

# ZnO 나노 분말 코팅 기반 건식전사 그래핀 전극 제작 및 유기태양전지 응용

조영수<sup>a</sup> · 우채영<sup>a</sup> · 홍순규<sup>a</sup> · 이형우<sup>a,b,c,\*</sup>

<sup>a</sup>부산대학교 나노융합기술학과, <sup>b</sup>부산대학교 나노에너지공학과, <sup>c</sup>부산대학교 에너지융합기술연구소

## Partially Dry-Transferred Graphene Electrode with Zinc Oxide Nanopowder and Its Application on Organic Solar Cells

Yeongsu Jo<sup>a</sup>, Chae Young Woo<sup>a</sup>, Soon Kyu Hong<sup>a</sup> and Hyung Woo Lee<sup>a,b,c,\*</sup>

<sup>a</sup>Department of Nano Fusion Technology, Pusan National University, Busan 46241, Republic of Korea

<sup>b</sup>Department of Nanoenergy Engineering, Pusan National University, Busan 46241, Republic of Korea

<sup>c</sup>Research Center of Energy Convergence Technology, Pusan National University, Busan 46241, Republic of Korea

(Received July 16, 2020; Revised July 28, 2020; Accepted July 28, 2020)

**Abstract** In this study, partially dry transfer is investigated to solve the problem of fully dry transfer. Partially dry transfer is a method in which multiple layers of graphene are dry-transferred over a wet-transferred graphene layer. At a wavelength of 550 nm, the transmittance of the partially dry-transferred graphene is seen to be about 3% higher for each layer than that of the fully dry-transferred graphene. Furthermore, the sheet resistance of the partially dry-transferred graphene is relatively lower than that of the fully dry-transferred graphene, with the minimum sheet resistance being 179 Ω/sq. In addition, the fully dry-transferred graphene is easily damaged during the solution process, so that the performance of the organic photovoltaics (OPV) does not occur. In contrast, the best efficiency achievable for OPV using the partially dry-transferred graphene is 2.37% for 4 layers.

**Keywords:** Zinc oxide nanopowder, Graphene, Dry transfer, Organic solar cells

### 1. 서 론

그래핀은 탄소동소체 중 하나로서 육각 형태의 2D 평면 구조를 가지고 있다[1]. 그래핀은 기계적 강도가 우수하고 좋은 전기전도도와 투과도를 가지고 있어[2] FET(Field-Effect Transfer)[3], 태양전지[4], 슈퍼커패시터[5], 수소저장 물질[6] 등으로 활용된다.

그래핀은 화학기상증착법(Che-mical Vapor Deposition)으로 합성되는데, 구리(Cu) 호일 또는 니켈(Ni) 호일 등 금속 촉매로 합성되기 때문에 원하는 기판으로 옮기는 그래핀 전사 공정이 필요하다. 그래핀 전사 공정은 용액 사용 여부에 따라 습식 전사와 건식 전사로 분류되며[7], 습

식 전사는 Poly(methyl-methacrylate) (PMMA)를 지지체로 사용하여 그래핀을 금속촉매에서 원하는 기판으로 전사하며, 그래핀의 결함을 최소화할 수 있는 전사 방법이다[8]. 대부분 투명전극으로서 소자에 응용하기 위해 주로 사용하는 방법이지만, 공정 과정이 복잡하고, 전사할 기판이 용액에 노출되어 전사 공정 중 용액에 반응하는 물질이나 기판을 사용 할 수 있는 제약이 생긴다.

건식 전사는 열 박리테이프를 그래핀의 지지체로 사용하여 그래핀을 전사하는 방법으로 그래핀과 테이프를 기계적인 힘을 주어 테이프의 접착력으로 그래핀에 부착한다[9]. 따라서 건식 전사 된 그래핀은 표면에 기계적인 결합이 발생하여[10] 테이프의 잔여물이 남아[11] 소자 특성

- 조영수·우채영·홍순규: 학생, 이형우: 교수

\*Corresponding Author: Hyung Woo Lee, TEL: +82-51-510-6115, FAX: +82-51-514-2358, E-mail: LHW2010@pusan.ac.kr

에 악영향을 주게 되고, 그래핀과 기판 사이의 결합력이 약해진다. 그러나 대면적으로 그래핀을 전사하기 쉽고, 공정이 간단하여 대량생산에 가능하다. 따라서 본 논문에서는 습식전사와 건식전사를 결합한 부분 건식전사공정(Partially Dry Transfer)을 제시하여 완전 건식전사의(Fully Dry Transfer) 한계를 해결하고자 한다. 부분 건식전사 공정은 한 층의 습식 전사된 그래핀 위에 다층의 그래핀을 건식 전사하는 방법이다.

한편, 유기태양전지는 유기물을 광활성층으로 사용하는 태양전지로 전자와 정공의 이동방향에 따라 정구조(Conventional structure)와 역구조(Inverted structure)로 구분되며, 본 논문에서는 역구조 유기태양전지를 사용하고 자 한다. 역구조 소자의 구조는 투명전극/ETL(Electron Transport Layer)/광활성층/HTL(Hole Transport Layer)/금속전극으로 구성되며, 투명전극으로서 건식 전사된 그래핀을 사용한다.

다양한 투명전극을 사용한 역구조 유기태양전지에 관한 연구는 꾸준히 진행되어 왔고[12, 13], 그 중 그래핀 기반 유기태양전지는 습식 전사된 그래핀을 사용하여 소자를 제작한다[14]. Park의 연구에서는 PTB7:PC<sub>71</sub>BM 광활성층 기반 소자를 제작하여 7.37%의 성능을 보였고[15], 이는 ITO 기반 소자와 유사하다. 그러나 건식 전사 공정 기반 그래핀을 사용한 유기태양전지에 관한 연구는 미비하며, 그 성능 또한 확인되지 않았다.

본 논문에서는 건식 전사된 그래핀을 유기태양전지소자에 응용하여 성능을 확인하고자 한다. 습식 전사된 한 층의 그래핀 위에 다층의 그래핀을 건식 전사하여 산화아연(Zinc Oxide) 나노 분말의 균질한 코팅을 이루고자 한다. 또한, 이 전극을 이용한 역구조 유기태양전지 소자를 제작하여 성능을 평가하고 기존 건식방사만 사용한 경우와 비교하고자 한다.

## 2. 실험 방법

### 2.1 그래핀 합성

그래핀은 화학기상증착법으로 합성하였다. 촉매 금속으로 구리 호일(Copper foil, JX Nippon Mining & Metals Corporation)을 사용하였으며, 석영 챔버의 온도를 20°C/min의 승온 속도로 1030°C까지 퍼니스(Furnace, ISAC research)로 가열하였고, 수소(H<sub>2</sub>) 30 sccm으로 30분간 전처리 과정을 거쳤다. 이후 1030°C에서 메탄(CH<sub>4</sub>) 가스 50 sccm, 수소(H<sub>2</sub>) 가스 30 sccm을 30분간 주입하여 그래핀을 합성하였다.

### 2.2 그래핀 완전 건식 전사

구리 호일에 성장된 그래핀 위에 박리온도 90°C의 열 박리테이프를 부착한 후, 열 박리테이프/그래핀/구리호일을 구리 에칭 용액(FeCl<sub>3</sub>, Alfa Aesar)에 담가 구리호일을 제거하며 DI water로 3번 세척한다. 60°C에서 열 박리테이프에 남아있는 수분을 제거한 후, 열 박리테이프/그래핀에 그래핀/구리호일을 부착하고 구리 제거 과정을 거치며 그래핀을 적층 한다. 유리 기판에 열 박리테이프/다층 그래핀을 부착한 후, 110°C로 가열된 라미네이터로 기계적 압력을 가하여 박리한다.

### 2.3 그래핀 부분 건식 전사 및 도핑

PMMA(Sigma Aldrich, M<sub>w</sub>:~120000 g/mol)를 Anisol(DAEJUNG)에 용해시켜 7.5 wt%의 용액을 만들고, 구리 호일에 합성된 그래핀 위에 2000 rpm의 속도로 스핀코팅하며 60°C의 온도에서 건조한다. PMMA/그래핀/구리호일을 구리 에칭 용액으로 구리를 제거하고 증류수(Deionized Water)로 3번 세척한다. PMMA/그래핀을 유리 기판(2.5×2.5 cm, AMG)에 전사한 후 60°C에서 건조하며, 최종적으로 아세톤(Acetone, DAEJUNG)에 40분간 담가 PMMA를 제거한다. 한 층 전사된 그래핀 위에 건식전사를 진행하여 그래핀을 적층한다.

그래핀 도핑은 그래핀/유리기판에 TFMS(tri-fluoromethanesulfonic acid)용액을 5000 rpm으로 스핀코팅하며 100°C에서 건조한다.

### 2.4 카운터 전극 제작

그래핀/유리기판의 카운터 전극 영역에 Thermal evaporator(ISAC research)로 은(Ag) 전극을 증착한다. 8.0×10<sup>-6</sup> Torr의 진공도에서 1.0 Å/s의 증착속도로 150 nm의 두께의 박막을 제작한다.

### 2.5 산화 아연 나노 분말 코팅

IPA(Isopropyl alcohol, DAEJUNG)에 용해된 산화아연

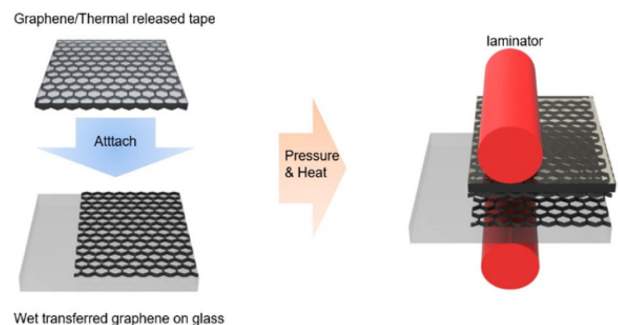


Fig. 1. Schematics of partially dry transfer process.

(Zinc oxide) 나노 분말(2.5 wt%, 1-material)은 상업적으로 구매되었다. 그래핀/유리기판을 플라즈마 시스템(FEMTO SCIENCE) 챔버에 넣어  $5.0 \times 10^{-3}$  Torr의 진공환경을 만든다. 질소( $N_2$ ) 가스를 45 sccm을 주입하며 30 W 3초간 처리한다. 표면 처리가 끝난 그래핀/유리기판 위에 Zinc oxide 분말을 3000 rpm으로 코팅하며  $120^\circ C$ 에서 건조한다.

## 2.6 그래핀 기반 유기태양전지 제작

도너 물질인 PTB7(99.5%, EM index) 5 mg과 억셉터 물질인 PC<sub>71</sub>BM(99.5%, OSM) 15 mg을 혼합하며, 용제인 클로로벤젠(Chlorobenzene, Sigma Aldrich) 970  $\mu$ l과 첨가제인 DIO(Diiodooctane, Sigma Aldrich) 30  $\mu$ l로  $60^\circ C$ 에서 하루 동안 용해시킨다.

Zinc oxide가 코팅된 그래핀 전극을 질소 환경의 글로브 박스에 넣은 후 PTB7:PC<sub>71</sub>BM 용액을 1300 rpm으로 스핀 코팅한다. 카운터 전극 영역에 코팅된 부분을 클로로벤젠을 사용하여 제거하며, Thermal evaporator로 5.5 nm 두께의 MoO<sub>3</sub>(ITASCO)와 100 nm의 은(RNA Korea)을  $9.0 \times 10^{-6}$  Torr의 진공환경에서 증착한다.

## 2.7 전극 특성 측정

그래핀 존재 여부를 확인하기 위해 라만 스펙트럼을 측정하였으며, 라만분광기(Raman spectroscopy, Uninano tech)로 532 nm의 파장에서 SiO<sub>2</sub>(300 nm) 기판에 전사된 그래핀을 측정한다.

그래핀의 면저항을 측정하기 위해, 4 point probe(AiT, CMT-ST2000N) 기기를 사용하며, 유리기판에 1 mm 간격으로 9개의 포인트의 평균을 구하여 면저항을 계산한다.

투과도는 자외선 가시광선 분광 분석기(Ultra violet-visible spectroscopy, EVO 210)를 사용하여 450 nm에서 700 nm의 가시광선 영역에서 측정한다.

## 2.8 산화 아연 박막 형상 분석

그래핀 위층에 형성된 산화아연 박막의 형상을 분석하기 위해 SEM(Hitach, S4800)을 사용한다.

## 2.9 유기태양전지 성능 평가

Solar Simulator는 Xeon lamp(San-ei Electric)과 멀티미터(Keithley, 3706A)로 구성되어 있으며, 각 소자의 개방전압( $V_{OC}$ , open circuit voltage), 단락전류( $J_{SC}$ , short circuit current), Fill Factor, 효율(PCE, Power conversion efficiency), 직렬저항( $R_s$ , series resistance)를 측정한다.

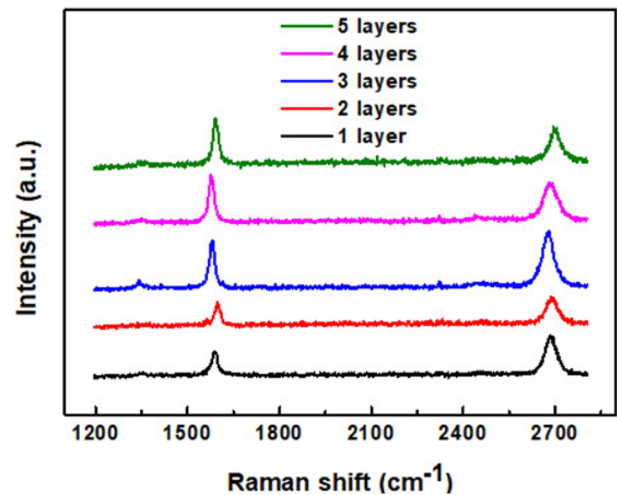


Fig. 2. Raman spectrum of dry-transferred graphene.

## 3. 결과 및 고찰

### 3.1 부분 건식 전사된 그래핀의 라만 분석

그림 2에서 부분 건식 전사된 그래핀의 라만 스펙트럼에 따르면[16] 각각  $1350\text{ cm}^{-1}$ ,  $1580\text{ cm}^{-1}$ ,  $2680\text{ cm}^{-1}$  영역에서 G피크와 2D피크를 확인할 수 있었으며, 모든 그래핀 층에 D피크가 약하게 발생하였고, 이는 건식 전사된 그래핀의 결함 때문이다. G피크는 그래핀이 적층 됨에 따라 증가하는 경향을 보이며, 5층에서 최대값을 보였으며,  $I_G/I_{2D}$  값은 1층에서 0.56, 2층에서 0.80, 3층에서 0.83, 4층에서 0.96, 5층에서 1.1로 증가하였다. Van Tu Nguyen의 논문에서  $I_G/I_{2D}$  값은 1층의 그래핀에서 0.5 값을 나타내며 3층 이상의 그래핀에서는 1 이상의 값을 가지며[17], 이는 그래핀의 적층 됨에 따라 G피크가 증가하기 때문이고 다층의 그래핀이 기판에 온전히 전사되었음을 확인할 수 있다. 결론적으로, 부분 건식 전사된 그래핀의 존재 여부를 확인할 수 있었다.

### 3.2 그래핀 전극 특성

완전 건식 전사한 그래핀은 표 1과 같이 1층의 경우 면저항은  $4120\ \Omega/\text{sq}$ 이며, 적층 됨에 따라 감소하여  $690\ \Omega/\text{sq}$ ,  $231\ \Omega/\text{sq}$ 로 나타났으나, 4층 이상에서  $280\ \Omega/\text{sq}$ ,  $271\ \Omega/\text{sq}$ 로 나타났다. 그래핀은 구리 호일의 결정에서부터 성장하기 때문에 결정립계가 존재하며, 3층 이상의 그래핀이 적층 됨에 따라 결정립계가 겹치게 되며, 이에 따라 전기전도도가 감소하게 된다[18].

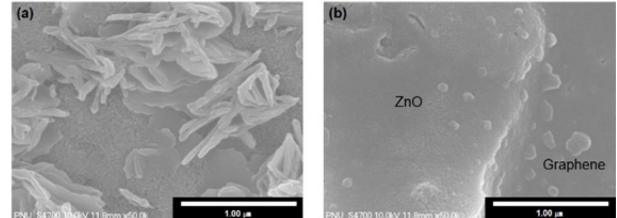
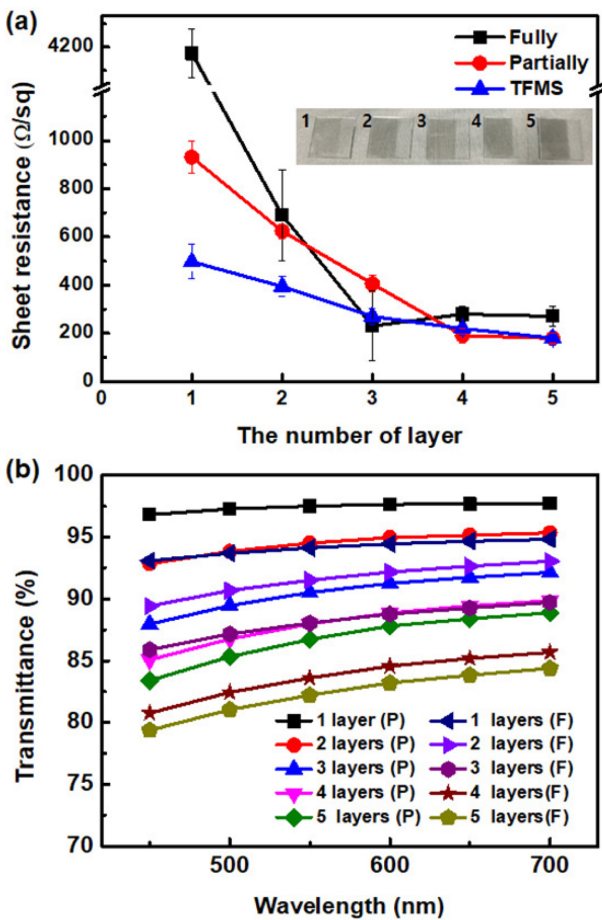
부분 건식 전사한 그래핀의 경우 그림 3 (a)와 같이 그래핀 적층에 따라  $931\ \Omega/\text{sq}$ ,  $624\ \Omega/\text{sq}$ ,  $406\ \Omega/\text{sq}$ ,  $191\ \Omega/\text{sq}$ ,  $179\ \Omega/\text{sq}$ 로 나타났으며, 감소하는 경향성을 보였다. 또한, 완전 건식 전사된 그래핀보다는 향상된 면저항을 나타내

**Table 1. Sheet resistance of fully-dry transfer and partially dry transfer and TFMS doping**

	Fully ( $\Omega/\text{sq}$ )	Partially ( $\Omega/\text{sq}$ )	TFMS doping ( $\Omega/\text{sq}$ )
1 layer	4120 ( $\pm 320$ )	931 ( $\pm 65$ )	497 ( $\pm 71$ )
2 layers	690 ( $\pm 190$ )	624 ( $\pm 30$ )	394 ( $\pm 40$ )
3 layers	231 ( $\pm 145$ )	406 ( $\pm 33$ )	270 ( $\pm 31$ )
4 layers	280 ( $\pm 105$ )	191 ( $\pm 31$ )	219 ( $\pm 25$ )
5 layers	271 ( $\pm 42$ )	179 ( $\pm 21$ )	180 ( $\pm 27$ )

**Table 2. Change of Sheet resistance before and after IPA spin-coating in fully and partially transferred graphene**

	Fully (3 layer)	Partially (3 layer)
Before	320 ( $\pm 42$ )	289 ( $\pm 51$ )
After	614 ( $\pm 78$ )	389 ( $\pm 89$ )

**Fig. 4. SEM image of Zinc oxide thin film on (a) fully transferred graphene and (b) partially transferred graphene.****Fig. 3. (a) Sheet resistance of fully and partially dry transferred graphene and doped graphene, (b) Transmittance of fully dry transferred graphene and partially dry transferred graphene according to the number of layers.**

있는데, 이는 그래핀과 기판과의 부착력 때문이라 예상된다[19]. 유리기판과 그래핀의 반데르발스(van der Waals) 결합보다는 그래핀과 그래핀과의 반데르발스 결합이 더 강하기 때문에 전사과정에서 결합이 더 적게 발생하기 때문이다.

그래핀 적층 수에 따른 투과도를 그림 3 (b)에서 확인할 수 있으며, 완전 건식 전사한 그래핀의 경우 550 nm의 파장에서 1층의 그래핀의 투과도는 93%로 나타났으며, 1층 씩 적층 됨에 따라 약 3%씩 감소하여 5층의 그래핀의 투과도는 82%로 확인된다. 부분 전사된 그래핀은 완전 전사된 그래핀에 비해 투과도가 높게 나타났으며, 1층의 그래핀의 경우 3%의 차이가 있었으며, 4층의 그래핀의 경우 최대 5%의 투과도 차이가 나타났다. 이는 완전 전사 그래핀의 경우 그래핀의 결합으로 인해 투과도가 감소한 것으로 예상된다.

IPA는 산화아연 용액의 용제물질로서 사용되며, 그래핀 위 층의 용액 공정을 한다. 따라서 용액 공정 후 그래핀이 손상없이 유지되는지 확인하기 위해 표 2와 같이 IPA 용액 스프인코팅을 처리하였으며, 완전 건식 전사한 그래핀은 면저항이 320  $\Omega/\text{sq}$ 에서 614  $\Omega/\text{sq}$ 로 91% 증가하였으며, 이에 비해 부분 건식전사한 그래핀의 경우 289  $\Omega/\text{sq}$ 에서 389  $\Omega/\text{sq}$ 로 34% 증가하였다. 따라서 완전 건식 전사된 그래핀의 경우 유리 기판에 제대로 부착되지 못하고 용액 공정 중 손상됨을 확인할 수 있다.

그래핀의 전기전도도를 향상시키기 위하여 TFMS 도핑을 하였고, 표 1에서 1층의 그래핀의 면저항은 928  $\Omega/\text{sq}$ 에서 497  $\Omega/\text{sq}$ 로 46%이상 감소하였다. 그래핀이 적층 됨에 따라 도핑효과는 감소하여 3층의 그래핀에서는 면저항이 406  $\Omega/\text{sq}$ 에서 33% 감소하여 270  $\Omega/\text{sq}$ 로 나타났다. 4층 이상의 그래핀에서는 면저항이 소량 상승하여 도핑 효과가 없었으며, 4층 이상의 그래핀은 표면을 유지하지 못하고 박리된 것으로 판단된다.

### 3.3 그래핀-산화 아연 박막 계면

그래핀 위에 코팅된 산화아연 나노 분말은 그림과 같이

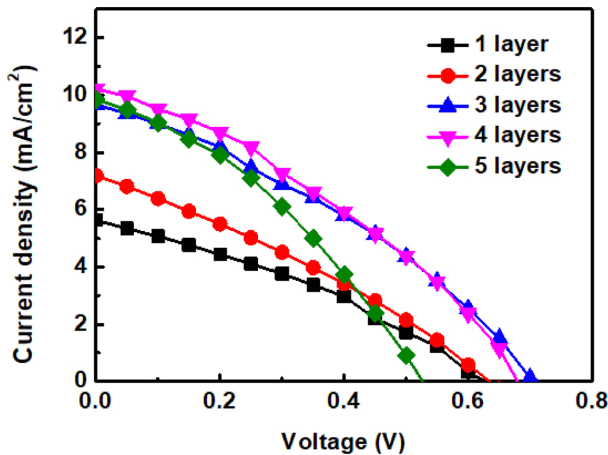


Fig. 5. I-V curve of OPV using partially dry transferred graphene.

형성되었음을 확인할 수 있다. 산화아연 박막은 유기태양전지에 전자전달층으로 사용되는 물질로서 균질한 표면 형상이 요구되며, 그림 5 (a)의 경우 완전 건식 전사된 그래핀 위에 불균질하게 표면이 형성됨을 확인할 수 있다. 그에 비해 부분 건식 전사된 그래핀은 그림 5 (b)와 같이 비교적 균질한 표면의 산화 아연 박막이 형성되었다.

### 3.4 건식 전사 그래핀 기반 유기태양전지 성능

그래핀 적층에 따른 유기태양전지 소자 성능은 표에서 확인할 수 있다. 완전 건식전사를 기반 유기태양전지의 소자 성능은 측정되지 않았다. 이는 유리 기판과 기계적으로 압착된 그래핀의 반데르발스 결합이 약하기 때문에 용액 코팅 공정 중 그래핀이 박리되어 전극으로서 역할을 못하기 때문이다.

부분 건식전사 그래핀의 경우 그래핀이 적층 됨에 따라 직렬저항은 감소하는 것을 확인할 수 있다. 1층의 그래핀의 효율은 1.19%로 확인되었으며, 직렬 저항이 크게 나타났기 때문에 전체적인 소자 성능이 떨어진 것으로 사료된다. 그래핀이 적층 됨에 따라 소자 효율은 각 층마다 1.19%, 1.39%, 2.32%, 2.37%로 향상되다가 5층에서는 1.83%로 효율이 감소하는 경향을 보인다. 이는 열 박리테이프 적층에 따라 잔여물이 증가하여 소자 성능에 악영향을 주기 때문이다. 특히 개방전압이 4층에서는 0.680 V에서 5층에서 0.527 V로 크게 감소하는 현상을 확인할 수 있다. 또한, 그래핀의 층수가 증가함에 따라 Fill factor가 증가하는 경향을 보이며, 이는 표3에서 직렬저항이 감소하였기 때문이다. 그러나 2층의 그래핀에서는 1층의 그래핀에 비해 fill factor가 감소하였는데, 소자의 결합에 엑시톤의 재결합이 발생하거나 누설 전류가 발생하였기 때문이라 예상된다.

Table 3. Performance of inverted OPV according to number of layer by partially dry transfer (cell area 0.05 cm<sup>2</sup>)

layers	Jsc (mA/cm <sup>2</sup> )	Voc (V)	Fill factor	PCE (%)	Rs (Ω)
1	5.63	0.629	0.336	1.19	1240
2	7.19	0.635	0.305	1.39	630
3	9.67	0.705	0.340	2.32	593
4	10.2	0.680	0.342	2.37	411
5	9.86	0.527	0.353	1.83	309

부분 건식 전사 기반 유기태양전지의 최고 효율은 2.37%이며, ITO 기반 유기태양전지의 효율에 비해 상당히 떨어진다. 이는 열 박리 테이프에 존재하는 기존의 잔여물 때문이며, 누설전류를 발생시키거나 균질한 박막 형성을 방해하여 소자의 성능을 떨어뜨리게 된다. 그러므로, 앞으로의 연구에서는 열 박리테이프의 잔여물을 최소화할 수 있는 그래핀 전사 방법과 그래핀 손상 없이 잔여물을 제거할 수 있는 방법에 대한 연구가 필요할 것이다.

## 4. 결 론

본 논문에서는 그래핀의 부분 건식 전사 공정에 대해 연구하였으며, 이를 응용한 유기태양전지를 제작하여 그 성능을 평가하였다.

그래핀의 상업화 및 대량생산을 위한 건식 전사공정이 연구되고 있지만, 습식 전사에 비해 투명전극으로서의 그래핀의 성능이 떨어져 그 응용에 한계가 있었다. 이를 해결하기 위해 부분 건식 전사를 이용하였고, 그래핀은 기존의 완전 건식 전사 그래핀에 비해 전기전도도와 투과도가 상대적으로 높게 나타났으며, 이에 따라 소자 응용의 가능성을 확인하였다.

또한, 기존의 완전 건식 전사된 그래핀은 기판과의 반데르발스 결합이 약해 용액 공정 시 쉽게 전극이 떨어져 나가는 문제가 있었으며, 완전 건식 전사 그래핀 기반 유기태양전지의 소자성능 평가가 불가능하였다. 부분 건식 전사 그래핀은 용액공정시 그래핀 전극이 기판에 흡착되어 있으며, 소자 제작 시 최대 2.37%의 효율을 얻을 수 있었다. 따라서 건식 전사를 사용한 그래핀 전극은 유기태양전지 투명전극 소자로서 응용될 수 있으며, 열 박리테이프 잔여물 등 추가적인 문제를 해결한다면 ITO에 준하는 소자 성능을 얻을 수 있을 것이다.

## 감사의 글

이 과제는 부산대학교 기본연구지원사업(2년)에 의하여 연구되었음.

## References

- [1] A. K. Geim: Science, **324** (2009) 1530.
- [2] Y. Zhu, S. Murail, W. Cai, X. Li, J. W. Suk and J. R. Potts: Adv. Mater., **22** (2010) 3906.
- [3] B. K. Sharma and J. Ahn: Solid-State Electron., **89** (2013) 177.
- [4] H. Park, J. A. Rowehl, K. K. Kim, V. Bulovic and J. Kong: Nanotechnology, **21** (2010) 505204.
- [5] Y. B. Tan and J. Lee: J. Mater. Chem. A, **1** (2013) 14814.
- [6] V. Tozzini and V. Pellegrini: Phys. Chem. Chem. Phys., **15** (2013) 80.
- [7] J. Kang, D. Shin, S. Bae and B. H. Hong: Nanoscale, **4** (2012) 5527.
- [8] A. Reina, H. Son, L. Jiao, B. Fan, M. S. Dresselhaus, Z. Liu and J. Kong: J. Phys. Chem. C, **112** (2008) 17741.
- [9] S. Lee, Y. Jo, S. Hong, D. Kim and H. W. Lee: Current Optics and Photonics, **1** (2017) 7.
- [10] X. Liang, B. A. Sperling, I. Calizo, G. Cheng, C. Ahn. Hacker: ACS Nano, **11** (2011) 9144.
- [11] C. Woo, Y. Jo, S. Hong and H. W. Lee; J. Korean Powder Metall. Inst., **26** (2019) 11.
- [12] M. Song, D. S. You, K. Lim, S. Park, S. Jung, C. S. Kim, D. Kim, J. Kim, J. Park, Y. Kang, J. Heo, J. H. Park and J. Kang: Adv. Funct. Mater., **23** (2013) 4177.
- [13] S. Jung, S. Lee, M. Song, D. Kim, D. S. You, J. Kim, C. S. Kim, T. Kim, K. Kim, J. Kim and J. Kang: Adv. Energy Mater., **4** (2014) 1300474.
- [14] H. Park, P. R. Brown, V. Bulovic and J. Kong: Nano Lett., **12** (2012) 133.
- [15] S. Jung, J. Lee, J. Seo, U. Kim, Y. Choi and H. Park: Nano Lett., **18** (2018) 1337.
- [16] M. S. Dresselhaus, A. Jorio, M. Hofmann, G. Dresselhaus and R. Saito: Nano Lett., **10** (2010) 751.
- [17] V. T. Nguyen, H. D. Le, V. C. Nguyen, T. T. T. Ngo, D. Q. Le, X. N. Nguyen and N. M. Phan: Adv. Nat. Sci., **4** (2013) 035012.
- [18] A. W. Tsen, L. Brown, M. P. Levendorf, F. Ghahari, P. Y. Huang, R. W. Havener, C. S. Ruiz-Vargas, D. A. Muller, P. Kim and J. Park: Science, **336** (2012) 1143.
- [19] S. Yang, S. Choi, F. O. O. Ngome, K. Kim, S. Choi and C. Kim: Nano Lett., **19** (2019) 3590.