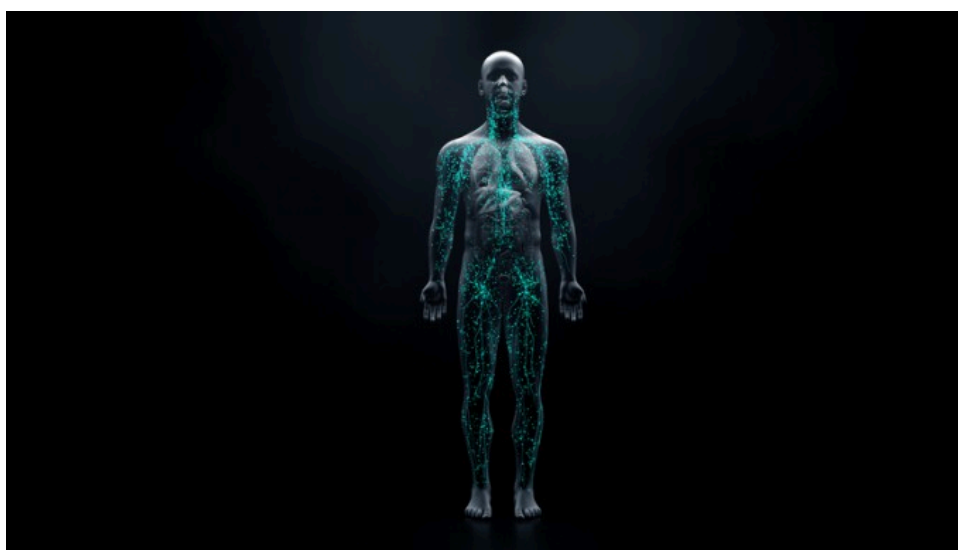


불필요한 단백질 사냥꾼 '자가포식체' 순간이동 세계 최초 포착

김민수 기자 2026.01.28 10:24

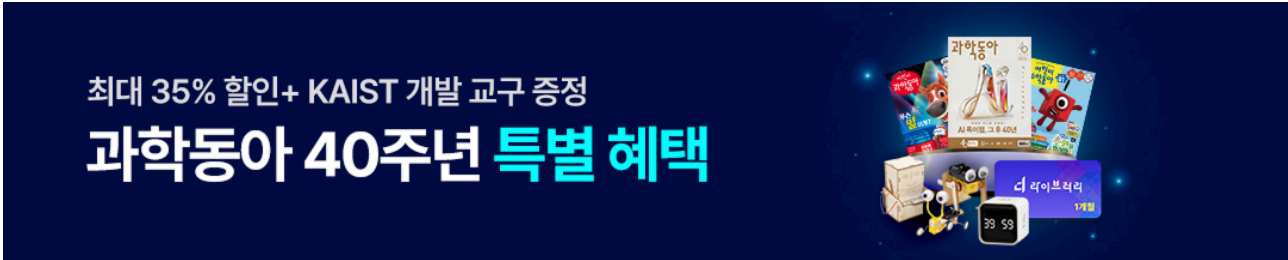
IBS 분자 분광학 및 동력학 연구단



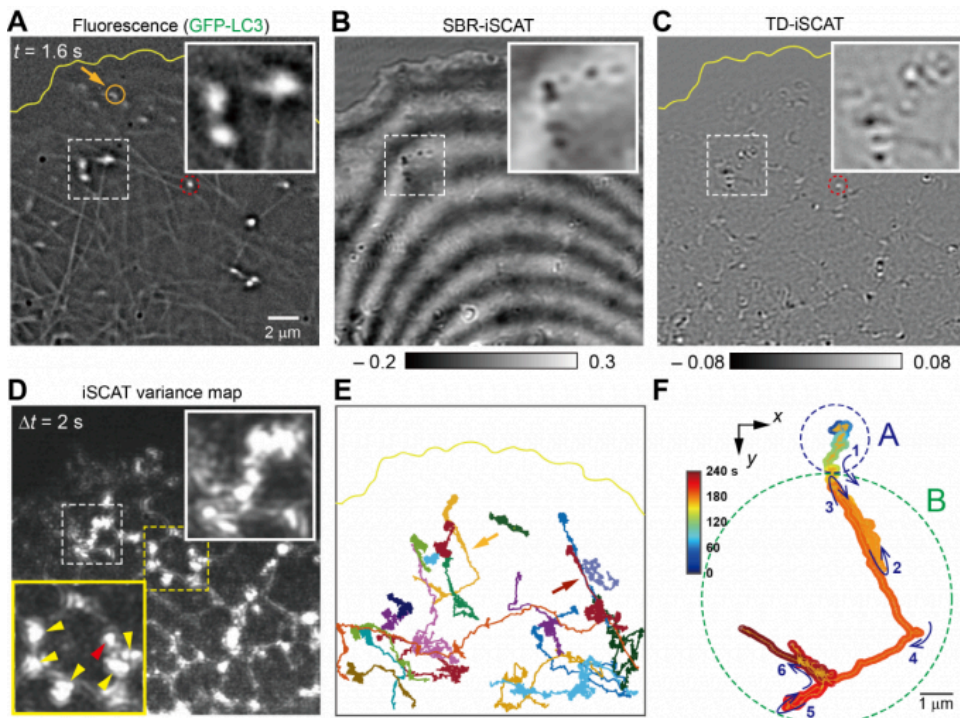
게티이미지뱅크 제공

세포 안에서는 매 순간 수많은 소기관이 생성되고 이동하며 생명 활동을 이어간다. 이들의 이동은 세포 내부 구조를 따라 정교하게 이루어진다. 소기관이 인접한 이동 통로로 옮겨 타는 '환승'의 순간은 지금까지 가설로만 존재했고 실제로 관찰된 적은 없었다.

기초과학연구원(IBS)은 조민행 분자 분광학 및 동력학 연구단 단장 조민행 단장(고려대 화학과 교수)과 홍석철 고려대 물리학과 교수 연구팀이 세포 소기관의 '환승'의 순간을 세계 최초로 실시간 영상으로 포착하는데 성공했다고 28일 밝혔다. 연구 결과는 21일 국제학술지 'ACS나노' 온라인판에 게재됐다.



연구팀은 앞서 간섭산란 영상 기법 기반의 ‘DySLIM’라는 장치를 자체 개발했다. 세포 속 소기관의 운동성을 나노미터 수준 정밀도로 고속 추적할 수 있는 장치다. 장치를 활용해 소포체에서 생성된 자가포식체가 인접한 미세소관으로 이전되는 순간을 실시간 관측했다.



형광 현미경과 결합된 간섭산란 영상 장비를 이용해 관찰한 살아 있는 세포 속 자가포식체, 미세소관, 소포체 구조.

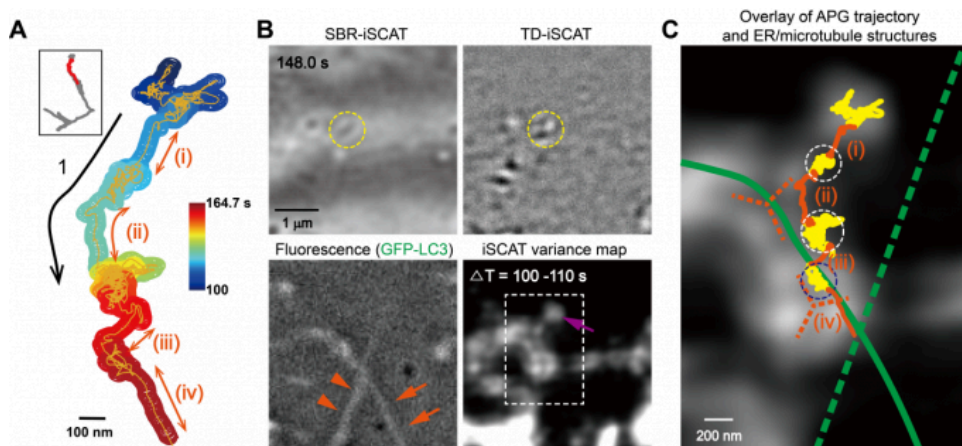
소포체는 세포 내 그물처럼 퍼져 있는 막 구조로 단백질과 지질을 만들고 다른 소기관으로 전달하는 통로 역할을 하는 세포 소기관이다. 자가포식체는 세포 내에서 불필요하거나 손상된 단백질, 오래된 세포 소기관 등을 이중막으로 둘러싸 분해하고 재활용하는 세포 소기관이다. 미세소관은 세포 내 물질의 이동 경로를 말한다.

자가포식체가 수행하는 자가포식은 생명의 항상성을 유지하는 데 중요한 생명 현상이다. 자가포식 과정에서 자가포식체는 인접한 소포체와 접촉해 막을 형성하는 성분인 지질을 공급받아 성장한 뒤 세포 속 불필요한 물질을 제거하는 분해 효소를 가진 '라이소좀'과 융합하기 위해 미세소관을 따라 이동한다.

이때 소포체와 미세소관이 맞닿는 접합점에서 일어나는 '이전 현상'은 오랜 기간 가설로만 제시됐고 실제로 관찰된 사례는 없었다.

아직 확인되지 않은 이 과정을 규명하기 위해 연구팀은 자가포식체의 형성과 성숙 과정에서 핵심적인 역할을 하는 'LC3 단백질'에 형광 표지를 붙여 자가포식체의 위치와 움직임을 빛으로 확인할 수 있도록 했다. 특히 LC3 단백질이 미세소관에도 함께 존재한다는 점에 착안해 하나의 형광 신호만으로 자가포식체와 미세소관을 동시에 구분해 관찰할 수 있는 방법을 구현했다.

하지만 형광 신호만으로는 자가포식체가 생성되는 소포체의 구조 변화까지 확인하는 데 한계가 있었다. 연구팀은 형광 표지 없이도 세포 구조의 미세한 변화를 감지할 수 있는 간섭산란 기반 DySLIM 장치를 병행 사용해 형광으로 식별된 자가포식체의 이동은 물론 소포체의 그물망 구조와 동적 변화까지 고속으로 영상화하는 데 성공했다.



간섭산란 현미경을 이용해 밀리초 시간분해능과 나노미터 공간 정밀도로 규명된 자가포식체의 소포체-미세소관 간 전이 과정.

관측 결과 연구팀은 소포체와 미체소관이 만나는 아주 좁은 접합 부위에서 일어나는 자가포식체의 순간 이전 현상을 밀리초(1000분의 1초) 단위로 시간 변화를 구분해 관찰했다. 또 나노미터(10억분의 1미터) 수준의 공간 정밀도로 실시간 포착하는 데 성공했다. 세계 최초로 살아 있는 세포에서 소기관 간 이동 과정을 시간의 흐름에 따라 직접 분석해 규명한 첫 실험 사례다.

조민행 단장은 “이번 연구는 연구단에서 개발한 비표지 고속 나노영상 기술의 탁월한 가능성을 입증한 성과”라며 “현재 운영 중인 다양한 비표지 분자 선택적 첨단 영상 기법들과의 융합을 통해, 향후 형광 표지에 의존하지 않는 차세대 비표지·분자 선택적 영상 플랫폼으로 발전시켜 나갈 것”이라고 밝혔다.



(왼쪽부터) 조민행 IBS 분자 분광학 및 동력학 연구단 연구단장, 홍석철 고려대 물리학과 교수(이상 공동 교신저자), 박진성 IBS 분자 분광학 및 동력학 연구단 연구교수(제1저자).

저작권자 © 동아사이언스 무단전재 및 재배포 금지



김민수 기자 >
reborn@donga.com