

# Gas Turbine용 구조 세라믹스 재료



박 동 수 (재료기술연구부 요업재료그룹)

- '82 연세대학교 공과대학 금속공학과(공학사)
- '86 미국 Univ. of Illinois at Chicago 재료공학과 (공학석사)
- '90 미국 Univ. of Illinois at Chicago 재료공학과 (공학박사)
- '90-현재 한국기계연구원 선임연구원

## 1. 서 론

Advanced Ceramics는 고유의 내열성, 비강도 (강도/질량), 내마모성 등의 특성이 우수하여 각종 산업으로의 응용이 이루어져 왔다. 세라믹스는 그 취약함, 즉 낮은 파괴인성 때문에 충격이 가해지는 상황에서는 그 응용이 극히 제한되어 왔으며, 특히 균열의 발생이 곧 파손으로 직결되는 단점 때문에 아직도 많은 산업 분야에서의 사용이 제한되고 있다. 최근에는 Advanced Ceramics의 연구 개발에 따라 그 물성이 크게 향상되고, 특히 섬유강화형 복합소재 등의 출현이 이루어지면서 그동안 적용이 불가능하다고 생각되었던 항공기 분야 등에서도 그 일부가 사용되고 있는데, 예를 들면 카본-카본(C-C) 복합재료를 이용한 Brake Disk등이 그것이다.

Advanced Ceramics는 다른 산업에서와 마찬가지로, 항공기 산업에서도 부품 및 제품의 고성능화를 위하여 그 적용이 시도되고 있는데, 이미 언급한 카본-카본 복합재료외에도 Monolithic Ceramics 중의 일부가 그 부품으로 응용이 시도되고 있으며, Ceramic Coating층을 이용한 금속계 Turbine Blade의 TBC(Thermal Barrier Coating)은 이미 실제 적용되고 있다. 항공기는 그 부품의 손상이 인명과 직결될 수도 있으므로 매우 엄격한 기준의 소재를 사용해야 함에도 불구하고 이러한 세라믹스 소재가 사용되고 있음은 실로 그동안의 많은 연구와 투자의 결실이라 할 수 있겠다. 물론 항공기의 모든 부품이 인명과 직결되는 것은 아니므로 그 손상이 항공기의 안전에 큰 영향을 미치지 않는 부품에서부터 세라믹스 소재의 적용이 시작되리라 생각하며 세라믹스 소재의 특성 향상이

이루어짐에 따라 더욱더 넓은 범위로 그 이용이 확대될 것이다. 특히, 고열 부분(Hot Section)의 부품을 세라믹스로 대체하게 되면 엔진의 작동 온도와 성능을 크게 향상시킬 수 있으며, 항공기의 성능도 크게 향상될 것이지만, 이를 위하여는 아직도 많은 노력과 투자와 시간이 요구된다.

첨단 가스터빈(Advanced Gas Turbine) 엔진에서는 기존의 가스터빈 엔진에 비하여 보다 높은 온도를 사용하기 때문에 고열부분(Hot Section)에 극심한 열적 조건이 가해지게 된다. 이 때문에 부품의 냉각을 위하여 많은 양의 공기를 Pass Duct, Cylinder, Blade, Nozzle 등에 공급해야 하고, 또 이것은 곧 엔진의 성능에 큰 부담을 주게 된다. 뿐만아니라 주조나 기계 가공상의 공차등의 치수상의 제한 때문에 냉각 효율을 높히는 것은 대단히 어렵게 된다. 이런 점에서 볼 때, 구조 세라믹스는 첨단 가스터빈 엔진의 문제인 별도의 냉각 장치없이 1200°C 이상의 고온을 극복할 수 있는 잠재력을 보이기 때문에 그 응용이 기대되는 바이다.

미국과 일본 등의 선진국에서는 이미 1970년대와

1980년대부터 이러한 세라믹스의 우수한 특성에 주목하여 Monolithic Silicon Nitride, Silicon Carbide, Sialon 등의 소재 및 엔진부품을 연구 개발하여 왔다. 세라믹스를 사용함으로써 얻는 잇점은 연료 효율의 증가, 중량 감소에 따른 회전 부품의 응력 감소, 냉각 장치의 불필요에 따른 엔진의 간소화 및 전략적 합금 원소의 절약 등이 있다. 그러나 이상의 잇점들의 일부는 Gas Turbine의 산업 기계의 부품으로 활용될 경우에도 얻어질 수 있으므로, 산업의 고도화에 따라 세라믹스의 활용은 크게 확대될 전망이다. 여기서는 항공기용 Gas Turbine을 비롯하여 자동차용 및 발전용 Gas Turbine으로의 세라믹스의 응용에 대하여 알아본다.

## 2. 가스 터빈용 세라믹스 소재

구조용 세라믹스는 최근 약 20년 동안 많은 관심과 연구의 대상이 되어온 결과, 표1에 나타난 몇 가지 예에서 볼 수 있듯이 과거에는 생각치 못했던 우수한 물성을 갖게 되었다.

가스터빈에서의 세라믹스의 응용은 주로 내열성을 이용한 부품에 집중되고 있다. 따라서 세라

표 1. Thermo-mechanical properties of some important engineering ceramics.<sup>1)</sup>

Material	Method*	MOR (MPa)	K <sub>IC</sub> **	E (GPa)	CTE***
SiC	S	400-600	2.5-4	380-440	4-5
	I	250-380	4-5	350-400	4.3
	HP	450-700	4-5	450-470	4.6
Si <sub>3</sub> N <sub>4</sub>	S	600-1100	4-8	140-300	3-3.5
	RB	250-350	1-3	80-220	3-3.5
	HP	700-1300	5-10	250-340	3-3.5
AlN	S	300-400		320	
	HP	400-500			
B <sub>4</sub> C	HP	350-1100	2-6	300-340	4-6
ZrO <sub>2</sub>	S	1000-1500	6-15	200	10-11
	HP	1000-2500			
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> -ZrO <sub>2</sub>	S	500-650	5-8	250-350	9

\*S : sintered, I : Si-infiltration, HP : hot pressed

\*\* Fracture Toughness : MPa  $\sqrt{m}$

\*\*\* Coefficient of Thermal Expansion : /°K

믹스 중에서도 내열성이 우수한 비산화물계 세라믹스가 연구되어 왔다. 비산화물계 세라믹스 중에서 질화규소(Silicon Nitride)는 자동차용 가스터빈 소재개발 프로그램에 의해 집중적으로 연구되어 많은 발전과 아울러 세라믹 절삭공구

등의 부산물을 낳기도 했다. 질화규소는 자연에서는 발견되지 않는 인공적인 강한 공유 결합의 화합물로서 알파와 베타의 두가지 결정 구조를 갖는다. 이 두가지 결정 구조에 대한 물리적, 기계적 특성을 표 2에 나타내었다.

표 2. Properties of Silicon Nitride Ceramics.<sup>2)</sup>

Crystal Structure	
alpha-phase, hexagonal	a-axis 0.775-0.777nm c-axis 0.516-0.569nm
beta-phase, hexagonal	a-axis 0.759-0.761nm c-axis 0.271-0.292nm
Decomposition Temperature	1900°C
Theoretical Density(g/cc)	
alpha-phase	3.168-3.188
beta-phase	3.190-3.202
Density(g/cc)	
dense Si <sub>3</sub> N <sub>4</sub>	90-100% TD
reaction-bonded Si <sub>3</sub> N <sub>4</sub>	70-88% TD
CTE(20-1500°C, 10 <sup>-6</sup> /°C)	2.9-3.6
Thermal Conductivity(RT, Wm <sup>-1</sup> K <sup>-1</sup> )	
dense Si <sub>3</sub> N <sub>4</sub>	15-50
reaction-bonded Si <sub>3</sub> N <sub>4</sub>	4-30
Thermal Diffusivity(RT, cm <sup>2</sup> sec <sup>-1</sup> )	
dense Si <sub>3</sub> N <sub>4</sub>	0.08-0.29
reaction-bonded Si <sub>3</sub> N <sub>4</sub>	0.02-0.22
Specific Heat(J · kg <sup>-1</sup> °C <sup>-1</sup> )	700
Electrical Resistivity(RT, ohm · cm)	-10 <sup>13</sup>
Microhardness(Vickers, kg/mm <sup>2</sup> )	1600-2200
Young's Modulus(RT, GPa)	
dense Si <sub>3</sub> N <sub>4</sub>	300-330
reaction-bonded Si <sub>3</sub> N <sub>4</sub>	120-220
Flexural Strength(RT, MPa)	
dense Si <sub>3</sub> N <sub>4</sub>	400-950
reaction-bonded Si <sub>3</sub> N <sub>4</sub>	150-350
Fracture Toughnes(MPa · m <sup>1/2</sup> )	
dense Si <sub>3</sub> N <sub>4</sub>	3.4-8.2
reaction-bonded Si <sub>3</sub> N <sub>4</sub>	1.5-2.8
Thermal Stress Resistance Parameter	
dense Si <sub>3</sub> N <sub>4</sub>	R : 300-780, R' : 7-32
reaction-bonded Si <sub>3</sub> N <sub>4</sub>	R : 220-580, R' : 0.5-10

열역학적인 관점에서 보면 480°C를 경계로하여 알파상은 저온에서 안정하며, 베타상은 고온에서 안정한 것으로 보고된 바 있다. 그러나 알파로부터 베타의 상변태는 단순한 온도의 증가에 따라 변태되지 않고, 반드시 주위의 액상이 개입되어 알파상이 우선 그 액상에 용해되고 다시 베타상으로 석출되는 이른바 용해-재석출의 과정을 거쳐야 한다. 따라서, 알파상과 베타상의 경계는 1400°C 정도로 알려져 있으며, 이는 질화규소 제조시의 개입되는 용융 실리콘의 존재와 무관하지 않은 것으로 생각된다. 따라서 알파로부터 베타로의 상변태는 단순한 온도만의 함수가 아니며 주위 액상과 매우 긴밀한 관계를 갖는다. 일반적으로 이 상변태는 비가역성으로 알파에서 베타로의 반응은 발생하지만 베타에서 알파로의 반응은 발생하지 않는 것으로 알려졌으나, 최근 Sialon의 경우에는 주위의 액상 성분에 따라, 베타로부터 알파로의 변태가 발생한다고 보고된 바 있다.

질화규소의 특이한 성질중의 하나는 고온에서 열분해(Thermal Decomposition) 현상이 발생하는 것이다. 즉, 질소 1기압의 분위기에서 1850°C 이상의 온도로 가열하면,  $\text{Si}_3\text{N}_4(\text{s}) = 3 \text{Si}(\text{l}) + 2\text{N}_2(\text{g})$ 의 반응에 의해 분해된다. 또, 이보다 낮은 온도에서라도  $\text{Si}_3\text{N}_4$ 의 표면에 항상 존재하는  $\text{SiO}_2$ 와의 반응에 의해 열분해가 발생된다( $\text{Si}_3\text{N}_4 + 3 \text{SiO}_2 = 6 \text{SiO}(\text{g}) + 2\text{N}_2(\text{g})$ ,  $\text{Si}_3\text{N}_4 + \text{SiO}_2 = 3 \text{SiO}(\text{g}) + 2\text{Si}(\text{l}) + 2\text{N}_2(\text{g})$ ). 이상의 질화규소의 열분해 반응을 그림 1에 표시하였다. 이러한 열분해는 탄소(C)의 존재하에서는 더욱 촉진된다. 열분해가 심하여지면, 질화규소는 없어지고 가스들이 발생하여 질화규소의 치밀화는 멈춰진다(그림 2).

강한 공유 결합에 의한 물질 이동의 어려움과 고온에서의 열분해 때문에 질화규소는 난소결성 소재로 취급되어 왔다. 질화규소를 충분히 치밀화하려면, 소결을 촉진하는 소결 조제(Sintering Additives)를 첨가하는 것이 요구된다. 이러한 소결 조제로는 주로 희토류 금속의 산화물( $\text{Re}_2\text{O}_3$ )과 주기율표 상의 III족과 IV족 금속의 산화물,  $\text{Al}_2\text{O}_3$  등이 단독 또는 복합적으로 사용되어 왔다. 이밖에 AIN 등의 금속 질화물도 일부 고려된 바 있지만 AIN을 제외하면 거의 사용되지 않는다.

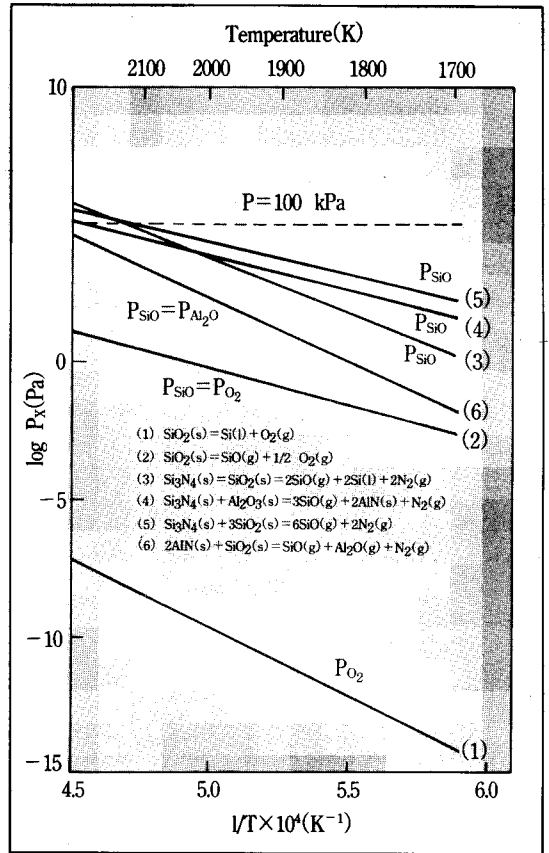


그림 1. Thermal decomposition reactions in the system Si-Al-O-N at  $P_{\text{N}_2} = 101.3 \text{ kPa}$ .<sup>3)</sup>

소결 조제는 질화규소 표면의  $\text{SiO}_2$ 와 공정 반응을 이루어 보다 낮은 온도(1300-1500°C)에서 유리질의 액상을 형성하며 물질 이동을 촉진하게 된다. 소결 조제의 양과 종류는 액상이 형성되는 온도, 형성되는 액상의 양 및 액상의 성질에 영향을 주게 되는데, 일반적으로 소결 조제의 양이 증가할수록 보다 낮은 온도에서 보다 치밀한 소결체를 얻을 수 있다.

상압소결(질소 1기압의 분위기)에 의해 상대밀도 98% 이상의 치밀화를 이루려면 상당히 많은 양의 제한된 종류의 소결 조제가 요구되는데, 이것은 이미 언급한 바와 같이, 질화규소가 심하게 열분해되는 온도(1850°C) 미만의 온도로 소결 온도가 제한되기 때문이다. 이렇게 소결 조제의 양이 많아지거나  $\text{SiO}_2$ 와의 저융점 공정 반응을 이루는

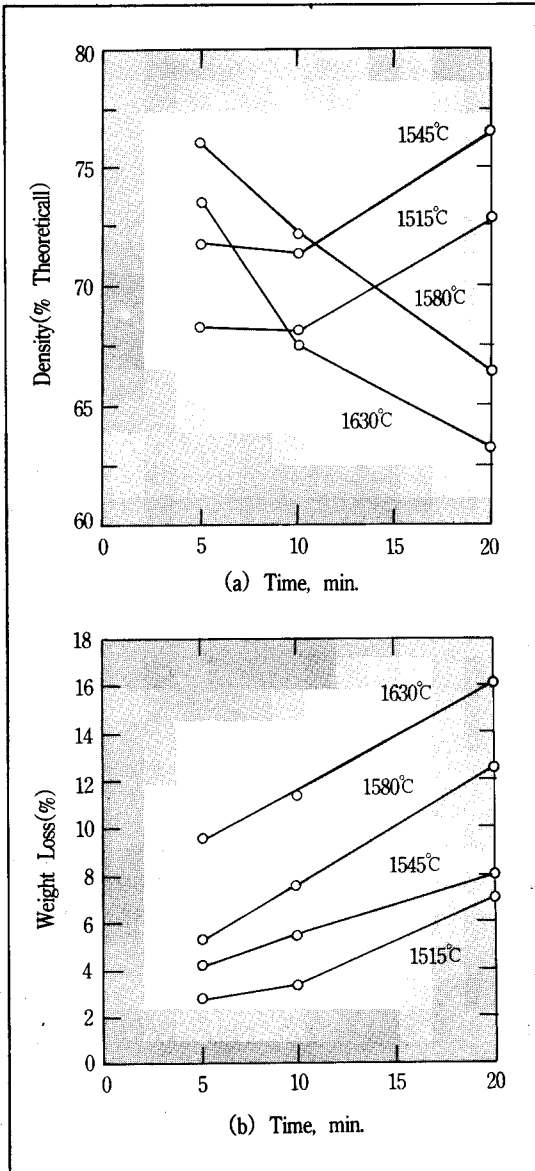


그림 2. Densities (a) and weight loss (b) obtained for isothermal experiments at three time periods and four temperatures.<sup>4)</sup>

소결 조제들은 결국 소결체의 물성에 좋지 않은 영향을 준다. 소결 조제의 양을 줄이고 우수한 물성의 소결체를 얻는 방법 가운데 가압 소결법 (Hot Press)이 있다. Hot Press는 일축 방향의 압력을 가하면서 온도를 상승시켜 치밀화하는 방법으로 우수한 물성의 소결체를 얻을 수 있지만,

복잡한 형상의 부품 제조에는 부적합하고, 단순 형상의 부품제조에만 적용된다. HIP(열간등압소결법)은 1600-2000°C의 온도와 100-200MPa의 압력을 이용하여 치밀화하는 방법으로 유체에 의한 등압을 사용한다. 역시 적은 양의 소결 조제로 우수한 성질의 소결체를 제조할 수 있으며 복잡한 형상의 부품을 제조하는데도 적합하다. 그러나 HIP의 고압을 사용하기 위하여는 성형체의 표면이 고압에 노출되지 않도록 보호하여야 하기 때문에 유리 밀봉법(Glass Encapsulation)등의 사전 처리가 요구된다. 이상의 가압 소결법이 압력을 이용한 (Pressure Assisted) 방법이였다면, 온도를 높힘으로서 소결을 촉진하는 방법이 있다. 이미 언급한 바와같이 질화규소를 고온으로 가열하면 열분해가 발생한다. 열분해가 발생하면 항상 질소가 발생하게 되는데, 소결 분위기의 질소 가스압을 증가시킴으로써 열분해를 억제하고 소결 온도를 높히는 방법이 가스압 소결법(Gas Pressure Sintering)이다. 가스압 소결에서는 분위기 질소압을 10 MPa까지 증가시킴으로써 소결 온도를 2000°C 이상으로 증가시킬 수 있게 된다. 또 소결 과정 중에 10MPa의 범위 내에서 압력을 자유로이 제어할 수 있기 때문에 아직 치밀화가 충분치 않은 온도에서는 낮은 질소압으로, 일단 치밀화가 진행된 후에 높은 압력으로 하여 마지막 치밀화를 이루는 공정을 사용하여 우수한 물성의 소결체를 얻을 수 있다. 가스압 소결에 의한 소결체는 제품 형상에 대한 제한이나 까다로운 전처리 과정이 필요없이 우수한 물성을 갖는데, 특히 고온에서의 제조에 따라 독창적인 물성을 나타낸다. 이밖에도 소결 조제의 양과 종류 및 제조 공정을 변화시켜 소결체의 미세 조직을 제어하고 물성을 변화시키게 되지만 여기서는 생략하기로 한다.

현재 질화규소계 세라믹스의 세계적인 수준은 상온 곡강도 1630MPa, 1400°C 고온곡강도 800MPa, 섬유강화 복합재료를 제외하고  $K_{Ic}=12\text{MPa m}^{1/2}$ , 내열충격온도>1000°C, 신뢰도를 나타내는 Weibull Modulus>50 정도이다. 아직도 보다 넓은 활용을 위하여는 파괴인성의 증진과 신뢰도의 향상 등이 요구되며 이를 위하여 섬유강화 복합소재 등이 활발히 연구되고 있다. 탄화규소(Silicon Carbide)는

내열성이 우수하여 초기에 가스터빈용 세라믹스 소재로 고려된 바 있으나, 아직 실용화를 위하여는 파괴인성 등의 물성 향상이 이루어져야 할 것으로 생각된다.

### 3. 외국의 가스터빈용 구조 세라믹스의 연구개발

#### 3.1 미국

세라믹 가스터빈에 관한 연구를 가장 먼저 시작한 곳은 미국으로 1970년대부터 DARPA(Defense Advanced Research Projects Agency)의 주관으로 Ford 자동차사, Westinghouse사 등이 참여하는 연구 개발을 수행한 바 있다. Ford 자동차사는 200마력급의 자동차용 가스터빈엔진의 개발을 목표로, Westinghouse사는 30kW급 발전용 가스터빈의 개발을 목표로 하였다. 세라믹 가스터빈의 주요한 장점으로서는 비냉각에 의한 높은 효율성, 연료의 다양성, 배기 가스의 저공해성 등이 있다. 이 프로그램에 따라 Ford 자동차사는 1974년 자동차 엔진 부품 중에 세라믹스 부품을 일부 채용한 Torino라는 자동차를 시험운전하는데 성공하였다. 1976년 DOE(에너지성)와 NASA(항공우주국)가 DARPA의 프로그램에 참여하여 세라믹 가스터빈에 관한 연구 개발이 본격화되었다. 이 프로그램은 1980년에 종료되었는데, 그 결과를 살펴보면 다음과 같다. 개발된 세라믹스 부품은 각각 또는 조합된 상태로 1050°C에서 175시간, 1370°C에서 25시간 시운전한 결과 개발된 세라믹스 부품은 모두 성공적으로 시운전 시험을 통과하였다. 이 프로그램에 계속하여 1979년-1987년의 기간동안 DOE가 주관하여 AGT100과 AGT101(Advanced Gas Turbine) 프로그램을 시작하였다. 참여기관으로는 Norton-TRW, Garrett, Carborundum, Detroit Diesel, Ford 등의 기업과 Oak Ridge National Lab. 등의 국립 연구기관, 대학 등이었으며, 목적은 세라믹 가스터빈 엔진의 개발이었다. 1987년 AGT 프로그램이 종료되고 계속하여 1987년-1992년의 5년동안 DOE가 주관하여 ATTAP(Advanced Turbine Technology Application Project)를 수행하였는데, 그

목적은 AGT에서와 같은 것이었다. ATTAP의 결과 제조된 부품들은 1370°C에서 최대 속력으로 운전하여 100시간 동안의 시운전을 무사히 마쳤다. 1983년 미국은 정부출연 4,700만달러, 기업출자 1억 5,300만 달러를 투자하여 DOE주관의 CATHE(Ceramic Turbine for Advanced Heat Engines) 프로그램을 시작하였는데, 이는 열기관용 터빈엔진에 세라믹스 부품을 적용하는 프로그램이었다. 이 프로그램의 기간은 10년이며 주안점은 신뢰성이 높은 부품(Gas Turbine Rotor, Diesel Engine Piston 등)의 개발이었다. 이 프로그램은 세 가지로 나누어져 있는데, 소재의 개발, 설계 기술, Database와 수명 예측이 그것이다. 현재 세라믹스 엔진 부품을 상용화하는데 가장 큰 문제는 경제성이다. 자동차 회사나 엔진 제조회사에서 세라믹스 부품의 신뢰성이나 성능에 대하여는 매우 긍정적이지만 가격이 비싼 것이 문제되고 있다. 따라서 미국의 다음 프로그램은 세라믹스 부품의 경제성에 맞추어질 것인데, 그 이름은 CECHE(Cost-Effective Ceramic Heat Engine)이 될 것이며, 그 주요내용은 제조, 가공의 경제적인 공정 개발, 새로운 소재의 개발(예, 저열팽창계수 소재), 설계 기술의 개발, Database의 확대, 경제적인 양산 기술 개발 등으로 이루어질 것으로 생각된다.

미국의 Lycoming사에서는 항공기용 Turbine Engine에 적용하기 위하여 세라믹스 부품의 개발을 시도하여 왔다. 이러한 세라믹스 부품 개발의 목적은 다른 Turbine에서와 같이, 냉각 장치의 불요성, 중량 감소, 열효율 증가 등이다. 그들이 개발을 시도하였던 Blade와 Turbine Nozzle 등을 그림 3에 나타내었다.

#### 3.2 일본

일본에서는 가스터빈이 다른 엔진에 비하여 소형, 경량이며 냉각이 불필요하고 다양한 연료를 이용할 수 있으며 공해가 적다는 점에 착안하여 그 개발이 수행되어 왔는데, 내열성이 우수한 세라믹스 부품을 적용하면 터빈의 입구 온도(Inlet Temperature)를 높일 수 있고 열효율을 더욱 높일 수 있다는 것을 인식하고 세라믹 가스 터빈(CGT,

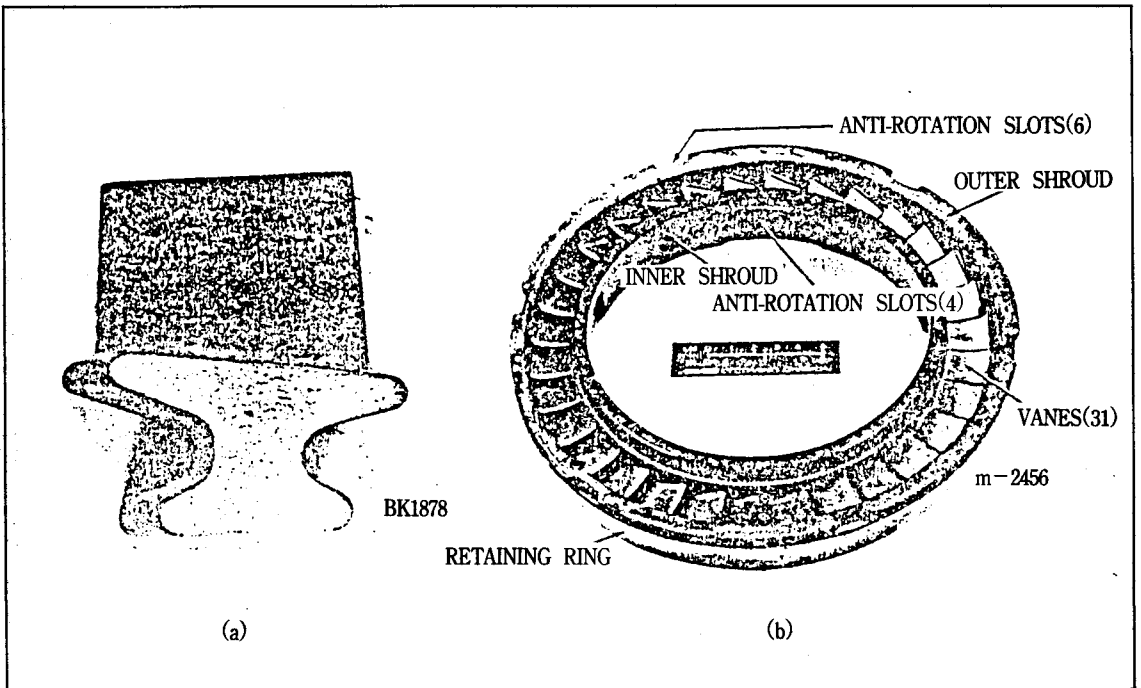


그림 3. (a) Single blade with circumferential root that is fabricated to net shape, and (b) multipiece ceramic nozzle.

Ceramic Gas Turbine)의 연구 개발을 수행하여 왔다. 세라믹 가스 터빈 프로그램은 일본 통산성의 Moonlight Project의 하나로 1988년부터 9년간 보조발전용(Co-Generation)과 운반이 가능한 3가지 종류의 가스 터빈을 개발하는 것을 목표로 터빈 메이커와 세라믹스 제조 회사 등의 3개 공동연구 그룹에 의해 수행되고 있다. 연구개발의 구체적인 목표는 입구온도 1350°C, 열효율 42% 이상의 300 kW급으로 환경 오염이 적은 재생식 CGT를 9년 내에 개발하는 것이다. 이 과제는 크게 2가지로 나누어지는데, 첫번째는 열효율 향상에 관한 것으로, 주로 터빈 메이커에서 요소 연구 및 설계 시운전 연구를 중심으로 실시되어왔다. 다음은 세라믹스의 터빈으로의 적용에 관한 과제로서, 대형의 복잡한 형상으로 1500°C에서의 강도가 400 MPa 이상, Weibull계수가 20이상, 상온 파괴인성이 15MPa·m<sup>1/2</sup> 이상인 고성능 세라믹스의 부품 제조 기술과 기본적으로 취약한 세라믹스 부품을 CGT 엔진에 적용하기 위한 설계 기술이 그것이다. 표 3은 CGT용 세라믹스 개발에 있어서의 개발 과제를

나타낸 것으로 이에따라 제작된 시작품을 그림 4에 나타내었다. 향후의 전망으로는 CGT에서 약 42%의 열효율이 얻어진다면 현재 약 20% 정도의 열효율을 갖는 소형 가스터빈이 획기적으로 발전되어 보조발전기, 이동식 발전기는 물론 자동차, 선박등에도 파급효과는 매우 크리라고 생각되며 이외에도 일본 통산성의 주관으로 140kW급의 CGT도 동시에 개발 중이다.

1990년 6월부터 석유 활성화 센터와 자원 에너지성이 주관하고 Toyota, Nissan, Mitsubishi등의 자동차 회사가 참여하여 운전 온도 1350°C의 가스터빈 개발 프로그램을 시작하였다. 연구개발 기간은 7년, 총연구비 약 150억엔으로 추정되며, 그 목적은 고효율, 저공해, 연료 다양화를 위한 터빈 엔진의 개발이다. 일본의 분석으로는 현재 미국의 기술 수준이 가장 앞서 있으며, 일본은 미국의 90%, 유럽은 미국의 95% 수준이며, 선진 각국이 비슷한 수준임을 알 수 있다. 현재는 실용화의 40% 수준으로 추정되고, 2000년대의 CGT시장규모는 약 4조원으로 추정된다.

표 3. 300kW급 CGT용 세라믹스 부품화의 기술 개발 과제.

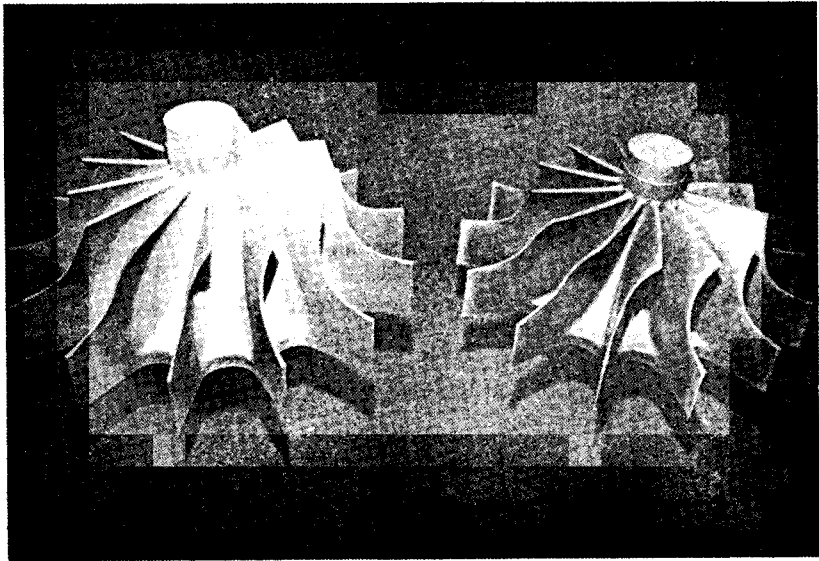
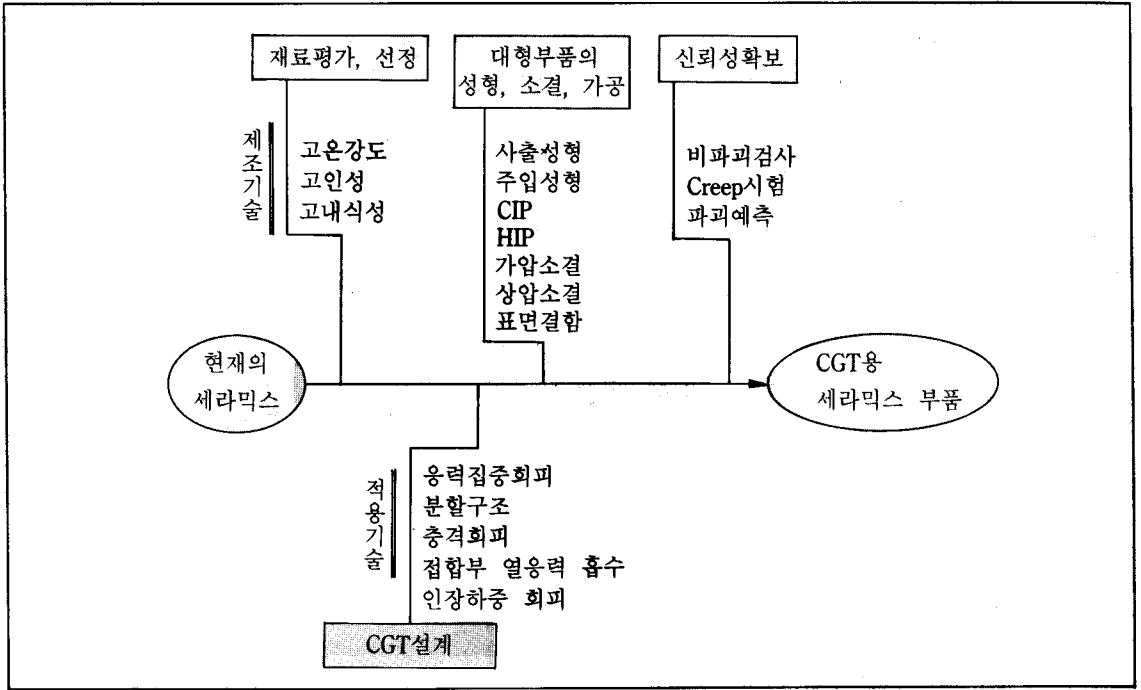


그림 4. 일본의 CGT 프로그램에 의해 제작된 가스터빈용 세라믹스 부품의 시제품의 예.



### 3.3 유럽

유럽의 경우에는 영국, 독일, 스웨덴 등에서 세라믹스에 관한 연구 개발을 지속적으로 수행하고 있으나 독일을 제외하고는 가스 터빈을 목적으로한 연구는 찾아보기 어려운 실정이다.

독일의 경우에는 1974년-1983년 동안 독일 연구 기술성의 주관으로 CGT연구개발 프로그램을 수행한 바 있으며, 1985년-1994년의 기간에는 Volkswagen, MTU등의 기업이 공동 참여하여 133마력급의 엔진을 개발하고 있다. 1987년부터, AGATA 프로그램을 독일의 BMW, Volkswagen, Benz, 스웨덴의 Volvo, 프랑스의 Pugeot등의 자동차 회사가 중심이되어 2축식 자동차 엔진을 개발하고 있다. 독일의 항공우주연구소(DLR)에서는 항공기로의 응용을 위한 섬유강화 복합소재 개발을 수행하고 있다. 섬유강화 복합재료는 세라믹스 가운데 파괴인성이 높고, 점진적인 파괴 현상을 나타내어 그 개발과 활용이 주목된다. 그림 5는 그러한 가운데 섬유강화 복합소재에 있어서 기계적 물성의 거동을 나타낸다.

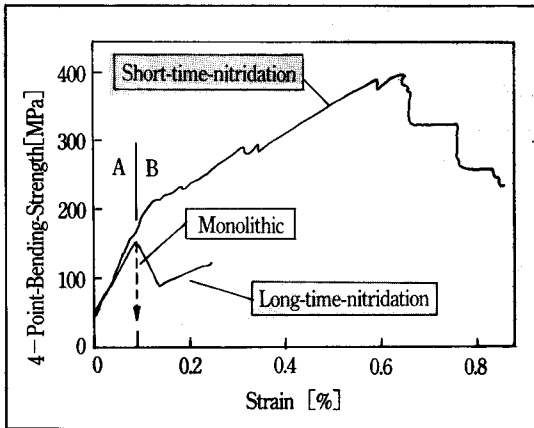


그림 5. Stress-strain behavior at room temperature for 10 v/o SiC fiber RBSN composite and unreinforced RBSN.

### 4. 국내 구조 세라믹스의 연구

국내 구조 세라믹스의 연구는 주로 내마모 부품, 섬유기계 부품, 내열성 부품등에 집중되어 왔다

(그림 6). 그것은 현재의 수요가 대부분 그러한 부품에 집중되어 있고, 또 국내 중소기업과 사회적인 요구가 현재의 문제점 해결을 시급히 요구하여 왔기 때문으로 생각된다. 그러한 가운데 최근 과거의 선도기술 개발사업(G7 Project)의 일환으로 자동차 엔진용 세라믹스 부품 개발이 진행중이며, 일부 엔진 관련 부품을 개발 중이다. 소재개발은 그동안 한국기계연구원, 한국과학기술원, 한국화학연구소 등의 정부 출연기관과, 산업과학기술연구소, 쌍용중앙연구소, 대한중석연구소 등의 기업 연구기관에서 활발히 진행되어, 현재의 소재 개발 수준은 세계적으로도 주목받는 위치이며 계속 그 격차는 줄어들고 있다. 그러나 설계기술의 부족, 소재와 설계 기술의 협력 부재 등의 문제점이 개선된다면 더욱 빠르게 발전될 수 있을 것으로 생각된다. 아울러 국내 자동차업계, 한국전력 등의 수요자측의 보다 적극적인 관심과 투자가 있어야 할 것으로 생각된다. 더욱이 UR, GR, CR, TR등의 갈수록 기술이전이 어려워지는 국제환경 속에 더이상 외국 기술의 구입이 어려워질 전망이다. 국내 기술개발에 과감하고 장기적인 안목의 투자가 이루어져야 한다. 이미 언급된 선진국의 예에서 알 수 있듯이, 7-10년 단위의 프로그램을 수 차에 걸쳐 수행하여 기술을 축적해 가야할 것이다. 또, 원료의 대부분을 수입하여 사용하는 문제의 해결을 위하여 원료 산업에 대한 획기적인 투자와 연구 개발 노력이 있어야 한다고 생각된다.

### 5. 결론 및 향후의 전망

세라믹 가스터빈 부품의 개발은 약 20여년간 지속되어 많은 노력과 투자가 이루어져 왔다. 그에 따라 구조용 세라믹스의 물성은 비약적으로 발전하여 왔으며, 과거에는 적용이 불가능했던 Rotor, Blade등의 부품이 상용화 되거나 그것이 시도되고 있다.(그림 7) 세라믹스 가스터빈의 실용화시기는 2000년대 초반으로 추정되며, 이를 위하여는 소재 개발, 설계 기술의 발전 등이 이루어져야 할 것으로 보인다. 이러한 기술의 발전에 따라 에너지, 환경 및 공해 등에 미치는 파급 효과는 매우 클 것으로 생각된다.

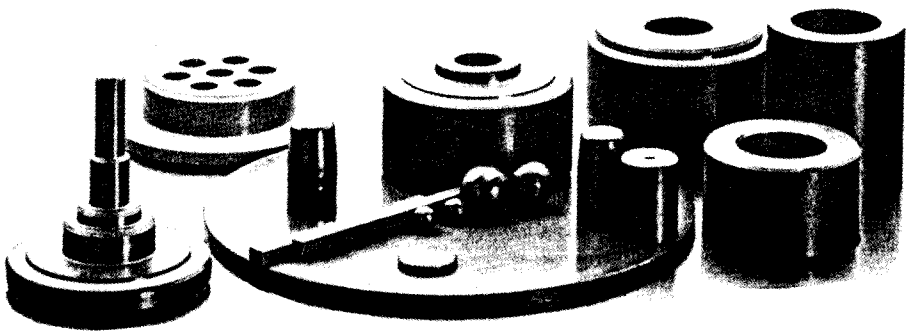
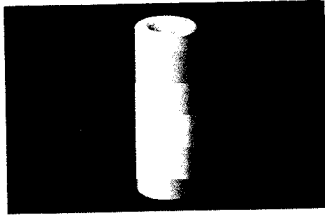
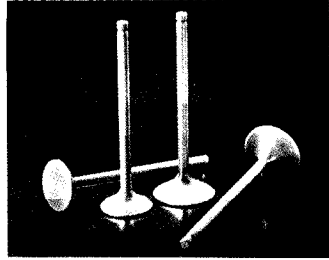


그림 6. 국내 생산업체에서 제조하는 세라믹스 내마모 부품(쌍용중앙연구소).



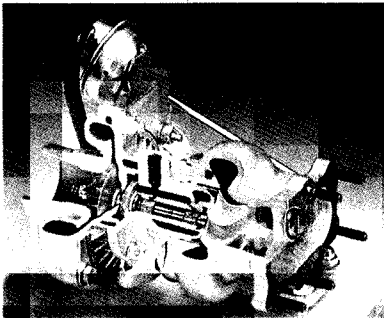
PISTON PIN (SSN)

(a)

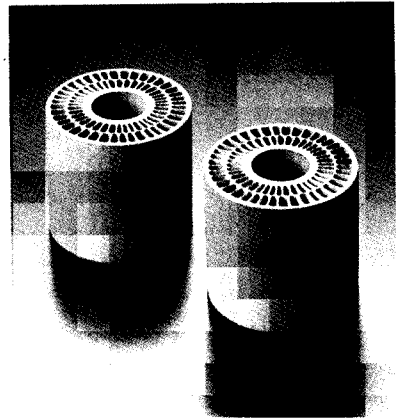


CERAMIC VALVE (SSN)

(b)



(c)



(d)

그림 7. Ceramic engine components : (a) piston pin, (b) ceramic valve, (c) turbocharger rotor, (d) ceramic complex rotor.

참 고 문 헌

1. P.Greil, "Opportunities and Limits in Engineering Ceramics", Powder Met. Int., Vol.21,(2), 1989, p40.
2. G.Ziegler, J.Heinrich, G. Woetting, "Review-Relationship between Processing, Microstructure and Properties of Dense and Reaction-Bonded Silicon Nitride", J. Mater. Sci., Vol.22, 1987, p3041.
3. D.R. Messier, E.J. Deguire, "Thermal Decomposition in the System Y-Si-Al-O-N", J. Am. Ceram. Soc., Vol.67, (9), 1984, p602.
4. G.R. Terwilliger, F.F. Lange, "Pressureless Sintering of  $\text{Si}_3\text{N}_4$ ", J. Mater. Sci., Vol.10, 1975, p1169.
5. A.F. McLean, E.A. Fisher, "Brittle Materials Design ; High Temperature Gas Turbine", Tech. Report AMMRC TR81-14, Army Materials and Mechanics Research Center, Watertown, MA02 172, 1981.
6. 岩永明男, "セラミックス ガスタービンの 開発", 工業技術, Vol. 6, 1991, p27.
7. B.Kanka, H.Schneider, "Continuous SiC-Fiber Reinforcement of Reaction Bonded Silicon Nitride (RBSN)", Key Engineering Papers, Vol.89-91, 1994, p429.
8. R.B.Schulz, D.R.Johnson, "Transportation, Energy, and Ceramics", Ceram. Eng. Sci. Proc., Vol.12, (7-8), 1991, p947.