

다양한 고분자에 적용 가능한 범용성 경화제

고분자 경화 기술은 고분자 사슬 사이를 연결하여 고분자의 충격저항, 인장강도 및 고온에서의 기계적 물성 등을 향상시킬 수 있는 기술이다. 일반적으로 고분자를 경화하기 위해서는 빛이나 열 등에 반응하는 작용기가 필요하다. 하지만 폴리에틸렌이나 폴리프로필렌과 같이 알킬기로만 이루어진 고분자는 이러한 작용기가 없어 경화가 쉽지 않으며, 작용기를 붙이는 경우 원치 않는 물성 변화가 발생하는 문제가 있다.

본 연구에서는 bis(diazirine)의 작용기를 통해 고분자의 C-H 결합에 작용할 수 있는 범용성 경화제를 개발했다. Bis(diazirine)는 350 nm 파장의 빛을 쬔었을 때 N_2 가 제거되어 carbene을 형성했는데, 이 때 형성된 carbene은 고분자의 C-H 결합과 반응하여 경화반응을 일으켰다. 본 연구에서 사용된 경화제는 빛 뿐만 아니라 140 °C 이하의 낮은 온도에서도 경화가 가능했으며, 구조를 조절하여 폭발 위험성을 낮추고 부반응을 억제했다. 본 연구진에 따르면 수 그램 이상 생산이 가능하기 때문에 범용적인 접착제로 응용될 수 있을 것이라 기대된다고 한다.

본 연구 결과는 “A broadly Applicable Cross-linker for Aliphatic Polymers Containing C-H bonds”라는 제목으로 2019년 *Science*에 게재되었다.

<M. L. Lepage et al., *Science*, **366**, 875 (2019), DOI: 10.1126/science.aay6230>

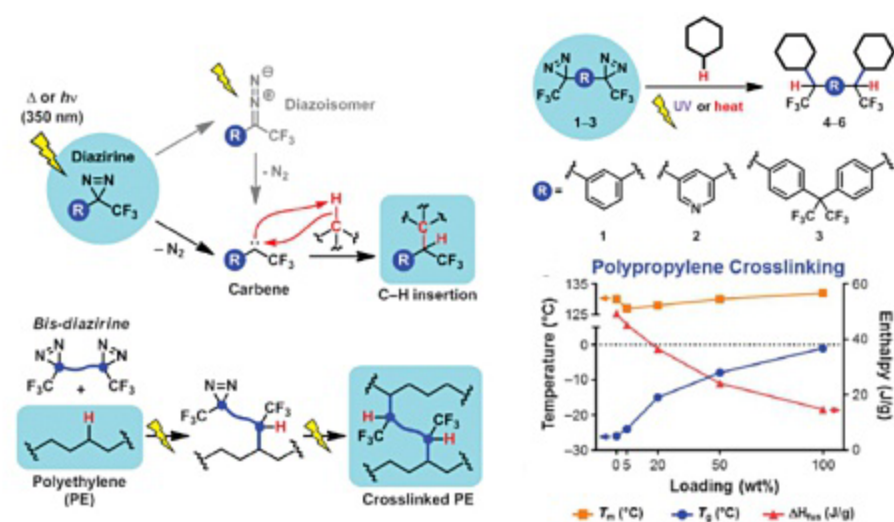


그림 1. 범용성 경화제의 작동 원리 및 구조식과 경화제 비율에 따른 폴리프로필렌의 기계적 물성 변화.

솜사탕을 활용한 에폭시-알루미나 나노입자 복합체의 열전도도 향상 기술

전자 소자가 소형화, 경량화 및 집적화됨에 따라 가볍고 기계적 물성이 우수하며, 가격이 싼 고분자를 이용한 방열 소재에 대한 관심이 커지고 있다. 하지만 고분자는 강한 격자 산란(phonon scattering)으로 인해 열전도도가 매우 낮기 때문에 무기물 필러(filler)와의 혼합을 통해 열전도도를 향상시키는 연구가 진행되고 있다.

본 연구에서는 솜사탕을 활용하여 알루미나(Al_2O_3) 나노입자의 연결성(percolation)이 향상된 에폭시 복합체를 제조했다. 우선 실험을 위해 설탕으로 솜사탕을 제조한 후 에폭시를 채워 솜사탕 구조체가 포함된 에폭시를 만들었다. 이후 에폭시 내에 빈 공간을 형성하기 위해 솜사탕 구조체를 물에 녹여 제거하였으며, 빈 공간에 알루미나 나노입자를 채워 에폭시-알루미나 복합체를 제조했다. 개발된 복합체의 열전도도는 알루미나가 첨가됨에 따라 증가했는데, 36.2 vol%의 알루미나가 첨가되었을 때 최대 3.17 W/mK까지 향상되었으며, 이는 균일하게 혼합된 복합체 대비 2배 이상 향상된 수치이다. 이러한 연구는 고분자 기반 고성능 방열 소재를 개발할 새로운 방법을 제시하고 있다.

본 연구 결과는 “Cotton Candy-Templated Fabrication of Three-Dimensional Ceramic Pathway within Polymer Composite for Enhanced Thermal Conductivity”라는 제목으로 2019년 *ACS Applied Materials and Interfaces*에 게재되었다.

<Y. Wu et al., *ACS Appl. Mater. Interfaces*, **11**, 44700 (2019), DOI: 10.1021/acsami.9b15758>

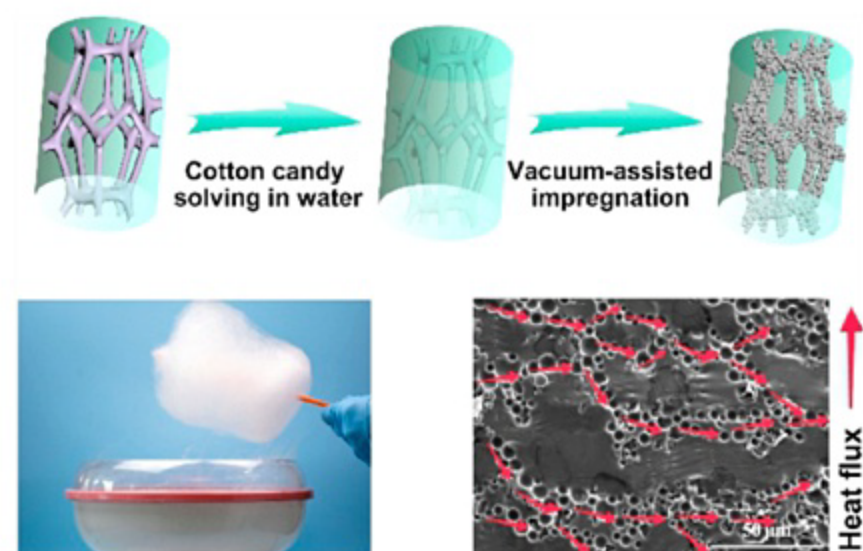


그림 2. 솜사탕을 활용한 에폭시-알루미나 복합체의 제조 방법 및 내부 구조.

붉은 빛을 방출하는 장기 발광 유기 소재

장기 발광 유기 소재(ultralong organic luminescent materials)는 외부에서 일시적으로 빛을 가했을 때 장기간 발광할 수 있는 특성을 지니고 있는 물질이다. 장기 발광 유기 소재의 특성을 향상시키기 위해 응집, 결정화, 할로젠 결합 등을 활용하는 연구가 진행되고 있다. 하지만 아직까지 대부분의 소재들은 양자 효율이 낮고, 결정성이 높아 취성이 크며 공정성이 떨어진다. 또한 대부분 푸른색과 녹색을 띄기 때문에 붉은색을 만들기 어려운 문제가 있다.

본 연구에서는 폴리비닐알코올(poly vinyl alcohol)에 여러 pyrene 계열의 물질을 혼합한 유기 발광 소재를 개발했다. Pyrene에 여러 작용기를 접합하여 pyrene의 응집도 및 폴리비닐알코올과 pyrene 사이의 수소 결합 정도를 조절했다. 이러한 과정을 통해 pyrene의 triplet state 에너지 준위가 변화했고 개발한 소재에 260~420 nm 파장의 빛을 가했을 때 붉은빛을 방출하는 결과를 얻었다. 이러한 연구는 생체 센서, LED, 데이터 저장, 정보 보안 등의 기술에 활용될 수 있을 것으로 전망된다.

본 연구 결과는 "Excitation-Dependent Long-Life Luminescent Polymeric Systems under Ambient Conditions"라는 제목으로 2019년 *Angewandte Chemie International Edition*에 게재되었다.

<Y. Su et al., *Angew. Chem. Int. Ed.*, **58**, 1 (2019), DOI: 10.1002/anie.201912102>

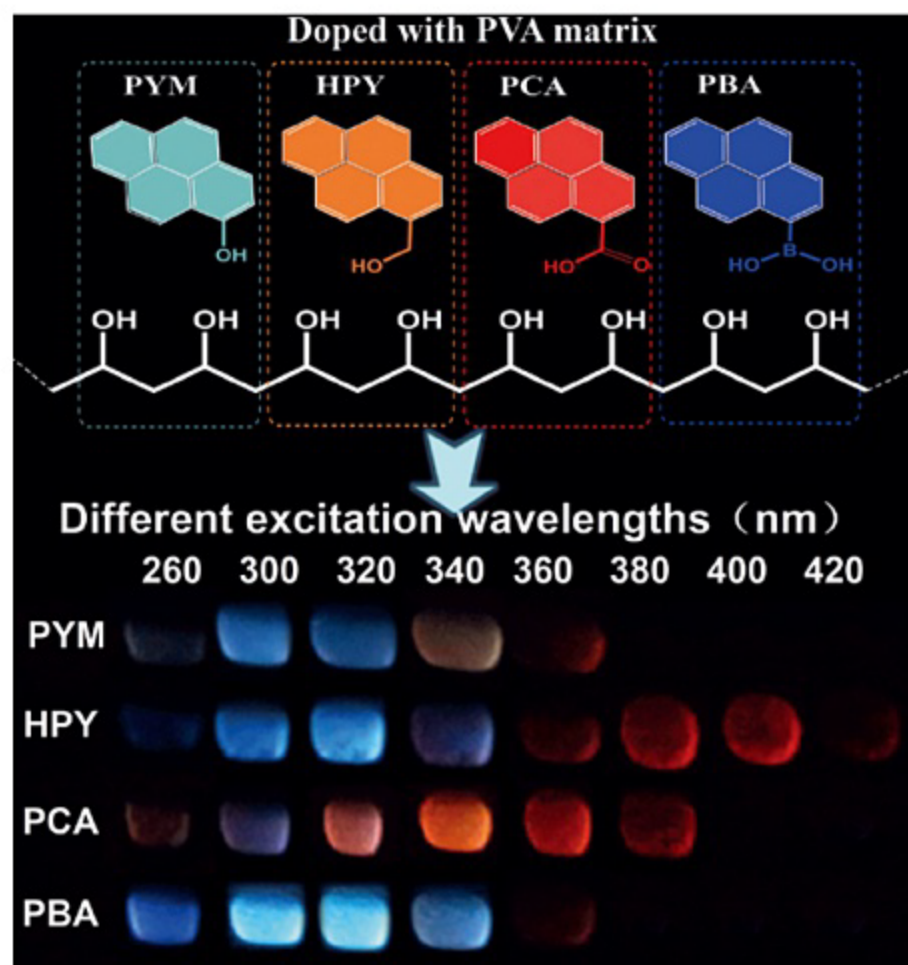


그림 3. Pyrene의 구조와 가한 빛에 따른 발광 색 변화.

음이온 교환을 통한 효율적인 공액 고분자 도핑 기술

도핑은 전하농도를 조절하여 반도체의 여러 특성을 조절할 수 있기 때문에 반도체 산업에서 필수적인 기술이다. 일반적으로 공액 고분자의 도핑은 산화환원 반응을 통해 이뤄지며, 고분자와 도펀트 사이의 에너지 준위 차이는 도핑 효율을 결정하는 중요한 요소 중 하나이다. 이 때 에너지 준위가 맞지 않는 경우 도핑이 발생하는 데에 한계가 있기 마련이다.

본 연구에서는 이미 도핑된 공액 고분자에 전하를 전달하여 음전하를 띤 도펀트를, 이온성 액체로 치환함으로써 위 한계를 극복했다. 도핑 되지 않은 고분자에 이온성 액체만 처리한 경우 이러한 도핑이 발생되지 않았으나, 이미 도핑된 고분자를 이온성 액체로 처리한 경우 전하농도 및 전기전도도가 향상됨을 발견하였다. 또한 음이온 치환된 고분자 박막을 160 °C에 10분간 보관했을 때 전기전도도 감소율이 99.96%에서 31%로 줄어드는 등 열 안정성이 크게 개선됨을 보고하였다. 음이온 교환 기술은 물질의 산화환원 준위의 한계를 극복할 수 있을 뿐만 아니라 기능성 분자를 공액 고분자 내에 저장하거나 운반, 변환하는 등에 사용될 수 있을 것으로 전망된다.

본 연구 결과는 "Efficient Molecular Doping of Polymeric Semiconductors Driven by Anion Exchange"라는 제목으로 2019년 *Nature*에 게재되었다.

<Y. Yamashita et al., *Nature*, **572**, 634 (2019), DOI: 10.1038/s41586-019-1504-9>

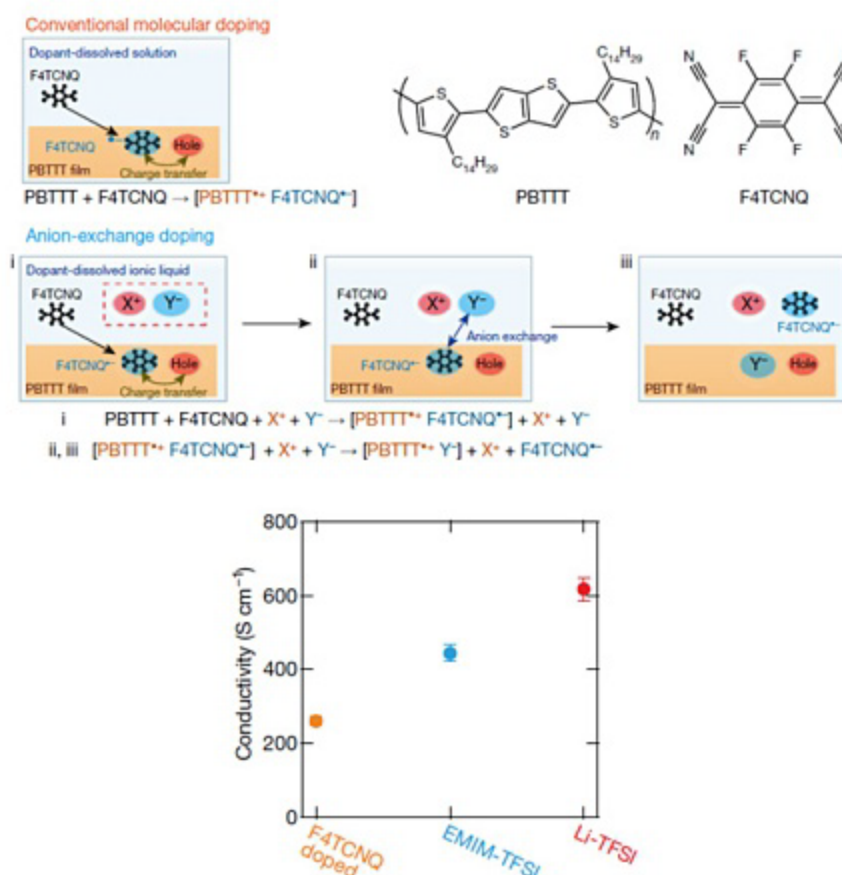


그림 4. 음이온 교환 메커니즘 및 도펀트에 따른 공액고분자 박막의 전기전도도 변화.

<장재영, email:jjyang15@hanyang.ac.kr>