



## 초고온 세라믹 복합 재료 개발현황

이세훈, 김해두 | 재료연구소

### [ 요약문 ]

최근 산업의 고도화에 따른 부품 소재의 고성능화에 따라 기존의 고온 세라믹의 한계를 극복하기 위한 노력으로 초고온 세라믹 재료에 대한 활발한 연구가 진행되고 있다. 초고온 세라믹은 대부분 붕화물이나 탄화물인 비산화물 세라믹으로 3000도 이상의 녹는점을 갖으며 2000도 부근에서의 사용을 목표로 하고 있다. 이 재료는 다른 세라믹들과 마찬가지로 취성파괴 거동을 나타내며, 이를 보완하기 위한 섬유강화 복합재료화도 활발히 진행되고 있다. 본고에서는 고온용 세라믹 장섬유와 세라믹 복합재료, 그리고 초고온 세라믹의 개발 현황과 산업화 전망을 정리하였다. 또한 초고온 세라믹의 발전 방향을 전망하였으며, 재료연구소에서 수행중인 초고온 세라믹의 연구 활동에 대해 간략히 언급하였다.

## 1. 서론

초고온 세라믹은 기존의 고온용 세라믹스들이 갖는 물성의 한계를 극복하기 위하여 최근 새롭게 연구되고 있는 재료이다. 2004년 미국의 National Science Foundation(NSF)과 Airforce Office of Scientific Research(AFOSR)에서는 초고온 재료의 연구 방향을 정립하기 위한 workshop을 수행하였으며 비산화물계 세라믹인  $ZrB_2$ ,  $ZrC$ ,  $HfB_2$ ,  $HfC$ ,  $HfN$ ,  $SiC$  등과 산화물계 세라믹인  $Y_3Al_5O_{12}$ 을 초고온 세라믹에 포함하였다. 이들 중 비산화물계 세라믹은 저온소결, 공정 개발, 재료 고유의 단점을 개선하기 위한 복합재료 제조 및 섬유강화 복합체 개발에 연구가 집중되고 있다. 특히 최근에는 세라믹의 단점인 낮은 신뢰도를 개선하기 위하여 탄소/ $SiC$  복합체,  $SiC/SiC$  복합체 및 탄소/Boride계 섬유강화 복합재료 개발을 위한 연구가 진행되고 있다.<sup>[1]</sup>

초고온 세라믹은 기존의 고온용 세라믹인 알루미늄, 지르코니아 등의 산화물이나  $Si_3N_4$ 로 대표되는 비산화물계 세라믹이 갖는 사용 가능온도인 1300-1500도의 한계를 뛰어넘어 2000도에 근접하는 온도 영역에서의 사용을 목표로 한다. 이를 위해서 이 재료들의 녹는점들은 대부분 3000도 이상이다. 표 1에 초고온 세라믹의 녹는점을 정리하였다.

초고온 세라믹은 미국, 일본, 프랑스, 러시아 등의 국가연구소 및 관련 업체에서 정부 주도하에 기존의 물성을 뛰어넘는 군사용이나 우주 항공용 첨단소재로의 적용을 위한 연구 개발을 수행하고 있다. 따라서 기초 소재, 설계 및 제조기술이 MTCR(Missile Technology Control Regime) 및 ITAR(International Traffic in Arms Regulations)의 규제 하에 도입이 통제되고 있다.<sup>[2]</sup>

최근 항공우주 분야에서 개발된 초고온 재료 기술이 반도체, 원자력/핵융합 및 고성능 브레이크 등 첨단 민수 산업용으로 확대 적용되고 있으며, 그 차이가 국가간의 기술력 격차에 영향을 미치고 있다. 또한 저공해 에너지 생산 등 그린 산업 분야에서도 관련기술을 응용하려는 노력이 진행되고 있다. 세계의 부품·소재 산업은 국제 경쟁의 격화에 따라 과거 다수 기업에 의한 생산 및 경쟁 체제에서 기술력을 보유한 소수 독점 기업 간의 상호협력체제로 전환되고 있으며, 선도 기업을 중심으로 기술, 생산, 판매 등 전 영역에 걸쳐 국제화가 이루어지고 있다. 소재 산업에서 후발주

자인 우리나라가 국제적인 경쟁력을 갖기 위해서는 새로운 고성능 재료들에 대한 도전적인 연구와 개발이 필요하나, 재료기술의 경우 개발에 장시간, 고비용의 투자가 필요하기 때문에 국내 기업은 기술 개발 투자를 주저하고 있다.

표 1. 초고온 세라믹스의 녹는점<sup>[3]</sup>

재료	녹는점 (°C)
ZrB <sub>2</sub>	3250
ZrC	3540
HfB <sub>2</sub>	3380
HfC	3890
HfN	3305
SiC	2545도 분해
Y <sub>3</sub> Al <sub>5</sub> O <sub>12</sub> (YAG)	1970

선진국에서는 정부 차원의 신소재 사업 지원은 주로 우주항공 분야 및 에너지 분야에 집중되어 있으며, 정보 및 전자산업용은 민간기업 주도로 이루어지고 있다. 특히 차세대 에너지 자원의 확보를 위해서 에너지 관련 소재를 포함한 미래형 에너지 기술 개발 및 에너지 자원의 효율적인 이용에 많은 예산과 인력을 집중하고 있다.

남북분단과 주위 군사 강대국에 둘러싸인 특수상황에 처해 있는 한반도의 현실에서 국가 안전을 위한 방위 능력 확보는 우선적으로 필요한 요소이다. 또한 우주, 항공, 해양, 방위, 정밀기계, 자동차, 조선, 철강, 비철, 에너지 및 환경산업 분야에서 선진국의 입지를 다지기 위한 기술자립이 필요한 시점이다. 따라서 초고온 세라믹 섬유, 원료분말 및 복합체 제조 등의 원천기술 확보가 절실히 필요할 것으로 생각된다.

본 고에서는 초고온 세라믹 재료 및 세라믹 복합재료에 관한 국내외의 기술동향, 향후 기술개발 전망 및 산업적 응용에 대해 논의하겠다.

## 2. 해외 기술개발 및 연구 동향

표 2에 선진국에서 수행중인 비산화물계 세라믹 섬유 및 섬유강화 복합체의 연구동향을, 표 3에 해외 주요국의 세라믹 섬유강화 복합소재 관련 R & D 현황을 정리하였다. 탄소섬유는 소량, 고성능의 군용 시장에서 대량, 저가격의 민수 시장으로 전환되면서 급격한 시장의 팽창이 이루어지고 있다. 이에 따라 세계 각국에서 생산이 이루어지고 있으며, 제조원가의 절감과 강도 및 탄성계수의 개선 등 물성 향상을 위한 연구가 진행되고 있다. 이를 위하여 피치계 원료 사용 및 제조공정의 개선을 통해서 가격을 낮추면서도 기존의 고성능 탄소섬유에 근접하는 물성을 구현하기 위한 연구들이 진행되고 있다.<sup>[4]</sup> 섬유 물성의 경우 PAN계 및 피치계 원료를 사용하여 6.4GPa의 인장응력 혹은 588GPa의 인장계수를 달성하는 등 기존의 재료로는 도달할 수 없는 우수한 기계적 물성을 갖는 탄소섬유가 상용화 되어 있다.<sup>[5]</sup>

지난 20여 년간의 연구개발 투자에도 불구하고 탄소/탄소 및 탄소/SiC 복합재료에 대한 내열성 향상 및 제조 가격 절감을 위한 생산기술 연구가 계속되고 있는데, 일례로 미 국방성은 년 2,000 만불의 연구개발비를 초고온용 탄소/탄소 및 탄소/SiC 복합재 분야에 투자하고 있다.

세라믹 SiC 섬유의 개발은 미국의 경우 NASA와 Textron, Dow corning사가 연계하여 고온 영역에서 2GPa의 강도를 유지하는 Sylramic 섬유를 개발하여 세라믹 복합재료 제조에 이용하고 있다.<sup>[6]</sup> 일본의 경우 UBE와 Nippon Carbon에서 SiC 섬유를 생산중이며, 보다 더 높은 온도의 극한환경에서 사용하기 위하여 섬유의 완전결정화와 치밀화 공정을 연구하였다. 이에 따라 UBE 사에서는 전구체 고분자의 개질을 통한 완전 결정화 섬유를 제조하였고,

Nippon Carbon 사에서는 극저산소 SiC 섬유를 제조하였다.<sup>7)</sup> 이 외에 UBE의 원료 precursor를 사용하여 일본의 IEST에서 SiC 섬유를 제조하고 있으며 대량생산에 적합한 연속식 furnace를 사용하여 섬유가격의 절감을 이룰 것으로 기대한다. 유럽의 경우 프라운호퍼 연구소를 중심으로 세라믹 섬유와 섬유의 원료인 고분자 전구체의 개발에 박차를 가하고 있으며 2005년 현재 연산 1톤 규모의 폴리카보실란 합성 파일럿 플랜트를 준공하는 등 SiC 섬유의 양산을 위한 활동을 진행중이다. SiC 섬유의 경우 연산 능력이 영세하고 군사용으로 전용될 위험 때문에 생산 및 수출에 제약이 가해지고 있는 실정이다. 비산화물 세라믹계 섬유의 경우 가격의 절감 이외에도 Sytramic-iBN 및 SiBN3C 섬유 등 대기중 사용온도 증가를 위한 연구가 이루어지고 있다.<sup>7,8)</sup>

표 2. 해외 주요국의 기술 개발 현황<sup>9)</sup>

구분	기술명	개발 단계	개발 내용	개발주체
미국	SiC 섬유 제조기술	상용화	SCS 계열 섬유	Textron
		Pilot	Sytramic 계열 섬유	Dow corning
	복합재료 제조기술	상용화	Porous burner	Du Pont Lanxide
			Tubular burner	Textron
			Engine valve guide	AlliedSignal
			Hot gas filter	McDermott
			Gas turbine, combustor liners	Dow corning
Pilot	구동효율 50% super turbine	Wilson Turbo Power		
일본	SiC 섬유 제조기술	상용화	Nicalon 계열 섬유	Nippon Carbon
			Tyranno 계열 섬유	Ube Ind.
	Pilot	Sef-NITE 계 섬유	UEST	
	복합재료 제조기술	Pilot	Combustor liner, shrouds	UEST
유럽	전구체 합성기술	Pilot	폴리카보실란 전구체 합성	Fraunhofer
	복합재료 제조기술	상용화	Rocket nozzle Aircraft nozzle Aircraft nozzle inner/outer flap Brake disc	Snecma
			Brake disc	DLR
	프리폼 제조기술	상용화	Complex preforms	EADS

고온용 세라믹 복합재료의 경우 미국은 1970년대부터 미 공군과 NASA가 주도적으로 우주항공 및 국방용 세라믹 섬유강화 복합재료의 개발을 시작하였으며 최근에는 축적된 기술을 일반 산업 분야에 적용하고 있다. 유럽의 경우 독일 항공 우주 연구소 (DLR)에서 우주 항공용 세라믹 복합재료를 연구하고 있으며, 기술을 민간기업에 이전하여 자동차용 세라믹 복합재료 브레이크 시스템 제조에 활용하고 있다. 또한 EADS-ST사에서는 우주 항공용 세라믹 복합재료 노즐을 개발하고 있다.<sup>9)</sup> 프랑스는 미국과 함께 초고온 복합재료 분야를 선도하고 있다. 대표적으로는 우주선용 대형 세라믹 복합재료 노즐을 제조하고 있는 SNECMA사 등이 있으며, 주로 대형 제품의 제조기술 및 내산화성 미세구조 개발에 있어서 세계 최고수준의 기술을 보유하고 있다. 또한 SiS/SiC 복합재료를 차세대 핵융합로



표 3. 세계의 세라믹 복합소재 관련 R & D 현황<sup>[2]</sup>

세계의 세라믹 복합소재 관련 R & D 현황	
미 국	<p>○ Vision 21 프로그램 (2001-2015) 청정, 저소비 에너지 소재 개발, 고효율 에너지 생산을 위한 새로운 에너지 기술 창출. 고온 열교환기 시스템용 소재, 석탄 가스화 정화용 고온재료, 산소 및 수소 분리용 분리막 (membrane), 연료전지용 재료, 고온 내부식성 내화재료 개발</p> <p>○ CFCC 프로그램 (1992-2001) 고온에서 고강도, 고인성 및 내부식성이 우수하고, 경량이면서 우수한 내구성 및 신뢰성을 갖는 에너지 소재 개발. 라디언트 튜브 (radiant tube), 열교환기 튜브, 섬유강화 복합재료 라디언트 히터, 라디언트 버너 스크린, 고온 배기가스 집진 필터 개발</p> <p>○ High temperature heat exchanger 프로젝트 (2003-2008) 열교환기용 부품 후보재료 선정/시험과 Si (sulfur iodine) 열화학 공정용 수소제조 플랜트 적용을 위한 열교환기 설계 및 prototype 제조. 열교환기용 재료로 carbon fiber reinforced Si-SiC, splint based Si-SiC, pitch based Si-SiC, short fiber reinforced SiC 소재 연구</p>
일 본	<p>○ Synergy ceramics 프로그램 (1994-2006) 고내열성 단열재료, 유체투과 기능재료, 고강도 · 고인성 구조재료, 고열전도성 재료, 유해성분 선택정화 기능재료, 응력 해석을 통한 재료파괴 예측 기술개발</p> <p>○ Smart material 프로그램 (1992-1996) 고성능 센서 시스템, 자기진단 및 손상제어 시스템, 지능 성형공정 개발, 모재-센서 액츄에이터 일체화 기술, 능동적 제어 시스템, 대형/복잡 구조 요소기술 개발</p>
유 럽	<p>○ Vision ceramics 2000 (2000-2002) 고성능, 고기능 에너지 재료 개발이 목표이며 고온 초전도체, 스마트 유체, 시너지 재료, 정보재료 및 바이오 재료 등의 연구를 수행</p> <p>○ ECOFINA 프로젝트 고성능 자동차용 바이오 복합재료를 개발하기 위해 “ECOFINA” 프로젝트를 “EU growth project” 내에서 산학연 협동연구로 수행. 독일의 경우 Daimler Chrysler 사는 2000년부터 Mercedes-Benz E-class 등 자동차의 내장재로 바이오 복합재료를 사용.</p>

에 적용하기 위한 연구도 진행 중이다.<sup>[10]</sup>

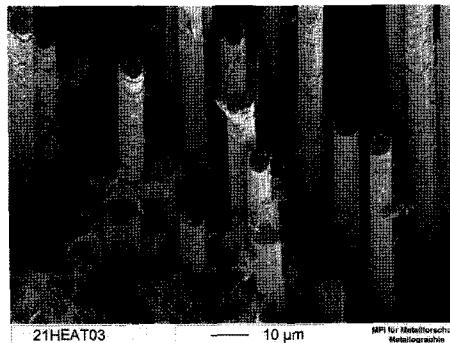


그림 1. 2100도 가열 후에도 섬유 뒤틀거동을 보여주는 탄소섬유/SiC/SiBCN계 세라믹 섬유강화 복합재료<sup>[11, 12]</sup>

### 3. 국내 기술개발 및 연구 동향

국내의 복합재료 산업은 주로 탄소섬유와 유리섬유를 기반으로 하는 저온 및 중온용 복합재료를 생산한다. 탄소/SiC계 초고온 세라믹 재료 개발은 2000년 이전까지는 시장의 미비로 많은 연구가 이루어 지지 않았으나 최근 연구소와 기업을 중심으로 산업화를 위한 연구들을 수행하고 있다.

탄소섬유의 경우 (주)효성과 전주기탄소기술원이 양산을 위한 연구개발을 진행하고 있다.<sup>[22]</sup>

탄소/SiC계 복합재료의 경우 (주)DACC에서 자동차용 브레이크디스크를 개발하였으며 최근 독일에 수출계약을 체결함으로써 탄소/SiC 브레이크를 독점 공급해온 독일의 SGL과 경쟁체제를 구축하였다.<sup>[23]</sup>

SiC 섬유의 원료가 되는 규소계 모노머는 2004년 KCC가 생산에 착수하였다. KCC는 현재 전주공장에 양산 시스템을 구축하였으며 2012년까지 이를 더욱 확충할 계획이다.

세라믹기술원(KICET)은 SiC 섬유 제조 기초기술 개발을 (주)DACC와 함께 수행하였다. 이를 통해 촉매공정을 통한 폴리카보실란의 상압반응 합성기술을 개발하였으며, 이를 이용하여 중온용 반결정형 SiC 섬유를 제조하였으며 그에 관한 원천특허를 출원하였다. 또한 충남대에서는 SiC, SiCN용 폴리머 전구체 연구를 수행하고 있으며 이를 이용하여 SiC foam 제조 및 MEMS 등에 응용하고 있다.

한국에너지기술연구원(KIER)에서는 탄소/SiC 복합재료 제조기술에 대한 연구를 수행하여 철강 열처리용 래디언트 튜브 및 래디언트 버너 노즐 시작품 개발을 완료하였으며, 현재에는 상용화를 위한 연구를 수행 중에 있다.

표 4. 국내 세라믹 섬유 및 복합재료 관련 연구현황<sup>[2]</sup>

기술명	개발단계	개발내용	개발주체
C/SiC 복합재료	상용화	래디언트 튜브, 래디언트 버너 노즐	KIER 대양산업
C/C 복합재료	상용화	항공기 부품 미사일 추진체	대양산업 (주)DACC
C/SiC 복합재료	Pilot	차량용 브레이크 디스크 및 패드	(주)DACC
SiC/SiC 복합재료	기술검토	원자력 부품	KAERI, KIMS
탄화규소 섬유	기술검토	탄화규소 섬유 및 고분자 전구체	KICET
열전지 격리판 용 탄화규소	기술검토	열전지의 전해질 격리판 소재	KICET, ADD, 서울대학교
SiC/ZrB <sub>2</sub> 복합재료	기술검토	항공·우주용 부품, 원자력 부품	KIMS

한국원자력연구소(KAERI)는 CVD(Chemical Vapor Deposition), CVI(Chemical Vapor Infiltration) 공정 및 SiC 분말을 이용한 고온가압소결 공정, 고분자 함침공정(PIP) 등을 적용하여 SiC/SiC 복합재료 제조를 위한 기반기술과 세라믹 섬유의 인장강화를 위한 섬유코팅 기술을 개발하고 있다. 그 결과 철강 열처리용 래디언트 튜브 및 래디언트 버너 노즐 시작품 개발을 완료하였으며, 현재는 상용화를 위한 연구를 수행중에 있다. 이를 위하여 연속 탄소섬유를 사용하여 필라멘트 와인딩 공정으로 1.5미터 크기를 갖는 대형 제품의 형상화 기술을 확립하고 이의 탄화 및 액체 규소 함침을 포함하는 전체 공정을 확립하였다.

국내에서 Zr 및 Hf계 초고온 세라믹의 연구는 (주)포항중합제철소에서 고내식성 ZrB<sub>2</sub>에 관한 특허를 발표하였고 (특1997-0042432), 제조 공정 측면에서는 서울대 및 한양대에서 boride계 시스템의 소결에 관한 연구가 수행되었으나 전반적인 기술 수준과 연구 영역은 선진국과 비교할 때 아직 미흡한 실정이다. 또한 세라믹기술원에서는 ZrB<sub>2</sub> 원료분말을 이용한 소결 특성을 연구하고 있다.

재료연구소는 SiC 및 ZrB<sub>2</sub>계 초고온 세라믹재료 개발에 관한 연구를 수행하고 있으며, 원료분말 합성, 분쇄, 습식

공정, 저온소결, 산화 저항성 개선 및 SiC 섬유강화 복합체 제조에 관한 연구를 수행하고 있다. 최근 본 연구소에서는 세계 최초로 원료 무가압 방식의 방전 플라즈마 소결법을 이용하여 100nm 내외의 평균입경을 갖는  $ZrB_2$ -SiC 나노 혼합분말의 제조 실험을 수행하고 있다. 또한 비수계의 고농도  $ZrB_2$  슬러리 제조 및 습식공정 도중  $ZrB_2$  분말의 표면 부식 억제 방법에 대한 지식과 노하우를 축적하고 있다.  $ZrB_2$ 의 저온소결은 3 종류의 비산화물 소결조제를 사용한 방전 플라즈마 소결법(SPS)으로 1650도에서 치밀한 소결체를 얻을 수 있었다. 이렇듯 재료연구소는 미래의 핵심 소재이며 전략 소재로 수입이 제한되는 초고온 세라믹에 관하여 원료 합성에서부터 복합재료 제조까지 일관된 연구를 수행함으로써 대한민국의 국익을 보호하고 선진국들과의 기술 경쟁에서 유리한 고지를 점하기 위한 노력을 경주하고 있다.

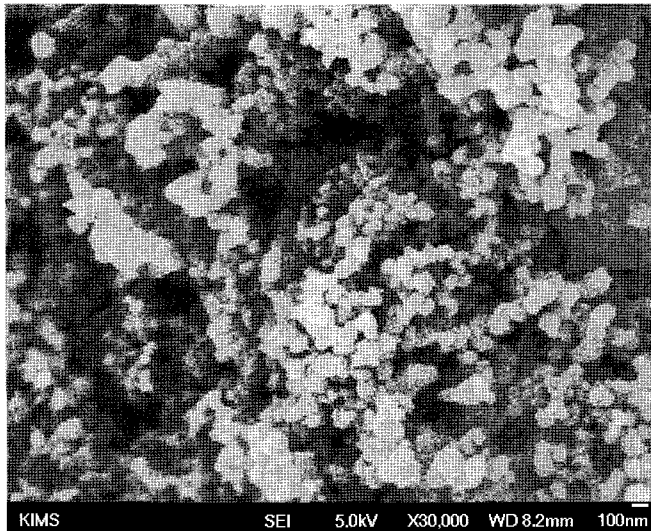


그림 2. 재료연구소에서 합성 중인  $ZrB_2$ -SiC 계 혼합 나노 분말

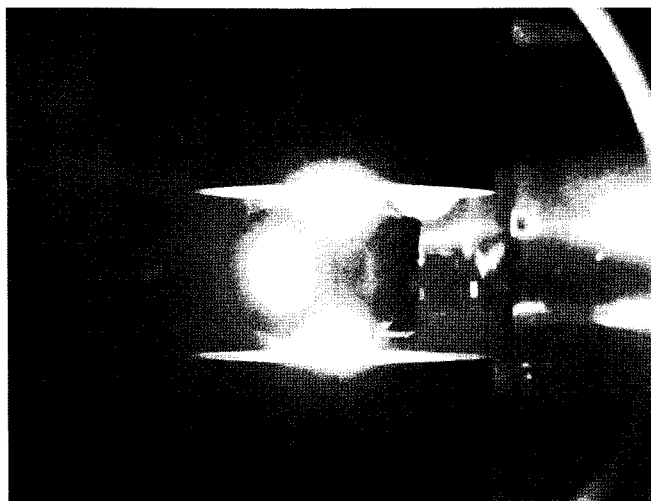


그림 3. 재료연구소의 방전 플라즈마 소결법을 이용한 초고온 세라믹 소결

## 4. 향후 기술 개발 및 산업적 응용 전망

초고온 세라믹은 연구의 역사가 비교적 짧은 신소재이며 현재까지 물성 개선 등 실용화가 아닌 기초 연구 위주로 연구가 진행되어 왔다. 미래에는 성능의 지속적인 향상과 더불어 저가격화, 대형화 및 높은 신뢰성을 실현함으로써 산업적인 활용을 가능하게 하기 위한 연구들이 이루어질 것으로 예상된다.

탄소섬유 시장은 현재 연간 1조 2천억원 정도이며 10년 후 20조원대의 거대 시장으로 성장할 것으로 예상된다.<sup>[24]</sup> 이는 탄소 섬유 시장의 주요 시장이 전투기 등 군용에서 민항기 등 민수용으로 급속히 이전되고 있기 때문이다.

내산화성이 비교적 향상된 탄소/SiC 복합체는 1,500°C 영역에서 비교적 단시간의 수명을 필요로 하는 미사일/Ram jet/Turbo jet의 고온 부위와 자동차용 브레이크 디스크에, SiC/SiC 복합체는 1200°C 부근에서 비교적 장기간 사용되는 항공기 및 우주비행체의 엔진부품 및 산업용 엔진 부품 등에 적용되고 있다. 또한 SiC 섬유강화 세라믹 복합체는 고효율 방사형 히터, 열전지용 separator, DPF, 엔진 부품, 가스터빈, 차세대원자로 구조재료, 로켓노즐, 송전선 등으로 응용범위가 확대되고 있다.<sup>[1]</sup>

국내에서 진행중인 탄소계 복합체연구의 경우 치밀화나 single layer 코팅, 탄소/SiC의 치밀화공정 분야에서는 세계적 수준과 대등하거나 상회하는 수준에, 3D 프리폼 제조기술 및 multi layer 내산화 코팅 기술에 있어서는 선진국과 대등한 수준에 도달하는 것을 목표로 연구를 진행중에 있다. 산업적으로는 (주)DACC 등의 국내 기업들이 선진국에서 독점적으로 생산하고 있는 고성능의 세라믹 복합재료의 제조 시장에 편입하기 위한 제품의 대형화, 신뢰성 확보 및 새로운 소재 활용을 위한 연구가 활발해질 것으로 예상된다.

Zr 혹은 Hf계 초고온 세라믹스의 경우 당분간 산업화를 위한 연구보다는 물성 및 공정개선 위주로 연구가 진행될 것으로 예상된다. 기존의 저온소결 및 산화저항성 연구 외에 초고온 세라믹 분말 생산기술 확보, 원료 분말의 고품질화, 나노복합화 등에 의한 기계적 물성의 개선, 장섬유 강화 복합체 제조에 의한 대형화 및 신뢰도 향상, 접합특성 향상 및 방전가공(Electrical discharging machining) 등을 이용한 가공성 개선 등이 이루어 질 것으로 예상된다. 특히 원료 분말의 생산 및 고품질화 기술은 선진국들의 거래 제한 장벽을 넘어서 새로운 소재에 대한 주도권을 쥐기 위해서 반드시 필요할 것으로 생각된다.

Zr 및 Hf계 초고온 세라믹은 기존의 탄소/탄소 재료보다는 우수한 내산화성 및 부품 수명을, 탄소/SiC 및 SiC/SiC 계 소재보다는 우수한 고온물성을 실현 시킬것으로 기대되며, 항공우주 재료분야 등 첨단산업분야에서 기존의 고온용 세라믹들을 대체할 것으로 기대된다. 산업의 고도화에 따라 고성능 소재에 대한 수요가 최근 크게 증가하고 있으며, 이에 따라 초고온 세라믹스의 군사적, 산업적 활용 역시 향후 활발히 이루어 질 것으로 예상된다.

## 5. 결 론

초고온 세라믹은 항공, 우주, 국방, 자동차, 발전 등의 국가 기간산업의 효율 개선에 큰 영향을 미칠 것으로 예상되는 핵심소재이며, 에너지, 환경산업으로의 응용도 폭넓게 확대될 수 있다. 따라서 미국, 유럽 등의 선진국에서는 국가적 차원의 연구 및 투자가 수행되고 있다. 반면 국내에는 초고온 세라믹과 그 복합체의 연구 및 산업기반이 아직 취약하며 관련 분야의 국내 산업은 단시일 내에 활성화되기는 어려운 측면이 있다. 그러나 국내에서도 초고온 세라믹은 산업용 소재로 점차 응용분야가 확대되고 있으며, 향후 기술개발에 대한 수요가 증가할 것으로 예상된다.

## ❁ 참고 문헌

- [1] 이세훈, 김해두, 월간 세라믹스, 6월호, 73-77 (2009)



- [2] 극한환경재료 연구개발 및 기술기반 구축사업, 기획 보고서, 한국기계연구원 부설 재료연구소, 08년 3월, pp. 33-60 (2008)
- [3] Draft, NSF-AFOSR Joint Workshop on Future Ultra-high Temperature Materials (2004)
- [4] [http://www.fta.dot.gov/documents/Low\\_Cost\\_Carbon\\_Fiber\\_Research.pdf](http://www.fta.dot.gov/documents/Low_Cost_Carbon_Fiber_Research.pdf)
- [5] <http://www.torayusa.com/cfa/pdfs/ToraycaSummaryDataSheet.pdf>
- [6] R. E. Jones et al., J. Nucl. Mater., 283-287, 556-559 (2000)
- [7] D. M. Wilson, Ceramic fibers, ASM Handbook, Vol 21, pp. 46-50 (1990)
- [8] P. baldus et al., Science, 285, 699-702 (1999).
- [9] S. Schmidt et al., Int. J. App. Ceram. Technol., 2, 85-96 (2005)
- [10] R. Naslain, Compos. Sci. Technol., 64, 155-170 (2004)
- [11] S. H. Lee et al., Acta Mater., 56, 1529-1538 (2008)
- [12] S. H. Lee et al., Acta Mater., 57, 4374-4381 (2009)
- [13] <http://www.matechgs.com/capabilities.html>
- [14] S. L. Levine et al., J. Europ. Ceram. Soc., 22, 2757-2767 (2002)
- [15] W. G. Fahrenholtz et al., J. Mater. Sci., 39, 5951-5957 (2004)
- [16] A. D. Chamberlain et al., J. Am. Ceram. Soc., 89, 450-456 (2006)
- [17] D. Sciti et al., J. Am. Ceram. Soc., 89, 2320-2322 (2006)
- [18] S. H. Lee et al., J. Am. Ceram. Soc., 91, 1715-1717 (2008)
- [19] S. H. Lee et al., J. Am. Ceram. Soc., 90, 3455-3459 (2007)
- [20] S. Q. Guo et al., Scripta Mater., 58, 579-582 (2008)
- [21] 전자신문 2009년 4월 28일
- [22] 노컷뉴스 2009년 3월 8일
- [23] 전북일보 2008년 5월 21일



이 세 훈

· 재료연구소 기능재료연구본부 엔지니어링세라믹연  
구그룹 선임연구원  
· 관심분야 : 세라믹 공정, 세라믹 복합재료, 초고온  
세라믹  
· E-mail : seahoon1@kims.re.kr



김 해 두

· 재료연구소 기능재료연구본부 엔지니어링세라믹연  
구그룹 책임연구원  
· 관심분야 : 구조 세라믹, 다공질 재료  
· E-mail : khd1555@kims.re.kr