

저온 경화는 페이스트 용 아크릴계 바인더의 다양한 개시제의 영향에 관한 연구

문지연¹ · 임현수² · 박고등¹ · 남혜령¹ · 전다영¹ · Otgongerel Zulmandakh¹ · 권오련¹ · 김성현^{3†}

¹한국전자기술연구원, 연구원

²한국전자기술연구원, 선임연구원

³한국전자기술연구원, 수석연구원

A Study on the Effect of Various Initiators of Acrylic Binder for Low-Temperature Curing Silver Paste

Moon Jiyeon¹ · Lim Hyunsoo² · Park Godeung¹ · Nam Hyeryeong¹ · Jun Da Yeong¹ · Otgongerel Zulmandakh¹ · Kwon Oryeon¹ · Kim Sung Hyun^{3†}

¹Researcher, Korea Electronic Technology Institute

²Senior Researcher, Korea Electronic Technology Institute

³Principal Researcher, Korea Electronic Technology Institute

[†]Corresponding author: shkim@keti.re.kr

Abstract

In heterojunction (HJT) solar cells, an amorphous silicon passivation layer is attached to the top and bottom of a crystalline silicon layer. HJT solar cells are manufactured at approximately 200°C because the structure of amorphous Si:H changes at high temperatures. Therefore, the silver paste utilized as an electrode on HJT solar cells should be subsequently cured at low temperatures below 200°C. In addition, the electrode requires good conductivity even at low curing temperatures. An initiator in the binder is crucial for the production of silver paste capable of low-temperature curing. This study investigated the effects of various initiators on the characteristics of a binder and silver paste that can be cured at low temperatures. Differential scanning calorimetry (DSC) and thermal gravimetric analysis (TGA) were operated to investigate the initiation and thermal decomposition properties of binders. The relationship between gel contents and the electrical conductivity of cured pastes was explored to reveal the impact of the curing ratio on electrical conductivity. The appropriate utilization of the initiator resulted in a high curing rate, which in turn increased the electrical conductivity.

Keywords: 은 페이스트(Silver paste), 저온 경화(Low-temperature curing), 아크릴계 바인더(Acrylic binder), 개시제(Initiator), 겔 함량(Gel contents), 비저항(Resistivity)

기호 및 약어 설명

TOPCon : Tunnel oxide passivated contact

HJT : Heterojunction technology

 OPEN ACCESS



Journal of the Korean Solar Energy Society
Vol.43, No.5, pp.9-17, October 2023
<https://doi.org/10.7836/kjes.2023.43.5.009>

pISSN : 1598-6411

eISSN : 2508-3562

Received: 24 April 2023

Revised: 21 June 2023

Accepted: 31 August 2023

Copyright © Korean Solar Energy Society

This is an Open-Access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution NonCommercial License which permits unrestricted non-commercial use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.

DSC : Differential scanning calorimetry

TGA : Thermogravimetric analysis

DTG : Derivative thermogravimetry

하첨자 설명

T_{onset} : Onset temperature

1. 서론

최근 탄소 배출에 대한 규제가 강화됨에 따라 이산화탄소 배출을 감소시키기 위한 화석연료의 대체에너지가 주목을 받고 있다. 이에 따라 국가별 에너지 정책 중 신재생 에너지 비중이 증가하면서 태양광 발전에 대한 관심이 높아졌다. 태양광 발전은 재생 가능한 에너지로 이산화탄소의 배출 없이 전력 공급이 가능하다는 장점을 가지고 있다^{1,2)}. 하지만 제조 단가의 감소에도 불구하고 여전히 가격 경쟁력이 떨어진다는 문제점이 남아 있다. 이를 해결하기 위해 저가화와 고효율화를 동시에 만족하는 다양한 차세대 태양전지 기술의 연구개발이 계속되고 있다. 차세대 태양전지 기술로는 tunnel oxide passivated contact (TOPCon), heterojunction technology (HJT), tandem 태양전지 등이 있으며^{3,4)}, HJT 태양전지는 그 자체의 높은 전력 변환 효율뿐만 아니라 tandem 태양전지와 호환성이 우수하여 주목받고 있다. HJT 태양전지는 공정 단축과 광전 효율 개선으로 발전 원가를 낮추는 기술을 중심으로 발전하고 있으며, tandem 태양전지가 상용화되기 전까지 HJT 태양전지가 시장을 선도할 것으로 예측된다^{5,6)}.

HJT 태양전지는 결정질 실리콘 상하부에 비정질 실리콘 패시베이션 층이 접합되어 있는 구조이다. 이 비정질 층을 형성시키는 공정은 약 200°C에서 이루어지는데, 이때 생성된 비정질 Si:H 층은 고온에서 구조가 변형이 된다⁷⁾. 이러한 이유로 후속 공정은 200°C 이하에서 이루어져야 하며, 전극 소성도 저온에서 행해져야 한다. 이에 따라 HJT 태양전지 개발과 함께 저온 경화가 가능한 은 페이스트에 관한 연구도 활발히 진행되고 있다. 저온 경화가 가능한 은 페이스트 제조 과정에서 바인더의 역할은 매우 중요하다. 바인더는 은 입자와 전극을 접합시켜 전극의 물리적, 화학적 안정성을 유지할 수 있도록 해야 한다. 아크릴계 바인더는 은 페이스트에 많이 사용되는 바인더 중 하나로, 접착력과 기계적 특성이 우수하고 빠른 경화 속도를 가지기 때문에 태양전지용 은 페이스트에 적합하다. 하지만, 이러한 특성은 바인더의 조성, 공정 조건 등에 따라 달라질 수 있다. 하지만 현재로서는 낮은 비저항, 우수한 접착력 등의 특성을 모두 만족할 수 있는 페이스트용 바인더는 개발이 되어 있지 않은 상태이다. 특히, 바인더에서 개시제는 고분자 중합반응을 시작하게 하는 중요한 요소이며 활성화된 개시제는 바인더 내 모노머 및 올리고머와 반응하여 중합반응을 하여 빠르게 고분자를 형성한다. 개시제의 종류와 농도에 따라 고분자 중합반응의 속도를 조절할 수 있으며, 원하는 고분자 구조와 강도, 내마모성 등의 물리적 특성을 얻을 수 있다. 따라서 개시제는 고분자 중합 과정을 제어하여 바인더의 품질과 성능을 조절할 수 있다.

본 연구에서는, 저온 경화가 가능한 바인더와 이를 이용한 은 페이스트를 제조하고 다른 개시 온도를 갖는 네 가지의 개시제에 따른 특성 차이를 확인하였다. 개시제 종류를 제외하고 바인더와 은 페이스트 재료들의 함량과 공정 조건 등을 모두 동일하게 하여 실험을 진행하였다. 제조된 바인더는 시차 주사 열량계 분석을 통해 개시 온도를 확인하여 개시제에 따른 경화 특성 차이를 분석하였다. 경화 후의 물성을 확인하기 위하여 경화된 바인더의 미반응물을 추출하여 겔 함량을 측정하였고 겔 함량 시험 전후로 열중량 분석을 수행하였다. 제작한 은 페이스트의 비저항과 바인더의 겔 함량을 비교한 결과, 개시제의 종류에 따라 경화 특성 및 전기적 특성이 달라짐을 확인하였다.

2. 실험

2.1 재료

바인더와 은 페이스트를 제조하기 위해 4종류의 개시제를 사용하였다. 이를 위해 Arkema S.A.에서 네 종류의 개시제(Luperox® DI, Luperox® P, Luperox® 10, Luperox® 26)를 구매하였다. 바인더 재료로는 올리고머(Mirammer SC2100, Miwon specialty chemical Co., Ltd.), 모노머(Isobornyl acrylate, Sigma Aldrich), 접착 증진제((3-Glycidyloxypropyl)trimethoxysilane, Sigma Aldrich)와 가교제(Phosphoric acid 2-hydroxyl ethyl methacrylate ester, Sigma Aldrich)를 각각의 제조사에서 구매하였다. 페이스트 재료인 은 분말은 LT Metal에서 구매하여 사용하였다. 또한, 미반응 물질 제거를 위한 용매로는 톨루엔(삼전순약공업(주))을 사용하였다.

2.2 바인더 제조

바인더 제조 비율은 Table 1에 나타냈다. 올리고머, 모노머, 접착 증진제, 가교제를 150 ml의 용기에 차례로 넣었다. 그리고 개시제 네 종류를 각각 첨가하고 스페큘라로 5분간 혼합하여 바인더를 제조하였다. 네 종류의 개시제인 Luperox® DI, Luperox® P, Luperox® 10, Luperox® 26 순서대로 바인더 시료명은 B1, B2, B3, B4로 명명하였다.

Table 1 Weight ratio of each materials

Oligomer	Monomer	Adhesion promoter	Coupling agent	Initiator
45	50	1	2	2

2.3 겔 함량 시험

겔 함량 측정을 위하여 경화된 바인더가 쉽게 박리되는 실리콘 코팅 PET 이형필름을 이용하였다. 바인더를 1×5 cm²의 크기로 실리콘 코팅 PET 이형필름에 코팅한 후 160°C에서 5분간 경화되었다. 경화된 바인더를 필름에서 떼어내어 무게를 측정한 후, 50 ml의 톨루엔에 넣어 6시간 80°C로 가열하여 미반응 물질을 추출하였다.

톨루엔에 담긴 경화된 바인더를 꺼내어 핫플레이트에서 40°C로 18시간, 그리고 진공 오븐에서 -0.1 MPa의 압력 하에 110°C로 24시간 건조하였다. 건조된 바인더의 무게를 측정하였고, 추출 후의 무게를 이용하여 다음 식과 같이 겔 함량을 계산하였다.

$$\text{겔 함량 (\%)} = (1 - (\text{추출 전 무게 (g)} - \text{추출 후 무게 (g)}) / \text{추출 전 무게 (g)}) \times 100 \quad (1)$$

2.4 열분석

제조된 바인더, 경화된 바인더와 겔 함량 시험 후 건조된 바인더에 대한 열분석을 시차 주사 열량계(DSC 200 F3, Netzsch)와 열중량 분석기(TGA/DSC1 star system, Mettler Toledo)를 이용하여 실시하였다. 제조된 바인더를 질소 분위기 하에서 10°C/분의 승온 조건으로 250°C까지 시차 주사 열량 분석을 수행하였다. 경화된 바인더와 겔 함량 시험 후 건조된 바인더는 질소 분위기 하에서 10°C/분의 승온 조건으로 600°C까지 중량 변화를 측정하였다.

2.5 은 페이스트 제조

준비된 바인더에 은 분말을 70 wt.% 비율로 첨가하여 스페큘라로 1차 혼합을 진행하였다. 2차 혼합은 유성 원심 혼합기(ARE-310, Thinky Corporation)를 이용하였고, 1000 rpm으로 30초간 혼합하고, 이어서 2000 rpm으로 10초간 추가적으로 혼합하였다. 마지막으로 바인더의 기포를 제거하기 위해 2200 rpm으로 30초간 진행하였다. 바인더 B1, B2, B3, B4 순서대로 제조된 은 페이스트 시료를 P1, P2, P3, P4로 명명하였다.

2.6 비저항

은 페이스트는 0.5×155 μm² 크기의 선으로 스크린 인쇄하였고, 160°C에서 2분간 경화하여 비저항 분석 시료를 준비하였다. 경화된 은 페이스트는 3D 디지털 현미경(RH-2000, Hirox Korea Co., Ltd.)를 이용하여 단면적을 측정하였다. 또한, 멀티미터(3244-60, Hioki E. E. Corporation)를 이용하여 경화된 은 페이스트 선의 저항을 측정하였다. 측정된 저항, 단면적, 선의 길이를 이용하여 비저항을 계산하였다.

3. 결과 및 토의

개시제 종류에 따라 제조된 바인더에 대한 시차 주사 열량 분석 결과를 Fig. 1에 나타내었다. DSC 결과를 통해 각 바인더의 반응 개시 온도(T_{onset})를 구하여 비교하였다. B1, B2, B3, B4의 T_{onset} 은 각각 133, 98, 62, 83°C로 측정되었으며, 사용한 개시제에 따라 T_{onset} 이 최대 50°C까지 차이가 났다. 그리고 피크의 모양에도 차이가 있으며, B3의 피크 기울기가 가장 가파르고 B1의 피크 기울기가 가장 완만하게 나타났다. 피크의 기울기는 중합 속

도를 나타내므로 바인더 간 중합 속도를 상대적으로 비교할 수 있다⁸⁾. 또한 고분자 사슬의 성장에 의해 점도가 증가하게 되어 확산과 이동성이 낮아짐에 따라 반응이 일찍 종결될 가능성이 있다⁹⁾. 이러한 이유로 사용한 개시제에 따라 개시 온도뿐만 아니라 중합 반응 속도를 조절할 수 있다. 시차 주사 열량 분석 결과를 바탕으로 모든 시료가 경화될 수 있는 온도인 160°C를 겔 함량 시험을 위한 시료와 은 페이스트 경화 온도 조건에 적용하였다.

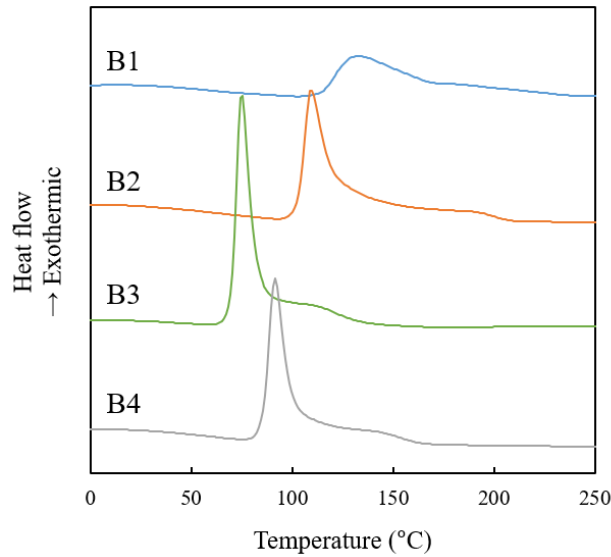


Fig. 1 DSC thermograms of binders

제조된 바인더 시료를 160°C에서 5분간 경화하여 겔 함량 시험과 열중량 분석을 위한 시료로 준비하였다. 겔 함량 시험을 통해 경화한 후 가교된 바인더에 남아있는 미반응물을 제거하여 완전히 가교된 바인더에 대한 비율을 확인하였고, 이를 통해 사용한 개시제에 따른 겔 함량 차이를 비교하였다. 열중량 분석은 겔 함량 시험 전후로 분석하였으며, Fig. 2는 열중량 분석과 시차 열분석 결과이다. 그리고 시차 열분석 피크에 대한 면적을 계산하여 겔 함량 계산 결과와 함께 Table 2에 나타내었다. 열중량 분석 결과, 모든 시료는 두 단계의 중량 변화를 거치는 것으로 확인하였다. 첫번째 피크는 상대적으로 약한 결합인 head-to-head 결합에 대한 분해이며, 두번째 피크는 head-to-tail 결합이 분해될 때의 중량 변화에 대한 결과로 판단된다¹⁰⁾. T_{onset} 이 가장 낮은 B3의 경우, T_{onset} 보다 상당히 높은 160°C에서 경화했기 때문에 시료 내에 분산되어 있는 개시제가 동시다발적으로 라디칼을 형성하여 고분자 중합반응이 빠르게 진행되었으며, 빠른 고분자 중합반응에 의해 불안정한 head-to-head 결합의 비율이 높은 것으로 보인다^{11,12)}. 뿐만 아니라 B3은 자기 정지반응으로 인해 상대적으로 짧은 결합 체인이 형성되었을 것으로 판단된다. 반면에 B1의 경우, T_{onset} 이 높기 때문에 160°C의 경화 온도가 반응을 시작하지만, 상대적으로 개시제가 서서히 라디칼을 형성하여 다른 시료에 비하여 안정한 head-to-tail 결합의 비율이 높다고 사료된다. 그리고 겔 함량 시험을 통해 가교된 바인더에 남아 있는 미반응물을 제거하여 개시제에 따라 겔 함량을 계산하였다. B2, B1, B4, B3 순으로 높은 겔 함량을 가지는 것을 확인하였다. 이는 T_{onset} 이 낮

은 B3의 고분자 중합반응이 빠르게 종결되어 미반응물이 남아있기 때문에 가장 낮은 겔 함량 값을 갖는다고 판단된다. 그리고 미반응물은 은 페이스트의 전기적 특성에 악영향을 미치므로 겔 함량과 전기적 특성 사이의 관계를 파악할 필요가 있다.

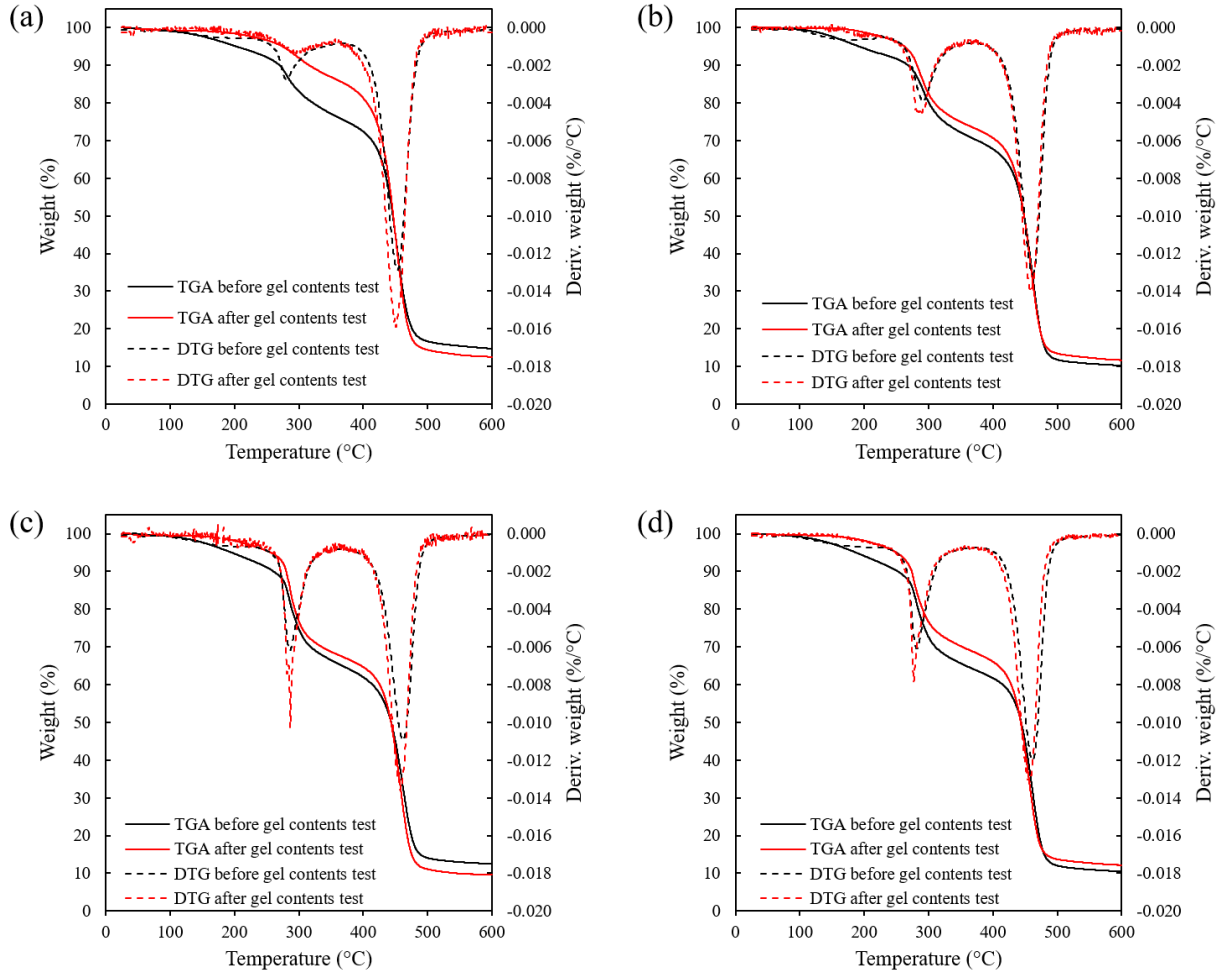


Fig. 2 TGA and DTG curves before and after gel contents test of cured (a) B1; (b) B2; (c) B3; and (d) B4

Table 2 Gel contents and area for DTG peak for each binder

Gel contents (%)	Before gel contents test		After gel contents test		
	Area under the 1 st peak	Area under the 2 nd peak	Area under the 1 st peak	Area under the 2 nd peak	
B1	94.92	18.74	55.51	10.70	71.65
B2	94.96	26.50	53.30	23.13	60.88
B3	93.08	34.93	53.68	28.20	57.35
B4	93.92	29.82	50.40	27.56	55.83

바인더 B1, B2, B3, B4 순서대로 제조된 은 페이스트 시료를 P1, P2, P3, P4로 명명하였고, 네 종류의 페이스트를 프린팅 인쇄하여 160°C에서 2분간 경화하여 각 페이스트에 대한 비저항을 구하였다. Fig. 3은 바인더의 젤 함량과 각 바인더로 제조한 은 페이스트의 비저항을 비교한 결과이다. 젤 함량이 낮을수록 비저항은 높아졌으며, 이는 미반응물에 의해 전기 저항이 높아져 비저항이 높아진 결과라고 판단된다. 한편, B1, B2는 비슷한 젤 함량 값을 가지지만 분자량의 차이로 인해 은 페이스트의 비저항에서 차이를 보이는 것으로 판단된다¹³⁾. 가교 되었을 때에 분자량이 큰 바인더를 은 페이스트에 사용한 경우에는 바인더 분자가 크게 형성되어 은 입자가 바인더 사이 공간으로 위치하기 어려워 은과 은 간의 거리가 멀어지게 되므로 비저항이 나빠지게 된 것으로 사료된다. 이로써 개시제가 바인더의 젤 함량과 그 바인더를 사용한 은 페이스트의 비저항에 영향을 미치기 때문에 바인더와 은 페이스트 제조 시에 개시제 선택에 따른 경화 조건의 최적화가 필수적임을 시사한다. 그리고 네 종류의 은 페이스트가 모두 저온에서 경화가 가능하기 때문에 HJT 등의 태양전지에 적용될 수 있다고 판단된다.

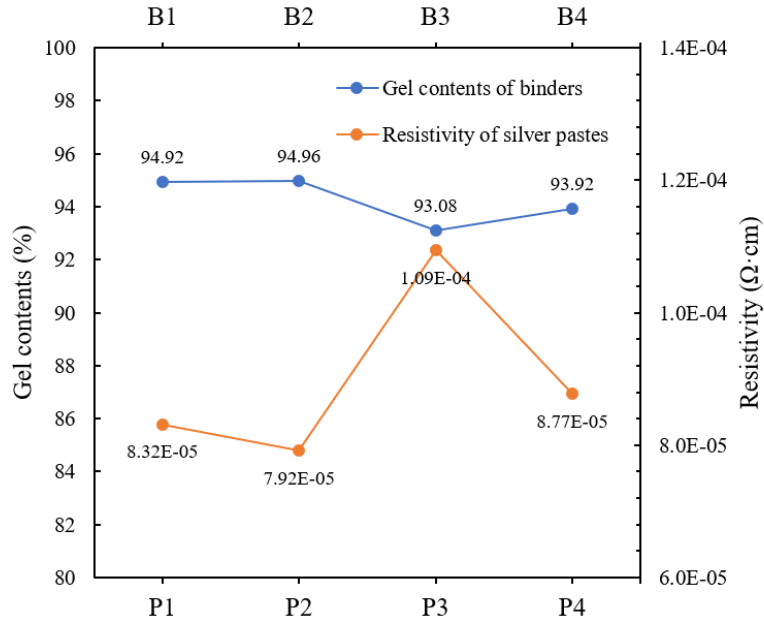


Fig. 3 Resistivity of silver paste and gel contents of binder

4. 결론

네 종류의 개시제를 사용하여 저온 경화가 가능한 바인더와 은 페이스트를 제조하였고, 개시제에 따른 특성 차이를 평가하였다. 제조된 바인더에 대한 시차 주사 열량 분석을 통해 사용한 개시제에 따라 경화 개시 온도가 최대 50°C까지 차이가 나는 것을 확인하였다. 준비한 바인더 시료가 모두 경화될 수 있는 온도인 160°C를 실험 조건으로 정하여 젤 함량 시험과 은 페이스트 경화에 적용하였다. 열중량 분석을 하여 개시 온도가 가장 낮은 B3은 빠른 고분자 중합반응에 의해 약한 결합인 head-to-head 결합의 비율이 높을 것이라 판단된다. 개시 온도가

높은 B1은 라디칼이 서서히 형성되어 느린 고분자 중합반응으로 안정한 결합인 head-to-tail 결합의 비율이 높은 것을 확인하였다. 겔 함량 시험을 통해 경화된 바인더에 남은 미반응물을 추출하여 완전히 가교된 바인더의 비율을 계산하여 겔 함량으로 나타냈다. B3의 경우에 고분자 중합반응이 빠르게 종결되어 미반응물이 남아있기 때문에 겔 함량이 낮은 것이라 판단된다. 그리고 바인더의 겔 함량과 각 바인더를 사용한 은 페이스트의 비저항과의 상관관계를 확인한 결과, 겔 함량이 낮을수록 비저항은 높아진 것을 확인하였다. 이는 경화된 바인더의 미반응물에 의해 저항이 커져 비저항이 저하된 것으로 보인다. 반면에, B2를 사용하여 제조한 P2의 비저항이 가장 우수하였다. B1과 B2의 겔 함량이 비슷함에도 불구하고 가교된 바인더의 분자량의 차이로 인해 비저항에서 차이를 보이는 것으로 판단된다. 이처럼 같은 경화 조건으로 경화를 하더라도 사용한 개시제에 따라 바인더의 가교 정도와 은 페이스트의 비저항에도 차이를 나타내므로 사용한 개시제에 따라 적합한 경화 조건을 찾는 것이 필요하다. 또한, 본 연구에서 제조된 네 종류의 은 페이스트는 모두 저온에서 경화가 가능하므로 각 페이스트 별 경화 조건을 최적화하여 HJT 등의 저온 공정 태양전지의 전극 재료로 응용을 기대해본다.

후기

본 연구는 산업통상자원부(MOTIE)와 한국에너지기술평가원(KETEP)의 지원을 받아 수행한 연구 과제입니다(No. 20213030010290, No. 20213030010240).

REFERENCES

1. Dobrotkova, Z., Sirana, K., and Audinet, P., The Price of Solar Energy: Comparing Competitive Auctions for Utility-scale Solar PV in Developing Countries, *Energy Policy*, Vol. 118, pp. 133-148, 2018, <https://doi.org/10.1016/j.enpol.2018.03.036>.
2. Vargas-Salgado, C., Aparisi-Cerda, I., Alfonso-Solar, D., and Gomez-Navarro, T., Can Photovoltaic Systems Be Profitable in Urban Areas? Analysis of Regulation Scenarios for Four Cases in Valencia City (Spain), *Solar Energy*, Vol. 233, pp. 461-477, 2022, <https://doi.org/10.1016/j.solener.2022.01.057>.
3. Firat, M., Sivaramakrishnan Radhakrishnan, H., Singh, S., Duerinckx, F., Payo, M. R., Tous, L., and Poortmans, J., Industrial Metallization of Fired Passivating Contacts for n-type Tunnel Oxide Passivated Contact (n-TOPCon) Solar Cells, *Solar Energy Materials & Solar Cells*, Vol. 240, pp. 111692, 2022, <https://doi.org/10.1016/j.solmat.2022.111692>.
4. Li, X., Xu, Q., Yan, L., Ren, C., Shi, B., Wang, P., Mazumdar, S., Hou, G., Zhao, Y., and Zhang, X., Silicon Heterojunction-based Tandem Solar Cells: Past, Status, and Future Prospects, *Nanophotonics*, Vol. 10, No. 8, pp. 2001-2022, 2021, <https://doi.org/10.1515/nanoph-2021-0034>.
5. De Wolf, S., Descoedres, A., Holman, Z. C., and Ballif, C., High-efficiency Silicon Heterojunction Solar Cells: A Review, *Green*, Vol. 2, pp. 7-24, 2012, <https://doi.org/10.1515/green-2011-0018>.
6. Liu, Y., Li, Y., Wu, Y., Yang, G., Mazzarella, L., Procel-Moya, P., Tamboli, A. C., Weber, K., Boccard, M., Isabella, O., and Yang, X., High-efficiency Silicon Heterojunction Solar Cells: Materials, Devices and Applications, *Materials Science & Engineering R*, Vol. 142, pp. 100579, 2020, <https://doi.org/10.1016/j.mserr.2020.100579>.

7. Li, X., Dong, H., Guo, S., and Zhao, L., Study on the Curing Process of Silver Paste of Heterojunction Solar Cells Using Response Surface Methodology, *Applied Science*, Vol. 10, No. 14, pp. 4857, 2020, <https://doi.org/10.3390/app10144857>.
8. Martin, J. L., Kinetic Analysis of an Asymmetrical DSC Peak in the Curing of an Unsaturated Polyester Resin Catalysed with MEKP and Cobalt Octoate, *Polymer*, Vol. 40, No. 12, pp. 3451-3462, 1999, [https://doi.org/10.1016/S0032-3861\(98\)00556-4](https://doi.org/10.1016/S0032-3861(98)00556-4).
9. Nowers, J. R. and Narasimhan, B., The Effect of Interpenetrating Polymer Network Formation on Polymerization Kinetics in an Epoxy-acrylate System, *Polymer*, Vol. 47, No. 4, pp. 1108-1118, 2006, <https://doi.org/10.1016/j.polymer.2005.12.030>.
10. Raponi, O. D. A., Barbosa, L. C. M., de Souza, B. R., and Ancelotti Jr. A. C., Study of the Influence of Initiator Content in the Polymerization Reaction of a Thermoplastic Liquid Resin for Advanced Composite Manufacturing, *Advances in Polymer Technology*, Vol. 37, pp. 3579-3587, 2018, <https://doi.org/10.1002/adv.22142>.
11. Kashiwagi, T., Inaba, A., Brown, J. E., Hatada, K., Kitayama, T., and Masuda, E., Effects of Weak Linkages on the Thermal and Oxidative Degradation of Poly(methyl methacrylates), *Macromolecules*, Vol. 19, No. 8, pp. 2160-2168, 1986, <https://doi.org/10.1021/ma00162a010>.
12. Chen, J. P., Kodaira, T., Isa, K., and Senda, T., Simultaneous TG-MS Studies on Polymers Derived from Monomers with a Polar Group, *Journal of the Mass Spectrometry Society of Japan*, Vol. 49, No. 2, pp. 41-50, 2001, <https://doi.org/10.5702/masspec.49.41>.
13. Liu, C., Fu, Qu., Zou, J., Huang, Y., Zeng, X., and Cheng, B., Effects of Polyester Resin Molecular Weight on the Performance of Low Temperature Curing Silver Pastes, *Journal of Materials Science: Materials in Electronics*, Vol. 27, pp. 6511-6516, 2016, <https://doi.org/10.1007/s10854-016-4593-3>.