고분자 엑셉터를 활용한 전고분자 태양전지 (All-Polymer Solar Cells)

DOI: 10.3938/PhiT.26.029

김상우·박진수·이창연·김범준

All-Polymer Solar Cells Utilizing Polymer Acceptor

Sang Woo KIM, Jin Su PARK, Changyeon LEE and Bumjoon J. KIM

Polymer solar cells (PSCs) are attracting attention as a next-generation energy source because they have the potential to provide mobile renewable energy at a low cost, lightweight and flexible. In this article, we focus on polymer acceptors that are emerging as an alternative solution to fullerene-based solar cells that suffer from long-term stability problems, and discuss the progree of devices and materials for all-polymer solar cells.

들어가는 글

유기태양전지는 특유의 가벼움과 유연함을 기반으로 하여 휴대용(portable), 웨어러블(wearable) 전자소자에 바로 적용이 가능하며, 그림 1과 같이 자유로운 디자인을 통해 실생활에 밀접하게 활용할 수 있다.^[1,2] 뿐만 아니라, 최근에는 BIPV(Building Intergrated PhotoVoltaic), 즉 건물일체형 태양광 발전 시스템에 유기태양전지를 적용하는 연구가 집중되고 있다. BIPV는 태양전지를 건축물에 설치하여 건축부자재의 기능과 더불어 전

Fig. 1. Various type applications of organic solar cell (OSC); (a) BIPV, (b) flexible OSC, (c) wearable OSC. [sources: (a) www.merck-performance-materials.com, (b) www.infinitypv.com and (c) www.opvius.com]

력생산을 동시에 할 수 있는 시스템이다.^[3] 유기태양전지를 이 시스템에 적용한다면, 다양한 색상의 셀을 건물에 활용할 수 있기 때문에 미관을 향상시킬 뿐만 아니라, 기존의 건축자재가 수행하고 있는 외장재의 기능을 수행하면서 동시에 태양광발전을 할 수 있다. 하지만, 아직까지 유기태양전지의 물리적, 화학적 내구성 및 안정성을 확보하지 못해 상용화의 어려움을 겪고 있는 상황이다. 따라서 이러한 한계를 극복하기 위해서는 유기태양전지의 내구성 및 안정성 확보가 필수적이다.

유기태양전지의 광활성 층은 도너(donor) 소재와 엑셉터(acceptor) 소재가 서로 무작위하게 섞인 상태의 다중 접합계면으로 이종 접합 구조(bulk heterojunction)를 형성하고 있다. 최근까지 고성능을 구현하는 유기태양전지의 경우 용액공정을 기반으로 도너 소재는 고분자를 사용하고, 엑셉터 소재는 fullerene 유도체 PC₇₁BM(phenyl C₇₁ butyric acid methyl ester)을 사용하고 있다. 유기태양전지의 에너지 변환효율(power conversion efficiency)을 높이기 위해 다양한 연구가 진행되고 있으며, 특히 도너-엑셉터 소재의 적절한 에너지준위 형성, 전자 및 정공 이동의 균형, 적절한 박막 형태(morphology) 및 도메인(영역) 형성, 장파장 빛의 적절한 흡수 특성을 고려하여 설계가 이루어지고 있다. 현재까지 다양한 공액 고분자 도너의 개발로 PC₇₁BM 엑셉터와 함께 사용하여 최고 12%의

저자약력

김상우 학생은 KAIST 생명화학공학과 박사과정에 재학 중으로 전고분자 태양전지 관련 연구를 중점적으로 수행하고 있다.

박진수 학생은 KAIST 생명화학공학과 석사과정에 재학 중으로 고분자 도너 및 엑셉터 소재 합성연구를 중점적으로 하고 있다.

이창연 학생은 KAIST 생명화학공학과 박사과정에 재학 중으로 전고분자 태양전지 관련 연구를 중점적으로 수행하고 있다.

김범준 교수는 2006년 University of California, Santa Barbara 화학공학과에서 박사학위를 취득하였으며, University of California, Berkeley 박사후연구원(2006-2008)을 거쳐 현재 KAIST 생명화학공학과 부교수(2008-현재)로 재직 중이다.(bumjoonkim@kaist.ac.kr)

REFERENCES

- [1] H. Hoppe and N. S. Sariciftci, J. Mater. Res. **19**, 1924 (2004).
- [2] A. M. Bagher, Int. J. Renew. Sustain. Energy **3**, 53 (2014).
- [3] A. Henemann, Renewable Energy Focus **9**, 16 (2008).

고효율이 보고되었다.^[4] 하지만, PCBM 엑셉터의 경우는 화학적 구조 변화의 한계성 때문에 연구가 매우 한정적으로 진행되고 있다. 뿐만 아니라 fullerene 유도체인 PC₆₁BM, PC₇₁BM 엑셉터의 경우 장파장에서의 매우 약한 빛 흡수, fullerene 합성의 고비용, 대면적화에서의 고분자에 비해 낮은 점도 등 많은 단점들이 드러나고 있다. 특히, 들어가는 글에서 언급한 바와 같이, 상용화에 걸림돌이 되고 있는 내구성 및 안정성에 치명적인 문제점을 가지고 있다. 이 때문에 최근 유기태양전지 소자의 내구성 및 안정성을 높이기 위한 대안으로 기존의 PCBM 엑셉터 소재를 고분자 엑셉터 소재로 대체한 전고분자 태양전지(all-polymer solar cells, all-PSCs)가 학계에서 주목받고 있는 기술로 떠오르고 있다.^[5]

고분자 엑셉터 개발

고분자 엑셉터는 PCBM보다 다양한 화학적 구조 설계(주쇄 및 측쇄 변화)를 통해 에너지 준위 조절과 흡수 영역을 조절할 수 있어 고분자 도너와 상보적 흡수를 통한 넓은 범위에서의 빛 흡수가 가능하다. 초기의 개발 단계에서는 CN-PPV (cyanated polyphenylenevinylene) 고분자가 널리 사용되었으며, 다음으로 fluorene와 benzothiadiazole(BT) 기반의 고분자 엑셉터가 사용되었다. CN-PPV 유도체는 상대적으로 높은 LUMO 레벨 때문에 높은 V_{oc} (> 1 V 이상)을 보였지만, 광 흡수 능력이 매우 제한되었고, 상대적으로 낮은 전자이동도로 인한 낮은 J_{sc} 와 FF 때문에 오랜 기간 동안 2%의 낮은 효율이 유지되고 있었다. 그 이후, rylene diimide계 고분자(naphthalene에 6각 dicarboxylic imide 고리가 fused된 형태)가 개발되었다. 대표적으로는 naphthalene diimide(NDI)와 perylene diimide(PDI)계 고분자가 있다.

PDI계 엑셉터는 강한 전자 친화력과 장파장과 단파장을 흡수하는 넓은 흡광영역을 가지는 장점을 가지며 넓은 평면구조를 갖는 코어구조는 강한 π - π 결합을 통해 고체상태에서 높은 결정성으로 우수한 전하 이동도를 보인다. PDI계 엑셉터는 imide의 N 위치와 코어 bay 위치에 다양한 작용기의 도입이 가능하므로 에너지 준위 조절 및 흡광영역 조절 등 다양한 특성의 제어가 가능하다. 최초로 개발된 PDI 기반의 고분자 엑셉터인 PDI-dithienothiophene copolymer, P(PDI-DTT)는 $1.3 \times 10^{-2} \text{ cm}^2 \text{ V}^{-1} \text{ s}^{-1}$ (FET 측정)의 전자이동도를 통해서 1% 정도의 효율을 보고하였다.^[6] 그 이후, 지속적으로 PDI 유닛에 다양한 작용기를 도입한 고분자 엑셉터가 보고되었고, 현재까지 PDI-V 고분자 엑셉터를 사용한 전고분자 태양전지에서 최고 7.57%의 효율이 보고되었다. PDI-V는 vinylene linker가 도입됨으로써 높은 결정성으로 인한 높은 전자이동도를 가지고(그

Fig. 2. Chemical structure of representative polymer acceptors; (a) PDI-V and (b) P(NDI2OD-T2).

림 2(a)), 이를 PTB7-Th 고분자 도너와 함께 사용하였을 때 첨가제(additive)와 전처리(post treatment) 없이도 7.57%의 높은 에너지 변환 효율을 나타냄이 보고되었다.^[7]

NDI계 엑셉터도 마찬가지로 넓은 평면구조를 가지면서, 단파장과 장파장에서 우수한 흡수 능력을 보인다. 또한 imide 위치에 다양한 치환기 도입이 가능하여 용해도를 향상시킬 수 있다. 특히, NDI 기반의 고분자는 PDI 기반의 고분자보다 상대적으로 작은 core를 가져 분자량을 상당히 높일 수 있는 장점을 가지며, 이는 고효율의 전고분자 태양전지를 구현하는데 중요한 요소이다. 초기 연구단계에서는 NDI 기반의 단분자가 개발되었는데, 이는 작은 fused-ring 유닛과 넓은 밴드갭으로 인해 PDI 기반의 단분자보다 낮은 성능을 보였다. 하지만 NDI 유닛의 고분자화를 통해 conjugated 길이가 길어져서 향상된 에너지 변환 효율이 보고되었다. Polyera사에서 Polyera Activlink N2200^[8]라고 불리는 NDI 기반의 P(NDI2OD-T2) 고분자(그림 2(b))를 개발하였는데, 이 고분자 엑셉터는 높은 전자이동도 (FET 측정: $0.45\text{--}0.85 \text{ cm}^2 \text{ V}^{-1} \text{ s}^{-1}$, SCLC 측정: $> 10^{-3} \text{ cm}^2 \text{ V}^{-1} \text{ s}^{-1}$)로 인해 J51 고분자와 함께 사용하여 8.27%의 높은 에너지

REFERENCES

- [4] M. Li, K. Gao, X. Wan, Q. Zhang, B. Kan, R. Xia, F. Liu, X. Yang, H. Feng, W. Ni, Y. Wang, J. Peng, H. Zhang, Z. Liang, H.-L. Yip, X. Peng, Y. Cao and Y. Chen, Nat. Photonics **11**, 85 (2017).
- [5] H. Kang, W. Lee, J. Oh, T. Kim, C. Lee and B. J. Kim, Acc. Chem. Res. **49**, 2424 (2016).
- [6] X. Zhan, Z. Tan, B. Domercq, Z. An, X. Zhang, S. Barlow, Y. Li, D. Zhu, B. Kippelen and S. R. Marder, J. Am. Chem. Soc. **129**, 7246 (2007).
- [7] Y. Guo, Y. Li, O. Awartani, J. Zhao, H. Han, H. Ade, D. Zhao and H. Yan, Adv. Mater. **28**, 8483 (2016).
- [8] Z. Chen, Y. Zheng, H. Yan and A. Facchetti, J. Am. Chem. Soc. **131**, 8 (2009).

Fig. 3. Chemical structures and energy levels of PBDTTTPD, P(NDI2HD-T), and PCBM. (from Ref. [11])

변환 효율을 보였다.^[9] 또한, 최근에는 PTzBI 고분자 도너와 함께 친 환경 용매인 MeTHF로 소자를 제작하여 9.16%의 전고분자 태양전지에서 제일 높은 에너지 변환 효율을 보고하였다.^[10] 이렇게 고분자 엑셉터는 지속적인 개발을 통해 PCBM 엑셉터에 버금가는 높은 전자이동도와 전자 친화력(electron affinities)을 보일 뿐만 아니라 장파장(가시광 영역)과 단파장(near-IR) 영역에서 높은 빛 흡수 능력을 가지기 때문에 향상된 단락전류(J_{sc})와 충전율(FE)을 통해 에너지 변환 효율이 상당히 향상되었다.

최근에는 많은 문헌을 통해 PCBM 기반의 유기태양전지보다 고분자 엑셉터 기반의 전고분자 유기태양전지가 뛰어난 내구성 및 안정성을 가지는 결과들을 보고하고 있다.^[11] 전고분자 태양전지의 경우 PCBM 엑셉터 기반의 유기태양전지에 비해 아직 최적화되지 않은 혼합 형태(blend morphology)로 인해 상대적으로 낮은 효율을 보이지만, 고분자 엑셉터 기반의 전고분자 태양전지의 효율 상승 경향은 최근 5년간 2%에서 9%까지 매우 가파르게 증가하고 있다. 아래에서 전고분자 태양전지의 효율을 결정짓는 개방전압(V_{oc}), 단락전류(J_{sc}), 혼합형태 제어(blend morphology control)에 대해 좀 더 면밀히 살펴보고자 한다.

1. 개방전압(V_{oc})

광활성 층에 사용되는 도너와 엑셉터 소재의 조합을 선택함에 있어 유기분자들의 최고준위 점유 분자궤도(highest occupied molecular orbital, HOMO)와 최저준위 비점유 분자궤도(lowest unoccupied molecular orbital, LUMO) 에너지 준위가 매우 중요한 고려 사항이 되는데, 일반적으로 도너의 HOMO 에너지 준위와 엑셉터의 LUMO 에너지 준위 차이가 클수록 높은 V_{oc} 를 얻을 수 있기 때문이다. 따라서 엑셉터 소재의 LUMO 에너지 준위를 올리게 되면 소자의 V_{oc} 를 향상시

킬 수 있고 에너지 변환 효율(PCE) 또한 향상시킬 수 있다. 물론, exciton(엑시톤)을 전자와 정공으로 분리시키기 위해 도너와 엑셉터 소재의 LUMO 에너지 준위차가 0.3 eV 이상 차이가 나는 도너, 엑셉터 조합 또한 고려사항이다. PCBM 엑셉터가 다양한 분자 설계가 어려워 에너지 준위 제어가 쉽지 않은 것에 비해 다양한 분자 설계가 가능한 고분자 엑셉터는 이러한 점에서 큰 장점을 가지고 있다. 일례로 그림 3에서와 같이 NDI 기반의 고분자 엑셉터인 P(NDI2HD-T)는 LUMO 에너지 준위가 -3.79 eV를 가져 PCBM의 -3.85 eV보다 더 높은 LUMO 에너지 준위를 가진다. 이를 PBDTTTPD 도너와 함께 소자를 제작했을 때, PCBM 엑셉터 기반의 소자는 0.96 V인 것에 비해 P(NDI2HD-T) 엑셉터 기반의 전고분자 태양전지는 1.06 V의 높은 V_{oc} 을 나타낸다.^[11] 에너지 준위 제어가 용이한 고분자 엑셉터가 낮은 HOMO 에너지 준위를 갖는 도너와 함께 설계된다면 더 높은 V_{oc} 을 기대할 수 있을 것이다.

2. 단락전류(J_{sc})

높은 단락전류(J_{sc})를 얻기 위해서는 두 가지 요소가 필수적이다. 첫 번째로는 태양으로부터 들어오는 광자(photon)를 최대한 많이 흡수해야 한다. 각 파장대마다 흡수할 수 있는 광자의 수가 다르기 때문에 장파장(가시광) 영역을 포함한 넓은 범위에서의 빛 흡수가 매우 중요하다. 두 번째로는 엑시톤(exciton)에서 분리된 전자와 정공이 전극까지 빠르게 이동되어야 하며, 이를 위해서는 엑셉터가 높은 전자 이동도를 가져야 한다. PCBM 엑셉터는 상대적으로 빠른 전자이동도를 가지고 있지만, 주로 300–400 nm 파장대의 빛만을 흡수할 수 있고 장파장에서의 빛 흡수 능력이 매우 떨어지는 단점을 가진다. 때문에 이를 포함한 광활성 층에서의 빛 흡수는 거의 고분자 도너에 의해 결정되게 된다. 이에 반해, 일반적으로 많이 사용되는 NDI 계열의 고분자 엑셉터 소재의 경우 그림 4(a)에서 보이는 것처럼 300–450 nm와 600–800 nm의 빛을 잘 흡수하기 때문에 PCBM에 비해 빛 흡수 능력이 매우 뛰어나다. 그러므로 이를 고분자 도너와 함께 광활성 층에 사용하면, 고분자 도너가 흡수하지 못하는 영역을 고분자 엑셉터가 흡수함으로써 상보적 빛 흡수를 통해 향상된 단락전류 값을 얻을 수

REFERENCES

- [9] L. Gao, Z. G. Zhang, L. Xue, J. Min, J. Zhang, Z. Wei and Y. Li, *Adv. Mater.* **28**, 1884 (2016).
- [10] B. Fan, L. Ying, Z. Wang, B. He, X.-F. Jiang, F. Huang and Y. Cao, *Energy Environ. Sci.* **10**, 1243 (2017).
- [11] T. Kim, J.-H. Kim, T. E. Kang, C. Lee, H. Kang, M. Shin, C. Wang, B. W. Ma, U. Jeong, T.-S. Kim and B. J. Kim, *Nat. Commun.* **6**, 8547 (2015).

Fig. 4. (a) UV-vis absorption spectra of PBDTTTPD, PCBM, and P(NDI2HD-T) (from Ref. [11]); (b) simulated absorbance of the PBDTTS-FAZ:PNDI-T10 active layer in the all-PSC and the divided absorbance of PBDTTS-FAZ and PNDI-T10 in the active layer. (from Ref. [13])

있다. 일본 교토대의 Ito 교수팀은 효과적인 상보적 흡수를 위해 세 가지 고분자 소재를 함께 광활성 층에 사용하는 삼성분계(ternary) 시스템(PBDTTT-EF-T/N2200/PCDTBT)을 도입하여 6.7%의 효율 결과를 발표하였다. 향상된 J_{sc} 는 각각의 소재가 서로 다른 영역의 빛을 흡수함으로써 넓은 영역의 빛을 흡수할 수 있게 된 것에서 기인한다.^[12] 또한 스웨덴의 칼머기술대학교 Wang 교수팀은 PBDTTS-FAZ 고분자 도너와 고분자 엑셉터(PNDI T10)의 적절한 조합을 통해 도너와 엑셉터의 빛 흡수 영역 겹침을 최소화하여 6.9%의 향상된 효율을 보고하였다.(그림 4(b))^[13] 이러한 사례들과 같이 고분자 엑셉터의 뛰어난 빛 흡수 능력을 적절하게 이용한다면 고분자 도너와 효과적인 상보적 흡수를 통해 PCBM 엑셉터 기반의 소자보다 향상된 단락전류를 얻을 수 있다.

3. 혼합 형태 제어(blend morphology control)

전고분자 유기태양전지 소자 제작에서 광활성 층은 고분자 도너와 고분자 엑셉터가 단일 용매에 용해되어 있는 혼합 용액을 스핀-코팅(spin coating)을 통해 박막필름을 형성함으로써 제작된다. 이때, 광활성 층의 고분자 도너와 고분자 엑셉터의 혼합 형태는 에너지 변환 효율을 결정짓는 아주 중요한 요소이다. 동일한 고분자 도너와 고분자 엑셉터를 사용하더라도 혼합 형태를 어떻게 제어하느냐에 따라 에너지 변환 효율이 극명한 차이를 보이는 것을 예로 들 수 있겠다.^[14,15] 혼합 형태(blend morphology)를 이루는 고분자 도너와 고분자 엑셉터의 광활성 층 내에서의 상 분리(phase separation)의 정도, 혼합 형태의 균일성, 고분자 사슬의 배열(ordering) 정도 등이 유기태양전지의 소자 성능과 매우 밀접한 관련이 있기 때문에 이러한 조건들을 최적화하는 연구들이 수행되어야만 고효율의 유기태양전지 구현이 가능하다. 대표적인 과정들을 살펴보면 고분자 엑셉터의 분자량 최적화^[14]와 측쇄의 화학구조의 최적화^[16-18] 등이 있으며, 이러한 최적화 과정은 고분자 사슬의 배

Fig. 5. (a) Chemical structure of P(NDI2HD-T2), (b) Comparison of molecular orientation in pristine P_L , P_M , and P_H films and PCE values of device with PTB7-Th donor. (from Ref. [14])

열 및 결정성 도메인(영역)의 배향을 제어하여 전하 생성 및 수송에 바람직한 혼합 형태를 형성함으로써 효율을 상승시킨다. 따라서 고분자 도너와 고분자 엑셉터의 혼합형태 제어는 새로운 고분자 엑셉터 설계와 함께 중요하게 고려되어야 한다.^[19] 구체적인 연구 사례로는 NDI 기반의 고분자 엑셉터인 P(NDI2HD-T2)의 분자량을 조절함으로써 도너-엑셉터 간 계면과 전극에 대한 분자 배향(molecular orientation)을 효과적으로 제어한 사례가 있다. 이 연구에서는 고분자 엑셉터의 분자량을 저(13.6 kg mol⁻¹), 중(22.9 kg mol⁻¹), 고(49.9 kg mol⁻¹)로 조절하여 합성하였고, 이를 PTB7-Th 도너와 혼합 형태의 필름으로 제작하였을 때 저분자량의 고분자 엑셉터의 경우 “edge-on” 배향을 하는 반면 고분자량의 경우 전하이동에 증대효과를 보이는 “face-on” 배향을 통해 단락전류가 크게 향상되어 소자 효율이 4.29%(저분자량)에서 6.14%(고분자량)까지 향상되는 결과를 보고하였다.^[14](그림 5)

REFERENCES

- [12] H. Bente, T. Nishida, D. Mori, H. Xu, H. Ohkita and S. Ito, Energy Environ. Sci. **9**, 135 (2016).
- [13] Z. Li, W. Zhang, X. Xu, Z. Genene, Dario D. C. Rasi, W. Mammo, A. Yartsev, M. R. Andersson, René A. J. Janssen and E. Wang, Adv. Energy Mater. **7**, 1602722 (2017).
- [14] J. Jung, W. Lee, C. Lee, H. Ahn and B. J. Kim, Adv. Energy Mater. **6**, 1600504 (2016).
- [15] C. Lee, Y. Li, W. Lee, Y. Lee, J. Choi, T. Kim, C. Wang, E. D. Gomez, H. Y. Woo and Bumjoon J. Kim, Macromolecules **49**, 5051 (2016).
- [16] B. R. Gautam, C. Lee, R. Younts, W. Lee, E. Danilov, Bumjoon J. Kim and K. Gundogdu, ACS Appl. Mater. Interfaces **7**, 27586 (2015).
- [17] W. Lee, C. Lee, H. Yu, D.-J. Kim, C. Wang, H. Y. Woo, J. H. Oh and B. J. Kim, Adv. Funct. Mater. **26**, 1543 (2016).
- [18] M. A. Uddin, Y. Kim, R. Younts, W. Lee, B. Gautam, J. Choi, C. Wang, K. Gundogdu, B. J. Kim and H. Y. Woo, Macromolecules **49**, 6374 (2016).
- [19] H. Bente, D. Mori, H. Ohkita and S. Ito, J. Mater. Chem. A, **4**, 5340 (2016).

Fig. 6. Tensile test of PBDTTTPD:PCBM and PBDTTTPD:P(NDI2HD-T) blend films. (a) Stress-strain curves and (b) toughness of blend films. (from Ref. [11])

신뢰성(내구성 및 안정성) 향상

앞서 말한 바와 같이, 유기태양전지의 상용화를 위해서는 광전 변환 효율뿐만 아니라 소자의 신뢰성 또한 매우 중요한 요소이다. 최근 들어 기존의 PCBM 엑셉터 대신 고분자 엑셉터 소재를 적용하여 내구성 및 안정성을 높이는 연구가 많은 연구 그룹들에 의해 앞다투어 보고되고 있다. 유기태양전지 소자의 안정성은 크게 기계적, 광, 열, 대기 안정성으로 구분하여 평가하고 있는데, 아직까지 이를 정량적으로 평가할 수 있는 시스템이 구축된 연구 그룹은 많지 않다. 더 나아가서, 광활성 층 내에 포함되어 있는 도너, 엑셉터 소재의 열화 메커니즘 또한 아직까지 명확히 밝혀진 바가 없기 때문에 앞으로 많은 연구가 필요한 분야이다. 유기태양전지의 안정성을 저해하는 요소는 외부로부터 오는 물리적 충격, 각 층의 불안정한 접착계면, 빛, 열, 산소, 수분 등이 있다. 각 요소에 따른 유기태양전지의 안정성 연구에 대해 알아보려고 한다.

첫 번째로 기계적 안정성을 살펴보고자 한다. PCBM 엑셉터와 고분자 엑셉터의 기계적 특성 비교를 한 연구 결과 그림 6과 같이 PCBM 엑셉터 기반의 소자(PCE=6.12%)에 비해 고분자 엑셉터 소자(PCE=6.64%)는 유연성은 60배, 내구성(기계적 특성)은 470배 정도 향상되었음이 보고되었다.^[11] 이는 단분자인 PCBM의 취성(brittleness)이 강하여 광활성 층 필름을 형성하였을 때 외부 충격에 쉽게 균열(crack)이 생기는 것에 비해 고분자 엑셉터의 경우 고분자 사슬(polymer chain)끼리 얽혀있는(entangled) 고분자 고유의 특징으로 큰 연성을 갖게 되므로 외부 충격에도 쉽게 필름 손상을 입지 않기 때문이다. 따라서 이 연구는 전고분자 태양전지의 유연소자(flexible device) 적용 및 상용화의 가능성을 제공하였다.

다음으로는 광, 열안정성을 살펴보고자 한다. 수분과 산소 같은 외부요인에 대한 유기태양전지의 민감성은 어느 정도 알

려져 있어서 봉지 소재의 도입으로 해결할 수 있지만, 빛에 의한 열화에 대해서는 근본적인 문제를 해결해야 한다. 일반적으로 PCBM은 빛에 장기간 노출되었을 때 두 개의 평행한 이중 결합(double bonds) 사이에서 [2+2] 고리화 첨가반응(cyclo-addition reaction)이 일어나 fullerene 케이지(cages)(이합체, dimerization)를 형성한다. 이렇게 형성된 PCBM의 이합체는 유효 전하 캐리어(effective charge carrier)의 이동성 감소로 이어지며, 이는 소자의 단락전류(J_{sc})와 충전률(FF)의 감소를 야기한다.^[20] 또한, 유기태양전지 작동 조건 하에서 태양광을 장기간 받게 되면 실제 작동 온도는 50~70 °C까지 올라갈 수 있으며, 심지어 일부 지역에서는 100 °C까지 도달할 수 있다. PCBM 엑셉터 기반의 유기태양전지 소자의 열 안정성 평가를 진행하고 혼합형태(blend morphology)를 관찰한 연구에 따르면, 소자가 열에 노출되는 시간이 장기화 될수록 초기에 발생된 나노미터 크기의 응집체(cluster)에서 마이크로미터의 응집체로 크기와 수가 증가하게 되고 홀 이동도(hole mobility)의 저하로 인해 전하이동도와 홀이동도의 균형(balance)이 깨져 개방전압(V_{oc}), 단락전류(J_{sc}), 충전률(FF) 모두 급격하게 감소하는 결과를 보인다.^[21]

맺음말

지금까지 범용적으로 사용되고 있던 PCBM을 대체할 수 있는 고분자 엑셉터 기반의 전고분자 태양전지(all-PSCs) 소재와 소자의 효율 및 신뢰성 향상을 위한 혼합 형태 제어 및 안정성 측면에서의 최근 개발된 최적화 기술을 간략히 살펴보았다. 유기태양전지의 상용화에 걸림돌이 되었던 신뢰성 문제를 고분자 엑셉터로 대체함으로써 상용화 가능성을 충분히 보여주었으며, 다양한 화학구조 설계를 통한 에너지 준위 및 빛 흡수 영역 제어 등으로 다양한 용도로 활용이 기대되고 있다. 이러한 기술 개발을 통해 유기태양전지가 앞으로 5년 이내에 상용화되어 우리 생활에 다양한 형태로 밀접하게 사용되기를 기대해 본다.

REFERENCES

- [20] A. Distler, T. Sauermann, H.-J. Egelhaaf, S. Rodman, D. Waller, K.-S. Cheon, M. Lee and D. M. Guldi, *Adv. Energy Mater.* **4**, 1300693 (2014).
- [21] Y.-J. Hsieh, Y.-C. Huang, W.-S. Liu, Y.-A. Su, C.-S. Tsao, S.-P. Rwei and L. Wang, *ACS Appl. Mater. Interfaces* **9**, 14808 (2017).