

시안(cyano)기 치환 신규 n형 사다리형 공액 고분자의 혼합 이온-전자 수송 특성

황예진 | 인하대학교 화학공학부 (E-mail: yjhwang@inha.ac.kr)

김성찬 | 경북대학교 신소재공학과 (E-mail: seongchan@knu.ac.kr)

본 연구에서는 우수한 혼합 이온-전자 수송 특성을 지닌 n형 사다리형 공액 고분자(폴리(벤조이미다조벤조페난트롤린), BBL)를 기반으로, 시안기(cyano)가 도입된 신규 n형 고분자 BBL-x2CN 계열을 설계 및 합성하였다. 시안화물과 랜덤 공중합 전략을 통해 BBL 고유의 평면적 사다리형 골격을 유지하면서도, 공중합 조성에 따라 LUMO/HOMO 에너지 준위를 정밀하게 조절하는 데 성공하였다. 특히 20 mol%의 시안기를 함유한 BBL-202CN은 향상된 결정성과 구조적 무질서 억제를 바탕으로, 유기 전기화학 트랜지스터(OECT)에서 약 3 mS의 높은 트랜스컨덕턴스와 2.8 $\text{FV}^{-1}\text{cm}^{-1}\text{s}^{-1}$ 의 우수한 μC^* 값, 그리고 빠른 응답 속도를 구현하며 기존 BBL의 성능을 상회하였다. 본 결과는 고성능 n형 OMIEC의 분자 설계 지침을 제시하며, 차세대 바이오-에너지 인터페이스 및 유기 전자소자의 확장 가능성을 입증하였다.

차 세대 바이오 전자소자, 뉴로모픽 소자 및 에너지 시스템이 비약적으로 발전하기 위해서는 이온과 전자를 동시에 효율적으로 수송할 수 있는 유기 혼합 이온-전자 수송체(OMIEC)의 확보가 필수적이다. 특히 n형 OMIEC는 p형 소재에 비해 성능과 안정성 측면에서 고질적인 한계가 보고되어 왔으며, 이에 따라 분자 구조 설계를 통한 성능 향상이 핵심 연구 과제로 부상하였다. 대표적인 n형 사다리형 공액 고분자인 BBL은 평면적 골격 구조로 인해 기록적인 혼합 이온-전자 수송 특성을 보이지만, 전자 구조 조절의 제약으로 소자 성능 최적화에는 한계가 남아 있었다.

이러한 배경에서 최근 미국 워싱턴 대학교 (University of Washington)의 Samson A. Jenekhe 교수 연구팀은 BBL 골격에 시안기(cyano)를 도입한 n형 사다리형 공액 고분자 공중합체 (BBL-x2CN)

계열을 설계·합성하고, 구조-물성-소자 성능 간의 상관관계를 체계적으로 규명하였다. 구체적으로 시안화(cyanation)와 랜덤 공중합 전략을 결합함으로써 BBL 고유의 평면적 사다리형 골격은 유지하면서도, 공중합 조성에 따라 LUMO/HOMO 에너지 준위를 효과적으로 조절할 수 있음을 확인하였다.

더 나아가 유기 전기화학 트랜지스터(OECT) 평가에서 시안기 함량이 20 mol%인 BBL-202CN은 약 3 mS의 높은 트랜스컨덕턴스와 함께 혼합 수송 지표인 μC^* (= 전자 이동도 $\mu \times$ 체적 정전용량 C^*)가 2.8 $\text{FV}^{-1}\text{cm}^{-1}\text{s}^{-1}$ 에 달했으며, 빠른 응답 특성 ($\tau_{on}/\tau_{off} = 40/12$ ms)도 나타났다. 미세구조 분석에 따르면, 이러한 성능 향상은 결정성 증가와 구조적 무질서 억제가 결합되면서 전하의 비국소화(delocalized) 길이가 확장된 결과로 해석된다.

결론적으로 본 연구는 n형 사다리형 공액 고분자의 정밀한 분자 설계를 통해 고성능 OMIEC 구현 가능성을 제시하였으며, 차세대 유기 전자소자 및 에너지·바이오 융합 소자 개발을 위한 중요한 설계 지침이 될 것으로 기대된다.

본 연구결과는 *Advanced Functional Materials*에 "Mixed Ionic-Electronic Transport in A Series of New Cyano-Functionalized N-Type Conjugated Ladder Copolymers"의 제목으로 2026년 1월에 게재되었다. (DOI: 10.1002/adfm.202510945).

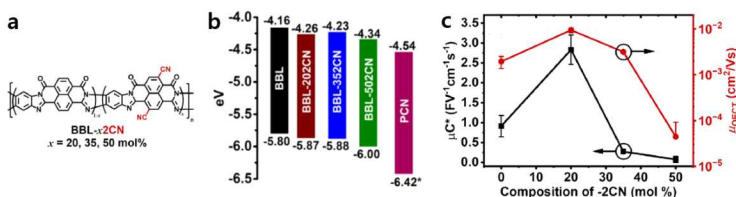


그림 1. (a) BBL-x2CN의 화학구조. (b) 치환기의 조성에 따른 에너지 준위변화. (c) 치환기 조성에 따른 μC^* 과 전하이동도(charge carrier mobility, μ_{OECT}).