

단일 레진 기반 다중소재 3D 프린팅을 위한 다중파장 광중합 기술

Multiwavelength Photopolymerization for Single Resin Multimaterial 3D Printing

도현성 · 나예은 · 김지원 | Hyunseong Do · Ye Eun Na · Ji-Won Kim

School of Chemical Engineering and Applied Chemistry, Kyungpook National University
80 Daehak-ro, Buk-gu, Daegu 41566, Republic of Korea
E-mail: kim.jw@knu.ac.kr

1. 서론

자연계의 구조체는 일반적으로 단단한 조직과 유연한 조직이 정밀하게 공간적으로 배열된 복합 형태를 띤다. 이러한 구조적 특성은 단일 소재로는 구현하기 힘든 우수한 강도와 탄성, 그리고 뛰어난 에너지 흡수 및 운동 기능을 동시에 부여한다. 이 기능성 다중소재 3차원 구조를 인공적으로 구현하기 위한 방법으로 압출, 재료 분사 및 광중합 기반 적층제조 기술이 개발되어 왔다. 그 중 수조 광중합(vat photopolymerization, VPP)은 액상의 광경화성 수지를 빛으로 선택적으로 고형화하므로 높은 형상 정밀도와 빠른 제작 속도를 제공하며, 특히 디지털 광처리(digital light processing, DLP)를 이용할 경우, 복잡한 이미지를 빠르게 투영할 수 있다는 장점이 있다.¹⁻⁴

그러나 상용 VPP 공정의 대부분은 하나의 조성으로 이루어진 균질 구조체를 제작하는 데 머물러 있다. 서로 다른 재료를 구현하기 위해 수조를 교체하는 방식도 존재하나, 이는 재료 선택의 폭은 넓지만, 잦은 교체와 세척 과정으로 인해 제작 시간이 증가하고, 재료 간 오염과 정렬 오차가 발생할 수 있다. 반면, 단일 수조(one-vat or single-resin) 기반 광중합 방식은 단일 레진에 서로 다른 광반응 경로를 부여하고, 조사되는 빛의 파장 또는 노광량을 공간적으로 조절하여 동일한 출력 과정에서 상이한 조성이나 가교 구조를 형성할 수 있다. 이 접근법은 재료 교환 없이 다중소재 영역을 연속적으로 형성할 수 있어 출력 속도, 계면 연속성 및 공정 단순화 측면에서 중요한 가능성을 가진다.^{1,2}

단일 레진 기반 다중소재 3D 프린팅 기술은 크게 노광량을 조절하는 그레이스케일 방식과 서로 다른 파장을 사용하는 다중파장 방식으로 구분할 수 있다. 그레이스케일 방식은 동일한 반응의 전환율과 가교밀도를 변화시키는 데 유리하지만, 저노광 영역에 미반응 단량체가 잔류하거나 장기 안정성이 저하될 수 있다. 반면에

Author



도현성

2026
경북대학교
응용화학공학부 응용화학전공
(학사)
2026-현재
경북대학교 응용화학공학부
(석사과정)



나예은

2023-현재
경북대학교 화학공학과
(학사과정)



김지원

2016
2017
2022
2022
2025
2025-현재
한국과학기술원 생명화학공학과 (학사)
한국과학기술원 생명화학공학과 (석사)
한국과학기술원 생명화학공학과 (박사)
한국과학기술원 생명화학공학과 (Post-Doc.)
텍사스 오스틴 주립대학교 (Post-Doc.)
경북대학교 응용화학공학부 조교수

다중파장 방식은 광자의 에너지 차이와 광반응성 성분의 선택적 흡수를 이용하여 서로 다른 중합반응을 독립적 또는 우세하게 활성화하므로, 단순한 경화도 차이를 넘어 화학적 조성과 네트워크 구조가 다른 재료를 한 번의 출력으로 구현할 수 있다. 본 특집에서는 다중파장 광중합을 위한 레진 설계, 광학 및 공정 제어, 출력물의 물성 평가를 정리하고, 하이브리드 에폭시-아크릴레이트 수지를 이용한 대표적 구현 사례를 중심으로 기술적 의의와 향후 과제를 논의하도록 한다.^{1,2}

2. 본론

2.1 다중소재 3D 프린팅의 발전

2.1.1 기존 다중소재 제조 전략과 한계

다중소재 3D 프린팅 기술은 구조체 내부의 기계적, 열적, 광학적 또는 전기적 특성을 위치에 따라 조절할 수 있다는 점에서 균질 재료 기반 적층제조와 구별된다. 균질 재료 기반의 3D 프린팅의 경우, 동일 구조 내에서 큰 물성 대비를 구현하기 어려우며, 연속적인 연질-경질 계면 형성에도 한계가 있다. 기존에 보고된 연구 중, 다중소재 구현을 위해 압출 및 재료 분사 방식에 여러 재료를 직접 도입하는 경우도 있으나, 이는 해상도가 토출 기구의 치수에 의해 제한되고 계면 접착이 물리적 결합에 의존한다는 한계점을 가지고 있다.^{1,3,4} 광중합형 방식에서 널리 쓰인 다중 레진 방식 역시 배출·세척·재충전의 반복으로 제작 속도가 느리고 잔류 레진으로 계면 조성이 불명확해진다는 한계가 존재한다. 이러한 제약은 모두 재료를 공간적으로 분리하기 위해 물질 자체를 이동시킨다는 공통점에서 비롯되며, 따라서 빛의 정보만으로 재료의 형성과 위치를 결정할 수 있는 단일 레진 전략이 크게 주목받고 있다(그림 1).^{1,4}

2.1.2 그레이스케일과 다중파장 광중합 기술의 발전

그레이스케일 3D 프린팅 기술은 픽셀별 광세기 또는 노광 시간을 조절하여 단량체 전환율, 겔 분율 및 가교밀도를 공간적으로 제어한다. 아크릴레이트 수지에서는 약 3만 배의 탄성률 차이가 보고될 만큼 물성 범위가 넓으나, 이는 동일

반응의 진행 정도를 달리한 결과이므로 연질 영역에 최대 약 90 wt%의 가용성 성분이 잔류하여 용출, 수축 및 노화 문제를 유발할 수 있다.⁵⁻⁸ 반면, 다중파장 광중합은 서로 다른 파장이 하나의 수지에서 상이한 광화학 경로를 유도하도록 설계하므로, 결정성의 광화학적 패터닝이나 직교 광반응을 이용한 연성 소자 제작과 같이 반응기작 자체가 구분된 영역을 형성할 수 있다.^{13,15} 나아가, 파장과 그레이스케일 노광을 병용하면 경질-연질 영역의 이산적 구분을 넘어 두 반응의 상대적 기여도를 연속적으로 변화시킬 수 있어 큰 대비를 갖는 물성 구배까지 설계할 수 있다.^{1,2,9,10}

2.2 다중파장 광중합의 광화학적 설계

2.2.1 다중파장 반응 모드

다중파장 수지에서 각 광원이 반응에 기여하는 방식은 네 가지로 구분된다. 첫째, 구성적(constructive) 모드에서는 여러 파장이 동일 반응을 함께 촉진하고, 둘째, 파괴적(destructive) 모드에서는 각 파장이 개별적으로는 반응을 유도하지만 동시 조사 시 소광이나 경쟁 반응으로 경화가 감소한다. 셋째, 직교적(orthogonal) 모드에서는 각 파장이 서로 다른 반응을 독립적으로 개시하여 화학적으로 구분되는 영역을 형성하며,¹¹ 넷째, 우세적(dominant) 모드에서는 한 파장이 공통 반응을 유도하고 다른 파장이 추가 반응을 선택적으로 활성화하여 기본 네트워크 위에 두 번째 네트워크를 형성한다. 완전한 직교성의 경우, 두 광개시제의 흡수 스펙트럼이 전혀 겹치지 않을 때 구현 가능하나, 일반적으로 단파장의 광자는 더 큰 에너지로 넓은 범위의 개시제를 동시에 활성화하므로, 실제 수지에서는 우세적 반응이 구현되기 쉽다. 이때 공통 네트워크가 두 영역의 계면을 공유하여 계면 접착이 향상되는 것은 우세적 모드의 부수적 이점이다(그림 2).¹

2.2.2 광중합 레진 설계

다중파장 수지는 광반응성 단량체와 올리고머, 반응성 희석제, 가교제에 광개시제, 광산 발생제 또는 광염기 발생제가 조합되어 구성되며, 설계의 핵심은 각 성분의 흡수 스펙트럼과 광원의 방출 스펙트럼을 정량적으로 대응시키는 것이다. LED(light-emitting diode)는 흔히 단색광으로 표현되지만

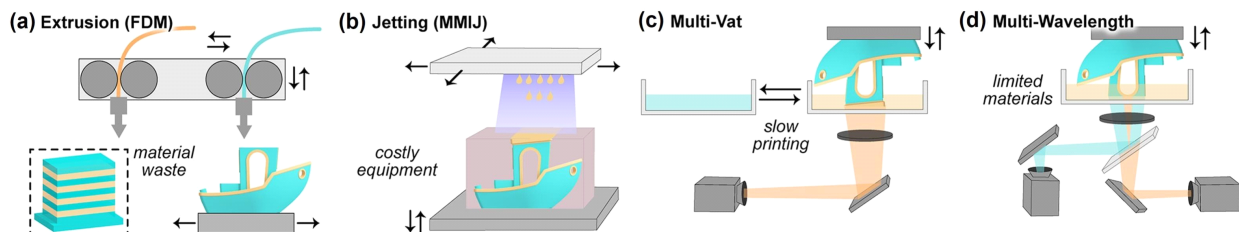


그림 1. 다중 소재 3D 프린팅 방식의 예. (a) 압출형(fused deposition modeling, FDM), (b) 잉크 제팅(multimaterial ink jetting, MMIJ), (c) 다중 수조 또는 (d) 다중 파장 조건을 활용하는 광중합형(vat photopolymerization, VPP).

실제로는 약 10-30 nm의 대역폭을 가지므로, 중심 파장이 아니라 광원 전체 대역에서 흡수되는 광자 수와 각 성분의 몰흡광계수를 함께 평가해야 한다. 다만, 흡광도만으로 반응성을 예측할 수는 없으며, 장파장 영역에서 높은 양자 효율이 나타나는 red-edge 효과와 경화 중 광표백에 따른 흡수 변화도 고려해야 한다.¹

반응 거동 및 광중합 속도는 실시간 FT-IR(Fourier-transform infrared spectroscopy)과 광열로지로 상보적으로 평가한다. 전자는 광반응성 기능기의 감소를 추적하여 유도시간, 중합 속도 및 최대 전환율을 제공하고, 후자는 저장탄성률과 손실탄성률의 교차점으로 겔화 시점을 규정한다. 겔화에 필요한 최소 노광량과 경화깊이의 관계는 working curve로 표현되나, 다중파장 수치에서는 파장별 흡수, 반응열 및 중합 중 광학특성 변화가 동시에 작용하여 단순한 Jacobs 식만으로는 실제 거동을 설명하기 어려워 측정 프로토콜의 표준화가 요구된다. Photo-DSC(differential scanning calorimetry), photo-Raman 및 공간적 단층촬영 등을 통해 반응열, 화학 결합 변화 및 경화깊이를 보완적으로 분석할 수 있다.¹

2.3 다중파장 3D 프린팅 시스템과 공정 제어

2.3.1 광학계와 노광 전략

다중파장 DLP 3D 프린팅 장비는 둘 이상의 광원과 투영계로 동일한 제작면에 파장별 이미지를 정렬한다. 두 개의 digital micromirror device(DMD)를 사용하는 구조는 파장별 영상과 세기를 독립적으로 제어하고 dichroic mirror로 광경로를 결합하며, 하나의 DMD에 여러 광원을 결합하는 방식은 구성이 단순한 대신 파장 전환과 시간 동기화에 정밀한 제어가 필요하다. 어느 방식이든 투영 배율, 초점면, 픽셀 위치가 파장별로 일치하지 않으면 재료 경계가 어긋나게

된다. 노광은 동시, 순차 또는 펄스 방식으로 수행할 수 있고 조사 순서와 간격이 반응 선택성뿐 아니라 수치 온도, 점도 및 활성종 확산에 영향을 주므로, 노광 프로토콜은 장비 운용 조건이 아니라 재료 설계와 분리될 수 없는 변수이다. 따라서, 슬라이싱 이전에 재료 목표값을 파장별 노광량으로 변환하는 통합 소프트웨어가 추가적으로 요구된다.^{1,2}

2.3.2 해상도(resolution)와 공정 보정

다중파장 출력의 해상도는 최소 선폭뿐 아니라 재료 영역의 위치 정확도와 계면 폭으로 평가해야 한다. 과도한 노광, 광산란 및 활성종 확산은 목표 영역 밖의 반응을 유도하여 경질-연질 경계를 넓히며, 이 영향은 특징 크기가 감소할수록 커진다. 필요할 경우, 광흡수제, 라디칼 억제제, 산·염기 완충제를 조절하여 경화 영역을 제한할 수 있고, 라디칼계에서는 산소 저해 자체가 해상도에 기여한다.^{1,2} 실험의 재현성 확보를 위해서는 제작판 수평도, 파장별 광세기 균일도, 수치 온도 및 주변 온습도를 관리해야 하며, 특히 두 투영계의 픽셀 정렬 오차는 재료 계면의 형상 오차로 직접 전환되므로 기준 패턴을 이용한 정기적인 보정이 요구된다. 이는 단일 재료 3D 프린팅 시스템에는 존재하지 않는 다중파장 시스템 고유의 오차원이다.¹

2.4 하이브리드 에폭시-아크릴레이트 기반 다중파장

광중합 기술 구현 사례

2.4.1 파장 선택적 광중합 기술

대표적인 다중파장 광중합 기술의 사례로는 아크릴레이트와 에폭사이드를 한 분자에 갖는 (3,4-epoxycyclohexyl)methyl acrylate(ECA)를 하이브리드 단량체로 사용한 연구가 있다.² 405 nm 파장에서는 광개시제가 라디칼을 생성하여

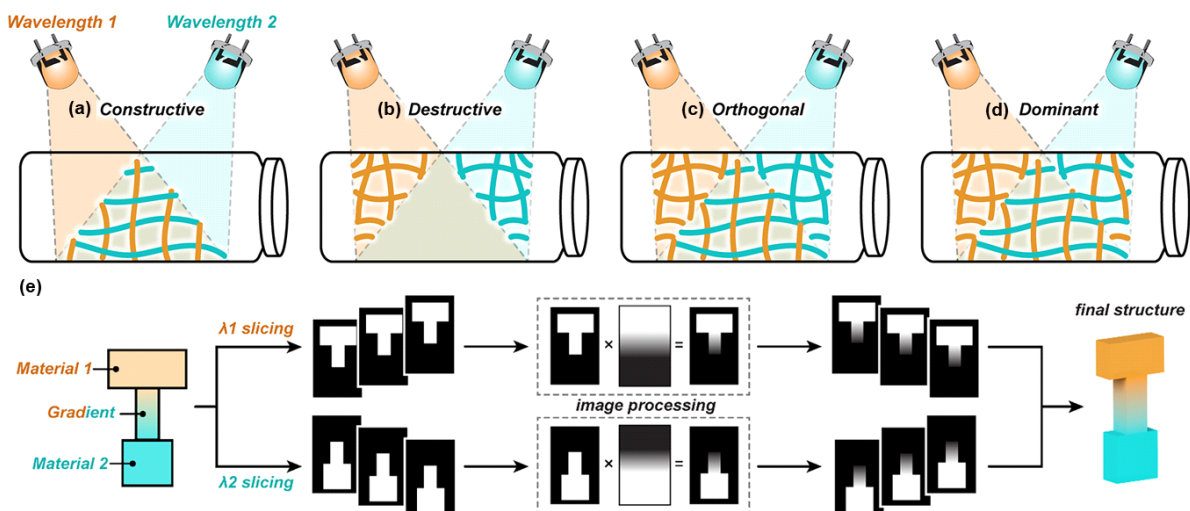


그림 2. 다중 소재 레진 시스템 및 파장 선택적 DLP 3D 프린팅의 핵심 설계 고려사항. (a) 보강, (b) 상쇄, (c) 직교, (d) 우세 수렴을 통한 서로 다른 반응의 선택적 활성화 메커니즘. (e) 단일 및 다중 파장 노광을 위한 그레이스케일 이미지 처리 워크플로우.

아크릴레이트 네트워크만 형성하고, 365 nm 파장에서는 라디칼 중합과 함께 광산 발생제에 의한 에폭사이드 양이온 개환중합이 동시에 진행된다. 그 결과, 405 nm 영역은 느슨하게 가교된 연질 네트워크가, 365 nm 영역은 치밀한 경질 네트워크가 형성되어 다중소재 구조를 하나의 레진에서부터 구현할 수 있게 된다. 이때, 두 영역이 아크릴레이트 네트워크를 공유하므로 계면이 공유결합으로 연결되어 박리와 가소화가 완화된다. 이는 2.2.1의 우세적 모드가 계면 접착에 기여하는 대표적 예이다.²

본 연구의 핵심인 광중합의 파장 선택성은 적합한 광시스템의 설계에서 비롯된다. 광산 발생제는 365 nm에서 광흡수가 낮아 단독으로는 출력 시간 내에 충분한 에폭시 전환을 얻기 어렵다. 하지만, 광감작제가 함께 존재할 경우, 광에너지 흡수를 충분히 유도할 수 있어, 365 nm에서 라디칼과 광산을 동시에 발생시킬 수 있게 된다. 본 연구에 활용된 주요한 광시스템은 광개시제(photo-initiator), 광산 발생제(photoacid generator), 그리고 광감작제(photosensitizer)로 구분할 수 있으며, 이 모든 물질이 하나의 레진에 존재할 때 비로소 단일 레진 다중 파장 시스템을 구현할 수 있게 된다 (그림 3).

2.4.2 물성 대비와 공간적 물성 구배

본 연구에서 다중파장 시스템을 활용하여 3D 프린팅한 결과, 365 nm로 적층하여 출력할 경우, 경질 재료는 탄성률 약 1,700 MPa, 인장강도 약 69 MPa 및 파단변형률 약 8%를 나타내었으며, 405 nm로 적층하여 출력할 경우, 연질 재료는 탄성률 약 0.60 MPa, 강도 약 0.78 MPa 및 파단변형률 약 260%를 나타내었다. 이는 동일 수치에서 약 3,000배 이상의 탄성률 차이가 구현된 것이며, 겔 분율은 각각 약 99 wt%와 89 wt%로 비슷한 수준을 보였다. 또한, 연질 재료의 경우, 100% 변형을 100회 반복한 뒤에도 99% 이상의 탄성 회복률과 약 3~4%의 히스테리시스 손실을 보였다. 다만, 연질 영역에 광산 발생제가 잔류할 경우, 후속 자외선 노출로 탄성률이 수백 배 상승할 수 있어, 아세톤 세척이 파장 선택적 물성을 유지하는 핵심 공정으로 확인되었다.²

경질과 연질 선을 교대로 출력한 시편에서는 약 0.25 mm 까지 광학적으로 구분되는 패턴이 구현되었고, 나노인텐터로 측정된 계면의 탄성률 전이는 수평 방향 약 200 μm , 적층 방향 약 200~250 μm 에 걸쳐 나타났다. 계면 폭은 광산 확산, 광산란, 반응열 및 경화된 층을 통한 자외선 투과로 결정되므로 그 축소는 재료와 광학 설계가 함께 다루어야 할 것이다. 또한, 두 파장의 그레이스케일을 중첩할 경우, 약 2~2,000 MPa 범위의 탄성률을 0.2, 1 및 10 mm 길이에서 서로 다른 기울기의 구배를 갖도록 구현할 수 있었다. 이는 서론에서 언급한 자연계 구조 중, 특히 구현이 어려운 생체 계면의 물성 구배가 인공 구조체에서 재현될 수 있음을 시사하는 결과이다.²

2.4.3 응용

본 특집에서 소개한 단일 레진 기반 다중파장 3D 프린팅 연구는 구조체의 외형을 변화시키지 않고도 내부 재료의 공간적 배치와 물성 분포를 조절함으로써 거시적 기계적 거동을 제어할 수 있음을 보여준다. 예를 들어, 연질 원통 내부에 경질 나선형 스프링을 삽입한 구조에서는 스프링의 피치를 조절함에 따라 압축 강성이 약 4배까지 변화하였으며, 이는 동일한 외부 형상을 유지하면서도 내부 다중소재 구조 설계를 통해 전체 구조체의 기계적 응답을 조절할 수 있음을 보여준다. 또한 그림 3b에 제시된 축소형 관절 구조는 경질 골격과 연질 인대 영역을 하나의 구조체 내에 연속적으로 구현함으로써 부드러운 굽힘 거동과 탄성 복원을 동시에 나타낸다.

이와 같은 다중소재 구조 설계는 신축성 전자소자로도 확장될 수 있다. 구조체 내부에 서로 다른 강성을 갖는 영역을 선택적으로 배치하면 외부 변형이 가해졌을 때 국소 변형의 위치와 크기를 제어할 수 있으며, 이를 통해 변형에 민감한 전자 부품이 위치한 영역의 기계적 손상을 효과적으로 억제할 수 있다. 실제로 경질 영역을 선택적으로 도입한 구조에서는 전체 구조체가 큰 변형을 받는 상황에서도 특정 영역의 국소 변형을 현저히 감소시킬 수 있음을 확인하였다. 이러한 결과는 단일 레진 기반 다중파장 3D 프린팅이 단순한 다중

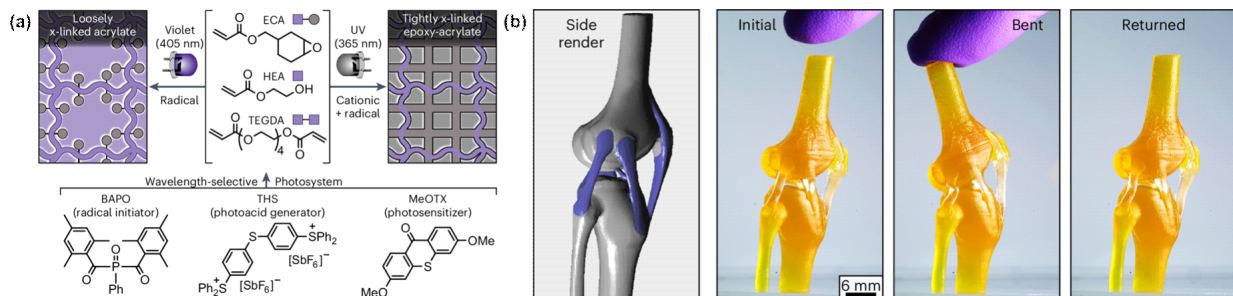


그림 3. (a) 다중소재 3D 프린팅을 위한 단일 레진 소재 구성. (b) 단일 레진 기반 3차원 다중소재 구현의 예.

소재 형상 구현을 넘어, 재료의 공간적 배치와 물성 분포를 활용하여 구조체의 거시적 기능과 국소 변형 거동을 설계할 수 있는 제조 전략임을 보여주며, 향후 바이오모사 구조체, 연성 로봇 및 신축성 전자소자 등 다양한 기능성 시스템으로의 확장 가능성을 제시한다.²

3. 결론

단일 레진 기반 다중소재 3D 프린팅 기술은 기계적 물성이 크게 다른 재료 영역을 하나의 3차원 구조체 내에 신속하고 정밀하게 구현할 수 있다는 점에서 크게 주목받고 있다. 특히 다중파장 광중합 기술은 파장에 따라 서로 다른 광화학 반응을 선택적으로 유도함으로써, 재료를 교환하지 않고도 화학적 조성과 고분자 네트워크 구조가 서로 다른 영역을 공간적으로 형성할 수 있다는 점에서 의미가 깊다. 이는 광 조사량을 조절하여 동일한 광중합 반응의 경화도와 가교 밀도를 변화시키는 그레이스케일 방식에서 한 단계 확장된 접근으로, 서로 다른 중합 반응을 선택적으로 활성화하여 큰 물성 차이와 연속적인 재료 계면을 동시에 구현할 수 있다는 점에서 큰 장점을 갖는다.

최근 보고된 하이브리드 에폭시-아크릴레이트 수지와 365 및 405 nm의 이중 광원을 이용한 다중파장 DLP 공정에서는 단일 레진에서 약 3,000배의 탄성률 차이를 갖는 경질 및 연질 영역과 약 200 μm 수준의 물성 전이를 구현하였다. 이러한 결과는 다중파장 3D 프린팅이 단순히 서로 다른 재료를 하나의 구조체에 배치하는 것을 넘어, 빛을 이용하여 구조체 내부의 화학적 조성, 네트워크 구조, 계면 및 국소 물성을 공간적으로 프로그래밍할 수 있는 제조 기술임을 시사한다.

한편, 다중파장 3D 프린팅의 정밀도와 재현성은 광경화성 소재의 파장 선택성뿐만 아니라 광원의 스펙트럼과 세기, 광학계의 정렬, 중합반응 속도, 활성종의 확산 및 후처리 조건 등 다양한 인자의 영향을 받는다. 따라서 소재와 공정을 독립적으로 최적화하기보다는 수지의 광화학적 설계, 다중 파장 광학계, 노광 조건 및 후처리 공정을 통합적으로 고려하는 접근이 요구된다. 또한 향후에는 반응 선택성과 장기 안정성 향상, 다중파장 광원의 정밀 제어 및 계면 특성 평가의 표준화를 통해 기술의 재현성과 적용성을 확보할 필요가 있다. 궁극적으로 이러한 기술적 발전은 기계적 물성의 공간 제어를 넘어 열적, 전기적 및 광학적 기능을 위치 선택적으로 구현하는 다중기능

구조체로 확장될 수 있으며, 다중파장 광중합은 형상과 재료의 조성·물성·기능을 하나의 공정에서 동시에 설계하는 차세대 3D 프린팅 기술로 발전할 것으로 기대된다.

참고문헌

1. E. A. Recker, X. Chen, J.-W. Kim, and Z. A. Page, *ACS Cent Sci*, **11**, 1527 (2025).
2. J.-W. Kim, M. J. Allen, E. A. Recker, L. M. Stevens, H. L. Cater, A. Uddin, A. Gao, W. Eckstrom, A. J. Arrowood, G. E. Sanoja, M. A. Cullinan, B. D. Freeman, and Z. A. Page, *Nature Materials*, **24**, 1116 (2025).
3. C. Zhu, H. B. Gameda, E. B. Duoss, and C. M. Spadaccini, *Adv. Mater.*, **36**, 2314204 (2024).
4. S. Subedi, S. Liu, W. Wang, S. M. A. Naser Shovon, X. Chen, and H. O. T. Ware, *npj Adv. Manufact.*, **1**, 9 (2024).
5. X. Kuang, J. Wu, K. Chen, Z. Zhao, Z. Ding, F. Hu, D. Fang, and H. J. Qi, *Sci. Adv.*, **5**, eaav5790 (2019).
6. L. Yue, S. Macrae Montgomery, X. Sun, L. Yu, Y. Song, T. Nomura, M. Tanaka, and H. Jerry Qi, *Nat. Commun.*, **14**, 1251 (2023).
7. S. Huang, S. M. Adelmund, P. S. Pichumani, J. J. Schwartz, Y. Mengüç, M. Shusteff, and T. J. Wallin, *Matter*, **6**, 2419 (2023).
8. Y. Ma, R. J. Dreiling, E. A. Recker, J.-W. Kim, S. L. Shankel, J. Hu, A. D. Easley, Z. A. Page, T. H. Lambert, and B. P. Fors, *ACS Cent. Sci.*, **10**, 2125 (2024).
9. J. J. Schwartz and A. J. Boydston, *Nat. Commun.*, **10**, 791 (2019).
10. I. Cazin, M. O. Gleirscher, M. Fleisch, M. Berer, M. Sangermano, and S. Schlögl, *Addit. Manufact.*, **57**, 102977 (2022).
11. X. Zhang, W. Xi, S. Huang, K. Long, and C. N. Bowman, *Macromolecules*, **50**, 5652 (2017).
12. K. C. H. Chin, G. Ovsepyan, and A. J. Boydston, *Nat. Commun.*, **15**, 3867 (2024).
13. E. Rossegger, J. Strasser, R. Höller, M. Fleisch, M. Berer and S. Schlögl, *Macromol. Rapid Commun.*, **44**, 2200586 (2023).
14. M. T. Kiker, A. Uddin, L. M. Stevens, C. J. O'Dea, K. S. Mason and Z. A. Page, *J. Am. Chem. Soc.*, **146**, 19704 (2024).
15. A. K. Rylski, H. L. Cater, K. S. Mason, M. J. Allen, A. J. Arrowood, B. D. Freeman, G. E. Sanoja, and Z. A. Page, *Science*, **378**, 211 (2022).