광 감응성 금속–유기 케이지 기반 토폴로지 전환 고분자 네트워크

유혜빈, 오승수 | 포항공과대학교(POSTECH) 신소재공학과 (E-mail: seungsoo@postech.ac.kr)

유연하고 신축성이 뛰어난 소프트 로봇의 개발이 화두로 떠오름에 따라 이를 위한 고분자 네트워크 신소재가 큰 주목을 받고 있다. 미국 매사추세츠공대(MIT) Jeremiah A. Johnson 연구팀은 광 감응성 금속–유기 케이지를 이용해 빛에 의한 네트워크 토폴로지의 전환을 성공하였고, 이 방법을 통해 재료의 벌크 성질을 변화시킬 수 있는 새로운 유형의 고분자 네트워크 재료를 개발하였다. 이러한 연구를 통해 자기 회복성 물질의 실질적 응용이 기대되고, 고분자 네트워크 소재의 수명 향상으로도 이어질 것으로 전망된다.

4차 산업혁명 시대를 맞이하여 소프트 로봇 및 웨어러블 디바이스에 대한 연구가 활발히 이루어짐에 따라, 유연한 움직임이 가능한 고분자 네트워크 구조가 큰 관심을 받고 있다. 고분자 네트워크는 하나의 교차점(junction point)에 여러 고분자 사슬이 연결되어 있는 그물망 구조를 말하고, 이러한 그물망 구조를 이루는 사슬과 교차점 사이의 위상 상태를 토폴로지라고 한다. 이러한 토폴로지는 고분자 네트워크의 벌크 성질, 탄력성 및 결함 허용도 등의 결정에 있어 핵심적 요소이다.

현존하는 많은 고분자 네트워크 시스템은 고정된 토폴로지 특성에 의해 단 하나의 상태로 존재한다. 하지만 단일 토폴로지 상태를 갖는 고분자 네트워크는 가역적 자극 변화 수용을 필요로 하는 액츄에이터나 전자 피부(E-skin) 등의 활용에는 한계가 있다. 이를 극복하고자 하는 시도 중 하나로 '토폴로지 전환'이라는 새로운 개념이 큰 주목을 받고 있다. 외부 환경 변화에 대응하여 재료의 성질을 가역적으로 변화시킬 수 있다면, 반복적인 자극에도 오래 견딜 수 있는 액츄에이터나 내구성이 뛰어난 소프트 로봇의 제작이 가능할 수 있기 때문이다.

이러한 '토폴로지 전환'의 전략에 기반하여, MIT의 Jeremiah A. Johnson 연구팀은 재료의 여러 특성을 일관되게 변화시킬 수 있는 자극 감응성

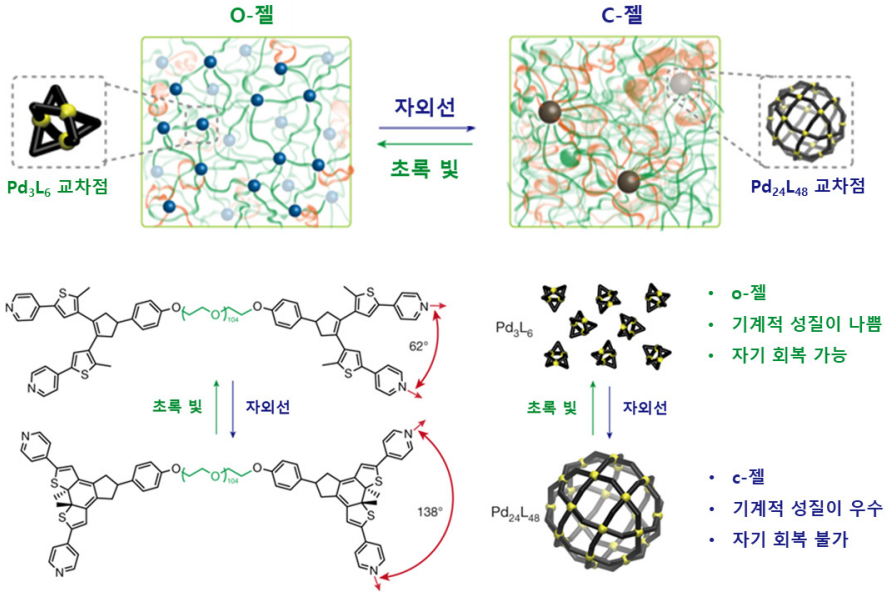

그림 1. 광 감응성 토폴로지 전환 고분자 네트워크의 메커니즘.

재료를 새롭게 개발하였다. 이는 협동성 자가 조립을 기본 원리로 하여, 조사하는 빛의 파장에 따라 두 종류의 토폴로지 상태가 가역적으로 전환될 수 있는 혁신적 시스템이다. 연구팀이 개발한 재료는 고분자 사슬과 금속-유기 케이지(metal-organic cage, MOC)로 이루어진 네트워크로, MOC를 구성하는 리간드에 부착된 고분자 사슬들이 각 MOC 들을 연결하고 있는 구조이다(polymer metal-organic cage, polyMOC). 네트워크 교차점의 역할을 하는 MOC는 일정한 비율의 금속과 리간드로 구성되어 있는데, 이 비율은 polyMOC 네트워크의 토폴로지와 재료의 벌크 성질을 좌우한다. 특정 파장대의 빛을 조사하면 광 반응성을 가지는 리간드의 화학 구조가 변하고, 이는 MOC의 크기 및 polyMOC의 토폴로지를 변화시킨다. 초록빛과 자외선의 조사를 통해서 크기가 작은 Pd_3L_6 MOC와 큰 $Pd_{24}L_{48}$ MOC의 가역적 전환이 일어나고, 함께 변화한 토폴로지로 인하여 거시적으로는 o-젤 상태와 c-젤 상태의 가역적인 전환이 유도될 수 있다(그림 1).

빛에 의한 토폴로지 전환은 네트워크 교차점의 분지 수, 전단 탄성 계수, 스트레스 완화 능력 및 자기 회복성 등 재료의 여러 성질들을 모두 변화시켰다. 성질 변화의 예로 연구팀은 자외선을 조사하였을 때 생성되는 c-젤이 높은 탄성 계수를 가짐을 확인한 바 있고, 이는 c-젤의 교차점 역할을 하는 $Pd_{24}L_{48}$ MOC의 분지 수가 매우 많아 네트워크의 교차점과 교차점 사이가 수많은 고분자 사슬들로 촘촘하게 연결되어 있기 때문이다. 반면 초록빛을 조사하였을 때 형성되는 o-젤은 낮은 탄성 계수를 가지지만 스트레스 완화 능력이 뛰어나다는 것이 드러났다. 이는 교차점 역할을 하는 Pd_3L_6 MOC의 분지 수가 적기 때문에 상대적으로 무른 대신, 활발한 리간드 교환이 가능하여 손상 시 자기 회복이 가능했기 때문이다.

이와 같은 '광 감응성 토폴로지 전환 물질'은 전에 없던 독창적인 재료로서, 학문적으로 큰 의미가 있을 뿐만 아니라 실질적인 응용 가능성을 가지고 있다. 기존 자기 회복성 물질들은 빠른 결합 교환 능력에 의존하고 있었기 때문에 기계적인 특성이 좋지 않고 실질적으로 응용하는데 있어서 많은 어려움을 안고 있다. 이 연구팀이 개발한 polyMOC 네트워크는 이러한 한계를 뛰어 넘는 대안이 될 수 있을 것으로 전망된다. 일례로, 소프트 로봇의 전자 피부로 적용되어 평소에는 기계적인 강도가 좋은 c-젤의 상태로 존재하다가, 피부가 손상을 입거나 재 공정이 필요해지면 토폴로지 전환을 통해서 자기 회복이 가능한 o-젤 상태로 변화될 수 있다. 손상된 피부가 회복되거나 재 공정을 마치면, 토폴로지를 재전환해 줌으로써 단단한 c-젤 상태의 전자 피부로 다시 돌아가 사용될 수 있을 것이다. 이처럼 토폴로지 전환 물질을 통해서 소프트 로봇과 액츄에이터의 수명이 크게 향상될 수 있을 것으로 기대된다. 뿐만 아니라 광 기반 자기 치료(예: 인공위성 표면 재생)와, 광 감응 물질 방출(예: 스마트 약물 방출 시스템)과 같은 새로운 응용 분야에도 적용할 수 있을 것으로 전망된다.

본 연구결과는 저널 *Nature*에 "Photoswitching topology in polymer networks with metal-organic cages as crosslinks"의 제목으로 2018년 8월에 게재되었다(DOI: 10.1038/s41586-018-0339-0).