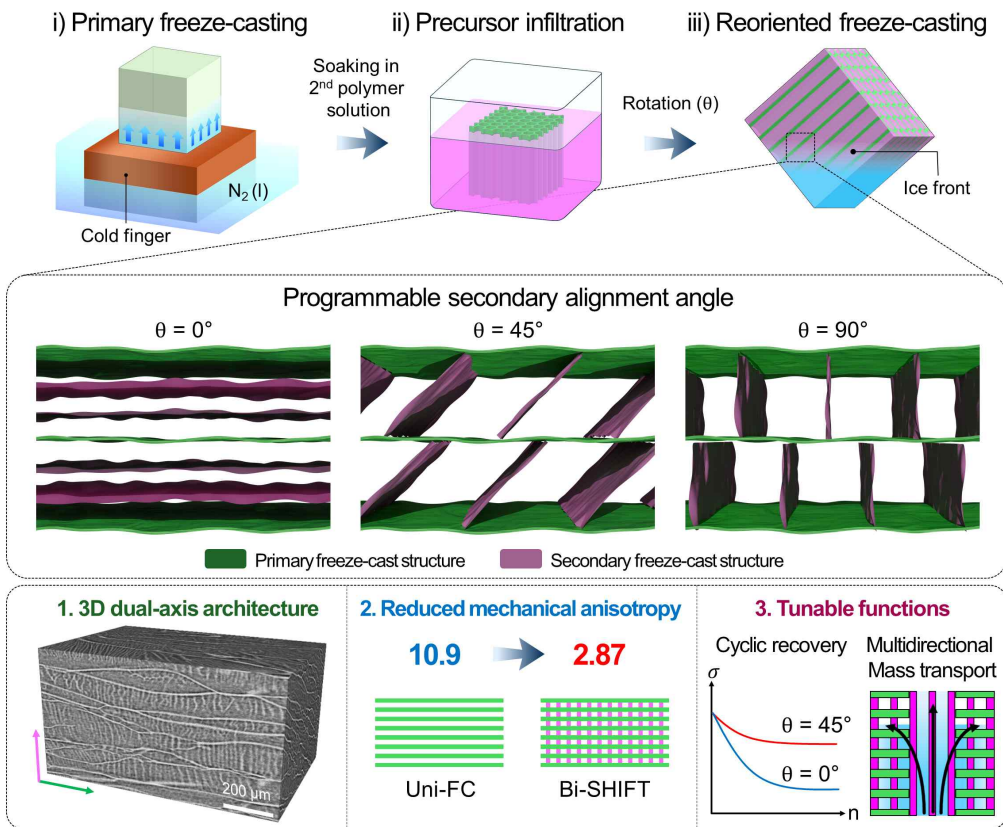
연구 추진 배경, 성과, 기대효과 등	Biological materials achieve exceptional mechanical resilience and multifunctionality through a hierarchical, multi-axial alignment, a structural complexity that remains challenging to replicate in synthetic porous materials. Conventional freeze-casting, while promising for mimicking aligned structures, is typically constrained to unidirectional anisotropy when governed by a single temperature gradient, resulting in poor transverse mechanical stability. Here, we present the Sequential Hybridization by Infiltration and Freeze-casting Technique (SHIFT), a platform that temporally separates primary scaffold formation and secondary architecture formation to enable the programmable construction of multi-axial aerogel architectures. By utilizing the primary structure as a geometric template during the secondary freeze-casting of an infiltrated precursor solution, SHIFT allows for controlled tuning of the secondary alignment angle (0°-90°) and spatial density. Mechanical analysis reveals that orthogonal alignment significantly suppresses mechanical anisotropy, achieving an anisotropy ratio of 2.87, closely matching that of natural cuttlebone (2.89), whereas programming the secondary alignment at oblique angles (30°-60°) enhances cyclic recovery. Furthermore, by integrating radial and vertical freezing strategies, multidirectional volumetric mass transport is achieved. This approach offers a versatile strategy to reduce the dependence of structural formation on a single freezing direction, unlocking new possibilities for engineering porous materials with programmable mechanical and transport properties.
Journal Link	https://advanced.onlinelibrary.wiley.com/doi/10.1002/adv.76283

□ 본문

연구 내용	에어로젤과 같은 다공성 소재는 가볍고 내부 공간이 넓어 단열재, 흡착재, 촉매 지지체, 조직공학용 스캐폴드 등 다양한 분야에 활용될 수 있다. 동결주조 기술은 얼음결정의 성장 방향을 따라 고분자나 입자를 정렬시킬 수 있어 생체 다공성 구조를 모사하는 유망한 방법으로 주목받고 있다. 그러나 기존 공정은 주로 일방향 정렬 구조만 구현할 수 있어, 정렬축과 다른 방향의 하중에는 쉽게 휘거나 무너지는 한계가 있었다. 본 연구는 이러한 한계를 극복하고, 생체소재처럼 서로 다른 방향의 구조가 결합된 다축 정렬 다공성 소재를 구현하고자 수행되었다. 연구진은 오징어뼈의 수직 벽·수평 격벽 구조와 목재의 수직·방사형 수송 구조에 주목하였다. 자연계 생체소재는 이처럼 다축 정렬 구조를 통해 기계적 안정성과 물질 수송 기능을 동시에 구현한다. 연구진은 순차적 침투 및 동결주조 기반 제조 기술인 SHIFT를 개발하였다. 이 기술은 먼저 일방향으로 정렬된 1차 에어로젤을 만든 뒤, 내부 기공에 2차 고분자 용액을 침투시키고 원하는 방향으로 다시 동결주조하는 방식이다. 이를 통해 0도에서 90도까지 2차 정렬각을 제어할 수 있는 다축 정렬 에어로젤을 구현하였으며, 안정적인 구조 형성을 위한 공정·재료 조건도 제시하였다. 개발된 다축 정렬 에어로젤은 기존 일방향 구조의 횡방향 취약성을 보완하고, 오징어뼈와 유사한 수준의 낮은 기계적 이방성을 나타냈다. 또한 경사 정렬 구조에서는 반복 압축 후 회복성이 향상되었으며, 수직·방사형 동결 전략을 결합해 다방향 유체 수송 기능도 구현하였다. 본 연구는 생체
--------------	---

	소재의 다축 정렬 원리를 인공 다공성 소재로 확장한 성과로, 향후 경량 구조재, 충격 흡수 소재, 유체 수송 소재, 촉매 지지체, 조직공학용 스캐폴드 등 다양한 기능성 소재 개발에 기여할 것으로 기대된다.
연구 결과	Programmable Multi-Axially Aligned Aerogels via Sequential Freeze-Casting for Tailored Anisotropy and Tunable Mechanics Kiho Sung and Sungchul Shin (Advanced Science, https://doi.org/10.1002/advs.76283) 본 연구는 기존 동결주조 공정이 주로 일방향 정렬 다공성 구조만 구현한다는 한계를 극복하기 위해, 순차적 침투 및 동결주조 기반의 새로운 다축 정렬 에어로젤 제조 기술인 SHIFT를 개발하였다. 연구진은 1차 정렬 에어로젤 내부에 2차 고분자 용액을 침투시킨 뒤 원하는 방향으로 재동결 주조함으로써, 0도에서 90도까지 2차 정렬각을 제어할 수 있는 다축 정렬 다공성 구조를 구현하였다. 특히 오징어뼈의 수직 벽·수평 격벽 구조를 모사한 직교 정렬 에어로젤은 기존 일방향 구조의 횡방향 기계적 취약성을 보완하고, 오징어뼈와 유사한 수준의 낮은 기계적 이방성을 나타냈다. 또한 30도에서 60도 사이의 경사 정렬 구조에서는 반복 압축 후 회복성이 향상되어, 구조 각도 설계만으로 강성, 회복성, 손상 저항성을 조절할 수 있음을 확인하였다. 더 나아가 수직 방향과 방사형 방향의 동결주조 전략을 결합하여 목재의 물질 수송 구조와 유사한 다방향 유체 수송 기능을 구현하였다. 이 연구는 생체소재와 유사한 다축 정렬 구조를 인공 다공성 소재로 확장한 성과로, 향후 경량 구조재, 충격 흡수 소재, 유체 수송 소재, 촉매 지지체, 조직공학용 스캐폴드 등 다양한 기능성 다공성 소재 개발에 중요한 기반을 제공한다.
용어 설명 (선택)	○ 에어로젤(Aerogel): 내부의 대부분이 공기로 이루어진 초경량 다공성 소재이다. 매우 가볍고 기공이 많아 단열재, 흡착재, 촉매 지지체, 조직공학용 스캐폴드 등 다양한 분야에 활용될 수 있다. ○ 동결주조(Freeze-casting): 고분자나 입자가 포함된 용액을 얼리면서 얼음결정이 자라는 방향을 따라 소재의 내부 구조를 정렬시키는 제조 방법이다. 얼음을 제거하면 정렬된 기공을 가진 다공성 구조를 만들 수 있다. ○ 다축 정렬 구조(Multi-axial alignment): 하나의 재료 안에 서로 다른 방향으로 정렬된 구조가 함께 존재하는 것을 의미한다. 오징어뼈나 목재처럼 자연계 생체소재는 다축 정렬 구조를 통해 기계적 안정성과 물질 수송 기능을 동시에 구현한다. ○ 기계적 이방성(Mechanical anisotropy): 재료의 기계적 특성이 방향에 따라 다르게 나타나는 현상이다. 일방향으로 정렬된 다공성 소재는 정렬 방향으로 강하지만, 다른 방향의 하중에는 취약할 수 있다. ○ SHIFT(Sequential Hybridization by Infiltration and Freeze-casting Technique): 본 연구에서 개발한 순차적 침투 및 동결주조 기반 제조 기술이다. 먼저 만들어진 1차 정렬 에어로젤 내부에 2차 고분자 용액을 침투시킨 뒤 다시 동결주조하여, 원하는 각도의 다축 정렬 구조를 구현한다.

SHIFT



▲ 순차적 침투 및 동결주조 기반 다축 정렬 에어로젤 제조 기술(SHIFT) 모식도