

가스압 소결조건에 따른 질화규소볼의 가공성에 대한 연구

이수완 · 김성호 · 정용선*

선문대학교 공과대학 재료공학과
*한양대학교 세라믹 공정 연구센터
(1997년 8월 12일 접수)

A Study on Machinability of Silicon Nitride Ball Sintered by Various Gas Pressure Sintering (GPS) Conditions

Soo-Wohn Lee, Sung-Ho Kim and Yong-Sun Chung*

Department of Materials Engineering, Sunmoon University
*Ceramic Processing Research Center, Hanyang University
(Received August 12, 1997)

요 약

질화규소의 소결에 미치는 소결조건에 영향을 대해서는 많은 연구가 진행되어 왔으나, 소결조건이 가공성에 미치는 영향에 대한 연구는 아직 미흡한 편이다. 본 연구에서는 소결조건(온도, 압력, 시간)을 변화시킨 후 물리적, 기계적 성질들을 측정하였다. 우수한 기계 가공성을 갖는 질화규소 볼의 최적 미세조직을 조사하기 위하여 소결조건을 달리한 질화규소 볼을 자성유체가공법으로 가공, 소결조건에 따른 질화규소의 가공성에 대하여 조사하였다. 아울러 다양한 소결조건에 따른 질화규소의 기계적 성질과 가공성의 관계를 규명하고자 하였다.

ABSTRACT

The effect of sintering conditions on the sinterability for silicon nitride has been studied by many investigators. However, the effect of sintering conditions on the machinability, which is the major barrier to the field applications of the ceramic components, has not been fully studied. In this study, the sintering conditions such as temperature, gas pressure and time in silicon nitride were varied. The physical and mechanical properties of the gas pressure sintered (GPS) silicon nitride were measured. The optimum microstructure of silicon nitride with the excellent machinability, was investigated by MFG (magnetic-fluid grinding) technique. An attempt was made to figure out how the mechanical properties influence upon the machinability of silicon nitride ball.

Key words : Machinability, Grinding, Ceramic ball, Gas pressure sintering, Silicon nitride

1. 서 론

최근 세라믹스 분야의 발전과 함께 많은 분야에서 기존의 금속재료가 세라믹스로 대체되고 있다. 그러나, 이들 세라믹스 재료가 부품 형태를 갖기 위해서는 크기와 형태, 표면정도 등이 요구되는 규격을 정확히 충족시켜야 하므로, 성형 및 소결 후의 후가공이 불가피한 것이 사실이다. 마무리가공의 경우는 치밀화 과정을 통해 가공물의 강도와 경도가 매우 높아져 있으므로 가공하기가 매우 어려울 뿐 아니라, 다이아몬드나 c-BN과 같은 고단가 공구재료의 사용이 불가피하여, 가공 비용이 전체 생산단가

의 30~60%를 차지하고 90% 이상이 되는 경우도 있다. 여러 가지 비산화물계 구조세라믹스 재료를 다이아몬드로 가공할 경우, 공정단계별 가공 가능여부가 달라진다.¹⁾ 또한 세라믹스 재료도 금속재료의 가공에서와 마찬가지로, 가공을 통해 얻을 수 있는 공차와 표면정도가 달라지게 된다. 세라믹스의 가공은 이러한 공정단계나 가공공구나 재료에 의해서만 달라지는 것이 아니라, 재료의 특성에 따라서도 달라지게 된다. 이러한 가공성의 문제를 보다 쉽게 하기 위한 연구가 활발히 진행되고 있다.

고온가스압 소결된 질화규소는 1970년대 초반에 잠재적으로 개스터빈 엔진용 베어링 재료로 평가되었다.^{2,3)} 근래

에 개발되고 있는 개스터빈 엔진의 높은 회전속도는 outer race에 매우 큰 부하가 걸리게 하며, 그 결과 일반적으로 박리에 의한 피로(spallation fatigue)를 가져온다. 질화규소의 비중은 금속(M50) steel 베어링의 비중의 40% 정도이며 이러한 상대적으로 낮은 비중은 outer race에 걸리는 응력의 실질적인 감소를 가져온다. 고온가압 소결한 질화규소는 M50-steel 보다 더 우수한 성능을 발휘한다.

질화규소는 비교적 고강도, 높은 경도와 낮은 비중 및 열팽창 계수를 갖어 내마모용의 기계적 부품으로 사용되고 있다.⁴⁾ 이러한 특성을 가지는 질화규소의 소결조건을 변화시켜 소결한 후 자성유체 가공공정으로 불을 가공하였다. 조성변화에 따른 기계적 성질(경도, 파괴인성, 강도), 미세조직, 소결상태(밀도측정)를 측정하여 가공성에 미치는 미세조직의 영향에 대하여 조사하였다.

2. 실험방법

2.1. 질화규소 볼 소재 제조 공정

본 연구에서 사용된 재료는 α 분율이 높은 Si_3N_4 (UBE E-10)분말을 사용했다. 평균입도는 $0.2 \mu m$ 이었다. 소결조제로 첨가된 Al_2O_3 는 Leynold사의 HP-DBN grade, Y_2O_3 는 Hermann C. Starck, Berlin사의 Fine grade powder를 각각 사용하였다. IPA (Iso Propyl Alcohol)을 이용하여 습식 ball-milling을 76 rpm으로 1차 72시간 동안 milling후 slurry를 #325 mesh로 처리한 후 오븐에서 약 $901 \sim 10^\circ C$ 에서 건조시켰다. 오븐에서 건조 후 분말을 막자와 사발로 분쇄시키고 #325 mesh로 sieving한 분말을 비닐 봉지에 넣고 airing하여 분말의 입도를 양호하게 하였다. mould die에 airing한 분말을 충전하고 $1 kg/cm^2$ 으로 hand pressing하고 $2000 kg/cm^2$ 로 CIP을 행하였다. 성형체는 GPS를 이용하여 모든 성형체 볼 및 plate를 소결하였다.

소결조성과 조건은 다음 Table 1과 같다. 질화규소의

Table 1. List of Gas Pressure Sintering Conditions

Sample	Conditions ($Si_3N_4+2wt\% Al_2O_3+6wt\% Y_2O_3$)		
	Temperature ($^\circ C$)	N2 gas Pressure (MPa)	Time (min)
GPS 1	1800	3	120
GPS 2	1900	3	60
GPS 3	1900	3	120
GPS 4	1900	3	180
GPS 5	1900	3	240
GPS 6	1900	8	120
GPS 7	2000	3	120
GPS 8	1900	5	120

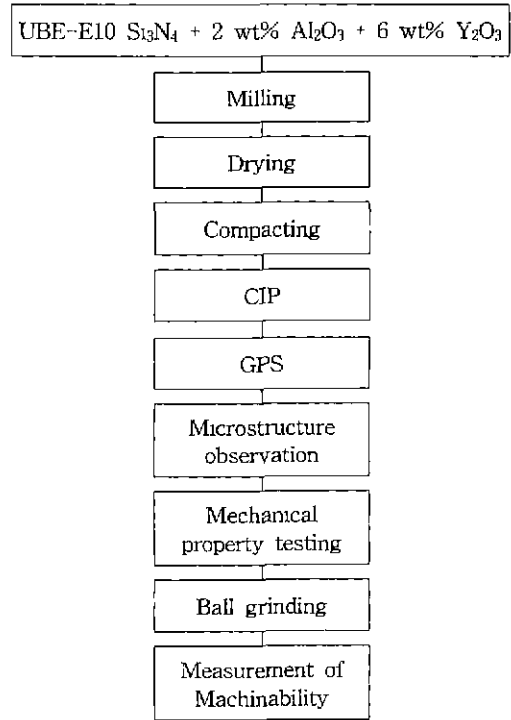


Fig. 1. Flow chart of Si_3N_4 ball machining process.

ball 소재 제조공정을 Fig. 1에 나타내었다. 소결 후 최종 ball size는 대략 지름이 8 mm부근이고 소결조건별로 수축률이 다르기 때문에 차이가 있었다. 아울러 hand pressing했을 경우 압력에 수직한 방향으로 band가 형성되었다.

2.2. 미세조직 관찰

또한 소결된 미세구조를 관찰하기 위하여 표면을 polishing한 후, polishing한 면에 indentation을 한 후 plasma etching을 한 후 polishing 면을 crack부분과 damage된 부분을 조사하였다. etching된 면을 SEM(JEOL J35)를 이용하여 미세 조직을 관찰하였다.

2.3. 밀도측정

전자현미경 사진으로 미세 구조를 관찰하면 조건별로 소결이 되지 않은 경우는 pore가 상당히 존재해서 질화규소 입자간에 잘 결합되지 않았으며 상대적으로 밀도 측정에도 다소 어려운 점이 있었다. Si_3N_4 , Al_2O_3 , Y_2O_3 의 각각의 이론밀도를 이용하여 조성의 출발 원료 함량을 기준으로 mixed rule에 기준하여 이론 밀도를 계산하였다. 소결체의 상대밀도는 부피밀도와 이론 밀도의 백분율로 구하였다. 각각의 측정값은 조건당 10개의 시편을 사용하여 측정하였다. 그 결과를 Table. 2에 나타내었다.

Table 2. Properties of Specimens After Gas Pressure Sintering

Sample	Relative density (%)	Hardness (GPa)	Fracture toughness (MPa · m ^{1/2})	Flexural strength (MPa)	Removal rate (μm/min)
GPS 1	86.40	7.14	5.3460	699.39	1.079
GPS 2	100.0	13.62	7.8092	785.49	3.001
GPS 3	99.14	13.10	6.6374	696.33	1.683
GPS 4	97.67	13.13	6.6313	675.40	1.127
GPS 5	98.28	13.31	6.0798	617.79	2.231
GPS 6	99.26	13.29	6.5075	840.58	1.446
GPS 7	95.83	10.12	5.4968	446.80	2.089
GPS 8	97.7	12.92	10.3140	773.43	1.37

2.4. 기계적 성질 측정

소결된 시편을 Indentation 방법으로 경도와 파괴인성을 측정하였다. 특히 소결이 불량한 시편은 indentation crack tip이 pore에 존재하여 crack length 측정이 불가능하였다. 경도기는 Swiss의 Zwick사의 3212 Hardness Tester를 사용하였고 20 kg 하중에서 15초동안 유지하였다. 평균값은 조건당 10개의 Indentation으로 계산하였다. 파괴인성값은 Evans와 Charles⁵⁾의 식에 대입하여 계산하였다.

Flexural strength측정은 3-point방법을 이용하여 측정하였으며, 이때 사용할 측정용 시편을 동시에 사각형으로 성형 및 소결하여 제작하였다. 강도측정 시편은 소결한 후 각 시편을 평면 연삭기로 연삭한 후 연삭기에서 diamond cutter로 3×3×45 mm 크기로 절단한 후 각 모서리를 45도 각도로 가공하여 주었다. span 거리는 25 mm, cross head speed 0.5 mm/mm로 측정하였다. 각 조성별 시편은 10개씩 제작하여 시험하고 그 평균값을 계산하였다.

2.5. 자성유체법에 의한 질화규소 ball 가공

자성유체법⁶⁾에 의한 질화규소 볼 가공법은 자장에 비자성을 띤 연마제가 자성유체와 혼합되어 있을 때 가공 파삭물이 연마제안에서 360도로 고속 회전하게 된다. 이는 자장 위에 자성유체가 존재하면 부력을 받게 되어 가공물질을 연마제로 가공하게 되는 원리이다.

자성유체법에 의한 세라믹 가공장치는 주로 rotor, holder, magnet, float, magnetic fluid, abrasive powder 로 구성된다. Fig. 2에 볼 가공 장치의 도식적 그림을 나타냈다. 주된 부품은 도역원의 일본의 Sanyo회사의 고속 회전 motor와 shaft 그리고 볼 가공의 접촉부인rotor, 그리고 볼 및 연마제 holder이다. 아울러 회전을 조절하는 control box가 첨부되었다. 볼과 holder사이의 자세한 부분을 Fig. 3에 나타내었다. 첫째 holder는 황동으로 가공하였고 고자화를 띤 Nd 자석을 일렬로 배열시키고

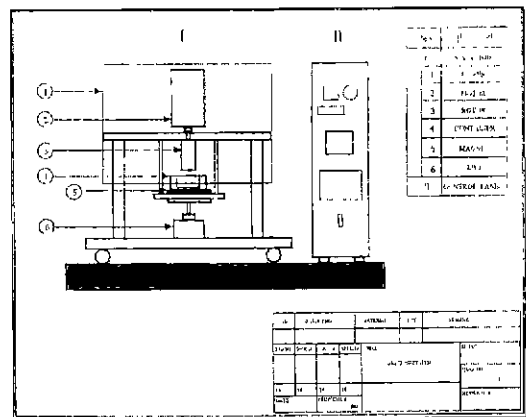


Fig. 2. Schematic diagram of magnetic fluid ball grinding apparatus.

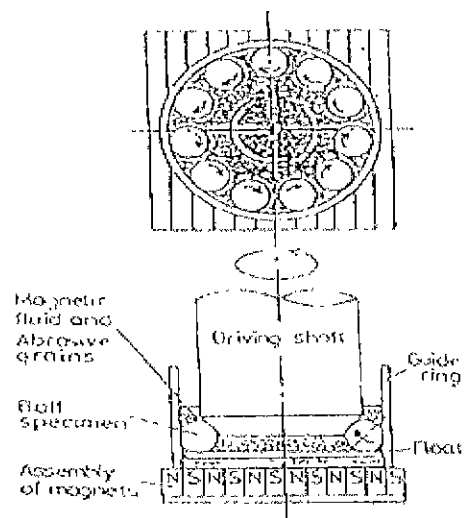


Fig. 3. Schematic diagram of the contact area for ball grinding.

nanosize의 ferrite 표면을 계면 활성제로 coating하여 각각의 초미립 입자가 응집되지 않게 방지하였다. ferrite는 물 또는 kerosine에 40 vol% 되게 고속 mixer기로 혼합한 후 연마제인 8 carat의 diamond(20 μm) 분말을 혼합하여 각각 사용하였다. 가공 시간을 변수로 하였다.

3. 실험결과

3.1. 소결온도변화

Fig. 4는 압력과 소결시간을 고정하고 소결온도에 따

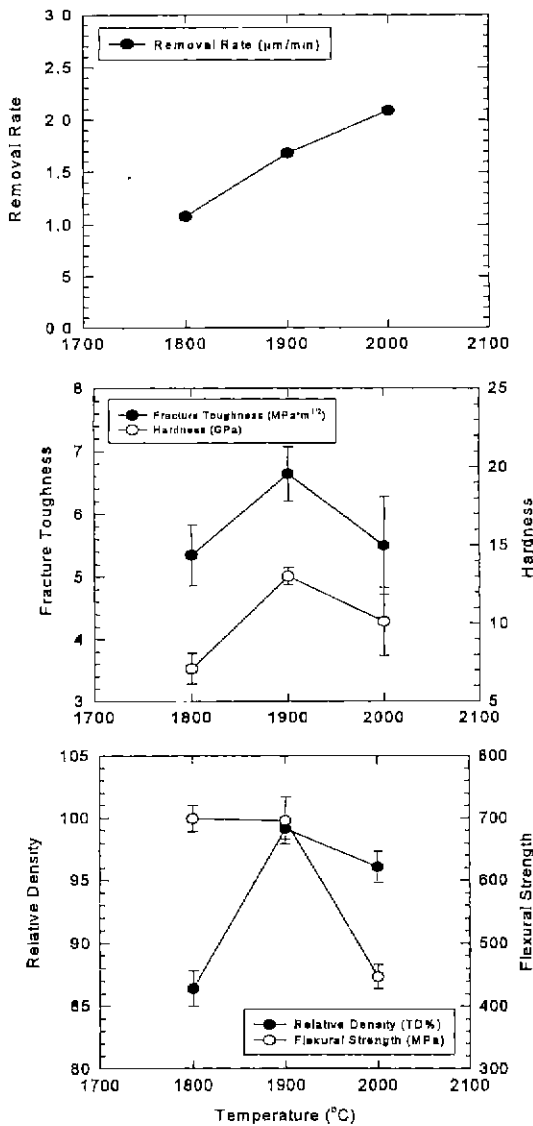
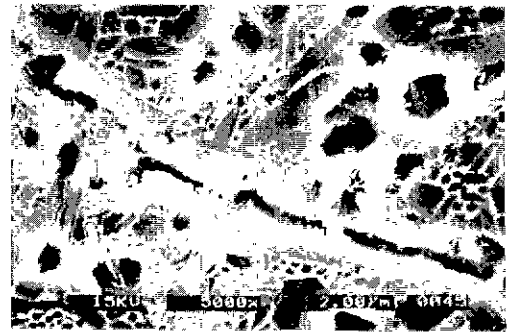


Fig. 4. Variation of properties with the temperature of sintering at 3 MPa, 2 hours.

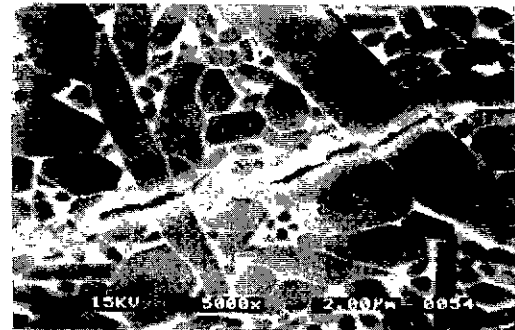
른 기계적 특성 및 가공성을 나타낸 것으로, 1800°C에서는 상대밀도가 86.4%로 아주 낮아 소결이 불량한 것으로 판단되며, 소결온도가 증가할 때, 즉 1900°C로 소결할 때 상대밀도가 99.1%로 이론밀도에 접근하다가 2000°C에서 95.8%로 다시 감소하였다. 따라서 소결온도가 1900°C일 때 가장 소결이 우수함을 알 수 있다.

Fig. 5는 소결온도를 변화시켰을 때 연마 후 etching한 SEM사진들을 비교한 것이다.

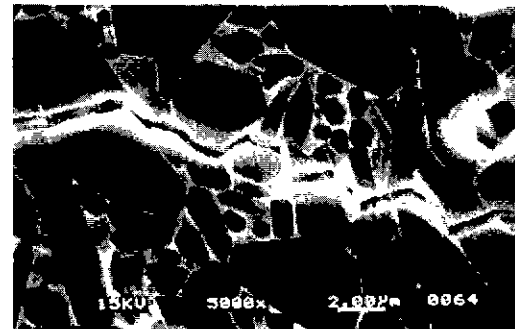
1800°C에서 소결한 것을 보면 작은 rod로 나타나고,



(a)



(b)



(c)

Fig. 5. SEM micrographs of the etched surface with the temperature at 3 MPa, 2 hours; (a) 1800°C, (b) 1900°C and (c) 2000°C.

pore가 많이 나타나는 것으로 보아 소결이 잘 일어나지 않는 것을 볼 수 있다. 1900°C에서 소결한 것은 1800°C에서 소결한 것보다 입자들의 크기가 증대된 것을 볼 수 있으며, pore가 적은 것을 봐서 앞의 것보다 소결이 잘 되었다고 볼 수 있다. 그리고 2000°C에서 소결한 것은 입자들이 조대화된 것을 볼 수 있으며, 이로 인해 기계적 특성을 감소시킬 수 있다.

즉, 1800°C에서 소결한 것은 완전히 소결이 일어나지 않았으며, 2000°C에서 소결한 것은 과소결이 일어난 것이다. 이로 인해 기계적 특성이 떨어지게 되는 것이다. hardness값의 변화를 보면 소결온도가 1800°C로 가장 낮을 때 경도값은 7.14 GPa로 가장 낮으며, 온도가 증가함에 따라 1900°C의 경도값이 증가하다가 2000°C에서는 값이 감소하는 경향을 보이고 있다. 또한 fracture toughness의 변화는 1900°C에서 소결할 때 큰 값(6.6374 MPa·m^{1/2})을 나타냈으며, 1800°C와 2000°C에서 소결할 때는 감소하였다. 그리고 온도변화에 의해 나타나는 flexural strength는 1800°C와 1900°C에서는 비슷한 699.39 MPa과 696.33 MPa이며 2000°C에서는 flexural strength값이 급격히 감소하여 446.8 MPa이 된다.

질화규소 볼을 10,000 rpm의 grinding speed로 40vol%의 자성유체에서 20 μm diamond 연마제를 8g 첨가한 조건으로 가공하였다. removal rate를 보면, 소결온도가 증가하면 removal rate도 증가하는 경향을 나타냈다.

가공성을 수치적으로 표현하기 위해서는 removal rate (μm/min)가 이용된다. 즉 초기의 볼 지름과 가공후의 볼 지름 차이를 가공시간으로 나눈 것을 removal rate라고 한다.

질화규소 ball의 relative density, hardness, fracture toughness, flexural strength 등의 여러 요소 중에서 ball의 가공성과 가장 관계가 깊은 요소는 fracture toughness임이 보고되었다.⁷⁾ 본 실험에서는 미세조직 관찰에서 알 수 있듯이 소결조건에 따른 미세조직의 변화에 의해 기계적 특성이 변함을 알 수 있었다. 소결온도가 낮거나, 또는 높으면 소결이 일어나지 않거나 과소결되어 기계적 특성을 저하시킨다.

이 data에 의하면 소결온도의 변화는 여러 가지 기계적 특성에 영향을 준다. 즉, 소결온도의 변화를 주었을 때 나타나는 기계적 특성 및 removal rate를 보면 pore가 없는 치밀한 elongated grain을 갖는 미세조직을 가지며 1900°C, 3 MPa, 2시간 유지한 시편이 좋게 나타났다. 이것은 상대밀도를 통해 소결성을 알 수 있으며, 이로 인해 소결이 잘된 시편이 pore가 적은 미세조직을 가지므로 hardness, fracture toughness, flexural strength등이 높은 값을 보여주었다. 가공성은 hardness에 관계한다는

것이 알려졌는데 이로 인해 hardness에 따른 가공성의 변화도 나타났다. 즉, 기계적 특성이 좋아질수록 가공성은 떨어진다는 것을 알 수 있다.

3.2. 소결압력변화

Fig. 6은 같은 조성의 시편에서 소결온도1900°C, 소결시간을 2시간으로 고정하고 압력 변화에 따른 기계적 특성 및 가공성을 나타낸 것이다. 가해진 압력에 따른 밀도 변화를 보면, 가스 압력이 증가할수록 시편이 이론 밀도에 접근하는 것을 알 수 있다. 또한 Fig. 7는 가스의

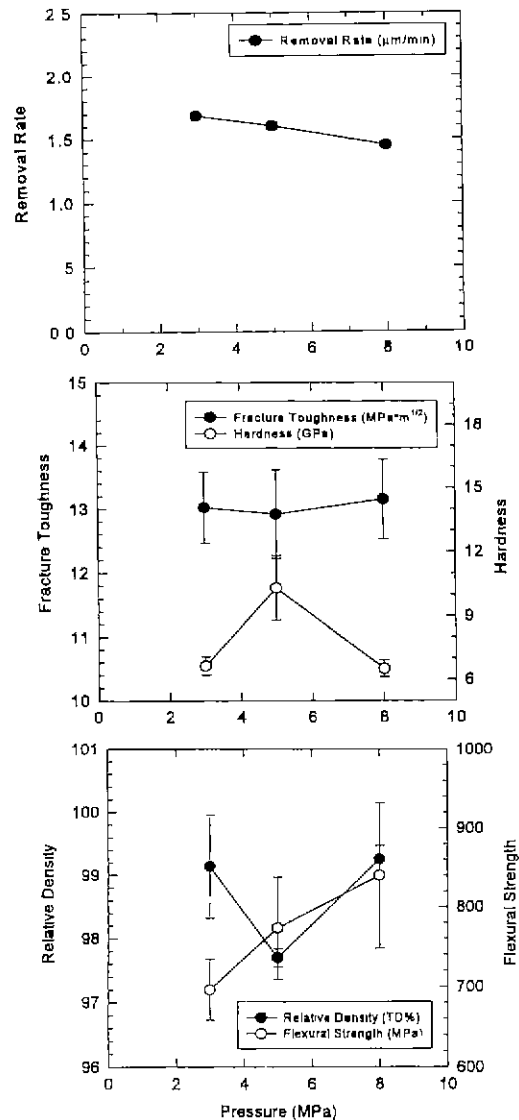
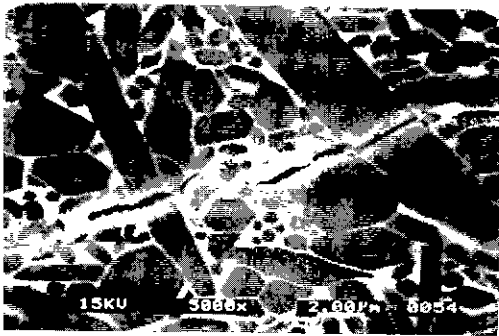
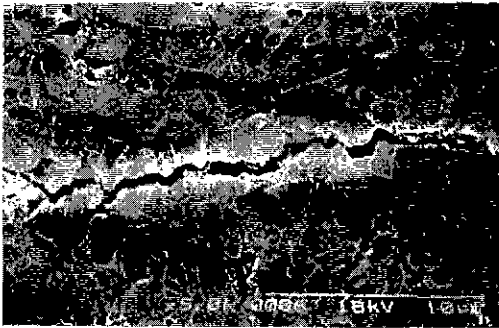


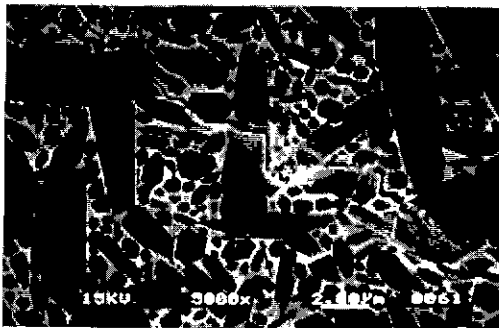
Fig. 6. Variation of properties with the pressure of sintering at 1900°C, 2 hours.



(a)



(b)



(c)

Fig. 7. SEM micrographs of the etched surface with the pressure at 1900°C, 2 hours; (a) 3 MPa, (b) 5 MPa and (c) 8 MPa.

압력을 변화시켰을 때 연마 후 etching한 SEM사진을 비교한 것이다. 이러한 미세조직의 변화는 Fig. 6(b)의 파괴인성의 변화와 밀접한 관계를 갖는다. 즉, 미세조직의 결정립의 크기가 크면 높은 파괴인성치를 결정립의 크기가 작으면 낮은 파괴인성치를 나타낸다. 이처럼 입자 성장의 억제에 의해 작아진 결정립과 입계의 사이가 결합함으로써 작용하고, 이러한 미세구조의 영향으로, 즉 미세한 입자크기로 인하여 고강도를 갖는 경향을 보였다. 이와 같이 세라믹스 재료의 고인성화를 꾀하는 데는

인성과 아울러 강도와와의 관계를 고려할 필요가 있으며, 고강도, 고인성화의 어려움이 여기에 있는 것으로 고려된다. 경도값의 변화는 압력이 증가함에 따라 조금 증가하는 것을 볼 수 있다. 그리고 압력변화에 따른 flexural strength변화는 압력이 증가함에 따라 flexural strength가 증가함을 보여주었다. 끝으로 removal rate의 변화는 이 실험결과로는 자세히 알 수는 없으나 소결시 분위기 질소가스의 압력이 증가할 때 removal rate이 감소하는 것으로 나타났다. 이처럼 removal rate의 변화, 즉, 감소가 일어나는 것은 입자들이 치밀해 질수록 가공성이 낮기 때문이다.

3.3. 소결시간변화

한편 Fig. 8은 소결온도와 분위기 가스 압력을 고정시키고 소결시간에 따른 밀도 변화를 나타낸 것으로, 소결시간이 1시간일 때 이론 밀도를 나타내지만 소결시간이 길어질수록 밀도가 떨어지는 것을 보였다. 즉 소결시간이 길어질수록 소결이 좋아지는 것이 아니라는 것을 나타냈다. 1900°C, 3 MPa에서는 1시간의 소결시간이 적합함을 보여주었다.

Fig. 9은 같은 조성의 시편에서 소결시간을 변화시켰을 때 연마 후 etching한 SEM사진을 비교한 것이다. 소결시간이 증가할수록 입자가 조대화되는 것을 볼 수 있다. 1시간 소결한 것은 pore가 적고 많은 작은 rod형태의 입자가 치밀한 조직을 이루고 있는 것을 알 수 있으며, 이로 인해 상대밀도는 이론밀도와 비슷하며 소결이 우수하다는 것으로 판단된다. 하지만 소결시간이 길어짐에 따라 입자의 조대화가 일어난다. 이로 인한 미세조직의 변화는 후술할 경도, 강도, 파괴인성 등의 기계적 성질의 변화와 밀접한 관계를 갖게 된다.

소결시간을 변화시켰을 때 나타나는 경도값은 소결시간이 1시간으로 가장 짧을 때 가장 큰 값인 13.62 CPa를 나타냈다.

본 연구에서는 소결시간이 길어짐에 따라 fracture toughness가 감소함을 보였다. 일반적으로 소결시간이 길어지면 입자크기가 커지며, 따라서 grain bridging, crack deflection 등의 현상이 일어나기 때문이라고 생각된다. 이로 인해 입자크기의 1/2승에 따라 파괴인성이 증가된다고 보고되었다.⁸⁾ 그러나 본 연구결과는 소결시간이 1시간일때의 fracture toughness는 7.8092 MPa·m^{1/2}이며, 이후 차츰 감소하였다. 또한 flexural strength도 소결시간이 길어지면 감소하는 것으로 나타났다. 그러나 hardness는 소결시간에 따라 감소하지는 않았다.

소결시간을 변화시켰을 때, 기계적 특성 및 가공성을 보면 소결시간이 길다고 해서 소결성이 좋은 것은 아니

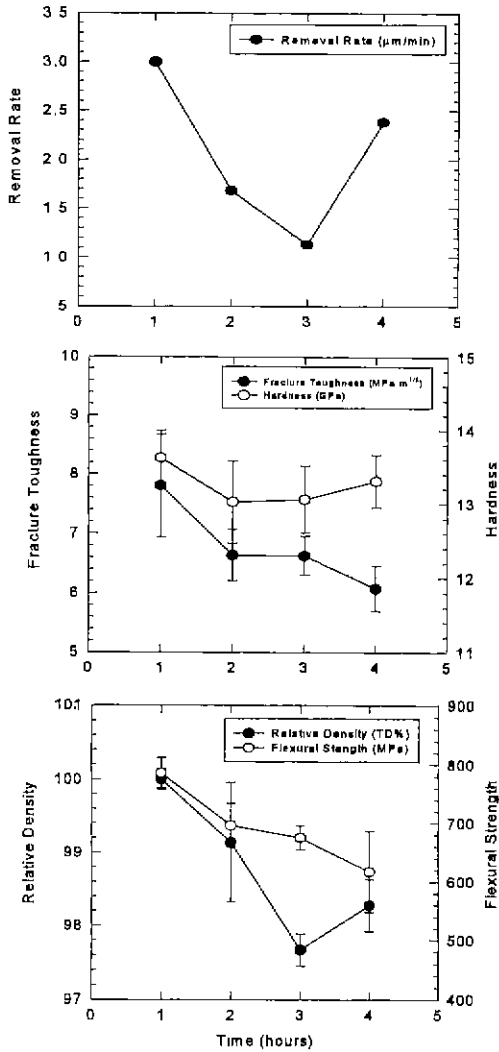
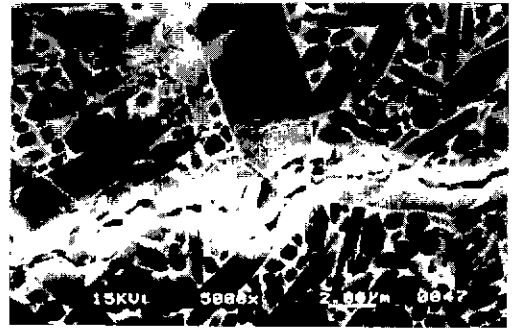


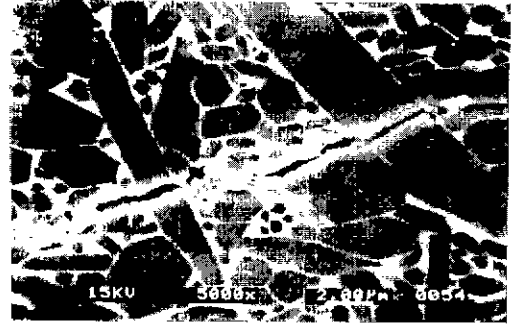
Fig. 8. Variation of properties with the time of sintering at 1900°C, 3 MPa.

다. 어떤 조건에서 그 조건에 맞는 시간으로 유지시키는 것이 중요하다. 그렇지 않을 때 소결이 덜되거나 과소결이 일어나, 입자를 조대화시켜 기계적 특성을 떨어뜨린다. 여기서 보면 1시간 유지시켰을 때 pore가 적은 미세조직을 갖는다는 것을 볼 수 있다. 시간이 길어질수록 grain이 커지는 것을 볼 수 있다. grain이 커진다는 것은 강도값이 감소한다는 것으로 알려졌다. 하지만 이 실험 결과에 의하면 가공성도 증가하는 것으로 나타났다. 본 연구의 결과는 1900°C, 3 MPa에서 1시간 유지할 때 기계적 특성 및 가공성이 좋다 좋은 것으로 나타났다.

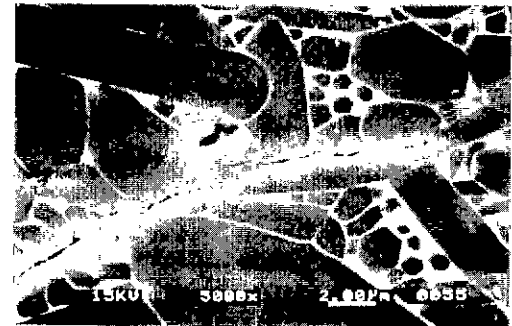
조성이 같은 시편에서 소결온도 1900°C, 가스 압력이 3 MPa로 일정하게 하고 소결시간의 변화에 따른 remov-



(a)



(b)



(c)



(d)

Fig. 9. SEM micrographs of the etched surface with the time at 1900°C, 3 MPa : (a) 1 hour. (b) 2 hours, (c) 3 hours and (d) 4 hours.

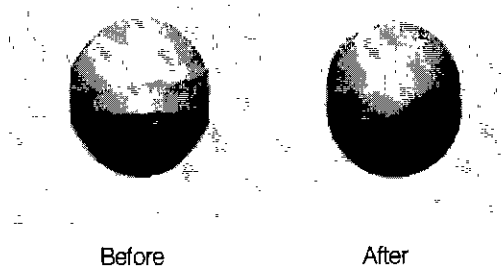


Fig. 10. Shapes of silicon nitride balls.

al rate은 소결시간이 1시간일 때 가장 큰 removal rate을 가지며, 차츰 감소하다가 3시간에서 최소 removal rate을 나타냈으며, 이후 removal rate이 증가했다.

최근 Lee⁹⁾등은 질화규소의 소결조제량 및 소결조제의 종류에 따른 가공성 영향에 대한 연구하였다. 질화규소의 볼 가공성에 파괴인성이 영향을 미친다고 보고하였다. 침상구조를 갖는 β -Si₃N₄는 복잡한 미세구조를 갖으며, 미세구조가 변함에 따라 기계적 성질이 달라지고, 동시에 기계적 가공성도 달라진다. 본 연구에서는 일정한 조성의 질화규소를 소결조건, 즉, 온도, 시간, 압력을 변화시켰을 때 미세조직 및 기계적 특성(fracture toughness, flexural strength)를 조사하여 기계 가공성과 상호관계를 조사하였다.

이와 같이 질화규소의 소결조건이 다르면 기계적 특성 및 가공성의 차이를 나타낸다. 따라서 최적의 기계적 특성 및 미세조직을 설계하기 위해서는 그에 따른 최적의 조건을 선택해야 한다. Fig. 10은 가공전과 가공후의 볼사진을 나타낸 것이다.

4. 결 론

질화규소는 높은 경도와 고강도로 마모용 부품으로 사용되나, 기계적 가공성이 난해하여 질화규소의 가공성에 관한 연구분야가 주목받고 있다. 본 연구에서는 가스압 소결방법을 이용하여 질화규소의 소결조건에 따라 미세조직 변화와 세라믹 볼 가공성을 조사하였다. 아울러 소결 조건에 따른 소결성 즉 sinterbility를 밀도를 측정하여 유추하고, 기계적 성질들(hardness, fracture toughness, flexural strength)과 가공성의 상호관계를 조사하였다. 위 실험 결과의 다음과 같다.

1. 1900°C의 소결온도와 3 MPa의 압력에서 소결시간이 1시간일 때 기계적 성질 및 가공성 이 가장 최적의

조건이었다.

2. 1800°C에서 3 MPa로 2시간 소결하거나 2000°C에서 3 MPa로 2시간 소결할 때 대부분의 기계 적성질이 낮았다.

따라서 hardness, fracture toughness, flexural strength가 증가하며, 가공성이 좋은 질화규소의 미세조직은 큰 β -상의 elongation grain을 적당량 갖어야 한다.

감사의 글

본 연구는 1995년도 한국과학재단의 특정기초과제(과제번호: 95-0300-01-01-3)에 의하여 수행된 연구의 일부이며, 이에 감사를 드립니다.

REFERENCES

1. S. Jahanmir, L.K. Ives, A.W. Ruff and M.B. Peterson, Ceramic Machining: Assessment of current Practice and Research Needs in the United States, National Institute of Standards and Technology SP 834, U.S. Government Printing Office, Washington, D.D. (1993).
2. C.F. Versch, "Overview of Ceramic Bearing Technology," Ceramics For High Performance Applications-II. Proceedings of Fifth Army Materials Technology Conference, 397-405 (1978).
3. R.N. Katz and J.G. Hannoosh, "Ceramics for High Performance Rolling Element Bearings A Review and Assessment," *Int. J. High Technol. Ceram.* **1**, 69-79, (1985).
4. J. Vi intin, M. Kalin, S. Novak, G. Dra i, L. K. Ives, M. B. Peterson, "Effect of Slip Amplitude on the Fretting Wear of Silicon Nitride Against Silicon Nitride," *Wear* **192**, 11 (1996).
5. A. G. Evans and E. A. Charles, "Fracture Toughness Determination by Indentation," *J. Am. Ceram. Soc.*, **59**, 371-372 (1976).
6. M. Umehara and K. Kato, "Principles of Magnetic Fluid Grinding of ceramic Balls," *J. Applied Electromagnets in Materials*, **1**, 37-43 (1990).
7. M. Kikuchi, Y. Takahashi, T. Suga, S. Suzuki and Y. Bando, "Mechanochemical Polishing of Silicon Carbide Single Crystal with Chromium(III) Oxide Abrasive," *J. Am. Ceram. Soc.*, **75**(10), 189-194 (1992).
8. T. Kawashima, H. Okamoto, H. Yamamoto and A. Kitamura, "Grain Size Dependence of the Fracture Toughness of Silicon Nitride Ceramics," *J. Ceram. Soc. Japan*, **99**(4), 320-323 (1991).
9. 이수완, 장태석, 엄호성, "알루미나와 이트리아가 질화규소의 가공성에 미치는 영향," 한국요업학회지, **33**(3), 269-276 (1996).