



화학색소 없는 구조색 컬러 인쇄 기술 개발

Pigment-free Color Printing Technology for Customized Structural-Color Graphics

연구책임자 김신현 소속학과 생명화학공학과 홈페이지 <http://isml.kaist.ac.kr>

구조색은 화학색소 없이 주기적인 나노구조에 의해 발색되는 반사색으로, 화학색소와는 구별되는 심미성과 응용성을 갖는다. 기존의 기술로는 콜로이드 입자의 결정화에 요구되는 복잡한 공정 과정, 까다로운 조건 및 오랜 시간으로 인해 맞춤형 구조색 패턴화가 거의 불가능했다. 본 연구에서는 직접 프린팅에 적합하며 단시간에 높은 결정성을 갖는 콜로이드 구조체를 형성할 수 있는 잉크를 개발하였으며, 이를 바탕으로 디자인, 색의 명도와 채도, 기계적 물성, 각도의존성, 인쇄 기판 등을 모두 자유롭게 조절할 수 있는 인쇄기술을 개발하였다. 본 기술은 구조색 패턴화의 속도와 자유도를 비약적으로 향상시켰으며, 향후 광학 소자나 광학 센서, 위변조방지 소재, 신개념 감성 코팅 소재 등을 응용 및 개인 맞춤형으로 제작할 수 있어 높은 기술적 파급효과가 기대된다.

1. 연구배경

구조색은 자연에서 종종 관찰되는 심미적인 색으로, 화학색소 없이 주기적인 나노구조에 의한 빛의 보강간섭에 의한 발색이다. 구조가 유지되는 한 색이 바래거나 사라지지 않으며 화학색소가 갖는 독성이 없어 인쇄 친화적이다. 더욱 중요한 것은 물질이 아닌 구조가 색깔을 결정하여 한 가지 소재로 다양한 발색이 가능하다. 이러한 특색으로 인해 구조색은 반사형 디스플레이 및 광학 센서를 포함한 광학 소자나 위조방지 소재, 고감성 코팅 소재 등으로 그 가치가 매우 높다. 구조색 발색에 사용되는 콜로이드 결정은 주로 증발 공정에 기반을 두는데, 그 제조 공정 및 조건이 복잡하고 까다로우며, 결정화에 긴 시간이 소요되어 실용화에 한계가 있었다. 비교적 최근에는 콜로이드 현탁액을 잉크젯 기술을 통해 반구형태의 콜로이드 결정을 기판에 프린팅하는 기술이 개발되고 있으나, 낮은 결정성과 낮은 표면 도포율로 인해 반사율이 낮아 실용적 응용은 불가하였다.

2. 연구내용

본 연구에서는 정교하게 포물레이션한 콜로이드 잉크를 직접 프린팅하여 증발 없이 빠른 속도로 콜로이드 결정을 패턴화할 수 있는 기술을 개발하였다. 콜로이드 잉크는 실용성 확보를 위해 광경화 가능한 레진을 연속상으로 사용하였으며, 레진에 분산된 실리카 입자가 반발력에 의해 빠른 속도로 결정화가 일어날 수 있도록 설계하였다. 이와 동시에 실리카 입자의 부피 분율을 고체전이분율에 가깝게 설정하여 직접 인쇄에 적합한 유변 물성을 달성하였다. 뿐만 아니라 사용하는 레진의 종류에 따라 최종적으로 형성되는 구조물의 탄성도를 제어할 수 있도록 설계하여, 기계적 변형에 따른 변색이 가능한 소재 또한 구현하였다. 또한 잉크의 점도를 조절하여 콜로이드의 결정화도를 조절하였다. 높은 결정화도를 갖는 콜로이드 구조체는 높은 각도 변색 특성을 보이도록 하였으며, 낮은 결정화도를 갖는 유리 구조체는 각도에 따른 변색이 없도록 설계하였다. 추가로 실리카 입자 외에 카본 블랙 입자나 폴리 도파민 입자를 도입함으로써 색의 명도 및 채도를 조절함과 동시에 무채색 또한 구현하였다. 본 기술에서는 광결정 형성을 위한 잉크가 도포 과정에서 받은 전단력이 콜로이드 결정 구조의 배향 방향을 결정한다는 흥미로운 점이 발견됐다. 광결정과 광유리를 위한 잉크의 유변 특성을 관찰한 결과, 두 잉크는 반발력이 작용하는 시간 및 거리 척도에 차이가 있으며 특히 전자의 경우 흐름에 따라 콜로이드가 배열되고 입자가 부재하는 면이 실시간으로 형성됨을 유변물성 분석 및 SEM 관찰을 통해 확인하였다. 노즐 내부에서 형성되는 Poiseuille 흐름과 노즐 및 기판의 상대운동에 따라 형성되는 Couette 흐름의 중첩에 의해 발생하는 위치 특이적인 흐름 방향이 최종 구조 내부에서의 콜로이드 결정 배향 방향을 지배하였다. 형성된 광결정 구조는 실리카 입자의 크기에 따라 다양한 색을 발현하며 이 색들은 밝고 각도의존성이 높다. 토출 조건에 영향을 주는 요소는 공압과 노즐의 이동 속도, 그리고 노즐과 기판 사이의 거리로, 해당 조건들을 조절하여 높은 해상도의 선형

3. 기대효과

패턴을 최소 머리카락 굵기의 너비로 최대 15 mm/s의 속도로 인쇄할 수 있다. 기판에도 제한이 없어 유리, 플라스틱, 금속, 실리콘 웨이퍼, 천, 종이 등 다양한 타깃 기판에 광결정 및 광유리 구조를 형성할 수 있는 큰 장점도 있다. 면 패턴은 선 구조를 인접하게 인쇄하고 이들 간의 융합을 통해 형성하며, 형성된 면은 평평한 표면을 가지고, 융합 시 가해지는 높은 전단력에 의해 균일하고 높은 결정도를 나타낸다. 높은 결정도로 인해 면 패턴은 90%에 달하는 강한 반사율을 보인다. 같은 고분자 레진을 사용하면 서로 다른 입자를 가진 잉크를 인접하게 인쇄하여도 경계에서 잉크 간 혼합이 발생하지 않아 자유롭게 다색 패턴을 구현할 수 있다. 사용하는 고분자 레진의 종류에 따라 강도나 신축성 등의 기계적 물성을 조절할 수 있기에 신축에 따라 변색하는 카멜레온의 피부를 모사한 패턴을 형성할 수 있으며 유연한 기계적 물성을 이용하여 구조색의 표면을 가진 3차원의 구조체도 형성하였다.

현재까지 보고된 구조색의 패턴화는 대부분 먼저 증발 공정을 기반으로 콜로이드 결정을 수 시간에 걸쳐 형성하고, 이후 국부적인 후처리를 통해 패턴을 형성했기에 실용성이 낮았다. 본 연구는 콜로이드 잉크의 정교한 포물레이션을 바탕으로 직접 인쇄를 통해 콜로이드 결정을 패턴화할 수 있었으며, 인쇄 속도는 15 mm/s 수준이며, 필름의 경우 90%에 달하는 절대 반사도를 달성할 수 있었다. 또한 콜로이드 결정 인쇄는 플라스틱, 유리, 금속, 종이뿐만 아니라 섬유에까지 인쇄가 가능하며, 잉크의 조성을 조절하여 소재의 물성을 탄성에서 비탄성까지 제어할 수 있다. 이 기술은 높은 자유도로 다색 컬러 그래픽을 빠르게 인쇄할 수 있으며, 색깔의 명도 및 채도, 각도에 따른 변색 정도 제어가 가능하고, 탄성 소재의 경우 변형에 따른 변색을 유도할 수 있다. 본 구조색 인쇄 기술은 응용 및 개인 맞춤형 구조색 패턴화가 가능하며 반사형 디스플레이 및 광학 센서를 포함한 광학 소자나 위변조방지 소재 및 고감성 코팅 소재 등으로 다양한 응용이 가능할 것으로 예상된다. 특히 화학색소와 구별되는 구조색의 높은 심미성은 MZ세대에게 개성을 표출하는 새로운 기술적 도구가 될 수 있을 것이라 예상된다.

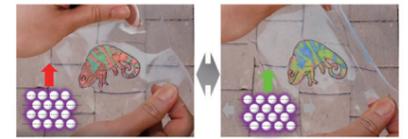


그림1. 신축에 의해 색이 달라지는 구조색 카멜레온 패턴

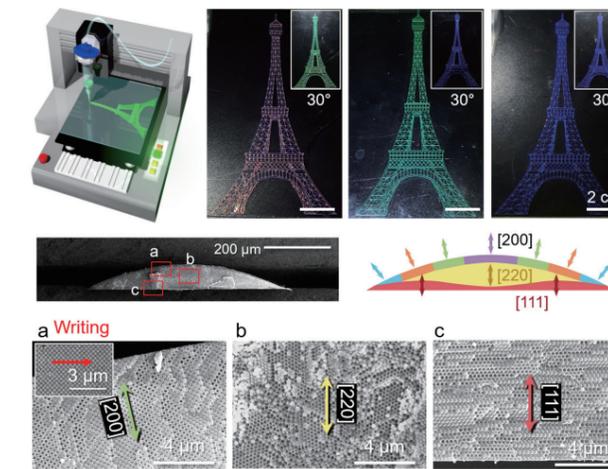


그림2. 직접 프린팅을 통한 구조색 선형 패턴의 인쇄 및 내부 격자 구조

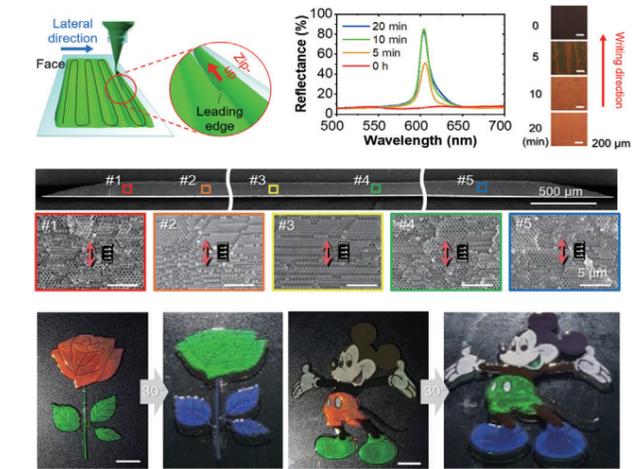


그림3. 직접 프린팅을 통한 구조색 면 패턴 광학특성과 내부 격자 구조, 그리고 각도 의존적인 장미와 미키마우스 구조색 패턴

연구성과

논문 J. B. Kim, C. Chae, S. H. Han, S. Y. Lee, S.-H. Kim, Direct writing of customized structural-color graphics with colloidal photonic inks, *Sci. Adv.* 7, eabj8780 (2021). [2020 Impact factor = 14.136]
S. K. Nam, J. B. Kim, S. H. Han, S.-H. Kim, Photonic Janus balls with controlled magnetic moment and density asymmetry, *ACS Nano* 14, 15714-15722 (2020). [2020 Impact factor = 15.881]

특허 국내특허출원 1건.

수상 제3회 한국도레이 과학기술연구기금 수혜, 삼성휴먼테크논문대상 동상 수상 ([논문1])

홍보 KBS 전국 및 대전세종충남 국내언론보도 10여 회, Phys Org 등 해외언론보도 ACS Youtube channel (view 1만회 이상) 및 C&EN 하이라이트, 해외언론보도 5건

연구비 지원 재단법인 한국도레이과학진흥재단, 맞춤형 구조색 패턴화를 위한 3차원 콜로이드 배열의 2D 및 3D프린팅 기술 개발 한국연구재단, 제어된 핵생성을 통한 신규격자구조의 콜로이드 광결정 설계