

유기 태양전지 효율 향상을 위한 신규 고분자 재료의 구조 설계 및 개발 동향

강태의, 김태수, 김범준(한국과학기술원/생명화학공학과)

1. 서 론

최근 몇 년 사이에 급속하게 성장하던 스마트 산업이 점차 포화되면서 기업들은 웨어러블 디바이스 산업을 이슈화시키고 새로운 시장의 주도권을 잡기 위해 경쟁에 돌입하였다. 구글의 스마트 안경과 삼성의 스마트 워치 등 다양한 종류의 웨어러블 디바이스가 개발되었으며 2015년 초 미국 라스베이거스에서 열린 가전박람회 CES 2015에서는 목걸이와 보석 등 색다른 형태의 웨어러블 디바이스도 전시되었다. 이러한 웨어러블 디바이스 시장의 도래에 발맞춰 관련 기술들 역시 새롭게 발전하고 각광받기 시작했다. 사람의 몸에 착용된 상태로 작동해야 하는 웨어러블 디바이스의 특성상, 기기를 구성하는 소자들은 가볍고 유연해야 한다. 하지만 기존 전자 기기에 사용되고 있는 전지는 이러한 조건을 충족시키기에는 무리가 있기 때문에 기존 전지를 대체할 수 있는 새로운 대안이 필요한 상황이다. 유기 태양전지는 저렴하고 쉬운 제작 공정과 더불어서 가볍고 신축성이 높다는 장점을 지니고 있어 웨어러블 디바이스의 성공을 이루어낼 수 있는 핵심 아이템 중 하나라고 할 수 있다.

유기 태양전지는 공액 유기화합물(conjugated organic compound)을 활용하여 태양에서 나온 가시광대 영역의 빛을 흡수한 후 전기로 바꿔주는 장치이다. 이웃하는

탄소 간에 이중 결합과 단일 결합이 번갈아 존재하는 구조로 이루어진 공액 유기화합물은 전기적 특성을 띄며, HOMO(highest occupied molecular orbital) 준위와 LUMO(lowest unoccupied molecular orbital) 준위 사이의 에너지 차이가 대체적으로 1.5-3eV 이기 때문에 가시광대 영역의 빛을 흡수할 수 있게 된다. 이러한 공액 유기화합물은 전자 주개(electron donor)의 역할을 수행하며 전자 친화도가 높은 전자 받개(electron acceptor)형 유기반도체와의 이종접합(heterojunction)을 통하여 태양전지로 활용된다. 빛을 통해 형성된 엑시톤(exciton)은 공액 유기화합물에 존재하는 파이 겹침(π - π stacking)에 의해 전자주개 도메인(domain) 내를 돌아다니다 전자 주개와 전자 받개 계면에 도달하게 되고 이러한 계면에서 전자(electron)와 정공(hole)으로 분리되어 전류가 흐르게 되는 것이다. 전자 주개와 전자 받개로 이루어진 박막을 광활성층(active layer)이라 하며, 대표적인 전자 주개는 전도성 고분자(conjugated polymer)가 있으며 전자 받개로는 주로 [6,6]-phenyl-C₆₁-butyric acid methyl ester(PCBM)이 쓰인다. 유기 태양전지 분야의 단점은 유기태양전지를 상용화하기에는 효율이 상대적으로 낮다는 것이며 따라서 효율을 높이기 위해 지난 20년간 활발히 연구가 진행되었다. 작은 밴드갭을 갖는 전자 주개형 고분자(low-bandgap polymer)의 개발과 PCBM의 구조 변화를 통하여 효율

증가를 발표한 사례가 대표적이며 또한 전자주개와 전자 받개 사이의 몰포로지와 계면 조절을 통하여 효율 및 안정성을 높이는 연구도 진행되었다. 이와 같이 원리적인 접근과 더불어 소자 아키텍처(device architecture)를 변화시켜 효율을 올리거나 금속나노입자를 유기 태양전지에 첨가하여 플라즈몬 효과(plasmonic effect)를 통하여 효율을 극대화하는 기술적인 접근도 연구되었다. 하지만 결과적으로 최근 구현된 상당히 높은 효율(9-10%)은 주로 새로운 전자 주개형 전도성 고분자의 개발을 통하여 달성되었다.

따라서 본 기고에서는 고효율 유기 태양전지를 위하여 그 동안 개발된 신규 전자 주개 유기 재료 중 대표적인 전도성 고분자를 소개하려 한다. 먼저 2장에서는 유기 태양전지의 전자 주개로 사용하기 위해 요구되는 특성을 소개하고 3장에서는 구조에 따라 전자 주개 고분자의 종류를 구분하여 소개하려 한다. 마지막으로 4장에서 결론을 맺으려 한다.

2. 유기 태양전지용 전자 주개 요구 특성

유기태양전지를 이루는 구성요소인 광활성층은 약 100nm 정도의 두께를 가지며, 전자 주개와 전자 받개의 이중층 구조(bilayer) 혹은 이종접합(heterojunction, BHJ) 구조로 되어있다. 일반적으로 전자 주개로는 전도성 고분자가 사용되며 전자 받개는 fullerene 계열의 PCBM이 주로 연구에 사용되어 왔다. 지금까지 전자 주개 및 받개의 신소재 개발을 통해 유기 태양전지의 효율을 높이기 위한 연구가 활발히 진행되어 왔으며, 그 중에서도 전자 주개로 주로 사용되는 전도성 고분자 개발을 통한 고효율 확보에 집중되어 왔다.

유기 태양전지 효율을 결정하는 요인 중 하나인 단락 전류(short-circuit current, J_{sc})는 전도성 고분자가 태양으로부터 들어오는 광자(photon)를 얼마나 많이 흡수하는지와 밀접한 관련이 있다. 즉, 태양 스펙트럼에서 최대 광자 밀도가 대략 700nm(밴드갭으로 보면 약 1.77eV)에 위치하고 있기 때문에 유기 태양전지의 효율향상을 위해서는 밴드갭이 낮으면서도 동시에 폭넓은 흡수 스펙트럼(absorption window)을 갖는 전도성 고분자의 합성이 필수적이다. 고분자가 위와 같은 흡수 스펙트럼을 갖는다면 단파장에서부터 장파장까지의 광자를 폭넓게 흡수할 수 있게 된다. 또한 전도성 고분자의 중요한 특성 중 하나인 HOMO와 LUMO의 에너지 준위는 HOMO와 LUMO의 에너지 준위차이에 의해 결정되는 밴드 갭뿐만 아니라 유기 태양전지의 엑시톤 분리 및 유기 태양전지 효율을 결정하는 요소 중 하나인 개방전압(open-circuit voltage, V_{oc}) 등과 밀접한 관계가 있다. 전도성 고분자에서 광자 흡수를 통해 형성된 엑시톤이 전자 주개와 받개 사이의 계면에서 자유 전자와 정공으로 분리되기 위해서는 전자 주개의 LUMO와 전자 받개의 LUMO의 에너지 준위 차이가 적어도 0.3eV 정도는 커야한다.[그림 1] 또한, 개방전압 역시 전도성 고분자의 HOMO와 전자 받개의 LUMO 에너지 준위 차이가 클수록 높아지는 경향을 보인다. 즉, 전도성 고분자는 밴드갭을 낮춰 태양광의 흡수 증가에 따른 단락전류를 향상시키는 것과 동시에 HOMO 에너지 준위를 낮춤으로서 높은 개방전압을 얻도록 설계되어야 한다. 또한, 유기 태양전지 활성층의 몰포로지(morphology)는 형성된 엑시톤의 이동거리가 5-10nm 정도에 불과하기 때문에 엑시톤이 효과적으로 분리되기 위해서 전자 받개와 주개 사이의 계면이 많이 형성될 수 있도록 10-20nm 이내로 적절한 상분리(phase separation)가 일어나는 것이 중요하다. 또한, 엑시톤에서 분리된 자유 전자와 정공이 효율적으로 각각의 전극으로 이동하기 위해서는 높은 전하이동도를 가지는 것도 중요하다. 즉 전자 주개의 전하이동도(hole mobility), 용해도(solubility), 전자 받개와의 혼화성(miscibility), 이에 따른 활성층의 몰포로지 형성 역시 고분자의 광학적, 전기적 특성과 더불어 유기 태양전지에서 매우 중요한 요소이다.

그림 1. 일반적인 유기 태양전지 구조 및 활성층을 구성하는 전자 주개(P3HT)와 전자 받개(PCBM)의 에너지 준위

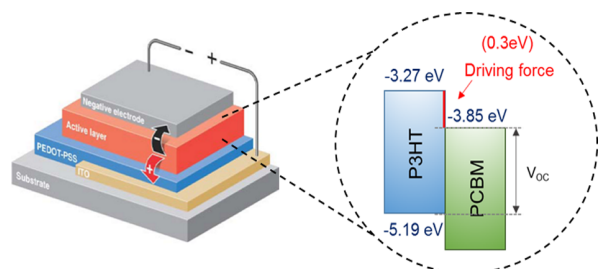


그림 1. 일반적인 유기 태양전지 구조 및 활성층을 구성하는 전자 주개(P3HT)와 전자 받개(PCBM)의 에너지 준위

3. 유기 태양전지용 고분자 개발 동향

전자 주개로 사용되는 전도성 고분자는 반복 단위 (repeating unit)의 구조에 따라 크게 (1) homopolymer, (2) donor-acceptor(D-A) alternating copolymer, (3) terpolymer 등으로 나눌 수 있다.[그림 2]

3.1. Homopolymer

초창기 유기 태양전지 연구에서 가장 많이 사용되었던 전자 주개 전도성 고분자들은 대부분 반복 단위 (repeating unit)이 single aromatic unit 또는 fused aromatics로 구성되어 있는 homopolymer구조로써 대표적으로는 PPV 계열의 poly(2-methoxy-5-((2'-ethylhexyl)oxy)-1,4-phenylenevinylene)(MEH-PPV),

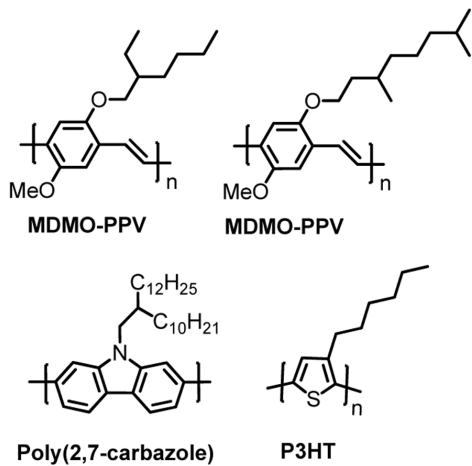


그림 2. 대표적인 homopolymer 구조

poly(2-methoxy-5-((3', 7' -dimethyloctyl)oxy)-1,4-phenylenevinylene)(MDMO-PPV)와 poly(2,7-carbazole), 그리고 poly(3-hexylthiophene)(P3HT)을 들 수 있다.[그림 3]

단일 반복 단위, 그리고 그 사이의 입체 장애(steric hindrance) 등으로 인해, 대부분의 homopolymer는 1.9eV 이상의 큰 밴드갭을 가지며 일부 homopolymer는 유기 용매에 대한 용해도가 떨어지는 경우도 있다. 지금까지 보고된 homopolymer 중에서는 P3HT가 P3HT:PC₆₁BM 또는 P3HT:PC₇₁BM을 기반으로 한 유기 태양전지는 평균 3~5%대의 가장 높은 광전변환효율 (power conversion efficiency, PCE)을 보이고 있다. 하지만 P3HT의 높은 전하 이동도의 장점에도 불구하고, 큰 밴드갭(~1.9eV)으로 인해 흡수할 수 있는 광자의 양이 제한적이며, 높은 HOMO 에너지 준위로 인해 전자 받개의 LUMO 에너지 준위와의 차이를 감소시켜 낮은 개방전압을 갖게 되어 P3HT를 이용해서는 유기 태양전지의 효율을 추가로 향상시키는데 한계가 있다.

3.2. D-A alternating copolymer

Homopolymer의 단점인 큰 밴드갭을 효과적으로 작게하면서 HOMO/LUMO 에너지 준위를 쉽게 조절할 수 있는 D-A alternating approach가 개발되었으며 이로 인해 작은 밴드갭을 가지는 전도성 고분자를 확보할 수 있다. 이런 D-A alternating copolymer 구조는 electron-rich(D) unit과 electron-deficient(A) unit이 교대로 고분자의 backbone에 도입되는 것으로, 이

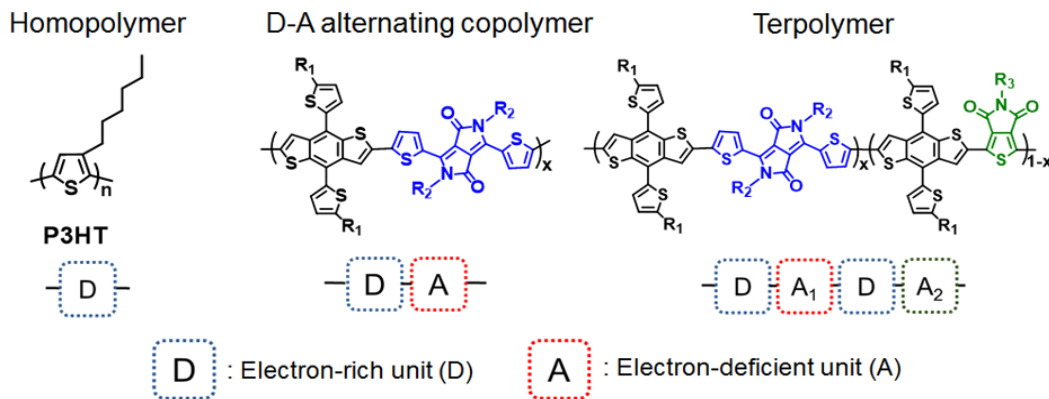


그림 3. Homopolymer, D-A alternating copolymer, terpolymer의 구조

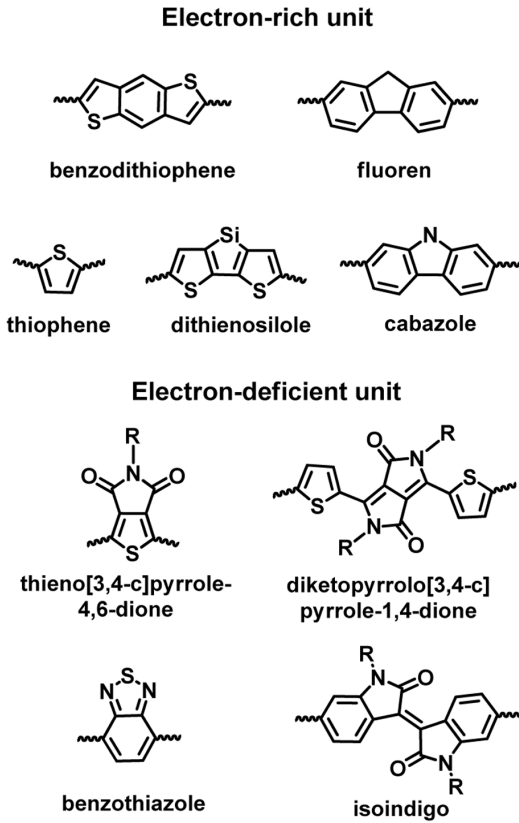


그림 4. 대표적인 electron-rich 및 electron-deficient units의 구조

방법으로는 하나의 backbone안에 존재하는 D와 A의 에너지 준위 사이의 intramolecular charge transfer (ICT)에 의해 밴드갭을 줄임과 동시에 다양한 D와 A의 조합을 통해 HOMO/LUMO 에너지 준위를 세밀하게 조절 할 수 있는 장점이 있다. 대표적인 electron-rich unit으로는 benzodithiophene, fluorene, thiophene, dithienosilole, carbazole 등이 있으며, electron-deficient unit으로는 thieno[3,4-c]pyrrole-4,6-dione, diketopyrrolo[3,4-c]pyrrole-1,4-dione, isoindigo, benzothiazole 등이 있다.[그림 4]

동시에 높은 단락전류와 개방전압을 얻기 위해서는 그림 5처럼 낮은 HOMO 에너지 준위를 가지면서 작은 밴드갭을 가지는 전도성 고분자가 필요하며, 이런 에너지 레벨을 형성하는데에는 상대적으로 약한 세기의 electron-rich unit과 강한 세기의 electron-rich unit의 조합이 적당하다고 알려져 왔고 이러한 구조로 높은 효율을 얻는 고분자가 보고되기도 했다. 하지만 유기 태

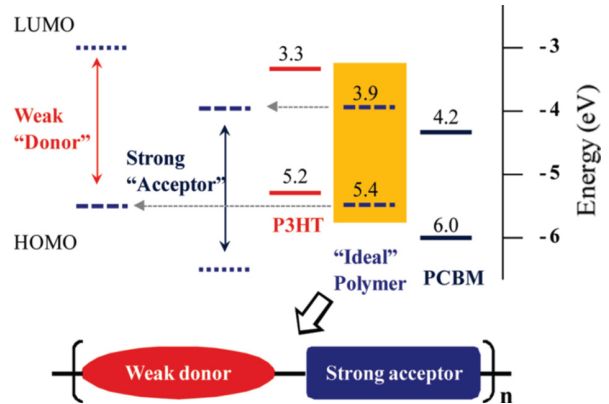


그림 5. 이상적인 에너지 준위를 가지는 weak-donor와 strong-acceptor 조합[10]

양전지에 사용되는 전도성 고분자의 경우, 단순히 전기적, 광학적 특성으로만 효율이 결정되는 것이 아니라 고분자의 전하이동도, side chain에 따른 용해도 및 고분자 패키징구조, PCBM과의 몰포로지 등에도 영향을 받게 된다.

D-A alternating copolymer의 평면성(planarity)을 증가시키고, 이에 의해 고분자간의 $\pi-\pi$ interaction을 향상시키는 방법을 통해 전하 이동도를 향상시킬 수 있다. 고분자의 평면성을 향상시키는 방법으로는 주로 backbone을 구성하는 thiophene을 대신해 benzodithiophene과 dithienothiophene처럼 상대적으로 rigid한 구조를 가진 unit을 도입하거나, 이웃(neighboring) unit과 수소결합(hydrogen bonds), 쌍극자-쌍극자 상호작용(dipole-dipole interactions) 등의 비공유결합(noncovalent attractive interaction)이 가능한 구조를 도입하는 방법이 있다. 하지만 고분자 간의 너무 강한 interaction은 오히려 고분자의 용해도를 감소시켜 태양전지 제작 시 최적화된 몰포로지의 형성을 매우 어렵게 한다. 예를 들어, poly(2,7-fluorene-alt-dithienylbenzothiadiazole)(PFDTBT)와 poly(2,7-carbazole-alt-dithienylbenzothiadiazole)(PCDTBT)의 electron-rich한 unit인 fluorene과 carbazole을 대신해 더 rigid한 구조를 가지는 multi-fused heptacyclic structure로 바뀌었으로써 π -orbital interactions을 향상시켜 효과적으로 밴드갭을 줄였을 뿐만 아니라 전하 이동도도 향상시켰다.[그림 6] 하지만 이런 강한 $\pi-\pi$ interaction은 고분자의

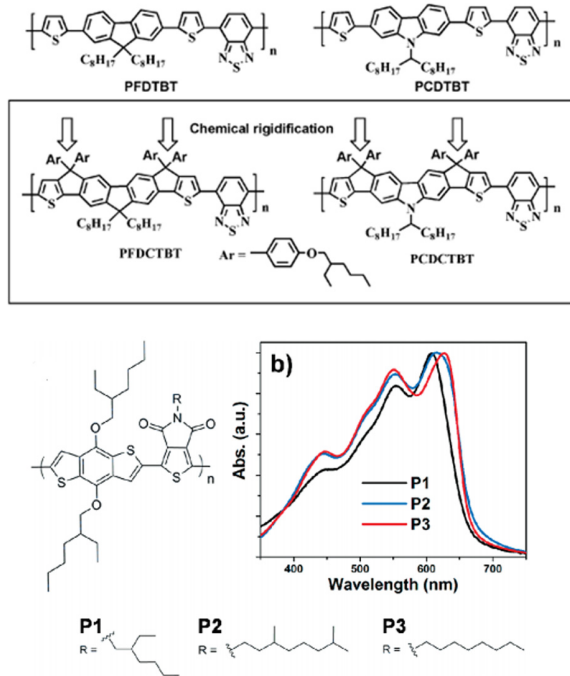


그림 6. D-A alternating copolymer의 backbone의 planarity 및 side chain의 구조가 태양전지 효율에 미치는 영향 [11.12]

용해도를 떨어뜨리기 때문에 이 연구에서는 적절한 side chain의 선택을 통한 용해도 향상과 동시에 고분자 패킹구조를 최적화시켰다.

고분자 설계 시 backbone의 구조도 중요하지만 side chain의 구조도 고분자의 용해도 및 배열 등에 중요한 영향을 미친다. 고분자의 용해도는 큰 분자량의 고분자를 합성하는데 중요한 요소이며 PCBM과의 miscibility, 더 나아가 BHJ morphology에도 영향을 미친다. 이에, 많은 그룹에서 동일한 backbone을 사용하는 전도성 고분자의 side chain을 바꿈으로써 이 구조의 변화가 태양전지에 미치는 영향에 대한 연구도 많이 진행되었다. 연구결과에 따르면, linear한 구조의 side chain을 길고 bulky한 그룹으로 바꾸주면 용해도가 향상되어 높은 분자량을 가지는 고분자를 얻을 수 있지만, 반면에 긴 chain으로 인해 박막(film) 안에서 고분자 간의 $\pi-\pi$ interaction을 감소시켜, 고분자의 배열 및 전하 이동도에 좋지 않은 영향을 미치게 되기도 한다. 즉, 동일한 backbone을 가진 고분자라도 side chain의 구조에 따라 유기 태양전지의 효율에 많은 영향을 주기 때문에 side chain을 최적화 하는 연구는 필수적이며 매우

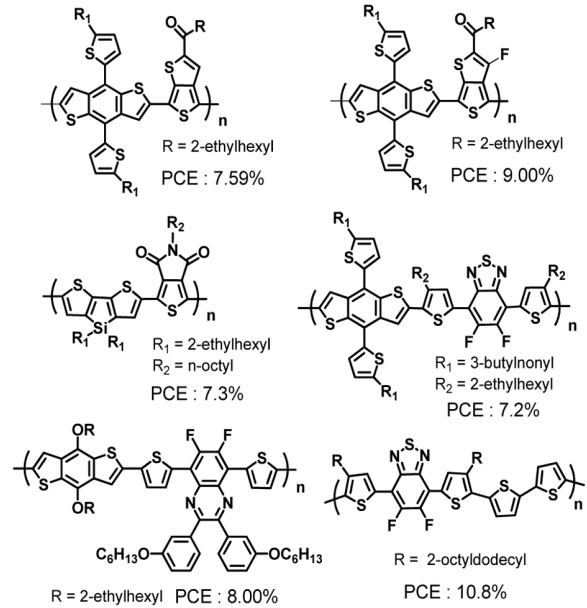


그림 7 높은 효율을 보이는 D-A alternating copolymer 구조 [14-19]

중요하다. 그 예로, benzodithiophene과 thieno [3,4-c]pyrrole-4,6-dione 기반의 PBDTTTPD 고분자에서 thieno[3,4-c]pyrrole-4,6-dione의 side chain을 branch에서 linear형태로 바꿈으로써 광전변화효율이 3%에서 6%로 증가함을 확인할 수 있었다.[그림 6] Bulky한 chain을 사용하게 되면 고분자의 용해도는 증가하지만 $\pi-\pi$ interaction distance가 길어져 전하 이동에 안 좋은 영향을 미쳐 효율이 감소했음을 확인할 수 있었다. 즉, D-A alternating copolymer를 설계할 경우, 적절한 backbone과 그에 따른 side chain 구조를 사용하여 원하는 고분자의 성질을 얻는 것이 중요하다. 이러한 특성을 고려한 D-A alternating copolymer 구조의 개발을 통해 유기 태양전지에서 ~10%에 이르는 광전변화효율을 얻을 수 있었다.[그림 7]

3.3. Terpolymer

위에서 언급한 것처럼 지금까지 유기 태양전지에 쓰이는 전도성 고분자의 경우 광학적, 전기적 특성 조절 등을 위하여 donor-acceptor alternating copolymer 구조를 기반으로 한 많은 고분자가 개발되었다. 하지만 이러한 D-A 구조의 고분자 개발로는 유기 태양전지에 최적화된 성질을 가지는 고분자 구현에 한계가 있어 최

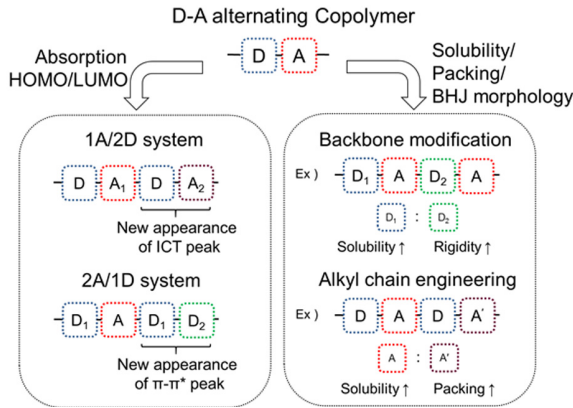


그림 8. Terpolymer approach를 이용한 새로운 전도성 고분자 설계[20]

근에는 3개의 서로 다른 unit을 사용하는 terpolymer approach에 대한 연구가 활발히 진행되고 있다. 즉, terpolymer approach에서는 고분자 하나의 backbone에 두개의 다른 electron-rich unit과 하나의 electron-deficient unit(2D/1A)이 포함되어 있거나 반대로 한 개의 electron-rich unit과 두 개의 다른 electron-deficient unit(1D/2A)이 포함되어 있는 구조가 될 수 있다.[그림 8]

이렇듯, 세 번째 그룹의 도입(electron-rich unit 또는 electron-deficient unit)으로 기존 D-A alternating copolymer의 흡수 스펙트럼, 전하 이동도, 용해도 등의 고분자의 특성을 좀 더 최적화할 수 있게 되었다. 이는 세 번째 unit 도입으로 인해 고분자 backbone 안에서 unit 간의 molar ratio 조절을 가능하게 해 원하는 고분자 성질을 좀 더 세밀하게 조절할 수 있기 때문이다. 이러한 terpolymer 구조로 이미 광전효율이 7~8%가 넘는 고분자가 보고됨으로써 기존의 D-A alternating copolymer를 대체할 새로운 고분자 구조로 많은 관심을 받고 있다. 한 예로써, 기존의 D-A alternating copolymer의 경우, ICT에 의해 고분자가 낮은 밴드갭을 가지게 되지만 빛의 흡수폭은 증가하지 않아서 오히려 가시광선 영역 대의 빛의 흡수가 감소해, 이로 인한 단락전류 감소가 문제점으로 자주 보고되고 있다. 하지만 terpolymer approach를 통해 흡수대가 상호 보완적인 세 번째 unit을 고분자에 도입함으로써 낮은 밴드갭을 가지면서 넓은 흡수 파장대를 가지는 terpolymer가 여러 그룹을 통해 보고되고 있다. 그 예

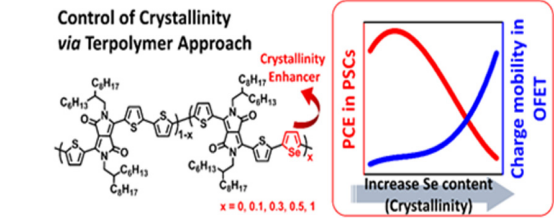
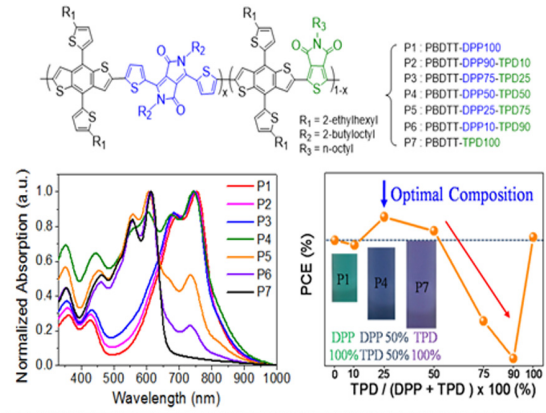


그림 9. Terpolymer approach를 이용한 흡수 스펙트럼 및 결정성/용해도 개선 연구[21-22]

로, 1.4eV의 낮은 밴드갭을 가지는 benzodithiophene (D)과 diketopyrrolo[3,4-c]pyrrole-1,4-dione(A₁)을 기반으로 하는 고분자(PBDTTDPP)의 경우, 상대적으로 400-600nm 대의 빛의 흡수가 현저히 낮은 것을 알 수 있다. 그에 반면, benzodithiophene(D)과 thieno [3,4-c]pyrrole-4,6-dione(A₂) 기반의 PBDTTTPD 고분자는 1.8eV의 밴드갭을 가지며 400-600nm 대의 빛의 흡수가 상대적으로 뛰어난 것을 알 수 있다. 본 연구 그룹에서는, 이 두 개의 다른 고분자의 흡수 측면을 상호 보완하기 위해 기존의 PBDTTDPP 고분자에 thieno [3,4-c]pyrrole-4,6-dione를 세 번째 unit으로 소량씩 첨가함으로써(1D/2A), 가시광선 영역에서의 흡수를 증가시켜, 이로 인해 약 15%의 단락전류의 증가로 전반적인 효율 향상을 가져왔다. 또한, 이 연구를 통해 thieno[3,4-c]pyrrole-4,6-dione(A₂)의 첨가 비율을 조절함으로써 밴드갭 및 HOMO/LUMO 에너지 준위를 좀 더 면밀하게 조절할 수 있음을 알 수 있었다. 하지만, 세 개의 다른 unit이 하나의 고분자 backbone 안에 들어가기 때문에 각 unit의 비율을 조절하는 것이 효율 최적화에 필수적임을 알 수 있다.[그림 9]

또한, 이와 같은 terpolymer approach를 통해 앞서

말했던 전도성 고분자의 상반되는 성질인 고분자의 용해도와 고분자 배열의 최적화가 세 번째 unit의 비율 조절을 통해 가능해졌고 이로 인해 유기 태양전지의 효율이 증가하는 결과를 보였다. 그 예로, 본 연구 그룹에서는 고분자의 결정화도 및 planarity를 미세조절하기 위해 기존의 thiophene(D₁)으로 되어 있던 고분자의 backbone에 더 rigid한 특성을 가지는 selenophene(D₂)을 일정 비율 도입하여 이 변화가 태양전지에 미치는 영향에 대해 연구를 진행하였다(2D/1A).[그림 9] Thiophene(D₁)과 selenophene(D₂)의 경우 에너지 준위가 비슷하기 때문에 두 unit의 비율의 변화에도 고분자의 광학적 성질에는 큰 영향을 미치지 않는 것을 알 수 있었다. 일반적으로, rigid한 selenophene(D₂)이 들어간 고분자일수록 고분자의 결정화도가 증가되며 이에 따라 전하 이동도도 같이 증가하는 것을 확인할 수 있었지만 이와 반대로 유기 태양전지에서는 전자 주개와 PCBM과의 miscibility 감소로 인해 상분리가 심하게 일어나 효율이 감소하게 되는 경향을 보였다. 하지만 terpolymer approach를 통해 selenophene(D₂) 양을 조절할 경우, 전하 이동도 증가와 적당한 상분리가 일어날 수 있도록 selenophene(D₂) 비율 조절을 통해 고분자의 특성을 최적화시켜 유기 태양전지의 효율을 향상 시킴을 확인할 수 있었다.

또한, terpolymer의 경우, 고분자 backbone 안에서의 배열(sequence)에 따라 random terpolymer와 regular terpolymer로 나눌 수 있다.[그림 10] Random terpolymer의 경우, 1D/2A 구조에서는 두 개의 다른 A₁/A₂가, 2D/1A 구조에서는 두 개의 다른 D₁/D₂가 고분자 backbone 안에서 random한 배열을 가지게 되며, 이러한 구조로는 그림 9에서 언급한 terpolymer를 예로 들 수 있다. 이와 달리, regular terpolymer의 경우는 backbone을 구성하고 있는 unit이 regular한 배열을 가지고 있으며, 이러한 구조를 갖기 위해서는 그림 10 (b)와 같이 trimer를 먼저 합성한 후, 이를 이용해 고분자 합성을 진행해야 한다. 그 예로, 그림 11의 PDPP3Ta/TPT가 대표적인 regular terpolymer이다. Regular terpolymer의 경우, random terpolymer의 장점 중 하나인 세 번째 unit의 비율 조절을 통한 세밀한 고분자 특성 제어는 불가능하다는 단점이 있지만 상

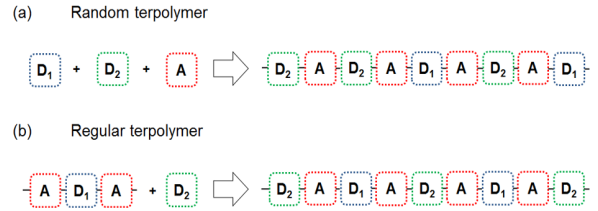


그림 10. Random terpolymer와 regular terpolymer의 구조 비교[20]

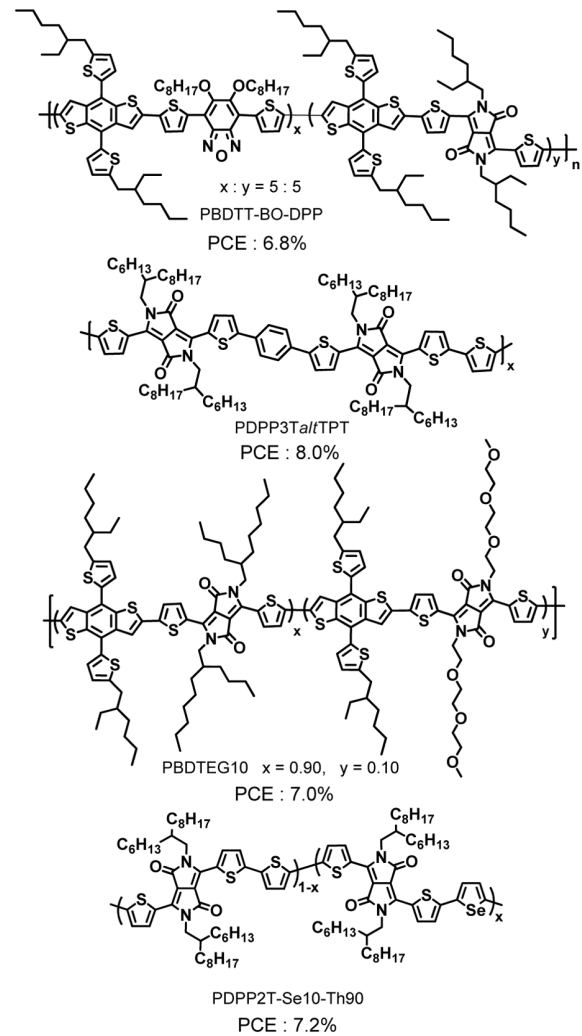


그림 11. 높은 효율을 보이는 Terpolymer 구조[22-25]

대적으로 batch-to-batch 변화가 크지 않으며 random terpolymer와 마찬가지로 추가적인 세 번째 unit의 도입으로 인해 terpolymer의 장점인 고분자의 전기적, 광학적 성질 등의 개선에 용이하다.

이렇듯, 전도성 고분자의 성질을 보다 세밀하게 조절

할 수 있게 됨에 따라, terpolymer에 대한 연구가 시작 된지 얼마 안 되어 7%가 넘는 효율을 보이는 고분자가 개발되었다. 현재로써, 새로운 구조의 electron-rich와 electron-deficient unit의 개발에 어려운 점이 있어, 새로운 unit의 개발보다는 새로운 조합을 통해 전도성 고분자를 개발하는 것이 중요한 시점인 만큼 앞으로 terpolymer 구조를 이용한 고분자 설계는 더 더욱 활발히 이루어질 것이라 예상된다.[그림 11]

4. 결론

지금까지 전자 주개 물질인 전도성 고분자 개발에 따른 유기 태양전지의 발전 과정과 최근 연구 동향을 간략히 살펴보았다. 유기 태양전지의 효율은 최근 몇 년간 크게 향상되었으며 이는 무엇보다도 다양한 전도성 고분자 구조 설계 방법으로 인한 새로운 전도성 고분자의 개발 때문이다. 이로 인해, 단일 셀로 10%에 도달하는 전자 주개 전도성 고분자가 개발되었고 이를 통해 실질적인 유기 태양전지 상용화에 대한 가능성은 높아질 것이라고 예상된다. 물론, 고효율을 달성하는 것만으로 유기 태양전지가 상용화되는 것은 아니다. 유기 태양전지를 실생활에 적용하기 위해서는 효율 증가와 함께 추가적으로 전도성 고분자의 열적 안정성, 광 안정성 및 기계적 특성 향상 개선 연구도 반드시 동반되어야 한다. 하지만 현재 유기 태양전지의 발전 속도와 다양한 장점을 고려한다면 상기 이슈들이 머지않아 해결되어 유기 태양전지의 상용화를 기대할 수 있을 것이라 예상된다. 앞으로 다양한 종류의 웨어러블 디바이스가 새롭게 개발될수록 유기 태양전지의 필요성은 더욱 부각될 것이며 따라서 유기 태양전지 분야의 응용가능성 또한 굉장히 넓어질 전망이다.

참고문헌

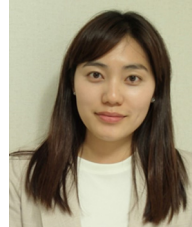
[1] F. C. Krebs, *Sol. Energy Mater. Sol. Cells*, **93**, 394 (2009).
 [2] S. Günes, H. Neugebauer, and N. S. Sariciftci, *Chem. Rev.*, **107**, 1324 (2007).
 [3] A. C. Arias, J. D. MacKenzie, I. McCulloch, J. Rivnay, and A. Salleo, *Chem. Rev.*, **110**, 3 (2010).

[4] C. J. Brabec, N. S. Sariciftci, and J. C. Hummelen, *Adv. Funct. Mater.*, **11**, 15 (2001).
 [5] L. M. Campos, A. Tontcheva, S. Günes, G. Sonmez, H. Neugebauer, N. S. Sariciftci and F. Wudl, *Chem. Mater.*, **17**, 4031 (2005).
 [6] G. Li, V. Shrotriya, J. Huang, Y. Yao, T. Moriarty, K. Emery, and Y. Yang, *Nat. Mater.*, **4**, 864 (2005).
 [7] W. Ma, C. Yang, X. Gong, K. Lee, and A. J. Heeger, *Adv. Funct. Mater.*, **15**, 1617 (2005).
 [8] H. Zhou, L. Yang, S. Stoneking, and W. You, *ACS Appl. Mater. Interfaces*, **2**, 1377 (2010).
 [9] C. J. Brabec, A. Cravino, D. Meissner, N. S. Sariciftci, T. Fromherz, M. T. Rispe, L. Sanchez, and J. C. Hummelen, *Adv. Funct. Mater.*, **11**, 374 (2001).
 [10] H. X. Zhou, L. Q. Yang, S. Stoneking, W. You, *Acs Applied Materials & Interfaces*, **2**, 1377 (2010).
 [11] C. Piliago, T. W. Holcombe, J. D. Douglas, C. H. Woo, P. M. Beaujuge, J. M. J. Frechet, *J Am Chem Soc.*, **132**, 7595 (2010).
 [12] J. S. Wu, Y. J. Cheng, M. Dubosc, C. H. Hsieh, C. Y. Chang, C. S. Hsu, *Chem Commun.*, **46**, 3259 (2010).
 [13] Y. J. Cheng, S. H. Yang, C. S. Hsu, *Chem Rev.*, **109**, 5868 (2009).
 [14] S. Zhang, L. Ye, W. Zhao, D. Liu, H. Yao, J. Hou, *Macromolecules*, **47**, 4653 (2014).
 [15] L. J. Huo, S. Q. Zhang, X. Guo, F. Xu, Y. F. Li, J. H. Hou, *Angew Chem Int Edit.*, **123**, 9871 (2011).
 [16] H. X. Zhou, L. Q. Yang, A. C. Stuart, S. C. Price, S. B. Liu, W. You, *Angew Chem Int Edit.*, **123**, 3051 (2011).
 [17] T. Y. Chu, J. P. Lu, S. Beaupre, Y. G. Zhang, J. R. Pouliot, S. Wakim, J. Y. Zhou, M. Leclerc, Z. Li, J. F. Ding, Y. Tao, *J Am Chem Soc.*, **133**, 4250 (2011).
 [18] H. C. Chen, Y. H. Chen, C. C. Liu, Y. C. Chien, S. W. Chou, P. T. Chou, *Chem Mater.*, **24**, 4766 (2012).
 [19] Y. Liu, J. Zhao, Z. Li, C. Mu, W. Ma, H. Hu, K. Jiang, H. Lin, H. Ade, H. Yan, *Nat Comm*, **5**, 5293 (2014).
 [20] T. E. Kang, K.-H. Kim, B. J. Kim, *J Mater Chem A*, **2**, 15252 (2014).
 [21] T. E. Kang, H.-H. Cho, H. j. Kim, W. Lee, H. Kang, B. J. Kim, *Macromolecules*, **46**, 6806 (2013).
 [22] K.-H. Kim, S. Park, H. Yu, H. Kang, I. H. Song,

- J. H. Oh, B. J. Kim, *Chem Mater.*, **26**, 6963 (2014).
- [23] K. H. Hendriks, G. H. Heintges, V. S. Gevaerts, M. M. Wienk and R. A. Janssen, *Angew. Chem., Int. Ed.*, **52**, 8341 (2013).
- [24] W.-H. Chang, J. Gao, L. Dou, C.-C. Chen, Y. Liu and Y. Yang, *Adv. Energy Mater.*, **4**, 1300864 (2014).
- [25] J.-M. Jiang, H.-C. Chen, H.-K. Lin, C.-M. Yu, S.-C. Lan, C.-M. Liu and K.-H. Wei, *Polym. Chem.*, **4**, 5321 (2013).

저 자 약 력

강 태 의



- 서강대학교 생명화학공학과(학사), 한국과학기술원 생명화학공학과(석사, 박사과정)
- 관심분야 : 유기 태양전지

김 태 수



- 한국과학기술원 생명화학공학과(학사, 석박사통합과정)
- 관심분야 : all-polymer solar cell, 유기전자소자의 안정성

김 범 준



- 서울대학교 응용화학부(학사), University of California (Santa Barbara) 화학공학과(박사) University of California, Berkeley 화학과(Post-Doc.) 현 한국과학기술원(KAIST) 생명화학공학과 부교수