

태양전지 봉지재용 에틸렌 비닐 아세테이트 공중합체 필름의 광열화 거동

김문호 · 엄효상* · 변두진*[†] · 최길영*[†]

부경대학교 고분자공학과, *한국화학연구원 신뢰성평가센터
(2016년 2월 3일 접수, 2016년 2월 19일 수정, 2016년 2월 19일 채택)

Photodegradation Behavior of Ethylene/Vinyl Acetate Copolymer (EVA) Film for Solar Cell Encapsulant

Mun Ho Kim, Hyo Sang Eom*, Doo-Jin Byun*[†], and Kil-Yeong Choi*[†]

Department of Polymer Engineering, Pukyong National University, 365 Sinseon-ro, Nam-gu, Busan 48547, Korea

*Reliability Assessment Center for Chemical Materials, Korea Research Institute of Chemical Technology,
141 Gajeong-ro, Yuseong-gu, Daejeon 34114, Korea

(Received February 3, 2016; Revised February 19, 2016; Accepted February 19, 2016)

초록: 본 연구에서는 태양전지 봉지재로 사용되는 ethylene/vinyl acetate (EVA) 필름 소재의 광열화 거동을 분석하였다. 광열화 실험에서는 태양광 하에서의 광열화를 모사하는 것이 중요하기 때문에 태양광과 유사한 제논 아크 램프를 사용하여 실험을 진행하였다. 소재의 광열화는 표면에서 주로 발생하기 때문에, 표면의 형상 및 조성, 그에 따른 광학특성의 변화를 분석하였다. 광열화가 진행되면 EVA 필름의 표면에 미세 크랙과 같은 결점들이 생성됨을 확인하였는데, 이러한 표면 형상의 변화는 광투과 특성에도 영향을 미쳐서 전체적인 광투과가 감소하였다. 또한 광산화반응으로 소수 특성을 유지해야 할 필름의 표면에 친수기들이 생성되어, 태양전지 모듈의 성능 및 수명에 주요한 영향을 미칠 수 있음을 확인하였다. 마지막으로 광원의 차이에 따른 광열화 거동을 분석하여, 가속시험 설계를 위한 광원 선택의 중요성을 확인하였다.

Abstract: In this study, we investigated the photodegradation behavior of an ethylene/vinyl acetate (EVA) film for solar cell encapsulant. The EVA film was exposed to the weathering apparatus, equipped with a xenon-arc lamp for simulated sunlight exposure conditions. Since photodegradation mainly induces changes and variations on the materials surface, a variety of technical approaches were employed to characterize the modifications of the EVA film surface, and then the deterioration behavior of optical properties was discussed in term of the morphological changes. And also, photodegradation caused the composition modification of the EVA film surface by the incorporation of oxygen to the polymer chains, which could make the wettability of the film hydrophilic. Finally, the photo-induced deformation behavior of the EVA film influenced by the light intensity depending on the type of lamp was discussed in order to show the importance of the light source.

Keywords: ethylene/vinyl acetate copolymer (EVA), photodegradation, solar cell encapsulant.

서 론

장기 수명을 가지는 태양전지 모듈을 얻기 위해서는 모듈의 부품 하나하나의 광학적, 전기적, 기계적 물성이 UV light, 계절 변화나 밤/낮 변화에 의한 온도 차이, 습도, 비, 공기 오염원과 같은 환경적인 요인들에 의해 영향을 받지 않을 만큼 내구성이 뛰어나야 한다. 봉지재는 태양전지 셀을 수분으로

부터 보호하는 접착제 겸 실란트 역할을 하게 되며, 태양전지와 회로 부품들을 외부 환경적인 요인들로부터의 보호하는 역할을 하게 된다.^{1,2} 태양전지 모듈을 위한 봉지재는 poly(butyl acrylate), polyurethane, ethylene/vinyl acetate copolymer (EVA) 등을 포함하는 소수의 고분자 소재만이 사용될 수 있는데, 이중 EVA는 투명하면서도 소수성을 가지고 있어서 수분으로부터의 보호 측면에서 유리한 점이 있다. 또한 셀 함량과 인장 모듈러스를 vinyl acetate의 함량에 의해 조절할 수 있으며, 무엇보다도 원재료의 가격이 상대적으로 저렴하기 때문에 상업화된 태양전지 모듈 봉지재 소재로 활용되고 있다.^{3,4}

고분자 소재의 활용에 있어서 하나의 단점 중의 하나는 내

[†]To whom correspondence should be addressed.
E-mail: djbyun@kricr.re.kr; kychoi@kricr.re.kr
©2016 The Polymer Society of Korea. All rights reserved.

후성에 관한 것인데, 대부분의 고분자 소재는 UV에 취약한 특성을 가지고 있다.⁵ 태양전지는 계속해서 태양광을 받아 전기를 생산해야 하는데, UV에 취약한 고분자인 EVA 필름 소재는 태양광에 의해서 광열화가 일어날 수 있기 때문에 제작 당시와 제작 후 수년이 지났을 때의 특성이 달라져 원하는 성능을 얻지 못하고, 모듈 전체의 성능 저하를 야기시킬 수 있다.⁶⁻⁸ 태양전지의 설계 단계에 있어서 EVA 소재의 광열화에 대한 충분한 고려가 이루어져야 하는데, 자연 상태의 태양광에 의한 광열화는 수년 이상의 기간이 필요하다. 따라서 인공광원을 이용하는 가속 광열화 실험을 이용하여 실험 시간을 단축시키고, 그 실험 결과를 바탕으로 태양전지의 수명을 예측하는 연구들이 이루어지고 있다.^{9,10}

가속 광열화 실험에서 가장 일반적으로 광원은 태양광의 광파워 스펙트럼을 모사한 제논 아크(xenon arc) 램프인데, 이 광원은 실제 태양광 하에서 나타날 수 있는 광열화 거동에 대한 재현성이 뛰어나다. 최근에는 메탈 할라이드(metal halide) 램프를 사용하는 경우도 있는데, 메탈 할라이드 광원은 현재 상업적으로 활용되고 있는 실내축진시험장치의 인공 광원 중 가장 강한 자외선 강도를 갖고 있어 초축진 광열화 장치를 활용될 수 있는 가능성이 있지만, 광파워 스펙트럼이 자연 태양광과 상이하고 기초 연구가 부족한 램프로 알려져 있다. 제논 아크 램프 및 메탈 할라이드 램프의 광파워 스펙트럼은 최근 발표한 논문에서 확인할 수 있으며, 고분자 소재의 광열화 거동이 광원에 따라 상이한 것을 확인한 바 있다.¹¹⁻¹³

본 연구에서는 상업화된 태양전지 봉지재인 EVA 필름소재의 가속 광열화 실험에 대한 결과를 얻고자 하였다. 가속 광열화 실험에서는, 자연 태양광 하에서의 광열화를 모사하는 것이 중요하기 때문에 태양광과 유사한 제논 아크 램프를 사용하여 실험을 진행하였으며 광열화에 따른 필름의 특성 변화를 분석하였다. 또한 메탈 할라이드 램프를 이용하여 강한 자외선 강도 하에서의 초축진 광열화에 따른 실험결과를 함께 얻어 비교 분석하였다.

실 험

EVA 필름 Curing. EVA 필름은 일본의 Mitsu-Dupont Co. 사 제품(Evaflex 150, containing 33 wt% vinyl acetate)을 입수하여 그대로 사용하였다. EVA 필름의 curing은 실제 상업화된 태양전지 모듈 제작 장비를 활용하여 진행하였다. EVA 원재료는 불투명한데 진공 라미네이터 장비를 이용하여 165 °C 진공에서 8분 30초 동안 경화시켰다. 고온에서 EVA 필름은 가교되고 용융이 되어 접착이 되기 때문에, 이형 필름을 이용하여야만 개별 필름을 얻을 수 있었다. 경화 공정이 끝난 EVA 필름은 xylene에 하루 동안 침지한 후 건조시켜 질량 변화를 통하여 젤 함량을 측정하였는데, 84% 정도의 젤 함량

을 가짐을 확인할 수 있었다.

가속 광열화 실험 및 초축진 광열화 실험. 가속 광열화 실험은 태양광을 모사하는 광파워 스펙트럼을 가지는 제논 아크 램프를 사용하고 있는 Xenotest Alpha(Atlas, USA) 장비를 이용하여 진행되었다. 태양전지 모듈에서의 광열화 거동을 모사하기 위해서, 실제 태양전지 모듈의 커버 유리를 시편 앞에 두어 커버 유리를 통과한 빛에 의해 열화가 되도록 하였고 온도의 영향을 배제하기 위해서 광열화 챔버는 상온을 유지하였다. 샘플과 광원의 거리는 10 cm 정도로 유지하였고, 조사광량은 100 MJ/m² 단위(Xenotest Alpha 설비로 11 일 소요)로 최종 500 MJ/m²의 광량을 노출하였는데, 이는 자연상태의 태양광에서는 2년치에 해당하는 광량이다. 메탈 할라이드 램프를 활용하는 초축진 시험은 metaling weather meter(Suga, Japan)를 사용하였고, 제논 아크 램프를 사용하는 경우보다 6배 정도 높은 자외선 강도를 가지는 것을 제외하면 다른 실험 조건은 위와 동일하게 설정하였다.

광열화 거동 분석. 광열화에 따른 EVA 필름의 표면 모폴로지 변화는 주사전자현미경(SEM; JEOL JSM 6700F, Japan)에 의해서 분석하였다. 열화된 필름 표면의 거칠기는 Nanoscope IV controller가 구비된 AFM(Veeco Metrology Group, USA)을 이용하여 분석하였다. 광열화에 따른 필름의 변색을 분석하기 위해서 색차계(Minolta CM-3700d, Japan)를 이용하여 ASTM E313 규격을 기준으로 ΔE 값(색차, $\sqrt{\Delta L^2 + \Delta a^2 + \Delta b^2}$)와 ΔYI 값 ($YI=100(C_x X - C_z Z)/Y$; $C_x=1.3013$, $C_z=1.1498$)를 specular component included(SCI)로 측정하였다. 필름의 혼탁도(haze) 및 광투과도 변화는 haze meter (BYK-Gardner, GmbH 2725, Germany)와 UV-vis-NIR spectrometer(Varian, Cary 5000, USA)를 이용하여 분석하였다. 열화에 따른 표면 조성의 변화는 fourier transform infrared(FT-IR; Thermo Nicolet 5700, USA)을 이용하여 분석하였는데, FTIR 장비는 ATR(attenuated total-reflection) 액세서리가 구비되어 있는 설비를 이용하였다.

결과 및 토론

광열화에 따른 EVA 필름의 표면 형상 변화. 광열화는 UV와 접촉하는 표면에서 가장 먼저 발생하기 때문에 표면의 특성변화를 분석하는 것이 중요하다.¹⁴ 제논 아크 램프를 이용한 광열화 시험 전·후의 EVA 필름 표면 모폴로지 변화를 SEM으로 관찰한 결과를 Figure 1에 나타내었다. EVA 필름은 Figure 1(A)와 같이 원래 매끈한 표면을 가지고 있었지만, 광에 노출이 되기 시작하면 초기에는 표면 결함이 부분적으로 생성되는 것이 관찰할 수 있다(Figure 1B). 노출 광량이 증가하여 열화 정도가 높아지게 되면 결함이 필름 전체에 걸쳐서 균일하게 확대되는 것을 관찰할 수 있었다(Figure 1(C)-(D)).

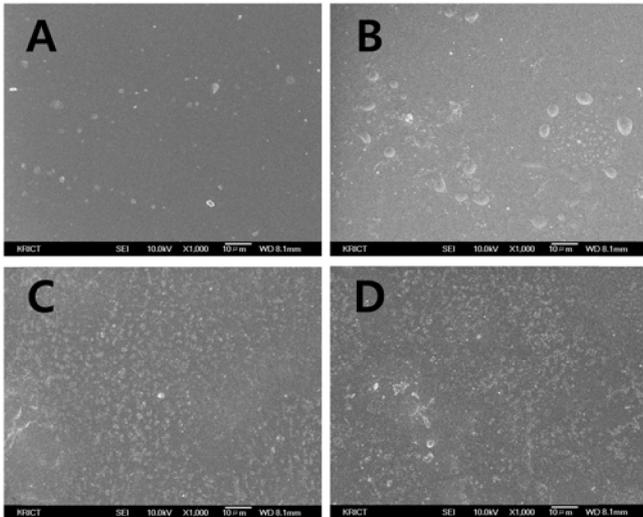


Figure 1. SEM surface images of EVA sheets: (A) before; (B)-(D) after photoaging (Accumulated radiation dose: (B) 100 MJ/m², (C) 300 MJ/m², (D) 500 MJ/m²).

고분자 소재가 UV에 노출이 되면 광열화가 진행되는데, 광열화의 생성되는 주요한 결과 중의 하나는 고분자의 사슬의 절단이다. 태양광에 포함된 295 nm 파장의 단파장 에너지는 고분자 사슬에 존재하는 C-N, O-O, C-Cl, C-O, N-H, 그리고 Si-O 타입의 결합을 파괴할 수 있는 에너지이다.¹⁵ 고분자 사슬이 절단되면 분자량이 작은 고분자 사슬들이 생성되고 이러한 저분자량 물질들은 이동성이 높아 쉽게 결정화될 수 있기 때문에, 전체적인 소재의 부피가 감소하고 밀도의 증가를 유발하게 된다. 이와 같은 부피의 감소 및 밀도 증가로 인해서 표면에서는 결합이나 미세 크랙이 생성되게 하기 때문에 Figure 1과 같은 모폴로지의 변화가 나타나게 된다.¹⁶ Figure 2는 Figure 1(D)에서 보이는 샘플을 확대하여 관찰한 SEM 이미지인데, EVA 필름의 표면에 미세 크랙이 상당량 생성된 것을 확인할 수 있다.

광열화 전후의 EVA 필름 표면의 거칠기는 AFM 분석을 통해서 관찰하여 Figure 3에 나타내었다. Figure 3(A)를 살펴보면, 광열화 전의 EVA 필름의 표면은 결합이 많지 않고 균일하고 평평한 표면 형상을 가지고 있음을 알 수 있는데, 평균 조도를 나타내는 Ra 값은 5.703 nm 값을 보여주었다. Figure 3(B)는 500 MJ/m² 노출된 EVA 필름의 표면을 스캔한 결과인데, 광열화 이전에 비해서 표면의 거칠기가 매우 증가하였다는 것을 확인할 수 있었다. 측정된 Ra값 역시 32.522 nm로 광열화 전보다 6배 정도 증가한 것으로 확인되어, 광열화에 따라서 표면의 모폴로지가 현저하게 변화한 것을 확인할 수 있다.

광열화에 따른 EVA 필름 광학특성 변화. SEM 및 AFM 분석을 통해서 열화에 따른 표면 결합 및 거칠기의 증가는 광학특성에도 그대로 영향을 미쳐서 초기에는 투명한 샘플이

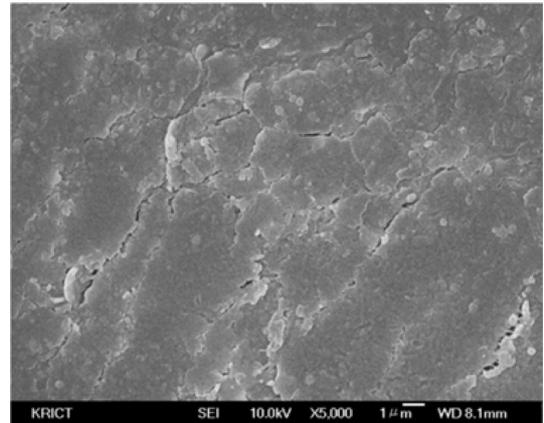


Figure 2. Magnified SEM surface of EVA sheet exposed to 500 MJ/m² radiation.

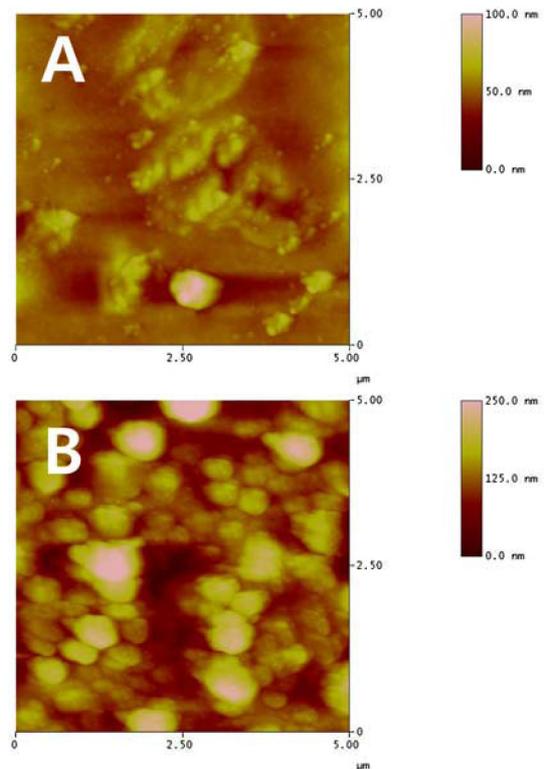


Figure 3. AFM analysis of EVA sheets: (A) before; (B) after photoaging (Radiation dose: 500 MJ/m²).

광에 노출됨에 따라서 뿌옇게 흐려지는 것을 관찰할 수 있었다. Figure 4는 EVA 필름의 광열화에 따른 색차, 황변, 혼탁도의 변화를 나타낸 것인데, 광열화에 따라서 색차, 황변 및 혼탁도는 투명한 특성에서 점진적으로 벗어나는 것을 확인할 수 있다. Figure 5에서는 EVA 필름의 가시광에서의 광투과 특성을 나타낸 데이터인데, EVA 필름은 광열화가 진행될수록 투과도는 가시광 전체에 걸쳐서 감소하는 경향을 나타내

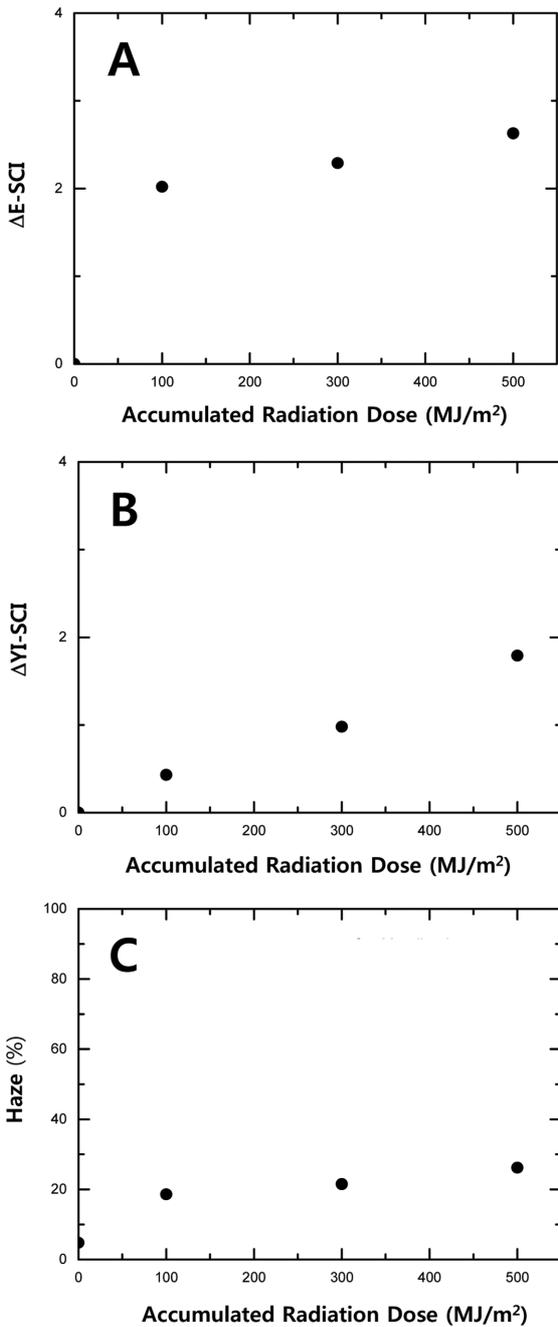


Figure 4. Optical properties of EVA films before and after photoaging. (A) Delta color differences; (B) delta yellowing indexes; (C) haze data.

고 있다. 투과도의 감소는 초기(100 MJ/m²까지)에 주요하게 나타났고, 그 이후에는 감소의 폭이 크지 않음을 확인할 수 있다.

원래 매끈한 표면을 가지는 필름이 광열화되면서 거친 표면을 가지게 되면서 빛을 산란시키는 정도가 커짐에 점점 증가하기 때문에 이와 같은 뿌옇게 흐려지는(whitening) 현상이

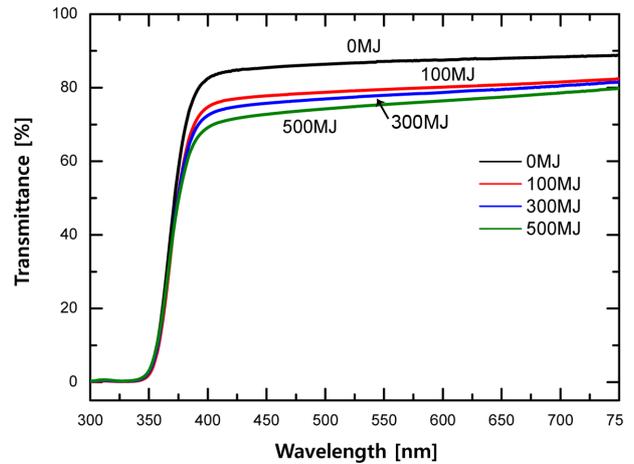


Figure 5. Transmittance spectra of EVA films before and after photoaging.

나타남이 예상된다.¹⁷ EVA 필름의 광열화에 따른 표면 형상에 변화 및 그에 따른 가시광 투과의 감소는 전체적인 태양광 발전의 효율의 감소를 야기할 것이기 때문에, EVA 필름의 취약한 광안정성을 충분히 고려하여 모듈을 설계해야 할 필요가 있으며, 이와 같은 표면 morphology의 변화 및 광투과 특성의 변화는 광열화의 초기 과정에 주요하게 발생한다는 것도 주목해야 하는 결과라고 할 수 있다.

광열화에 따른 EVA 필름의 표면조성 변화. 고분자 소재에서의 광열화는 표면에서의 형상 뿐만 아니라 표면 조성의 변화 또한 야기할 수 있다. 열화에 의해서 고분자 사슬에서 라디칼이 생성되면 산소가 침투하여 초기에는 수산화기 및 과산화기가 고분자 사슬에 생성이 되고, 최종적으로 카르보닐기(-C=O)가 표면에 생성된다는 것은 널리 알려져 있는 사실이다.^{18,19}

광열화에 따른 EVA 필름의 표면 조성의 변화는 ATR-FTIR을 이용하여 분석하였다. Figure 6에 분석 결과를 나타내었는데, 스펙트럼에서 가장 먼저 관찰되는 것은, 광열화가 진행됨에 따라서 3600~3200 cm⁻¹의 비교적 넓은 범위에서 흡수 피크가 나타난다는 것인데, 500 MJ/m²에 노출된 샘플에서 가장 큰 피크를 보여주고 있다. 이 범위에서의 흡수 특성은 표면에 수산화기(-OH)가 생성되었다는 것을 나타내고 있다. 또 다른 주목할 만한 결과는 1100 cm⁻¹ 위치의 피크가 500 MJ/m²에 노출된 샘플에서 크게 증가한 것이데, 1100 cm⁻¹의 피크는 C-O 작용기의 생성을 나타낸다.²⁰

표면 조성의 변화를 살펴보면, 광열화가 진행될수록 표면에 친수기가 생성된다는 것을 의미하고 있는데 이는 수분 침투를 억제하기 위해서 소수성을 유지해야 하는 태양전지 모듈 봉지재로서의 물성 측면에서 살펴보면 매우 부정적인 결과라고 할 수 있다. 또한 EVA 소재는 광열화가 진행되면 광산화 반응의 결과로서 단분자인 아세트산이 생성될 수 있고

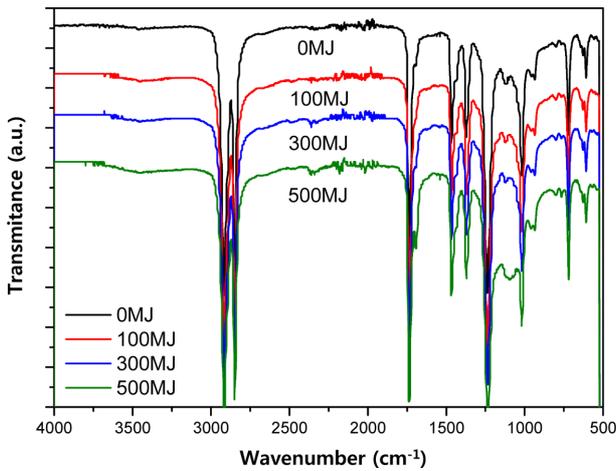


Figure 6. Delta color differences transmittance spectra ATR-FTIR spectra of EVA films before and after photoaging.

고분자 표면에 카르복실산이 생성될 수 있다고 보고되고 있는데,³ 이와 같은 산성 성분의 부산물은 태양전지 모듈에 존재하는 금속을 부식시킬 위험도 있기 때문에, 모듈을 설계함에 있어서 사전에 고려해야 하는 중요한 점이다.

광원에 따른 광열화 거동의 변화. 광원을 제논 아크 램프에서 메탈 할라이드 램프로 변경하여 광열화를 진행한 샘플

을 살펴보았을 때, whitening이 일어난 제논 아크 램프에서와는 달리 외견상으로는 거의 변함이 없이 계속해서 투명한 특성을 유지함을 확인할 수 있었다. Figure 7(A)는 메탈 할라이드 램프에서 500 MJ/m²의 광량을 노출시킨 샘플에 대한 표면 SEM 이미지인데, 표면의 형상이 광에 노출되지 않은 샘플과 유사하게 매끈한 형상을 가짐을 확인할 수 있었고 미세 크랙과 같은 광열화에 따른 결과물들은 관찰되지 않았다.

Figure 7(B)는 EVA 필름의 광열화에 따른 색차의 변화를 나타낸 것인데, 메탈 할라이드 램프 하에서는 색차의 변화가 거의 없음을 보여주고 있는데, 여기서 나타내진 않았지만 황변 및 혼탁도 역시 거의 변화가 없었다. Figure 7(C)는 메탈 할라이드 광원 하에서의 EVA 필름의 광투과 특성을 나타낸 것인데, 광에 노출되더라도 거의 변화가 없음을 나타내고 있다. FTIR spectra로 관찰되는 표면의 조성 변화 또한 Figure 7(D)에서 관찰되는 것처럼 거의 변화가 없는 것으로 관찰되었다.

광에 노출된 EVA 필름의 표면의 형상 및 조성, 필름의 광투과 특성 변화 결과에 따르면 메탈 할라이드 광원 하에서는 열화가 거의 나타나지 않은 것으로 판단된다. 메탈 할라이드 램프는 UV 영역의 에너지가 매우 높아 단시간 내에 광열화 효과를 얻기 위해서는 자주 사용되는 광원인데, EVA 필름의 경우에는 단시간 내에서는 광열화 효과가 나타나지 않는 것

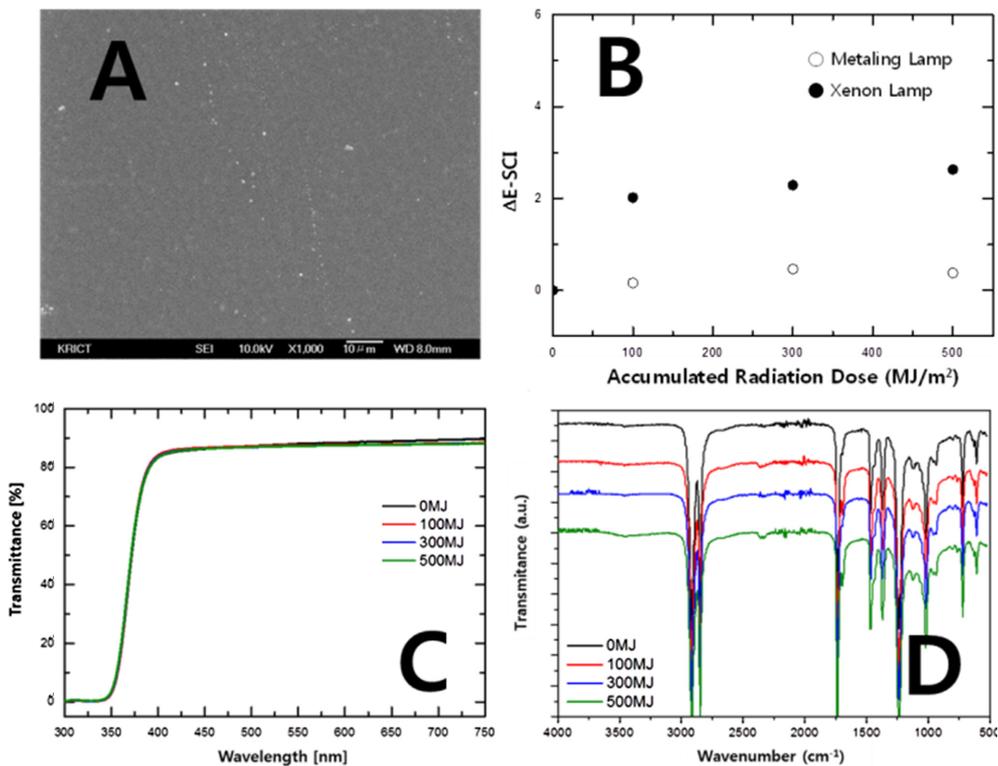


Figure 7. Properties of EVA films before and after photoaging using the metaling lamp. (A) SEM surface image of EVA film exposed to 500 MJ/m² light radiation by a metaling lamp; (B) delta color differences data; (C) transmittance spectra; (D) ATR-FTIR spectra.

으로 확인된다. EVA 필름의 경우에는 광원에서의 UV 에너지의 강도보다는 UV에 노출되는 시간이 더 중요하기 때문에 적은 광량을 장시간 동안 노출할 경우에만 광열화가 나타나는 것으로 예상된다. 이와 같은 결과는 EVA 필름의 광열화 거동을 모사하는 가속실험을 설계할 때 광원의 선택이 매우 중요하다는 것을 나타내며, UV 에너지 강도가 높은 광원을 사용한다고 하더라도 광량에 대비한 광열화 가속효과가 크지 않을 수 있다는 것을 시사하는 중요한 결과라 할 수 있다.

결 론

본 연구에서는 태양전지 모듈용 봉지재인 EVA 필름 소재의 내구성 가속시험 설계를 위한 광열화 거동을 분석하였다. EVA 필름은 광열화가 진행될수록 표면에 미세 크랙과 같은 결점들이 생성됨을 확인하였는데, 이는 광열화에 따른 고분자 사슬의 절단과 가교, 그리고 그로 인한 부피수축으로 설명할 수 있었다. 이러한 표면 형상의 변화는 광투과 특성에도 영향을 미쳐서 전체적인 광투과가 감소하고, 광산화반응으로 소수 특성을 유지해야 할 필름의 표면에 친수기들이 생성되어, 태양전지 모듈의 성능 및 수명에 주요한 영향을 미칠 수 있음을 확인하였다. 이와 같은 필름소재 물성 변화는 태양광을 모사한 광원을 사용할 경우 초기에 주요하게 발생하였으며, 자외선 강도가 높은 광원에 단시간에 노출할 경우에는 관찰되지 않기 때문에 가속시험의 설계에 있어서 광원 선택이 중요하다는 것을 나타내고 있다.

감사의 글: 이 논문은 부경대학교 자율창의기술연구비(2015년)에 의하여 연구되었으며 이에 감사드립니다.

참 고 문 헌

1. A. W. Czaderna and F. J. Pern, *Sol. Energy Mater. Sol. Cells*, **43**, 101 (1996).
2. K. Agroui, A. Maallemi, M. Boumaour, G. Collins, and M. Salama, *Sol. Energy Mater. Sol. Cells*, **90**, 2509 (2006).
3. S. I. N. Ayutthaya and J. Wootthikanokkhan, *J. Appl. Polym. Sci.*, **107**, 3835 (2008).
4. J. Jin, S. Chem, and J. Zhang, *Polym. Degrad. Stabil.*, **95**, 725 (2010).
5. N. S. Allen, *Photochemistry and photophysics of Polymer Materials*, John Wiley and Sons, Ltd, London, p 569 (2010).
6. S. M-Therias, E. Fanton, J. L. Gardette, S. Peeterbroeck, M. Alexandre, and P. Dubois, *Polym. Degrad. Stabil.*, **92**, 1873 (2007).
7. T. Kojima and T. Yanagisawa, *Sol. Energy Mater. Sol. Cells*, **81**, 119 (2004).
8. F. J. Pern and S. H. Glick, *Sol. Energy Mater. Sol. Cells*, **61**, 153 (2000).
9. H. Hintz, H. J. Egelhaaf, L. Luer, H. Hauch, H. Peisert, and T. Chasse, *Chem. Mater.*, **23**, 145 (2011).
10. J. Pospisil, J. Pilar, N. C. Billingham, A. Marek, Z. Horak, and S. Nespurek, *Polym. Degrad. Stabil.*, **91**, 417 (2006).
11. M. H. Kim, J. J. Lee, D. J. Byun, and K. Y. Choi, *J. Colloid Interf. Sci.*, **393**, 66 (2013).
12. M. H. Kim, J. J. Lee, H. S. Eom, J. E. You, K. Y. Choi, and D. J. Byun, *Polym. Degrad. Stabil.*, **98**, 1648 (2013).
13. M. H. Kim, D. J. Byun, S. Y. Song, S. M. Shin, S. K. Kwak, and K. Y. Choi, *Macromol. Res.*, **21**, 1366 (2013).
14. M. H. Kim, J. H. Jeong, and D. J. Byun, *Polym. Degrad. Stabil.*, **120**, 17 (2015).
15. J. Scheirs, *Compositional and Failure Analysis of Polymers*, John Wiley and Sons, Ltd, London, p. 518 (2000).
16. Y. Zhang, X. Hao, J. Zhou, Y. Zhang, J. Wang, Y. Song, and L. Jiang, *Macromol. Rapid Commun.*, **312**, 2115 (2010).
17. M. D. Kempe, *Sol. Energy Mater. Sol. Cells*, **94**, 246 (2010).
18. S. B. Brijmohan, S. Swier, R. A. Weiss, and M. T. Shaw, *Ind. Eng. Chem. Res.*, **44**, 8039 (2005).
19. W. Y. Jung and J. I. Weon, *Polym. Korea*, **39**, 873 (2015).
20. F. Leroux, L. Meddar, B. Milhot, S. Morlat-Therias, and J. L. Gardette, *Polymer*, **46**, 3571 (2005).