

염료 흡착 조건에 따른 염료감응형 태양전지의 전기적 특성

김지웅, 이경섭, 최용성^a

동신대학교 전기공학과

Electrical Characteristics of Dye Sensitized Solar Cell According to Condition of Dye Adsorption

Ji-Woong Kim, Kyung-Sup Lee, and Yong-Sung Choi^a

Department of Electrical Engineering, DongShin University, Naju 58245, Korea

(Received October 21, 2015; Revised October 21, 2015; Accepted October 24, 2015)

Abstract: This paper is designed to find out where power reaches the highest point as the load of solar cells varies. In addition, the current and power were measured when irradiation changes, and the correlation between current and power was investigated. On top of that, experiments were conducted with the light volume kept constant and with the incoming light angle changing in order to figure out the incoming light angle that produces the most power and to conduct analyses. It was ascertained that if the load increases, the current decreases and the voltage increases. Since the power of 0.9828[W] was the highest when measurements were done, it can be said that when a load of 30[%] is applied to the solar cells, they are the most efficient.

Keywords: DSSC, Solar cell, Irradiation, Dye adsorption, I-V characteristics

1. 서론

2005년 2월 교토의정서를 발효시켜 CO₂ 배출량을 감축하도록 요구하고 있다. 우리나라는 2013년부터 CO₂ 규제 대상국에 포함되어 CO₂ 감축에 대한 부담은 더욱 가중될 것이다 [1,2].

태양광 에너지, 풍력 에너지, 조력 에너지, 수소 에너지, 연료전지, 폐기물 에너지 등 여러 가지 신재생 에너지 중에서 특히 무한하다고 할 수 있는 태양광 에너지는 일조량이 풍부한 우리나라 환경에 가장 적합한 형태로 주목받고 있어 실리콘계 박막태양전지, CIGS 박막 태양전지, 염료감응형 태양전지 (dye-sensitized

solar cell, DSSC) 등 다양한 종류의 태양광 전지가 개발·연구되고 있다 [3].

현재 높은 효율과 양산화 제조공정의 확보 등으로 가장 널리 쓰이고 있는 결정질 실리콘 태양전지는 원료값 폭등과 복잡한 제조공정, 비싼 제조단가, 태양광 추적 시스템의 필요, 구름이 낀 흐린 날에는 사용할 수 없다는 단점 등으로 인하여 경제성이 한계에 이르렀다.

이러한 결정질 실리콘 태양전지를 대체할 수 있는 차세대 태양전지 중 하나로 염료감응형 태양전지가 꼽힌다. 염료 감응형 태양전지는 1991년 스위스의 Michael Gratzel 교수팀에 의해 개발된 이래로 세계적으로 지속적인 연구가 진행되고 있다. 제조 단가는 Si 태양전지의 1/3~1/5 정도로 저렴하며, 투명성을 갖고, 광 입사각에 둔감한 장점을 바탕으로 다양한 응용이 가능하여 상용화에 유리한 특징을 갖고 있다 [4,5]. 염료감응형 태양전지는 전기, 화학, 재료, 금속 등의 분

a. Corresponding author; yschoi67@dsu.ac.kr

야가 복합적으로 융합된 것으로 각 분야별로 수많은 연구가 진행되고 있으며, 크게 고효율화와 저가화의 두 가지 목적으로 진행되고 있다 [6].

현재까지 염료감응형 태양전지는 최고 11[%] 정도의 효율을 기록하고 있으며, 이는 이론적 효율인 33[%]에 현저히 못 미치는 수준이다. 따라서 광전변환효율을 증가시키기 위하여 여러 방향으로 연구가 진행되고 있다. TiO_2 보다 더 높은 전도대를 갖는 산화물을 코팅하여 TiO_2 /염료/전해질 계면에서 발생하는 재결합 반응을 감소시키는 연구 [7], 금속 산화물질들과 함께 TiO_2 광전극의 표면 처리에 대한 연구 [8], 염료의 구조를 개선하거나 개질화하여 태양전지의 변환효율을 향상시키는 연구 [9], 입자가 작은 TiO_2 층에 입자가 큰 TiO_2 층을 코팅하여 광 산란층을 추가함으로써 광전효율을 높이는 연구 [10], 전자 차단층 도입 [11], 염료를 양자점으로 대체하는 방법에 대한 연구 [12] 등이 이루어지고 있다.

또한 염료감응형 태양전지의 공정 소요 시간을 단축시키기 위한 연구 [13]도 이루어지고 있다. 따라서, 본 논문에서는 염료감응형 태양전지의 전체 제조 공정 중 염료 흡착 시에 소요되는 시간 및 흡착 온도와 전기적 출력 특성과의 관계를 비교 분석하여 최적의 염료 흡착 시간과 온도를 실험적으로 구하였다. 또한, 이 결과를 바탕으로 전체 공정 시간의 30~40[%]가 소요되는 염료 흡착시간의 단축 가능성을 분석하였다. 마지막으로 전자의 재결합 방지를 위하여 FTO glass 및 광전극에 $TiCl_4$ 를 처리하였을 경우에는 염료흡착 조건에 따라 전기적 출력 특성이 어떻게 변화하는지를 분석하였다 [14].

2. 실험 방법

2.1 실험 방법 및 장치

2.1.1 방법

본 연구에서는 염료 감응형 태양전지를 제작 시 염료 흡착 온도를 10[°C], 20[°C], 30[°C], 40[°C], 50[°C]로 나누고, 각 온도 조건별로 염료 흡착시간을 2, 4, 8, 12, 18, 24시간으로 나누어서 광전극을 제작하여 염료 흡착 온도 및 시간에 따른 염료 감응형 태양전지의 전기적 출력 특성을 solar simulator를 이용하여 분석하였다.

광전극을 제작하기 위한 투명 전도성 유리기판(TCO)으로는 FTO glass를 사용하였고, 이를 2[cm]×1.7[cm]의 크기로 자른 후 에탄올을 이용하여 1차적으로 세척한 뒤 초음파 세척기를 이용하여 25[°C]에서 10분간 세척 과정을 거친다. 초음파 세정 완료 후 질소가스를 이용하여 FTO 표면에 남아있는 세정액을 건조시키고, 다시 건조기를 이용하여 70[°C]에서 10분간 건조하여 준비한다.

건조된 FTO 기판의 전도성 박막이 증착된 면에 TiO_2 페이스트를 1[cm]×1[cm]의 면적으로 doctor blade 공법을 이용하여 도포한 후 전기로를 이용하여 120[°C]에서 10분간 소성시킨 뒤, 다시 450[°C]에서 30분간 소성시킨다. 소성 과정을 거친 광전극을 식힌 후 N719 염료에 침지시켰다.

각 온도에서 조건에 따른 시간이 지난 후, 염료에서 광전극을 꺼내어 에탄올 처리를 통해 적층되어 있는 염료분자를 제거하여 광전극을 완성하였다.

상대전극 제작의 전도성 투명 전극 기판(TCO)은 광전극과 마찬가지로 FTO를 사용하였고 이를 2[cm]×1.7[cm]로 자른다. 셀 크기로 준비된 전도성 투명 전극 기판을 에탄올을 이용하여 1차적으로 세정한 후, 초음파 세척기를 이용하여 25[°C]에서 10분간 세정한다. 세정된 전도성 투명 전극 유리 기판을 질소가스를 이용하여 1차적으로 건조시킨 후, 건조기를 이용하여 70[°C]에서 10분간 건조하여 준비한다.

건조된 FTO 기판의 전도성 박막이 증착된 면에 Pt 페이스트를 1.1[cm]×1.1[cm]의 면적으로 doctor blade 공법을 이용하여 도포한 후 전기로를 이용하여 400[°C]에서 10분간 소성시키고, 이를 식혀 상대전극을 완성시켰다. 염료감응형 태양전지의 제작을 위해 완성된 광전극과 상대전극을 sealing지를 이용하여 접합한 후, 전해질을 주입하여 염료 감응형 태양전지를 완성시켰다. 제작된 염료 감응형 태양전지의 전기적 특성을 분석하기 위하여 solar simulator를 이용하여 AM1.5G 조건에서 I-V-P 특성 곡선을 분석하였다. 광입사 에너지는 AM 1.5의 조건이므로 100[mw/cm²], 측정 delay 시간은 전자 전달시간을 고려해 500[ms]로 고정하였다.

2.1.2 실험 장치

초음파 세척기는 JAC-2010를 사용하였다. 전기로는 DMFP-14를 사용하였으며, 최대 가열온도는 1,000[°C]

이다. 광전효율을 측정하기 위한 solar simulator는 K201 LAB100를 사용하였으며, 광원 전력은 Xe 램프 (XENOS1100-1007003)를 사용하였다. Photovoltaic power meter는 K101 LAB20, K101 LAB10를 사용하였다.

3. 결과 및 고찰

염료 감응형 태양전지의 광전 효율에 직접적으로 영향을 미치는 요소는 전자의 발생량과 이동이다. 그 중 염료의 흡착량은 전자의 발생량을 결정짓는 요소이며, 염료의 흡착량이 증가할수록 발생하는 전류밀도 또한 증가할 것이다. 또한 광전극의 TiO₂ 표면적은 한계가 있으므로 염료의 흡착량 또한 한계가 있어 전류밀도는 일정량 이상 증가하지는 않을 것이다. 이러한 사항들을 유추해 내기 위하여 염료 흡착 시간에 따른 I-V 곡선을 온도별로 그림 1~4까지 나타내었다.

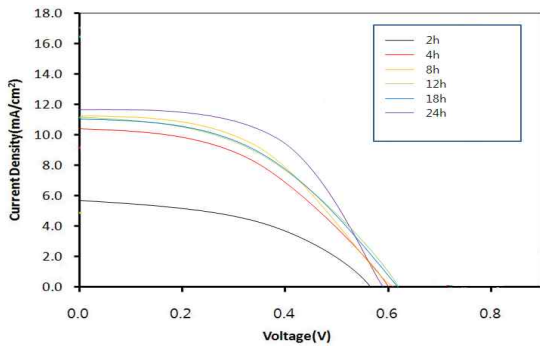


Fig. 1. I-V characteristics of DSSC according to adsorption time at dye adsorption temperature 10[°C].

그림 1~4의 염료 흡착 시간에 따른 I-V 곡선 특성을 살펴보면 흡착시간의 증가에 따른 개방전압은 특별한 관계가 보이지 않지만, 단락전류의 경우 흡착시간의 증가에 따라서 대체로 증가하는 추세를 보인다. 전류밀도의 증가량은 염료 흡착 온도와 상관없이 흡착 경과 시간이 2~4시간 사이일 때 최고가 되며, 8시간 경과 이후로는 전류밀도 변화폭이 비교적 감소하게 됨을 알 수 있다. 광전효율에 비례하는 그래프의 면적을 보았을 때 온도와 상관없이 염료 흡착 시간이 24시간 경과했을 때의 그래프 면적이 가장 넓게 나타났다. 염료 감응형 태양전지의 염료 흡착 시 온도에 대한 특성을 알

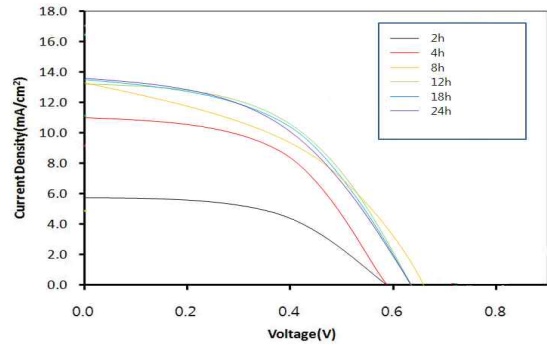


Fig. 2. I-V characteristics of DSSC according to adsorption time at dye adsorption temperature 20[°C].

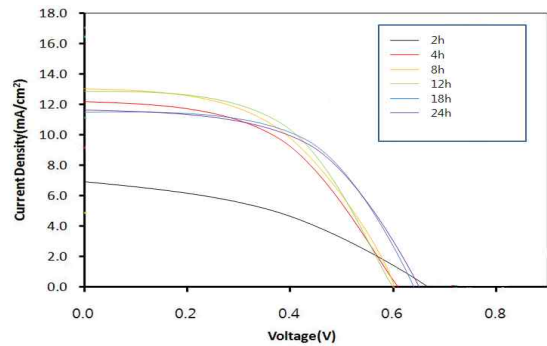


Fig. 3. I-V characteristics of DSSC according to adsorption time at dye adsorption temperature 30[°C].

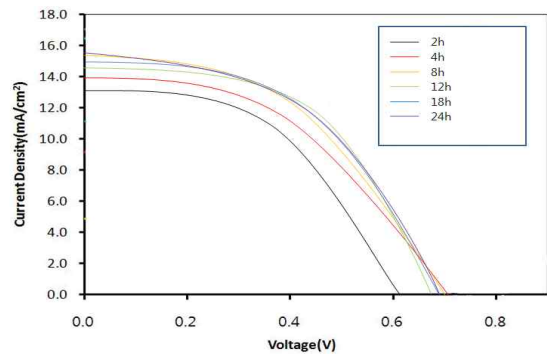


Fig. 4. I-V characteristics of DSSC according to adsorption time at dye adsorption temperature 40[°C].

아보기 위하여 동 시간대별로 각 온도에 따른 I-V 곡선 특성을 분석하였고, 그림 5~8에 나타내었다. 염료 흡착 경과 시간과는 상관없이 온도의 증가에 따라 개방전압 및 단락전류는 대체로 증가하는 추세를 보였으며

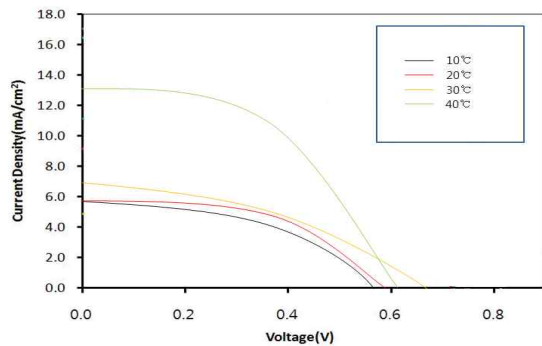


Fig. 5. I-V characteristics of DSSC according to temperature after 2 hours of adsorption time.

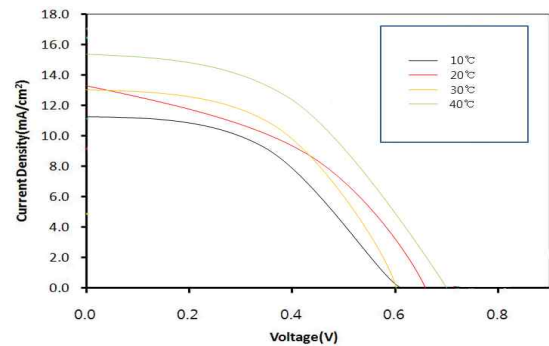


Fig. 7. I-V characteristics of DSSC according to temperature after 8 hours of adsorption time.

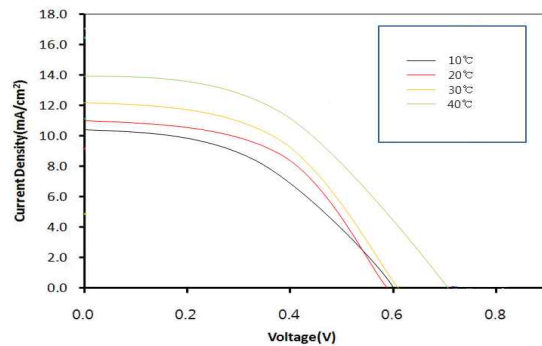


Fig. 6. I-V characteristics of DSSC according to temperature after 4 hours of adsorption time.

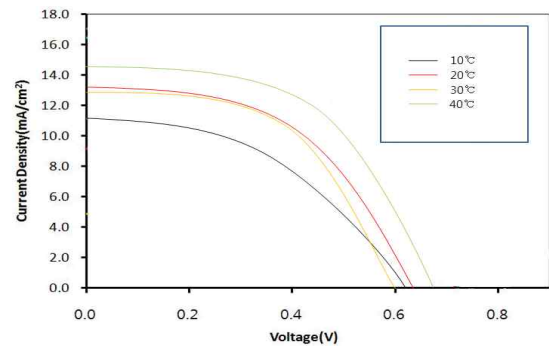


Fig. 8. I-V characteristics of DSSC according to temperature after 12 hours of adsorption time.

그래프가 차지하는 면적 또한 대체로 온도에 비례하는 경향을 보이고 있다. 이는 염료 흡착 온도가 증가할수록 염료 흡착이 활발히 이루어지기 때문으로 추정된다. 다만 염료 흡착 2~12시간 경과 시 30[°C]의 경우 전체적인 경향성과는 조금 차이가 있는데, 이는 광전극 제조 시 TiO₂ 코팅 시의 표면의 불균일성, 소성 시 열에 의한 균열 등으로 인하여 발생하는 격자 결함, 또는 그 외에 예기치 못한 불순물의 염료 흡착 방해 등의 이유로 사료된다. 염료 흡착 시간, 온도에 따른 전기적 특성을 표 1~4에 나타내었으며, 이를 이용하여 개방전압(Voc), 단락전류밀도(Jsc), Fill Factor (FF), 광전효율(η)을 정량적으로 나타내었다.

표 1~4에서 보는 바와 같이 염료감응형 태양전지의 광전효율은 염료 흡착 시간이 증가함에 따라 증가하며, 일정 시간 이후로는 거의 변화가 없음을 알 수 있다. 이는 염료 고분자가 TiO₂에 흡착되는 양이 시간에 비례하지만 TiO₂의 표면적은 한계가 있기 때문에 염료

고분자와 TiO₂ 분자의 결합이 포화상태가 되면 더 이상 흡착이 이루어지지 않기 때문이다.

염료 흡착 시간에 따른 효율은 10[°C]에서는 2.14, 3.18, 3.6, 3.92[%]로 점차 증가하였고, 20[°C]에서는 2.28, 3.58, 4.58, 5.07[%], 30[°C]에서는 3.19, 3.54, 4.45, 4.68[%], 40[°C]에서는 3.9, 4.79, 5.24, 5.34[%]로 나타났다. 각 온도별로 염료 고분자와 TiO₂ 분자의 결합이 포화상태에 가까운 시점을 보면, 10[°C]에서는 약 8시간, 20[°C]에서는 약 8시간, 30[°C]에서는 약 8시간, 40[°C]에서는 약 8시간이 경과했을 때 거의 포화상태에 이르렀다. 이는 염료 흡착 온도가 증가함에 따라 염료 고분자와 TiO₂ 분자의 결합이 더 활발히 일어남을 증명해 주는 결과이다.

염료 흡착 온도별 효율을 비교해보면, 염료 흡착으로부터 2시간이 경과했을 경우에는 온도가 증가함에 따라 광전 효율도 증가하였다. 염료 흡착으로부터 4시간, 8시간, 12시간이 경과했을 경우, 10[°C], 20[°C],

Table 1. Electrical characteristics of DSSC according to dye adsorption time at 10[°C].

10[°C]	Voc[V]	Jsc[mA/cm ²]	FF[%]	η [%]
2 h	0.57	5.85	63.72	2.14
4 h	0.60	10.41	50.95	3.18
8 h	0.61	11.36	51.56	3.60
12 h	0.62	11.27	55.83	3.92

Table 2. Electrical characteristics of DSSC according to dye adsorption time at 20[°C].

20[°C]	Voc[V]	Jsc[mA/cm ²]	FF[%]	η [%]
2 h	0.59	5.78	66.76	2.28
4 h	0.59	10.94	55.88	3.58
8 h	0.65	13.34	52.48	4.58
12 h	0.63	13.26	60.66	5.07

Table 3. Electrical characteristics of DSSC according to dye adsorption time at 30[°C].

30[°C]	Voc[V]	Jsc[mA/cm ²]	FF[%]	η [%]
2 h	0.66	6.98	69.29	3.19
4 h	0.61	12.22	47.36	3.54
8 h	0.60	13.19	56.18	4.45
12 h	0.60	12.78	61.37	4.68

Table 4. Electrical characteristics of DSSC according to dye adsorption time at 40[°C].

40[°C]	Voc[V]	Jsc[mA/cm ²]	FF[%]	η [%]
2 h	0.61	13.20	48.14	3.90
4 h	0.71	13.97	48.46	4.79
8 h	0.70	15.41	48.85	5.24
12 h	0.67	14.64	54.31	5.34

40[°C]로 온도가 증가함에 따라 광전 효율은 대체로 증가하는 추세를 보였다. 30[°C]에서는 20[°C]의 경우보다 효율이 조금 떨어지는 결과를 얻었는데, 이는 TiO₂ 페이스트 코팅시의 압력에 의해 박막의 두께가 샘플마다 조금씩 차이가 있고, 이를 소성시켰을 경우에 페이

스트에 포함된 용매나 바인더가 증발하면서 발생하는 박막 두께의 감소가 샘플마다 조금씩 차이가 있기 때문이다. 이 외에도 소성 시 열에 의한 격자결함, 불순물로 인한 저항성분의 증가 등이 효율 저하의 원인으로 추측된다.

염료 흡착 온도에 따른 효율은 2시간에서는 각각 2.14, 2.28, 3.19, 3.9[%], 4시간에서는 3.18, 3.58, 3.54, 4.79[%], 8시간에서는 3.6, 4.58, 4.45, 5.24[%], 12시간에서는 3.92, 5.07, 4.68, 5.24[%]로 나타났다.

4. 결론

본 논문에서는 염료감응형 태양전지의 전기적 출력 특성이 최대가 되는 염료 흡착 시간 및 온도 값을 도출하기 위하여 solar simulator를 이용하여 각 조건에서 설계·제작된 염료 감응형 태양전지를 분석하였고, 이를 통해 다음과 같은 결론을 얻었다.

1. 염료 흡착 시간을 각각 2, 4, 8, 12, 18, 24 시간으로 변화시킨 결과, 시간이 증가할수록 염료의 흡착량이 증가하여 Jsc 및 효율이 증가하는 경향이 나타났다. 다만 염료 흡착량이 포화상태가 되면 Jsc 및 효율의 변화는 거의 없었으며, 염료가 포화되는 시간은 10[°C]에서는 약 18시간, 20[°C]에서는 약 12시간, 30[°C]에서는 약 12시간, 40[°C]에서는 약 8시간 정도로 나타났다.
2. 염료 흡착 시 온도를 각각 10[°C], 20[°C], 30[°C], 40[°C]로 변화시켰을 경우, 온도가 증가할수록 염료의 흡착이 활발히 이루어져 Jsc 및 효율이 대체로 증가하는 경향이 나타났다. 염료 감응형 태양전지의 염료 흡착 조건에 따른 최대전력 전달 조건은 40[°C]에서 24시간 염료 흡착하였을 경우이며, 공정 시간 단축으로 인한 경제성을 고려할 경우, 40[°C]에서 8시간 동안 염료를 흡착했을 경우가 가장 적합한 것으로 나타났다.

REFERENCES

[1] A. R. Park, E. M. Jin, and H. B. Gu, *J. Korean Inst. Electr. Electron. Mater. Eng.*, **25**, 315 (2012).
 [2] J. Lee, J. C. Yang, S. K. Kim, and S. Y. So, *Trans. of KIEE*, **63**, 1312 (2014).
 [3] C. H. Shim, Y. G. Kim, D. H. Kim, H. J. Lee, and H.

- J. Lee, *Trans. of KIEE*, **60**, 114 (2011).
- [4] H. C. Ki, S. H. Kim, D. G. Kim, T. U. Kim, H. K. Jin, and S. Y. So, *J. Korean Inst. Electr. Electron. Mater. Eng.*, **25**, 902 (2012).
- [5] M. Gratzel, *Nature*, **421**, 6923 (2003). [DOI: <http://dx.doi.org/10.1038/421586a>]
- [6] H. W. Suh, MS *Thesis*, p. 3, Graduate School of Pusan National University, Busan (2008).
- [7] B. Y. Oh, S. K. Kim, and D. G. Kim, *J. Korean Inst. Electr. Electron. Mater. Eng.*, **26**, 298 (2013).
- [8] K. Tennakone, J. Bandara, P.K.M. Bandaranayake, G.R.A. Kumara, and A. Konno, *Jpn. J. Appl. Phys., Part 2: Lett.*, **40**, L732 (2001).
- [9] G. Rothenberger, P. Comte, and M. Gratzel., *Sol. Energ. Mat. Sol. Cells.*, **58**, 321 (1999). [DOI: [http://dx.doi.org/10.1016/S0927-0248\(99\)00015-X](http://dx.doi.org/10.1016/S0927-0248(99)00015-X)]
- [10] F. Gao, Y. Wang, D. Shi, J. Zhang, M. Wang, X. Jing, R. Humphry-Baker, P. Wang, S. M. Zakeeruddin, and M. Gratzel, *J. Am. Chem. Soc.*, **130**, 10720 (2008). [DOI: <http://dx.doi.org/10.1021/ja801942j>]
- [11] J. Kim and J. S. Kim, *J. Nanosci. Nanotechnol.*, **11**, 7335 (2011). [DOI: <http://dx.doi.org/10.1166/jnn.2011.4843>]
- [12] B. Hyun, Y. Zhong, A. Bartnik, L. Sun, H. Abruna, F. W. Wise, J. D. Goodreau, J. R. Matthews, T. M. Leslie, and N. F. Borrelli, *ACS Nano*, **11**, 2206 (2008). [DOI: <http://dx.doi.org/10.1021/nm800336b>]
- [13] S. Y. Park, H. W. Seo, M. K. Son, S. K. Kim, N. Y. Hong, J. Y. Song, K. Prabakar, and H. J. Kim, *Trans. KIEE*, **62**, 208 (2013).
- [14] J. W. Kim, MS *Thesis*, p. 1-38, Graduate School of Dongshin University, Naju (2013).