



초고순도 탄화규소 분말 기술동향

글 _ 김병숙*, 신동근**

*엘지이노텍(주)

**한국세라믹기술원

1. 서론

탄화규소 (SiC)가 발견된 것은 1824년이지만 첨단소재로 주목받기까지 무려 160년 이상이 걸렸고, 그만큼 탄화규소는 일반인에게도 널리 알려져 있는 흔한 세라믹 소재라고 할 수 있다.¹⁾ 주요 용도로는 소위 “사포 (emery paper)”에 쓰이는 연마재 (abrasive)와 히터의 발열체 또는 내화재 등으로 전통 산업의 많은 부분에 사용되고 있다. 최근 탄화규소가 가지고 있는 탁월한 고온안정성과 내화학 특성, 전기적 특성으로 인해 차세대 산업에서는 없어서는 안 될 중요한 소재로 진화하고 있다.

첨단 세라믹소재로서의 탄화규소는 크게 (1)형상 및 구조제어 기술과 (2)초고순도화 기술 두 가지 관점에서 접근을 하고 있다 (Fig. 1). 섬유상이나 다공체 또는 코팅 등 탄화규소의 형상 및 미세구조를 다양하게 제어함으로써 초고온용 섬유강화복합소재 (SiC_f/SiC composites)나 다공성 단열소재 또는 극한 환경용 내식/내화학 소재로 사용할 수 있다.^{2,5)} 특히 SiC_f/SiC 복합체는 고온고강도 및 고내열 특성을 겸비한 경량 소재로 알려져 있으며 기존의 고온용 금속소재의 문제점을 극복할 수 있는 신소재로 항공우주용 내열소재, 고성능 브레이크디스크 (brake disc), 핵융합 발전용 Blanket 구조재, GFR 및 VHTR 소재 등 다양한 극한 환경 분야의 응용 연구가 활발히 진행되고 있다.^{2,6)} 반도체용 세라믹 소재 측면에서 탄화규소의 순도는 기계적 특성 이상으로 중요한 특성지표로 반도체 공정의 고온치구 (susceptor, heater, ring, boat

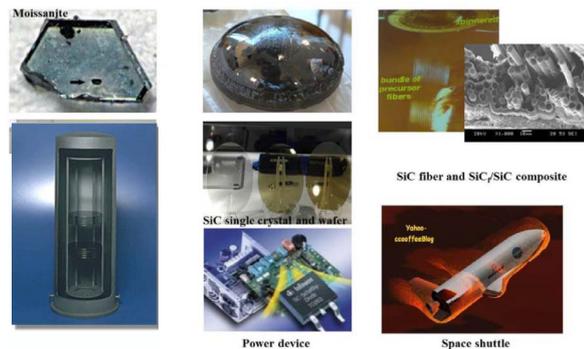


Fig. 1. Advanced silicon carbide materials and its applications from semiconductor to aerospace industry.

등)를 포함한 고온 안정성 및 고성능이 요구되는 자동차/철도/항공기 등에 쓰이는 고전력 반도체의 기판소재 또는 높은 Electron drift velocity가 요구되는 휴대폰 소자, LED나 레이저용 기판소재로 큰 관심을 받고 있다.^{7,10)}

반도체 산업의 고도화에 따른 고집적화 및 기판 대규격화 (2021년 실리콘 기판 650 mm 예상) 기술개발이 가속화되고 있는 상황에서 반도체 공정 (기판의 산화, 확산 및 에칭 등)에 사용되는 부품/치구에 대한 요구사항도 점차 높아지고 있다. 주요 요구사항으로 반도체용 기판, 부품/치구의 초고순도화이다.^{7,10)} 반도체 기판에서 밴드갭의 도너 또는 억셉터 역할을 하는 금속 불순물들은 원치 않는 오염에 의해 기판의 도너/억셉터 농도 제어가 어려워지거나 또는 2차, 3차의 도너/억셉터 레벨을 형성하여 반도체 특성을 저하시키는 원인으로 작용하게 된다.^{11,12)} 최근, 반도체 공정소재 또는 기판소재로 고온내식성, 내산화성 등 고온물성이 우수한 탄화규소의 적용이 두드러



진 현상으로 나타나고 있는데, 이로 인해 탄화규소 소재의 초고순도화에 대한 산학연의 관심이 매우 높다.

초고순도 탄화규소 소재의 개발을 위해서 소재개발 공정에서 거쳐 불순물 제어와 고순도가 이루어져야 하는데, 특히 원재료에서의 불순물 제어는 매우 중요하다. 우리나라에서는 WPM 사업의 일환으로 초고순도 탄화규소 소재 개발이 진행되고 있으며 올해 2단계에 접어드는 상황에 있다.¹³⁾ 이와 더불어 많은 국내 기업들이 관심을 갖고 투자 및 연구개발을 검토 또는 진행하고 있다. WPM 초고순도 탄화규소 소재 사업단은 7N급의 초고순도 탄화규소를 원료부터 소결체, 단결정, 에피박막에 이르기까지 초고순도 탄화규소 소재 전반에 걸쳐 개발하고 있으며 1단계 총 770억 원의 사업비를 투입하여 세계적 수준의 기술을 확보하였다. 특히, 6N급 초고순도 탄화규소 분말기술 개발은 반도체 기술을 한 단계 업그레이드 할 수 있는 계기를 마련했다고 평가받고 있다 (Fig. 2). 이러한 시점에서 초고순도 탄화규소 분말기술 개발 현황을 정리하고 앞으로의 방향을 논하는 것이 큰 의미가 있다고 생각된다. 그간 고품질 탄화규소 소재기술 개발 현황에 대한 리뷰 또는 보고가 많이 이루어져왔기 때문에 독자들은 전반적인 탄화규소 기술개발에 대해 익히 알고 있을 것이다. 본고에서는 최근 WPM 사업을 중심으로 진행되고 있는 국내 초고순도 탄화규소 분말기술의 개발 현황과 최근 나타난 시장의 변화에 대해 알아보고 향후 초고순도 탄화규소 분말의 개발방향에 대해 논하고자 한다.



(a) Ultra-high purity SiC powder (b) 4H/6H SiC single crystal ingot

Fig. 2. Ultra-high purity SiC powder and 4H/6H single crystal developed in WPM project.

2. 본론

2.1. 초고순도 탄화규소 분말 제조 기술 현황

초고순도 탄화규소 분말에 있어서 주요 불순물로 Al, B, Fe, Ti, V 등 반도체 공정 또는 전력반도체용 기판의 특성에 영향을 미치는 금속불순물을 들 수가 있다. 일부는 공정 중 쉽게 제거되거나 관리될 수 있는 원소도 있지만 대부분의 원소가 탄화규소 내에서 쉽게 제거되지 않는다. 특히 Al과 B의 경우 반도체 기판에서 억셉터 레벨을 형성하는 원소로 대표적인 p-type의 도핑원소이기 때문에 기판의 전기적 특성에 중요한 영향을 미친다.^{11,12,14)} 단결정 성장 원료로 쓰이는 탄화규소 분말의 경우 단결정 내에 존재하는 불순물의 함량이 탄화규소 분말의 불순물 함량에 비례하여 떨어지기 때문에 단결정 기판의 품질이 탄화규소 분말의 순도에 직결되어 있음을 알 수 있다 (Fig. 3).¹⁷⁾ 금속불순물 이외에도 잔류 실리콘 및 탄소 역시 단결정 기판 내 인클루전 (inclusion) 등의 디펙트 (defect)를 형성하는 원인으로 작용하기 때문에 제어해야 할 주요 항목이라 할 수 있다.¹⁸⁾ 탄화규소 분말합성에 있어서 불순물의 주요 오염원은 출발원료와 도가니, 합성 공정 부재 (그라파이트 부재) 등 다양하며 몇몇 불순원소들은 고온에서도 매우 안정하기 때문에 한번 오염이 되면 쉽게 제거되기 어렵다.

탄화규소 분말의 제조방법은 출발원료의 종류에 따라 구분될 수 있는데, 이는 출발원료의 특성이 제조된 탄화규소 분말의 특성에 큰 영향을 미치기 때문이다 (Table 1). 현재 국내에서는 초고순도 탄화규소 분말을 제조하기 위

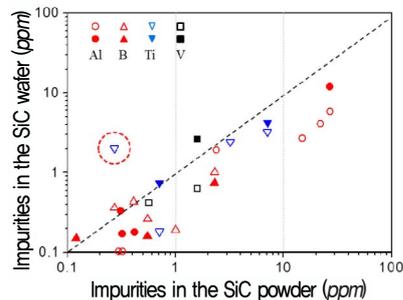


Fig. 3. Comparison of the major impurity contents between SiC powder and single crystal wafer.



Table 1. Classification of the Synthetic method for ultra-high purity SiC powder with raw materials including carbon and silicon

합성법	규소원	탄소원	(국내/해외)
Carbothermal reduction	Fumed silica	Carbon black	엘지이노텍
			Carborundum
Modified carbothermal reduction	TEOS	Phenolic resin	KICET, KIST
			Bridgestone
Direct reaction	Silicon	Carbon black	KICET
			Kyocera
Thermal decomposition	Preceramic polymer		Shin-Etsu

해 다양한 방법들이 시도가 되고 있는데, 크게 fumed silica와 carbon black을 출발원료로 사용하는 Carbothermal reduction 방법과 TEOS (tetraethylorthosilicate) 및 phenolic resin을 원료로 하는 Modified carbothermal reduction 방법, 그리고 silicon metal과 carbon black (또는 phenolic resin)의 직접반응 (Direct reaction) 방법이 주로 적용되고 있다.

2.1.1 초고순도 탄화규소 분말의 출발원료

대표적 고상 출발원료인 fumed silica는 SiCl_4 와 같은 고순도의 기상 규소원을 1000°C 이상의 고온 화염에서 산화하여 얻어지며 입도가 50 nm 정도의 비정질상 나노 분말이다. 현 수준 연속/대량생산이 가능하며 등급별로 산업 전반에 적용되고 있기 때문에 가격이 싸고 상대적으로 고순도를 얻을 수 있다. 현재 산업에서 고순도의 needs가 있어서 해외 기업을 필두로 하여 5N 이상의 고순도 제품을 생산하고 있다. 대표적인 해외기업은 독일의 에보닉 (Evonik)과 미국의 캐봇 (Cabot)이 대표적이며 이외에도 바커케미칼 (Wacker-Chemical), 도쿠야마 (Tokuyama) 등이 생산하는 것으로 알려져 있다. 국내에서는 OCI에서 fumed silica를 생산하고 있지만 아직 고순도 제품을 양산하지 않고 있다. Carbon black은 코크스 건류과정의 부산물인 탄화수소 (hydrocarbon)를 열분해하여 제조하고 있으며 제조공정에 따라 제품의 물성에 차이가 있다. Carbon black은 자동차 타이어 및 각종 고무제품의 충전제로 주로 사용되고 있으며 fumed silica와 달리 기존 시장에서 초고순도에 대한 필요성이 대두되지

못하고 있는 상황이었다. 한국의 코리아카본블랙(주) OCI 등에서 저순도의 나노 분말을 생산하고 있으며, 해외에는 캐봇, 에보닉, 덴카블랙 (Denka Black), 쇼와전공 (Showa Elec. Corp.) 등에서 생산하고 있는 상황이다. 일부 전자, 전지 분야에 사용되는 제품에 대하여 순도를 요구하는 시장이 있지만 이 역시 4N 이하의 수준으로 형성되고 있다. 이들을 초고순도 원료로 적용하기 위해서는 고순화 방법의 개선 또는 신규개발이 필요하다. 이와 관련하여 한국세라믹기술원 황광택 박사팀에서는 도데칸 (dodecane) 등의 탄화수소 화합물을 RF 열플라즈마에서 열분해하여 초고순도 탄소 나노분말을 합성하는 연구를 진행하고 있다 (Fig. 4).

액상 출발원료 중 TEOS는 SiCl_4 의 알코올 분해반응 (Alcoholysis reaction)으로 합성할 수 있는데, 주로 실리콘 고분자 가교제를 포함해 각종 반응의 규소원으로 널리 사용되고 있으며 중국산 제품의 경우 저가의 제품을 손쉽게 얻을 수 있다. 그러나 이러한 상용 TEOS의 경우 순도 3N급에도 미치지 못하는 저급제품으로 이의 초고순도 정제기술이 중요하다. WPM 참여기업인 석경에이티(주)에서는 고온 정제방법을 이용해 7N급의 초고순도

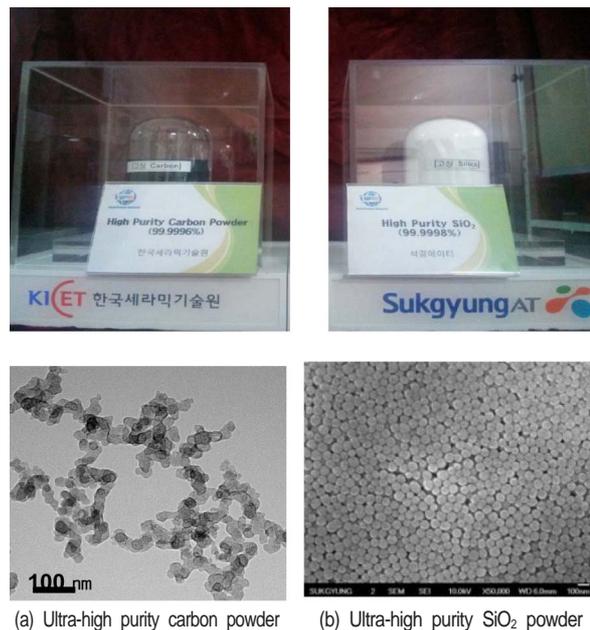


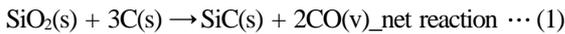
Fig. 4. Raw materials for ultra-high purity SiC powder.



TEOS 제조 기술을 개발하고 있으며 현재 6N급 이상의 초고순도 TEOS 양산이 가능한 단계에 접어들었다. 아울러 TEOS와 같은 실리콘 알콕사이드의 가수분해 및 축중합 반응을 통해 초고순도 silica 분말도 합성할 수 있는데, 초고순도 TEOS를 출발원료로 사용하고 연속합성공정을 적용하여 현재 6N에 가까운 silica 분말 제조가 가능하고 더불어 단분산성 및 입자 균일성을 확보한 상태이다 (Fig. 4). Phenolic resin은 phenol과 formaldehyde의 축합반응을 통해 합성하는 대표적인 합성고분자로 전자산업을 포함해 항공우주산업에도 중요하게 쓰이고 있다. 최근 중국 업체와의 가격 경쟁 등으로 인해 국내 많은 회사들이 사업에서 철수하고 있는 상황에 있으나, 강남화성, 코오롱 인더스트리, 태양합성 등이 여전히 국내에서 생산기반을 확보하고 있는 상태이다. 이들은 다양한 점도/고형분의 제품을 생산하고 있으며 반도체 산업의 요구에 따라 고순도 원료를 이용하여 합성, 현재 5N급 이상의 고순도 제품을 양산하고 있다.

2.1.2 초고순도 탄화규소 분말 합성기술

Carbothermal reduction은 고순도의 fumed silica와 carbon 원료를 균일혼합 후 열처리하여 얻어지게 되며 기본 반응은 식 (1)과 같다 (Fig. 5).



이 공정을 이용해 초고순도 탄화규소 분말을 얻기 위해서는 고순도의 원료선정과 더불어 원료의 균일 혼합 및 최적 열처리공정 제어가 매우 중요하다. 특히, 혼합공정의 경우 원료의 혼합이 균일하지 않으면 열처리 중 탄화규소의 불균질 합성으로 인한 잔류 실리콘 및 잔류 탄소가 발생하게 되고 또한 탄화규소 분말의 입도 불균일도 초래하게 된다. 아울러 초기 원료의 혼합비율 (R, C/SiO₂ molar ratio)에 따라서 탄화규소 분말 내 잔류 원소 뿐만 아니라 입도 및 그 분포에도 영향이 있는데, 최적 혼합비율 (R)은 2 정도로 알려져 있으며 주어진 혼합



Fig. 5. Process map of the carbothermal reduction for ultra-high purity SiC powder.

비율의 원료가 균일하게 혼합될 경우 고품질의 탄화규소 분말이 안정하게 얻어질 수 있다. 엘지이노텍에서는 Carbothermal reduction 공정을 적용하여 5N급의 고순도 탄화규소 분말 양산기술을 확보하였으며 최근 석경에 이티(주)와의 협력을 통해 금속 불순물 기준 6N급의 초고순도 탄화규소 분말제조에 성공하였다. 제조된 초고순도 탄화규소 분말을 이용하여 각각 반도체 치구용 소결 및 단결정 성장 특성을 평가하였다. Hot press 소결의 경우 미립 (1 µm급)의 초고순도 탄화규소 분말을 사용하였을 때 순도가 5N급 이상인 고밀도 (3.05 g/cm³)의 LED 공정 Susceptor용 탄화규소 소결체를 제작할 수 있었다. 또한, 엘지이노텍에서는 한국세라믹기술원에서 개발 중인 “플라즈마열분해법을 이용한 초고순도 탄소분말 제조 기술”을 적용하여 7N급의 초고순도 탄화규소 분말을 제조하기 위한 연구를 진행하고 있다.

Modified carbothermal reduction은 초고순도 탄화규소의 원료로 액상의 TEOS와 phenolic resin을 사용함으로써 기존의 고상합성법인 carbothermal reduction에 비해 고순도 출발원료의 확보가 용이하며, 원료의 균일한 혼합공정 및 추가 열처리 공정기술을 통한 탄화규소분말의 고순도화, 조립화를 확보할 수 있다. 특히, 원료로 사용되는 TEOS의 경우 현 수준으로도 6N급 이상의 초고순도화가 가능하기 때문에 (WPM 3차년 결과보고) 세계 최고수준의 초고순도 탄화규소 분말을 제조하기에 적합한 방법이다. 현재 한국과학기술연구원 박상환 박사팀에서 7N급 초고순도 탄화규소 분말제조기술 확보를 목표로 연구를 진행하고 있다. 이들은 다양한 액상의 출발원료를 적용하여 hybrid precursor를 합성하고 이를 적정한 고온 조건에서 합성하여 β상의 초고순도 탄화규소 분말을 제조하였는데, 본 공정의 장점은 순도제어의 용이성



과 함께 평균입도 70 μm 이상의 조립의 β상 탄화규소 분말을 얻을 수 있어 고품질 단결정 성장에 적합하다 (Fig. 6). 현재, 국내 단결정 개발업체인 포스코 등에서 이의 적용을 검토 중인 것으로 알려져 있다. 한국세라믹기술원 김영희 박사팀에서는 TEOS 및 novolac resin을 이용하여 precursor를 만든 후 이를 고온열분해하는 방법과 저급 탄화규소 분말의 고온 정제 방법 등을 적용하여 5N5 급의 초고순도 β상 탄화규소 분말을 합성하였고 러시아 단결정 제조사인 Nitride Crystal Group과 국제공동 연구를 통해 초고순도 탄화규소 분말을 이용한 단결정 성장 특성을 평가하였다 (Fig. 7).¹⁹⁾ 이들의 연구 결과, 탄화규소 분말의 순도가 향상됨에 따라 4H 탄화규소 단결정 내 micropipe 밀도와 전위밀도가 각각 3.9cm⁻² 및 5E4cm⁻²으로 저순도 분말 대비 크게 감소하였다. 아울러, 단결정 성장에 대한 공정 재현성이 향상되고 단결정 품질과 더불어 성장 수율도 크게 향상됨을 확인하였다. 반도체 산

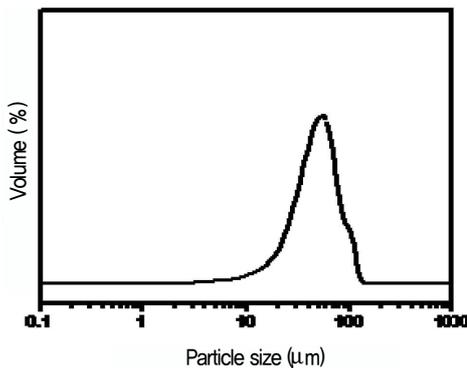
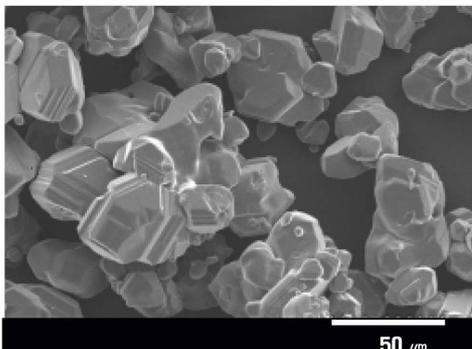


Fig. 6. FE-SEM image of ultra-high purity SiC powder from modified carbothermal reduction (β-phase and particle size over 70 μm).

Impurities in the SiC powder (ppm)

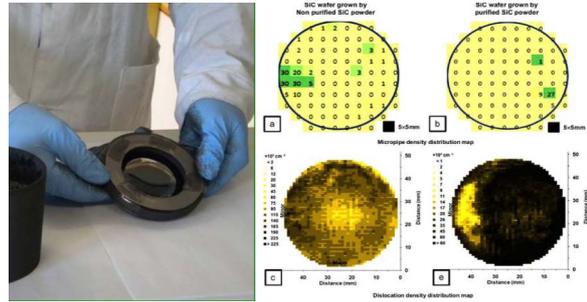
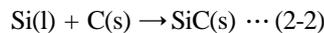
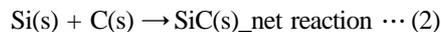


Fig. 7. Comparison of themicropipe and dislocation density distribution map between 4H SiC wafers grown by (a,c) non-purified and (b,d) purified SiC powder.

업의 주요 폐기물 중 큰 비중을 차지하고 있는 실리콘 슬러지 재활용의 일환으로 태양전지산업으로부터 배출되는 폐실리콘 슬러지를 원료로 하여 이를 직접 반응시켜 탄화규소 분말을 제조하는 연구가 이루어지고 있는데, 원료인 폐실리콘을 분쇄하여 미립화한 후 이를 다시 carbon black과 반응시킨다. 이때 초기에 폐실리콘의 고순화를 통해 고순도 탄화규소 분말의 경제적 생산이 가능하고 폐실리콘의 재활용 측면에서 환경친화적이라는 장점을 가지고 있다.^{20,21)} 본 공정의 기본 반응은 식 (2)와 같이 실리콘의 용점인 1400~1500°C 범위에서 실리콘과 탄소 가 직접 반응하여 탄화규소 분말을 합성하게 되는데, 이 공정은 균일반응을 유도하기 어렵기 때문에 통상 합성 후 미반응 실리콘이 탄화규소 분말 내에 잔류하게 된다. 이 때문에 화학양론반응 제어공정과 원료의 고순화 공정에 대한 연구가 추가적으로 진행되고 있다.



프리세라믹 폴리머의 열분해를 이용한 고순도 탄화규소 분말합성법은 폴리카보실란과 같은 유기규소화합물을 원료로 하여 저온 열분해반응을 통해 고순도 탄화규소 분말을 합성하는 기술로, 이 방법은 탄소 및 규소원이 폴리머의 주쇄구조에 함께 존재하기 때문에 다른 방법에 비해 혼합 등의 공정이 필요 없다. 반면, 출발물질인 폴리디메틸실란의 합성단계에서 부산물로 발생하는 NaCl이



최종 제품까지 그대로 남아 순도저하의 원인이 될 수 있다. 국내에서는 한국세라믹기술원에서 탄화규소 섬유제조를 목적으로 합성한 폴리카보실란을 이용하여 탄화규소 분말을 제조한 바 있으나 추가적인 연구는 진행되지 않았다.²²⁾

또 다른 연구로 초고순도 원료의 확보 및 혼합 균일성 확보, 그리고 양산성 측면에서 복합공정기술에 대한 시도가 함께 이루어지고 있다. 예를 들어, fumed silica와 같은 고상분말과 phenolic resin 같은 액상원료를 함께 적용하거나 TEOS와 carbon black을 적용하는 원료 복합화 공정도 함께 시도되고 있다.

2.1.3. 초고순도 탄화규소 분말기술 해외동향

해외의 탄화규소 분말 업체들도 최근 독자적으로 고순도화 기술 개발을 진행하고 있는 것으로 알려져 있다. SiC 분말의 고순화는 전통적으로 에치슨 (Acheson) 분말의 산처리법을 통한 기술 개발이 진행되었으며, 대표적으로 Lutch ceramic사에서 상용화한 방법인 고온에서 HCl 가스를 사용하는 공법과 Toshiba ceramics사에서 개발한 Halogen 가스를 사용하여 고온 정제하는 공법이 있다. 그리고 일본의 태평양런덤사 (Pacific Rundum)를 필두로 저온에서 산용액과 반응시켜 불순물을 용출시키고 순수(purified water)로 세정하는 방법으로 기술 개발하는 그룹이 있다. 그러나, 이와 같은 후처리 공정은 분말의 표면 불순물만 제거하고 내부에 존재하는 불순물은 그대로 남아 있기 때문에 초고순도 탄화규소 분말제조에는 적합하지 않다하여 일각에서는 고순도 원재료를 이용한 분말의 합성을 통하여 초고순도 분말 개발을 진행하고자 각고의 노력을 하고 있다. 브릿지스톤사 (Bridgestone)는 에틸실리케이트 (ethylsilicate)와 같은 알콕사이드 (alkoxide)와 Phenolic resin을 이용하여 6N급의 고순도 탄화규소 분말을 합성, 단결정 및 반도체 부품용 소결체 제조에 적용하고 있음은 국내에 많이 알려진 사항이다.^{7,10,23)} 최근 이집제도 탄화규소 단결정 개발은 종료하였으나 고순도 고품질의 반도체 부품사업에 그 역량을 집중하고 있다. 이외에도 일본의 태평양런덤 (Pacific Rundum)은 Gas 상의 원재료를 이용하여 CVD 공정으로 6N급의 초고순

도 탄화규소 분말을 개발한 것으로 알려져 있으나, 대량 양산체제로 진입하지는 못하고 있는 상황이다. 최근에는 일본의 야쿠시마덴코 (Yakusima Denko)가 AIST (National Institute of Advanced Industrial Science and Technology)와 공동개발을 통하여 단결정용 초고순도 분말을 개발하였다고 알려져 있으며, 이외에 다양한 업체에서 초고순도 분말의 기술 개발과 이를 통한 사업 확장을 위해 지속적으로 노력하고 있는 상황이다.

2.2. 초고순도 탄화규소 분말 산업 및 시장 최근 동향

전 세계 탄화규소 시장은 제조공정 또는 제조사, 적용 산업군 등 다양한 분류로 검토될 수 있는데, 그 중 최종 적용산업군별로 분류하면 크게 철강분야, 자동차, 우주항공, 방위산업, 전자/반도체 산업 그리고 기타 산업으로 나눌 수 있으며 주로 철강 및 전자/반도체 산업이 가장 큰 비중을 차지하고 있다.²⁴⁾ 초고순도 탄화규소의 경우 주로 전자/반도체 산업에서 쓰이고 있으며 그 시장은 현재까지는 좀 더 특화되어 있고 소량의 고가에 판매되고 있는 상황이다. 탄화규소의 세계 시장규모는 지속적으로 상승하는 추세를 보이고 있는데, 2008년 현재 8,514억 원에서 연평균성장률 (CAGR) 8% 증가, 2019년에는 2조 원에 육박할 것으로 전망하였으나, 최근 신규 시장 확대를 예상하여 연평균성장률 15% 이상을 전망하고 있으며 이 경우 2019년 전체 4조원 이상의 탄화규소 시장이

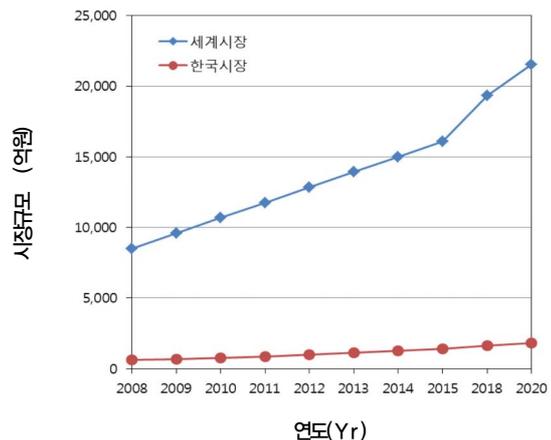


Fig. 8. 연도별 탄화규소 분말 시장규모 및 전망 (산업동향리포트, 2012년 5호).



예상된다 (Fig. 8).^{24,25)} 전체 탄화규소 시장 중 초고순도 탄화규소 분말의 경우 주로 전자/반도체 산업에 쓰이고 있으나, 대부분의 국가에서 초고순도 탄화규소 분말은 국가전략소재로 수출 규제 품목으로 지정되어 있다. 따라서, 초고순도 탄화규소 분말의 독립적인 유통경로가 명확하지 않은 상황이라 시장 예측은 쉽지 않지만 LED 용 및 EV/HEV 등 자동차용 시장을 포함한 초고순도의 고품질 탄화규소 소재가 사용되는 신규시장이 활성화 될 것이 기대됨에 따라 향후 수요시장의 성장률을 감안하여 급성장할 것으로 전망된다.^{24,26)}

일본의 탄화규소 원료시장을 보면 대부분 소결체용으로 야쿠시마덴코, 태평양런덤 (α -type), 그리고 이비텐, 스미토모오사카시멘트 (β -type)에서 생산되고 있다. 초고순도 탄화규소 원료시장은 반도체용 및 단결정용으로 야쿠시마덴코, 태평양런덤, 브릿지스톤, 신일본제철 (쇼와덴코) 등에서 고가의 제품으로 소량 판매하거나 전략적 내재화를 진행하였다 (Table 2).²⁷⁾ 반면, 후발주자로

개발에 빠르게 참여하고 있는 아시아 경쟁국들은 여전히 초고순도 탄화규소 분말에 대한 관심도가 높기 때문에 초고순도 탄화규소 분말의 시장 매력도는 매우 높다고 할 수 있다.^{24,27)}

국내는 현재까지 생고방 (Saint-Gobain) 분말을 많이 수입하여 산업 전반에서 사용 중에 있으며 최근 초고순도 탄화규소 소재에 대한 국내 관심도가 높아지고 기업들의 단결정 개발과 잠재적 시장의 확대가 예상됨에 따라 해외 초고순도 분말기업들의 국내 시장에 대한 관심도가 높아지고 있는 상황이다.

3. 결론

탄화규소가 첨단소재로 주목받기까지 걸린 시간만큼 첨단소재로서 제 몫을 하고 그 가치를 평가받기 위해 더 많은 노력이 필요할 것이다. 더욱이 미래 반도체 산업을 한 단계 높이기 위해서 초고순도 탄화규소 소재는 전 공정에서의 불순물 제어와 초고순도화 기술의 확보가 중요하다. 그 첫 단추인 초고순도 탄화규소 원료 및 분말 기술은 현 단계에서 6N 수준의 초고순도화 기술인프라를 구축했다고 평가할 수 있다. 이러한 노력이 기술 개발에 그치지 않고 지속적으로 기술경쟁력을 향상시키고 차별화된 공정기술 확보와 더불어 개발된 소재에 대한 산업에의 적용성 검증을 통해 사업화 단계에 진입하기 위한 노력이 절실히 필요한 시점에 와 있다. 초고순도 SiC 소재 사업단은 1단계 사업에서 확보한 원천소재 기반기술을 올해부터 진행되는 2단계 사업을 통해 기술 경쟁력을 높인다는 계획이다. 이러한 노력을 통해 소재 상용화에 성공하도록 정부를 포함한 산학연의 적극적인 협력을 이루어야 할 것이다.

감사의 글

본 기술보고서는 산업통상자원부 WPM 사업 (10037908) 과 교육과학기술부 미래융합 파이오니아사업 (NRF-2010-0019468)의 지원으로 이루어졌으며 이에 감사드립니다.

Table 2. 일본의 탄화규소 분말 시장

Grade	구분	주요 메이커
소결체용	α -type	야쿠시마덴코
		쇼와덴코
		태평양런덤
		해외품
		기타
	β -type	이비텐 (내재화)
		토모코우료 (수입)
		기타
초미립자		스미토모오사카시멘트 (내재화) (히타, 정전척, 기타)
고순도원료	α -type	야쿠시마덴코
	β -type	태평양런덤
		해외품
		브릿지스톤 (내재화)
		(더미웨이퍼, MOCVD용, 장치용 부재)
		기타
단결정	α -type	태평양런덤
	β -type	신일본제철 (내재화)
		브릿지스톤 (내재화, 샘플판매)

*자료: 주목되는 SiC 현상과 전망, 2011년 3월 신산업총람



참고문헌

1. S. B. Bayne and B. N. Pushpakaran, "Silicon Carbide Technology Overview," *J. Electr. Eng. Electron. Technol.*, **1** 1-8 (2012).
2. 류도형, 신동근, 조광연, 허승헌, 공은배, "기능성 무기 섬유," 섬유기술과 산업, **11** [4] 242-50 (2007).
3. J.-I. Kim, Y.-J. Lee, S.-R. Kim, Y.-H. Kim, J.-I. Kim, C.-H. Woo, D.-J. Choi, "SiOC Coating on Stainless Steel Using Polyphenylcarbosilane, and Its Anti-corrosion Properties," *J. Kor. Mater. Res.*, **21** [1] 8-14 (2011).
4. T. Ishikawa, "Advances in Inorganic Fibers," *Adv. Polym. Sci.*, **178** 109-44 (2005).
5. 류도형, 신동근, 박은비, 조광연, 허승헌, "항공우주용 SiC 섬유의 개발동향," *Ceramist*, **12** [1] 72-82 (2009).
6. A. Kohyama, 7th IEA workshop on SiC/SiC for Fusion and 1st International Workshop on C & SiC Composites for advanced Fission Plenary Meeting, Sep. 2006.
7. 조경선, 윤성호, 정훈, 채수호, 임광영, 김영옥, 박상환, "반도체 제조공정용 탄화규소 소재 기술," *Ceramist*, **12** [1] 33-48 (2009).
8. R. Madar, E. Pernot, M. Anikin, and M. Pons, "Defects in Sublimation-grown SiC Bulk Crystals," *J. Phys.: Condens. Matter*, **14** [48] 13009-018 (2002).
9. "일본에서의 SiC 파워디바이스 개발과 실용화," 첨단 기술정보분석리포트 (www.reseat.re.kr), 2013.
10. "반도체 제조공정용 탄화규소 부품/소재 기술 분석 보고서 (IOD Report)," 2005.
11. G. Augustine, V. Balakrishna, and C. D. Brandt, "Growth and Characterization of High-purity SiC Single Crystals," *J. Cryst. Growth*, **211** [1-4] 339-42 (2000).
12. E. Schmitt, T. Straubinger, M. Rasp, M. Vogel, A. Wohlfart, "Polytype Stability and Defects in Differently Doped Bulk SiC," *J. Cryst. Growth*, **310** [5] 966-70 (2008).
13. "첨단소재 상용화 동반성장 열매 맺는다," 신소재 경제신문, 2013. 7. 24 기사.
14. St. G. Muller, E. K. Sanchez, D. M. Hansen, R. D. Drachev, G. Chung, B. Thomas, M. J. Loboda, M. Dudley, H. Wang, F. Wub, S. Byrappa, B. Raghathamachar, G. Choi, J. Zhang, "Volume Production of High Quality SiC Substrates and Epitaxial Layers: Defect Trends and Device Applications," *J. Cryst. Growth*, **352** [1] 39-42 (2012).
15. D. Schulz, G. Wagner, J. Dolle, K. Irmscher, T. Muller, H. J. Rost, D. Siche, and J. Wollweber, "Impurity Incorporation During Sublimation Growth of 6H Bulk SiC," *J. Cryst. Growth*, **198-199** 1024-27 (1999).
16. A. Kubiak and J. Rogowski, "Boron and Aluminum Diffusion into 4H-SiC Substrates," *Mater. Sci. Eng. B*, **176** [4] 297-300 (2011).
17. D-G. Shin, H-R. Son, S. Heo, B-S. Kim, J-E. Han, K-S. Min, and D-H. Lee, Proceeding in ICSCRM 2013

18. H. Helava, E. Mokhov, O. Avdeev, M. Ramm, D. Litvin, A. Vasiliev, A. Roenkov, S. Nagalyuk, and Y. Makarov, "Growth of Low-Defect SiC and AlN Crystals in Refractory Metal Crucibles," *Mater. Sci. Forum*, **740-742** 85-90 (2013).
19. J. G. Kim, E. J. Jung, Y. Kim, Y. Makarov, and D. J. Choi, *Ceram. Inter.*
20. 이현재, 권우택, 김영희, 김수룡, 한국 등록특허 10-1257458.
21. E. J. Jang, Y. Kim, Y. J. Lee, S. R. Kim, and W. T. Kwon, "A Study on the Preparation of SiC Nano powder from the Si Waste of Solar Cell Industry," *J. Kor. Inst. Resources Recycling*, **19** [5] 44-49 (2010).
22. 조광연, 신동근, 류도형, 한국 등록특허 10-1269862.
23. 김영희, 김수룡, 권우택, 이윤주, 정은진, " β -SiC 분말 제조 및 이를 이용한 단결정 성장 기술 현황," *Ceramist*, **14** [5] 28-34 (2011).
24. Market Report: Silicon Carbide (Black SiC, Green SiC) Market for Automotive, Aerospace, Military, Electronics, Healthcare, Steel and Energy Applications: Global Industry Analysis, Size, Share, Growth, Trends and Forecast 2013-2019, Transparency Market Research.
25. 산업동향 Report: 탄화규소(SiC) 산업동향, 한국세라믹기술원, 2012년 5호.
26. Market Report: SiC 단결정 기술동향 및 시장전망 (2010~2020), SNE research.
27. Market Report: 주목되는 SiC 현상과 전망, 신산업 총람, 2011.

●● 김병숙



- 2004년 경북대학교 무기재료공학과 학사/석사
- 2004년 엘지미크론 연구소 연구원
- 2009년 엘지이노텍 부품소재 R&D센터 선임 연구원

●● 신동근



- 1998년 한양대학교 금속재료공학과 학사/석사
- 2009년 서울대학교 재료공학부 박사
- 2010년 엘지이노텍 부품소재연구소 책임연구원
- 2013년 한국세라믹기술원 에너지환경소재본부 선임연구원