≫ 研究論文 ≪

太陽光 産業에서 發生하는 Si/SiC 混合物의 燒結特性 研究

[†]權禹澤 · 金壽龍 · 金令姬 · 李玟周 · 金鍾日 · 李賢宰* · 吳世千**

韓國세라믹技術院 에너지環境素材本部

*(주)엔바이온

**公州大學校 環境工學科

Sintering Characteristics of Si/SiC Mixtures from Si Waste of Solar Cell Industry

[†]Woo Teck Kwon, Soo Ryong Kim, Younghee Kim, Yoon Joo Lee, Jong Il Kim,
Hyun Jae Lee* and Sea Cheon Oh**

Energy-Environmental Ceramics Division, KICET, 77, Digital-ro 10-gil, Geumcheon-gu, Seoul 153-801 Korea

* Enbion Inc, 841, Tamnip-dong Yuseong-gu, Daejeon, 305-510, Korea

** Department of Environmental Engineering, Kongju National University, 275 Budae-dong, Chungnam, 330-717, Korea

요 약

태양광 산업에서 폐기물로 발생하는 Si/SiC 혼합슬러지를 재활용하는 것은 환경과 경제적인 측면에서 중요하다. 이러한 재활용을 위해서 Si/SiC 혼합물의 소결특성을 분석하는 것이 필요하다. 본 연구에서는 SiC 함량에 따른 소결특성을 살펴보기 위해서 공기분급기를 이용하여 Si/SiC 혼합물에서 SiC 함량을 변화시켰다. SiC 함량이 변화된 Si/SiC 혼합물에 카본블랙, 점토 및 수산화알루미늄을 첨가하여 소결하였다. Si/SiC 혼합물의 특성분석 및 첨가제 변화에 따른 Si/SiC 혼합물 소결체의 특성변화를 SEM, XRD, 입도분석 및 겔보기 밀도변화를 측정하여 분석하였다. SEM 및 입도분석결과, SiC 95% 시료의 경우에는 원시료 및 SiC 75% 시료와 비교하여 1 µm 크기 이하의 미립입자가 크게 감소하여 공기분급을 통한 미세입자 제거가 SiC 함량 제어에 효과가 있음을 확인할 수 있었다. 수산화알루미늄을 첨가함에 따라서 β-Cristobalite 가 감소하고 mullite 생성량이 증가하였으며, 카본블랙의 첨가가 소결 특성 향상에 영향을 주는 것을 확인하였다.

주제어 : 태양광, 실리콘, 실리콘카바이드, 재활용, 소결

Abstract

The recycling of the Si/SiC mixture sludge obtained from solar cell industry is very significant, environmentally and economically. The sintering characteristics of Si/SiC mixture sludge was studied for the purpose of recycling. In this study, to understand sintering behavior, SiC content in the Si/SiC mixture was controlled using an air separator. Various Si/SiC mixtures having different SiC contents were sintered using carbon black, clay and aluminum hydroxide as sintering aids. Physical properties of Si/SiC mixture and sintered bodies have been characterized using SEM, XRD, particle size analyzer and apparent density measurement. SEM and particle size analysis result confirmed that the fine particles less than 1 µm decreased or removed more effectively through the air separator in the case of 95% SiC sample compared than the case of 75% SiC sample or original SiC

* Received : October 19, 2012 · Revised : December 4, 2012 · Accepted : February 22, 2013

[†]Corresponding Author : Woo Teck Kwon (E-mail : wtkwon@kicet.re.kr)

Energy & Environmental Division, Korea Institute of Ceramic Engineering & Institute, 77 Digital-ro 10-gil, Geumcheon-gu, Seoul 153-801, Korea

Tel : +82-2-3282-2425 / Fax : +82-2-3282-2430

©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.

sample. Further, with addition of the Aluminum Hydroxide, β -cristobalite phase gradually decreased while mullite phase gradually increased. The addition of the carbon black improved the sintering characteristics.

Key words : photovoltaic, silicon, silicon carbide, recycling, sintering

1. 서 론

태양광 에너지는 기존의 화석에너지를 대체할 수 있는 효율적인 청정에너지이다. 태양광 에너지를 활용하기 위한 웨이퍼 가공공정에서 절삭유(diethylene glycol 등)와 함께 연마재로서 탄화규소(SiC) 분말이 사용되고 있으며, 이 과정에서 실리콘 잉곳의 약 50%가 분말형태로 손실되고 있다.^{1,2)} 실리콘웨이퍼 제조공정에서 발생하는 Si/SiC 혼합물을 재활용하는 것은 태양광 산업의 경제성 제고 및 환경적인 측면에서 매우 중요하다.^{3,4)}

태양광산업의 제조공정에서 발생하는 고순도 실리콘 및 Si/SiC 혼합물에서 절삭유를 재활용하는 다양한 연구가 진행되었다.⁵⁻¹⁰⁾ 이러한 재활용 노력으로 웨이퍼 제조공정에서 발생하는 대부분의 고순도 실리콘과 탄화규소 및 절삭유는 분리공정을 거쳐서 재활용되고 있다. 하지만 재활용과정을 거치고 남은 잔여 Si/SiC 혼합물러지는 폐기물로 처리되고 있으며, 그 처리량이 국내에서만 연간 10,000톤 규모가 발생되고 있다.¹⁰⁾ Si/SiC 혼합물을 재활용하기 위하여 별도의 분리공정을 진행하지 않고 세라믹 도자기 원료로 사용하거나¹¹⁾ 전기장을 이용하여 Si와 SiC를 분리하는 등¹²⁾ 다양한 연구를 진행하였지만 아직까지 대부분의 Si/SiC 혼합물은 재활용되지 못하고 있다. Si/SiC 혼합물을 안정적으로 재활용하기 위해서는 균일한 품질특성 유지 및 경제성을 충족해야 한다. SiC는 고온안정성, 내산성뿐만 아니라 내마모성 등 우수한 특성으로 철강산업의 내화물이나 반도체의 고온공정, 원자로 등 그 사용분야가 지속적으로 증가하고 있다. SiC는 대부분 소결체 형태로 제조되어 활용되지만 고온에서 매우 안정하기 때문에 소결체로 제조하는 것에 어려움이 있다. 또한 소결체로 제조하기 위해서는 많은 에너지가 필요하기 때문에 사용이 제한적이었다. 따라서 SiC 소결온도를 낮추기 위한 다양한 연구가 진행되었다.¹³⁻¹⁴⁾ 최근에는 고온에서 열 교환을 극대화하기 위해 허니컴 형태로 제조하여 자동차 배기가스 후처리 장치(DPF) 및 축열 소재로의 활용이 추진되고 있다. 허니컴 형태의 SiC 소결체를 제조하기 위해서는 성형과정에서 압출공정에 적합한 점결성 유지 및 입자간 결합을 위한 binder가 필요하다. 허니컴 형태의

block 제조를 위한 점결성 유지 및 binder 소재로서 점토를 사용하는 것으로 알려져 있다.¹⁵⁾ 하지만 점토를 사용할 경우에는 점토에 포함되어 있는 SiO_2 성분으로 인하여 불안정한 광물특성을 갖는 cristobalite 광물이 생성되기 때문에 점토를 사용할 경우에는 cristobalite 광물을 최소화하는 배합 및 소결조건의 선정이 요구된다. 또한 Si/SiC 혼합물의 품질특성을 균일화할 수 있는 분리분급이 필요하다. 본 연구에서는 혼합물의 소결실험에 앞서 Si/SiC 혼합물이 일정한 성분을 유지할 수 있도록 공기 분급기를 이용하여 SiC 함량별로 분리하였다. SiC 함량변화 및 첨가제 변화에 따른 Si/SiC 혼합물의 소결특성을 살펴보고자 하였으며, SiC 함량이 변화된 Si/SiC 혼합물에 카본블랙, 점토 및 수산화알루미늄($\text{Al}(\text{OH})_3$)을 첨가하여 소결특성에 미치는 영향을 살펴 보았다.

2. 실험방법

국내 N사 태양광 웨이퍼 가공공정에서 발생하는 슬러지로부터 절삭유를 분리하여 본 실험의 원료로 사용하였다. SiC/Si 혼합물에서 SiC 함량을 높이는 것은 분리정제 공정설비 및 경제성과 밀접한 관련이 있다. 공정설비를 간소화하고 경제성을 높이기 위해서는 분리공정을 최소화할 필요가 있으며, 이것은 SiC 함량과 밀접한 관련이 있다. 따라서 SiC 함량 변화에 따른 Si/SiC 혼합물의 소결특성을 살펴보고자 하였다. Si/SiC 혼합물의 분리정제 및 소결하고자하는 출발원료의 SiC 함량을 변화시키기 위하여 50 ATP 공기분급기(Hosokawa Micron Ltd)를 이용하였다. 공기분급과정을 거쳐서 Si/SiC 혼합물에서 SiC 함량을 75%와 95%로 조절하여 Si/SiC 소결실험의 원료로 사용하였다. Si/SiC 혼합물의 소결조건을 선정하기 위해서 점토와 수산화알루미늄의 배합비와 소결온도 변화에 따른 광물특성 변화를 우선적으로 검토하였다. 소결온도는 1350°C와 1400°C로 변화시켰으며, 점토에 대한 수산화알루미늄 함량은 10%, 20%, 30%, 40% 및 50%로 증가시켰다. 승온속도는 5°C/min, 소결시간은 2h 으로 유지하였으며 공기분위기에서 소결하였다. 첨가제 변화에 따른 Si/SiC 혼합물의

소결실험은 기존의 연구결과 및 예비실험결과를 토대로 하여 카본블랙, 점토 및 수산화알루미늄을 이용하였다. 카본블랙은 일본 미쓰비시사 MA100을 이용하였으며, 점토는 일반 카오린 보다 점착특성이 우수한 것으로 알려진 와목점토를 사용하였다. 수산화알루미늄은 Sigma-Aldrich사의 시약급(Al_2O_3 , 50 ~ 57%) 제품을 구입하여 사용하였다. 카본첨가량은 Si/SiC 혼합물에서 Si 함량을 고려하여 5%로 고정하였다. 점토의 함량은 혼합기에서 Si/SiC 혼합물의 반죽상태를 고려하여 15%로 고정하였다. 수산화알루미늄과 점토와의 예비실험 결과를 토대로 해서 수산화알루미늄 함량을 6.5%와 15%로 변화하였다. Si/SiC 혼합물의 소결에 있어서 점토 첨가에 의한 cristobalite 광물의 생성을 최소화하기 위해서 소결온도는 $1400^{\circ}C$ 로 고정하였다. 승온속도는 $5^{\circ}C/min$, 유지시간은 2h 으로 하였으며 첨가제로 사용한 카본블랙의 산화를 방지하기 위하여 아르곤 분위기에서 소결하였다. Si/SiC 혼합물 및 공기 분급기를 이용하여 분리된 시료는 Particle size analyzer(Beckman Coulter, Model LS 230)로 측정하였다. SiC 성분분석은 KS L 1612 파인세라믹스용 미분말의 화학분석 방법에 의거 분석하였다. 결정상 분석을 위한 X-선 회절은 Ni-filtered $CuK\alpha$ radiation을 이용하여 Rigaku D/Max-A diffractometer를 사용하여 측정하였으며, 스캔속도는 $4^{\circ}/min$ 으로 하였다. 온도에 따른 소결체의 미세구조 분석은 SEM(S-4100, HITACHI사)을 이용하였다. 소결체의 소결밀도 변화를 살펴보기 위해서 KS L 4008 도자기의 겉보기 기공을 측정방법에 의거하여 겉보기 밀도를 측정하였다.

3. 결과 및 고찰

3.1. Si/SiC 혼합물의 분리분급

Si/SiC 혼합 슬러지에서 절삭유를 분리한 시료의 SEM 및 입도분석결과를 Fig. 1과 Fig. 2에 나타내었다. SEM 분석결과, $1\mu m$ 이하의 작은 입자와 $5\mu m$ 이상의 조대한 입자가 혼재되어 있음을 알 수 있었다. 이러한 결과는 태양광산업에서 발생하는 Si/SiC 혼합물에 대한 기존의 연구결과⁸⁾와 일치함을 알 수 있다. 기존의 연구결과 및 SEM 분석결과에서 볼 수 있듯이 $5\mu m$ 이상의 조대한 입자는 웨이퍼 가공공정에서 연마제로 사용되고 있는 SiC 분말이며, $1\mu m$ 이하의 미세한 입자는 Si 잉곳에서 발생하는 Si 분말인 것으로 판단되었다. Si/SiC 혼합물의 입자표면이 날카롭지 않고 뭉뚱함을 알 수

Fig. 1. SEM image of Si/SiC mixture.

Fig. 2. Particle size distribution of Si/SiC mixture.

는데 이것은 웨이퍼 가공과정에서 입자표면의 마모과정에서 기인한 것으로 판단된다. Fig. 2의 입도분석결과에서 보듯이 $1\mu m$ 이하의 미세한 입자와 $5\mu m$ 이상의 입자가 Bimodal 형태로 존재함을 알 수 있는데, 이것은 특성이 상이한 입자가 공존하고 있음을 보여주는 것이다. 이러한 결과는 Fig. 1에 나타난 SEM 분석결과와도 일치하였다. 일본 Hosokawa Micron Ltd사 공기 분급기를 사용하여 SiC함량을 75%와 95%로 조절한 시료의 SEM 및 입도분포 분석결과를 Fig. 3과 Fig. 4에 나타내었다. SEM 및 입도분석결과, SiC 95% 시료의 경우에는 SiC 75% 시료와 비교하여 $1\mu m$ 크기 이하의 미립입자가 크게 감소하여 공기분급을 통한 미세입자 제거가 SiC 함량 제어에 효과가 있음을 확인할 수 있었다.

3.2. 점토와 수산화알루미늄 배합에 따른 소결특성

Fig. 5는 열처리 온도 및 점토에 대한 수산화알루미늄 첨가량의 비율 변화에 따른 XRD 분석결과다. 열처리온도는 점토와 알루미나 혼합물에 대한 기존의 연구

Fig. 3. SEM image of Si/SiC mixture after air separation.

Fig. 4. Particle size distribution of Si/SiC mixture after air separation.

Fig. 5. XRD data of sintered clay with aluminium hydroxide additions at (a) 1350°C, (b) 1400°C.

결과¹⁶⁾ 및 온도변화(1300°C ~ 1500°C)에 따른 사전실험 결과를 토대로 하여 본 실험에서는 1350°C와 1400°C로 고정하여 소경특성 변화를 살펴보았다. 점토에 대한 수산화알루미늄의 비율은 5:1, 5:2, 5:3, 5:4, 5:5로 변화하여 실험하였다. 열처리 온도를 1350°C로 하였

을 경우에는 수산화알루미늄의 함량을 5:2(40%)까지 증가시켜도 β -Cristobalite(SiO₂) 광물 peak가 존재하였다. 하지만 열처리 온도를 1400°C로 증가하여 열처리할 경우에는 점토에 대한 수산화알루미늄의 함량을 5:1(20%)만 첨가하여도 β -Cristobalite 광물 peak가 없어져

Fig. 6. SEM image of sintered clay with aluminium hydroxide additions at 1400°C.((a) Clay : Aluminium hydroxide (5 : 1), (b) Clay : Aluminium hydroxide (5 : 3), (c) Clay : Aluminium hydroxide (5 : 5)).

Table 1. Composition variations of Si/SiC mixture with additive for sintering experimental (g)

No.	Si/SiC mixture (SiC 75%)	Si/SiC mixture (SiC 95%)	Clay	Carbon Black	Al(OH) ₃
1	80	-	15	5	-
2	75	-	15	-	13
3	75	-	15	5	6.5
4	-	75	15	-	13

서 열처리온도 증가가 β -Cristobalite 광물함량을 최소화 하는데 효과가 있었다. 1350°C에서 소결한 시편의 경우는 점토에 있는 SiO₂ 성분과 첨가된 수산화알루미늄의 Al₂O₃ 성분이 반응하여 mullite(3Al₂O₃·2SiO₂) 상으로 전환되지 못한 것으로 추정된다. 한편 1400°C에서 소결한 시편의 경우는 점토의 SiO₂ 성분과 수산화알루미늄의 Al₂O₃ 성분이 반응하여 mullite상으로 전환되기에 적절한 온도임을 확인할 수 있었다. 이러한 결과는 점토에 알루미늄을 첨가하여 소결특성을 연구한 기존의 연구결과¹⁶⁾와 일치하였다. Fig. 6은 소결온도를 1400°C로 하였을 때 수산화알루미늄 함량 변화에 따른 SEM 분석결과를 나타내었다. SEM 분석결과, 수산화알루미늄의 첨가량이 증가할수록 소결특성이 저하되고 서로 뭉쳐서 덩어리로 존재함을 확인할 수 있었다. 따라서 Si/SiC 혼합물의 첨가제로서 점토와 알루미늄을 첨가제로 사용할 경우에는 β -Cristobalite 광물량을 최소화할 수 있는 적정비율의 알루미늄 source의 첨가와 더불어 알루미늄을 충분히 소결할 수 있는 소결온도 증가 및

소결조제의 첨가가 필요할 것으로 추정되었다.

3.3. Si/SiC 혼합물의 소결특성

태양광산업에서 발생한 Si/SiC 혼합물의 특성분석 및 점토와 수산화알루미늄의 배합비율에 따른 소결특성 분석결과를 토대로 하여 첨가제 변화에 따른 Si/SiC 혼합물의 소결특성 변화실험을 1400°C에서 실시하였다. 소결실험을 위한 첨가제의 배합비를 Table 1에 나타내었다. Si/SiC 혼합물에서 SiC 함량은 분리정제 공정 및 경제성과 밀접한 연관이 있다. 따라서 Si/SiC 혼합물을 활용하여 소결체를 제조할 때 경제성 및 분리공정을 고려한 적정 SiC 함량을 검토하기 위해서 SiC 함량을 75%와 95%로 변화하여 소결실험을 실시하였다. 1400°C 소결조건에서 첨가제 변화에 따른 Si/SiC 소결체의 XRD 분석결과를 Fig. 7에 나타내었다. Si/SiC 혼합물에서 SiC 함량 및 첨가제에 따른 SiC peak intensity 변화는 크지 않았으며, 본 실험조건에서 β -Cristobalite peak는 관찰되지 않았다. Si/SiC 혼합물의

Fig. 7. XRD data of sintered Si/SiC mixture with various additives.

소결에서도 수산화알루미늄 첨가에 따라서 mullite peak 가 증가하는 것으로 확인되었다. 이것은 첨가된 수산화 알루미늄이 점토에 잔류하고 있던 미 반응 SiO_2 성분과 고온에서 반응하여 mullite를 형성하였기 때문인 것으로 파악되었다. 이 결과는 점토와 수산화알루미늄의 배합 비율 변화에 따른 소결특성 실험결과와도 일치하였다. SiC 함량변화에 따른 mullite peak intensity 변화는 거의 없었다. Si/SiC 혼합물 소결체의 겉보기 밀도변화를 Fig. 8에 나타냈다. Si/SiC 혼합물에서 SiC 함량을 75%와 95%로 변화시킨 조건(No.2, No.4)에서의 겉보기 밀도는 SiC 함량이 75%인 소결조건 (No.6)에서 오히려 크게 나타났다. 이러한 결과로부터 SiC 함량변화가 소결특성에 미치는 영향은 크지 않을 것으로 추정되었다. 겉보기 밀도는 카본블랙을 첨가한 조건(No.1, No.3)에서 상대적으로 높게 나타나 카본블랙의 첨가 소결특성 향상에 영향을 주는 것으로 추정되었다.

Fig. 8. The apparent densities of sintered Si/SiC mixture with various additives.

4. 결 론

태양광 산업에서 발생하는 Si/SiC 혼합물을 소결체 원료로 활용하기 위해서 SiC 함량과 첨가제 변화에 따른 소결특성 영향을 검토하였다. SiC 함량 변화에 따른 시료를 분석한 결과, SiC 95% 시료의 경우에는 원 시료 및 SiC 75% 시료와 비교하여 1 μm 크기 이하의 미립입자가 크게 감소하여 공기분급을 통한 미세입자 제거가 SiC 함량 제어에 효과가 있음을 확인할 수 있었다. 점토와 수산화알루미늄 배합실험에서 수산화알루미늄 첨가와 열처리온도의 증가가 β -Cristobalite 감소와 mullite 생성량 증가에 효과가 있음을 알 수 있었다. 하지만 수산화알루미늄을 첨가할수록 소결특성이 저하되기 때문에 점토와 알루미늄의 적정 배합비 선정 및 알루미늄을 충분히 소결할 수 있는 소결온도 증가 및 소결조제의 첨가가 필요할 것으로 예상된다. Si/SiC 혼합물의 소결실험에서 SiC 함량변화가 소결체 특성에 미치는 영향은 크지 않았다. 카본블랙을 첨가함에 따라서 Si/SiC 소결체의 겔보기밀도가 높게 나타나 카본블랙의 첨가가 소결체의 소결특성 향상에 영향을 주는 것을 확인하였다.

감사의 글

이 논문은 지식경제부의 글로벌 전문기술개발사업 (No. 10039723), 산업원천기술개발사업 (No. 10038591) 및 교육과학기술부의 융합파이오니아 사업(No. 2011-0001382)에 의하여 지원되었으며, 이에 감사드립니다.

참고 문헌

1. W. Koch, A. L. Endros, D. Franke, C. Haeßler, J. P. Kalejs, H. J. Moeller, 2003 : Bulk crystal growth and wafering for PV Handbook of Photovoltaic Science and Engineering ; J. Wiley.
2. Arjan Ciftja, Thorvald Abel Engh and Merete Tangstad, 2008 : Refining and Recycling of Silicon: A review. Norwegian university of science and technology.
3. Vasilis Fthenakis et al, 2011 : Life Cycle Inventories and Life Cycle Assessments of Photovoltaic Systems, International Energy Agency(IEA) PVPS Task 12, Report T12-02:2011.
4. V. M. Fthenakis, P. D Moskowitz, 2000 : Photovoltaics: Environmental, Health and Safety Issues and Perspectives, Prog. Photovolt. Res. Vol.8, pp. 27-28.
5. T.Y. Wang et al, 2008 : A novel approach for recycling of kerf loss silicon from cutting slurry waste for solar cell applications, Journal of Crystal Growth, Vol.310, pp. 3403-3406.
6. T.Y. Wang et al, 2009 : Recovery of silicon from kerf loss slurry waste for photovoltaic applications, Vol.17, Issue 3, pp 155-163.
7. I. Lombardi et al, 2009 : High Yield Recycling Process of Silicon Kerf from Diamond Wire Wafering, 24th European Photovoltaic Solar Energy Conference, pp. 21-25 September 2009, Hamburg, Germany.
8. Woo Teck Kwon, Soo Ryong Kim, Younghee Kim, Yoon Joo Lee, JiYeon Won, Won-Kyu PARK, Sea Cheon Oh, 2012 : Effect of temperature and carbon contents on the synthesis of β -SiC from silicon sludge by direct carbonization method, Materials Science Forum, Vol.724, pp. 45-48.
9. Woo Teck Kwon, Soo Ryong Kim, Younghee Kim, Yoon Joo Lee, Eunjin Jung, Won-Kyu PARK, Sea Cheon Oh, 2012 : A Study on the Synthesis of SiC Powder from the Silicon Sludge of the Photovoltaic Industry, Materials Science Forum, Vol.724, pp. 49-52.
10. Eun Jin Jung, Younghee Kim, Yoon Joo Lee, Soo Ryong Kim, Woo Teck Kwon, 2010 : A Study on the Preparation of SiC Nano powder from the Si Waste of Solar Cell Industry, J. of Korean Inst. of Resources Recycling, Vol.19(5), pp. 44-49.
11. T. Kuniaki, O. Toyoko, K. Hideaki, I. Yoshiaki, Recycling of sludge containing silicon and reclaimed product thereby Patent number : JP9175851.
12. Wu YF, Chen YM, 2009 : Separation of silicon and silicon carbide using an electrical field, Separation and Purification Technology, Vol.68(1), pp. 70-74.
13. Z.H. Huang, D.C.Jia, Y.Zhou, Y.G.Liu, 2003 : A new sintering additive for silicon carbide ceramic, Ceramic International, Vol.29, pp. 13-17.
14. S. Prochazka, 1975 : The role of boron and carbon in the sintering of silicon carbide, in: P. Popper(Ed.), Special Ceramics, Vol.6 pp. 171-181.
15. Necat Altinkok, Adem Demir, Ibrahim Ozsert, 2003 : Processing of $\text{Al}_2\text{O}_3/\text{SiC}$ ceramic cake performs and their liquid Al metal infiltration, COMPOSITES, Part A 34, pp. 577-582.
16. V. Viswabaskaran, F.D. Gnanam, M. Balasubramanian 2003 : Mullitisation behaviour of calcined clay-alumina mixtures, Ceramics International, Vol.29 pp. 561-571.

權 禹 澤

- 이주대학교 화학공학과 학사
- 한양대학교 화학공학과 석사, 박사
- 쌍용연구소 책임연구원
- Oak Ridge National Laboratory 방문연구원
- 현재 한국세라믹기술원 수석연구원

金 壽 龍

- 한양대학교 요업공학과 학사
- 서울대학교 무기재료공학과 석사, 박사
- 쌍용연구소 에너지환경실장
- 현재 한국세라믹기술원 수석연구원

金 令 姬

- 고려대학교 화학과 학사, 석사
- Polytechnic University of New York 박사
- 현재 한국세라믹기술원 수석연구원

李 玟 周

- 덕성여자대학교 화학과 학사
- 연세대학교 화학과 석사
- 현재 한국세라믹기술원 학생연구원

金 鍾 日

- 인하대학교 신소재공학과 학사
- 연세대학교 신소재공학과 석사
- 현재 한국세라믹기술원 연구원

李 賢 宰

- 한양대학교 화학공학과 학사, 석사
- 쌍용연구소 선임연구원
- 현재 (주)엔바이온 대표이사

吳 世 千

- 한양대학교 화학공학과 (학사, 석사, 박사)
- 천안공업대학 환경공학과 교수
- 현재 공주대학교 환경공학과 교수