

알루미나 원료형상이 RBAO-SiC 세라믹스 제조에 미치는 영향

김일수 · 강민수* · 박정현*

동의대학교 재료공학과

*연세대학교 세라믹공학과

The Effects of used Alumina Shapes on the Processing of RBAO-SiC Ceramics

Il-Soo Kim, Min-Soo Kang* and Jeong-Hyun Park*

Dept. of Materials Eng., Dongguk Univ., Pusan 614-714

*Dept. of Ceramic Eng., Yonsei Univ., Seoul 120-749

(1998년 2월 9일 받음, 1998년 5월 4일 최종수정본 받음)

초 록 반응결합 알루미나 (RBAO)-SiC 세라믹스를 Al 금속분말/Al₂O₃/SiC 분말혼합체로부터 제조하였다. 하소알루미나와 용융알루미나를 알루미나 분말공급원으로 사용하였다. 출발원료는 단일구경 (3mm) 또는 혼합구경 (3mm+5mm) 의 ZrO₂ 볼로 어트리션 밀링 하였다. 정수압 성형한 시편을 1100℃까지 1.5℃/min로 1차소성한 다음, 1500℃~1600℃까지 5℃/min으로 2차소성하였다. 용융알루미나와의 분말혼합체가 하소알루미나와의 분말혼합체보다 분쇄가 더욱 잘 되었다. 또한 단일구가 혼합구보다 분쇄에 더욱 효율적이었다. Al₂O₃ 형태에 따른 반응소결거동에는 별 차이가 없었다.

Abstract Reaction bonded Al₂O₃ (RBAO)-SiC ceramics were prepared from the Al/Al₂O₃/SiC powder mixture. The calcined alumina and fused alumina were used as the raw Al₂O₃ powder. The same sized (3mm) and differently sized (3mm+5mm) ZrO₂ balls were used in attrition milling of starting powders. The effect of Al₂O₃ powder shapes on the milling efficiency and reaction sintering was investigated. After attrition milling, isopressed compacts were preheated to 1100℃ with a heating rate 1.5℃/min and then sintered at the temperature range 1500 to 1600℃ for 5 hours with a heating rate 5℃/min. The powder mixture with fused alumina was effectively comminuted than the mixtures with calcined alumina. And the same sized balls milled more effective than the differently sized balls. The reaction sintering behavior differed not depending on the shapes of Al₂O₃ powder.

1. 서 론

알루미나는 강도, 경도, 내마모성, 내열성, 내화학성 등의 제반 물성이 우수하면서, 비교적 원료가 풍부하며, 정밀도가 좋은 소결체를 쉽게 얻을 수 있는 장점을 갖고 있다. 그러나 세라믹스 특유의 단점인 파괴인성 및 신뢰성이 알루미늄에서도 역시 문제가 되고, 경도가 높은 관계로 가공성이 나빠서 최종가공비용이 많이 드는 단점이 있다. 인성과 신뢰성은 ZrO₂, SiC, TiC 등의 강화제로 복합재료화하여 향상시키고 있으며, 가공성의 개선을 위해 연구되는 기술이 near net shape 기술이다. 소성전과 소성후의 제품의 크기와 형상에서 별 차이가 없으면, 최종 연마비용을 대폭 줄일 수 있고 따라서, 전체적인 제조비용을 많이 절감할 수 있다. 실제로 엔지니어링 세라믹스 제조비용중 차지하는 마무리 가공 비용은 20~44% 정도에 이르는 것으로 알려지고 있다. near net shape로 생산가능한 제조공정에는 주입(Infiltration)법, 반응소결법, 용융산화법(DIMOX process)이 있다. 반응소결법으로 현재까지 제조된 대표적인 재료로는 반응결합질화규소(RBSN)와 반응결합탄화규소(RSiC)가 있다.

RBAO(Reaction Bonded Aluminium Oxide, 반응결

합 알루미나)는 금속 Al이 산화하면서 생기는 부피팽창(128%)이 소결수축을 상쇄함으로써, near net shape Al₂O₃ 세라믹스를 얻을 수 있는 방법으로서 1989년부터 본격적으로 연구되기 시작하였다.¹⁾ 이론적으로는 기공율 22%인 Al 분말성형체를 반응소결하면 수축이 전혀 없는 Al₂O₃ 세라믹스를 얻을 수 있다. 그러나 Al은 고상산화속도가 매우 느리고, 성형체 내부로의 산소이동이 어렵기 때문에 Al만의 성형체로는 이런 목적을 이루기 어렵다. 그래서 현실적으로는 금속분말의 많은 부분을 Al₂O₃로 대체하여 소결체를 얻고자 노력되고 있다.^{1~3)} RBAO는 세라믹 분말과 가소성이 있는 Al 금속분말이 함께 생소지로 성형되므로 생소지 강도가 높다는 장점도 있다. 다른 엔지니어링 세라믹스의 성형에는 적절한 생소지 강도를 얻기 위해 유기물질이 결합체로 첨가된다. 그런데 RBAO는 Al 분말이 자체적인 결합체 역할을 하므로 유기결합체가 필요없다. 따라서 소성전에 선반작업 등을 통해 미리 최종모양으로 가공하기가 용이하고, 유기물질이 열처리중 타면서 발생하는 제조상의 문제점도 해결된다.

RBAO 세라믹스 제조를 위해 첨가되는 Al 분말은 입자 크기가 작을수록 바람직하다. 그러나 Al 입자는 연성이 대단히 커서, 분쇄가 잘 되지 않기 때문에 입자크기가 작은

Al 분말을 얻기는 대단히 어렵고 가격도 비싸다. Al 분말의 분쇄에는 어트리션 밀이 적합한데,^{4,5)} RBAO의 경우는 Al과 Al₂O₃이 함께 혼합분쇄되므로 Al 만의 분쇄와는 조금 분쇄경향이 다르다. 이들의 혼합, 분쇄거동에 대해서는 다소의 연구결과가 있다.^{1,6,7)} 대체로 Al은 구형 보다는 판형입자를 사용하는 것이 미립의 Al을 얻는데 유리한 것으로 알려졌다. 그러나 경제성을 고려한다면 Al의 경우는 판형입자가 구하기도 쉽고 가격도 저렴하므로 그 사용에 이견이 있을 수 없다. Al₂O₃의 경우는 하소알루미나보다 용융알루미나가 1.5~2 배 비싸므로 그만큼 효용성이 있는지는 검토해 보아야 할 것이다.

본 연구에서는 RBAO 세라믹스에 일정량의 SiC 입자를 첨가하고, 용융알루미나와 하소알루미나 중 어떤 원료혼합이 우수한 분쇄특성을 가지는 지를 확인해 보고자 하였다. 또 혼합 및 분쇄방식, 성형압 크기, 소성조건을 고정하여,

소결체를 얻었고, 소성 중 무게 및 길이 변화, 상분석과 미세구조 관찰을 통하여 그 결과를 고찰하고자 하였다.

2. 실험 방법

표 1에 출발원료의 평균입자크기와 공급원을 나타내었다. Al₂O₃와 Al의 기본조성비는 65:35 (vol.%)로 하였다. SiC 강화재 첨가비율은 Al이 전량 Al₂O₃로 산화됨을 가정하고 적절한 첨가량으로 연구된⁸⁾ 10vol%로 하였다. 평량한 시료를 어트리션 밀(고려소재개발, KMD-1B)로 분쇄 혼합하였다. 용기는 Al₂O₃로 된 것이었으며, 임펠라는 ZrO₂, 회전축은 테프론으로 코팅된 강을 사용하였다. 아세톤을 분쇄용매로 사용하였으며, 분쇄매질은 ZrO₂ 붙이었는데 직경 3mm 단일구를 쓰거나, 직경 3mm와 5mm를 50vol%씩 섞은 혼합구를 사용하였다. 이렇게 혼합구와 단

Table 1. The average particle sizes (from supplier's data) and suppliers of starting materials.

	calcined Al ₂ O ₃	fused Al ₂ O ₃	Al	ZrO ₂	SiC
average particle size(μm)	0.4	3.0	50	0.05	2.2
Supplier	Alcoa	Wako	Junsei	Tosoh	Norton

일구로 따로 분쇄한 이유는 Al분쇄에는 혼합구가 효과적이거나, 세라믹 분말의 분쇄에는 단일구가 효율적이었던 연구결과⁹⁾에 바탕을 두고, 좀 더 고찰하기 위해서였다. 분말과 용매, 볼의 부피비는 10vol% 분말+40vol% 아세톤+50vol% 볼로 하였다. 회전속도는 700 rpm으로 하였으며, 분쇄 효과를 측정하기 위하여 밀링 1시간 후 시료의 일부를 채취하고, 7시간을 더 분쇄하였다. 총 8시간을 분쇄한 분말 혼합체는 석고판을 간 거름종이 위에 부어 습분을 제거하였으며, 유발로 가볍게 응집체를 분리한 후 출발 원료로 하였다. 1시간 후와 8시간 후 채취한 시료는 XRD를 통하여 상분석을 하였고, 입도분석과 비표면적을 측정함으로써 분쇄 효과를 알아보려고 하였다.

각 원료혼합은 100Kgf로 일축성형한 후 300MPa로 냉간정수압성형하였다. 성형된 시편은 무게와 직경, 두께를 측정 후, 1100℃까지 분당 1.5℃의 승온속도로 1차소성하였고 5시간 유지 후 로냉하였다. 1차소성 후 무게와 직경을 측정함으로써 밀도와 산화율을 계산하였다. 1차 소성한 시편은 1500℃, 1550℃, 1600℃로 2차소성하였으며, 이때의 승온 속도는 5℃/min, 최고 온도를 5시간 유지한 후 로냉하였다. 한 조건 당 시편은 세 개였다. 소성된 시편의 무게와 직경, 두께를 다시 재어 밀도와 산화율을 계산하였고, XRD 분석으로 상분석을 하였다. SEM으로는 미세구조를 관찰하였다. 시료의 표기는 다음의 예와 같이하였다.

예) C S 3 8 : 하소알루미나, SiC와 함께 3mm 볼

① ② ③ ④ 로 8시간 분쇄한 시료

① 알루미나의 종류, C: 하소알루미나, F: 용융알루미나

② 강화재의 종류, S: SiC, Z: ZrO₂

③ 어트리터 볼 크기, 3: 3mm만, 5: 3mm+5mm

④ 분쇄시간, 1: 1시간 후, 8: 8시간 후

실험과정을 도표로 나타내면 그림 1과 같다.

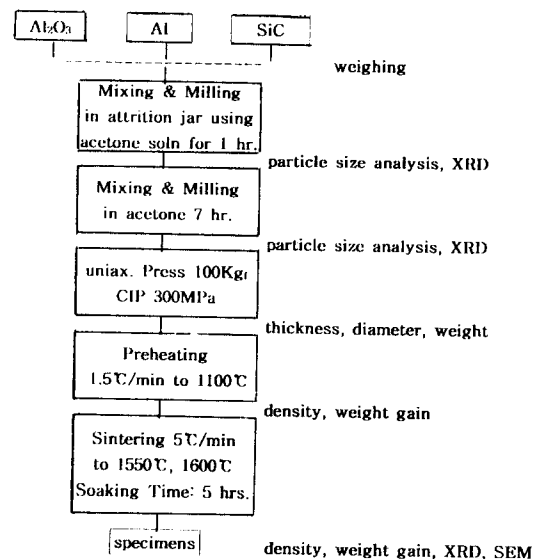


Fig. 1. Flow chart of experimental process.

3. 결과 및 고찰

3.1. 분쇄거동 및 상변화에 미치는 알루미나 형상의 영향

시료의 분쇄에 따른 입도와 비표면적은 1시간 후와 8시간 후에 현격한 차이를 나타내고 있었다. 그림 2는 CS31, CS38 시료의 입도분석결과인데, 넓은 범위에 걸쳐 분포했던 입자크기가 8시간 후엔 평균입자크기를 중심으로 거의

Table 2. The average particle sizes and specific surface areas of powder mixtures after attrition milling.

	CS31	CS38	CS51	CS58	FS31	FS38	FS51	FS58
average particle size(μm)	8.75	0.83	6.52	0.94	3.52	0.75	6.50	0.85
specific surface area(m^2/cc)	2.59	9.28	2.89	7.96	3.06	9.75	2.16	8.61

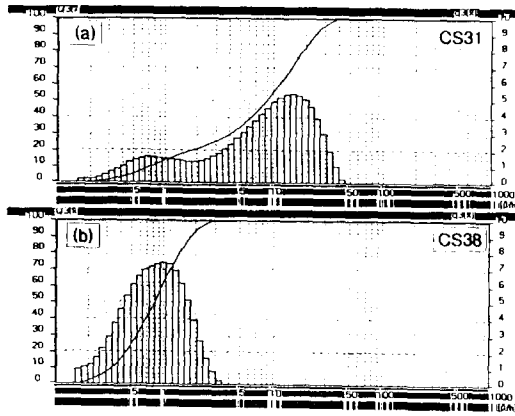
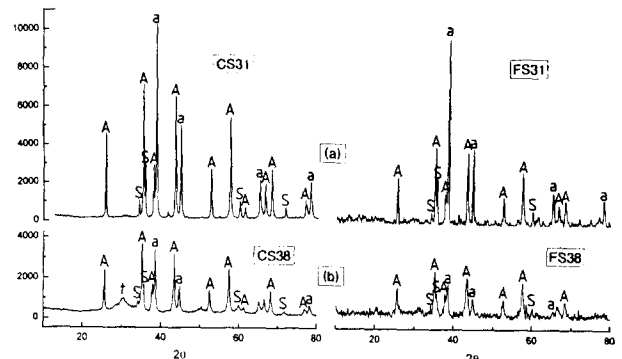
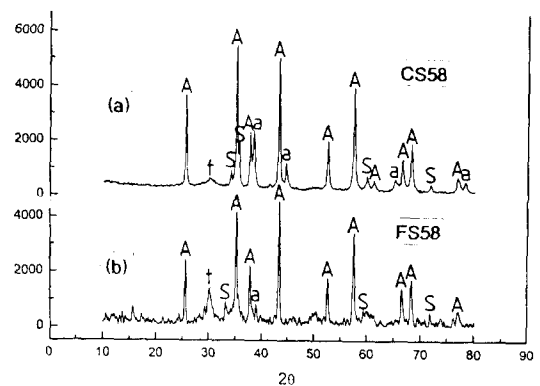


Fig. 2. The Effect of milling time on particle size distribution (a) after 1 hr. (b) after 8 hrs.

대칭분포하고 있음을 알 수 있다. 표 2에 모든 시료의 평균 입자크기와 비표면적을 나타내었다. CS3 시료의 경우, 어트리션 밀 1시간 후의 평균입자크기와 비표면적은 각각 $8.75\mu\text{m}$ 와 $2.59\text{m}^2/\text{cc}$ 였는데, 8시간 밀링을 한 후, 그 값이 $0.83\mu\text{m}$, $9.28\text{m}^2/\text{cc}$ 로 변화함으로써 입도가 미세화 되었음을 알 수 있다. 하소알루미나의 경우에는 초기(1시간 후)에는 혼합구의 분쇄효과가 더 나았으나, 8시간 후에는 단일구가 더 나은 분쇄효과를 보이고 있다. 또 용융알루미나의 경우에는 일관되게 단일구의 분쇄효과가 나은 것으로 나타나고 있다.

표 2에 나타나는 전체적인 경향은 용융알루미나가 하소알루미나보다 더 나은 분쇄효과를 갖는다는 것이다. 특히 FS3 시료는 초기에도 입자크기감소가 대단히 큼을 볼 수 있다. 어트리션 밀의 경우, 延·展性이 있는 Al 입자는 입자 전체면에 반복되는 충격과 전단작용에 의해 입자가 퍼지고 깎이거나 잘림으로서 분쇄가 이루어진다. 모서리가 없는 하소알루미나보다는 각이 진 입자형상인 용융알루미나가 이런 작용을 도우는데 더욱 효과적이기 때문에 이런 결과를 보였을 것이다.

CS31, CS38, FS31, FS38 시료들을 X-선 회절분석한 것이 그림 3이다. peak intensity를 고려하면 8시간 후의 peak가 1시간 후의 peak에 비해 현저히 낮아졌으며, base line이 상승한 것을 알 수 있다. 이는 격렬한 분쇄로 인하여 입자가 미세화되고, 일부는 마쇄에 의한 비정질화되었음을 의미한다.¹⁰⁾ 또한 8시간 분쇄한 XRD 결과에서는 1시간 분쇄한 것에 비해 금속 Al peak가 현저히 감소했는데, 이는 분쇄중에 비정질상으로 산화 또는 수화되었기 때문이다.³⁾ SiC peak가 감소한 것도 미세화에 의한 영향이라고 볼 수 있을 것이다. 특기할 것은 8시간 후의 그래프 상의 $2\theta = 30^\circ$ 에서 작고 넓은 peak가 하나 새로 띄는 것이다. 이것은

Fig. 3. The effect of milling time and used alumina type on phase changes of powder mixture (a) after 1 hr. (b) after 8 hrs (A: Al_2O_3 , t: $t\text{-ZrO}_2$, a: Al, S: $\alpha\text{-SiC}$)Fig. 4. The effect of used alumina type on phase changes of powder mixture (a) CS58 (b) FS58 (A: Al_2O_3 , t: $t\text{-ZrO}_2$, a: Al, S: $\alpha\text{-SiC}$)

tetragonal ZrO_2 peak로서, 출발물질에 포함되지 않았던 이 ZrO_2 는 분쇄중에 임펠라와 볼로부터 갈려나온 것이다. 이것은 뒤의 SEM 결과에서도 확인된다. 용융알루미나를 사용한 경우에 tetragonal ZrO_2 peak를 제외한 모든 상의 peak intensity는 하소알루미나를 사용한 경우에 비해 낮게 나타나고 있다. 이것은 용융알루미나와 함께 분쇄되었을 때 미립자화, 비정질화가 더욱 많이 이루어졌음을 의미하는 것으로서, 입자크기가 작았던 표 2의 결과와도 합치되는 부분이다.

그림 4는 CS58과 FS58의 XRD 결과이다. 그림 3의 결과와 크게 다르지 않은 경향이다. 그러나 FS58의 경우에는 FS38에는 거의 보이지 않았던 tetragonal- ZrO_2 peak가 높게 나타나고 있으며, Al peak가 대단히 낮다는 것이 특기할 점이다. 혼합구의 사용이 Al 입자의 분쇄에는 더 효과적이는데,^{4,5,9)} FS58의 경우 이런 경향이 아주 뚜렷이 나타나고 있다. 또한 $t\text{-ZrO}_2$ peak가 크게 나타나는 것은 불과

임펠라로부터 잘려나온 ZrO_2 가 많았음을 의미하는 것으로, 불 배열이 불균일한 혼합기와 각이진 입자와의 충격, 전단작용이 많이 일어났기 때문이라고 해석할 수 있다.

3.2. 소성거동 및 상변화에 미치는 알루미나 형상의 영향

시편의 성형성은 Al 분말의 가소성에 의한 입자결합능력 때문에 좋았다. 성형한 시편을 1차소성하였다. 분쇄를 통해 작아진 Al 입자는 대기중의 산소와 수분과 접촉함으로써 표면에 유리상의 산화막, 수화막이 존재하며, 이들 상이 Al_2O_3 로 바뀌는 온도는 $300^\circ C \sim 600^\circ C$ 이고, 분쇄용매로부터 입자표면에 흡착된 H_2O , H_2 , C_2H_4 상이 탈착되는 온도가 $200^\circ C \sim 500^\circ C$ 이므로^{2,3)} 승온에 유의하여야 한다. 한편 Al 입자는 승온속도가 빠른 경우 Al의 용점 ($660^\circ C$) 이상에서 표면에서부터 서서히 산화가 진행되지 않고, Al 입자가 뭉쳐 액상이 된다. 시편내부에 갇힌 Al 액상은 압력이 커지면서 산화피막의 미소균열을 통해 방울형태로 용출되는 현상이 나타난다.¹¹⁾ 이와 같은 두 가지 이유로 승온은 천천히 이루어져야 한다. $1100^\circ C$ 까지의 승온속도를 $1.5^\circ C/min$ 로 한 것은 이와 같은 이유이며, 이 때 용출이 발생되지 않았다.

직경, 두께와 무게를 단 시편을 $1100^\circ C$ 까지 $1.5^\circ C/min$ 으로 승온하여 5시간 유지하고, (1차 소성) 로냉한 후, 직경, 두께와 무게를 달았다. 이를 다시 1500 , 1550 , $1600^\circ C$ 의 온도까지 분당 $5^\circ C$ 의 속도로 승온하고, 5시간 유지한 후 (2차소성) 로냉하였다. 소성 후의 시편의 무게 증가율과 길이변화를, 그리고 밀도를 표 3에 나타내었다. 무게증가와 길이변화는 열처리하기 전을 기준으로 계산한 것이다. 1차소성 후의 무게증가와 길이증가(시편의 팽창)은 Al의

산화에 의한 것이며, 흡착성분의 이탈이나, 수화성분이 기화함으로써 무게증가가 다소 상쇄된 것으로 예상된다. 2차소성후의 무게증가는 없었는데, 이는 Al의 산화가 1차소성만으로 완결되었음을 의미한다. $1100^\circ C$ 까지의 1차소성에서 오히려 팽창했던 시편은 소결과정을 거치면서, $1600^\circ C$ 에서 소결한 것은 $9 \sim 11\%$ 정도 수축하였다. 이 값은 일반 알루미나소결체의 소성수축에 비해서는 작은 값이지만, near net shape라는 RBAO 세라믹스 제조의 특징을 만족하기에는 부족하다. Al 양을 늘리든지, 성형압을 더욱 크게 한다든지, 소성조건을 변화시켜 보완해야 할 것으로 생각된다. SiC가 원래의 첨가량대로 시편내에 존재한다면 그 이론밀도값은 3.87이다. 이를 시편의 실제밀도와 비교해 상대밀도로 계산하면, $1500^\circ C$ 에서는 $82 \sim 85\%$, $1550^\circ C$ 에서는 $86 \sim 89\%$, $1600^\circ C$ 에서 소성한 경우는 $92 \sim 98\%$ 정도의 밀도를 나타내고 있다.

그림 5는 CS58, FS58 시편의 미세구조를 전자현미경으로 관찰한 것이다. 두 시편의 미세구조가 크게 다르지 않으며, 밝게 나타나고 있는 것은 ZrO_2 입자로서, 분쇄 후 분말의 XRD분석에서 확인한 바대로, 분쇄할 때 임펠라와 볼로부터 이입된 것이다. 이 ZrO_2 는 알루미나의 인성증진 메카니즘 중의 하나인 transformation-toughening 효과를 가질 것으로 예상된다. 그림 6은 같은 시편을 XRD 분석한 것으로서 두 시료간의 차이는 거의 없다고 할 수 있다. 출발물질인 $\alpha-Al_2O_3$, SiC 외에 t- ZrO_2 , m- ZrO_2 , 그리고 Mullite peak가 나타나고 있다. ZrO_2 는 임펠라와 볼에서 잘려나온 미세한 상이 결정화되고 전이되어 나타난 것으로서 이미 미세구조상으로도 확인한 바 있다.

Mullite는 SiC표면의 산화층이 분쇄와 소성을 거치면서

Table 3. Table 3. Weight and length changes of specimens and its bulk densities after presintering at $1100^\circ C$ and after final sintering at $1500^\circ C$ to $1600^\circ C$.

	1100°C for 5hrs			1500°C for 5hrs			1550°C, 5hrs		1600°C, 5hrs	
	$\Delta W/W$ (×100%)	$\Delta L/L$ (×100%)	ρ_B (g/cm ³)	$\Delta W/W$ (×100%)	$\Delta L/L$ (×100%)	ρ_B (g/cm ³)	$\Delta L/L$ (×100%)	ρ_B (g/cm ³)	$\Delta L/L$ (×100%)	ρ_B (g/cm ³)
CS38	5.7	1.4	2.30	5.7	-3.28	3.27	-9.5	3.56	-11.1	3.78
CS58	5.4	2.4	2.23	5.4	-5.8	3.17	-6.5	3.32	-8.8	3.55
FS38	5.3	1.8	2.29	5.3	-7.5	3.30	-9.3	3.46	-11.2	3.80
FS58	5.4	2.5	2.28	5.4	-6.0	3.19	-7.0	3.33	-9.8	3.57

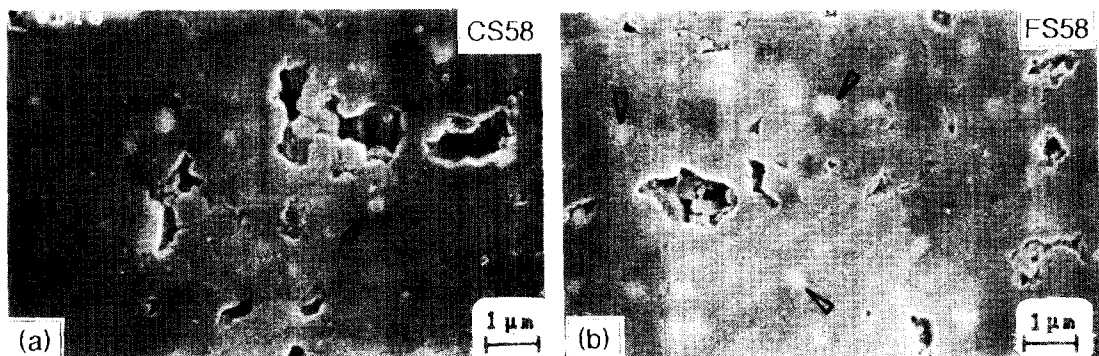


Fig. 5. SEM-micrographes of specimens after sintering at $1600^\circ C$ for 5 hours. (↑ : relative bright ZrO_2 particle) (a) CS58 (b) FS58

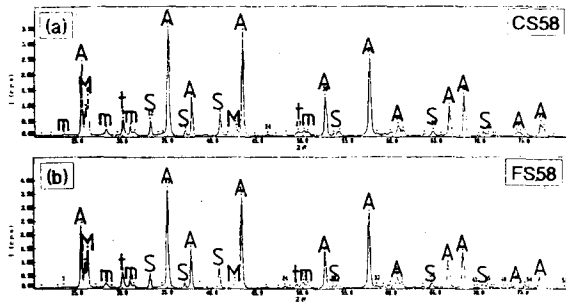


Fig. 6. XRD diagrams of samples, sintered at 1600°C for 5 hours. (a) CS58 (b) FS58 (A: Al₂O₃, m: m-ZrO₂, t: t-ZrO₂, M: Mullite, S: α-SiC)

그 양이 증대하여 Al₂O₃와 반응하여 생성된 것이다.¹²⁾ Al₂O₃-SiC 복합체는 SiC의 산화를 막기 위해서 불활성분위기, 1700°C 이상의 온도에서 소결하는 것이 보통인데,^{13,14)} 이번 연구는 시편제조가 공기중에서 이루어졌기 때문에 Mullite 상이 나타났다. RBAO는 Al이 산화가 되면서 세라믹스를 얻는 공정이며, 이 과정은 산화 또는 공기중에서 이루어지므로 SiC의 산화는 불가피하다. 순수한 Al₂O₃-SiC 복합재료가 얻어지지 못하는 것보다, 상압, 공기중에서의 소결이라는 큰 이점이 있다. 따라서, 차후의 기계적 특성 등의 물성연구를 통하여 이 재료의 문제점을 파악하는 것이 의미를 가질 것으로 생각된다. 분쇄효과에서는 용융알루미나를 사용하는 것이 하소알루미나를 사용하는 것보다 나았으나, 그 영향이 소결특성을 낮게 하는데까지는 이르지 못하고 있음을 SEM과 XRD 결과로서 알 수 있다.

4. 결 론

1) 어트리션 밀에 의한 분쇄효과를 보면 RBAO-SiC 세라믹스의 알루미나 공급원으로는 용융알루미나를 사용하는 것이 하소알루미나를 사용하는 것보다 더 바람직하다.

2) 산화에 의한 무게증가는 1100°C 1차소성에서 모두 이루어졌으며, 이때 2% 정도 팽창하였던 시편은 1500°C ~ 1600°C로 2차 소성을 거치면서 수축하였다. 상대밀도가 92~98%에 이른 1600°C 소성 후에는 10% 정도 수축하고 있다.

3) 분쇄효과에는 용융알루미나의 사용이 바람직한 것으로 나타났으나, 소성거동에서는 하소알루미나를 사용한 것과는 별 차이가 없었다. 기계적 특성을 중심으로 한 지속적인 연구로 문제점 파악이 필요할 것으로 사료된다.

4) RBAO-SiC 소결체에서는 mullite 상이 관찰되는데, 이 상은 SiC 표면의 SiO₂와 Al₂O₃가 소성과정 중에 반응한 결과로서, RBAO 공정이 공기 중에 이루어지므로 불가피하다. 이 상이 기계적 특성에 미치는 영향은 차후의 연구를 통하여 규명할 것이다.

감사의 글

본 연구는 1996년도 과학재단 특정기초연구비(과제번호: 96-0300-20-01-3)의 지원에 의하여 수행되었습니다. 이에 감사를 드립니다.

참 고 문 헌

1. N. Claussen *et. al.*, "Low-shrinkage reaction-bonded alumina", *J. Eur. Ceram. Soc.*, **5**, 29-35 (1989)
2. S. Wu *et. al.*, "Mechanisms and kinetics of reaction-bonded aluminium oxide ceramics", *J. Am. Ceram. Soc.*, **76** (4), 1970-1980 (1993)
3. D. Holz *et. al.*, "Effect of Processing Parameters on Phase and Microstructure Evolution in RBAO Ceramics", *J. Am. Ceram. Soc.*, **77** (10), 2509-2517 (1994)
4. T.M. Cook & T.H. Courtney, "The Effects of Ball Size Distribution on Attritor Efficiency", *Metall & Mater. Trans. A*, **26A** (9), 2389-2397 (1995)
5. J.A. Rodriguez *et. al.*, "Structure and properties of attrition-milled aluminium powder", *J. Mater. Sci.*, **32**, 3535-3539 (1997)
6. 황규홍, 박정환, 윤태경, "산화물과 금속분말의 attrition milling 및 반응소결: I. 분말의 특성에 따른 분쇄 거동", *요업학회지*, **31** (3), 337-345, (1994)
7. 황규홍, 김의훈, "산화물과 금속분말의 attrition milling 및 반응소결: II. 분말의 분쇄특성에 따른 반응소결 거동", *요업학회지*, **31** (4), 448-456 (1994)
8. A. Nakahira *et. al.*, "Microstructure and Mechanical Properties of Al₂O₃-SiC Composites", *J. Ceram. Soc. Japan*, **94** (8), 767-773 (1986)
9. 김일수, 강민수, 박정현, "RBAO 세라믹스 공정에서 어트리터 효율에 미치는 볼 크기의 영향", *요업학회지에 투고*
10. 荒康夫 저, 김창은 외 3인 공역, 세라믹 분체 재료학, 3.4.5 메카노케미스트리 pp 87-98, 반도출판사, 1994
11. D.E. Garcia *et. al.*, "Fast Firing of RBAO Composites", *J. Mater. Sci.*, **30**, 5121-5124 (1995)
12. 김경환, 이홍립, 이형민, 홍기곤, "SiC의 산화에 의한 Al₂O₃/SiC 복합체의 제조", *요업학회지*, **34** (5), 535-543 (1997)
13. J. Zhao *et. al.*, "Mechanical Behavior of Alumina-Silicon Carbide Nanocomposites", *J. Am. Ceram. Soc.*, **77** (11), 3039-41 (1994)
14. I. Lavin *et. al.*, "Effect of SiC Submicrometer Particle Size and Content on Fracture Toughness of Alumina-SiC Nanocomposites", *Am. Ceram. Soc.*, **78** (1), 254-256 (1995)