

## 태양광 폐실리콘 웨이퍼 회수 실리콘을 활용한 탄화규소 분말 합성

이윤주\* · 권오규\* · 선주형\*\* · 장근용\*\* · 최준철\*\*\* · 권우택\*

\*한국세라믹기술원 탄소중립소재센터, \*\*플러스매니저 연구소, \*\*\*드림마닝

### Synthesis of Silicon Carbide Powder Using Recovered Silicon from Solar Waste Silicon Wafer

Yoonjoo Lee\*, Oh-Kyu Kwon\*, Ju-Hyeong Sun\*\*, Geun-Yong Jang\*\*,  
Joon-Chul Choi\*\*\* and §Wooteck Kwon\*

\*Carbon Neutrality & Materials Digitalization Division, Korea Institute of Ceramic Engineering & Technology,  
Jinju 52851, Korea

\*\*Research Institute, PLUS Manager, Changwon 51609, Korea

\*\*\*Dream mining, Hwaseong 18552, Korea

#### 요 약

태양광 폐실리콘 웨이퍼에서 회수한 실리콘과 카본블랙을 활용하여 탄화규소 분말을 제조하였다. 태양광 발전시장에서 결정질 실리콘 모듈이 90% 이상을 차지한다. 태양광 모듈의 사용기한이 도래함에 따라 환경과 경제적인 측면에서 실리콘을 회수하고 활용하는 기술은 매우 중요하다. 본 연구에서는 태양광 폐패널에서 회수한 실리콘을 탄화규소 원료로 활용하기 위하여, 순도 95.74% 폐실리콘 웨이퍼로부터 정제과정을 거쳐 99.99% 실리콘 분말을 회수하였다. 탄화규소 분말 합성특성을 살펴보기 위하여, 정제된 99.99% 실리콘 분말과 탄소분말을 혼합한 후, Ar 분위기에서 열처리(1,300°C, 1,400°C, 1,500°C)과정을 수행하였다. 실리콘과 탄화규소 분말의 특성을 입도분포, XRD, SEM, ICP, FT-IR 및 Raman 분석기를 사용하여 분석하였다.

**주제어 :** 태양광 폐패널, 실리콘, 정제, 열처리, 탄화규소 분말

#### Abstract

Silicon carbide powder was prepared from carbon black and silicon recovered from waste solar panels. In the solar power generation market, the number of crystalline silicon modules exceeds 90%. As the expiration date of a photovoltaic module arrives, the development of technology for recovering and utilizing silicon is very important from an environmental and economic point of view. In this study, silicon was recovered as silicon carbide from waste solar panels: 99.99% silicon powder was recovered through purification from a 95.74% purity waste silicon wafer. To examine the synthesis characteristics of SiC powder, purified 99.99% silicon powder and carbon powder were mixed and heat-treated (1,300, 1,400 and 1,500 °C) in an Ar atmosphere. The characteristics of silicon and silicon carbide powders were analyzed using particle size distribution analyzer, XRD, SEM, ICP, FT-IR, and Raman analysis.

**Key words :** solar waste panel, silicon, purification, heat treatment, silicon carbide powder

· Received : September 9, 2022 · Revised : September 21, 2022 · Accepted : September 26, 2022

§ Corresponding Author : Wooteck Kwon (E-mail : wtkwon@kicet.re.kr)

Carbon Neutrality & Materials Digitalization Division, Korea Institute of Ceramic Engineering & Technology, 202, Osongsaengmyeong 1-ro, Osong-eup, Heungdeok-gu Cheongju, Chungcheongbuk-do 28160, Korea

©The Korean Institute of Resources Recycling. All rights reserved. This is an open-access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution Non-Commercial License (<http://creativecommons.org/licenses/by-nc/3.0/>), which permits unrestricted non-commercial use, distribution and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.

## 1. 서 론

2015년 12월, 제21차 유엔기후변화협약 당사국 총회(COP21)에서 파리기후변화 협약이 합의된 이후 전 세계적으로 온실가스 감축을 위한 노력이 이루어지고 있다. 이에 각국에서는 신재생 에너지, 특히 태양광 발전 중심의 에너지믹스 재편을 통해 지속 가능한 신재생에너지 보급 확대에 박차를 가하고 있다. 국내의 경우, 태양광 모듈의 사용기한이 도래함에 따라 2030년 약 8만 톤의 폐 모듈 발생이 예상되며, 2045년에는 155만 톤 이상의 폐 모듈 발생이 예상되고 있다<sup>1)</sup>. 국내 태양광 발전시장에서는 결정질계 실리콘 모듈이 90% 이상을 차지하고 있으며, 일반적으로 태양광 모듈은 알루미늄 프레임, 강화유리 EVA(ethyl vinyl acetate) 필름, 태양전지, 백시트 등으로 구성되어 있다. 실리콘은 모듈 구성 소재의 3.65~4.1%를 차지하므로<sup>2,3)</sup>, 2045년 실리콘 배출량은 약 6만 5천 톤에 이를 것으로 추정된다. 현재 폐 모듈은 재활용 기술이 존재하지 않아 대부분 매립 처분해야 하는 상황이다. 국내는 2022년까지 태양광 모듈 회수 보관 체계 구축 및 재활용 기술개발 등 재활용 기반을 마련한 후, 2023년부터 폐 모듈 생산자책임재활용제도(EPR)를 도입할 예정으로 업체는 회수한 폐패널을 80% 이상 재활용하여야 한다<sup>4)</sup>. 따라서 태양광 폐패널에서 고순도 실리콘을 회수하고 재활용 하는 것은 태양광 폐모듈 재활용 경제성제고 및 재활용을 증진을 위해 매우 중요하다.

탄화규소는 강한 공유결합을 하고 있어서 결합력이 아주 강하기 때문에 고온안정성, 열 충격 저항성이 높고, 내마모성, 자기윤활성이 좋을 뿐 아니라 내산화성, 내식성 등의 특성이 우수하여 베어링, 메커니컬실 및 반도체용 부품 소재로써 주목받는 재료이다. 가장 대표적인 탄화규소 제조 방법은 실리콘을 고온에서 탄소환원 시키는 에치슨(Acheson)법을 사용하여 제조되는데, 이는  $\alpha$ 상의 탄화규소( $\alpha$ -SiC)를 제조하는데 적합한 대표적 산업적 양산 방법이다. 그 외에도  $\beta$ 상의 탄화규소 제조방법에는 탄소환원법(carbothermal reduction method), 직접탄화법(direct carbonization), 기상반응을 이용한 합성법, 액상고분자 반응법 등이 잘 알려져 있다<sup>5-8)</sup>. 본 연구에서는 태양광 폐실리콘 웨이퍼에서 고순도 실리콘 분말을 회수하였으며, 탄화규소 분말 합성특성을 살펴보기 위하여, 직접탄화법을 이용해서 실리콘 분말과 탄소분말을 혼합한 후, Ar 분위기에서 열처리온도 변화에 따른 탄화규소 분말 합성특

성을 연구하였다.

## 2. 실험방법

### 2.1. 실리콘 정제 및 회수율 계산

폐실리콘 웨이퍼에서 침출 정제공정을 거쳐 고순도 실리콘을 회수하고, 회수한 실리콘을 활용하여 탄화규소 분말을 합성하는 공정은 Fig. 1과 같다. 실리콘 정제를 위해서 태양광패널 생산 공정에서 발생하는 폐실리콘 웨이퍼를 5mm 이하 크기로 파쇄한 후, 180℃ 반응기에 폐실리콘 14kg과 침출액 42ℓ를 투입하였다. 폐실리콘에 함유된 불순물을 정제하기 위해서 상온(20℃)에서 각 단계별 60분간 반응시켰으며, 정제효율을 높이기위해서 교반기를 이용하여 200rpm으로 교반하였다. 실리콘 정제를 위하여 당초에는 산 종류를 변경하면서 3단계에 걸쳐 실험하였으나, 공정단계 변화에 따른 시간절약 및 공정효율을 향상시키기 위해서 2단계에 걸쳐서 정제를 진행하였다. 1단계에는 15wt% 질산( $\text{HNO}_3$ ) 용액을 사용하였으며, 2단계에서는 5~10% 불화암모늄( $\text{NH}_4\text{HF}_2$ ), 과산화수소( $\text{H}_2\text{O}_2$ ) 및 15~20% 황산( $\text{H}_2\text{SO}_4$ ) 혼합산을 사용하여 실리콘 불순물을 제거하였다. Fig. 2는 정제실험 전 폐실리콘 웨이퍼와 정제과정을 거친 후의 실리콘 및 침출액 사진이다. 실험에 사용한 실리콘에 대한 순도분석은 유도결합 플라즈마 방출분광기 ICP-OES(Perkin Elmer OPTIMA 8300) 및 원소분석기(LECO CS 744, Leco ONH836)를 이용하였다. 폐실리콘 웨이퍼 고순도화 과정에서 얻은 실리콘 회수율은 정제과정을 거친 실리콘분말에서의 실리콘함량

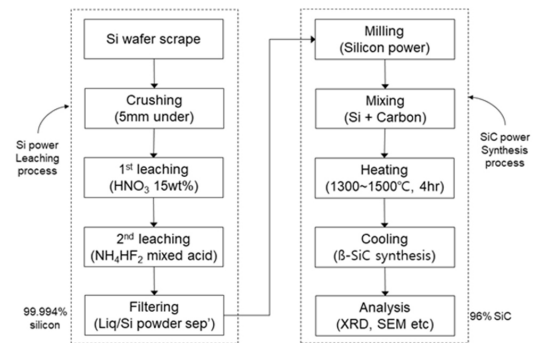


Fig. 1. Process diagram of high purity silicon recovery and synthesis of silicon carbide powder in waste silicon wafer.

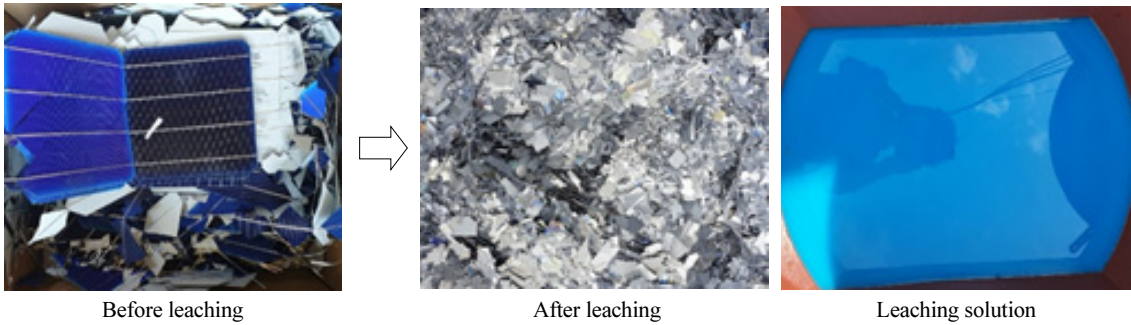


Fig. 2. Photographs of waste silicon before and after leaching.

을 실리콘웨이퍼에서의 실리콘 함량으로 나누어 계산 (Eq. (1)) 하였다.

$$\text{실리콘회수율} = \frac{\text{정제후고순도실리콘무게} \times \text{실리콘순도}}{\text{실리콘웨이퍼무게} \times \text{실리콘순도}} \times 100 \quad (1)$$

### 2.2. 탄화규소 분말 합성

탄화규소 분말 합성을 위하여 정제된 실리콘을 볼밀로 12시간 분쇄하였으며, 분쇄된 실리콘 분말과 카본블랙을 1 : 1.2 몰비로 혼합하였다. 실리콘 분말과 카본블랙의 입자형상 및 크기는 JEOL사 전계방출형 주사전자현미경 (FE-SEM, JSM-7610F)을 이용하여 분석하였다. 실리콘과 카본블랙 혼합물을 1300°C, 1400°C 및 1500°C Ar 분위기에서 4시간 열처리하였다. 열처리 생성물 특성평가를 위하여 HORIBA 레이저 회절 입도 분석기(LA-950)를 이용하여 입도분포를 측정하였으며, 광물특성 변화는 X-회절분석기(BRUKER사 D8 Advance)를 이용하여 분석하였다. 화학성분은 유도결합 플라즈마 방출분광기 ICP-OES(Perkin Elmer OPTIMA 8300) 및 원소분석기(LECO CS 744, Leco ONH836)를 이용하였고, 입자형상 및 크기는 JEOL사 전계방출형 주사전자현미경(FE-SEM, JSM-7610F)을 이용하여 분석하였다. 열처리 생성물의 표면 구조 및 특성변화를 살펴보기 위하여 Bruker사 퓨리에 변환 적외선분광기(FT-IR, Vertex 80v)를 사용하였다.

## 3. 실험결과 및 고찰

### 3.1. 실리콘 정제

폐실리콘 웨이퍼 및 2단계에 걸쳐 불순물을 제거한 실

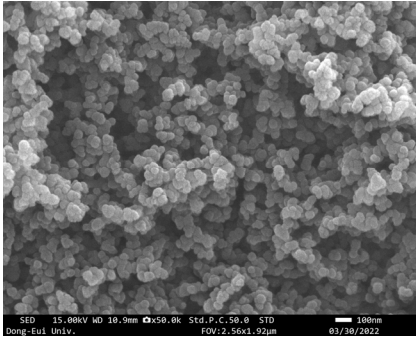
Table 1. Analysis results of silicon components

	raw materials	1 <sup>st</sup> leaching	2 <sup>nd</sup> leaching
Si purity (%)	95.743	99.932	99.994
Impurities (ppm)			
Al	35,110	454.0	<0.1
Ag	5,107	25.5	<0.1
Te	1,433	44.5	18.8
Ba	254	1.1	<0.1
Pb	119	18.0	0.1
Bi	102	0.8	0.1
V	92.1	4.0	<0.1
Zn	71.9	3.2	<0.1
Sr	50.2	0.4	<0.1
B	40.1	1.8	<0.1
Ca	36.3	9.1	1.7

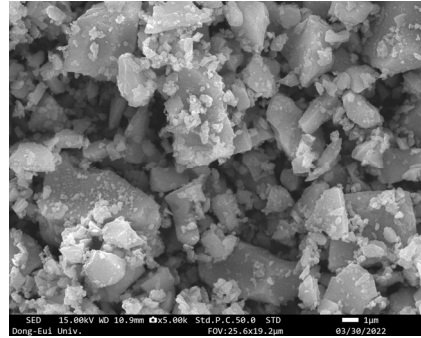
리콘 성분은 유도결합 플라즈마 방출분광기 및 원소 분석기를 이용하여 분석하였으며, 원 시료 기준 30ppm 이상인 성분의 분석결과를 Table 1에 나타내었다. 분석결과에서와 같이 실리콘 순도 95.743%의 폐실리콘을 1차 질산 용액 침출과정을 거쳐 99.932% 순도의 실리콘 분말을 얻을 수 있었으며, 혼합산을 사용한 2차 침출과정을 통해 99.994%의 고순도 실리콘 분말을 확보하였다. 1차 침출 과정에서 질산을 사용한 것은 금속성분을 제거&회수하기 위한 것이고, 2차 침출과정에서 혼합산을 사용한 것은 비금속 성분을 효율적으로 제거하기 위한 것이다. 폐실리콘 웨이퍼의 회수율 계산결과를 Table 2에 나타내었다. 계산결과에서와 같이 실리콘 순도 95.74% 폐실리콘 웨이퍼 14kg을 사용하여 99.994% 실리콘 12.187kg을 회수하여 90.91%의 회수율을 확보할 수 있었다.

**Table 2.** Recovery rate of waste silicon wafer

	Weight (kg)	Silicon purity (%)	Recovery rate = $\frac{12.187 \times 99.994}{14 \times 95.743} = 90.915\%$
Silicon wafer	14.000	95.743	
High purity silicon	12.187	99.994	



(a) Carbon black



(b) Silicon

**Fig. 3.** SEM analysis of carbon black and silicon powder.

### 3.2. 탄화규소 분말 합성

탄화규소 분말 합성원료로 사용한 실리콘 분말과 카본블랙의 SEM 측정결과를 Fig. 3에 나타내었다. SEM 측정결과, 카본블랙의 경우에 30~50nm크기의 구형 일차 입자가 불규칙하게 뭉쳐져 있으며, 실리콘 분말은 각형의 조대한 3~10 $\mu\text{m}$  입자표면에 1 $\mu\text{m}$ 이하의 미세입자가 응집되어 있음을 관찰할 수 있다. 입도 분석기를 사용하여 측정 한 실리콘분말의 평균입자 크기는 2.82 $\mu\text{m}$ 로 측정되었다.

열처리 생성물에 대한 화학성분을 유도결합 플라즈마 방출분광기 및 원소 분석기를 이용하여 분석하였으며, 100ppm 이상인 성분의 분석결과를 Table 3에 나타내었다. 분석결과에서와 같이 열처리 온도가 1300 $^{\circ}\text{C}$ 에서 1400 $^{\circ}\text{C}$ , 1500 $^{\circ}\text{C}$ 로 증가함에 따라 탄화규소 함량이 89.8%에서 95.9% 및 95.6%로 증가함을 알 수 있다. 열처리 온도 1300 $^{\circ}\text{C}$ 에서 1400 $^{\circ}\text{C}$ 로 증가할 때, 탄화규소 함량이 89.8%에서 95.9%로 크게 증가하였지만, 1400 $^{\circ}\text{C}$ 와 1500 $^{\circ}\text{C}$ 로 증가할 때, 탄화규소 함량 변화가 거의 없음을 알 수 있다. 이것은 Si와 탄소의 직접반응이 1150 $^{\circ}\text{C}$  부근에서 시작해서<sup>3)</sup> 1400 $^{\circ}\text{C}$  전에 대부분 완료되는 것을 의미한다. 열처리온도가 증가함에 따라 잔류 실리콘과 아울러 Na, K, 및 Fe 등의 불순물의 양을 감소시켜 탄화규소 순도 96% 까지 향상시켰으며, 열처리 온도증가에 따른 탄화규소 분말의 순도향상을 확인할 수 있었다.

**Table 3.** Chemical components according to heat treatment temperature (1300 $^{\circ}\text{C}$ , 1400 $^{\circ}\text{C}$  and 1500 $^{\circ}\text{C}$ )

	1300 $^{\circ}\text{C}$	1400 $^{\circ}\text{C}$	1500 $^{\circ}\text{C}$
SiC (%)	89.8	95.9	95.6
Free-Carbon (%)	6.60	3.68	4.01
Free-SiO <sub>2</sub> (%)	1.69	0.19	0.18
Free-Si (%)	0.74	0.15	0.15
O (%)	0.86	0.06	0.05
Impurities (ppm)			
Na	1,013	14.3	9.2
Ca	811	38.2	16.4
K	383	21.8	14.7
Mg	182	1.9	2.2
Fe	124	24.5	6.3
Zr	104	77.0	70.5

Fig. 4에 1300 $^{\circ}\text{C}$ , 1400 $^{\circ}\text{C}$  및 1500 $^{\circ}\text{C}$ , Ar 분위기에서 4시간 열처리한 생성물에 대한 X-선 회절분석기 측정결과를 나타내었다. X-선 회절분석결과,  $\beta$ -SiC상의 주 피크인 35 $^{\circ}$ , 60 $^{\circ}$ , 73 $^{\circ}$ 에서 피크가 관찰되어, 열처리 생성물이  $\beta$ -SiC임을 확인할 수 있었다. 피크강도를 보면 1300 $^{\circ}\text{C}$ 와 비교하여 1400 $^{\circ}\text{C}$  및 1500 $^{\circ}\text{C}$  피크강도가 증가하고 명확해져,  $\beta$ -SiC상의 결정도가 증가함을 확인할 수 있다.

열처리한 생성물에 대한 SEM 측정결과를 Fig. 5에 나

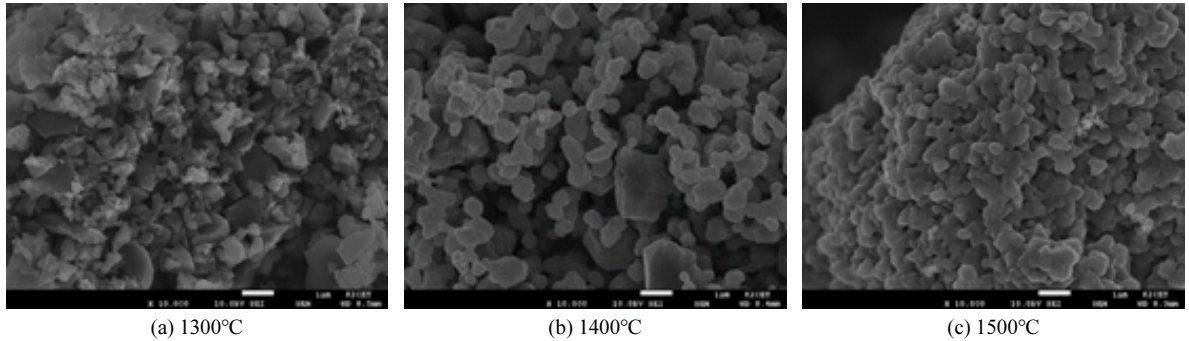


Fig. 5. SEM analysis of SiC powders produced at 1300°C, 1400°C and 1500°C.

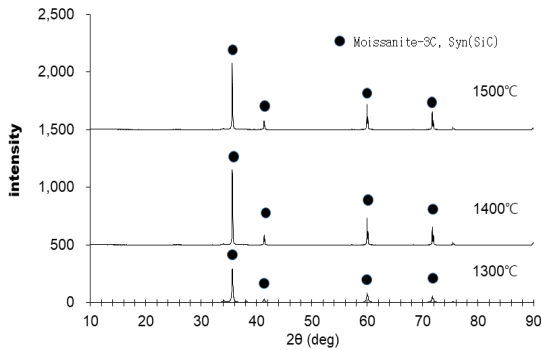


Fig. 4. X-ray diffraction patterns of SiC powders produced at 1300°C, 1400°C and 1500°C.

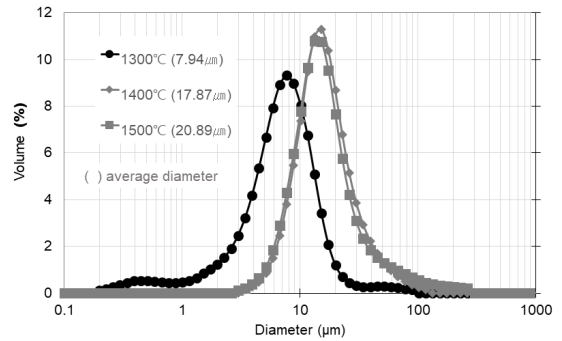


Fig. 6. Particle size distribution of SiC powders produced at 1300°C, 1400°C and 1500°C.

타내었다. SEM 측정결과, 1300°C에서 열처리한 경우에는 입자형상이 원료물질인 실리콘 형상과 유사하게 각형의 모난 형상을 보여주고 있으나, 1400°C, 1500°C에서 열처리한 경우에는 표면이 용융된 것 같은 둥근 형상을 보여주고 있음을 확인하였다. 이것은 원료물질인 실리콘과 탄소반응이 시작되는 1150°C 부근에서는 고상반응이 진행되어<sup>10)</sup> 원료물질인 실리콘 형상을 유지하지만 실리콘이 melting되기 시작하는 1400°C 부근에서는 액상반응에 의해 실리콘 입자표면이 둥근 형상을 보여주게 된다. 1차 입자는 200nm~3μm 크기로 온도가 증가할수록 입자간 응집현상이 증가함을 알 수 있다. 이 결과는 0.35μm 크기의 실리콘 입자를 사용하고 1300°C에서 열처리 하였을 때, 100nm 크기의 미세한 1차 탄화규소 입자가 생성된 기존 연구 결과와<sup>5)</sup> 차이가 있었다. 0.35μm 실리콘 입자를 사용하였을 때 100nm크기의 미세한 탄화규소 입자가 생성된 기존 연구결과와, 2.82μm의 조대한 실리콘 입자를 사용하였을 때 1차 입자가 200nm~3μm로 증가한 본 실험결과

를 비교할 때, 탄화규소 입자크기는 탄소분말의 입자크기 뿐 아니라 실리콘 입자크기에 영향을 받는 것으로 판단되었다.

Fig. 6에 열처리 생성물의 입도분석 측정결과를 나타내었다. 입도분석결과, 1400°C와 1500°C에서 합성된 탄화규소 분말의 평균입경은 18~21μm로 유사한 경향을 보이나, 1300°C에서 합성된 탄화규소 분말의 입자크기는 8μm로 차이가 나는 것을 알 수 있다. 이러한 현상은 두 반응 메커니즘의 차이로 설명될 수 있다. 1400°C 부근인 실리콘의 용점보다 높은 값으로 온도를 증가시키면, 용융된 실리콘 Si(액체)와 C(s)의 반응은 기본적으로 Si(l) + C(s) → β-SiC(s) 반응 매커니즘을 따른다. 이 상태에서, 액체 Si는 침투하거나 Si 원자가 C(s)로 확산될 것이고, 여기서 반응이 일어나 β-SiC를 형성하거나 용융된 실리콘에서 탄소의 용출이 일어나 탄화규소가 용액 또는 증착 장소에서 (차가운) 증착 위치로 운반된다. 이러한 고체-액체 반응은 큰 입자를 만드는데 유리한 것으로 보인다<sup>10)</sup>. 그러나

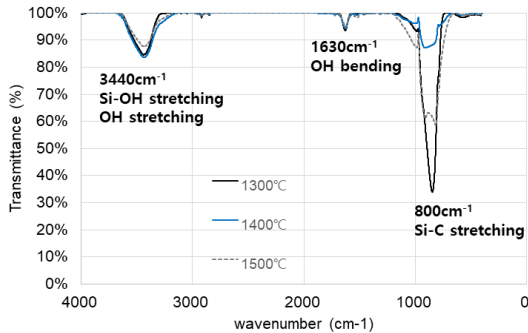


Fig. 7. FT-IR analysis of SiC powders produced at 1300°C, 1400°C and 1500°C.

Si의 용점 이하의 온도에서는 Si(고체) + C(고체)형 반응이 일어나는 것을 알 수 있다. 상압 하에서 Si와 탄소의 분말 혼합물의 직접 반응은 1150°C 부근에서 천천히 시작된다<sup>9)</sup>. 이러한 고체-고체 반응은 고체-액체 반응에 비해 작은 입자를 형성한다.

제조된 탄화규소 시료 표면의 화학결합과 작용기를 Fig. 7와 같이 FT-IR 스펙트럼을 이용하여 확인하였다. 그림에서 알 수 있는 바와 같이, Si-C 진동에 기인하는 피크가 800cm<sup>-1</sup>에 나타나는데, 이것은 탄화규소가 형성되었음을<sup>11)</sup> 나타낸다. 또한 Si-OH 및 OH 진동에 기인하는 3440cm<sup>-1</sup> 및 1630cm<sup>-1</sup>의 두 개의 강한 피크가 발견되었는데 이것은 탄화규소 표면에서 Si-OH의 존재와 시료 표면에 수분이 존재함을 보여준다.

#### 4. 결 론

태양광 폐패널에서 고순도 실리콘을 회수할 뿐 아니라, 이를 활용하여 탄화규소 분말 제조가능성을 확인하고자 하였다. 본 연구에서는 질산용액과 혼합산을 사용한 2차에 걸친 정제과정으로 95.74% 폐실리콘 웨이퍼로부터 99.99% 실리콘 분말을 회수하였으며, 90.91%의 실리콘 회수율을 확보하였다. 아울러 정제된 99.99% 실리콘 분말과 탄소분말을 원료로 사용하여 열처리과정을 거쳐 β-SiC 분말을 합성하였다. 또한 반응온도 변화에 따른 탄화규소 분말 합성특성을 살펴보았다. 반응온도의 상승은 잔류 실리콘과 아울러 Na, K, 및 Fe 등의 불순물의 양을 감소시켜 탄화규소 순도 96% 까지 향상시켰으며, 고온열처리에 의한 탄화규소 분말열처리온도가 증가함에 따라

탄화규소 분말의 순도향상을 확인할 수 있었다. XRD 및 FT-IR 분석결과로부터 1300°C의 낮은 온도에서 β-SiC 분말이 합성되었음을 알 수 있었다. SEM 측정결과, 1차 입자는 200nm~3μm 크기로 온도가 증가할수록 각형의 모난 형상에서 표면이 용융된 것 같은 구형입자로 변화되면서 입자간 응집현상이 증가하는 것을 확인할 수 있었다. 아울러 미세한 실리콘 입자를 사용한 기존 연구결과<sup>9)</sup>와 2.82μm의 조대한 실리콘 입자를 사용하여 탄화규소 입자를 합성한 실험결과를 비교할 때, 탄화규소 입자크기는 실리콘 입자크기에 영향을 받는 것으로 판단되었다.

#### 감사의 글

본 연구는 환경부의 재원으로 환경산업기술원의 재활용 저해제품 순환이용성 개선 기술개발사업(2020003100002)의 연구비지원을 받아 수행되었습니다.

#### References

1. Lee, K. and Cha, J., 2019 : Management of Solar Photovoltaic Panels under the Extended Producer Responsibility Legislation, J. Korean Soc. Miner. Energy Resour. Eng., 56(4), pp.367-376.
2. J. Y. Cho, A. Park, H. M. Yun, et al., 2020 : Current Status and Utilization Technology of End-of Life Photovoltaic Modules, J. of Korean Inst. of Resources and Recycling, 29(4), pp.15-30.
3. Latunussa, C. E. L., Ardente F., Blengini, G. A., et al., 2016 : Life Cycle Assessment of an Innovative Recycling Process for Crystalline Silicon Photovoltaic Panels, Solar Energy Materials & Solar Cells, 156, pp.101-111.
4. Kim, T. G. and Kim, K. Y., 2021 : Utilization Technology of Solar Photovoltaic Waste Panels, KISTEP Tech. Brief, 2021(13).
5. E. J. Jung, Y. Kim, W. T. Kwon, et al., 2010 : A Study on the Preparation of SiC Nano powder from the Si Waste of Solar Cell Industry, 19(5), 44-49.
6. Setiowati, U. and Kimura, S., 1997 : Silicon carbide powder synthesis from silicon monoxide and methane, J. Am. Ceram. Soc., 80(3), pp.757-60.
7. Kevorkjian, V. M., Komac, M. and Kolar, D., 1992 : Low temperature synthesis of sinterable SiC powders by carbothermic reduction of colloidal SiO<sub>2</sub>, J. Mater. Sci., 27(10), pp.2705-2712.
8. Just, W., Muhlhoff, L., Scholz, C., et al., 1992 : Epitaxially

- grown  $\beta$ -SiC on Si(100) and Si(111) substrates by low pressure chemical vapor deposition, Mater. Sci. Eng. B, 11(1-4), pp.317-319.
9. E. J. Jung, M. H Lee, Y. Kim, et al., 2017 : Preparation of particle-size-controlled SiC powder for single-crystal growth, J. Korean Cryst. Growth Cryst. Technol., 27(1), pp.57-63.
10. A. Taylor and D. S. Laidler, 1950 : The formation and crystal structure of silicon carbide, Br. J. Appl. Phys., 1(7), pp.174-181.
11. Sujirote, K., Leangsuwan, P., 2003 : Silicon carbide formation from pretreated rice husks, J. Mater. Sci., 38, pp. 4739-4744.

---

### 이윤주

- 현재 한국세라믹기술원 책임연구원
  - 당 학회지 12권 2호 참조
- 

---

### 권오규

- 부산대학교 고분자공학과 학사
  - 현재 한국세라믹기술원 연구원
- 

---

### 선주형

- 부경대학교 신소재시스템공학과 학사
  - 부경대학교 신소재시스템공학과 석사
  - 현재 ㈜플러스매니저 선임연구원
- 

---

### 장근용

- 동아대학교 기계공학과 학사
  - 부산대학교 금속공학과 석사
  - 현재 동의대학교 신소재공학과 박사과정
  - 현재 ㈜플러스매니저 대표이사
- 

---

### 최준철

- 한양대학교 금속공학과 학사
  - 한양대학교 금속공학과 석사
  - 한양대학교 금속공학과 박사
  - 현재 ㈜드림마이닝 연구소장
- 

---

### 권우택

- 현재 한국세라믹기술원 수석연구원
  - 당 학회지 제19권 제5호 참조
-