

물리적 방법에 의한 태양광 폐모듈로부터 실리콘 회수

윤대식^{1,2} · 안영수³ · 강기환⁴ · 장효식⁵⁺ · 이진석³⁺

¹한국에너지기술연구원 에너지저장연구실, 학생연구원

²충남대학교 에너지과학기술대학원, 석사과정

³한국에너지기술연구원 에너지저장연구실, 책임연구원

⁴한국에너지기술연구원 태양광연구단, 책임연구원

⁵충남대학교 에너지과학기술대학원, 교수

Silicon Recovery from Solar Module Waste by a Physical Method

Yoon Dae-Sik^{1,2} · Ahn Young-Soo³ · Kang Gi-Hawn⁴ · Chang Hyo Sik⁵⁺ · Lee Jin-Seok³⁺

¹Student Researcher, Energy Storage Laboratory, Korea Institute of Energy Research

²Master Course Student, Graduate School of Energy Science and Technology, Chungnam National University

³Principal Researcher, Energy Storage Laboratory, Korea Institute of Energy Research

⁴Principal Researcher, Photovoltaic Laboratory, Korea Institute of Energy Research

⁵Professor, Graduate School of Energy Science and Technology, Chungnam National University

†Corresponding author: hschang@cnu.ac.kr, jslee@kier.re.kr

Abstract

This paper describes the physical process used to recover silicon from a solar module, where the solar cell recovery rate (87.4 %) was determined under optimized process conditions. This physical recycling method requires a particle separation process because selective separation of the recovered materials is difficult, and the recovery rate and purity of the recovered materials can be low after the initial particle separation. In this study, the recovery rate was determined with respect to the crushing time and rotational speed of the cutter mill as well as the amplitude and separation time of the sieving machine, which were optimized to increase the Si recovery rate. In addition, an etching process was used to recover high-purity Si from the solar cells. To determine whether Ag and Al were removed from the recovered Si, XRD analysis was performed to confirm the measured Si peak and small TiO₂ peak, and ICP-MS analysis was performed to confirm the purity of the recovered Si, which was found to be of 3N grade.

Keywords: 태양광 모듈(Photovoltaic module), 재활용(Recycling), 분쇄(crushing), 태양전지(Solar cell), 실리콘(Silicon)

1. 서론

태양광 모듈은 태양에너지를 이용하여 전기에너지로 변환하는 방법으로 화석 연료를 사용하지 않아 배기가스가 발생하지 않는 무공해 발전이다. 현재 환경친화적인 에너지로



Journal of the Korean Solar Energy Society
Vol.42, No.3, pp.1-11, June 2022
<https://doi.org/10.7836/kjes.2022.42.3.001>

pISSN : 1598-6411

eISSN : 2508-3562

Received: 19 April 2022

Revised: 26 April 2022

Accepted: 26 April 2022

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.

전 세계적으로 주목받아 많은 양의 태양광 모듈이 설치되었으며, 태양광 모듈 설치량이 기하급수적으로 증가하고 있다. 2021년 1분기 신재생에너지 산업 동향 보고서에 따르면 2022년부터 전 세계 태양광 모듈 설치량이 200 GW 이상 될 것으로 예상되며, 국내 태양광 설치량의 경우 4 GW 이상 될 것으로 예상되고 있다¹⁾. 이에 따라 태양광 폐모듈의 발생량 또한 증가하고 있다. IRENA 보고서에 따르면 전 세계적으로 2016년 발생된 태양광 폐모듈 양은 25톤이고 2030년도의 경우 최대 8백만 톤까지 발생할 것으로 예측된다²⁾. 또한 태양광 폐모듈은 대부분 매립되어 환경오염 및 불필요한 토지가 사용되고 있다. 이러한 태양광 폐모듈 문제를 처리하기 위해 유럽 연합(European union, EU)에서는 전기·전자 폐기물 제품의 의무 재활용 관련 규정(Waste electrical and electronic equipment, WEEE)에 태양광 폐모듈을 포함시켜 태양광 폐모듈 회수 및 재활용을 의무화하였다³⁾. 태양광 모듈은 유리, EVA, 태양전지, 백시트, 구리 리본으로 구성되어 있고 테두리는 알루미늄 프레임으로 되어 있으며, 모듈 후면에는 정션박스가 부착되어 있다. 정션박스과 프레임은 해체 장비를 통해 쉽게 분리가 가능하나 이를 제외한 유리, EVA, 태양전지, 백시트, 구리 리본을 재활용하기 위한 분리 및 회수 과정은 쉽지 않아 이를 해결하기 위해 태양광 모듈 내 구성 재료를 회수하기 위한 공정 연구가 활발히 진행되고 있다⁴⁻⁹⁾.

태양광 모듈의 재활용 방법은 대표적으로 화학적 방법, 열적 방법, 물리적 방법으로 나누어진다¹⁰⁻¹⁵⁾. 화학적 방법은 에칭 공정을 통해 태양광 모듈 내 원하는 유가 재료를 높은 순도로 회수할 수 있으나 이를 회수하기 위해 여러 종류의 용액을 사용하여야 하고 또한 폐용액이 발생되어 2차 환경오염이 발생한다. 열적 방법은 태양광 모듈 내 재료를 접착시키는 역할을 하는 EVA를 제거하여 유가 재료를 회수하는 방법인데 이는 화학적, 물리적 방법 대비 높은 회수율을 갖지만 연소하기 위해 500°C 이상의 고온을 만들고 유지하여야 하므로 높은 에너지를 소비하고 유해 배가스가 발생한다¹⁶⁾. 물리적 방법은 다른 방법에 비해 짧은 공정 시간을 가지며, 배가스와 폐용액이 발생되지 않아 친환경적이라는 이점이 있다. 하지만 물리적 방법의 경우 일반적으로 분쇄 공정을 이용하여 재활용이 진행되는데 공정 특성상 특정 소재의 선택적 분리가 어려워 분쇄 공정 이후 추가적인 선별공정이 요구되는 단점이 있으며, 태양전지와 유리의 경우 미분화되어 분쇄되기 때문에 이를 분리하기 어려워 회수 소재의 순도가 낮다^{17,18)}.

본 논문에서는 물리적 방법의 상기 문제점을 해결하기 위해 태양광 모듈로부터 유리를 먼저 분리한 후, 나머지인 모듈 샌드위치(태양전지, 구리 리본, 백시트, EVA)를 활용하여 실험을 진행하였다. 그리고 분쇄 공정과 선별 공정의 제어를 통해 실리콘의 높은 회수율과 순도를 갖는 최적의 공정 조건을 도출하는 것을 주목적으로 하였다.

2. 실험 방법

본 논문에서는 평균 10.1 g의 무게인 6인치 태양전지가 가로 2개, 세로 5개로 구성된 360 × 870 mm² 모듈을 제작하여 사용하였다. 물리적 방법을 이용한 태양광 모듈 재활용 공정 시 모듈의 강화유리를 제거하지 않을 경우 후속 공정에서 회수된 금속 소재에 유리가 혼재되어 순도에 영향을 주게 되므로, 모듈의 강화유리를 선행적

으로 제거할 필요가 있다. 태양광 모듈 내 강화유리를 분리 및 회수하기 위해 모듈 분리 장비를 이용하여 유리와 모듈 샌드위치로 분리하였다⁶⁾.

분리된 모듈 샌드위치는 태양전지 1개의 크기(156 × 156 mm²)로 절단한 다음 로터리 커터밀(Rotary cutter mill, CTHC-0707, CRUTEC)을 이용하여 분쇄하였다. 공정에 사용된 커터밀은 장비 내부에 고속으로 회전하는 커터와 장비 내 고정된 커터가 맞물렸을 때 그 사이에 존재하는 샘플이 절단되는 형식으로 분쇄가 진행되는 장비이다. 해당 실험에 적용된 분쇄 조건은 Table 1과 같이 나타내었다. 분쇄 시간 선정 실험의 경우 800 RPM 조건에서 10, 30, 60, 90, 120분을 변수로 두었으며, RPM 선정 실험의 경우 분쇄 시간 60분을 고정으로 300, 500, 800 RPM를 변수로 두어 실험을 진행하였다.

Table 1 Process conditions for crushing

Condition (unit)	Range
Crushing time (min)	10, 30, 60, 90, 120
Crushing speed (RPM)	300, 500, 800

분쇄된 샘플을 입도 크기에 따라 선별하기 위해 체가름기(Sieve Shaker, BA 200N, CISA) 장비를 사용하였다. 해당 장비는 진동을 가해 체가름기 내 샘플을 부양시키고, 부양된 샘플은 중력에 의해 떨어져 입도 크기에 따라 표준체에 분쇄물이 걸러지는 형식으로 선별이 진행된다. 장비에 사용된 표준체는 KS-A-5101 규격 표준체이며, 체눈 크기 0.5 mm이었다. 입도 선별에 적용한 체가름기의 자세한 조건은 Table 2와 같이 나타내었다. 진폭 선정 실험의 경우 유지시간 5분 조건에서 0.5, 1.0, 1.5, 2.0 mm를 변수로 두었으며, 선별 시간 선정 실험의 경우 진폭을 2.0 mm으로 고정하여 1, 3, 5, 7, 10분을 변수로 두어 실험을 진행하였다. 선별 후 분쇄물 회수율은 아래의 식(1)을 통하여 산출하였다.

Table 2 Process conditions for particle separation

Condition (unit)	Range
Amplitude (mm)	0.5, 1.0, 1.5, 2.0
Separating time (min)	1, 3, 5, 7, 10

$$\text{선별 후 분쇄물 회수율 (\%)} = \frac{\text{선별 후 분쇄물 무게 (g)}}{\text{선별 전 분쇄물 무게 (g)}} \times 100 \quad (1)$$

입도 선별을 통해 0.5 mm 이하의 크기로 선별된 샘플 내 EVA를 제거하기 위해 전기로(Muffle Furnace)를 이용하였다. 장비 내부에 연소를 진행할 샘플을 넣고 600°C에서 60분을 유지시켜 EVA를 제거하여 태양전지

분말을 회수하였다¹⁶⁾. 태양전지 분말의 회수율은 아래의 식(2)을 통하여 산출하였으며, 3회 실험 결과의 평균을 구하여 계산하였다.

$$\text{태양전지 회수율 (\%)} = \frac{\text{모듈로부터 회수한 태양전지 합량 (g)}}{\text{모듈내 존재하는 태양전지 합량 (g)}} \times 100 \quad (2)$$

도출된 최적 조건을 통해 회수한 태양전지 분말로부터 실리콘을 회수하기 위해 Table 3의 조건으로 에칭 공정을 진행하였다. 태양전지 분말과 에칭 용액의 고액비는 30으로 고정하였다. 태양전지 분말 내 Ag 전극을 제거하기 위해 50°C인 HNO₃ 30 wt% 용액에 120분 반응시켰고, Al 전극을 제거하기 위해 HCl 36 wt% 용액을 이용하여 상온조건에서 반응시켰다. 위와 같은 조건으로 태양전지 내 Ag, Al 전극을 제거하였으며, 아래의 식(3)을 통해 실리콘 회수율을 산출하였다. 이때 실리콘 회수율의 경우 3회 실험 결과에 대한 평균으로 산출하였다.

Table 3 Experimental conditions for etching

Solution	Solid-liquid ratio	Temperature [°C]	Time [min]
HNO ₃ 30wt%	30	50	120
HCl 36wt%	30	RT.	60

$$\text{실리콘 회수율 (\%)} = \frac{\text{모듈로부터 회수한 실리콘 합량 (g)}}{\text{모듈내 존재하는 실리콘 합량 (g)}} \times 100 \quad (3)$$

최종 회수한 실리콘 분말은 X선 회절 분석법(X-ray Diffraction, XRD, DMAX-2500, Rigaku, Japan)을 이용하여 전지 표면의 금속 전극인 Ag와 Al이 제거되었는지 확인하였다. 이후 주사전자현미경(Scanning Electron Microscope, SEM, S-4800, Hitachi, Japan) 분석을 통해 회수한 실리콘의 형상을 확인하였고, 추가로 유도결합 플라즈마 분석기(Inductively Coupled Plasma-Mass Spectroscopy, ICP-MS, Element-2, Thermo Scientific, USA)를 이용하여 회수한 실리콘의 순도를 확인하였다.

3. 결과 및 고찰

본 논문에서는 물리적 방법 중 분쇄 및 선별 공정을 통해 분쇄물을 회수하였으며, 회수 샘플 내 EVA를 제거하기 위해 연소를 진행하여 태양전지 분말을 회수하였고 에칭 공정을 진행하여 실리콘을 회수하였다. 먼저 태양전지를 회수하기 위해 분쇄 조건에 따른 실험을 진행하여 거동을 확인하였고 회수율을 비교하여 최적의 공정 조건을 도출하였다.

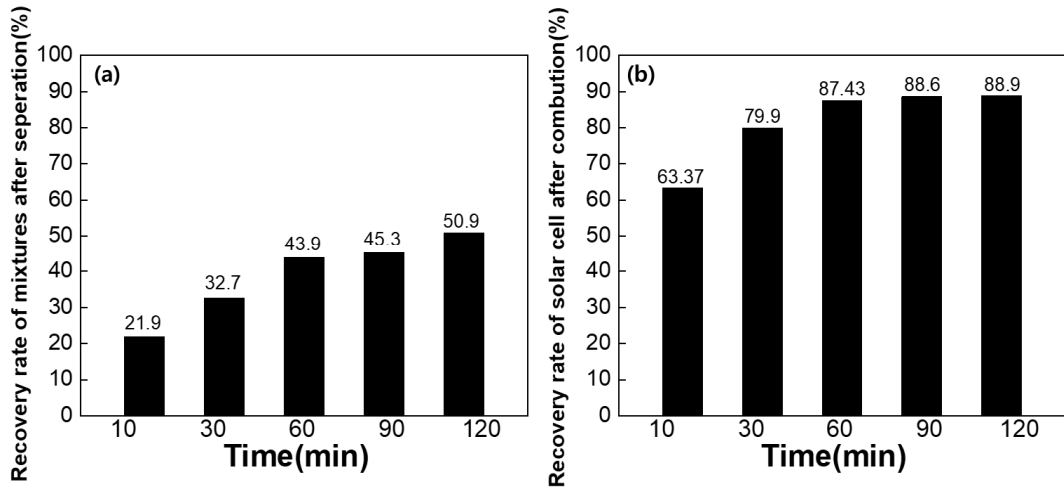


Fig. 1 Recovery rate of (a) mixtures after separation and (b) solar cell after combustion depending on crushing time

Fig. 1은 고정된 800 RPM 하에서 분쇄 시간에 따른 (a) 선별 전/후 분쇄물 회수율과 (b) 태양전지 회수율을 나타낸 그래프이며, 선별 전/후 분쇄물 회수율의 경우 10분 분쇄한 샘플은 21.9%, 30분은 32.7%, 60분은 43.9%, 90분은 45.3%, 120분은 50.9%로 분쇄 시간에 비례하여 증가하는 경향을 확인하였다. 그러나 이는 분쇄물 내 EVA가 포함된 회수율이므로 연소를 통해 EVA를 제거하여 태양전지 회수율을 도출하였다. 그 결과 10분은 63.37%, 30분은 79.9% 60분은 87.43 ± 1.03%로 회수율이 증가하는 경향을 보였으며, 60분 이상 조건부터는 87.43 ± 1.03%, 90분은 88.6 ± 0.54%, 120분은 88.9 ± 0.57%로 큰 차이를 보이지 않는 것을 확인할 수 있었다. 즉, 60분 이상으로 과하게 분쇄할 경우 태양전지가 EVA로부터 탈착되어 회수되는 양보다 EVA 자체가 절단되어 회수되는 양이 증가하여 연소 전 회수 소재의 무게가 증가되는 것으로 사료된다. 분쇄물 내 EVA를 제거하기 위해 연소를 진행할 때 EVA의 함량이 높을수록 연소량과 에너지 소모량이 증가하기 때문에 60분 이상 분쇄는 비효율적으로 판단된다.

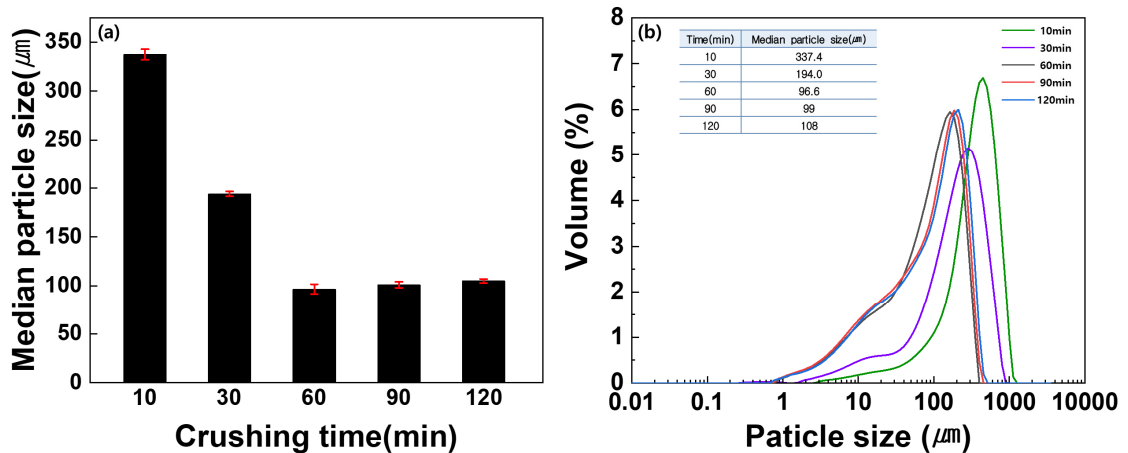


Fig. 2 (a) Median particle size (μm) and (b) particle size distributions of recovered powders depend on crushing time

Fig. 2 그래프는 고정된 800 RPM 하에서 분쇄 시간에 따른 입도 크기 차이를 비교하였다. Fig. 2(a) 그래프를 보았을 때 10분부터 60분까지 분쇄 시간이 증가할수록 입도 크기가 줄어드는 거동을 보이다가 60분, 90분, 120분 조건에서는 모두 비슷한 입도 크기를 갖는 것을 확인하였다. 이는 60분 이상부터 커터밀 챔버 내 분쇄된 EVA 양이 증가하여 사용한 커터밀의 커터와 태양전지 간에 입체적 접촉 방해를 일으켜 태양전지가 더 이상 분쇄되지 않는 것으로 판단된다.

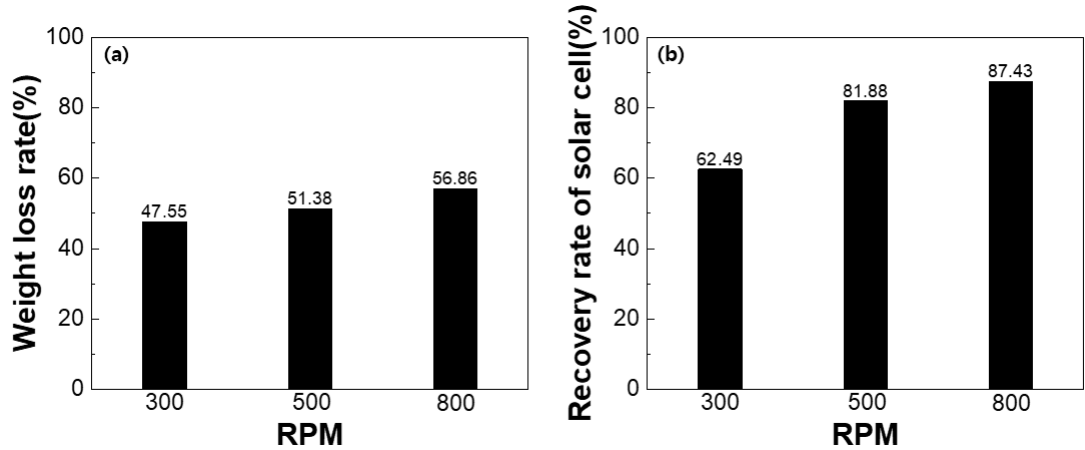


Fig. 3 (a) Weight loss rate before/after combustion and (b) recovery rate of solar cell depending on RPM

Fig. 3은 60분 분쇄 시간 하에서 RPM 조건에 따라 회수한 분쇄물의 연소 전/후 무게 감소율 및 태양전지 회수율을 비교한 그래프이다. Fig. 3의 (a) 연소 전/후 분쇄물의 무게 감소율 그래프는 RPM이 증가함에 따라 300 RPM은 47.55%, 500 RPM은 51.38%, 800 RPM은 56.86%로 증가하였다. 또한 (b) RPM 조건에 따른 태양전지 회수율 그래프도 300 RPM은 62.49%, 500 RPM은 81.88%, 800 RPM은 87.43 ± 1.03%로 증가하는 것을 확인하였다. 결론적으로 같은 시간 동안 분쇄하였을 경우 높은 회수율을 가지는 800 RPM 조건이 최적 공정 조건이라고 판단된다. 그러나 이와 같이 높은 RPM 조건을 적용하여 분쇄를 진행할 경우 태양전지 함량이 증가됨과 동시에 EVA의 함량 또한 증가한다. 이는 추후 연소 공정에서 소모되는 에너지의 증가를 야기할 수 있으므로 높은 RPM 조건을 사용하기보다는 적절한 RPM 조건 도출이 중요할 것으로 판단된다.

앞서 진행한 분쇄 조건에 따른 태양전지 회수율의 최적 공정 조건을 확인하였으며, 도출된 최적 공정 조건을 적용하여 선별 실험을 진행하였다.

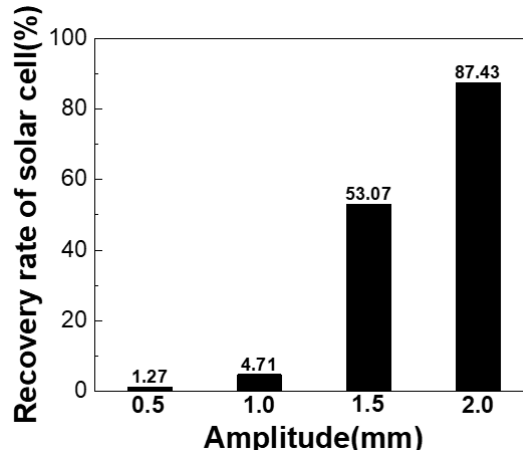


Fig. 4 Recovery rate of solar cell depending on amplitude

Fig. 4는 진폭 세기에 따른 태양전지 회수율을 나타낸 그래프이다. 진폭은 체가름기 내부의 샘플에 가해지는 진동 세기이다. 0.5 mm와 1.0 mm 진폭의 태양전지 회수율은 1.27%와 4.71%로 선별이 거의 진행되지 않았지만, 진폭 1.5 mm 이상부터는 선별이 진행되었다. 그리고 사용한 장비 내 가장 큰 진폭인 2.0 mm에서 $87.43 \pm 1.03\%$ 로 가장 높은 회수율을 보였다. 태양전지 분말 선별 시 진폭의 세기에 비례하여 태양전지 회수율이 증가하는 거동을 보였으며, 가장 높은 회수율을 갖는 진폭 2.0 mm가 본 실험에서는 최적 조건임을 확인하였다.

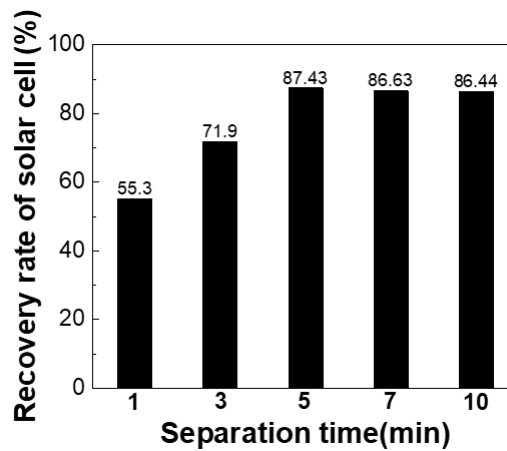


Fig. 5 Recovery rate of solar cell depending on separation time

Fig. 5는 선별 시간에 따른 태양전지 회수율을 비교한 그래프이다. 선별 시간에 따른 태양전지 회수율은 1분은 55.3%, 3분은 71.9%, 5분은 $87.43 \pm 1.03\%$ 로 점차 증가하는 경향을 보였으나 7분, 10분은 $86.63 \pm 0.56\%$, $86.44 \pm 0.45\%$ 로 5분과 비슷한 거동을 보였다. 5분 이상의 조건에서 선별되는 태양전지 회수율의 차이가 나지 않는 이유는 5분 조건에서 대부분의 태양전지가 회수되어 그 이상에 조건에서 공정을 진행하여도 EVA에 붙어

있는 태양전지가 추가적으로 탈착 되진 않았기 때문에 사료된다. 이를 통해 선별 시간의 최적 조건은 5분임을 확인하였다.

앞서 도출된 최적 조건을 통해 회수한 태양전지로부터 고순도의 실리콘을 회수하기 위해 에칭 실험을 진행하였다. 샘플 속 Ag의 경우 아래의 반응식(4)와 같이 HNO₃ 30 wt% 용액을 통해 120분 진행하여 제거하였으며, 반응 시간은 NO_x 가스가 발생되지 않는 조건을 기준으로 결정하였다. Al 또한 아래의 반응식(5)과 같이 HCl 36 wt%을 통해 제거하였다. 실험에 사용된 질량 고액비, 공정 온도, 공정 시간의 경우 예비 실험을 통해 도출된 조건을 적용하였다^{5,19,20}.

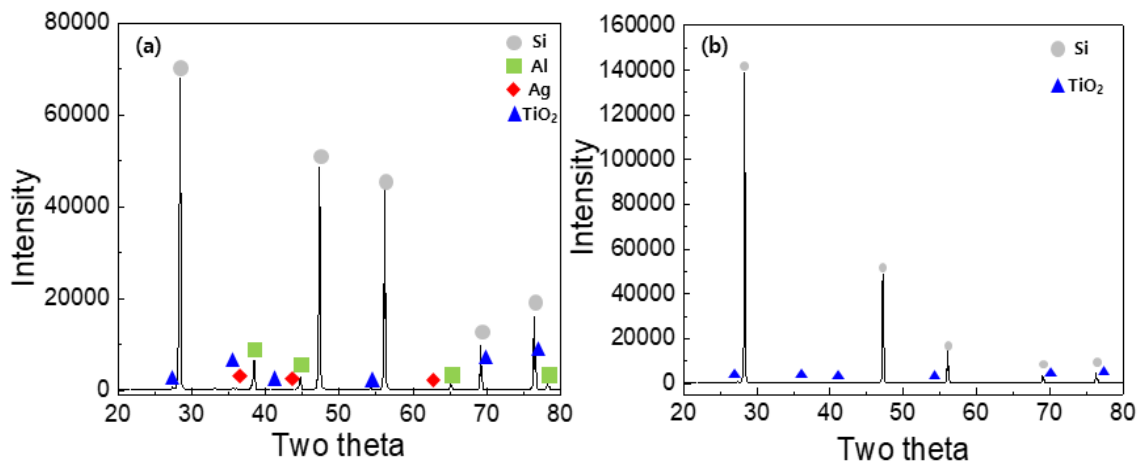
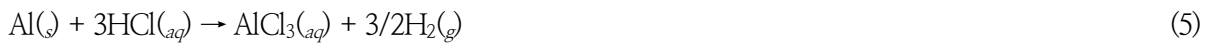
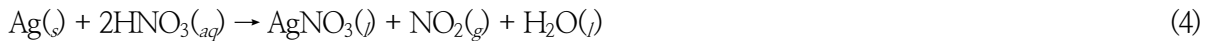
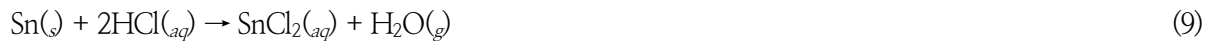
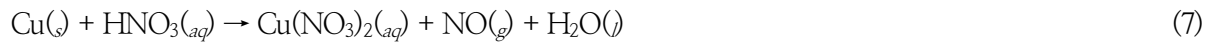


Fig. 6 XRD result of Si powders (a) before and (b) after etching

Fig. 6은 Ag 와 Al 제거를 위해 진행한 HNO₃과 HCl 에칭 공정 전/후의 XRD 분석 결과이다. 먼저 에칭 공정 전 샘플의 XRD 분석 결과 Si, Al, Ag 및 TiO₂ 피크가 검출되었는데 Al 피크의 경우 태양전지 후면 전극과 패시베이션(Passivation) 층으로부터 검출되었으며 Ag 피크의 경우 전면 전극에 의해 검출된 것으로 판단된다. TiO₂ 피크의 경우 백시트 내 함침 되어 있는 TiO₂ 나노분말이 연소 시 백시트가 분해되면서 검출된 것으로 보인다⁴). 에칭 공정 후 XRD 분석 결과를 보았을 때 Al, Ag 피크의 경우 HNO₃, HCl 용액에 의해 제거되어 검출되지 않은 반면 TiO₂의 경우 에칭 공정에 적용된 용액에 반응하지 않아 여전히 검출되는 것으로 확인되었다²¹). 한편 에칭 공정 후 XRD 분석 결과에서 TiO₂ 피크가 감소된 것으로 보여지지만 이는 상대적으로 높은 강도를 갖는 Si 피크에 의한 것으로 사료된다.

Table 4 Purity of silicon powder after etching by ICP-MS

Element	Concentration (ppm)	Element	Concentration (ppm)	Element	Concentration (ppm)
Na	5.73	Cr	2.00	Zn	3.30
Mg	0.15	Mn	0.45	Ag	41.19
Al	122.83	Fe	148.31	Sn	6.34
K	0.20	Ni	0.02	Ba	0.40
Ca	2.56	Co	0.23	Pb	6.21
Ti	540.27	Cu	4.47	Purity (%)	99.91



ICP-MS 분석을 통해 실리콘 내의 금속 불순물을 확인하였으며 그 결과를 Table 4에 나타내었다. 회수 실리콘 내 금속 불순물의 경우 대표적으로 Al, TiO₂, Ag, Cu, Pb 및 Sn이 있다. Al, Ag의 경우 태양전지 전·후면을 구성하고 있는 물질이며 TiO₂의 경우 백시트 내 함침 되어 있는 물질이고 Cu, Pb 및 Sn의 경우 구리 리본을 구성하고 있는 물질이기 때문에 불순물로 선정하였다. 추가적으로 분쇄 공정 중 회전하는 칼날에 의해 혼입되었을 불순물(Fe, Ni, Co, Cr 등)도 포함하였다. 분석 결과 회수한 실리콘의 순도는 3N1으로 이는 회수 실리콘 내 대표적인 금속 불순물이 반응식(6) ~ (9)과 같이 HNO₃와 HCl 용액에 의해 대부분 제거된 것으로 확인되었다²¹⁻²⁴. 하지만 불순물 중에 가장 많은 양을 차지하는 Ti의 경우 에칭 공정 중에 제거되지 않으며, 백시트 내 TiO₂ 분말에 기인하였기 때문이다. 최종적으로 실리콘 회수율을 계산하기 위해 본 논문의 실험에 사용된 태양광 모듈의 실리콘 함량을 확인한 결과 88.0 g이었다. 공정 후 회수한 실리콘은 76.1 g으로 식(3)을 통하여 산출한 결과 약 86.5 ± 1.01%의 실리콘 회수율을 갖는 것을 확인하였다.

4. 결론

본 논문에서는 태양광 모듈로부터 물리적 방법 중 분쇄 및 선별 공정을 이용하여 높은 태양전지 회수율을 갖는 최적 공정 조건을 도출하였으며, 적절한 에칭 공정을 통해 높은 순도의 실리콘을 회수하였다. 분쇄 시간과 RPM에 따른 태양전지 회수율을 비교한 결과 최적 분쇄 공정 조건은 분쇄 시간 60분, 800 RPM이었다. 이후 진

폭과 선별 시간에 따른 태양전지 회수율을 비교한 결과 2.0 mm 진폭과 선별 시간 5분이 최적 선별 공정 조건이었다. 앞서 도출한 최적 공정을 적용하였을 때 태양전지 회수율은 약 $87.43 \pm 1.03\%$ 로 확인되었고 태양전지로부터 높은 순도의 실리콘을 회수하기 위해 HNO_3 과 HCl 을 이용한 에칭 공정을 진행하였다. 에칭 공정 후 회수된 실리콘 분말을 평가하기 위해 먼저 XRD 분석을 진행한 결과 Ag와 Al이 상당량 제거된 것을 확인하였다. 이후 ICP-MS 분석을 통해 실리콘 순도를 확인한 결과 3N1의 순도를 갖는 것으로 확인되었다. 최종적으로 회수된 실리콘의 회수율을 확인한 결과 약 $86.5 \pm 1.01\%$ 이었다.

후기

본 연구는 한국환경산업기술원 재활용저해제품 순환이용성 개선기술개발사업의 지원을 받아 수행한 연구 과제입니다(과제번호: RE202003052).

REFERENCES

1. Overseas Economic Research Institute, Renewable Energy Industry Trend Report for the 2nd Quarter of 2021, 2021.
2. Weckend, S. and Andreas, W., End of Life Management: Solar Photovoltaic Panels. No. NREL/TP-6A20-73852. National Renewable Energy Lab.(NREL), Golden, CO (United States), 2016.
3. Goodish, V. and Ap, S., Waste Electrical and Electronic Equipment (WEEE) Handbook, Woodshed Publishing, 2019.
4. Kim, J. H., Lee, J. K., Ahn, Y. S., Yeo, J. G., Lee, J. S., Kang, G. H., and Cho, C. H., Peeling Behavior of Backsheet according to Surface Temperature of Photovoltaic Module, Korean Journal of Materials Research, Vol. 29, No. 11, pp. 703-708, 2019.
5. Noh, M. H., Lee, J. K., Ahn, Y. S., Yeo, J. G., Lee, J. S., Kang, G. H., and Cho, C. H., Photovoltaic Performance of Crystalline Silicon Recovered from Solar Cell Using Various Chemical Concentrations in a Multi-Stage Process, Korean Journal of Materials Research, Vol. 29, No. 11, pp. 697-702, 2019.
6. Seo, K. M., Lee, J. K., Ahn, Y. S., Kang, G. H., Chang, H. S., and Lee, J. S., Structural Analysis for Physical Separation of End-of-life Photovoltaic Module, Journal of the Korean Solar Energy Society, Vol. 42, No. 1, pp. 1-11, 2021.
7. Komoto, K., Lee, J. S., Zhang, J., Ravikumar, D., Sinha, P., Wade, A., and Heath, G. A. End-of-Life Management of Photovoltaic Panels: Trends in PV Module Recycling Technologies, No. NREL/TP-6A20-73847, National Renewable Energy Lab.(NREL), Golden, CO (United States), 2018.
8. Lee, J. K., Lee, J. S., Ahn, Y. S., Kang, G. H., Song, H. E., Kang, M. G., Kim, Y. H., and Cho, C. H., Simple Pretreatment Processes for Successful Reclamation and Remanufacturing of Crystalline Silicon Solar Cells, Progress in Photovoltaics: Research and Applications, Vol. 26, No. 3, 2018.
9. Xu, Y., Li, J., Tan, Q., Peters, A. L., and Yang, C., Global Status of Recycling Waste Solar Panels: A Review, Waste Management, Vol. 75, pp. 450-458, 2018.
10. Chowdhury, M. S., Rahman, K. S., Chowdhury, T., Nuthammachot, N., Techato, K., and Akhtaruzzaman, M., An Overview of Solar Photovoltaic Panels' End-of-life Material Recycling, Energy Strategy Reviews, Vol. 27, 100431, 2020.

11. Pagnanelli, F., Moscardini, E., Granata, G., Atia, T. A., Altimari, P., Havlik, T., and Toro, L., Physical and Chemical Treatment of End of Life Panels: An Integrated Automatic Approach Viable for Different Photovoltaic Technologies, *Waste Management*, Vol. 59, pp. 422-431, 2017.
12. Granata, G., Pagnanelli, F., Moscardini, E., Havlik, T., and Toro, L. J. S. E. M., Recycling of Photovoltaic Panels by Physical Operations, *Solar Energy Materials and Solar Cells*, Vol. 123, pp. 239-248, 2014.
13. Pagnanelli, F., Moscardini, E., Granata, G., Atia, T. A., Altimari, P., Havlik, T., and Toro, L., Physical and Chemical Treatment of End of Life Panels: An Integrated Automatic Approach Viable for Different Photovoltaic Technologies, *Waste Management*, Vol. 59, pp. 422-431, 2017.
14. Zhao, P., Guo, J., Yan, G., Zhu, G., Zhu, X., Zhang, Z., and Zhang, B., A Novel and Efficient Method for Resources Recycling in Waste Photovoltaic Panels: High Voltage Pulse Crushing, *Journal of Cleaner Production*, Vol. 257, 120442, 2020.
15. Tokoro, C., Nishi, M., and Tsunazawa, Y., Selective Grinding of Glass to Remove Resin for Silicon-Based Photovoltaic Panel Recycling, *Advanced Powder Technology*, Vol. 32, No. 3, pp. 841-849, 2021.
16. Choi, Y. S., Park, J. W., Lee, J. H., Shin, J. H., Jang, S. W., and Kim, H. J., Preparation of EVA/Intumescent/Nano-Clay Composite with Flame Retardant Properties and Cross Laminated Timber (CLT. application technology), *Journal of the Korean Wood Science and Technology*, Vol. 46, No. 1, pp. 73-84, 2018.
17. Nevala, S. M., Hamuyuni, J., Junnila, T., Sirviö, T., Eisert, S., and Wilson, B. P., Electro-hydraulic Fragmentation Vs Conventional Crushing of Photovoltaic Panels – Impact on Recycling, *Waste Management*, Vol. 87, pp. 43-50, 2019.
18. Bogust, P. and Smith, Y. R., Physical Separation and Beneficiation of End-of-Life Photovoltaic Panel Materials: Utilizing Temperature Swings and Particle Shape, *JOM*, Vol. 72, No. 7, pp. 2615-2623, 2020.
19. Abd El Haleem, S. M., Abd El Wanees, S., Abd El Aal, E. E., and Farouk, A., Factors Affecting the Corrosion Behaviour of Aluminium in Acid Solutions. I. Nitrogen and/or Sulphur-containing Organic Compounds as Corrosion Inhibitors for Al in HCl Solutions, *Corrosion Science*, Vol. 68, 2013.
20. Sadrnezhaad, S. A. E. and Mozammel, M., Kinetics of Silver Dissolution in Nitric Acid from Ag-Au_{0.04}-Cu_{0.10} and Ag-Cu_{0.23} Scraps, *Journal of Materials Science and Technology*, Vol. 22, No. 5, pp. 696-700, 2020.
21. Lee, H. J., Park, Y. G., Lee, S. H., and Park, J. H., Photocatalytic Properties of TiO₂ According to Manufacturing Method, *Korean Chemical Engineering Research*, Korean Society of Chemical Engineers, Vol. 56, No. 2, pp. 156-161, 2018.
22. Habashi, F., Dugdale, R., and Nagamori, M., The Recovery of Copper, Iron, and Sulfur from Chalcopyrite Concentrate by Reduction, *Metal*, Vol. 28, No. 11, pp. 1051-54, 1974.
23. Wang, D., Fan, M., He, T., Zeng, F., Hu, X., Li, C., and Su, Z., Cu/Cu_xS-Embedded N, S-Doped Porous Carbon Derived in Situ from a MOF Designed for Efficient Catalysis, *Chemistry – A European Journal*, Vol. 27, No. 44, pp. 11468-11476, 2020.
24. Cosic, B. and Fontijn, A., Kinetics of Pb Reactions with N₂O, Cl₂, HCl, and O₂ at High Temperatures, *The Journal of Physical Chemistry A*, Vol. 104, No. 23, pp. 5517-5524, 2000.