

자연모사 광활성 인공색소세포의 4D 프린팅

4D Printing of Bioinspired and Light-responsive Artificial Chromatophore

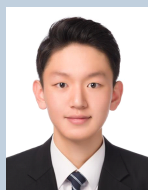
최규형 · 한대훈 | Kyuhyeong Choi · Daehoon Han

School of Chemical Engineering, Chonnam National University,
77, Yongbong-ro, Buk-gu, Gwangju 61186, Korea
E-mail: dhhan@jnu.ac.kr

1. 서론

자연에는 현대 기술로도 구현해내기 힘든 놀라운 능력들을 보여주는 동물 또는 식물들이 있다. 가장 잘 알려져 있는 예시들 중, 카멜레온과 문어는 주변 환경에 따라 피부색이나 피부패턴을 가역적으로 바꾸는 놀라운 위장 능력을 보여준다. 특히 문어 및 오징어와 같은 두족류(cephalopod)는 그들의 피부색 및 패턴을 짧은 시간안에 매우 정교하게 변화시킨다. 두족류의 이러한 놀라운 능력을 만드는 중요 요소는 이들의 피부에 분포된 색소세포(chromatophore)이다.¹⁻⁴ 각 색소세포는 색소가 들어있는 주머니와 그 주머니를 둘러싸고 있는 방사형 근육들로 구성되어 있다. 각 주머니마다 특정 색소를 가지고 있으며, 두족류가 자신의 피부 색을 변경하고자 할 때, 해당 색상이 들어있는 주머니의 근육 세포들이 수축된다. 이로 인해, 특정 색을 가진 주머니들만 피부에서의 면적이 확장되며, 두족류의 피부색이 해당 색상으로 변하거나 특정 패턴을 만들 수 있게 된다. 이와 같은 색소세포의 작동원리는 잘 알려져 있는 반면, 두족류가 어떻게 주변의 색을 읽어 그 색과 패턴으로 자신들의 피부색을 바꿀 수 있는지는 명확하게 알려져 있지 않다. 관찰된 것은 두족류의 눈으로 색상의 정보를 읽기보단 주변의 반사되는 빛을 개별적인 색소세포가 읽고 그에 따라 색상과 패턴을 만든다는 것이다.⁵ 본 특집에서는, 실제 두족류의 작동 메커니즘과는 다르지만 두족류의 색소세포에 영감을 얻어 만들어진 다양한 변조 시스템을 간단하게 살펴보고, 두족류의 색소세포와 같은 구조적 디자인 및 작동 메커니즘을 가지고 빛에 반응하는 인공색소세포(light-responsive artificial chromatophore, LAC)의 3차원(3D)/4차원(4D) 프린팅 기술을 다룬다.⁶ LAC의 3D/4D 프린팅 기술은 프로젝션 기반의 다중재료 3D 프린터(multi-material projection microstereolithography, MM-PU²SL)를 통해 구현되었으며,⁷ 광활성 하이드로젤, double-network(DN) 하이드로젤, 그리고 poly(ethylene glycol) diacrylate(PEGDA) 세 가지 서로 다른 고분자 물질들을 사용하여 제작되었다. 세 가지 다른 고분자 물질들은 다른 재료적 성질 및 기능을 보여주며, 이로 인해 두족류의 색소세포와 같은 메커니즘으로 작동되는 변조 시스템을 효과적으로 구현했다. LAC를 포함한 다양한 변조 시스템 개발 및 연구는 색상 또는 패턴 변조를 사용하는 다양한 응용 분야에 대한 새로운 개념을 제안할 수 있을 것이다.

Author



최규형

2019-현재 전남대학교 화학공학부 (학사)



한대훈

2012 서울시립대학교 화학공학과 (학사)
2014 서울시립대학교 화학공학과 (석사)
2020 Rutgers University 기계공학과 (박사)
2019-2022 University of Minnesota (Post-Doc.)
2022-현재 전남대학교 화학공학부 조교수

2. 본론

2.1 색소세포(chromatophore)

두족류는 연체동물의 한 분류이며, 두족류 중 오징어와 문어는 서로 간의 의사소통 또는 외부의 적으로부터 자신을 보호하기 위해 자신의 피부색과 패턴을 변화한다.^{2,3} 이러한 색 또는 패턴 변화는 1초도 안되는 매우 짧은 시간에 빠르고 정교하게 이루어지며, 피부에 존재하는 색소세포가 주요한 역할을 한다. 색소세포는 크게 색소주머니와 방사형 근육들로 나눌 수 있다(그림 1).¹

색소주머니는 황색, 적색, 또는 갈색의 염료 중 하나를 포함하고 있으며, 방사형 근육들이 이 주머니를 둘러싸고 연결되어 있다. 주머니 안에 들어있는 색상을 피부에 나타내고자 할 때, 방사형 근육들이 수축하며 가운데 색소주머니를 잡아당긴다. 이로 인해 피부에서 특정 색상의 평면 면적이 피부에서 확장되어 피부의 색 변화 또는 패턴 변화를 가져온다(그림 2). 일반적으로 축소된 주머니의 크기는 직경 150 μm 이며, 확대된 주머니는 직경 450 μm 이다.³ 이는 주머니의 직경이 3배 이상 늘어나며, 주머니의 평면 면적이 9배 이상 크게 증가할 수 있음을 나타낸다.

2.2 색소세포모사 변조 시스템

두족류의 이러한 놀라운 변조 능력에 영감을 받아 많은 색소세포모사 변조 시스템들이 동전기학(electro-kinetics) 및 전기유체학(electro-fluidics),⁸ 전기-기계-화학적-감응형

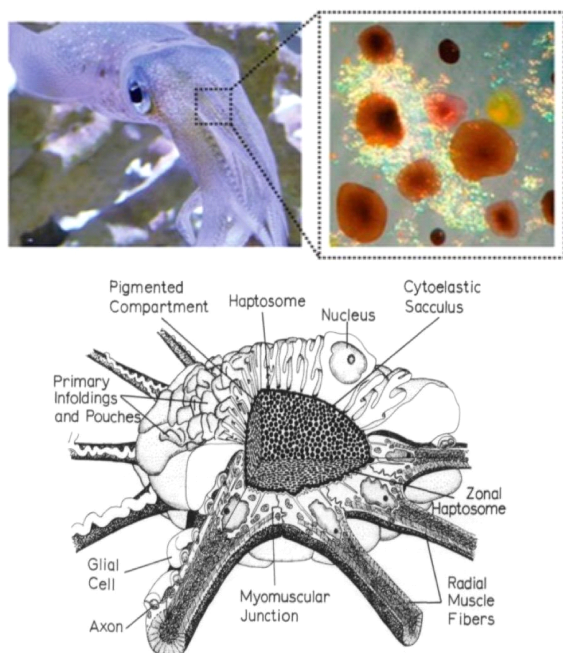


그림 1. 색소세포(chromatophore)의 구성. 중앙에 특정 색(황색, 적색, 또는 갈색)을⁶ 포함한 탄성의 색소주머니와 이를 둘러싸고 있는 방사형 근육들.¹

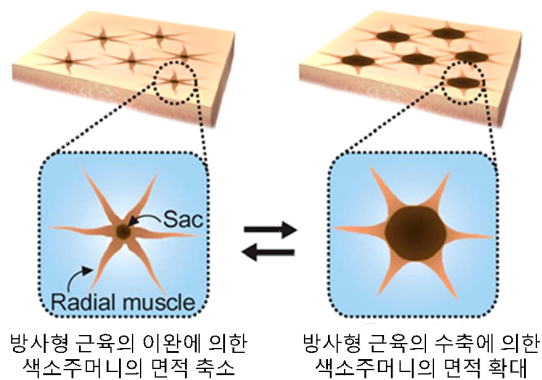


그림 2. 색소세포의 작동 원리. 방사형 근육들의 이완 또는 수축에 의한 색소주머니의 평면 면적 축소 또는 확대.⁶

탄성중합체(electro-mechano-chemically responsive elastomers),⁹ 기계적 변형 의존 균열 및 접힘(strain-dependent cracks and folds),¹⁰ 자성 나노 안료(magnetic nano-pigments),¹¹ 또는 유전체 탄성중합체(dielectric elastomers)¹²를 사용하여 개발되었다(그림 3). 이들의 색 변조 작동 메커니즘은 근육과 색소주머니를 사용하는 실제 색소세포의 색 변조 원리와는 다르지만, 효과적인 색상 또는 패턴 변조 능력을 보여주고 있다.

2.2.1 동전기학 및 전기유체학

처음 소개하고자 하는 색소세포모사 변조 시스템은 동전기학 기반의 시스템으로, 시스템안에 있는 염료를 전기장을 사용하여 확장 또는 수축하는 원리로 시스템의 색상 또는 패턴 변조를 유도한다.⁸ 여기서 사용되는 염료 입자들은 전하를 띠고 있어, 전압이 가해졌을 때, 상대전극으로 입자들이 빠르게 이동하며, 100 밀리초의 빠른 속도로 변조를 가능하게 한다(그림 3a). 전기유체학을 이용한 변조 시스템도 전기장을 통해 염료의 면적을 확대 또는 수축하는 원리로 시스템의 변조를 보여준다(그림 3b). 전압이 시스템에 가해졌을 때, 표면장력에 의해 얇은 채널안에 수축되어 있던 염료들이 넓은 면적으로 펼쳐지면서 시스템의 변조를 가져온다. 이러한 변조는 동전기학 기반의 시스템보다 10배 정도 빠른 10 밀리초로 이루어진다.

2.2.2 전기-기계-화학적 감응형 탄성중합체

전기장 아래 다양한 형광 패턴을 만들어 색상 또는 패턴을 변조하는 시스템이, 전기-기계-화학적 감응형 탄성중합체를 이용하여 제시되었다(그림 3c).⁹ 신축성이 있는 탄성중합체에 기계적 변형에 반응하여 형광색을 나타내는 입자들을 결합하여 변조 시스템을 구축했으며, 시스템의 충분한 기계적 변형을 만들기 위해 전기장을 이용하였다. 이러한 작동 원리를 통해, 전기장을 이용하여 선, 원형, 그리고 글자 등 다양한 형광 패턴으로의 변조를 제시하였다.

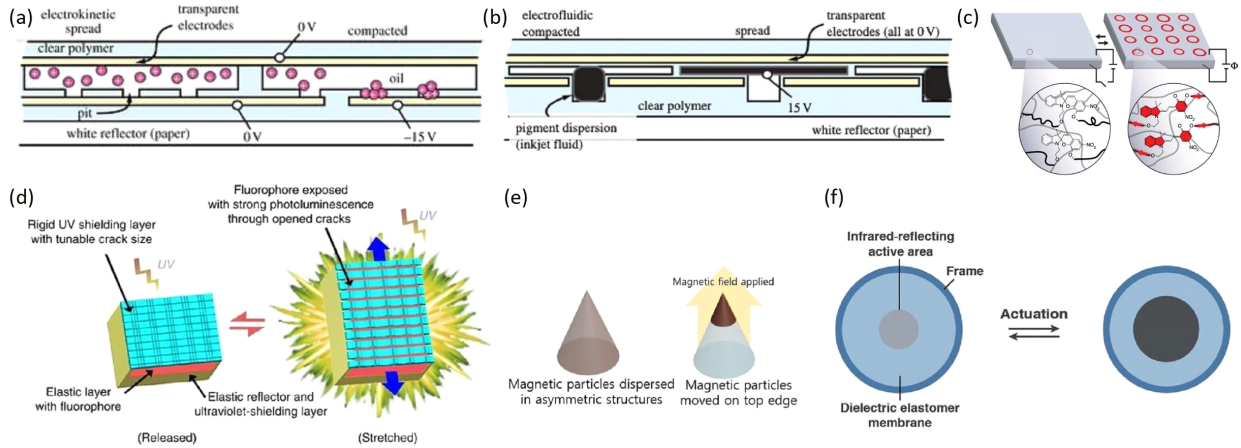


그림 3. 색소세포모사 변조 시스템들의 개발. (a) 동전기학 및 (b) 전기유체학을 이용한 전기장 감응형 변조 시스템들.⁸ (c) 전기장에 의한 기계적 변화와 그로 인한 형광 패턴 발현.⁹ (d) 표면의 균열 및 접합을 이용한 기계적 변형 기반의 색상 또는 패턴 변조 시스템.¹⁰ (e) 자기장을 이용한 자성 나노 안료의 조작 및 이를 통한 변조.¹¹ (f) 전기적 에너지에 의한 유전체 탄성중합체의 길이 변화 및 변조.¹²

2.2.3 기계적 변형 의존 균열 및 접합

이중 층(단단한 층과 신축성 층)으로 이루어진 변조 시스템은, 기계적으로 변형 될 때, 단단한 층에 존재하는 균열 및 접합을 이용하여 시스템 표면 구조와 형태를 조절한다(그림 3d).¹⁰ 이러한 표면의 변화를 조작하여 투명/불투명 조작, 형광 패턴 생성, 색 변조, 그리고 패턴 암호화와 같은 다양한 변조를 보여준다. 또한 이와 같은 흥미로운 변조들이 40% 이내의 작은 단일 길이방향 기계적 변화만으로도 이루어질 수 있음을 제시하였다.

2.2.4 자성 나노 안료

자성 나노 안료(또는 입자)를 이용한 변조 시스템은 자기장을 통해 안료들의 움직임과 위치를 조작하여 패턴의 변조를 이룬다.¹¹ 시스템 내의 안료들은 원뿔과 같은 비대칭 구조 안에 분포되어 있다(그림 3e). 안료들이 원뿔의 바닥에 위치해 있을 때는 바닥 전체가 안료들로 덮여 넓은 영역이 안료의 검은색을 나타내지만, 자기장을 통해 원뿔의 꼭대기로 안료들을 이동시키면, 원뿔의 바닥에서 위로 갈수록 지름이 작아지는 구조적 특징으로 인해, 안료가 차지하게 되는 면적이 감소하게 되고 이는 효과적인 패턴 변조로 나타난다. 이러한 작동 원리를 바탕으로 투과도 조절이 가능한 스마트 창문의 개발을 보고했다.

2.2.5 유전체 탄성중합체

유전체 탄성중합체는 전기적 에너지를 기계적 에너지로 변환하여 큰 기계적 길이 변화를 보여주는 흥미로운 재료이다. 탄성중합체와 샌드위치 구조를 이루고 있는 두 전극은, 시스템에 전압이 가해졌을 때, 정전기 압력을 생성한다. 발생한 압력으로 두 전극은 탄성중합체를 수직 방향으로 압축하게 되고, 이로 인해 탄성중합체의 면적이 수평방향으로

넓어져 변조를 이루는 원리이다(그림 3f).¹² 전극에 의한 압축은 면적의 변화 뿐만 아니라 표면의 형태 변화를 만든다. 전압을 가하기 전 주름이 있던 표면의 형태는 전압을 가함으로 평평해질 수 있고, 이로 인해 표면으로부터 반사되는 빛의 정보가 바뀌게 된다. 이를 기반으로 선택적으로 적외선 영역의 빛을 반사시키는 흥미로운 변조 시스템이 개발되었다.

2.3 4D 프린트된 인공색소세포

앞에서 소개한 다양한 색소세포모사 변조 시스템들은 염료가 시스템에 차지하는 면적을 조절하거나 기계적 변형을 이용해 색을 발현하는 방법으로 변조를 이루었다. 이들 시스템들은 흥미로운 변조 능력을 보여주지만, 실제 두족류의 색소세포가 변조에 사용하는 메커니즘과는 거리가 있다.

본 연구팀은 두족류의 색소세포와 같은 구조적 디자인을 가진 인공색소세포(LAC)를 3D/4D 프린팅 기술을 통해 구현해 냈으며, 실제 색소세포의 변조 메커니즘과 동일한 메커니즘을 사용하여 LAC의 변조를 이루었다(그림 4).⁶ 빛을 이용한 LAC의 변조는, 실제 두족류가 빛을 변조에 어떻게 이용하는지에 대한 아직 밝혀지지 않은 근본적인 문제를

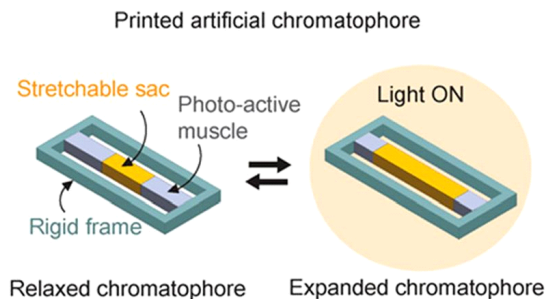


그림 4. 4D 프린트된 인공색소세포(LAC). 탄성주머니와 빛에 반응하여 수축하는 근육들로 이루어진 LAC.⁶

해결하는데 주요한 역할을 담당할 것이라 기대한다.

앞서 설명한대로 두종류의 색소세포는 방사형 근육들의 수축 및 이완을 통해 색소주머니의 면적을 조절하며 이를 변조에 사용한다. 이러한 작동 메커니즘을 구현하기 위해, 빛에 반응하여 수축하는 광활성 하이드로젤을 LAC의 근육을 위한 물질로서 사용하였고, 3배 이상의 길이 변화가 가능한 신축성 소재(DN 하이드로젤)로 색소주머니를 제작하였다.

2.3.1 광활성 하이드로젤과 LAC 근육

온도반응성 하이드로젤인 poly(*N*-isopropyl-acrylamide) (PNIPAAm) 하이드로젤은 전이온도($\sim 32^\circ\text{C}$) 이하의 온도에서는 부피팽창을 보이며, 반대로 전이온도 이상의 온도에서는 큰 부피 수축을 보이는 흥미로운 스마트 재료 중 하나이다.¹³ 광활성 하이드로젤은 PNIPAAm 하이드로젤에 폴리도파민 나노 입자들(PDA-NPs)을 광열제로서 첨가하여 제작되었다(그림 5a).^{14,15} 광열제는 빛에너지를 열에너지로 변환하는 물질로서, 광활성 하이드로젤에 전달된 빛에너지가, 광열제에 의해, 열에너지로 변환되면서 광활성 하이드로젤을 이루는 PNIPAAm 하이드로젤의 부피 수축을 유도하는 원리이다.

인공색소세포의 효과적인 작동을 위해서는 광활성 하이드로젤의 큰 부피 수축이 필수적이다. 이를 위해, PDA-NPs의 농도가 광활성 하이드로젤의 빛에너지에 의한 부피 수축에 미치는 영향을 확인하였다. 결과적으로 PDA-NPs의 농도가

높을수록 동일한 빛에너지가 주어졌음에도 더 큰 부피 수축을 보이는 것을 확인하였다(그림 5b). 이는 하이드로젤 내의 PDA-NPs의 농도가 높아 더 많은 열에너지를 생성할 뿐만 아니라, PDA-NP 표면에 다양한 작용기들이 존재하여 추가적인 결합을 제공함으로써 광활성 하이드로젤의 고분자 네트워크가 더 다양하고 많은 결합으로 형성되기 때문이다.^{15,16} 이러한 결과를 바탕으로 30 g/L 농도의 PDA-NPs를 포함하는 광활성 하이드로젤을 LAC의 근육을 위한 재료로서 선택하였다.

2.3.2 DN 하이드로젤과 색소주머니

앞서 언급한대로, 두종류의 색소세포내 색소주머니는 직경이 약 3배까지 늘어날 수 있다. 이와 같은 색소주머니의 높은 신축성을 구현하기위해, 높은 기계적 물성을 가진 DN 하이드로젤을 사용하여 LAC의 신축성 색소주머니를 제작하였다. 두 개의 서로 다른 고분자 네트워크들로 구성된 DN 하이드로젤이 크게 변형될 때, 상대적으로 짧은 네트워크가 먼저 끊어지면서 에너지를 소산시킨다.¹⁷ 이와 같은 에너지의 소산은 하이드로젤의 인성(toughness)을 크게 증가시키며, 이는 하이드로젤의 신축성 증가를 의미한다. 본 연구에서는, DN 하이드로젤을 만들기 위해, 긴 네트워크로서 acrylic acid (AA)와 PEGDA 700의 공유가교결합과, 짧은 네트워크로서 Fe^{3+} 이온의 이온결합을 각각 사용하였다. 일반적인 고분자 물질의 기계적 물성은 공유가교결합제(PEGDA 700)와 이온(Fe^{3+})의 농도에 따라 크게 변한다. 3배 이상의 신축성을

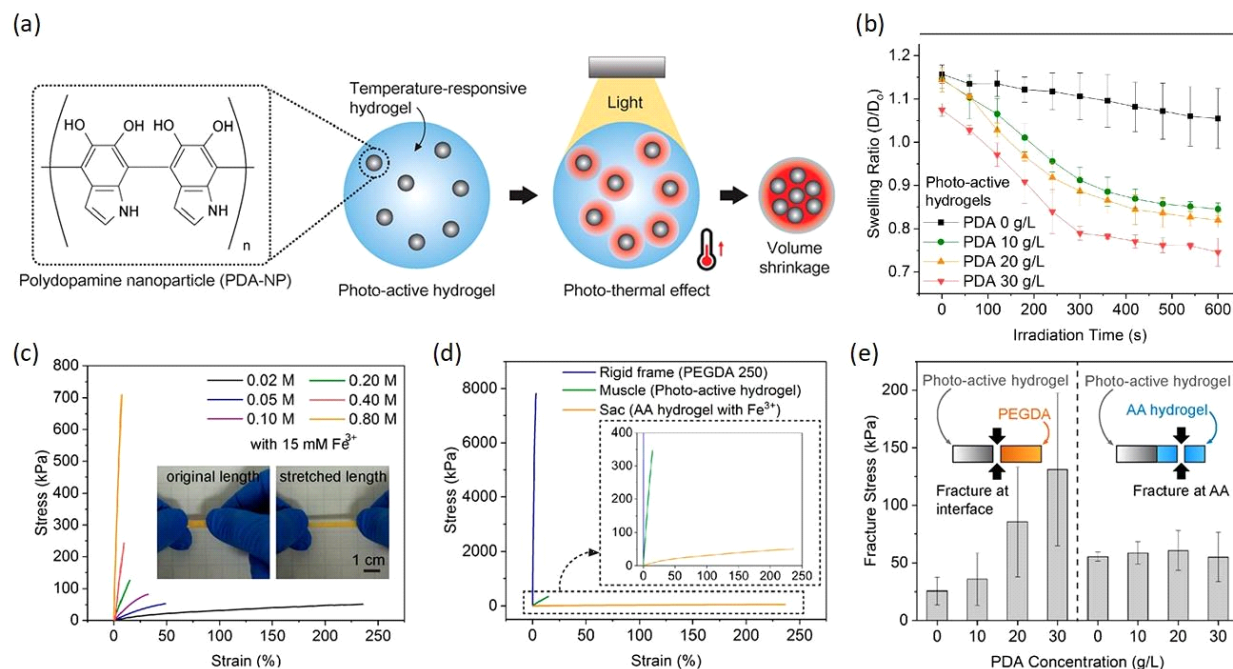


그림 5. 인공색소세포(LAC)를 이루는 세 가지 다른 물질들.⁶ (a) 온도반응성 하이드로젤과 폴리도파민 나노 입자들(PDA-NPs)로 이루어진 광활성 하이드로젤. (b) PDA-NPs 농도에 따른 광활성 하이드로젤의 빛에 대한 부피 수축 차이. (c) DN 하이드로젤의 신축성. (d) LAC의 틀을 위해 사용된 PEGDA 250의 기계적 물성. (e) PDA-NPs 농도에 따른 세 가지 다른 물질들 간의 결합 강도 차이.

확보하기 위해, 공유가교결합제와 이온의 농도를 변경하며 DN 하이드로젤의 기계적 물성을 확인했다. 결과적으로, 0.02 M의 공유가교결합제와 15 mM의 이온을 포함한 DN 하이드로젤이 3배 이상의 신축성을 보였고, 이를 LAC의 색소주머니를 제작하기 위한 재료로서 선정하였다(그림 5c).

2.3.3 LAC의 틀과 각 물질들 간의 결합

광활성 하이드로젤로 이루어진 LAC 근육들의 수축을 이용하여 LAC 색소주머니의 면적을 효과적으로 확장하기 위해서는, 디자인적으로 중요한 요구사항이 있다. 효과적인 확장을 위해 LAC 근육들의 한쪽 끝은 LAC 색소주머니에 연결되고, 다른 한쪽 끝은 단단하게 고정되어야 할 것이다. 광활성 하이드로젤의 한쪽 끝 고정은 이들의 수축 진행 방향을 색소주머니로부터 고정되어 있는 방향으로 유도한다. 이로 인해 효과적인 색소주머니의 면적 확장이 이루어지게 된다. LAC 근육들의 한쪽 끝을 고정하고자 PEGDA 250 고분자 물질을 이용하여 틀을 만들었다(그림 4). PEGDA 250은 광활성 하이드로젤과 DN 하이드로젤에 비해 높은 기계적 강성(~8 MPa)을 가지고 있다(그림 5d). 이는 LAC가 빛에 의해 작동될 때에도, 틀은 변형이 일어나지 않고 LAC 근육들의 한쪽 끝을 단단하게 고정할 수 있음을 나타낸다.

LAC의 성공적인 변조 작동을 위해서는 세가지의 다른 물질들이 서로 충분한 결합 강도를 가지고 연결되어 있어야만 한다. 하지만, 서로 다른 재료 간의 약한 결합 강도는 다중 재료 제조분야에서 오래전부터 해결되어야 할 중대한 문제점 중 하나이다. 앞서 언급했던 광활성 하이드로젤에서 광열제로 사용된 PDA-NPs는 표면에 다양한 작용기들이 존재하여 추가적인 결합들을 제공한다.^{15,16} 이와 같은 추가적 결합들은 서로 다른 재료 간의 결합 강도(또는 접착력)를 증가시켜, LAC 작동을 위한 세 가지 물질들 간의 필요 결합 강도를 충족시킨다. 광활성 하이드로젤 내의 PDA-NPs의 농도는 결합 강도를 결정하는 중요한 요소이며, 높은 농도의 PDA-NPs를 포함할 수록 더 높은 결합 강도를 보인다. 실제로 광활성 하이드로젤과 PEGDA 250 간의 결합은 PDA-NPs의 농도가 증가할 수록 증가함을 확인할 수 있다(그림 5e의 왼쪽 그래프). 또한 PDA-NPs의 농도에 따른 광활성 하이드로젤과 DN 하이드로젤 사이의 결합 강도를 측정하였다(그림 5e의 오른쪽 그래프). 그래프에서 볼 수 있듯이, PDA-NPs의 농도와 상관없이 모든 샘플들이 약 50 kPa의 파괴 강도를 보여준다. 이는 DN 하이드로젤의 낮은 파괴강도로 인해, 두 물질 간의 결합 부위가 떨어지기 이전에 DN 하이드로젤의 파괴가 먼저 이루어지기 때문이다. 이는 두 물질 간의 정확한 결합 강도는 알 수 없지만, DN 하이드로젤의 파괴강도보다 높은 결합 강도를 가지고 있음을 나타내며, 이로 인해 LAC의 변조 작동이 LAC의 손상 없이 효과적으로 이루어질 수

있음을 의미한다.

2.3.4 LAC의 다중재료인쇄(3D/4D 프린팅)

앞서 논의한 세 가지 재료를 사용하여, LAC를 프로젝션 기반 다중재료 마이크로 3D 프린팅 기술(MM-PμSL)을 통해 제작하였고,⁷ 온도 또는 빛을 이용한 LAC의 작동으로 4D 프린팅을 구현하였다. 4D 프린팅이란, 고정된 형상의 3D 구조물이 아닌, 외부자극을 통해 프로그램 된 모양 또는 특성으로의 변화가 가능한 3D 구조물 프린팅을 의미한다.¹⁸ 사용된 MM-PμSL기술은 높은 해상도(~5 μm)로 3D 구조물 제작을 가능하게 하며, 프린팅 과정동안 효과적이고 빠른 재료 교환을 통해, 세 가지 물질의 고유한 특성 및 기능이 다중재료 3D 구조물 안에서 저하되지 않는다.

LAC를 제작하기 위해, 먼저 LAC의 틀을 PEGDA 250을 이용하여 길이(틀 내부) 9 mm, 너비(틀 내부) 4.5 mm로 인쇄하였다. 다음, 광활성 하이드로젤을 재료로, 두 개의 분리된 LAC 근육들을 길이 3 mm, 너비 1.5 mm로 LAC 틀과 연결하여 인쇄하였다. 마지막으로, 두 개의 LAC 근육 사이에 LAC 색소주머니를 DN 하이드로젤을 사용하여 인쇄하였다(그림 4). 인쇄된 LAC는, 하이드로젤의 특성 상, 가역적 작동을 위해 물 안에서 보관 또는 작동되었다.

2.3.5 LAC의 온도 또는 빛에 의한 작동

광활성 하이드로젤을 이루는 주된 고분자 네트워크는 온도

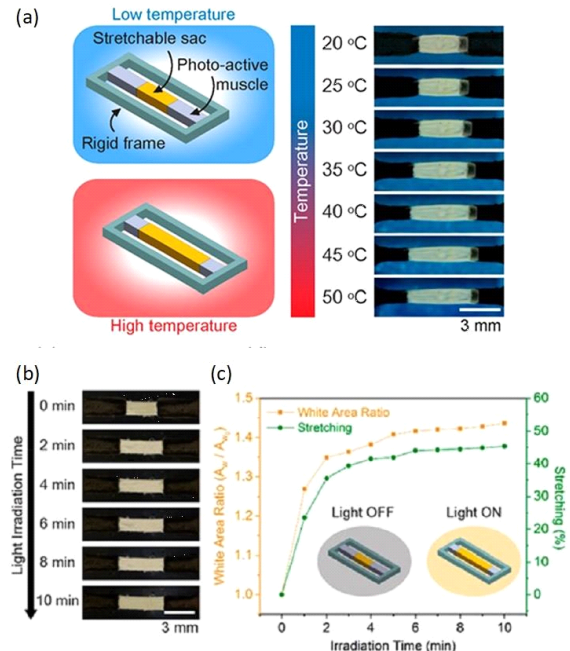


그림 6. 온도와 빛에 의해 작동되는 LAC 및 LAC의 색상 변조 평가.⁶ (a) 온도 변화에 따른 LAC 근육 및 LAC 색소주머니의 변화. (b) 빛에 의한 LAC의 작동. (c) 빛을 비추는 시간에 따른 LAC 색소주머니의 변화 평가.

반응성 하이드로젤인 PNIPAAm이다. 따라서 LAC 근육들은 빛 뿐만 아니라 온도에 의해서도 활성화될 수 있다(그림 6a). 그림에서 볼 수 있듯이, 온도가 증가함에 따라, LAC의 두 근육들(검은색)은 수축하며 가운데 위치한 LAC 색소주머니(흰색)의 면적을 증가시킨다. LAC의 색상 변조 능력을 분석 그리고 평가하기 위해, 각 온도에서 사진 속 LAC의 검은색(LAC 근육)과 흰색(LAC 색소주머니)의 면적을 측정하였다. 온도가 20 °C에서 50 °C로 변경되는 동안, 흰색 면적은 약 40% 확장되고 검은색 면적은 약 55% 감소하였다.

또한 빛을 비추는 시간에 따른 LAC의 변조를 확인하였다(그림 6b). LAC에 백색광(빛의 세기: 0.77 W/cm²)을 비추었을 때, LAC 근육들은 수축하며 성공적으로 색소주머니의 면적을 증가시켰다. LAC의 빛에 의한 색상 변조 능력을 분석하기 위해, 사진 속 LAC의 흰색 면적을 측정하였다(그림 6c). 5분 동안 빛을 비추었을 때, 흰색 면적은 약 40% 이상 확장되었다. 또한 단 2분 만에 주머니의 전체 면적 변화의 95% 이상이 달성되었다. 이러한 LAC의 빠르고 큰 면적 변화는, LAC가 색상 변조 시스템으로의 큰 잠재력을 가지고 있음을 나타낸다.

3. 결론

본 특집에서는 두족류의 색소세포에 영감을 얻어 제작된 다양한 변조 시스템들을 소개하였다. 각각의 시스템마다 다른 작동 메커니즘을 가지고 있으며, 색소세포의 놀라운 변조 능력을 실제 시스템으로 구현하였다. 특히 LAC는 실제 두족류의 색소세포와 같은 디자인 및 작동 메커니즘을 이용해 변조 시스템을 구축했다는 점에서 의미가 있다. 온도 또는 빛에 의한 LAC의 변조를 확인했으나, 실제 산업에 적용하기 위해선 다음과 같은 후속 연구가 필요하다. 첫째, 본 연구에서 사용된 DN 하이드로젤의 색상은 흰색이지만, DN 하이드로젤에 염료를 추가하여 손쉽게 다양한 색상의 LAC 시스템을 구축할 수 있다. 또한 광활성 하이드로젤의 광열제 종류를 조합함으로 LAC가 작동되는 빛의 파장 영역을 선택할 수 있다. 이러한 내용을 바탕으로, 다른 색소주머니에 다른 광열제를 포함한 LAC 근육들을 배치하여 빛의 파장 선택을 통한 특정 색상으로의 변조를 가능케 할 수 있다. 둘째, 가역적인 LAC의 작동을 위해선, LAC를 물 안에 넣어둬야 하며, 이로 인해 빛에 의해 발생된 열이 물로 전달되어 큰 열손실이 일어나고 작동 속도에 영향을 준다. 따라서, 열손실을 줄이기 위한 방법

마련과 수중 작동이 필요하지 않은 재료 개발 연구가 필요하다. 이와 같은 후속 연구를 통해 LAC의 색상 변조 기능과 작동 속도 등이 개선된다면, LAC로 이루어진 변조 시스템이 위장 표면, 생체 광자 소자, 그리고 유연한 디스플레이와 같은 다양한 엔지니어링 응용 분야에서 사용될 것이라 기대된다.

참고문헌

1. R. A. Cloney and E. Florey, *Z. Zellforsch. Mikrosk. Anat.*, **89**, 250 (1968).
2. M. Fingerma, *Physiol. Rev.*, **45**, 296 (1965).
3. G. R. Bell, A. M. Kuzirian, S. L. Senft, L. M. Mäthger, T. J. Wardill, and R. T. Hanlon, *Invertebr. Biol.*, **132**, 120 (2013).
4. J. Rossiter, B. Yap, and A. Conn, *Bioinspir. Biomim.*, **7**, 036009 (2012).
5. M. D. Ramirez and T. H. Oakley, *J. Exp. Biol.*, **218**, 1513 (2015).
6. D. Han, Y. Wang, C. Yang, and H. Lee, *ACS Appl. Mater. Interfaces*, **13**, 12735 (2021).
7. D. Han, C. Yang, N. X. Fang, and H. Lee, *Addit. Manuf.*, **27**, 606 (2019).
8. E. Kreit, L. M. Mäthger, R. T. Hanlon, P. B. Dennis, R. R. Naik, E. Forsythe, and J. Heikenfeld, *J. R. Soc. Interface*, **10**, 20120601 (2013).
9. Q. Wang, G. R. Gossweiler, S. L. Craig, and X. Zhao, *Nat. Commun.*, **5**, 4899 (2014).
10. S. Zeng, D. Zhang, W. Huang, Z. Wang, S. G. Freire, X. Yu, A. T. Smith, E. Y. Huang, H. Nguon, and L. Sun, *Nat. Commun.*, **7**, 11802 (2016).
11. J. Yang, H. Lee, S. G. Heo, S. Kang, H. Lee, C. H. Lee, and H. Yoon, *Adv. Mater. Technol.*, **4**, 1900140 (2019).
12. C. Xu, G. T. Stiubianu, and A. A. Gorodetsky, *Science*, **359**, 1495 (2018).
13. D. Han, Z. Lu, S. A. Chester, and H. Lee, *Sci. Rep.*, **8**, 1963 (2018).
14. Y. Liu, K. Ai, J. Liu, M. Deng, Y. He, and L. Lu, *Adv. Mater.*, **25**, 1353 (2013).
15. L. Han, Y. Zhang, X. Lu, K. Wang, Z. Wang, and H. Zhang, *ACS Appl. Mater. Interfaces*, **8**, 29088 (2016).
16. Y. Ding, M. Floren, and W. Tan, *Biosurf. Biotribol.*, **2**, 121 (2016).
17. X. Zhao, *Soft Matter*, **10**, 672 (2014).
18. S. Tibbitts, *Archit. Des.*, **84**, 116 (2014).