

강유전 고분자를 첨가한 유기태양전지의 효율 특성

박자영, 정치섭^a

청주대학교 레이저광정보공학과

The Efficiency Characteristics of the Ferroelectric Polymer Added Organic Solar-cells

Ja young Park and Chi Sup Jung^a

Department of Laser and Optical Information Technology, Cheongju University, Cheongju 28503, Korea

(Received March 21, 2016; Revised June 13, 2016; Accepted June 16, 2016)

Abstract: P3HT:PCBM bulk heterojunction solar cells added with ferroelectric polymer were fabricated and characterized. By incorporating P3HT:PCBM solar cell with P(VDF-TrFE) ferroelectric additive, the power conversion efficiency was increased up to nearly 50%. Photoacoustic analysis on this phenomena was carried out for the first time. Through this study, we find that the ferroelectricity of the polymer additive plays the key role in the enhancement of the power conversion efficiency of the organic solar cell by suppressing the non-radiative recombination of charge transfer exciton more effectively.

Keywords: P3HT:PCBM, P(VDF-TrFE), Ferroelectric, Photoacoustic, Power conversion efficiency

1. 서 론

현재 가장 보편적으로 사용되고 있는 전지는 실리콘 결정형 태양전지로서 상용 파워 변환 효율 (power conversion efficiency: PCE; 이하 효율로 칭함)은 거의 20%에 이른다. 이에 비해 유기 고분자 태양전지의 효율은 아직 10% 정도로, 획기적인 효율증가가 이루어지지 않는 한 상용화는 어렵다고 보여진다 [1,2]. 그럼에도 불구하고 낮은 제조 가격 및 공정상 편이성 때문에 이 분야 연구는 아직도 꾸준히 계속되고 있다 [3]. 고분자 태양전지는 유기반도체 특성을 활용한 소자로서 전자 주개/받개의 이종접합 구조로 되어있다. 광 흡수

로 인해 형성된 엑시톤은 확산 과정을 통해 도너/억셉터 계면으로 이동하며, 전자 친화도 차이에 의해 전자는 억셉터 쪽으로 이동하여 소위 전하 전달 엑시톤 (charge transfer exciton, CTE)이 형성된다 [4].

CTE는 전극의 일함수차이에 인해 발생하는 내부 전기장에 의해 자유 전하로 분리되어 광전류를 발생시킨다. 이 태양전지로부터 추출 가능한 효율은 이론적으로 15%에 달한다. 그러나 이를 달성하기 위해서는 효율 감쇠의 원인을 찾아 제거하는 노력이 무엇보다 중요하다. 효율감쇠의 요인은 (1) 불완전한 광 흡수, (2) 엑시톤의 짧은 확산거리, (3) 전하 또는 CTE의 비방사 재결합, (4) 낮은 캐리어 이동도 등을 들 수 있다 [4-6]. 신물질 개발, BHJ (bulk heterojunction) 구조 채택, 그리고 다양한 포집 광학계 개발로 많은 효율 개선이 이루어지고 있으나, 아직 전체 효율 감쇠 요인의 50% [7] 이상을 차지하고 있는 엑시톤의 재결합 문제는 별 진전을 보지 못하고 있다. 이 사실은 효과적인 CTE

a. Corresponding author; csjung@cju.ac.kr

분리를 통한 재 결합률 감소가 유기태양전지의 효율 개선에 있어 가장 중요한 열쇠임을 보여주고 있다 [8].

보통 P3HT:PCBM 유기 태양전지에서 CTE 분해에 필요한 전기장의 세기는 수십 $V/\mu m$ 이다. 그러나 전극의 일함수 차이에 의해 발생하는 전기장은 보통 수 $V/\mu m$ 로서, 이 전기장만으로는 CTE를 효과적으로 분리하기 어렵다 [9,10]. 따라서 CTE 분리를 위해 강한 외부 전기장 인가가 필요하다 [10]. Yuan 등은 외부전기장을 인가하는 대신 강유전체 인 P(VDF-TrFE) 박막을 광 흡수층과 전극 사이에 삽입하여 이 효과를 대신할 수 있다고 주장하였고, 실제 300%의 효율 증가를 관측한 바 있다 [11].

그들은 강유전고분자에 의해 유도된 내부 전기장이 CTE를 분리시켰고, 이로 인한 비방사 재결합의 역제가 효율 증가의 주된 원인이라고 분석하였다.

한편 Nalwa [12] 등은 강유전체를 광 흡수층에 첨가물(additive) 형태로 도입하여도 효율 증대가 가능함을 보고하였다. 이들의 연구들로부터 알 수 있는 공통적인 사실은 강유전 분극에 의해 발생한 내부장에 의한 CTE 분리가 효율 증가의 원인이라는 것이다. 그러나 효율 증대에 기여하는 파라미터가 서로 다르다는 사실은 매우 흥미롭다. 버퍼층으로 강유전체가 도입되는 경우 효율 증대의 요인은 개방전압의 증가이다. 그러나 첨가물 형태로 강유전체가 도입되는 경우 효율 증가의 주요인은 개방전압이 아니라 단락 전류의 증가이기 때문이다.

우리는 이 연구에서 강유전체를 첨가물로 도입하였을 때 전류 증가 효과를 엑시톤의 비방사 재결합의 관점에서 분석할 예정이며 이를 위해 광 음향 측정법을 도입할 것이다. 엑시톤의 비방사 재결합을 직접 측정하는 접근법은 추후 버퍼층 구조에서 개방전압 증가에 의한 효율 증강의 해석에도 유용하게 적용될 수 있을 것으로 본다.

유기태양전지에서 엑시톤의 효과적 분리는 광전류의 증가나 광기전력의 증가로 나타난다. 그러나 엑시톤의 분리가 용이하지 못할 경우 엑시톤은 전하로 분리되지 못하고 재결합을 통해 발광(radiative process)을 하거나 비방사 과정(non-radiative process)을 통해 열로 방출된다.

활성화된 유기 태양전지에서 발광효율은 비방사 전이 효율에 비해 무시할 수 있는 정도로 작다 [13]. 따라서 태양전지에서 엑시톤 재결합 과정을 광전류 생성과 비방사 전이 관점으로만 접근하여도 해석상 큰 무리는 없을 것으로 본다. 광 음향 분광학 [14]은 물질의

비방사 전이 측정에 효율적인 측정방법으로, 분광학이 광자(photon)의 측정에 기본을 둔다면 광 음향 측정법은 물질 내 비방사 전이에 의한 격자진동(phonon)을 측정하는 방법이다.

우리는 이 연구에서 광전류 측정과 함께 열의 형태로 방출되는 비방사 전이를 강유전체의 첨가비의 함수로 측정함으로써 효율 증강에 기여하는 강유전체의 기여 과정을 분석할 것이다. 비방사 측정을 통한 효율 증강에 대한 연구는 아직까지 한 번도 보고된 바가 없다. 따라서 현 단계에서 광 음향 세기와 엑시톤의 비방사 전이율 사이에 대한 정량적 연관관계를 밝혀내기는 어렵지만 광 음향 결과와 특성 파라미터를 연계 분석 한다면 강유전 고분자에 의한 엑시톤의 분리 억제 효과는 충분히 검증할 수 있을 것으로 본다.

2. 실험 방법

태양 전지는 다음과 같은 과정을 통하여 제작되었다. 기판은 ITO glass를 사용하였으며, acetone, ethyl alcohol, Di-water에 순서대로 5분간 초음파 세척기를 이용해서 세척하였고 N_2 gas를 불어 수분을 제거하였다. 기판은 UV-Ozone cleaner에 15분간 넣어 불순물 및 유기물 처리를 하였다. 정공수송층 (PEDOT:PSS): Poly(3,4-ethylenedioxythiophene)-poly(styrenesulfonate)은 기판 위에 스프인코팅 방법으로 30 nm 두께로 올려 제작하였다. 본 실험에 앞서 P3HT와 PCBM 조성비에 따른 두께 특성, 분광 특성, 전류전압 특성, 변환 효율 특성을 측정하여 최적의 조성비를 결정하였다. 이 연구에서 사용된 광 흡수층은 P3HT:PCBM의 무게에 대하여 P(VDF-TrFE)를 0%, 5%, 10%, 20%가 되도록 하였다. 이를 위해 P(VDF-TrFE)는 용매인 THF (tetrahydrofuran) 1 ml당 각각 0 mg, 4 mg, 8 mg, 16 mg의 농도로 24시간 이상 교반한 후 최적화된 P3HT:PCBM과 부피비 1:4로 혼합 후 12시간 이상 또 다시 교반하여 제작하였다. 제작된 시료는 0.2 μm 필터를 통과시키고, 200 rpm으로 5초 500 rpm 속도로 55초 총 60초 동안 스프인코팅 하였다. 광활성층을 스프인코팅 후 3분간 대기상태에서 건조 후, hot plate에서 155°C로 10분간 열처리하였다. 이렇게 만들어진 광 활성층 위에 알루미늄을 10^{-6} – 10^{-7} torr 조건에서 증착함으로써 전극을 만들었다. 유기 태양전지의 각층 두께는 Tencor사 (D-100)의 alpha-step을, 분광 특성은 HITACHI (UH4150) spectrophotometer를, 표면 형

상은 Carl Zeiss사(LEO-1530) 530 Field Emission Scanning Electron Microscope과 PUCO TECH사의 AFM을 사용하였다. 전지소자의 변환 효율 및 전류 전압 특성은 McScience사의 Polaronix K201 Solar Simulator를 사용하여 측정하였다.

이 실험에서 광 음향 측정에는 광원으로는 1.9 eV (630 nm)와 2.7 eV (450 nm)의 LED를 사용하였으며, light chopper로 변조된 빛은 광활성층에 입사되도록 하였다. 주기적으로 변조된 빛은 비방사 재결합을 통해 발생한 주기적 열로 변환되며 시료와 마이크로폰 사이의 작은 공간 내에 주기적인 압력 변화를 거쳐 전압변화로 유도되도록 하였다. 이 실험에서 사용된 gas-microphone 방법에 대한 설명은 참고 논문 [14]에 자세히 기술되어 있다.

3. 결과 및 고찰

이 연구에서는 강유전 고분자를 첨가 효과를 보기 위해 기준 전지의 사양을 반복된 실험을 거쳐 다음과 같이 설정하였다. P3HT에 대한 PCBM 조성비는 10:7로, 그리고 유기용매에 대한 P3HT:PCBM 농도비는 1.5 wt%로 하였다. 기준 시료로부터 측정된 태양전지 특성을 표 1에 보였다.

Table 1. Characteristic parameters of the reference P3HT:PCBM solar cell under study.

PCE(%)	0.965
Voc(V)	0.445
$J_{sc}(mA/cm^2)$	5.238
F·F(%)	41.333
R shunt(ohm)	2538.53
R series(ohm)	428.2991

측정된 효율은 일반 태양전지에 비해 낮다. 이는 강유전체에 의한 효과를 제외한 다른 요인을 제거하기 위해 일반적으로 사용되는 최적화 과정을 생략한 이유도 있다.

우리는 기준시료(0%) 첨가시료(5, 10, 20%)에 대한 광 흡수율을 측정하였으며 그 결과를 그림 1에 보였으며 그림 2는 표면 거칠기 측정 결과이다. 그림 2에 보이는 바와 같이 모든 시료에서 광 흡수층의 두께는

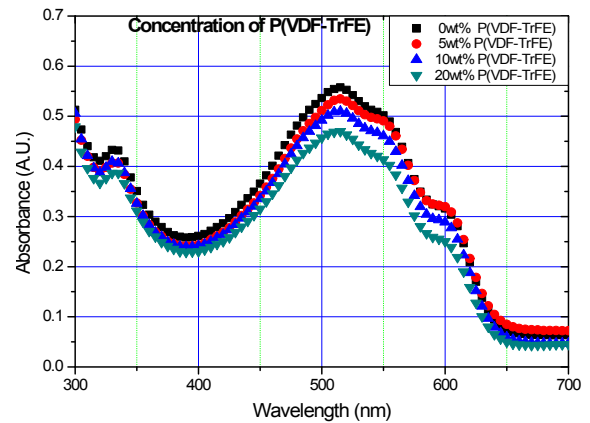


Fig. 1. Absorption characteristics of the photoactive blend layers with different P(VDF-TrFE) concentration ratio.

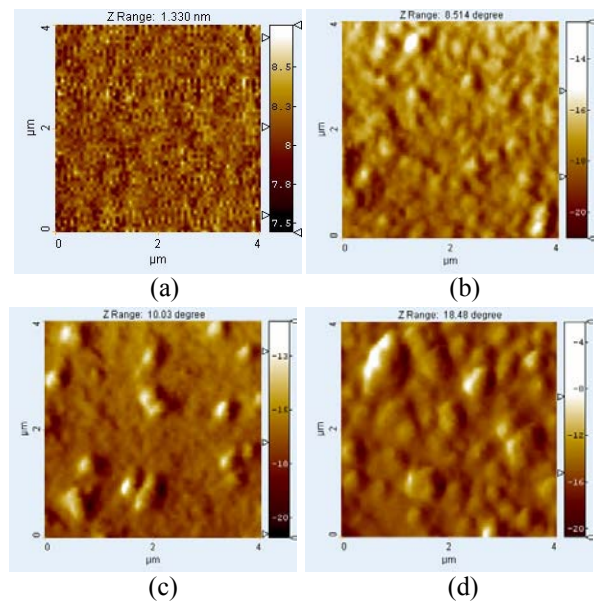


Fig. 2. Surface morphology of the photoactive blend layers with different P(VDF-TrFE) concentration ratio. (a) 0%, (b) 5%, (c) 10%, and (d) 20%.

123±3 nm로 나타나 두께 요인에 의한 광 흡수율 차이는 없다고 보았다. 이 경우 그림 1에서의 광 흡수율 차이는 (1) 강유전 고분자 점유로 인한 광 흡수의 감소, (2) 강유전 고분자에 의한 산란 효과 등으로 분석할 수 있다.

강유전 첨가 전지의 광 흡수율은 전파장 영역에 걸쳐 기준전지(0%) 보다 낮다. 광 흡수층의 표면을 원자 현미경으로 (그림 2)를 보면 열처리 과정 중 만들어진

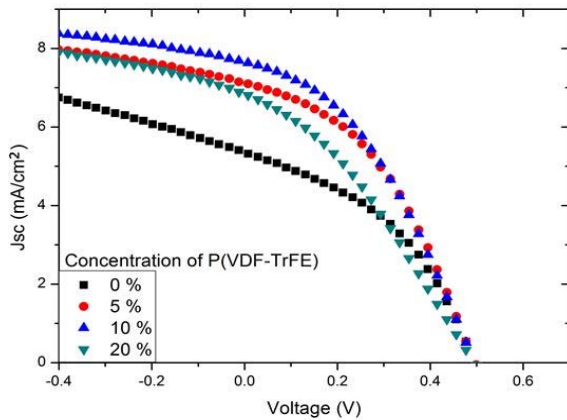


Fig. 3. J-V characteristics of cells with P3HT:PCBM blend with different P(VDF-TrFE) concentration.

Table 2. Characteristic parameters of cells with P3HT:PCBM blend with different P(VDF-TrFE) concentration ratio.

P(VDF-TrFE) weight ratio	0%	5%	10%	20%
PCE(%)	0.965	1.349	1.486	1.121
Voc (V)	0.445	0.465	0.493	0.491
Jsc (mA/cm ²)	5.238	7.0644	7.648	6.833
Fill Factor (%)	41.333	41.063	39.357	33.430
R shunt (ohm)	2538.53	2447.02	2469.36	1728.99
Rseries (ohm)	428.299	387.55	426.474	650.997

P(VDF-TrFE)가 덩어리의 형태로 분포됨을 알 수 있다. P(VDF-TrFE)는 가시광 영역에 걸쳐 광 흡수는 거의 없다 [11]. 따라서 강유전체 첨가에 따라 광 흡수율이 낮아지는 경향은 충분히 예견된다. Nalwa [12] 등은 광 흡수 물질과 강유전체 사이의 굴절률 불일치로 인해 20% 시료전지에서의 광 흡수율이 10% 시료전지에 비해 도리어 크게 측정되었다고 발표한 바 있다. 그러나 우리는 여러 차례의 검증 실험에서 이를 확인할 만한 결과를 얻지 못했다.

그림 3에 이 전지들로부터 측정된 전류-전압곡선을 보였다. 그림을 보면 광 흡수도는 P(VDF-TrFE)를 첨가에 따라 낮아진다. 따라서 빛 흡수로 인해 발생하는 광전류도 강유전체가 첨가할수록 작아져야 한다. 그러나 실험 결과는 예측과 반대로 P(VDF-TrFE)를 첨가할수록 광전류는 증가하여 10% 첨가전지에서는 기준

전지에 비해 50% 증가되었으며 이를 정점으로 20% 첨가 태양전지에서는 줄어드는 경향을 보였다. 흡수율 감소에도 불구하고 이렇게 효율이 증가되는 현상은 강유전체인 P(VDF-TrFE)가 유기태양전지의 효율을 증가시킨다는 설명 밖에는 해석할 방법이 없다.

그림 3의 결과에서 또 주목해야 할 현상은 효율 증강에 있어 개방전압의 기여는 거의 없었거나 있더라도 미미했다는 사실이다. 이 사실은 강유전 고분자를 첨가물 형태로 광 흡수층에 도핑시킬 경우 강유전 효과가 P3HT:PCBM 시스템의 에너지 준위 변화에 영향을 거의 주지 못함을 보여준다. 이 같은 결과는 강유전고분자를 버퍼층으로 삽입한 Yuan 등의 결과와 전혀 양상을 달리한다.

우리는 이 실험 결과들로 부터 중요한 두 가지 현상을 확인할 수 있었다. 첫째는 P(VDF-TrFE)의 첨가로 인해 유기태양전지의 효율이 향상된다는 것이고, 둘째는 첨가물 형태와 버퍼층 형태에 따라 효율 증강 메커니즘이 다르다는 사실이다.

첨가물 형태로 강유전 고분자가 분포할 경우 광 흡수층에서 발생하는 내부 전기장은 고전 쌍극자 모델을 통하여 계산된다. 강유전 쌍극자에 의해 흡수층 내 발생하는 국소 전기장은 $E = 4\pi\sigma f/\epsilon$ 로서 표현된다 [11]. 여기서 ϵ , σ , f 는 각각 상대유전율, 초전유도 표면 전하밀도($6 \mu\text{C}/\text{cm}^2$), 쌍극자에 의해 점유되는 체적 비율을 나타낸다. 이에 따른 내부 전기장을 고분자의 체적비 함수로 표시하면 $8 \times 10^3 \times f \text{ V}/\mu\text{m}$ 이다. 체적비 f 는 그림 2의 AFM 표면 사진으로 부터 추정할 수 있다. 5%, 10%, 20% 시료의 표면 점유비로부터 추정된 체적비는 각각 2%, 4%, 9%이었다. 이에 따라 계산한 전기장 세기는 각각 $16 \text{ V}/\mu\text{m}$, $32 \text{ V}/\mu\text{m}$, $63 \text{ V}/\mu\text{m}$ 로 일함수 차이에 의한 전기장 (수 $\text{V}/\mu\text{m}$)에 비해 한 자리 이상 증강되었음을 보여준다. 이는 전기장 차폐나 첨가 고분자 분포 등을 고려하더라도 기준전지에 비해 충분히 더 많은 엑시톤이 분리될 수 있음을 보여주고 있으며 이로 인해 더 많은 전하 캐리어가 형성될 수 있음을 보여주는 근거가 된다.

이러한 주장을 뒷받침하기 위해 우리는 기존의 광전류 측정으로부터 비방사 재결합을 추정하는 대신 비방사 재결합을 직접 측정함으로써 효율 증대의 원인을 보다 명확히 규명하고자 하였다. 태양전지에서 엑시톤 분리가 원활할 경우 광전류는 증가된다. 그러나, 그렇지 못할 경우 엑시톤은 비방사 재결합을 통해 phonon (열)로 에너지가 방출된다 [15,16]. 따라서 비방사 전이의 관측은 엑시톤 분리의 정도를 가늠하는 중요한 수단이 될 수 있다.

Table 3. Photoacoustic characteristics of cells with P3HT:PCBM blend with different P(VDF-TrFE) concentration ratio.

P(VDF-TrFE) weight ratio	0%	5%	10%	20%
450 nm	48.46	36.87	32.25	47.7
630 nm	16.5	14.8	12.5	15.6

광 음향(photoacoustic, PA) 측정법은 물질에서의 비방사 전이를 측정할 수 있는 가장 효과적인 방법 중 하나이다. 우리는 이 연구에서 엑시톤의 비방사 재결합 문제를 해결하기 위해 광 음향 측정법을 이용하였다. 유기 태양전지에서 비방사 전이 발생 요인 대상은 (1) 광 흡수층 (2) 광 흡수층을 제외한 구조물, (3) 첨가물인 강유전고분자 P(VDF-TrFE) 등이 있다. 그러나 첨가물인 P(VDF-TrFE)는 가시광 영역에서 흡수대가 없어 광 음향 발생 요인이 되지 못한다. 또한 입사광은 광 흡수층에만 흡수되도록 설계될 경우 구조물에 의해 발생하는 광 음향 세기는 최소화 할 수 있다. 설사 구조물에 의한 광 음향이 발생되더라도 모든 시료전지의 구조물은 동일하게 제작되었으므로 발생한 광 음향 세기는 상대 비교를 통해 기여도를 상쇄할 수 있다. 이 같은 분석에 따라 이 실험에서 측정되는 광 음향세기는 주로 흡수층 내에서 발생하는 비방사 전이에 의해 결정된다고 판단하였다.

표 3은 제작된 태양전지에 450 nm (2.76 eV), 630 nm (1.97 eV) 빛을 조사하여 발생하는 광 음향 신호 세기를 보인 결과이다. 표에서 보듯이 태양전지에서 발생하는 광 음향 신호세기는 P(VDF-TrFE)의 첨가비에 따라 민감하게 변하고 있어 강유전 고분자의 첨가비 방사 재결합에 영향을 주는지를 보여주고 있다. 표 3의 광 음향 세기는 강유전 고분자 첨가에 따른 흡수도차이를 고려하지 않은 값이다. 따라서 광 흡수에 대한 광 음향 세기의 비를 '광 음향 변환비'라고 정의하고 기준전지(0%)에서 이 값을 1로 놓는다면 강유전 첨가전지에서의 광 음향 변환비는 정확히 구해진다.

그림 4와 5는 이 결과와 전지의 효율 값들을 강유전 고분자 첨가비 함수로 보인 결과이다. 그림에서 보듯 강유전 고분자 첨가비에 따른 태양전지에서의 효율 변화 경향은 광 음향 세기 변화 경향과 정반대임을 알 수 있다. 즉 첨가비를 증가시키면 비방사 재결합이 감소하고, 이에 따라 효율이 증가됨을 명확히 보여주고 있다. 이는 강유전체 첨가로 엑시톤의 분리가 증가하여 효율 증가에 기여함을 보여주는 직접적인 증거로 볼 수 있다.

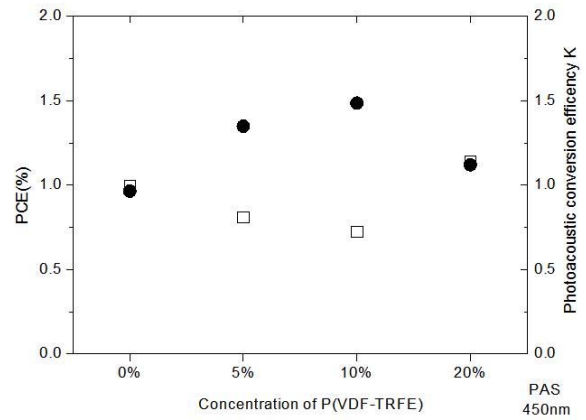


Fig. 4. Power conversion efficiency (●) and photoacoustic conversion efficiency (□) of cells in which active layer is added with P(VDF-TrFE). Photoacoustic measurement has been carried out under illumination of LED light (450 nm).

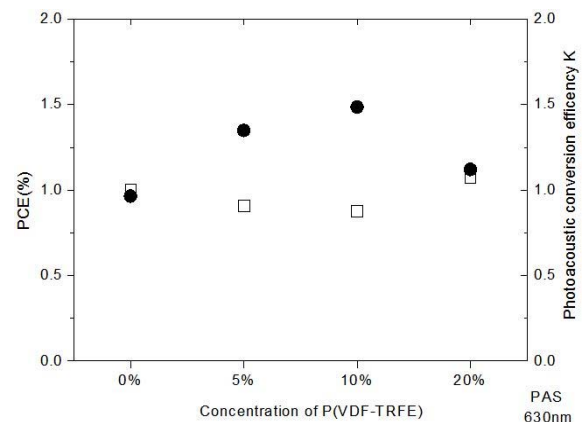


Fig. 5. Power conversion efficiency (●) and photoacoustic conversion efficiency (□) of cells in which active layer is added with P(VDF-TrFE). Photoacoustic measurement has been carried out under illumination of LED light (630 nm).

이 같은 해석은 첨가비 20% 시료에서의 결과를 보면 보다 명확하여 진다. P(VDF-TrFE)의 경우 쌍극자 문턱 농도를 넘는 경우 쌍극자의 상호작용 에너지가 증가하여 aggregate가 형성된다 [18]. 이 경우 aggregate는 쌍극자에 의해 유도되는 전기장을 차폐시켜 광 흡수층 내 엑시톤 분리를 원활하게 할 수 없도록 작용한다. 이에 따라 비방사 재결합률은 증가되어 효율의 감소를 일으키는 원인이 된다. 이는 그림 4와 5에서 20% 시료에서의 결과와도 일치한다. 광 음향을

통한 이 분야 연구는 아직 초기 단계이므로 엑시톤 재결합률과 광 음향 세기 사이의 관계를 정량적으로 분석한 연구는 없는 상황이다. 그러나 이 연구만으로도 강유전체 첨가로 인해 엑시톤이 효과적으로 분리되어 효율을 증가시킬 수 있다는 해석을 뒷받침하는데 부족함이 없을 것으로 본다.

4. 결론

P3HT:PCBM기반 유기태양전지에서 강유전 고분자인 P(VDF-TrFE)를 첨가함으로써 최대 50%의 효율 증대를 얻었다. 강유전 고분자를 광활성 물질 내 10%를 첨가하였을 단락전류는 47%의 증가를 보인 반면 개방전압은 10%의 증가에 그쳐 효율 증가의 주원인이 단락전류의 증가임을 보여주었다. 이 사실은 강유전 고분자로 인해 활성층 내 엑시톤들의 분리에 필요한 국소 전기장이 형성될 수 있었기 때문에 가능하였으며 이에 따라 더 많은 광전하들이 형성되었기 때문으로 해석되어진다. 이 같은 해석을 뒷받침하기 위해 우리는 비방사 과정인 엑시톤의 비방사 재결합을 광 음향 방법을 통해 처음으로 측정하였다. 이를 위해 강유전체 첨가비를 달리한 전지들로부터 전지 효율과 광 음향 변환을 변화 추이를 분석하였다. 그 결과 우리는 엑시톤의 비방사 재결합이 강유전 고분자 때문에 억제됨을 보았으며, 이 결과 전지 효율이 증가된다는 인과관계를 밝힐 수 있었다.

감사의 글

본 연구는 청주대학교 2012-2017 특별 연구과제 지원을 받았음. 태양전지 제작에 도움을 주신 단국대학교 장호정교수님과 연구팀에 감사를 드립니다.

REFERENCES

- [1] F. C. Krebs, *Sol. Energy Mater. Sol. Cells*, **93**, 394 (2004). [DOI: <http://dx.doi.org/10.1016/j.solmat.2008.10.004>]
- [2] C. J. Brabec, *Sol. Energy Mater. Sol. Cells*, **83**, 273 (2004). [DOI: <http://dx.doi.org/10.1016/j.solmat.2004.02.030>]
- [3] C. H. Bang, *The Korean Vacuum Society*, **16**, 167-171 (2007). [DOI: <http://dx.doi.org/10.5757/JKVS.2007.16.3.167>]
- [4] J. Y. Lee, *The Korean Physical Society*, **21**, 20-30 (2012).
- [5] D. Veldman, S.C.J. Meskers, and R.A.J. Janssen, *Adv. Funct. Mater.*, **19**, 1939-1948 (2009). [DOI: <http://dx.doi.org/10.1002/adfm.200900090>]
- [6] T. Kirchartz, K. Taretto, and U. Rau, *J. Phys. Chem. C*, **113**, 17958-17966 (2009). [DOI: <http://dx.doi.org/10.1021/jp906292h>]
- [7] D. Veldman, Ö. İpek, S.C.J. Meskers, J. Sweelssen, M. M. Koetse, S. C. Veenstra, J. M. Kroon, S. S. van Bavel, J. Loos, and R.A.J. Janssen, *J. Am. Chem. Soc.*, **130**, 7721-7735 (2008). [DOI: <http://dx.doi.org/10.1021/ja8012598>]
- [8] K. S. Nalwa, J. A. Carr, R. C. Mahadevapuram, H. K. Kodali, S. Bose, Y. Chen, J. W. Petrich, B. Ganapathysubramanian, and S. Chaudhary, *Energy Environ. Sci.*, **2012**, 7042 (2012). [DOI: <http://dx.doi.org/10.1039/C2EE03478F>]
- [9] K. Vandewal, K. Tvingstedt, A. Gadisa, O. Inganäs, and J. V. Manca, *Nature Mater.*, **8**, 904-909 (2009). [DOI: <http://dx.doi.org/10.1038/nmat2548>]
- [10] V. Shrotriya, Y. Yao, G. Li, and Y. Yang, *Appl. Phys. Lett.*, **89**, 063505 (2006). [DOI: <http://dx.doi.org/10.1063/1.2335377>]
- [11] Y. Yuan, T. J. Reece, P. Sharma, S. Poddar, S. Ducharme, A. Gruverman, Y. Yang, and J. Huang, *Nature Materials*, **10**, 296 (2011). [DOI: <http://dx.doi.org/10.1038/nmat2951>]
- [12] K. Asadi and P. de Bruyn, *Appl. Phys. Lett.*, **98**, 183301 (2011). [DOI: <http://dx.doi.org/10.1063/1.3587630>]
- [13] V. D. Mihailetschi, L.J.A. Koster, J. C. Hummelen, and P.W.M. Blom, *Phys. Rev. Lett.*, **93**, 216601-216604 (2004). [DOI: <http://dx.doi.org/10.1103/PhysRevLett.93.216601>]
- [14] L. B. Kreuzer, *Optoacoustic Spectroscopy and Detection*, Chap 1, *Y. H. Pao Ed.* (Academic Press, 1977)
- [15] B. Yang, J. Cox, Y. Yuan, F. Guo, and J. Huang, *Appl. Phys. Lett.*, **99**, 133302 (2011). [DOI: <http://dx.doi.org/10.1063/1.3643450>]
- [16] T. Kirchartz, K. Taretto, and U. Rau, *J. Phys. Chem. C*, **113**, 17958 (2009). [DOI: <http://dx.doi.org/10.1021/jp906292h>]
- [17] D. Shvydka and V. G. Karpov, *Appl. Phys. Lett.*, **92**, 053507 (2008). [DOI: <http://dx.doi.org/10.1063/1.2835972>]