

## 완도납석으로부터 제조된 $\beta$ -Sialon의 기계적 성질

이 홀림 · 장병국  
연세대학교 요열공학과  
(1986년 3월 20일 접수)

### Mechanical Properties of $\beta$ -Sialon Prepared from Wando Pyrophyllite

Hong-Lim Lee and Byung-Kook Jang  
Dept. of Ceramic Engineering, Yonsei University.  
(Received March 20, 1986)

#### ABSTRACT

$\beta$ -Sialon powders were prepared by the reduction-nitridation reaction from the mixture of Wando-pyrophyllite and graphite at 1350°C in  $N_2-H_2$  atmosphere. The  $\beta$ -Sialon powders were sintered at 1750°C by the pressureless sintering for 90 min and the hot-pressing for 60 min, respectively.

All the sintered bodies showed their relative densities higher than 94%. The values of M.O.R., fracture toughness ( $K_{IC}$ ), and hardness showed 32.9 kpsi, 2.9  $MN/m^{1.5}$ , 12.1  $GN/m^2$  for the pressureless sintered bodies and 48.6 kpsi, 4.6  $MN/m^{1.5}$ , 15.3  $GN/m^2$  for the hot-pressed bodies, respectively.

#### 1. 서 론

$\beta$ -Sialon은  $Si_3N_4$ , SiC 등과 함께 가스터어빈을 비롯해서 세라믹 엔진부품과 같은 내열 고온구조재료로서 뿐만 아니라 공구류와 내화재료로서도 크게 기대되고 있는 중요한 엔지니어링 세라믹스의 재료이다.<sup>1,2</sup> 특히 인공합성물 중에서  $\beta$ -Sialon이 주목받고 있는 것은  $Si_3N_4$ 에 비해서 소결성이 우수하고<sup>3</sup> 열충격저항성, 화학적 안정성, 산화저항성, 내충격강도, 내마모성 등이 우수한 물질로서<sup>1,2,4</sup> 1970년 초 영국의 Jack<sup>5</sup>와 일본의 Oyama<sup>6</sup> 등이 발견한 이래로 그 제조방법 및 소결기구와 열적·기계적 성질에 관해서 많은 연구가 진행되어 왔다.

$Si_3N_4$ , AlN,  $Al_2O_3$ ,  $SiO_2$ 의 조성으로 부터  $\beta$ -Sialon의 합성과 그 소결체의 특성에 관해서는 많은 연구가 진행되어 왔으나  $Al_2O_3$ - $SiO_2$ 계의 천연원료로부터  $\beta$ -Sialon의 합성에 관해서는 다소의 연구보고는 있

으나<sup>7, 19, 21</sup> 합성된 분말의 소결과 특히 그 기계적 특성에 대해서는 거의 연구보고된 바가 없다.

본 연구에서는 불순물이 비교적 적고 국산 천연원료인 완도납석으로부터 흑연을 환원제로 사용하여  $N_2-H_2$  분위기하에서 1350°C로 가열하여 반응시켜  $\beta$ -Sialon을 합성한 다음 1750°C에서 상압소결 및 고온프레스함으로써 소결체를 얻고 이 소결체에 대한 적임강도, 파괴인성, 경도, 밀도 등을 측정하고 미세조직을 관찰하여 기계구조용 재료로서의 사용가능성에 대하여 연구 검토하였다.

#### 2. 실험방법

##### 2.1 출발물질과 $\beta$ -Sialon의 분말 합성

$\beta$ -Sialon을 제조하기 위한 출발원료로서는 완도납석을 사용하였다. Table 1에서 알 수 있는 바와 같이 완도납석에는  $SiO_2$ 와  $Al_2O_3$ 가 각각 80.32%와 15.85%씩 포함되어 있으므로 원료구성상  $\beta$ -Sialon의 합성

Table 1. Chemical Composition of Wando Pyrophyllite

Component	SiO <sub>2</sub>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	CaO	MgO	Ig-loss
Wt (%)	80.32	15.82	0.13	Tr.	0.64	3.06
Total	96.17		0.77		3.06	

에 적합하다.

완도남석층의 SiO<sub>2</sub>와 흑연의 무게비 즉, 완도남석 (SiO<sub>2</sub>)/C = 1/1.2인 조성의 혼합분말이 β-Sialon 생성에 대한 최적조건임을 이용하여<sup>7)</sup> powder bed분말 (Si<sub>3</sub>N<sub>4</sub>/SiO<sub>2</sub> = 1/1; 몰비)<sup>7)</sup>로 짜서 실리콘이트 발열체를 사용한 전기로 속<sup>8)</sup>에서 80% N<sub>2</sub> - 20% H<sub>2</sub>의 혼합가스 분위기하에서 1350°C로 10시간 반응시켜 β-Sialon분말을 얻고 이것을 다시 공기중에서 700°C로 10시간 가열하여 잔류탄소를 제거하였다. 이와 같이 합성하여 탄소를 제거하기 전과 후에 대한 X선회절분석결과를 Fig. 1에 나타내었다. 사용된 시약은 흑연 (graphite : Junsei Chemical Co.), MgO (Wako Pure Chemical Industries), Si<sub>3</sub>N<sub>4</sub> (Soekawa Chemicals) 그리고 SiO<sub>2</sub> (Junsei Chemical Co., Ltd.)이었다.

2.2 β-Sialon의 소결

앞에서 합성한 β-Sialon 분말을 소결하기 위해서는 상압소결법과 고온프레스법을 사용하였다.

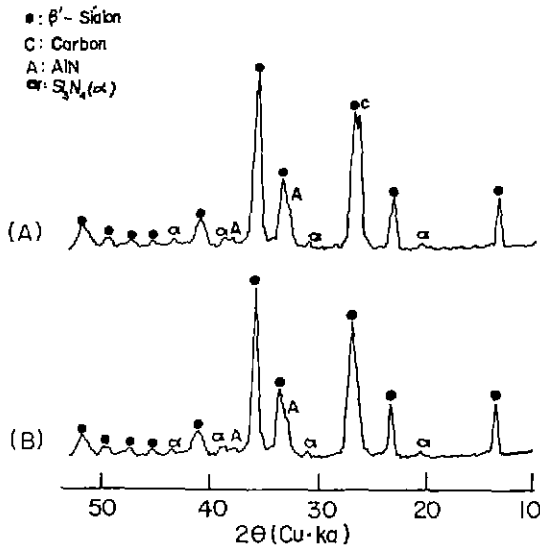


Fig. 1. X-ray diffraction pattern: (A) W. Pyrophyllite (SiO<sub>2</sub>)/C = 1/1.2, 1350°C, 10 hr, 80% N<sub>2</sub> - 20% H<sub>2</sub> (B) Reheating 700°C, 5 hr, in air.

Table 2. Compositions for Sintering

Notation	Composition (weight %)	Fabrication
A	synthesized sialon powder	1750°C, 90 mins, in N <sub>2</sub>
B	" "	Hot Pressing
C	sialon: MgO = 1 : 0.03	1750°C, 60 mins, in N <sub>2</sub>

먼저 상압소결을 하기 위해서는 합성된 β-Sialon 분말을 40 × 7mm의 4각 급형에 넣고 3.5 kg/mm<sup>2</sup>의 압력으로 서서히 전식 가압하여 성형한 것을 다시 22,500 psi의 압력으로 isostatic pressing하여 성형함으로써 성형밀도가 이론밀도의 60%인 균일한 성형체를 얻었다. 이 성형체를 다시 고온에서의 분해를 방지하기 위해서 powder bed (Si<sub>3</sub>N<sub>4</sub>/SiO<sub>2</sub> = 1/1)를 사용하여 흑연 용기속에 넣어서 흑연발열체로 된 수직로속에서 승온속도를 300°C/min로 하고 N<sub>2</sub> 가스를 50 cm<sup>3</sup>/min로 흘러보내면서 1750°C에서 90분동안 소결시켰다.

고온프레스법으로 소결하기 위해서는 앞에서 합성한 β-Sialon 분말을 지름이 30mm인 흑연 mold속에 넣어서 승온속도 1200°C/h, N<sub>2</sub> 분위기(1l/min), 5,000 psi의 압력하에서 1750°C로 1시간동안 소결시켰으며 소결촉진제로서 MgO<sup>12,13,14)</sup>를 사용하였다. 흑연mold는 내부가 BN으로 코팅되었으며 소결조건은 A, B, C의 세가지로서 Table 2에 나타내었다.

2.3 밀도 및 기공률의 측정

소결체의 밀도와 기공률은 KSL-3114에 따라서 측정하였으며 상대밀도는 이론밀도에 대한 부피밀도의 백분율로 하였다. 그리고 측정은 5번 행하여 평균 값을 얻었다.

2.4 상온 적임강도의 측정

소결된 β-Sialon 시편을 200 번, 800 번, 1,200 번의 다이아몬드 disk로써 연마하였으며 연마방향은 시편의 길이방향으로 하였다. 연마된 시편은 100 kg의 load cell을 사용하여 cross head speed 0.5 mm/min, span은 26.08mm가 되도록 3점 적임강도 시험을 행하였다.

2.5 경도 및 파괴인성 측정

시편을 SiC 연마지 # 400, # 1,000, # 1,200의 순서로 diamond paste를 사용하여 연마하였다. 연마가 끝난 시편은 초음파 세척기로 충분히 세척한 다음 vickers hardness tester를 사용하여 시편에 압입(indentation)하고 경도와 파괴인성의 값을 측정하였다. 파괴인성(K<sub>1c</sub>)의 값은 다음의 식<sup>15)</sup>에 의해서 계산하였다.

$$K_{IC} \Phi / H \sqrt{a} = 0.15 k (c/a)^{-3/2} \dots\dots (1)$$

여기서 H는 경도(N/m<sup>2</sup>),  $\Phi$ 는 억제상수(≈ 3), a는 압흔(indented mark)의 대각선길이의 반(half diagonal)(m), c는 균열의 길이(m)이며 k는 약 3.2로 하였다.

2.6 미세구조의 관찰

적임강도 시험에서 생겨나는 시험편의 파단면을 HF + HNO<sub>3</sub>의 희석용액으로 70°C에서 5분간 etching<sup>16)</sup>하여 초음파세척기로 세척한 다음 주사현미경으로 미세구조를 관찰하였다.

3. 결과 및 고찰

3.1 소결조건에 따른 밀도 및 기공율의 변화

상압소결법과 고온프레스법을 이용하여 1750°C에서 소결한  $\beta$ -Sialon의 소결체에 대한 밀도가 기공율을 측정할 결과를 소결조건 A, B, C(Table 2)에 따라서 Fig. 2에 나타내었다. 그림에서 알수 있듯이 상대 밀도는 어느 경우에도 94% 이상의 값을 보여주고 있으며 기공율은 0.4% 이하의 값을 나타내고 있다. 연구보고된 바에 의하면 Si<sub>3</sub>N<sub>4</sub>의 경우 고온프레스에 의한 소결체가 상압소결에 의한 것 보다도 밀도가 더 크며 기계적 성질도 보다 우수한 것으로 알려져 있다.<sup>14)</sup> 특히 소결조제로 MgO를 3wt% 첨가한 소결체인(C)의 경우에는 이론밀도의 98% 이상이나 되었는데 이것은 소결조제 MgO가  $\beta$ -Sialon 중에 포함되어 있는 산화물과 반응하여 소결 온도에서 액상을 형성함으로써 액상소결이 효과적으로 진행된 것으로 믿어진다.<sup>14, 18)</sup>

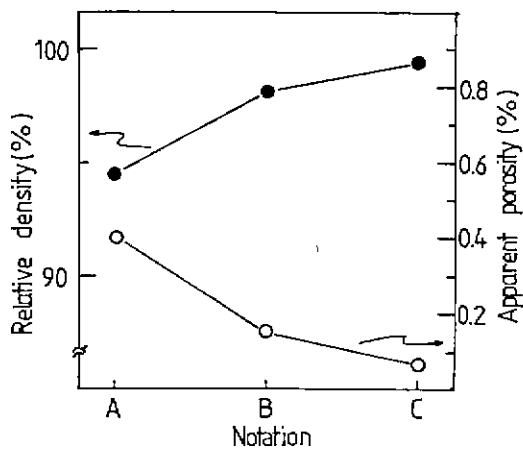


Fig. 2. Relative density and Apparent porosity after sintering at 1750°C.

3.2 적임강도와 미세구조

세라믹스의 기계적 강도를 증진시키기 위해서는 미세구조의 효과적인 제어가 필요하다. 취성(brittle) 세라믹스의 강도는 최약결합설(the weakest link theory)<sup>17)</sup>에 의해서 가장 약한 결합을 하고 있는 부위의 강도에 의해서 결정되므로 기공의 크기, 입자의 크기, 표면흠(surface flaw)의 크기 등을 작게 조절함으로써 강도를 증진시킬 수 있다.<sup>16)</sup>

Fig. 3은 소결조건이 A, B, C인 각각의 소결체에 대한 적임강도의 값을 나타내고 있는데 모두 30 kpsi 이상의 값을 보여주고 있다.  $\beta$ -Sialon을 소결할 때 상온강도를 증진시키는 데 큰 효과를 나타내는 첨가제로서 MgO가 보고된 바 있다.<sup>3)</sup> Fig. 3에서도 MgO를 소결조제로 첨가한 (C)의 경우가 소결조제를 첨가

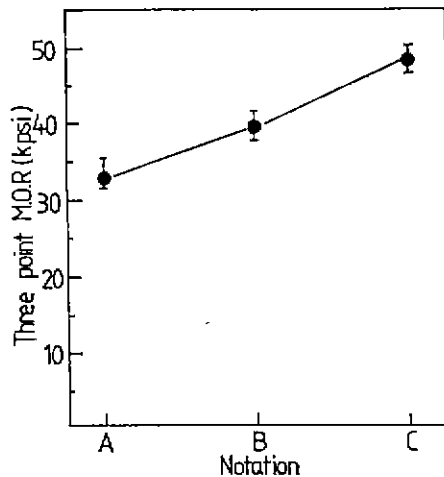


Fig. 3. Modulus of rupture after sintering at 1750°C.

하지 않은 (A)와 (B)의 경우보다 적임강도값이 더욱 큰 것을 알 수 있다. 또한 Fig. 2에서도 MgO를 첨가한 (C)의 경우가 밀도가 더욱 크고 기공율이 보다 적은 소결체를 얻을 수 있음을 알 수 있다.

Fig. 4는 적임강도를 측정할 후 그 파단면에 대한 SEM 사진으로서 소결조건 (A)의 경우에는  $\beta$ -Sialon 입자가 부분적으로 크게 성장하여 불균일한 입자분포를 보여주고 있으나 (B)의 경우에는 비교적 균일하게 분포하고 있으며 입자의 크기도 비교적 작은 것을 알 수 있다. 그 이유는 상압소결보다 고온프레스 소결법에 의해서 소결함으로써 입자의 성장이 억제되었으며 또한 (A)의 경우보다 소결시간이 30분 짧은 것도 그 원인이라고 생각된다. (C)의 경우에는 입자들이 다른 경우에 비해서 약간 더 주사화강이 진행된 것을 관찰할 수

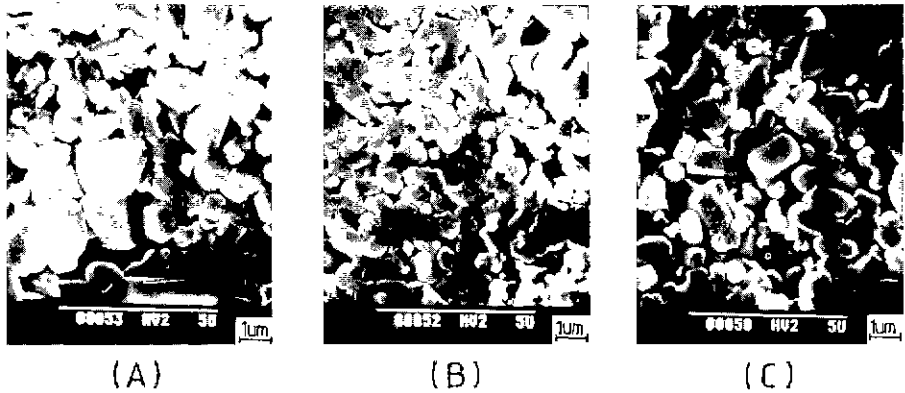


Fig. 4. The SEM photographs of fractured surfaces after MOR measurement.

있는데 이것은 Si<sub>3</sub>N<sub>4</sub>의 경우에 대하여 소결체의 입자를 주상화시킴으로써 강도가 더욱 증진된다는 보고<sup>19, 20)</sup>와 일치하여 Fig. 3에서 (C)의 강도가 다른 경우보다 큰 것을 나타내고 있다. 또한 입자가 주상으로 되는 것은 β-Sialon을 소결할 때 MgO, Y<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, lanthanide oxides를 첨가하면 β-Sialon 입자의 주상화를 촉진시키고 이에 따라서 상온적임강도가 증진된다는 연구보고<sup>21)</sup>와 잘 일치하고 있다.

3.3 경도와 파괴인성

Fig. 5에서는 (A), (B), (C) 각각의 소결조건에 대한 소결체의 경도값과 파괴인성(K<sub>1c</sub>)을 측정된 것을 나타내었다. 경도와 파괴인성은 (A), (B), (C)의 순으로 증가하고 있는데 이것은 Fig. 3과 비교해 보

면 강도값과 같은 경향을 보여주고 있다. 이것은 σ<sub>f</sub>를 강도, C를 균열 또는 흠의 크기, Y를 형상계수라고 할 때

$$\sigma_f = K_{1c} / (Y\sqrt{C}) \dots\dots\dots (2)$$

의 식<sup>17)</sup>으로 부터 알 수 있듯이 균열의 크기 C와 형상계수 Y가 일정하면 강도 σ<sub>f</sub>는 파괴인성 K<sub>1c</sub>에 비례한다는 이론에 잘 일치하고 있다. 또한 Fig. 4에서 (A), (B), (C)의 순으로 입자의 주상화가 진행되어 Aspect 비가 증가함으로써 조직이 보다 치밀해지고 이에 따라 균열전파(crack propagation)에 대한 저항이 증가하여 파괴인성이 증가하게 되고 따라서 꺾임강도가 증가한 것으로 생각된다. 그리고 경도값 역시 (A), (B), (C)의 순으로 증가하는 것은 (1)식으로 부터 경도 H는 파괴인성 K<sub>1c</sub>에 비례하는 것으로 부터 설명된다.

3.4 β-Sialon 소결체의 조성과 특정치 비교

각각의 소결조건에서 소결된 소결체에 대한 X선회절분석결과를 Fig. 6에 나타내었다. 어느것이나 모두 β-Sialon 이외에 X-phase가 관찰되고 있다. 이 X-phase<sup>22)</sup>는 일반적으로 β-Sialon 제조 때 흔히 존재하게 되는데<sup>23)</sup> Si<sub>16-2</sub>Al<sub>2</sub>O<sub>14-12</sub>N<sub>12-2</sub>의 일반식을 갖는다.<sup>23)</sup> 이 X-phase는 출발조성에 SiO<sub>2</sub>의 함량이 많이 존재할 때 잘 생성하는데<sup>24)</sup> 본 연구에서는 이러한 가능성이 충분히 많을 만큼 원료중에 SiO<sub>2</sub>의 함량이 많이 포함되어 있으며 β-Sialon 합성때 미량이 미반응으로 남아 있다가 소결할 때 X-phase가 나타날 가능성도 충분히 있다.

1600°C 이상에서는 X-phase는 액상으로 존재하는데 본 실험에서 소결온도가 1750°C 이므로 이 온도

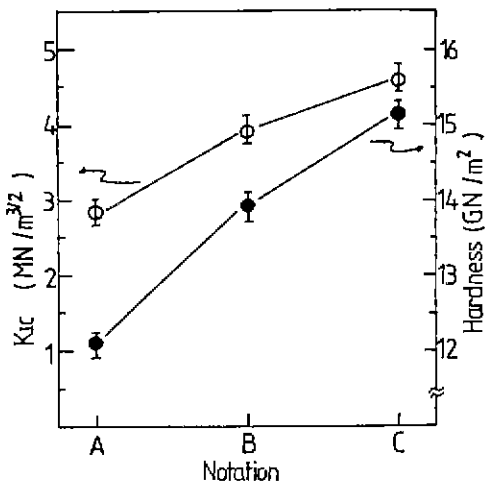


Fig. 5. K<sub>1c</sub> and Hardness after sintering at 1750°C.

Table 3. Properties of Various  $\beta$ -sialon and  $\text{Si}_3\text{N}_4$

Fabrication method	Material	Density (g/cm <sup>3</sup> )	R. Temp. M. O. R. (Kpsi)	K <sub>1c</sub> (MN/m <sup>3/2</sup> )	Hardness (GN/m <sup>2</sup> )	Ref.
1750°C, 90 min	Wancko Pyrophyllite	2.94	32.9	2.9	12.1	This Work(A)
Hot pressing	" "	3.08	48.6	4.6	15.3	This Work(C)
1650°C	Kaolin	3.06	30	—	—	27
1740°C, 1hr	Si <sub>3</sub> N <sub>4</sub> , AlN, Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	3.00	51.1	2.21	—	28
SYALON	" "	3.2	120	5	17.6	29
RBSN	Si <sub>3</sub> N <sub>4</sub>	2.4 - 2.8	28.4 - 42	3.6	8.8 - 10.7	17

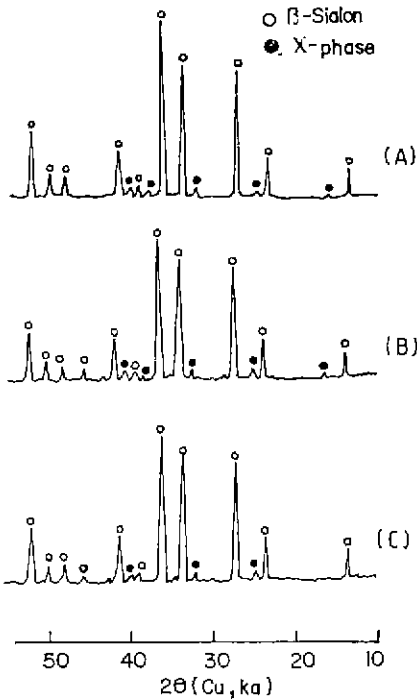


Fig. 6. X-ray diffraction patterns of surface sintered at 1750°C.

서 X-phase 가 액상으로 존재하여 액상소결에 의해서 소결이 촉진되어<sup>25,26)</sup> Fig. 2에서 볼 수 있는 바와 같이 치밀한 소결체가 얻어진 것으로 생각된다. 그러나 이 X-phase 는 입계상으로 존재하여 기계적인 강도를 저하시키는 원인이 되므로 이 X-phase 를 최소화시키는 것이 중요한 것으로 생각된다.<sup>20)</sup>

Table 3 에는 본 연구에서 측정된 특성치와 이미 보고된 문헌치<sup>27-29)</sup> 를 비교하여 나타내었다. Table 3 에서 알 수 있는 바와 같이 본 연구에서 천연의 완도납석으로부터 합성한  $\beta$ -Sialon 의 소결체로부터 얻

은 밀도, 상온강도, 파괴인성, 경도등은 반응소결한 Si<sub>3</sub>N<sub>4</sub> 에 대한 값<sup>17)</sup> 이나 Kaolin<sup>27)</sup> 으로부터 합성한 값보다 우수하며 또한 순수한 시약으로부터 합성한 Sialon 의 상품에 대한 값들과 견줄만한 것을 알 수 있다.

#### 4. 결 론

완도납석으로부터 탄소(graphite)분말을 환원제로 하고 1350°C, 80% N<sub>2</sub> - 20% H<sub>2</sub> 분위기 중에서 환원과 질화의 동시반응에 의해서  $\beta$ -Sialon 분말을 합성하고 이 분말을 1750°C, N<sub>2</sub> 분위기하에서 상압소결 및 고온프레스하에 소결성, 소결체의 조성, 그리고 기계적인 특성을 측정하였으며 다음과 같은 결론을 얻었다.

- 1) 상압소결과 고온프레스에 의해서 얻어진 소결체 모두 이론밀도의 94% 이상을 나타내었다.
- 2) 소결체의 밀도, 경도, 꺾임강도, 파괴인성등은 상압소결의 경우보다 고온프레스에 의한 것이 더욱 향상되었으며 특히 소결조제로서 MgO 를 3 wt% 첨가한 것이 가장 우수하였다.
- 3) 천연산의 납석원료로부터 합성한  $\beta$ -Sialon 분말을 소결하여 얻은 소결체의 기계적 특성치는 반응소결 Si<sub>3</sub>N<sub>4</sub> 보다 우수하였으며 시약으로부터 상품용으로 제조한 Sialon 과 견줄만한 비슷한 특성을 나타내고 있어서 앞으로의 전망이 크게 기대된다.

#### 참 고 문 헌

- 1) K. H. Jack, "Nitrogen Ceramics", *Trans. J. Brit. Ceram.*, **72**, 376 - 384 (1973).
- 2) K. H. Jack, "Sialons and Related Nitrogen Ceramics", *J. Mat. Sci.*, **11** (6) 1135 - 1158 (1976).
- 3) H. Nakamura and S. Umebayashi, "The effects of Additives on Bending Strength of Hot-pressed  $\beta$ -Sialon with Z=1", *Yogyo-Kyokai-Shi*, **93**

- (4), 175 - 181 (1985).
- 4) N. E. Cother and P. Hodgson, "The Development of Sialon Ceramics and Their Engineering Application", *Trans. J. Bril. Ceram. Soc.*, **81**, 141 - 144 (1982).
  - 5) K. H. Jack and W. I. Wilson, "Ceramics Based on the Si-Al-O-N and Related Systems", *Nature* (London), *Phys. Sci.*, **238** (80), 28 - 29 (1972).
  - 6) Y. Oyama and O. Kamigaito, "Hot Pressing of  $\text{Si}_3\text{N}_4$  -  $\text{Al}_2\text{O}_3$ ", *Yogyo - Kyokai - Shi* **80**(8), 327 - 336 (1972).
  - 7) 이홍림, 장병국, 이형복, "완도납석으로부터  $\beta$ -Sialon의 합성(2), 요업학회지, **22** (5), 35-42 (1985).
  - 8) 이홍림, 신현곤, "완도납석으로부터  $\beta$ -Sialon의 합성", 요업학회지, **21** (1) 5 - 10 (1984).
  - 9) M. Mitomo and Mihashi, "The Preparation of Sialon powder from Kaolinite", *Yogyo - Kyokai - Shi*, **91** (10), 443 - 449 (1983).
  - 10) J. K. Lee and I. B. Cutler, "Sinterable Sialon powder by Reduction of Clay with Cabon and Nitrogen", *Am. Ceram. Soc.*, **58**, 867 - 871 (1979).
  - 11) Shimada and Hitata, "Nitrides Formd by Reducing Process of the Shirasu Glass with Carbon", *Yogyo - Kyokai - Shi*, **88**(8), 489-496 (1980).
  - 12) J. G. Lee and I. B. Cutler, "Reactions in the  $\text{SiO}_2$  - C -  $\text{N}_2$  System", Presented at NATO-ASI Nitrogen Ceramics, 175 - 182 (1976).
  - 13) M. H. Lewis, "The Microstructure of Sintered Si - Al - O - N Ceramics", *J. Mat. Sci.*, **15**, 103 - 113 (1980).
  - 14) A. Giachello, P. Martinengo and P. Pooper, "Sintering and Properties of Silicon Nitride Containing  $\text{Y}_2\text{O}_3$  and  $\text{MgO}$ ", *Am. Ceram. Soc. Bull.*, **59** (12) 1212 - 1215 (1980).
  - 15) A. G. Evans, E. A. Charles, "Fracture Toughness Determination by Indentation", *ibid.*, **59**, 7 - 8, 371 - 372 (1976).
  - 16) M. Mitomo, N. Kuramoto and Y. Inomata, "The Strength of Reaction Sintered  $\beta$ -Sialon", *Yogyo - Kyokai - Shi*, **88** (8), 489 - 496 (1980).
  - 17) 이홍림, 엔지니어링 세라믹스, 번역판, 반도출판사 (1986).
  - 18) G. E. Gazza, "Hot - pressed  $\text{Si}_3\text{N}_4$ ", *J. Am. Ceram. Soc.*, **56** (12), 662 (1973).
  - 19) F. F. Lange, "High - Temperature Strength Behavior of Hot - pressed  $\text{Si}_3\text{N}_4$ ", *J. Am. Ceram. Soc.*, **57** (2), 84 (1974).
  - 20) R. R. Wills, R. W. Stewart and J. M. Wimmer, "Effects of Composition and X - phase on the Intrinsic Properties of Reaction - Sintered Sialon", *Am. Ceram. Soc. Bull.*, **56** (2), 194 - 200 (1977).
  - 21) J. G. Lee and I. B. Cutler, "High - Performance Ceramics", 요업학회지, **14** (1), 33 - 49, (1977).
  - 22) Y. Oyama, "Solid Solution in the System  $\text{Si}_3\text{N}_4$  -  $\text{Al}_2\text{O}_3$  - AlN", *Yogyo - Kyokai - Shi*, **82** (7), 351 - 357 (1984).
  - 23) L. J. Gaukler and G. Petzow, "Contribution to the Phase Diagram  $\text{Si}_3\text{N}_4$  - AlN -  $\text{Al}_2\text{O}_3$  -  $\text{SiO}_2$ ", *J. Am. Ceram. Soc.*, **58** (7 - 8), 346 (1975).
  - 24) R. R. Wills and J. H. Wimmer, "Fabrication of Reaction - Sintered Sialon", *J. Am. Ceram. Soc.*, **60** (1 - 2), 64 - 66 (1977).
  - 25) M. Mitomo and H. Suzuki, "The Formation of Single phase Si - Al - O - N Ceramics", *Yogyo - Kyokai - Shi*, **86** (11), 526 (1978).
  - 26) M. Mitomo, N. Kuramoto and Y. Inomata, "Fabrication of High Strength  $\beta$ -Sialon by Reaction Sintering", *J. Mater. Sci.*, **14**, 2309 - 2316 (1979).
  - 27) 이준근, "산화물의 Carbothermal Reduction에 의한 고급 요업재료의 합성", 요업학회지, **15**(4), 224 - 227 (1978).
  - 28) R. R. Wills, R. W. Stewart and J. M. Wimmer, "Effect of Composition and X - phase on the Intrinsic Properties of Reaction - Sintered Sialon", *Am. Ceram. Soc. Bull.*, **56** (2), 194 - 203 (1977).
  - 29) N. E. Cother and P. Hodgson, "The Development of Sialon Ceramics and Their Engineering Applications", *Trans. J. Br. Ceram. Soc.*, **81**, 141 - 144 (1982).