

용액 코팅을 이용한 태양전지용 고분자 유연 패턴필름 제조

박찬욱 · 강호종[†]

광 에너지 소재 연구센터, 단국대학교 고분자시스템공학과
(2013년 6월 12일 접수, 2013년 7월 12일 수정, 2013년 7월 20일 채택)

Manufacturing of Flexible Patterned Cover Film for Solar Cell by Solution Coating

Chanwook Park and Ho-Jong Kang[†]

Center for Photofunctional Energy Materials, Dept. of Polymer Science and Engineering, Dankook University,
126 Jukjeon-dong, Sugi-ku, Yongin-si, Gyeonggi-do 448-160, Korea

(Received June 12, 2013; Revised July 12, 2013; Accepted July 20, 2013)

초록: 태양전지의 효율 증가를 위하여 유리비드가 함유된 polymethyl methacrylate(PMMA) 용액을 PMMA 필름 위에 코팅하여 유리비드가 코팅된 고분자 유연 패턴 필름을 제조하고 패턴 필름이 태양전지 효율에 미치는 영향을 살펴 보았다. 필름 위에 코팅된 유리비드로 인하여 빛의 입사각 0도에서 90도 범위에서 태양전지의 상대효율이 최대 3.4%까지 증가함을 알 수 있었다. 이러한 효율 증가는 빛의 입사각 변화에도 필름 표면에 형성되어 있는 구 형태의 유리비드로 인하여 빛이 수직으로 입사되어 방향성에 의한 태양전지 효율 감소가 최소화되기 때문이다. 태양전지 상대효율 증가는 필름 표면 위의 유리비드가 반구의 형태를 가질 때 가장 높으며 유리비드 함량에 따라 증가되나 유리비드 함량이 너무 많은 경우, 오히려 광 투과도 감소 및 빛의 간섭 효과에 의하여 상대효율이 감소됨을 알 수 있었다.

Abstract: The flexible patterned cover film was made by a simple solution coating process using polymethyl methacrylate (PMMA) solution with glass beads. The effect of patterned cover film on the efficiency of solar cell has been investigated. It was found that the relative solar cell efficiency increased up to 3.4% with the incident light angle between 0-90° by the sphere shape of glass bead coated on the film surface. This was understood that the loss of transmittance and scattering due to the light directional dependency on solar cell were minimized because the light entered glass beads normal to its surface regardless of incident light angle. The maximum relative solar cell efficiency was achieved when glass bead shape on the film is hemisphere and the relative efficiency increased with increasing the amount of glass bead on the film surface. However, too much glass beads on the film surface resulted in the lower relative solar cell efficiency due to the lowering of transmittance as well as the occurring of light interference.

Keywords: solar cell efficiency, patterned film, glass bead, transmittance, reflection, scattering.

서 론

무제한의 태양광을 에너지원으로 활용하기 위하여 태양전지에 대한 연구가^{1,2} 활발하게 진행되고 있다. 이러한 연구의 가장 큰 관심사는 저가에 많은 양의 태양광을 에너지로 변환시키는 것이다. 이를 위하여 다양한 실리콘 소재,³ CdTe 혹은 GaAs 등의 무기 화합물,^{4,5} 염료 감응형 소재,^{6,7} 그리고 유기물 소재^{8,9} 등이 태양전지용 소재로 연구가 진행되고 있다. 이러한 화학적 접근 방법과 함께 물리적 접근으로 태양전지 소재의 표면을 요철, 피라미드 형태 혹은 다공성으로 변형시

키는 방법,¹⁰⁻¹² 태양전지로 구성하는 모듈의 구성요소인 표면재,¹³⁻¹⁵ EVA와 같은 필름소재^{16,17} 등에 대한 연구가 집중되고 있다. 이와 함께 태양광을 태양전지에 최대한 유입시키기 위한 집광시스템¹⁸ 혹은 트래킹 시스템과¹⁹ 같은 연구도 함께 병행되고 있다.

태양전지 모듈의 표면재(cover glass)는 태양광의 입사량을 크게 하기 위하여 투명한 재질을 이용하며 주로 유리, FRP(fiber reinforce plastics), 필름, 경성플라스틱 등이 사용되고 있다. 이 중 유리는 90% 이상의 높은 광 투과율, 8% 이하의 낮은 반사율 그리고 우수한 광학적 특성, 열적 화학적 안정성, 균질성 및 편평성 등을 가지고 있어 가장 많이 사용되는 표면재이며 최근 태양전지 효율을 높이기 위한 다양한 표면 형태 변화에 대한 연구가 진행되고 있다.^{20,21} 이러한 연

[†]To whom correspondence should be addressed.
E-mail: hjkang@dku.edu

구 중에는 nano-imprint lithography 또는 hot-embossing 방법을 이용하여 표면재 위의 PVC 필름을 moth-eye 구조로 형성하는 방법,²²⁻²⁴ 표면재 자체를 surface texturing을 통해 표면을 patterning하는 방법²⁵ 그리고 졸-겔 공정을 이용하여 표면재 위에 SiO₂-TiO₂, TiO₂, SiO₂ 3가지 무기물질을 순서대로 코팅해 triple-layer를 코팅시켜줌으로써 anti-reflection 효과 주는 방법²⁶ 등이 있다. 하지만, 이러한 방법들은 공정이 복잡하거나 표면재 생산 비용이 증가되는 문제점을 갖는다.

본 연구에서는 태양광의 태양전지로의 입사광을 증가시키기 위하여 고분자 용액 코팅 기법을 이용하여 단순하고 저가의 유리비드가 코팅된 태양전지 표면재를 제조하여 보았다. 특히 유기태양전지의 경우, 기관의 유연성이 중요한 이슈로 대두됨에 따라 고분자 소재 중 유리비드와 비슷한 투과율을 갖는 PMMA 필름을 이용하여 유연 패턴 고분자 필름을 제조하였다. 제조된 필름을 실리콘 태양전지에 적용하여 유리비드 양과 코팅 형태가 태양전지 상대 효율에 미치는 영향을 살펴보았다.

실 험

유연기관 소재로 굴절률이 1.49인 Arystal사의 두께가 1000 μm인 PMMA 쉬트를 사용하였다. 유리비드를 기관에 코팅하기 위한 바인더로는 LG MMA의 PMMA와 미원 특수 화학의 aliphatic urethane acrylate UV 경화용 올리고머 (PU610) 그리고 광 개시제로는 Ciba사의 IRGACURE 184를 사용하였다. 유리비드는 BINEX사의 크기 40 μm의 단분산 분포를 가진 고굴절용 유리비드(RI: 1.93)를 사용하였다. 유리비드 바인더 용액은 PMMA와 UV 경화용 올리고머를 3:7로 혼합하고 광 개시제를 3 wt% 첨가하여 MEK(Duksan Co.)에 녹여 유리비드를 20-80 wt% 혼합하여 제조하였다.

얻어진 코팅액을 기배이엔티사의 bar coater(Comate-3000VH)를 이용하여 20 mm/s 속도로 비드 직경과 코팅 두께가 4:1, 2:1, 4:3, 1:1이 되도록 코팅하였다. 코팅된 필름은 오븐에서 60 °C에서 30분간 건조 후 Dae Ho사의 수은 램프가 장착된 광 조사 장치(CURE ZONE 2)를 사용하여 광량 80 mW/cm²에서 20초동안 조사시켜 바인더가 경화되어 유리비드가 필름 표면에 패턴을 형성한 필름을 얻었다.

유리비드가 코팅된 패턴 기관의 광학적 이미지를 Olympus사의 BX51 광학현미경을 사용하여 평면과 단면을 확인하고 얻어진 광학사진을 이미지 분석기(image partnership사)를 이용하여 분석하여 유리비드가 필름 표면에 차지하는 면적을 확인하였다. Perkin Elmer사 LAMBDA 950을 이용하여 550 nm의 total transmittance를 측정하여 광의 투과(T_{tr}), 반사(T_{ref})를 측정하고 식 (1)에 의하여 흡수(T_{abs})를 계산하였다.

$$T_{abs}(\%) = 100 - T_{tr}(\%) - T_{ref}(\%) \quad (1)$$

900 mm의 적분구를 사용하여 4종류의 transmittance(T_1 , T_2 , T_3 , T_4)를 측정한 후 식 (2)에 의하여 확산 투과인 헤이즈를 계산하였다.

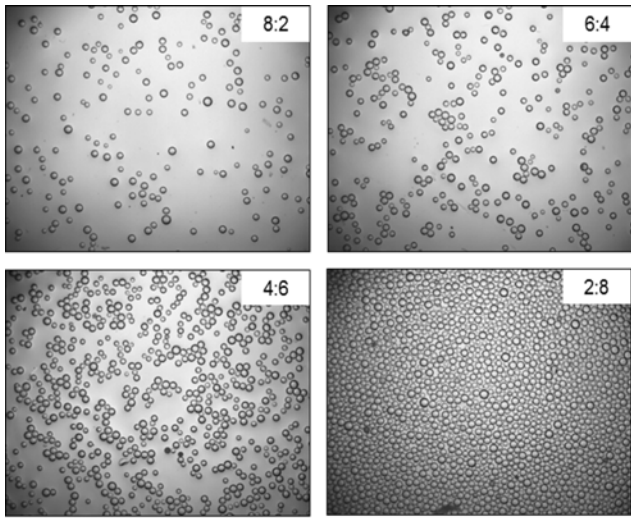
$$\begin{aligned} \text{Haze}(\%) &= (\text{Diffuse transmittance}/\text{Total transmittance}) \times 100 \\ &= [(T_4/T_2) - (T_3/T_1)] \times 100 \end{aligned} \quad (2)$$

여기서, T_1 은 reflectance standard의 투과도, T_2 는 시편과 reflectance standard의 투과도, T_3 는 시편이 존재하지 않은 상태의 투과도, T_4 는 시편의 투과도를 의미한다.

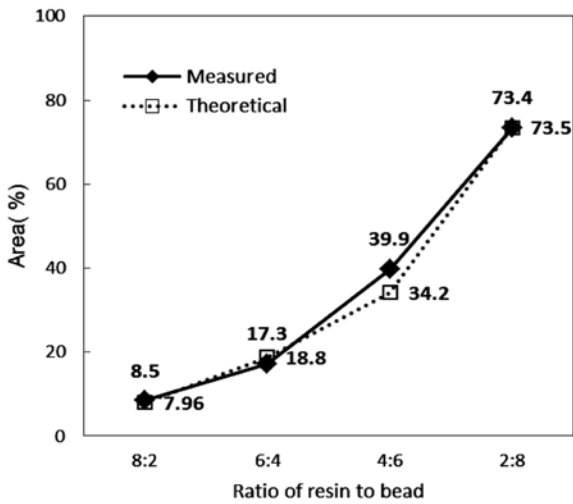
빛의 입사 방향에 따른 광 산란 현상을 확인하기 위하여 광원으로 632.8 nm 파장의 He-Ne 레이저와 ANDOR technology사의 CCD카메라가 장착된 광산란 장치를 사용하여 산란 패턴을 얻고 이들의 산란 정도를 count vs. frequency로 도시하여 얻어진 면적으로부터 빛의 입사 각도에 따른 광량을 상대 비교하였다. 이때 입사각은 빛이 기관 표면에 수직으로 입사하는 경우를 0으로 하였다. 일반 전구의 광원을 이용하여 ST1사의 고니오메터에 Solar center사 2 V 250 mA 태양전지 모듈을 장착하고 그 위에 제조된 패턴 필름을 덮고 0도에서 90도로 회전시키며 입사 빛에 의하여 생성된 voltage를 Keithley사 multimeter로 측정하였다. 입사각이 0도에서의 voltage를 기준으로 하여 입사각의 변화에 따른 voltage의 차이를 측정하였으며 이를 유리비드가 없는 상태의 필름을 덮은 태양전지의 각각의 각도에서의 얻어진 voltage 차이와 상대 비교하여 증가된 voltage 값을 패턴 필름에 의한 태양전지의 상대 효율 증가로 나타내었다.

결과 및 토론

Figure 1(a) 유리비드가 코팅된 패턴 필름의 유리비드 함량에 따른 광학 이미지의 top view를 나타내었다. 그림에서 보는 바와 같이 유리비드 함량이 증가될수록 유리 비드가 균일하게 코팅되는 것을 알 수 있다. 코팅액에 유리비드의 함량이 많은 경우, 코팅 시 구형의 유리비드가 코팅액에 조밀하게 분포되어 coater bar의 이동에 의하여 구의 이동이 적어 유리비드가 균일하게 코팅되는 반면, 유리비드의 함량이 작아지면 도포된 코팅액에 여유 공간이 많아져 coater bar에 의한 유리비드의 이동이 손쉬워져 상대적으로 균일하지 못한 분포를 갖게 된다. Figure 1(b)에 이미지 분석에 의하여 계산된 유리비드가 필름 표면에 차지하는 면적 비를 나타내었다. 그림에서 보는 바와 같이 용액에 첨가된 유리비드 함량을 면적으로 환산한 이론적 면적비와 비교하여 매우 유사한 면적을 가짐을 알 수 있다. 하지만, 유리비드의 함량이 작은 경우 Figure 1(a)에서 확인된 바와 같이 유리비드의 분포가 균일하지 못한 문제점을 갖는다. 이는 태양전지 표면재로 사용하는 패턴 필름의 유리비드에 의한 패턴이 일정하지 않다는 의미이며 이러한 불균일 패턴 분포는 광 투과, 반사, 흡수 및 산



(a)

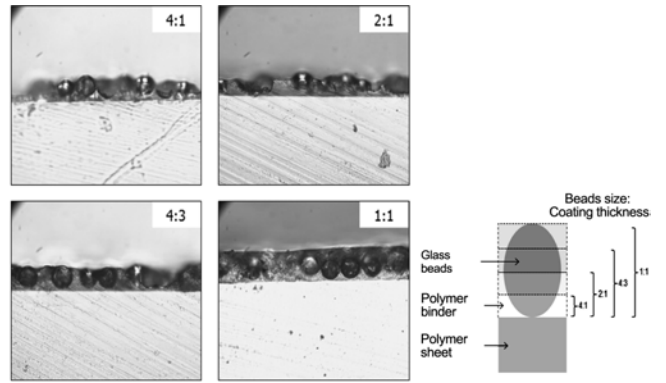


(b)

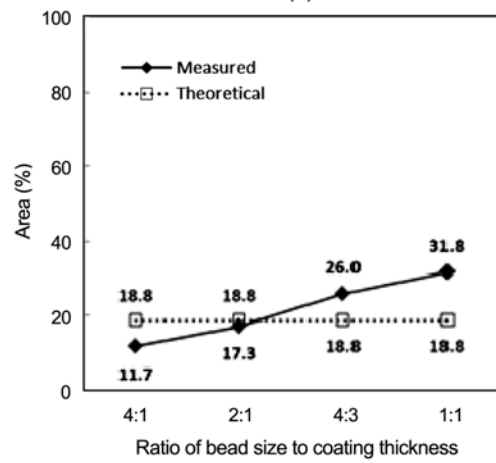
Figure 1. Glass bead distribution on patterned film: (a) optical image (top view); (b) glass bead covered area (bead diameter: coating thickness=2:1).

란에 영향을 미쳐 방향에 따른 태양전지 상대효율의 불균일을 초래할 것으로 판단된다.

Figure 2에 수지 대 유리비드의 비가 6:4인 경우, 유리비드 직경과 코팅 두께 비에 따른 측면 optical image와 모식도 그리고 유리비드가 코팅 필름 위에 차지하는 면적비를 나타내었다. 그림에서 보는 바와 같이 유리비드의 직경과 코팅 두께가 1:1의 경우, 바인더 수지가 유리비드를 완전히 덮고 있으며 2:1의 경우, 필름 위의 유리비드의 형태가 반구(hemisphere)의 형태를 가짐을 알 수 있다. 유리비드가 패턴 필름에서 차지하는 면적은 유리비드가 바인더 수지에 파묻힐수록(1:1) 면적이 증가됨을 알 수 있다. 이러한 이유는 코팅 시 바인더 코팅액의 두께가 두꺼운 경우, 유리비드를 포



(a)

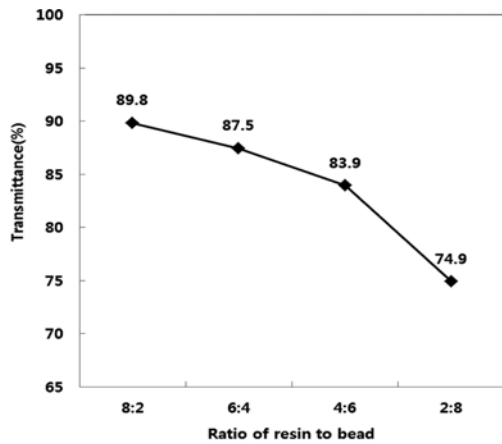


(b)

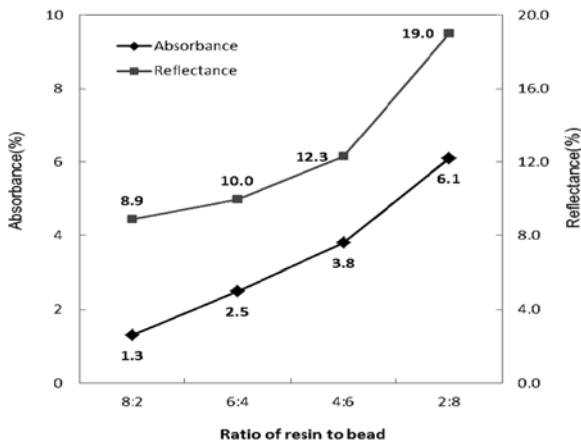
Figure 2. Glass bead surface morphology on patterned film: (a) optical image (side view); (b) glass bead covered area (resin: bead=6:4).

합한 용액의 양이 많아 coater bar에 의하여 유리비드의 밀림 현상이 적어 균일하게 코팅되는 반면 수지 대 유리비드의 비가 4:1인 경우, 이론적인 값에 비하여 유리비드의 면적이 감소됨을 알 수 있으며 이는 코팅액의 양이 작아 유리비드가 coater bar에 의하여 밀려 이동하여 기판 면에 균일하게 분포되지 못함에 기인된다. 유리비드의 필름 표면에서의 형태 또한 빛의 투과, 흡수 및 산란에 영향을 미칠 것으로 판단된다.

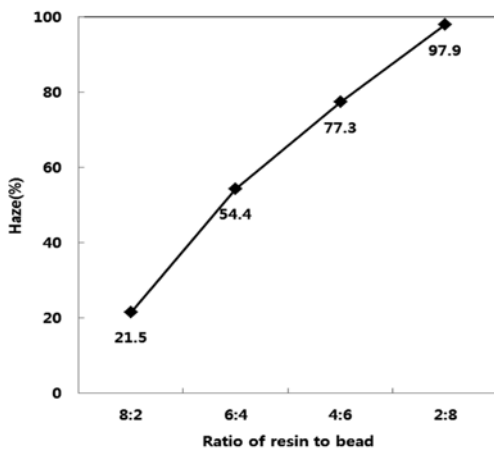
Figure 3에 유리비드 함량에 따른 광 투과, 흡수, 반사 그리고 헤이즈를 나타내었다. 그림에서 보는 바와 같이 유리비드의 함량이 증가됨에 따라 광 투과가 현저히 감소됨을 알 수 있다. 이는 유리비드 함량의 증가에 따라 유리비드에 의한 반사 및 흡수가 현저히 증가되며 특히, Figure 3(b)에서 확인된 바와 같이 패턴 기판에 차지하는 유리비드의 면적이 증가됨에 따라 유리비드에 의한 빛의 반사가 급격히 증가됨을 알 수 있다. 이러한 이유는 사용 유리비드가 광학용 고굴절 유리비드로서 높은 굴절률에 의하여 반사가 증가되기 때문이다. 또한 투과된 빛도 고굴절 유리비드에 의한 산란 현상에



(a)



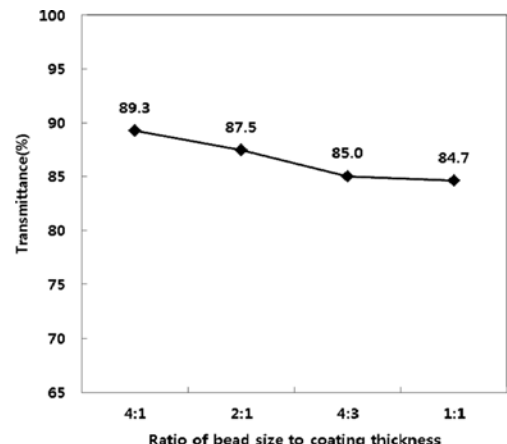
(b)



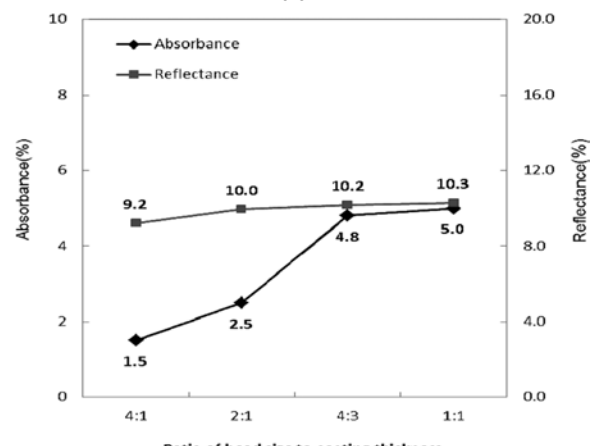
(c)

Figure 3. Effect of glass bead content on the optical properties of patterned film; (a) total transmittance; (b) reflectance and absorbance; (c) haze.

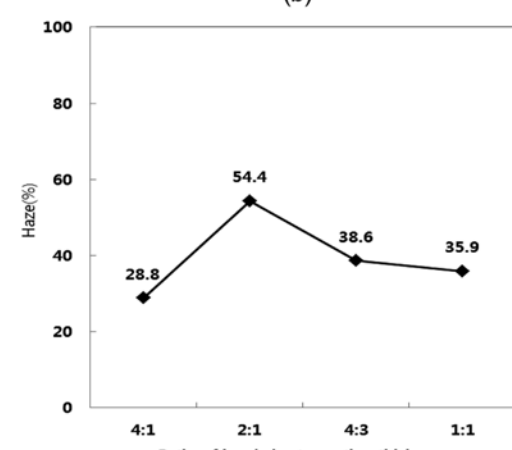
의하여 대부분 직접 투과(direct transmission) 보다는 확산 투과(diffused transmission)로 투과되며 유리비드의 함량 증가에 따라 확산 투과가 증가됨을 알 수 있다. 따라서 유리비드



(a)



(b)



(c)

Figure 4. Effect of glass bead shape on the optical properties of patterned film; (a) total transmittance; (b) reflectance and absorbance; (c) haze.

코팅을 이용한 패턴 필름의 제조의 경우, 태양 빛의 방향성에 의한 태양전지 효율 감소를 최소화하기 위해서는 태양전지로 입사되는 빛의 양을 의미하는 투과도의 감소가 유리비

드에 의하여 적으면서 동시에 빛의 방향성에 영향을 미치는 확산 투과는 최대가 되도록 유리비드 함량을 조절하여 코팅해야 함을 알 수 있다. 따라서 투과도의 감소가 큰 수지 대 유리비드 양이 2:8인 코팅액 보다는 투과도의 감소가 적으며 확산 투과가 증가되는 6:4 혹은 4:6 코팅액을 이용하는 것이 태양전지 효율을 증가시킬 수 있을 것으로 판단된다.

Figure 4에 패턴 필름 위의 유리비드 모양이 광 투과, 반사, 산란에 미치는 영향을 나타내었다. 그림에서 보는 바와 같이 유리비드가 완전히 수지에 묻힌 경우(1:1), 가장 높은 투과와 낮은 흡수를 보임을 알 수 있다. 하지만, 태양전지 상대 효율에 가장 큰 영향을 미치는 반사는 패턴 필름 위의 유리비드의 모양에는 크게 영향을 미치지 못함을 알 수 있다. 빛의 방향성에 영향을 미치는 산란의 경우 필름 위의 유리비드의 모양이 반구일 때 가장 높음을 알 수 있다.

Figure 5에 수지와 유리비드의 비가 6:4, 유리비드의 모양이 반구인 패턴 필름의 light scattering 장치에 의한 광 산란 패턴을 나타내었으며 변화된 입사각에 따른 광도 변화를 코팅 조건에 따라 Figure 6에 나타내었다. 그림에서 보는 바와 같이 유리비드를 사용하여 반구로 필름 표면에 패턴을 만든 필름이 일반 필름에 비하여 산란 현상이 급격히 많음을 알 수 있으며 입사각이 증가될수록 즉, 빛의 입사가 패턴 필름과 수직에서 멀어질수록 빛의 산란에 따른 퍼짐 현상이 감소됨을 알 수 있다. 이들의 광량은 Figure 6에서 보는 바와 같이 입사각의 증가에 따라 다소 감소하나 크게 변화되지 않음을 알 수 있다. 이는 유리비드가 갖는 곡면에 의하여 입사각이 증가되어도 빛은 수직으로 필름에 입사할 수 있기 때문이

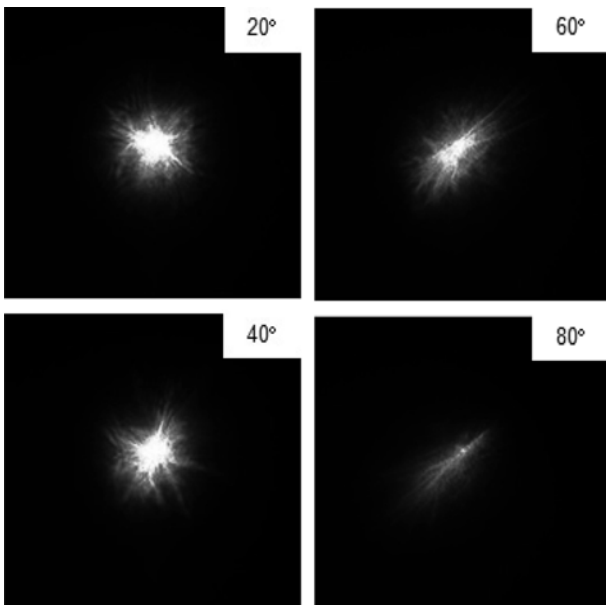


Figure 5. Light scattering patterns of glass bead patterned film by different incident light angle.

다. 아울러 이러한 현상은 Figures 3과 4에서 보는 바와 같이 유리비드에 의해 일어난 확산 투과의 증가에도 영향을 받는다. 이와 함께 반구의 유리비드 형태에 의한 산란 현상과 유리비드 안에서의 확산투과에 의하여 빛의 방향성에 의한 광도 변화가 최소화됨에 따라 빛의 방향성에 의한 태양전지 상대 효율감소가 현격히 줄어들 것으로 예측된다. Figure 6에 유리비드의 함량과 유리비드의 모양이 입사각에 따른 광도 변화에 미치는 영향을 나타내었다. 일정 각도에서의 투과 광도는 물질이 갖는 투과도와 관계가 있으며 따라서 Figures 3과 4에서 확인된 바와 같이 수지 대 유리비드의 비가 6:4 그리고 유리비드의 모양이 반구인 경우 가장 높은 광도를 가짐을 알 수 있다. 또한 유리비드의 양이 증가되는 경우 산란 빛이 많아지고 이들의 간섭효과가 일어나 광도 감소 요인으로 작용하며 패턴 필름에서 유리비드의 코팅모양에 의하여 광도가 감소됨을 알 수 있다.

Figure 7에 유리비드 양과 유리비드 모양에 따른 태양전지

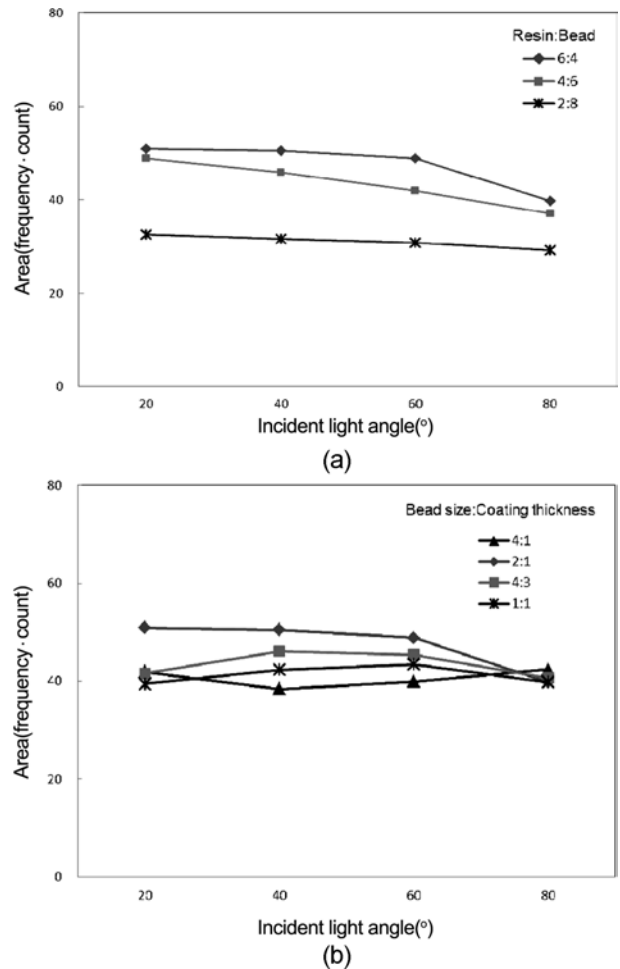


Figure 6. Light scattering intensity as a function of incident light angle: (a) effect of bead content; (b) effect of bead shape on patterned film.

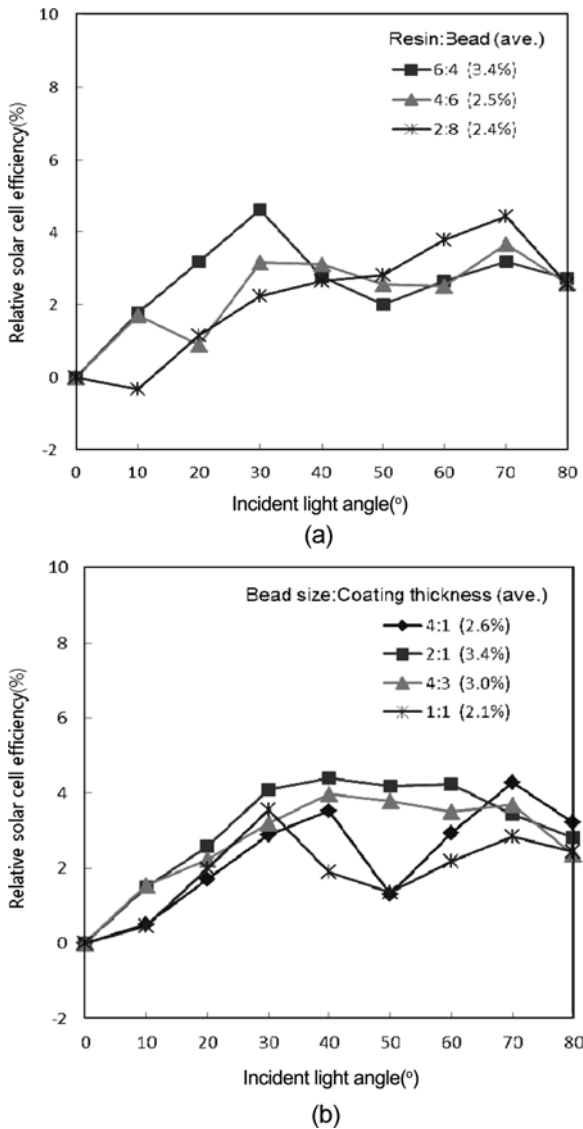


Figure 7. Relative solar cell efficiency as a function of incident light angle: (a) effect of bead content; (b) effect of bead shape on patterned film.

상대 효율을 입사각도에 따라 나타내었다. 그림에서 보는 바와 같이 유리비드가 포함되지 않는 필름에 비하여 상대 태양전지 효율이 증가함을 알 수 있다. 수지 대 유리비드의 비가 6:4 그리고 유리비드의 모양이 반구를 갖는 패턴 필름이 태양광의 입사각 0-90도 범위에서 3.4%의 평균 효율 증가를 보임을 알 수 있다. 태양전지 소재 변화 없이 표면재만으로서의 이러한 효율증가는 산업적으로 활용 가능할 것으로 판단된다. Figure 7(a)에서 보는 바와 같이 입사각이 30도 이하로 작은 경우, 태양전지의 상대효율은 Figure 3(a)에서 보는 바와 같이 광 투과에 의존적인 반면 입사각이 40도 이상에서는 빛의 태양전지로 들어오는 각도가 낮아 광 투과보다는 투과 중 확산투과의 양과 유리비드에 의한 산란에 의존함을 알 수

있다. Figure 7(b)는 유리비드의 형태가 태양전지 효율에 미치는 영향을 나타내었다. 그림에서 보는 바와 같이 유리비드의 곡면이 반구와 3/4 반구로 나타날 경우 Figure 5(b)에서 확인된 바와 같이 빛이 입사하여 산란하는 현상에 의하여 낮은 입사각보다는 60도까지의 입사각에서 효율이 큼을 알 수 있다. 하지만, 유리비드가 완전히 파묻힌 1:1의 경우 이러한 곡면이 기판 표면에 존재하지 않아 입사각이 30도 이상 되면 태양전지 상대효율이 감소함을 알 수 있다.

결론

본 연구에서는 태양전지의 상대효율을 증가시키기 위한 방법으로 고분자 필름 위에 고분자 바인더와 유리비드를 혼합한 용액을 코팅하여 반구 표면 구조를 갖는 유연 패턴 고분자 필름을 제조하고 이를 태양전지에 적용시켜 패턴 고분자 필름이 태양전지 효율에 미치는 영향을 살펴보았다.

필름 위에 유리비드 코팅 양이 증가됨에 따라 빛의 반사와 흡수에 의하여 광 투과도가 감소함을 알 수 있었으며 이러한 감소의 주된 요인이 흡수보다는 반사에 있음을 알 수 있었다. 유리비드에 의하여 투과된 빛 또한 확산 투과가 주를 이룸을 알 수 있었다.

패턴 필름 위에 유리비드의 모양은 바인더 위에 존재하는 유리비드의 표면적이 증가함에 따라 감소하나 이러한 감소는 흡수와 반사에 기인됨을 알 수 있었으며 헤이즈는 반구의 모양에서 가장 높음을 알 수 있었다.

빛의 입사각 즉, 방향성에 대한 산란 특성을 살펴본 결과, 유리비드로 코팅된 패턴필름의 경우 모양에 관계없이 입사각에 따른 영향이 없음을 확인하였으며 수지 대 비드의 함량이 6:4이며 반구 형태의 패턴필름의 산란이 가장 높음을 알 수 있었다.

빛의 입사각에 따른 태양전지 상대효율은 낮은 입사각에서는 광 투과에 의존하나 입사각이 증가되면 유리비드에 의한 산란과 유리비드 안에서의 확산 투과에 의존함을 알 수 있다.

필름에 형성된 반구 혹은 3/4구의 모양은 빛의 산란을 유발시켜 입사각이 증가함에 따라 태양전지 상대 효율이 증가한다. 수지 대 유리비드의 함량비가 6:4와 반구 형태의 패턴 필름에서 방향에 따른 상대 태양전지 효율이 최대 3.4%까지 증가함을 확인하였다.

감사의 글: 본 연구는 지식경제부의 선진기술국가 국제공동기술개발사업 [적층형 차세대 유기태양전지 소재 및 소자 개발, 2012-선진-B-015]으로 수행되었으며 이에 감사드립니다.

참고 문헌

1. F. Manzano-Aguilario, A. Alcayde, F. G. Montoya, A. Zapata-

- Sierra, and C. Gil, *Renew. Sust. Energ. Rev.*, **18**, 134 (2013).
2. A. Goetzberger, C. Hebling, and H. Schock, *Mater. Sci. Eng.*, **40**, 1 (2003).
3. K. Shirasawa, *Curr. Appl. Phys.*, **1**, 509 (2001).
4. A. M. Acevedo, *Sol. Energ. Mat. Sol. C.*, **90**, 2213 (2006).
5. N. Romeo, A. Bosio, V. Canevari, and A. Podesta, *Sol. Energ.*, **77**, 795 (2004).
6. S. Anandan, *Sol. Energ. Mat. Sol. C.*, **91**, 843 (2007).
7. S. D. J. Weng, Y. Sui, C. Shi, Y. Huang, S. Chen, X. Pan, X. Fang, L. Hu, F. Kong, and K. Wang, *Sol. Energ. Mat. Sol. C.*, **84**, 125 (2004).
8. G. Dennler, M. C. Scharber, and C. J. Brabec, *Adv. Mater.*, **21**, 1323 (2009).
9. L. Biana, E. Zhua, J. Tanga, W. Tanga, and F. Zhangb, *Prog. Polym. Sci.*, **37**, 1292 (2012).
10. T. Trupke, A. Shalav, B. S. Richards, P. Würfel, and M. A. Green, *Sol. Energ. Mat. Sol. C.*, **90**, 3327 (2006).
11. D. S. Kim, E. J. Lee, J. Kim, and S. H. Lee, *J. Korean Physical Society*, **46**, 1208 (2005).
12. J. Zhao and M. A. Green, *IEEE T. Electron Dev.*, **38**, 1925 (1991).
13. R. K. Brow and M. L. Schmitt, *J. Eur. Ceram. Soc.*, **29**, 1193 (2009).
14. G. S. Vicente, *J. Sol. Energ. Eng.*, **130**, 011007-1 (2008).
15. C. E. Kennedy, R. V. Smilgys, D. A. Kirkpatrick, and J. S. Ross, *Thin Solid Films*, **304**, 303 (1997).
16. A. W. Czanderna and F. J. Pern, *Sol. Energ. Mat. Sol. C.*, **43**, 101 (1996).
17. F. J. Pern and A. W. Czanderna, *Sol. Energ. Mat. Sol. C.*, **25**, 3 (1992).
18. M. A. Hamdy, *Solar & Wind Technology*, **7**, 147 (1990).
19. T. P. Teng, H. M. Nieh, J. J. Chen, and Y. C. Lu, *Renew. Energ.*, **35**, 845 (2010).
20. H. K. Elminir, A. E. Ghitas, R. H. Hamid, F. E. Hussainy, M. M. Beheary, and K. M. Abdel-Moneim, *Energ. Convers. Manage.*, **47**, 3192 (2006).
21. A. Gombert, W. Glaubitt, K. Rose, J. Dreiholz, B. Blasi, A. Heinzl, D. Sporn, W. Doll, and V. Wittwer, *Sol. Energ.*, **68**, 357 (2000).
22. K. S. Han, J. H. Shin, and H. Lee, *Sol. Energ. Mat. Sol. C.*, **94**, 588 (2010).
23. K. S. Han, H. Lee, D. Kim, and H. Lee, *Sol. Energ. Mat. Sol. C.*, **93**, 1214 (2009).
24. S. H. Hong, B. J. Bae, K. S. Han, E. J. Hong, H. Lee, and K. W. Choi, *Electron. Mater. Lett.*, **5**, 39 (2009).
25. L. Bergamin and T. Sammarae, *Sol. Energ.*, **84**, 90 (2010).
26. L. Ye, Y. Zhang, X. Zhang, T. Hu, R. Ji, B. Ding, and B. Jiang, *Sol. Energ. Mat. Sol. C.*, **111**, 160 (2013).