

## Silver Paste 를 이용한 Solar Cell 은 전극 제조<sup>§</sup>

김영규\* · 정태의\*\* · 오동훈\* · 김남수\*\*\* · 홍성엽\*\*\*\*†

\* 서경대학교 KEN Research Center, \*\* 서경대학교 컴퓨터과학과, \*\*\* 텍사스 주립대학교 금속재료공학과, \*\*\*\* 서경대학교 응용화학과

### Synthesis of Top Connector for Solar Cells by Using Silver Paste

Young Kyu Kim\*, Tae Eui Jeong\*\*, Dong Hoon Oh\*, Nam Soo Kim\*\*\*  
and Seong Yeup Hong\*\*\*\*†

\* KEN Research Center, Seokyeong Univ.,

\*\* Dept. of Computer Science, Seokyeong Univ.,

\*\*\* Dept. of Metallurgical and Materials Engineering, The University of Texas at El Paso, USA,

\*\*\*\* Dept. of Applied Chemistry, Seokyeong Univ.

(Received May 13, 2010 ; Revised October 1, 2010 ; Accepted October 26, 2010)

**Key Words** : Solar Cell Top Connector(태양광 전극), Silver Paste(은페이스트) , Micro-Dispensing Deposition Writing(입자분산도포법), 20 um Thick Layer(20um 후막)

**초록**: 화석에너지의 고갈로 인한 대체 에너지 연구는 최근 수십 년 동안 계속 행해지고 있다. 원자력 에너지와 비교해서 낮은 전기발생 효율에도 불구하고, 환경친화적이며 태양이라는 영구성으로 태양에너지는 주목 받고 있다. 본 논문에서는 태양전지의 효율에 가장 영향을 미치는 인자로 햇빛 입사각의 변화와 Top Connector 형상이라 가정하고 MATLAB 과 MathCAD 를 이용하여 모사하였다. 실험 모사 결과 상용화 제품인 500um 선풍, 5um 높이 Top Connector 형상과 비교하여, 최고 10%의 태양전지 효율증가는 Top Connector 후막 두께가 25~50 um, 선풍 두께가 50~100um 영역에서 찾을 수 있었다. 10 만 cps 의 점도를 갖는 은페이를 500um 의 MDDW (Micro-Dispensing Deposition Writing) 직접분사 노즐을 이용하여 성공적으로 25 um 후막을 형성하였다.

**Abstract**: Studies on alternative energy have been carried out for many decades because of the accelerated exhaustion of fuel. While the efficacy of solar cells is still low in comparison with that of nuclear power, solar cells have been highlighted as potential sources of alternative energy because they are environmentally friendly and have a source of unlimited energy, namely, the sun. In this study, the optimum efficiency of solar cells was simulated as a function of the incident angle of sunlight and the geometric shapes of patterns using MATLAB and MathCAD software. The foremost efficiency of the solar cell was found to be 1.10 when the thickness and width of the patterns were in the range 25–50 μm and 50–100 μm, respectively. To achieve the 25 um thick layer, 100,000 cps silver paste and 500 um orifice tip has been successfully implemented with Micro-Dispensing Deposition Writing.

### 1. 서 론

산업의 발전이 진행 되면서 화석에너지의 사용량이 증가하고 있다. 신흥 개발도상국들의 산업화에 따른 에너지 수요는 증가하는 추세이다. 화석

연료의 의존도가 지속될 경우 자원 고갈화와 환경 오염 문제가 심각한 수준에 이를 것이다. 전통적인 에너지 공급원인 화석연료의 매장량의 한계성으로 인한 대체 에너지 개발이 요구되고 있다.<sup>(1,2)</sup>

다양한 대체 에너지가 주목을 받고 있지만, 그 중에서 자원의 무한성, 친환경, 기술의 진보 등으로 태양전지 기술은 가장 주목을 받고 있다.<sup>(3,4)</sup>

태양전지는 결정질 실리콘, 박막형, 3 세대 태양전지로 구분된다. 결정질 실리콘은 단결정 실리콘과 다결정 실리콘으로 나뉜다. 단결정 실리콘의

§ 이 논문은 2010년도 대한기계학회 생산 및 설계공학부문 춘계학술대회(2010. 4. 22-23., 제주 라마다프라자) 발표논문임.

† Corresponding Author, sungyeap@skuniv.ac.kr

© 2010 The Korean Society of Mechanical Engineers

경우 결정의 방향이 같아 전하이동에 걸림돌이 없어 유전 효율이 좋지만, 경제성이 떨어지는 단점이 있다. 다결정 실리콘의 경우 태양전지 제조시 단순한 공정과 추가 정제과정이 없고 단결정에 비해 웨이퍼 사용량이 적다는 장점이 있다. 단결정 타입에 비해 가격은 30~40% 저렴하지만, 변환효율은 낮다는 단점을 가지고 있다. 세계 태양전지 시장의 90% 이상을 차지하고 있는 결정질 실리콘 태양전지는 주 재료인 폴리실리콘 공급부족으로 가격이 천정부지로 뛰어오른 상황이다. 이에 따라 박막 태양전지에 대한 관심이 높아지고 있고, 그 중에서도 CIGS 에 대한 관심이 증대되고 있다. 현재 3 세대 태양전지의 경우 연구단계 개발이 진행 중이다. 태양전지모듈의 양산 효율은 Bulk 형 실리콘 태양전지는 단결정의 경우 15~18%, 다결정은 12~14% 수준이다. 박막형 실리콘 태양전지는 7~12% 수준으로 Bulk 형에 비해 낮다.<sup>(5-8)</sup>

따라서 태양전지 상용화의 성공적인 요인은 낮은 에너지 변환효율의 극복이다.<sup>(9)</sup> 기존의 실크스크린 방식은 기판 위에 잉크를 뿌리고 Top Connector 부문 만 남겨두고 잉크를 모두 긁어 버리는 제작 방법으로 태양광 기판에 흠집을 낼 수 있고 재료의 낭비가 심하다. 그리고 그림자를 형성하기 때문에 에너지 변환 효율을 떨어뜨린다.<sup>(10-13)</sup>

태양전지에서 효율을 향상시킬 수 있는 방법은 크게 빛 흡수율 향상을 위해 텍스처나 반사방지막을 형성하는 방법, 전자와 정공의 재결합을 방지하는 패시베이션 기술, 그리고 전극의 재질, 선폭 등을 조절해 빛의 흡수율을 최대화하는 방법 등이 연구되고 있다.<sup>(14-16)</sup>

본 논문에서는 낮은 에너지 변환효율을 극복하기 위하여 기존의 실크스크린 방식으로 제작되던 전극형상을 제어하고, 직접인쇄방식 중 가장 상용화에 근접한 MDDW (Micro-Dispensing Deposition Write) 기술을 태양전지 Top Connector 제작에 적용하여 기존의 실크스크린 방식으로는 불가능한 선폭을 조절하여 20 um 이상의 후막을 제조하는 방법을 제시하였다. MDDW 방식은 다양한 직접인쇄 기술 기술 중 고점도 물질 도포가 용이하여 Top Connector 를 효율적으로 제어할 수 있으며, 그 재료의 사용량을 최소화 할 수 있는 또 다른 장점이 있다.<sup>(17)</sup>

Top Connector 의 형상제어를 위하여 MathCAD 와 MATLAB 프로그램을 이용하여, 전통적으로 실크스크린에서 제작되는 5um 높이와 500um 폭의

전극 형상을 제어하여, 그림자와 입사각 등의 변화에 따른 최고 에너지 발생 효율을 하루 기준 12 시간에서 컴퓨터 모사하는 방법을 채택하였다.

## 2. 본 론

### 2.1 Top Connector 묘사

Fig. 1 은 일반적인 실리콘 재료를 사용한 태양전지의 모식도이다. 일반적으로 전기를 발생하는 부위 p-n 접합부위와 발생한 정공 또는 전자를 외부로 이동시키는 Top Connector 그리고 외부에서 발생하는 빛의 반사를 막아주는 Anti Reflection Coating 으로 구성되어 있다. 서론에 언급한 바와 같이 최근 1,2,3 세대의 태양광 기술을 지속적인 발전을 거치며 대부분의 연구가 재료와 공정에 치중되어있는데 반하여, 은 페이스트를 사용하는 Top Connector 의 재료기관과의 접합성, 형상, 전도성에 관한 깊은 연구는 많이 보고 되어지고 있지 않다. 이를 위하여 본 연구에서는 Top Connector 의 형상을 변화시켜 기본 실크스크린 형상대비 광전변환 효율의 최적화를 컴퓨터 프로그램을 통하여 최적화 하고자 하였다. 이를 Fig. 2 에 자세히 도식화 하였다.

p-n 접합 태양전지에서 광전자가 발생하여 전자와 정공의 흐름은 크게 Z 축 방향의 전류( $i_z$ )와 Y 축 방향의 전류( $i_y$ )로 표현할 수 있다. 단결정 또는 다결정 실리콘 재료를 사용하는 1 세대 태양광과 CIGS, CdTe 또는 비정질 실리콘을 기반으로 하는 박막형 2 세대 태양광 기술에 공통적으로 적용되는 전극 Top Connector 는 일반적으로 실크스크린 방식으로 형성된다. 좀더 구체적으로는, 이온스퍼

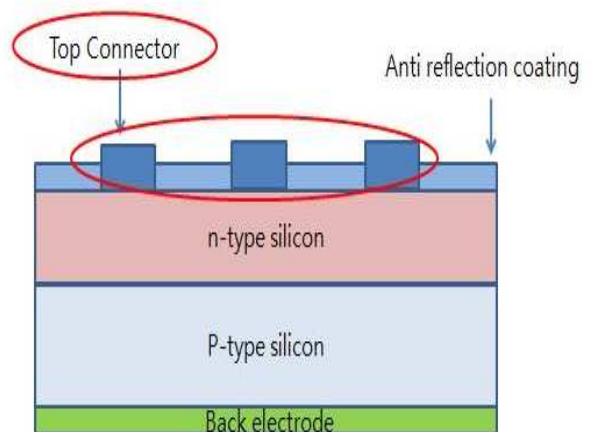


Fig. 1 Schematic of solar cell<sup>(17)</sup>

터링, 화학증착, 스핀 코팅법등의 방법으로 제조되는 TCO (Transparent Conductive Oxide) layer 와 실크 스크린 방법으로 제조되는 실버페이스트는 기판 접착력을 증가 시키기 위하여 첨가된 무게대비 3% 정도의 유/무기 물질에 의한 저항 증가로 인하여 전기 전도도는 급격히 저하 시킨다.

Top Connector 의 전기 이동을 컴퓨터 시뮬레이션 하기 위하여, 전도성 입자가 고르게 분산된 실

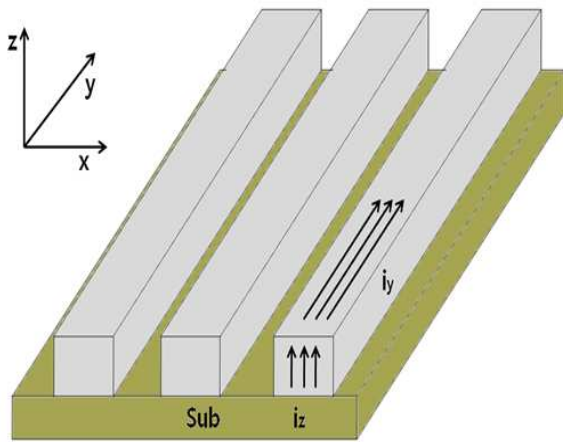


Fig. 2 Schematic of electronic current flow in solar cell

버 페이스트를 고려하면, Fig. 2 에서 보여주는 바와 같이, 전반적으로  $i_x$  의 흐름을 방해하는 저항은 거리가 0.5~20  $\mu\text{m}$  이하로 짧은데 비하여,  $i_y$  의 Y 축 방향으로의 흐름을 방해하는 저항은 그 이동 거리가 1000 배 이상으로 길어 전체 저항은  $i_y$  의 흐름을 방해하는 요인에 의해 결정된다고 본 연구에서 가정하였다

또한 태양전지 효율에 영향을 가장 직접적으로 미치는 인자로 햇빛 입사각의 시간에 따른 햇빛을 받는 변화와 Top Connector 형상에 따른 효율을 MathCAD 와 MATLAB 프로그램을 이용하여 최적화 하였다. 선행연구에 의해 컴퓨터 프로그램화되어 있는 형상제어에 의한 효율 최적화 조건<sup>(18)</sup>을 본 연구의 목적을 위하여, 부루스 솔라(독일)사의 2세대 CIGS Solar Cell (Fig. 3)의 Top Connector 는 Fig. 2 의 x 축 방향 총 26cm 에 67 line 패터닝 되었음을 확인하였다. 이에 따라 Connector 선폭 500 $\mu\text{m}$ , 높이 5 $\mu\text{m}$ 의 형상을 기준으로 시뮬레이션 코드를 재 작성 하였다.

좀더 구체적으로는 Fig. 2 상의 y 면에서 직육면체 형상의 단 면적을 변화시키면 y 축 방향 패턴의 길이는 상수로 처리할 경우, 단면적의 형상에 의해서만, Top Connector 저항 값이 변화됨을 알 수 있다. 이에 따른 시뮬레이션 결과를 Fig. 4 에 나타내었다. Top Connector 재료의 단면적 형상 변화에 따라 전기전도도가 3 배 증가 하면 태양전지 전체 효율은 전기 전도도를 증가시키기 전 (500  $\mu\text{m}$  선



Fig. 3 Image of CIGS solar pannel made by wurth solar (Germany)

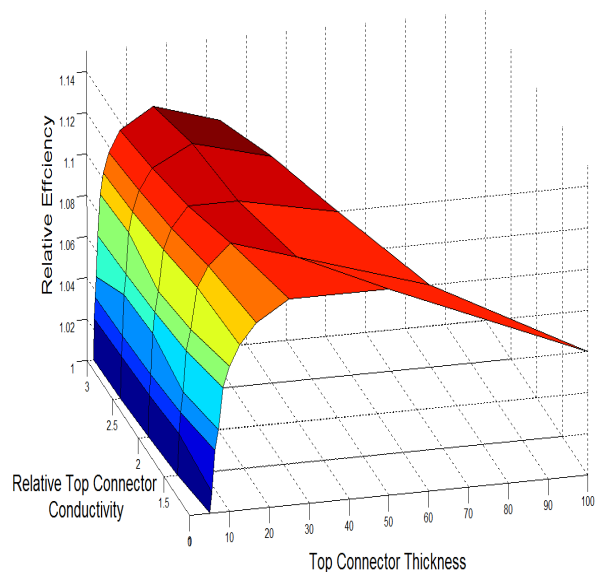


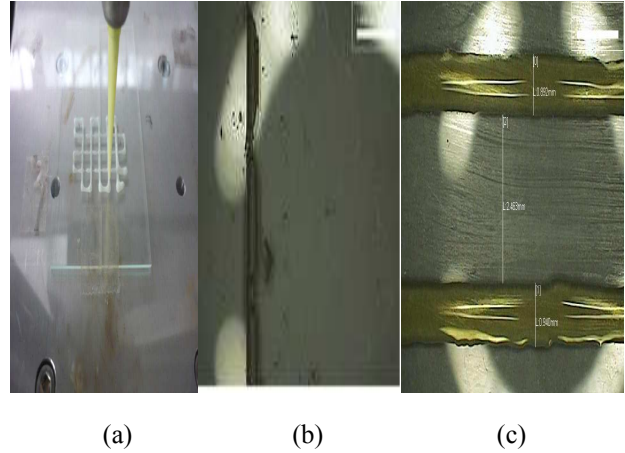
Fig. 4 Solar cell efficiency with varying of top connector thickness

폭, 5 um 높이) 과 비교하여 전기전도도 증가 효과로 형상에 따라 최고 12% 증가하는 결과를 보였다.

또한, Top Connector의 전기전도도의 변화 없이 기존의 선폭 500um, 높이 5um의 형상의 에너지 변환효율을 1로 가정하였을 때, 상용화 제품과 동일한 재료를 사용하여 선폭 50~100um, 높이 25~50um 영역에서 기하학적 형상 변화로 에너지 변환효율이 10% 증가됨을 Fig. 4에서 확인할 수 있다.

## 2.2 MDDW 방식

직접인쇄방식은 원하는 재료를 기판 위에 직접 형성화 하는 기술이다. 현재 상용화에 가장 근접한 MDDW (Micro-Dispensing Deposition Write)는 외부 공기의 압력으로 물질을 밀어내어 패터닝하는 방식으로 다른 방식에 비해 높은 점도의 물질을 사용할 수 있고 최고 100 만 cps의 고점도 물질의 3 차원 형상이 가능하다고 보고되어진다.<sup>(19)</sup> 구체적으로 MDDW 방식은 일반적인 잉크젯, 톨툴롤과 비교하여 고점도물질의 패터닝이 가능하여 본 시뮬레이션 결과에 따른 10% 이상의 효율증가를 위한 후막 (12~20 um)의 처리가 가능하다.<sup>(20)</sup> MDDW를 이용하여 최소 폭 형상은 최소 10um 가능하다고 보고되어지나, 본 연구에서는 미세 선폭 보다는 고점도의 물질과 후막을 구현하는 것을 목적으로 아래 Fig. 5와 같이 10 만 cps의 재료를 분사 노즐 500um Tip을 사용하여 패터닝을 형성하였다. Fig. 5는 직접인쇄방식을 이용하여 실버 페이스트를 패터닝 한후 200℃, 400℃에서 열처리한 것이다. 일반적으로 제 1 세대 실리콘을 기반으로 하는 공정에서는 Top Connector와 대부분의 p-n 접합을 위한 700℃에서 Co-firing 기법을 사용하나, 최근 유무기 바인더 및 기판으로 스테인리스 등을 사용하는 2 세대 태양광 또는 유기계 태양광의 경우 처리온도가 점차 저온화 되고 있다. 따라서 본 실험에서는, 기존에 다양하게 사용되는 D사의 은페이스트를 이용하여 열 처리 후 25 um이 되도록 다양한 두께의 패터닝을 한 후 각각 200℃, 400℃와 600℃에도 30 분간 열처리하였다. 그 결과 200℃에서는 패턴의 유리 접합성과, 내부 유무기 물질이 충분히 반응하지 않아, 경화성과 부스러짐 현상이 발생하였다. 열처리 온도가 400℃인 경우에는 패턴 강도에는 문제가 없지만, 은페이스트 내의 3 wt. % 첨가된 무기바인더가 용융되지 않아 기판과의 적합성이 나빠, 패턴이 기판에서 쉽게 분리되는 문제가 발생하였다. 패턴의



**Fig. 5** Schematic of a)Micro-Dispensing Deposition Write with high viscous materials (100,000 cps), patterns after heat treatment at b) 200℃ and c) 600℃

강도와 기판의 접착성을 고려하여 600℃ 이상의 고온에서 하였을 경우 상용화된 은페이스트는 기판과의 접합성, 강도 및 전기 전도도는 양호한 것으로 조사되었다. Fig. 5의 (a)는 10 만 cps의 고점도 물질을 SiO<sub>2</sub>계 기판위에 코팅 가능한 MDDW 기법을 보여주고 있으며, Fig. 5의 (b)는 200℃에서 열처리하여 입자가 부스러지며, 접착력이 불량함을 (c)는 600℃에서 열처리하여, 기판과의 접합성과 패턴의 연속성, 전기전도성 등이 양호함을 보여주고 있다.

최적화된 패터닝 공정조건에서 은페이스트는 Top Connector 후막의 두께가 600℃에서 30 분간 열처리 하였을 때 최초 패터닝 상태에서 수축하여 25um 이상을 유지할 수 있도록, 상용화 은페이스트의 최적화 패터닝 조건을 확립할 수 있었으며, 성공적으로 한 번의 패스(pass)로 25um의 후막을 제조할 수 있었다.

## 3. 결론

본 연구에서 Top Connector의 Z축 방향의 저항을 무시한다는 가정하에 시뮬레이션 결과를 보면 Top Connector 재료의 단면적 형상 변화에 따라 전기전도도가 3 배 증가 하면 태양전지 전체 효율은 전기전도도를 증가시키기 전 (500 um 선폭, 5 um 높이)과 비교하여 전기전도도 증가 효과로 다양한 형상에 따라 최고 12% 까지 증가하는 결과를 보였다. Top Connector 패터닝을 위하여 상용화 제품을 사용하였다고 가정하여 전기전도도 증가없이



시뮬레이션 하였을 경우, 선폭 50~100um, 높이 25~50um 영역에서 기하학적 형상 변화로 최고 10% 광전자 변화 효율을 증가시킬 수 있음을 확인하였다. 실험 모사 결과에 따른 10% 이상의 효율증가를 위한 후막 (25~50 um)의 패터닝을 위하여 고점도의 물질과 후막을 구현하는 것을 목적으로 10 만 cps 의 재료를 선폭 500um 의 Tip 을 사용하여 성공적으로 형성하였다. 형성된 Top Connector 의 열처리 전 패터닝 두께를 확인하였고, 600°C 30 분의 열처리 조건으로 기판과의 접합성, 전기전도성, 25um 이상의 후막 형성이 성공적임을 확인하였다.

## 후 기

본 논문은 서울특별시 지원하는 전략산업 혁신 클러스터 육성 지원산업 3D Microsystem Packaging 을 위한 접합공정 및 장비개발(10890)으로 지원되어 수행하였습니다.

## 참고문헌

- (1) Claes, G. G., 2007, "Transparent Conductors as Solar Energy Materials: A Panoramic Review," *Solar Energy Materials and Solar Cells*, Vol. 91, No. 17, pp. 1529~1598.
- (2) Bak, T., Nowothy, J. Rekas, M. and Sorrell, C. C., 2002, "Photo-electrochemical Hydrogen Generation from Water Using Solar Energy," *International Journal of Hydrogen Energy*, Vol. 27, No. 10, pp. 991~1022.
- (3) Szklo, A. and Schaeffer, R., 2006, "Alternative Energy Sources or Integrated Alternative Energy Systems? Oil as a Modern Lance of Peleus for the Energy Transition," *Energy*, Vol. 31, No. 14, pp. 2513~2522.
- (4) Siddiqui, A. and Fleten, S. E., 2010, "How to Proceed with Competing Alternative Energy Technologies: A Real Options Analysis," *Energy Economics*, In Press, Corrected Proof, Available online
- (5) Huang, J. S., Hsiao, C. Y., Syu, S. J., Chao, J. J. and Lin, C. F., 2009, "Well-Aligned Single-Crystalline Silicon Nanowire Hybrid Solar Cells on Glass," *Solar Energy Materials and Solar Cells*, Vol. 93, No. 5, pp.621~624.
- (6) Nijs, J. F., Szlufcik, J., Poortmans, J., Sivonthaman, S. and Mertens, R. P. 2001, "Advanced Cost-Effective Crystalline Silicon Solar Cell Technologies," *Solar Energy Materials and Solar Cells*, Vol. 65, No. 1~4, pp. 249~259.
- (7) Dai, X. M. and Tang, Y. H., 1996, "A Simple General Analytical Solution for the Quantum Efficiency of Front-Surface-Field Solar Cells," *Solar Energy Materials and Solar Cells*, Vol. 43, No. 4, pp. 363~376.
- (8) Zdanowicz, T., Rodziewicz, T. and Zabkowska-Waclawek, M., 2005, "Theoretical Analysis of the Optimum Energy Band Gap of Semiconductors for Fabrication of Solar Cells for Applications in Higher Latitudes Locations," *Solar Energy Materials and Solar Cells*, Vol. 87, No. 1~4, pp. 757~769.
- (9) Han, K. N. and Kim, N. S., 2007, "Theory and Application of Conductive Inks Manufactures with the Help of Low Melting Metals," *Transactions of Korea Society of Machine Tool Engineers*, Vol. 7, pp.28~34.
- (10) Han, K. N. and Kim, N. S., 2008, "Conductive Inks Manufactured with the Help of Low Melting Metals," *Transactions of Korea Society of Machine Tool Engineers*, Vol. 17, No. 1, pp.126~131.
- (11) Lee, W. J., Ramasamy, E., Lee, D. Y. and Song, J. S., 2006, "Glass First Overcoater Silver Grid Lines for Nano-crystalline Dye Sensitized Solar Cells," *Journal of Photochemistry and Photobiology A; Chemistry*, Vol. 183, pp.133~137.
- (12) Buchberg, H. and Edwards, D.K., 1976, "Design Considerations for Solar Collectors with Cylindrical Glass Honeycombs," *Solar Energy*, Vol. 18, No. 3, pp. 193~203.
- (13) Krebs, F. C., Jørgensen, M. Norrman, K., Hagemann, O., Alstrup, J., Nielsen, T. D., Fyenbo, J., Larsen, K. J. and Kristensen, C., 2009, "A Complete Process for Production of Flexible Large Area Polymer Solar Cells Entirely Using Screen Printing-First Public Demonstration," *Solar Energy Materials & Solar Cells*, Vol. 93, No. 4, pp.422~441.
- (14) Ren, B., Minhua Wang, M., Liu, X. and Xu, Y., 2006, "Effect of H Treatment on Performance of HIT Solar Cells," *Rare Metals*, Vol. 25, No. 6, pp. 133~136.
- (15) Tanaka, S., Okamoto, S., Nakajima, K., Shibuya, N., Okamoto, K., Nammori, T., Nunoi, T. and Tsuji, T., 1991, "Effects of Electrode Contact Area Reduction Using an Excimer Laser," *Solar Energy Materials*, Vol. 23, No. 2~4, pp. 206~211.
- (16) Newcomb, J., 1994, "Energy Efficiency Services: What Role in a Competitive Environment?," *The Electricity Journal*, Vol. 7, No. 9, pp. 34~45.
- (17) <http://www.solarbuzz.com>
- (18) Lee, J. H., Kim, Y. K., Kim, Y. P., Jung, S. H. and Kim, N. S., 2009, "Geometric Simulation of Top Grid Solar Cell," *ICFPE*, Nov. 11~13.
- (19) Kim, N. S., Han, K. N. and Church, K. H., 2007, "Direct Writing Technology for 21st Century Industries

- Focus on Micro-Dispensing Deposition Write  
Technology,” *Journal of KSMTE*, pp. 511~515.  
(20) Li, B., Clark, P. A. and Church, K. H., 2007,

“Robust Printing and Dispensing Solutions with Three  
Sigma Volumetric Control for 21st Century  
Manufacturing and Packaging,” MRS.