

반응소결 탄화규소의 제조 및 특성에 관한 연구(I): pH 및 분산제가 안정한 슬립에 미치는 영향

박현철 · 박상환* · 최성철

한양대학교 무기재료공학과

*한국과학기술연구원 세라믹스부

(1996년 6월 26일 접수)

A Study on Fabrication and Properties of Reaction-Bonded Silicon Carbide (I):

Effect of pH and Dispersants on the Stable Slip

Hyeon-Cheol Park, Sang-Hwan Park* and Sung-Churl Choi

Dept. of Inorg. Mater. Eng., Hanyang Univ.

*Korea Institute of Sci. and Tech.

(Received June 26, 1996)

요 약

α -SiC와 흑연의 이성분계에서, 표면전하의 조절과 분산제의 사용이 슬립의 안정성에 미치는 영향에 대해 조사하였으며, 이 조건하에서 주입성형법으로 성형체를 제조하였다. 그리고 용융 실리콘 침윤공정을 통하여 반응소결체를 제조하였을 때, 반응소결체의 미세구조 및 기계적 특성을 분석하였다. 슬립의 안정성은 pH에 따른 슬립의 제타전위, 점도 변화 등을 측정하여 이루어 졌으며, 성형체의 미세구조 분석을 통하여 관찰하였다. 또한 분산제의 종류와 양에 따른 점도변화를 통하여 슬립의 안정 조건을 정하였다. 반응소결공정은, 1550°C, 10⁻¹ Torr 진공하에서 30분간 용융금속 실리콘을 침윤시켜 반응소결체를 제조하였다. 입자의 분산성은 pH와 분산제를 동시에 사용하였을 때 더 효과적이었으며, 반응소결체의 균일한 미세구조를 얻을 수 있었다. 3점 곡강도는 420±40 MPa의 범위이었고, 밀도는 2.9 g/cm³ 정도이었다.

ABSTRACT

In the binary system of α -SiC and graphite, the effect of the control of the surface charge and the dispersants on the stable slip was investigated. Also, after fabricating green body by slip casting method under this condition, infiltration process was conducted to fabricate reaction bonded silicon carbide, whose microstructure and mechanical properties was then characterized. For stable slip, zeta-potential and viscosity of the slip as a function of pH was measured, and then, the microstructure of the green body was characterized. As well as it was also determined as a function of the amount of the various dispersants used. For reaction bonding process, the sintered body was fabricated by infiltration of molten Si at 1550°C under 10⁻¹ Torr for 30 min. For stable dispersion, it was effective when using both pH and dispersant, it was possible to obtain uniform and homogeneous microstructure. The 3-P. bending strength was in the range of 420±40 MPa and the density was 2.9 g/cm³.

Key words: SiC, Graphite, Dispersion, Reaction bonding, Slip casting

1. 서 론

반응소결 탄화규소는 영국의 P. Popper¹⁾에 의해 고온-액 연료 차폐(cladding) 재료로 개발이 되었으며, 비교적 저온(1500°C)에서 결합이 이루어지고 반응소결 후 성형

체의 원래의 치수와 형상을 그대로 유지하므로 최소한의 가공만으로 원하는 형태의 탄화규소(SiC) 제품을 쉽게 만들 수 있다는 장점이 있다²⁾. 따라서, 탄화규소의 상압소결 기술이 개발 되기 이전에는, 반응소결법으로 제조된 탄화규소가 많이 이용되어 왔다. 특히 탄화규소

재료는 열충격 및 열응력에 강하고 고온에서 부식 및 산화특성이 우수하다는 장점때문에¹⁾ 가스터빈 부품, heat exchanger, seal ring, sea water injection pump, 베어링 등에 응용²⁾이 되어 왔다.

반응소결 탄화규소 성형체를 만드는 방법은 여러가지가 있으며³⁾, 대표적으로 주입성형과 압출성형(extrusion) 방법이 잘 알려져 있다. 이 중 주입성형법은 설비가 저렴하고, 금형성형의 공정에서 발생할 수 있는 불균일한 압력전달이 없으며, 특히, 분산에 따른 균일한 밀도를 가지기 때문에 소결온도를 낮추고 향상된 강도 값을 보이는 것으로 알려져 있다.

주입성형시⁴⁾ 가장 많이 고려하는 부분들은 (1) 입자 충전율 (2) 비표면적 (3) 입자수화도 등이 있으며, 비산회분의 입자수화도는 낮기 때문에 계면활성제를 사용하기도 한다. 대표적으로 1936년에 처음으로 비산화물의 주입성형에 관한 특허를 낸 독일의 SIEMEN사⁵⁾의 경우에, Sodium alginate와 acrylic acid polymer의 조합으로 주입성형에 성공하였으며, M. Persson 등¹⁰⁾에 따르면, pH와 wetting agent를 동시에 사용하는 것이 더 효과적이라는 보고가 있다. 이와 같이 pH를 사용할 경우¹¹⁾, 입자의 표면에 표면 전하를 형성하여 전기적 이중층의 반발력에 의해 입자를 효과적으로 분산시킬 수 있으며, 분산제를 사용할 경우에는 폴리머가 입자의 표면에 흡착되어 steric hindrance 기구에 의해 입자를 분산시킨다. 근래에는 PMAA나 PAA 같은 다가전해질(polyelectrolyte)을 사용하여 electrosteric stabilization 기구에 의해 분산성을 향상시킬 수 있는 것으로 보고되고 있다¹²⁾.

본 연구에서는, 서브마이크로미터 크기의 탄화규소 분말과 탄소분말을 출발원료로 하여 슬립을 제조하였을 때, pH의 변화, 분산제 종류 및 양의 변화가 슬립의 안정성에 미치는 영향을 조사하여 최적의 분산조건을 정하는데 그 목적을 두었다 또한, 이 최적 분산조건하에서 슬립을 제조하여 주입성형법으로 성형체를 만든 후 반응소결체를 제조하였으며, 이 반응소결체에 대하여 미세구조 및 기계적 특성을 조사하여 주입성형법으로 제조한 반응소결체의 실제응용을 평가하였다.

2. 실험방법

2.1. 출발원료

출발원료인 α-SiC 분말과 흑연분말은 각각 Lonza의 UF15(Lonza-Werke GmbH, Switzerland)와 일본 SEC사(SEC, Co., Japan)의 제품을 사용하였으며, Table 1에

Table 1. Characteristic of Starting Material

α-SiC	Manufacturer	Lonza-Werke GmbH, Switzerland
	Average Particle Size	0.48 μm
	BET Surface Area	15.6 m ² /g
	Specific Gravity	3.2 g/cm ³
	purity	O ₂ : 0.8% Al<0.03% Fe<0.05%
Graphite	Manufacturer	SEC, Japan
	Average Particle Size	5 μm
	Specific Surface Area	11 m ² /g
	Purity	>99.95%

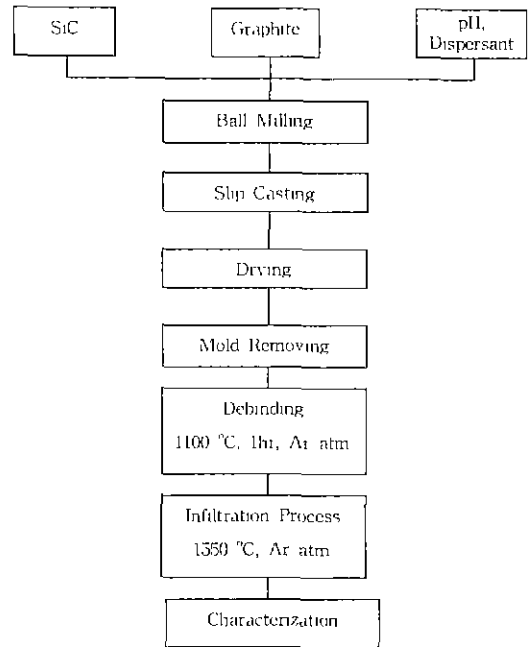


Fig. 1. Overall procedure for fabricating reaction bonded SiC.

이들 분말의 특성을 나타내었다. 탄화규소 분말은 평균 입경 0.48 μm, 비표면적 15.6 m²/g를 사용하였으며, 흑연은 평균 입경 5 μm를 사용하였다. 실리콘은 반도체 기판용 고순도 실리콘(순도 : 99.999%)를 사용하였다.

입자를 분산시키기 위한 분산제로는 Davan-C(ammonium polymethacrylate, R.T. Vanderbilt Co., U.S.A.)와 CEERASPERSE 5468CF(ammonium salt of polymer

boxylic acid, SanNopCo, Co., Japan) 및 DO#113(sodium dioctyl Suffocinate, DongNam, Chem., KOREA)를 사용하였으며, pH는 HCl과 NH₄OH를 사용하여 조절하였다.

2.2. slip 제조

본 실험의 대략적인 공정은 Fig. 1과 같으며, α -SiC : 흑연(graphite)의 비를 8 : 2로 혼합하였다. 출발원료의 비를 8 : 2로 기존의 REFEL process(6 : 4 또는 7 : 3)¹²에 비해 작게 정한 이유는 흑연 분말이 비수용성이며 pH의 영향을 안받기 때문에 분산이 어려워져 슬립의 점도를 높이기 때문이다. 즉, 주입성형시 중요한 변수중의 하나인 고체함량을 높이고 효과적인 분산을 위해서 흑연의 함량을 낮추었다.

슬립의 제조는 먼저 pH에 따른 제타전위, 점도의 결과와 분산제의 종류와 첨가량에 따른 점도를 측정하여 최적의 분산조건을 정한 후, 이 최적조건하에서 슬립을 제조하였다. 제조된 슬립은 석고 볼드에서 사각시편(L 100×W100×H30 mm)으로 성형하였다.

2.3. 소결체의 제조

성형된 시편은 충분히 건조시킨 후(100°C, 48 hr.) 진공로에서 10°C/min의 승온속도로 1550°C까지 승온시킨 후, 30분 유지시키며 용융 금속 실리콘을 성형체와 반응시켜 침윤공정에 의해 반응소결체를 제조하였다.

2.4. 측정 및 분석

2.4.1. 슬립의 특성

슬립의 분산성 및 안정성을 조사하기 위하여, 먼저 pH에 따른 제타전위를 측정한다. 점도를 측정하여 가장 낮은 점도를 보이는 pH 영역을 조사하였다. 또한 분산제의 종류와 양에 따른 점도변화를 측정하여 분산제의 종류와 양을 정하였으며, 침전 실험 및 성형체의 미세구조 관찰을 통하여 안정한 슬립의 조건을 확인하였다. 분산제의 종류 및 양에 따른 침전 실험은, 10 wt%로 고체함량을 고정시킨 후, homogenizer(IKA Ultra Turrax T25, Janke & Kunkel Ltd., Germany)로 3000 rpm, 10분의 조건으로 혼합하여 실린더에 첨가하여 100시간 경과 후 관찰하였다. pH는 TOA pH meter(TOA Electronics Ltd., Japan), 점도는 Brookfield viscometer(model LVT, Brookfield Engineering Lab., U.S.A.), 제타전위는 Zetapotential analyzer(Zetaplus, Brookhaven, Instrument, Co., U.S.A.)를 이용하여 측정하였다. 한편 SEM(Hitach, Japan) 관찰을 통하여 성형체의 분산상태를 관

찰하였다.

2.4.2. 소결체의 특성

용융 실리콘 침윤공정으로 제조된 반응소결체는 소결 밀도, 3점 꺾임강도, 미세구조 등을 분석하였으며, 3점 꺾임강도는 L40×W4×H3 mm의 시편을 #1200까지 다이아몬드 휠(Ewha Diamond, KOREA)을 사용하여 표면연마한 후, 만능 강도시험기(Instron, U.S.A.)를 사용하여 하부 span 20 mm, cross head speed 0.5 mm/min.의 조건에서 측정하였다. 상분석은 X-ray diffractometer(Philips Pw 1840, Netherland)를 이용하여 30 kV-15 mA의 조건에서 Cu target을 사용하여 측정하였으며, 미세구조는 0.25 μ m까지 다이아몬드 페이스트로 연마한 후, colloidal silica를 사용하여 연마한 후, SEM(Hitach, Japan)을 이용하여 관찰하였다.

3. 결과 및 고찰

3.1. pH에 따른 제타전위의 측정

입자의 표면전하를 통한 입자의 분산은^{10,11} 기본적으로 제타전위를 따르며, 입자의 표면전하는 끊어진 결합(broken bond)이나 흡착이온 혹은 수화층의 형성에 기인하는 것으로 알려져 있다. 탄화규소의 경우¹³ 탄화규소의 표면에 OH기가 붙게 되는 특성을 나타내게 된다. 이렇게 생성된 표면 OH기는 탄화규소의 표면전하를 결정지으며, 탄화규소의 표면전하의 특성은 형성된 비정질 산화물 층에 의해 영향을 받게 된다.

Fig. 2는 pH에 따른 제타전위의 변화를 보이고 있다. 등전점은 pH 3 부근에서 나타나고 있으며, 이 값은 같은 α -SiC 분말(UF15)를 사용하여 제타전위를 측정한 Elis

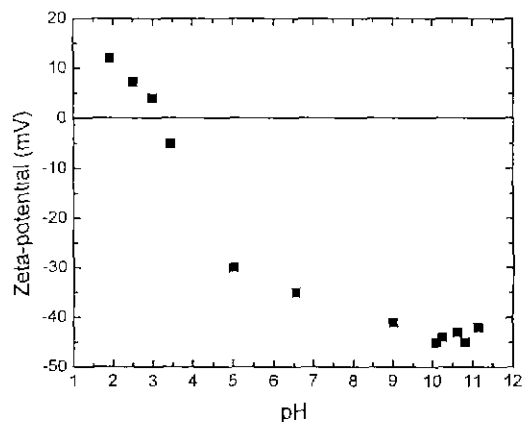


Fig. 2. Zeta-potential of the diluted slip of a 8:2 ratio of SiC to C as a function of pH.

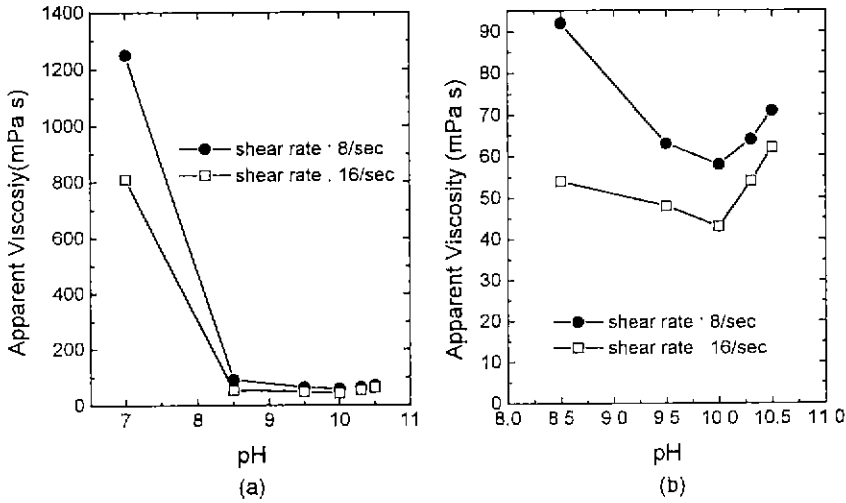


Fig. 3. Viscosity for slip of α -SiC and C as a function of pH; (a) $7 < \text{pH} < 11$. (b) $8.5 < \text{pH} < 11$.

Carlstrom¹¹⁾의 분석과 거의 일치하고 있다. 그러나 본 실험에서 출발원료인 α -SiC에 흑연을 20 wt% 첨가하였을 때, 등전점의 변화는 Elis Carlstrom¹¹⁾의 결과에 비해 크지 않음을 알 수 있었다. 따라서, 흑연의 첨가가 등전점의 변화에 큰 영향을 미치지 않고 있는 것으로 판단된다.

제타전위의 변화는 pH가 3.2 이상에서 음전하를 나타내기 시작하여 pH 값이 증가함에 따라 제타전위가 감소하며 음전하에서 큰 폭으로 줄어들고 있다. 특히 pH 9 이상에서는 제타전위의 변화가 거의 없다가 pH 11에서 다시 감소하였다. 따라서 pH 9 이상에서는 입자들 사이의 반발력이 증가하여 정전기적으로 안정화되고 있음을 알 수 있다.

3.2. pH가 점도에 미치는 영향

Fig. 3은 α -SiC와 탄소분말의 혼합된 슬립에 대해 각 pH 값에서 전단속도 변화에 따른 점도의 변화를 측정된 결과이다. 전술한 바와 같이, pH 9 이상에서 제타전위가 가장 큰 값(-40 mV)을 보이고 있으므로 점도는 pH 9 이상에서 작은 값을 보이리라 예상이 되며, 실제로 점도 측정 결과 pH 10에서 가장 작은 값을 보이고 있다. 제타전위와 점도와의 관계는 Andersen 등¹³⁾이 지적하였듯이, 높은 제타전위에서는 입자간 상호 인력을 억제하여 낮은 점도를 유도하게 된다. 따라서, pH 10에서 입자들 사이의 반발력이 가장 큰 것으로 판단된다.

3.3. 분산제의 영향

Fig. 4는 α -SiC와 흑연분말이 혼합된 슬립에 DO # 113,

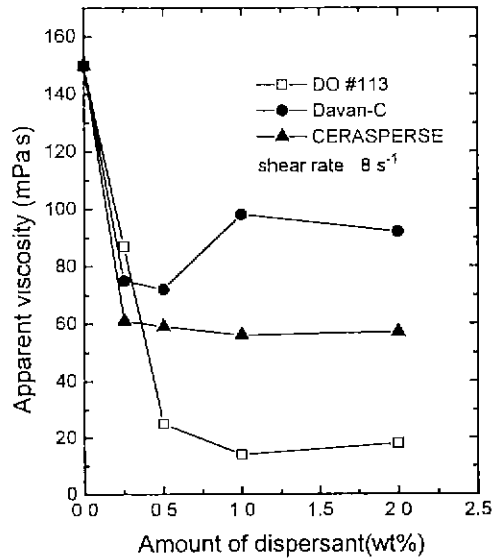


Fig. 4. Viscosity for slip of α -SiC and C as a function of amount of various dispersant.

Davan-C, Cerasperse의 양을 변화시키면서 점도를 측정된 결과이다. 본 실험에서 사용한 분산제는 모두 음이온 계면활성제로 일종의 다가전해질이다. Davan-C의 경우에는 0.5 wt%까지 점도가 감소하다가 다시 증가하는 경향을 보이고 있으며, DO # 113과 Cerasperse는 0.5 wt%까지 점도가 급격히 떨어지며 그 이후에는 약간 감소하는 경향을 보이고 있다. 이 세가지 분산제를 비교해 볼 때, DO # 113이 제일 우수한 분산성을 보이고 있는 것으로 판단된다.

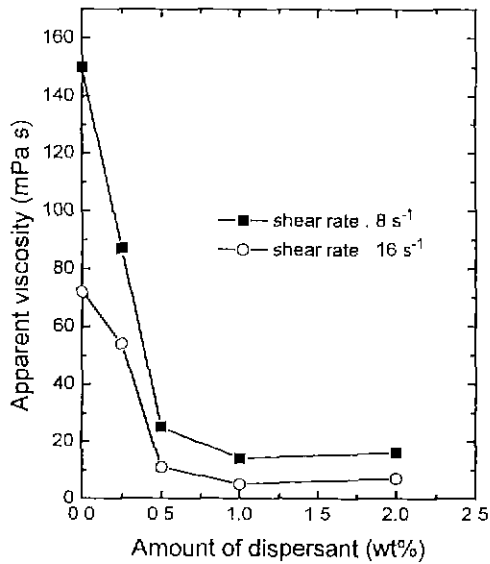


Fig. 5. Viscosity for slip of α -SiC and C as a function of amount of dispersant (DO #113).

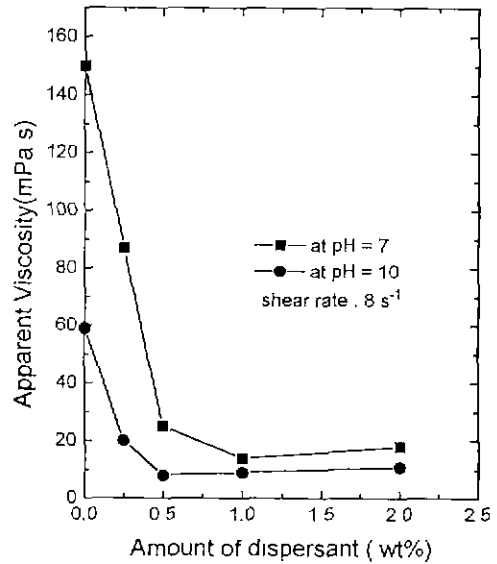


Fig. 7. Viscosity for slip of α -SiC and C as a function of amount of dispersant (DO #113).

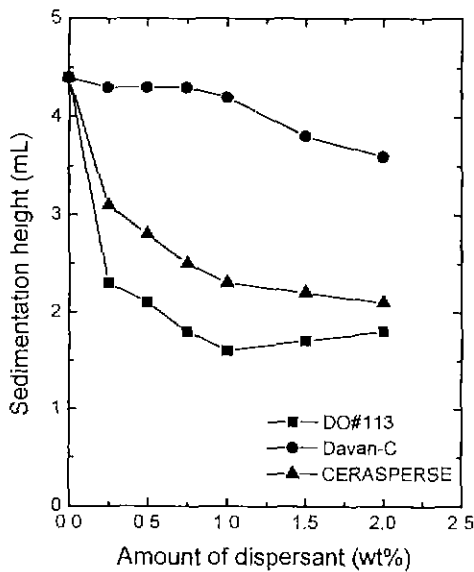


Fig. 6. Sedimentation height for slip of α -SiC and C as a function of amount of dispersants.

점도가 제일 적게 나오는 영역에서는 분산제가 입자 표면을 완전히 흡착하였을 경우라는 것을 생각하면, DO #113의 경우에는 1 wt%에서 완전흡착이 이루어졌다고 판단되며, 그 이상의 분산제를 사용할 경우에는 Fig. 5에서 보이는 것처럼 폴리머의 bridging 현상⁽⁶⁾에 의해 입자가 응집이 일어나게 되어 점도가 약간 증가하는

경향을 보이는 것으로 여겨진다. 이와같이 전술한 결과들은 pH의 변화나 분산제의 첨가량에 따른 입자의 침전높이를 측정함으로써 확인할 수 있다.

Fig. 6은 α -SiC와 흑연의 이성분계에서 분산제의 양에 따른 침전높이 변화의 결과를 보이고 있다. CERASPERSE나 Davan-C를 분산제로 사용하였을 때보다 DO #113을 분산제로 사용하였을 때 침전높이가 급격히 줄어들음을 알 수 있으며, 특히 DVAN-C의 경우에는 탄화규소층과 흑연층이 분리되는 이중층을 형성하였다. 이러한 현상은 Overbeek 등⁽⁷⁾이 지적하였듯이, 안정한 슬립의 경우 입자간 반발력이 충분하여 분산이 잘 이루어지기 때문에, 침전은 느리게 일어나며 겹께가 불투명하고 침전 높이가 작게 되는 현상과 관련이 있다. 즉, DO #113을 분산제로 첨가할수록, 안정한 분산이 이루어지고 있음을 알 수 있다.

Fig 7은 pH=7에서와 pH=10에서 DO #113의 양에 따른 점도변화를 나타내고 있다. pH 10에서 DO #113의 양이 0.5 wt%에서 가장 낮은 점도값을 보이고 있으며, pH와 분산제를 동시에 사용하였을 때, 탄화규소와 흑연의 이성분계에서 슬립의 안정성에 가장 좋은 영향을 미치고 있는 것으로 보인다. 다가전해질이⁽⁸⁾ 소수성 입자의 표면을 완전히 용착할 경우 입자는 친수성이 되며, 낮은 점도값을 보이게 되므로 DO #113의 경우에는 0.5 ~ 1 wt%에서 충분한 흡착이 이루어져 있는 것으로 판단이 된다. 그러나 pH를 사용하지 않았을 때와 pH와

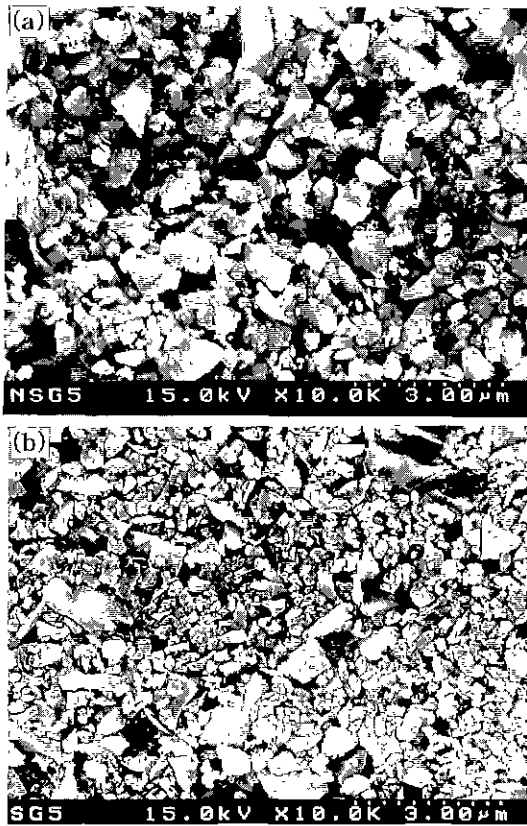


Fig. 8. SEM microstructure of the green body fabricated by slip casting method; (a) prepared from slip without dispersant (DO #113) at pH=7, (b) prepared from slip with dispersant (DO #113) at pH=10.

DO #113을 동시에 사용하였을 때의 점도변화는 크지 않았으며, 이로 볼 때, DO #113이 안정한 슬립에 주로 영향을 미치는 것으로 여겨진다. 음이온 계면 활성제의 경우, pH가 변함에 따라 (-) 이온기는 해리하게 되며, 음이온 계면 활성제의 전하도 변하게 된다. 즉, pH가 증가할수록 (-) 이온기의 해리분율도 증가하게 되며 음이온 전하도 증가하게 된다. 또한 입자를 완전히 흡착하는데 필요한 분산제의 양도 줄어들게 되는데, 분산제와 pH를 동시에 사용하였을 때, 점도의 변화가 거의 없는 부분은 거의 0.5 wt%로서 분산제만을 썼을 때, 1 wt% 보다 약간 줄어드는 이유가 다가전해질의 (-) 이온기의 해리분율 정도가 변하므로 이와 관련된 현상인 것으로 판단된다.

Fig. 8는 입자가 완전히 분산되었을 때와 분산이 이루어지지 않았을 때의 입자의 표면 SEM 사진이다. 최적

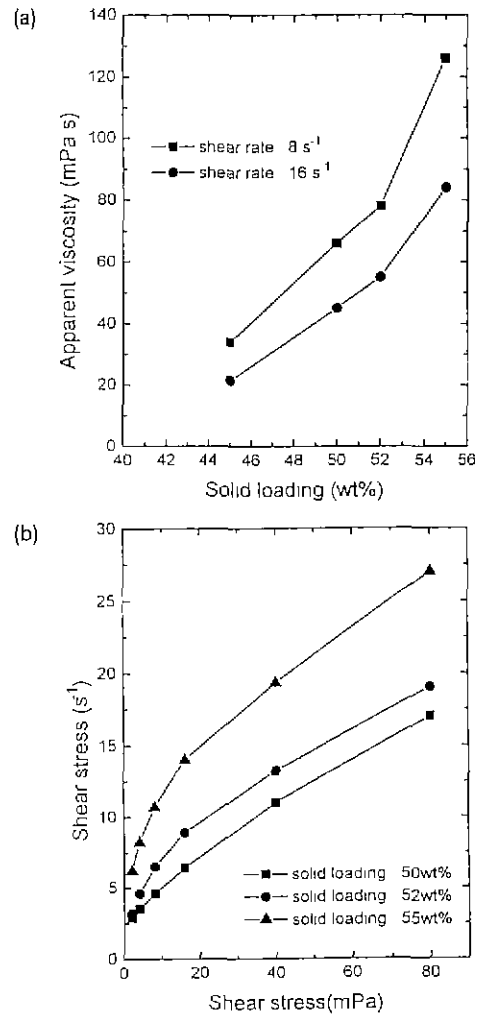


Fig. 9. Data for slip of α -SiC and C as a function of amount of solid loading under the condition of stable slip; (a) viscosity with solid loading, (b) rheological behavior with solid loading.

분산 조건하에서의 미세구조는 입자충진이 잘 되어 있는 것을 알 수 있으며, 입자의 충진밀도가 높으면 점도가 떨어지게 되고 고체함량이 높아지게 된다¹⁰⁾.

특히, 탄화규소와 흑연은 밀도와 반지름이 다르기 때문에 침강속도의 차이가 나타나게 되며, consolidation의 문제가 생길 수 있다 그러나 본 실험에서는 입자의 분산과 Fig.9의 rheology 조질을 통하여 consolidation에 가까운 성형체의 미세구조가 얻어진 것으로 판단된다.

Fig.9는 전단속도 8(sec)에서 고체함량에 따른 점도의 변화 및 고체함량에 따른 슬립의 rheological 거동을 보

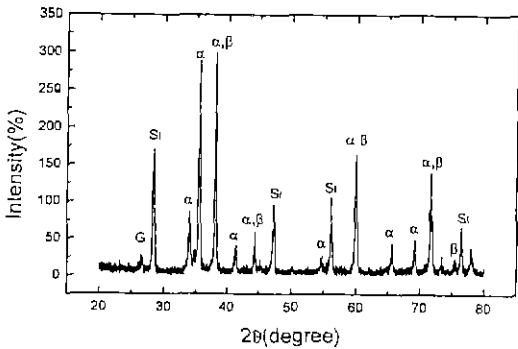


Fig. 10. X-ray diffractoin patterns of reaction bonded silicon carbide by slip casting method; α: α-SiC, β: α-SiC, Si: silicon, G: graphite.



Fig. 11. SEM microstructure of reaction bonded silicon carbide by slip casting method.

이고 있다. 고체 함량이 50 wt%까지는 유동성(점도 : < 100 mPa·s)이 좋고 Newtonian 혹은 Newtonian에서 약간 벗어난 거동을 보이지만, 52 wt% 이상에서는 nonnewtonian을 보이며, 유동성이 좋지 않게 된다. 따라서 본 실험에서는 고체함량 50 wt%에서 주입성형술을 행하였다. 지금까지의 결과들을 종합해 볼 때, α-SiC와 흑연의 이성분계에서 슬립의 안정화를 위한 최적조건은 pH=10에서 0.5 wt%의 DO# 113을 첨가하였을 경우임을 알 수 있다. 이러한 최적조건하에서 사각시편을 제조하였으며, 성형 밀도는 이론 밀도의 62%에 달하였다.

3.4. 미세구조 및 기계적 성질

Fig. 10은 최적의 분산조건하에서 주입성형법을 이용하여 성형체를 제조한 후, 1550°C, 10⁻³Torr에서 금속 Si를 용융시켜 30분 동안 유지시킴으로써 반응소결 시킨 소결체의 X-선 분석으로 α, β-SiC와 잔류 실리콘으로

Table 2. Sintered Density and 3-P. Bending Strength of Reaction-Bonded SiC by Slip Casting Method.

Material	Sintered Density (g/cm ³)	3-P. Bending Strength (MPa)
Reaction-Bonded SiC Fabricated by Slip Casting Method	2.9	420±40

주로 구성되어 있으며, 미반응 흑연의 존재는 미약하였다. 따라서 용융 실리콘 침투, 흑연과의 반응이 충분히 이루어져 기공이 없는 치밀한 소결체가 얻어진 것으로 판단되며, Fig. 11에 보이는 것처럼 균일한 미세구조를 얻을 수 있었다. 미세구조는 기공이 없는 소결체를 나타내고 있으며, 원 탄화규소(흰색) 잔류 실리콘(검은색), 새로 형성된 β-SiC(회색부분)으로 이루어져 있음을 알 수 있다. β-SiC는¹⁻³ 새로 형성된 상으로 출발원료인 α-SiC 입자 주위에 핵형성하고 성장하는 것으로 알려져 있다.

반응 소결체의 밀도 및 3점 꺾임 강도의 측정결과 Table 2에서 보이는 것처럼 2.9 g/cm³의 소결 밀도, 420±40 MPa의 곡강도 값을 나타내었다. 이러한 물성치는 기존의 반응소결 탄화규소의 기계적 성질에 비해 떨어지지 않는 값으로 실제 응용이 기대되는 우수한 특성을 나타내는 것을 알 수 있다.

4. 결 론

α-SiC와 흑연 분말의 이성분계에서 pH와 분산제에 따른 슬립의 안정성을 조사한 후, 최적의 슬립조건하에서 성형 및 반응 소결을 한 결과 다음과 같은 결론을 얻었다.

1. 분산제가 첨가되지 않은 α-SiC와 흑연의 이성분계에서 pH에 따른 제타전위를 측정된 결과 안정된 슬립의 범위는 pH>9이었으며, 이 영역에서 제타전위의 최대 절대값을 보였다.
2. 최적의 분산조건은 pH 10에서 DO# 113을 0.5 wt% 첨가하였을 때 얻을 수 있었으며, 이 조건에서 충전 밀도가 우수한 성형체의 미세구조를 얻을 수 있었다.
3. 상기한 최적의 슬립조건으로 슬립을 제조한 후, 주입성형을 제조하고 이를 반응소결 시킨 결과 기공이 없는 균일한 구조의 미세구조를 얻을 수 있었으며, 소결 밀도와 꺾임강도는 각각 2.9 g/cm³과 420±40 MPa이었다.

REFERENCES

1. P. Popper, "The Preparation of Densc Self-Bonded Silicon Carbide," *Special Ceramics*, Heywood London, pp. 209-219 (1960).
2. C.W. Forrest, F. Kennedy and J.V. Shennan, "The Fabrication and Properties of Self-Bonded Silicon Carbide Bodies," *Special Ceramics*, 5Ed., by P. Popper, The Brit. Ceram. Res. Assoc., Stoke-on-Trent, pp 99 (1972).
3. J.N. Ness and T.F. Page, "Microstructural Characterization of Reaction-Bonded Silicon Carbide," *J. Mater. Sci.*, **21**, 1377-97 (1986).
4. J. Woodthorpe, "Industrial Applications for Reaction-bonded Silicon Carbide," *Ceramic Technology International*, 52, (1994).
5. John B. Wachtman Jr, "Structural Ceramics," pp. 99-160, Vol 29, Academic Press, Inc., (1989).
6. P. Rado, "Slip Casting of Non-Clay Materials," *Trans Brit Ceram Soc.*, **72**, 291 (1973).
7. James S. Reed, "Principles of Ceramics Processing," pp. 137-241, John Wiley & Sons, Inc., (1995).
8. 戸田 三희 다수, "세라믹스의 제조프로세스," pp. 150-168, 사단법인 요업협회, (1985).
9. R.R. Rowlands, "A Review of the Slip Casting Process," *Ceram Bull.*, **45**(1), 16 (1966).
10. M. Persen, L. Hermnsson and R. Carlsson, "Some Aspects of Slip Casting of Silicon Nitride and Silicon Carbide," *Ceramics Powders*, ed., by P Vincenzini, Elsevier Science Pub. Co., Amsterdam, 735 (1983).
11. 이명재, 김재봉, "세라믹 Slip Casting에 있어서 분산기구 및 유동 특성에 대한 고찰," *요업재료의 과학과 기술*, **6**(1), 53 (1991)
12. J. Cesarano III and I.A. Aksay, "Processing of Highly Concentrated Aqueous-Alumina Suspensions Stabilized with Polyelectrolytes," *J. Am. Ceram Soc.*, **74**(12), 1062-67 (1988)
13. M.N. Rahaman, Y. Boiteux and L.C. De Jonghe, "Surface Characterizations of Silicon Nitride and Silicon Carbide Powders," *Am. Ceram Soc Bull.*, **65**(8), 1171 (1986).
14. E. Carlstrom, M. Perrsson, and etc., "Steric Stabilization of Silicon Carbide Slips," *High Tech. Ceramics*, ed. by P. Vincenzini, Elsevier Science Pub. Co., Amsterdam, 623 (1987).
15. P.J. Andersen and P. Murray, "Zeta Potentials in Relation to Rheological Properties of Oxide Slips," *J Am Ceram. Soc.*, **42**(2), 70 (1959).
16. J. Theodoor G. Overbeek, et al., "Recent Development in the Understanding of Colloid Stability," *J Colloid Interface Sci.*, **58**(2), 408-422 (1977).
17. J. Theodoor G. Overbeek, "How Colloid Stability Affects the Behaviour of Suspensions," *Materials Science Research* ed. by R.F. Davis, Plenum Press, New York, 25 (1987).
18. J. Cesarano III and I.A. Aksay, "Stability of Aqueous α -Al₂O₃ Suspensions with Poly(methacrylic acid) Polyelectrolyte," *J. Am. Ceram Soc.*, **71**(4), 250-55 (1988).