

산학연 연구실 소개

고려대학교 유기광전자소재 연구실

(Organic Optoelectronic Materials Laboratory (OOML), Korea University)

주소: 서울특별시 성북구 안암로 145 고려대학교 아산이학관 242호, 247호(우: 02841)

전화: 02-3290-3125 / Fax: 02-3290-3121

E-mail: hywoo@korea.ac.kr / Homepage: <http://www.ooml.korea.ac.kr>

연구책임자 | 우한영 교수

고려대학교 화학과

1. 연구실 소개

전도성 고분자(conducting polymer)는 단일결합과 이중결합이 반복되는 공액 구조를 따라 π -전자가 비교적 자유롭게 이동할 수 있는 공액 고분자(conjugated polymer) 구조에 기반하고 있다. 실리콘과 같은 무기 반도체에 비해 전도성 고분자 등 유기분자를 이용한 유기전자소자는 가볍고 상온 용액 공정을 이용한 쉬운 제조 공정과 그에 따른 낮은 생산 가격, 기계적 유연성을 바탕으로 플라스틱과 같은 flexible 기판을 사용한 유연소자, 더 나아가 착용 가능한(wearable) 전자소자의 적용 가능성 등 다양한 장점을 가진다. 또한 분자 디자인 변경을 통해 쉽게 전자 구조, 에너지 띠 간격(band gap), 광학적 특성 등 물리 화학적, 전기적 특성을 손쉽게 제어할 수 있어 최근 유기 태양전지(organic photovoltaics, OPVs), 유기발광다이오드(organic light emitting diode, OLED) 등 다양한 유기전자소자의 광활성층뿐만 아니라 형광 혹은 전기화학적 검출 메커니즘을 바탕으로 화학/바이오센서 등의 센서 플랫폼으로도 활발히 연구되고 있다(그림 1).

본 연구실에서는 유기광전자소재로 이용될 수 있는 여러 종류의 공액 분자(혹은 공액 고분자)를 디자인, 합성하고 이들 구조를 유기태양전지와 같은 광전자소자에 적용하는 연구를 진행하고 있다. 또한 공액 고분자의 알킬 체인 말단에 이온 그룹을 도입함으로써 공액 고분자전해질(conjugated polyelectrolyte; CPE)을 합성하여 유기전자소자의 전하 전달 특성 제어를 위한 interlayer로 적용하거나 수용액 내에서 생체 물질을 검출할 수 있는 바이오/화학센서 메커니즘 개발과 바이오 이미징 응용 연구를 수행하고 있다.

Same conjugation and electronic structures

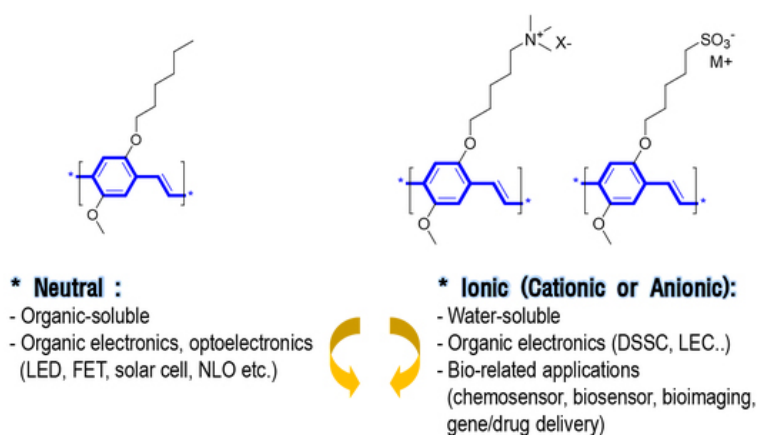


그림 1. 소수성 및 친수성 특성을 가지는 공액 유기분자의 응용.

2. 주요 연구 분야

2.1 유기태양전지 적용을 위한 공액 유기분자의 디자인 및 합성

인구 증가와 산업발전에 따라 인류의 에너지 소비량이 급증하면서 화석연료의 고갈 문제가 야기되었고 환경오염 등의 문제와 결부되면서 대체 에너지로서 환경친화적인 신재생 에너지 개발의 중요성이 강조되고 있다. 특히 유기태양전지는 가볍고 휘어지는 소자 제작 및 용액 공정이 가능하여 가격과 공정 면에서 매우 큰 장점을 지니고 있으므로 플렉시블 디스플레이 및 차세대 에너지원으로 많은 관심을 받고 있다. 전자주개 물질과 전자받개 물질로 이루어진 광활성층이 태양광을 흡수하면 전자-정공 쌍(엑시톤)이 형성되며 전자주개/전자받개 간 접합부로 확산된다. 접합부에 도달한 엑시톤은 각각 전자와 정공으로 분리되고 음극 및 양극으로 이동하여 전극에서 추출됨으로써 최종적으로 전기 에너지로 변환된다. 최근 전 세계적으로 유기태양전지 상용화를 위하여 광전 효율 및 안정성을 높이기 위한 연구들이 활발히 진행되고 있으며 특히 우수한 특성을 가지는 광활성층의 개발은 유기태양전지 개발을 위한 핵심 기술로 다양한 유기분자들이 디자인 합성되고 있다.

2.1.1 풀러렌(Fullerene) 기반 유기태양전지 적용 연구

유기태양전지의 우수한 광전변환효율을 얻기 위해 광활성층의 광학적, 전기화학적, 전기적 특성 및 모폴로지를 미세하게 제어해야 한다. 본 연구실에서는 분자 내 비공유 결합상호작용을 도입한 결정성 고분자를 합성하였고 높은 전하 이동도와 9% 이상의 세계 최고 수준의 에너지변환효율을 보이는 유기태양전지 시스템을 보고하였다

(그림 2). 또한 200도의 온도에 130시간 동안 노출된 후에도 광전변환효율이 유지되는 등 높은 열 안정성을 확인하였으며 300 nm의 박막에서도 9.39%의 광전 효율을 보임으로써 유기 태양전지의 상용화의 가능성을 제시하였다.

2.1.2 비풀러렌(Non-Fullerene) 기반 유기태양전지 적용 연구

전자받개로 널리 연구되어 온 풀러렌 기반 유기 분자는 전자 이동도가 높다는 장점이 있지만 가시광선 영역에서 낮은 흡광도, 정제 및 합성의 어려움, 응집에 의한 모폴로지 변형 등 여러가지 한계점을 가지므로 최근 풀러렌 구조를 대체할 수 있는 새로운 전자받개 개발에 대한 연구가 활발히 진행되고 있다. 본 연구실에서는 선행 연구된 고분자(PPDT2FBT)과 서로 다른 분자량을 가지는 Naphthalene diimide (NDI) 기반 전자받개 고분자 P(NDI2OD-T2)를 블랜드함으로써 분자량에 따른 all-polymer solar cell 광활성층 필름의 모폴로지 연구를 진행하였다. 고분자량의 전자주개를 사용한 필름의 경우 전자주개의 자기정렬 특성이 감소하였고 전자받개와 쉽게 혼합됨으로써 전자주개-전자받개의 상분리를 제어할 수 있었으며 5.03%의 광전 효율을 보고하였다.

또한 전자받개로 고분자가 아닌 단분자를 이용하기 위해 NIDCS-HO 라는 단분자 전자받개 구조를 사용하여 앞서 연구한 PPDT2FBT와 블랜드하여 비풀러렌 태양전지 적용 연구를 진행하였다. 활성층은 상보적인 흡수 스펙트럼을 가지며 필름의 열처리 온도에 따라서 각 전자받개 또는 전자주개의 결정도와 모폴로지를 조절할 수 있었다(그림 3). 90도 열처리 시 최적의 필름 모폴로지를 형성하였으며 7.64%의 우수한 광전변환효율을 보고하였다.

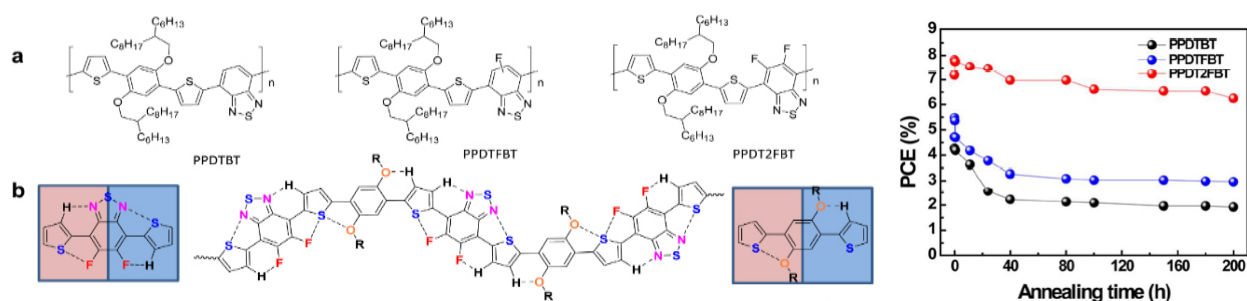


그림 2. 분자 내 비공유 결합 상호작용을 도입을 통한 분자 결정성 및 소자 안정성 향상.

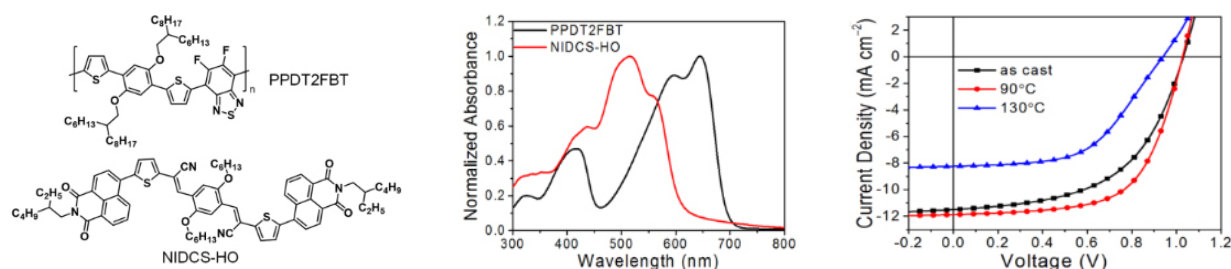


그림 3. 단분자 전자받개를 사용한 non-fullerene 유기태양전지 광활성층 광전 특성.

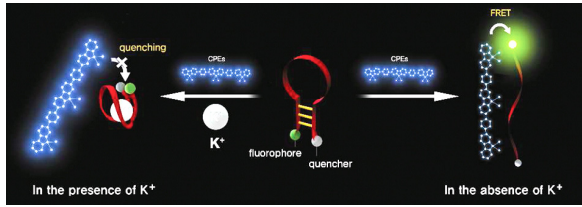


그림 4. 공액 고분자전해질/분자비컨압타머 기반의 포타슘 이온 검출 메커니즘.

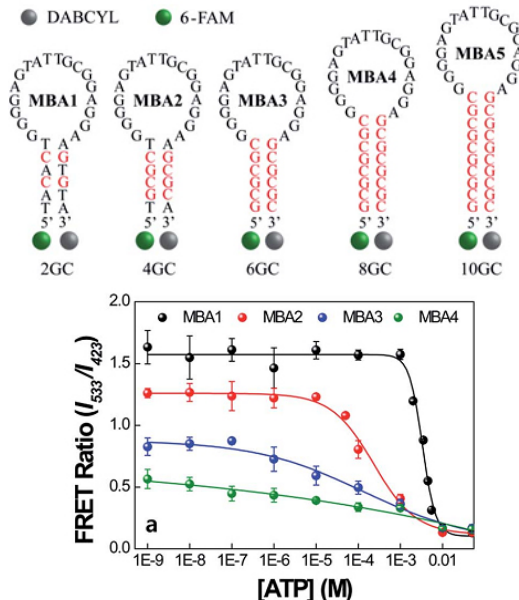


그림 5. 분자비컨압타머의 stem 안정성 조절을 통한 센서 시스템의 검출 특성 제어.

2.2 수용성 공액 유기분자를 이용한 화학/바이오 센서 검출 메커니즘 및 이미징 연구

실시간으로 생체 내 존재하는 단백질이나 효소, 금속이온 및 특정 질병을 유발하는 DNA 염기 서열을 검출하는 기술은 병 진단이나 유전자 변형 진단뿐만 아니라 학문적으로도 해결해야 할 중요한 과제가 되고 있다. 특히 공액 고분자전해질 기반의 형광센서는 여러 광학적 활성단위로부터 형성된 다수의 여기자가 주사슬을 통해 이동, 집적되는 공액 고분자의 분자선 효과를 기대할 수 있으므로 향상된 형광 신호 및 민감도를 가진다. 물에 대한 용해도 및 바이오 물질과의 친화력 향상을 위해 공액 고분자 사슬의 말단에 이온 그룹 또는 친수성 그룹을 도입하여 공액 고분자전해질을 합성함으로써 단백질, 생체 이온 등과 같은 생체 물질 검출뿐만 아니라 세포 내 이미징, 약물전달 및 유전자 전달에 대한 광학적 플랫폼으로 활용될 수 있다.

2.2.1 공액 고분자전해질/압타머 기반의 형광 센서

공액 고분자전해질을 형광공명에너지전달(fluorescence resonance energy transfer, FRET) 현상 기반의 형광 검출

센서의 광학적 플랫폼으로 사용함으로써 신호 증대 효과를 통한 우수한 민감도 및 높은 신호 대비 잡음 비(signal-to-noise ratio)를 확보할 수 있다. 표적 물질에 특이적으로 결합하여 G-quadruplex와 같은 2차 구조를 형성할 수 있는 염기 서열인 압타머(aptamer)는 분자 구조 내 인산기로 인해 음전하를 띠므로 양이온성 공액 고분자전해질과 정전기 착체를 형성하여 공액 고분자전해질 기반 형광 센서 시스템에 우수한 선택도를 부여한다. 본 연구실에서는 양 말단에 형광체가 레이블된 압타머 또는 형광체 및 형광억제제를 레이블한 분자비컨압타머(molecular beacon aptamer, MBA)를 이용하여 형광 발현의 억제 및 FRET에 의한 형광 증폭을 유도함으로써 우수한 검출 특성으로 표적 물질을 검출할 수 있는 기작을 개발하였다(그림 4).

표적 물질이 존재하지 않을 경우 압타머 기반 검출 프로브는 양이온성 공액 고분자전해질과 결합하여 헤어핀 → 선형 구조로 구조 변화가 일어나며 고분자에서 형광체로 FRET 현상을 유도, 안테나 효과에 의해 형광체의 형광 신호가 증폭된다. 하지만 표적 물질이 존재할 경우 압타머가 표적 물질과 안정한 G-quadruplex 구조를 형성하며 공액 고분자전해질을 첨가하여도 구조 변화가 일어나지 않은 상태로 검출 프로브/표적물질 복합체의 구조를 형성하게 된다. 검출 프로브 양 말단의 형광체/형광억제제 또는 형광체/형광체 간 거리가 감소하므로 검출 프로브 말단에 레이블된 분자에 따라 공액 고분자전해질이 여기된 후 형광체를 통해 형광억제제로 에너지가 전달되는 형광 억제 또는 두 형광체 간 2-단계 FRET을 통해 우수한 민감도와 선택도로 표적 물질을 검출할 수 있다. 또한 검출 시스템 내 압타머 기반 검출 프로브의 안정성 또는 공액 고분자전해질의 농도를 조절함으로써 검출 한계 및 검출 범위와 같은 센서 시스템의 검출 특성을 미세하게 제어할 수 있음을 확인하였다(그림 5). 본 감지기작은 G-quadruplex 형성이 가능한 다양한 금속 이온 및 바이오 물질 검출에 확대 적용이 가능하다.

2.2.2 수용성 공액 유기분자를 이용한 바이오이미징

살아있는 세포를 가시적으로 관측하거나 질병의 표시인자를 검출, 모니터링하는 기술은 세포 내 질병 발생에 대해 분자 수준에서의 유발 및 발전과정을 이해하기에 적합하나 검출 프로브의 안정성 및 세포 유입, 광원에 의한 세포 손상, 수용액 내에서의 낮은 형광 효율 등 해결해야 할 문제점들을 가지고 있다. 본 연구실에서는 음이온성 블록 공중합체(E_m-A_n)와 양이온성 계면활성제(C_{16}) 및 공액 분자전해질($C1$)을 이용하여 자기 조립에 의한 수용성 나노 구조체($C1/E_m-A_n/C_{16}$)를 형성하고 이광자 형광 분광법(two-photon fluorescence microscopy, TPM)을 활용하여 세포 이미징 연구를 수행하였다. 형성된 나노 구조체는 세포질 내에서 밝은 형광 신호

를 보였으며 낮은 pH에서 나노 구조체가 분해되는 현상을 이용하여 기존의 세포보다 낮은 pH를 보이는 암세포 등에 대한 약물 전달체로서의 응용 가능성을 제시하였다. 또한 근적외선(near infrared) 영역의 형광 특성을 가지는 공액 분자전해질을 도입함으로써 우수한 *in vivo* 형광 이미징 프로브로 활용될 수 있음을 보고하였다.

3. 본 연구실의 현황

고려대학교 유기광전자소재 연구실은 2006년부터 우한영 교수의 지도하에 공액 유기분자를 이용한 유기태양전지, 유기발광다이오드 등 유기광전자소재 및 소자 응용 연구와 공액 고분자/단분자 전해질을 이용한 형광센서, 바이오 이미징 분야에 대한 연구를 진행하고 있다. *Journal of the American Chemical Society*, *Energy & Environmental Science*, *Advanced Materials* 등 세계 최고 권위의 학술지를 포함하여 100여편의 SCI급 논문과 다수의 국내/외 특허를 출원, 등록하였다.

4. 참고문헌(연구실 대표 논문)

1. Y. Li, S.-J. Ko, S. Y. Park, H. Choi, T. L. Nguyen, M. A. Uddin, T. Kim, S. Hwang, J. Y. Kim, and H. Y. Woo, *J. Mater. Chem. A*, **4**, 9967 (2016).
2. H. Yao, R. Yu, T. J. Shin, H. Zhang, S. Zhang, B. Jang, M. A. Uddin, H. Y. Woo, and J. Hou, *Adv. Energy Mater.*, 1600742 (2016).
3. S.-J. Woo, S. Park, J.-E. Jeong, Y. Hong, M. Ku, B. Y. Kim, I. H. Jang, S. C. Heo, T. Wang, K. H. Kim, J. Yang, J. H. Kim, and H. Y. Woo, *ACS Appl. Mater. Interfaces*, **8**, 15937 (2016).
4. S.-J. Ko, B. Walker, T. L. Nguyen, H. Choi, J. Seifter, M. A. Uddin, T. Kim, S. Kim, J. Heo, G.-H. Kim, S. Cho, A. J. Heeger, H. Y. Woo, and J. Y. Kim, *Adv. Funct. Mater.*, **26**, 3324 (2016).
5. O. K. Kwon, M. A. Uddin, J.-H. Park, S. K. Park, T. L. Nguyen, H. Y. Woo, and S. Y. Park, *Adv. Mater.*, **28**, 910 (2016).
6. D. G. Bae, J.-E. Jeong, S. H. Kang, M. Byun, D.-W. Han, Z. Lin, H. Y. Woo, and S. W. Hong, *Small*, ASAP (2016).
7. T. H. Lee, M. A. Uddin, C. Zhong, S.-J. Ko, B. Walker, T. Kim, Y. J. Yoon, S. Y. Park, A. J. Heeger, H. Y. Woo, and J. Y. Kim, *Adv. Energy Mater.*, ASAP (2016).
8. M. A. Uddin, T. H. Lee, S. Xu, S. Y. Park, T. Kim, S. Song, T. L. Nguyen, S.-J. Ko, S. Hwang, J. Y. Kim, and H. Y. Woo, *Chem. Mater.*, **27**, 5997 (2015).



〈연구실 구성원〉

9. J. K. Gallaher, S. K. K. Prasad, M. A. Uddin, T. Kim, J. Y. Kim, H. Y. Woo, and J. M. Hodgkiss, *Energy Environ. Sci.*, **8**, 2713 (2015).
10. H. Kang, M. A. Uddin, C. Lee, K.-H. Kim, T. L. Nguyen, W. Lee, Y. Li, C. Wang, H. Y. Woo, and B. J. Kim, *J. Am. Chem. Soc.*, **137**, 2359 (2015).
11. J.-E. Jeong, B. Kim, S. Woo, S. Hwang, G. C. Bazan, and H. Y. Woo, *Chem. Sci.*, **6**, 1887 (2015).
12. S.-J. Ko, W. Lee, H. Choi, B. Walker, S. Yum, S. Kim, T. J. Shin, H. Y. Woo, and J. Y. Kim, *Adv. Energy Mater.*, **5**, 1401687 (2015).
13. T. L. Nguyen, H. Choi, S.-J. Ko, M. A. Uddin, B. Walker, S. Yum, J.-E. Jeong, M. H. Yun, T. J. Shin, S. Hwang, J. Y. Kim, and H. Y. Woo, *Energy Environ. Sci.*, **7**, 3040 (2014).
14. S. Yum, T. An, X. Wang, W. Lee, M. A. Uddin, Y. J. Kim, T. L. Nguyen, S. Xu, S. Hwang, C. Park, and H. Y. Woo, *Chem. Mater.*, **26**, 2147 (2014).
15. B. L. Nguyen, J.-E. Jeong, I. H. Jung, B. Kim, V. S. Le, I. Kim, K. Kyhm, and H. Y. Woo, *Adv. Funct. Mater.*, **24**, 1748 (2014).
16. W. Lee, G.-H. Kim, S.-J. Ko, S. Yum, S. Hwang, S. Cho, Y.-H. Shin, J. Y. Kim, and H. Y. Woo, *Macromolecules*, **47**, 1604 (2014).
17. B. H. Lee, I. H. Jung, H. Y. Woo, H.-K. Shim, G. Kim, and K. Lee, *Adv. Funct. Mater.*, **24**, 1100 (2014).
18. S.-J. Ko, H. Choi, W. Lee, T. Kim, B. R. Lee, J. W. Jung, J.-R. Jeong, M. H. Song, J. C. Lee, H. Y. Woo, and J. Y. Kim, *Energy Environ. Sci.*, **6**, 1949 (2013).
19. B. Kim, I. H. Jung, M. Kang, H.-K. Shim, and H. Y. Woo, *J. Am. Chem. Soc.*, **134**, 3133 (2012).
20. H. Choi, J. S. Park, E. Jeong, G.-H. Kim, B. Lee, S. O. Kim, M. H. Song, H. Y. Woo, and J. Y. Kim, *Adv. Mater.*, **23**, 2759 (2011).