

The Effect of SiC Powder Size at Reaction Bonded SiC Composite Fabricated by a Molten Si Infiltration Method

Sung-Ho Yun^{*,**}, Kyung-Sun Cho^{*,**}, Phang Nhun Tan^{*,***}, Hun Cheong^{*†},
Young-Do Kim^{**}, and Sang-Whang Park^{*}

^{*}Materials Science & Technology Research Division, Korea Institute of Science and Technology, Seoul 136-791, Korea

^{**}Department Materials Science and Engineering, Hanyang University, Seoul 133-791, Korea

^{***}Department Materials Science and Engineering, Sungkyunkwan University, Seoul 440-746, Korea

(Received July 21, 2008; Revised August 19, 2008; Accepted August 19, 2008)

용융 Si 침윤법에 의해 제조된 반응소결 탄화규소 복합체에서 SiC 입자 크기의 영향

윤성호^{*,**} · 조경선^{*,**} · Phung Nhut Tan^{*,***} · 정훈^{*†} · 김영도^{**} · 박상환^{*}

^{*}한국과학기술연구원 재료기술연구본부

^{**}한양대학교 신소재공학과

^{***}성균관대학교 신소재공학과

(2008년 7월 21일 접수 ; 2008년 8월 19일 수정 ; 2008년 8월 19일 승인)

ABSTRACT

Reaction bonded silicon carbide(RBSC) composite for heat-exchanger was fabricated by molten Si infiltration method. The raw materials with variable particle sizes were used in this experience. The finer the particle size in sintered silicon carbide was the more increasing 3-point bending strength and fracture toughness. As the adaptable particle sizes had been occupied interstice arising from packing sample, the mechanical properties were increased. In the PCS1-1 sample, the 3-point bending strength and fracture toughness were 323 MPa and $4.9 \text{ MPa}\cdot\text{m}^{1/2}$, respectively.

Key words : Silicon carbide, RBSC, Si infiltration, Phenol resin, Heat-exchanger

1. 서 론

탄화규소(SiC)는 고온강도, 내식성, 내마모성, 내화학성 및 내열 충격성이 우수하기 때문에 세라믹 가스터빈, mechanical seal, 우주 항공용 노즐재료, 내화물, 소각로용 세라믹 필터, 고온 열교환기 등의 고온재료로 활용하기 위하여 활발하게 연구가 진행되어 왔다.¹⁻³⁾ 최근 다시 증폭되고 있는 고유가로 인하여 에너지 위기 및 환경오염 문제의 심각성이 대두되면서 전 세계적으로 대체 및 청정 에너지원 개발을 위한 연구개발이 활발히 이루어지고 있다. 아직까지 발전 시스템 및 산업체의 설비에서는 주요 에너지원으로 화석연료가 사용되고 있으며, 국내외에서 발전, 가정 및 산업체 설비등을 포함한 모든 에너지 시스템에서 폐가스에 의한 전체 에너지 손실은 30%에 이르고 있으며, 그 중 발전, 제철, 제강, 요업, 화학공업 등의 고온 공업로에서 발생하는 에너지 손실율은 70%를 차

지하고 있다. 따라서 국내외에서는 근원적인 에너지원의 사용량을 감소시키기 위하여 탄화규소 열교환기와 같은 고효율 산업체로용 열회수 시스템의 기술개발이 활발히 이루어지고 있다.

용융 실리콘의 침윤 반응을 이용한 반응소결 탄화규소(RBSC, reaction bonded silicon carbide)는 1500~1600°C의 온도 범위에서 기공이 없는 치밀한 소결체를 제조할 수 있다. 또한 소결 후 성형체의 원래 치수와 형상을 유지하기 때문에 최소한의 가공만으로 원하는 형태의 탄화규소 제품을 얻을 수 있어 새로운 응용 분야에 적용하는데 상업적 가치가 높은 것으로 제조 공정으로 평가되고 있다.^{3,4)} 이 공정은 순수 SiC 소결체의 제조 온도보다 낮은 온도에서 제조되어지지만 고온 내부식성, 상온강도 및 내마모성은 탄화규소 소결체와 비교하여 큰 차이가 없다. 그러나 반응소결 탄화규소 소결체는 취성파괴 거동을 보이는 잔류 실리콘의 존재 때문에 낮은 파괴인성 및 신뢰도의 문제가 제기되고 있으며,⁵⁾ 전형적인 취성파괴 거동을 보이기 때문에 응용분야에서의 사용이 제한적 있다. 뿐만 아니라 실리콘의 용점 부근(1400°C)에서 고온 강도가 급격히 저하하기 때문에 고온 구조재료로서 사용온도

[†]Corresponding author : Hun Cheong

E-mail : hcheong68@nate.com

Tel : +82-2-958-5475 Fax : +82-2-958-5509

Table 1. Characteristics of Raw Materials

Materials	Supplier	Remark	Purity
SiC	Showa denko	130, 6.7, 3 1.2 μm	>99.5%
Phenol resin	Kolong chemical	-	55%<Carbon contents<60%
Carbon black	Korea carbon black	N774	Carbon contents>90%
Si ingot	LG siltron	-	>99.9999

Table 2. Compositions of Reaction Bonded SiC

Sample	SiC (wt%)						Phenol resin(wt%)	Black carbon(wt%)
	270 μm	130 μm	35 μm	6.2 μm	3 μm	1.2 μm		
PSC1-1			70	30			5	6
PSC1-2		70		30			5	6
PSC1-3		70			30		5	6
PSC1-4		70				30	5	6
PSC1-5		60	24	9.57		6.43	5	6
PSC1-6	60		24	9.57		6.43	5	6

에 제한이 된다는 단점을 가지고 있다. 이런 단점을 보완하기 위하여 섬유강화 복합체의 제조에 의한 파괴인선 및 신뢰도 향상에 관한 연구가 활발하게 진행되고 있다. 섬유강화 공정은 주로 long-fiber 형태로 CVD 공정에 의한 continuous fiber 강화 탄화규소 복합체,⁶⁻⁹⁾ PIP 공정에 의한 강화,¹⁰⁻¹¹⁾ 반응소결 (RS),¹¹⁻¹²⁾ 그리고 hot-pressing (HP)¹³⁻¹⁴⁾ 공정이 널리 연구되어 지고 있다.

본 연구에서는 용융 Si 침윤법에 의해 제조된 반응소결 탄화규소 소결체의 제조에서 사용되는 SiC 분말 입자의 크기를 변화시켜 물성을 변화를 관찰하였다. 입자 조합의 변화는 SiC 입자의 충전이 이루어질 수 있는 배위수를 결정 한 후 무게비를 결정하였으며, 두 가지 크기가 다른 입자를 사용한 경우와 네 종류의 크기가 다른 입자를 사용하여 조합하였다. 이들 조합 변화에 따른 소결 후 반응소결 탄화규소 소결체의 밀도 및 기계적 특성 변화를 관찰 하였다.

2. 실험 방법

용융 Si 침윤 공정을 이용한 반응소결 탄화규소 복합체 제조에 사용된 출발 원료는 Table 1에 보여주는 것과 같다. 반응소결 탄화규소의 기지상 합성원료로 270 μm, 130 μm, 34 μm, 6.7 μm, 1.2 μm 크기의 SiC 입자, Si ingot, Phenol resin 및 carbon black을 사용하였다. 입자들의 조합에 따른 최적의 기계적 특성을 선정하기 위해 SiC 입자 크기별 조합을 선정한 무게비를 Table 2에 나타내었다.

Si 침윤법에 의한 반응소결 탄화규소 성형체 및 복합체의 제조 공정은 Fig. 1과 같다. 복합체를 제조하기 위해 서로 다른 두 종류의 SiC 입자를 먼저 혼합하고 carbon source를 공급하기 위해 5 wt%의 phenol resin과 6 wt%의

carbon black을 에탄올과 혼합하여 졸을 만든 후 두 종류의 분말이 혼합된 SiC 분말과 10분간 혼합을 실시하였다. 혼합된 분말과 carbon source 졸의 건조를 위하여 120°C에서 1시간 동안 건조를 실시하였다. 제조된 SiC/Carbon black/Phenol resin 혼합분말을 사용하여 23 MPa의 압력으로 일축가압 성형 후 일정한 성형 강도를 유지하기 위해 150°C에서 5시간 건조하여 12×25×10 mm 크기의 성형체를 제조하였다. 제조된 SiC/Carbon black/Phenol resin 성형체는 Fig. 2에서 보여주는 것과 같이 BN 분말로 코팅

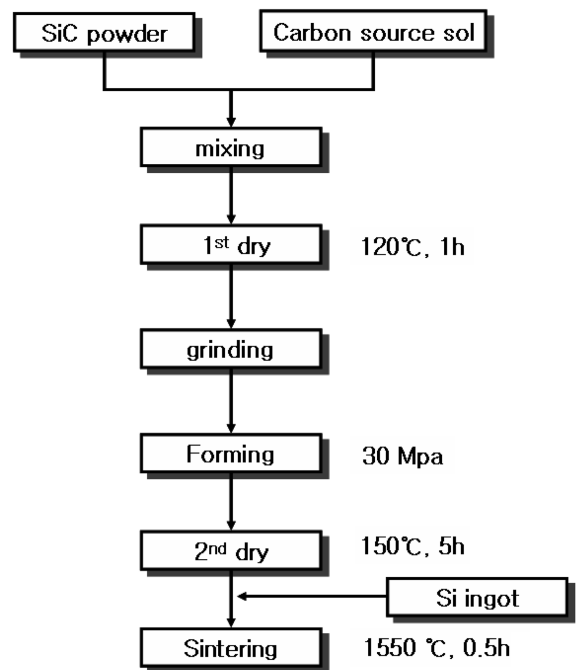


Fig. 1. Experimental process of the Si melt infiltration to fabricate reaction bonded SiC composite.

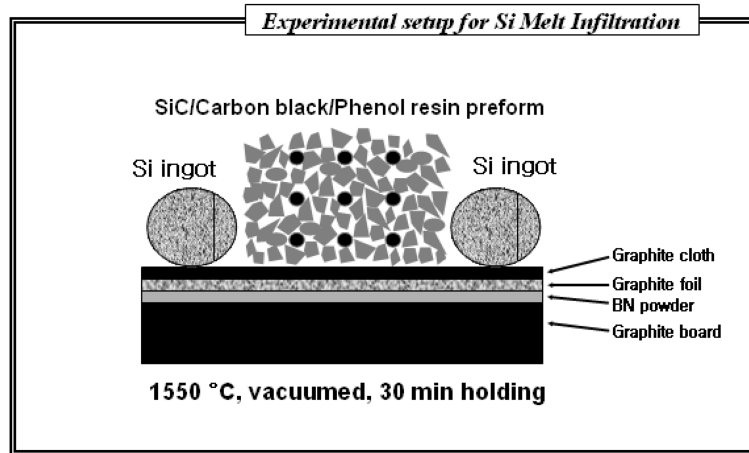


Fig. 2. A schematic of experimental setup for the Si melt infiltration to fabricate RBSC.

된 Graphite plate 위에 Carbon foil 및 Carbon cloth를 순서대로 적층한 후 SiC/Carbon black/Phenol resin 성형체 및 Si ingot을 위치시켜 graphite 진공로를 사용하여 반응소결 하였다. 용융 Si 침윤 방법에 의한 반응소결 탄화규소 제조는 진공분위기 ($<10^{-1}$ torr) 하에서 침윤온도인 1550°C까지 10°C/min. 속도로 승온하여 1550°C의 온도에서 30분간 유지한 후 노냉 시켰다.

반응소결 탄화규소 복합체 소결 밀도는 ASTM C20 방법에 의하여 겉보기 밀도를 측정하였다. 미세구조를 관찰하기 위하여 소결체 연마표면을 SEM (Scanning Electron Microscope)을 사용하여 시편 표면에 전도성 피막 코팅을 하지 않은 상태에서 관찰하였다.

반응 소결된 시편의 파괴강도 및 파괴인성을 측정하기 위하여 $3 \times 4 \times 25$ mm의 크기로 가공한 후 diamond paste를 이용하여 1 μ m까지 표면 연마하였다. 파괴강도는 3점 굽힘강도 측정방법으로 Instron을 사용하여, cross head speed 0.5 mm/min 하부 span 길이 20 mm의 조건으로 측정하였다. 파괴인성은 SENB (Single Edged Notched Beam) 방법으로 측정하였다. 시편을 3점 굽힘강도 측정시와 같은 방법으로 준비한 뒤, 시편의 하단면 중앙에 넓이 0.1 mm, 깊이 0.4 mm의 노치를 만들고 3점 굽힘강도와 같은 방법으로 파괴하중을 구한 후 다음 식으로 파괴인성을 구하였다.

$$K_{IC} = \frac{3PL}{2bd^2} a^{1/2} Y$$

여기서, K_{IC} 는 파괴인성, P는 파괴하중, d는 시편의 두께, L는 span 길이, a는 노치 깊이, b는 시편의 폭, Y는 형상계수이다.

3. 결과 및 고찰

용융 Si 침윤방법으로 제조된 반응소결 탄화규소 및 탄

소섬유 강화 반응소결 탄화규소 복합체의 제조를 위해 270 μ m, 130 μ m, 35 μ m, 6.2 μ m, 3 μ m, 1.2 μ m 크기의 SiC 분말을 사용하여 제조하였다. 단일 입자로 반응소결 탄화규소 소결체를 제조한 결과 입자 크기가 작아질수록 3점 굽힘강도는 증가되어지지만 파괴인성 값은 큰 변화를 확인할 수 없었다. 따라서 입자의 조합을 이용하여 3점 굽힘강도 및 파괴인성을 향상시키기 위해 입자 조합을 변화시키면서 실험을 실시하였다. 예전 실험에서 사용되었던 조성인 PCS1-1과 비교실험을 실시하였다. PCS1-2, 3, 4의 경우는 가장 큰 기지상 입자를 130 μ m로 하고 이들 입자간에 형성되는 공간에 작은 입자들이 충전된다고 가정하여 조합하였고, PCS1-5는 PCS1-1의 조성에서 기지상이 형성된 공간에 작은 입자가 충전되고 다시 형성된 공간에 더 작은 입자가 충전된다고 가정하여 조합을 구성하였으며, PCS1-6은 PCS1-5에 기지상의 입자를 더 큰 입자로 변화시켜 조합을 구성하였다. 각 입자들의 혼합량은 SiC 각 입자들이 3배위로 배열된다고 가정하여 형성된 공간에 작은 입자들이 빈 공간에 들어갈 수 있는 분말 중에서 가장 큰 분말을 입자 충전율을 높이기 위하여 선정하였다. 미립 SiC 첨가량의 결정은 체심입방 충전율 (68%)와 면심입방 충전율 (74%)을 고려하여 기지상 형성 분말을 70%, 그리고 충전 분말을 30%로 선정하여 조합을 선정하였다.

Fig. 3은 Table 2의 조합으로 제조된 탄화규소 성형체의 밀도 및 용융 Si 침윤법에 의해 제조된 반응소결 탄화규소 소결체 시편의 밀도를 나타내었다. 성형밀도는 미립을 사용하여 제조된 PCS1-1의 경우보다 두 가지 다른 입자를 혼합하여 성형한 시편 (PCS1-2, 3, 4)에서 더 높게 나타났다. 하지만 미세 입자를 첨가할 때마다 형성되는 작은 공간에 충전될 수 있도록 미립의 4종류의 크기가 다른 입자들을 조합하여 만든 시편 (PCS1-5, 6)의 경우에는 성형밀도가 감소되는 것을 확인할 수 있었다. 하지만 소

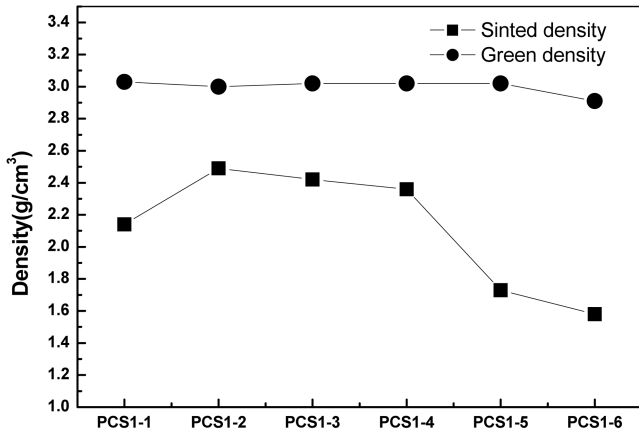


Fig. 3. Variation of green and sintered densities of RBSC fabricated by Si infiltration process as a function of SiC particle size.

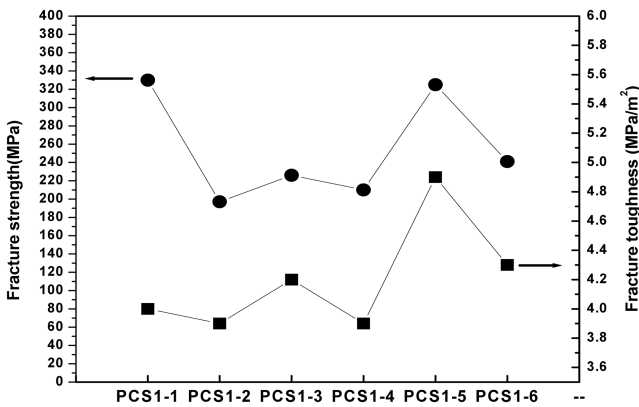


Fig. 4. Variation of 3-point bending strength and fracture toughness of RBSC fabricated by Si infiltration process as a function of SiC particle size.

결시 Si ingot를 사용하여 용융 Si를 침유시킨 시편에서는 큰 소결밀도의 차이를 확인할 수 없었다. 이런 현상은 분말을 성형할 때 형성되어진 미세 기공에 Si가 용융되어 침윤되면서 Si의 침투성이 높아져 미세 기공에도 쉽게 침투되어 기공을 제거하였기 때문에 발생하는 것으로 판단된다.

Fig. 4는 Si 침윤법에 의해 제조된 반응소결 탄화규소 시편의 3점 굽힘강도 및 파괴인성을 측정된 결과이다. 3점 굽힘강도를 측정된 기존의 PSC1-1의 조합에서보다 지지상의 입자가 130 μm로 큰 입자를 지지상으로 사용하고 그 보다 작은 입자를 사용한 시편들(PCS1-2, 3, 4)에서 PSC1-1에서 보다 낮은 값을 나타내는 것을 관찰할 수 있었다. 그리고 지지상 입자로 130 μm를 사용하고 형성된 공간에 충전 될 수 있는 작은 4 종류의 입자를 각각 혼합한 경우(PCS1-5)에는 미립의 입자를 사용하여 제조한 시편 (PSC1-1)과 거의 유사한 3점 굽힘 강도를 나타내는 것을 관찰할 수 있었다. 하지만 지지상 입자를

270 μm를 사용하고 충전이 가능한 4 종류의 입자를 혼합하여 제조한 시편 (PCS1-6)에서는 도리어 강도가 감소되는 것을 관찰할 수 있었다. 이 현상은 130 μm의 입자를 지지상으로 사용하였을 때에는 그 입자들이 형성하는 공간 사이에 투입되는 입자들이 공간의 크기와 거의 유사한 입자를 사용하였지만 270 μm의 입자를 사용하였을 때에는 270 μm의 공간과 거의 유사한 입자가 투입되지 못해서 발생하는 현상으로 판단되어진다. 이들 입자들이 3 배위를 이룬다고 가정하였을 때 투입될 수 있는 가장 최대 입자 직경은 약 34 μm였다. 하지만 파괴인성의 경우는 기존 미립의 입자 조합의 값, 3.9 MPa·m^{1/2}와 비교하여 보면 두 성분의 혼합으로 제조된 시편 (PCS1-2, 3, 4)에서는 거의 유사한 파괴인성을 나타내었다. 하지만 지지상 입자를 130 μm를 사용하고 형성되어지는 공간에 충전 될 수 있는 4 종류의 입자를 혼합한 시편 (PCS1-5)에는 4.9 MPa·m^{1/2}로 1.0 MPa·m^{1/2} 정도 증가된 것을 확인할 수 있었다. 하지만 지지상 입자를 270 μm를 사용하고 4 종류의 충전 입자를 혼합하여 제조한 시편 (PCS1-6)에서는 4.3 MPa·m^{1/2}로 기존 조합의 파괴인성보다는 증가되었지만 PCS1-5의 경우보다는 도리어 낮은 값을 가지는 것을 관찰 할 수 있었다.

Fig. 5는 SiC 입자 크기의 변화와 파괴인성 값의 관계를 확인하기 위하여 시편의 파단면 미세구조를 관찰한 사진이다. 관찰된 파단면에서는 PSC1-1 시편에서는 지지상 입자와 충전 입자가 비교적 균일하게 분포되어 있고 침윤된 Si 역시 균일하게 침윤된 것을 확인할 수 있다. 하지만 지지상을 130 μm를 사용하고 충전 입자의 차이를 둔 시편 (PCS1-2, 3, 4)의 경우에는 지지상 사이에 미립의 입자들이 충전되면서 용융 Si의 침윤이 완벽하게 되지 않고 입자들의 결합만이 이루어진 부분이 많이 관찰되어진다. 하지만 PCS1-5 시편의 경우는 지지상 입자의 주변에 미립의 들이 치밀하게 충전되었지만 크기가 다른 SiC 입자들 간의 neck 부분에 용융 Si의 침윤이 잘 형성되어 가장 높은 파괴인성을 나타내는 것을 관찰 할 수 있다. PSC1-6의 경우는 지지상 입자와 충전되는 입자의 크기가 너무 차이가 크기 때문에 지지상 입자와 충전 입자 사이에 미립의 입자가 충전되지 않은 부분이 있어 지지상 입자 사이의 neck 부분에서 완전히 치밀화 되지 않은 부분이 존재하여 PSC1-5에서 보다 낮은 3점 굽힘강도 및 파괴인성을 나타내는 것으로 생각된다.

Fig. 6는 파괴인성 변화에 대한 원인을 고찰하기 위하여 시편의 표면 연마후 SEM을 이용하여 미세구조를 관찰한 사진이다. PSC1-1의 경우는 지지상으로 혼합된 입자와 충진을 위해 투입된 입자 크기의 차이가 크기 않아 지지상 입자와 충전 입자간의 접촉점에서 투입된 carbon source와 침윤된 Si의 결합에 의해 형성된 SiC가 결합을 이루어 파괴 인성이 비교적 높게 나타난 것으로 생각된다.

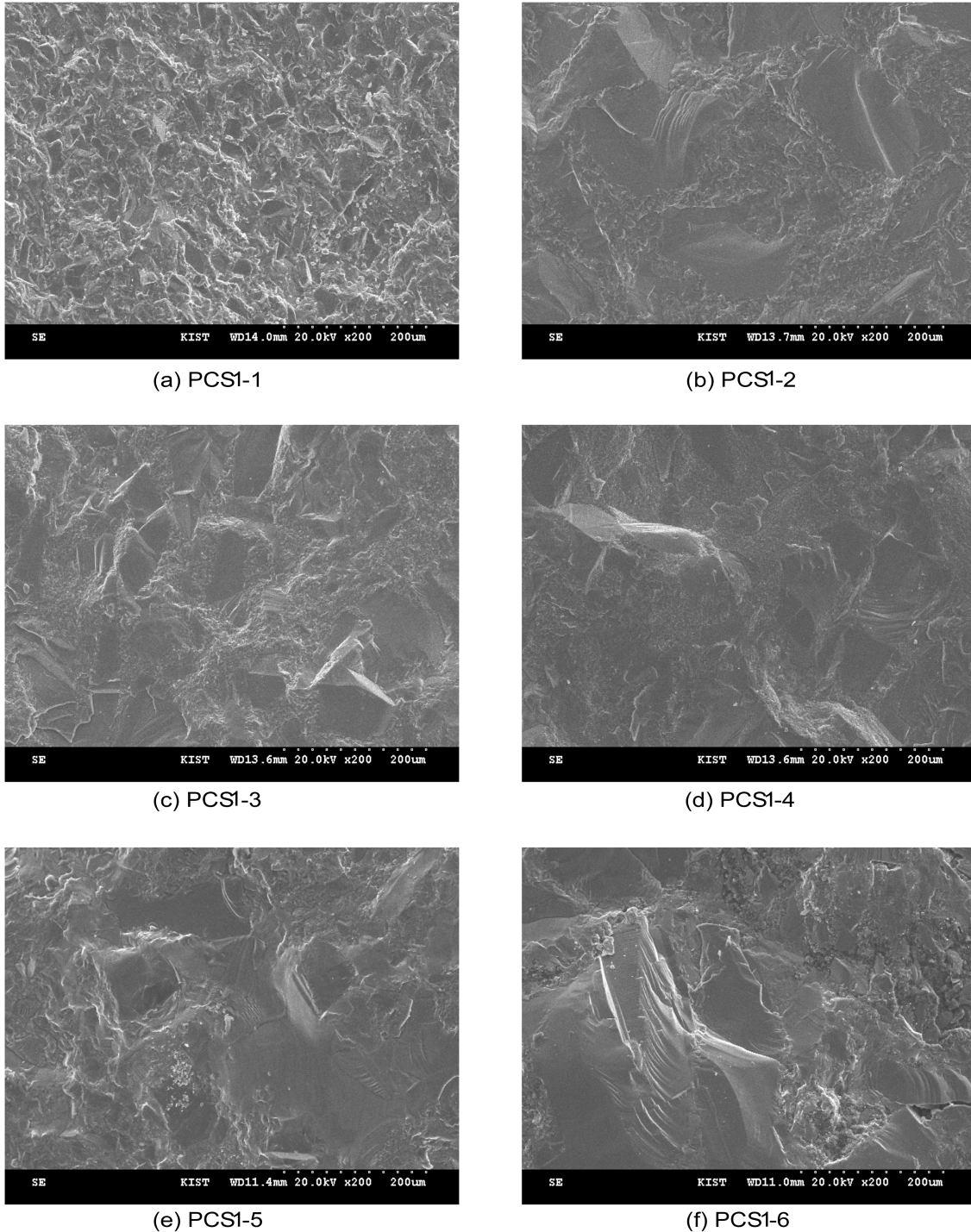


Fig. 5. SEM microstructures of fracture surface of RBSC fabricated by Si infiltration process as a function of SiC particle size.

다. 하지만 PCS1-2, 3, 4의 경우는 기지상인 $130\ \mu\text{m}$ 크기의 입자들 사이에 충진을 위해 투입된 입자들이 기지상 입자의 접촉을 억제하여 기지상 입자간의 접촉 계면에서 소결 과정에서 형성되는 SiC가 충진을 위해 투입된 미립자의 표면과 기지상의 표면에만 형성된 것을 관찰할 수 있다. 하지만 PCS1-5의 경우는 기지상 입자를 제외한 3

가지 크기의 입자들이 비교적 균일하게 분포되어 있는 것을 확인할 수 있다. 뿐만아니라 기지상 입자와 미립자의 접촉점도 소결과정에서 형성된 SiC에 의해 결합된 부분이 많아 여러 시편들(PCS1-1, 2, 3, 4) 중에서 가장 높은 파괴인성을 나타내는 것으로 설명할 수 있다. 하지만 기지상으로 $270\ \mu\text{m}$ 크기의 입자를 기지상으로 사용했을 경

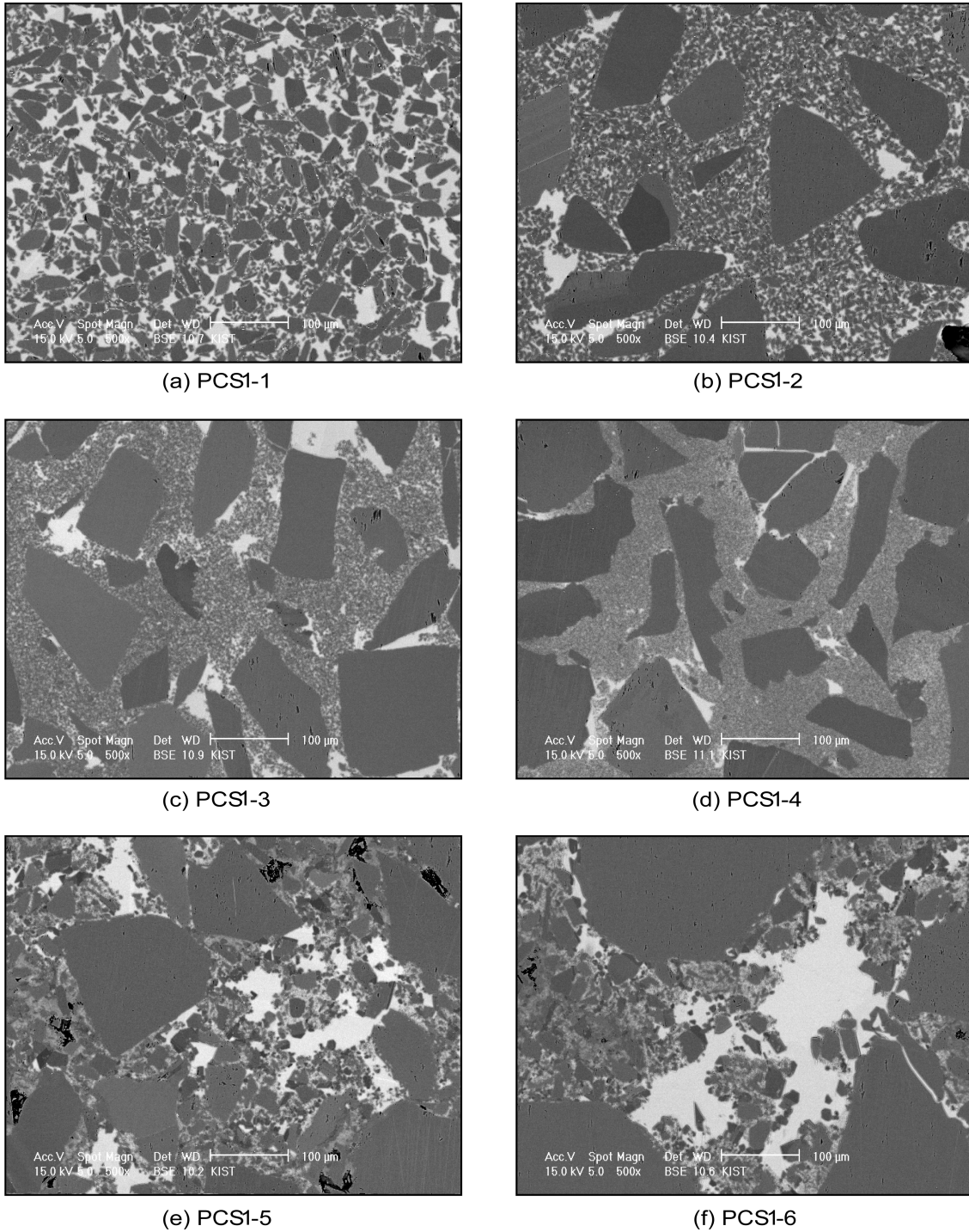


Fig. 6. SEM microstructures of polished surface of RBSC fabricated by Si infiltration process as a function of SiC particle size.

우에는 130 μm 입자를 기지상으로 사용했을 때 보다 기지상 입자간의 결합이 적으며, 기지상 입자 사이에 많은 양의 Si이 함침되어 파괴 강도 및 파괴 인성의 저하를 나타낸 것으로 판단된다. 따라서 기지상으로 사용된 조대 SiC 입자와 미세 SiC 입자들의 적절한 크기 조합 및 혼합비를 통한 충진을 향상이 반응소결 탄화규소 복합체의

기계적 특성에 영향을 미치는 것을 확인할 수 있었다

4. 결 론

용융 Si가 침윤된 반응소결 탄화규소 소결체의 제조에서 입자 크기의 영향에 대한 실험으로부터 다음과 같은

결론을 얻었다.

서로 다른 입자 크기를 갖는 SiC를 혼합하여 제조한 시편의 경우 35 μm 와 6.2 μm 의 조합에서 3점 굽힘강도 값이 330 MPa, 파괴인성 값이 4.0 MPa·m^{1/2}인 시편을 얻었고, 입자 충진을 3배위로 가정하고 그 틈새 자리에 입자들이 충진되도록 크기를 선정하고 충진율을 계산하여 무게비가 선정된 시편 (PSC1-5)에서 3점 굽힘강도는 323 MPa, 파괴인성 값이 4.9 MPa·m^{1/2}이었다. 혼합 입자의 사용에서 기지상과 입자간의 틈새 크기에 따라, 즉 형성되는 틈새의 크기보다 작거나 너무 큰 입자를 사용하면 소결 후 충진 입자가 너무 작은 경우 입자의 응집 현상이 발생되고 용융 Si의 침윤이 감소되는 현상을 확인할 수 있었다. 따라서 용융 Si 침윤법에 의해 탄화규소 소결체의 제조에서 입자 크기 및 혼합비의 선정이 기계적 특성 향상에 영향을 미치는 것을 확인할 수 있었다.

Acknowledgment

본 연구는 지식경제부에서 시행한 에너지·자원기술개발사업에 의하여 연구되었으며, 이에 감사드립니다.

REFERENCES

1. P. Popper, "The Preparation of Dense Self-bonded Silicon Carbide," *Speci. Ceram.*, Heywood London, 207-19 (1960).
2. C. W. Forrest, P. Kennedy, and J. V. Shennan, "The Fabrication and Properties of Self-Bonded Silicon Carbide Bodies," *Speci. Ceram., British Ceram. Res. Asso., U.K.*, **5** 99-127 (1972).
3. J. B. Wachtman Jr., "Structural Ceramics," *Academic Press Inc.*, **29** 99-160 (1972).
4. J. N. Ness and T. F. Page, "Microstructural Characterization of Reaction-Bonded Silicon Carbide," *J. Mater. Sci.*, **21** 1377-97 (1986).
5. R. Naslain and F. Langlais, "Fundamental and Practical Aspects of the Chemical Vapor Infiltration of Porous Substrates," *Carbon*, **27** 221-35 (1990).
6. T. M. Besmann, B. W. Sheldon, R. A. Lowden, and D. P. Stinton, "Vapor-Phase Fabrication and Properties of Continuous-Filament Ceramic Composites," *Science*, **253** 1104-09 (1991).
7. R. Naslain, J. Lamon, R. Pailler, X. Bourrat, A. Guette, and F. Langlais, "Micro/minicomposites a Useful Approach to the Design and Development of Nonoxide CMCs," *Composites, Part A* **30** 537-47 (1999).
8. K. Sato, A. Tezuka, O. Funayama, T. Issoda, Y. Terada, S. Kato, and M. Iwata, "Fabrication and Pressure Testing of a Gas-Turbine Component Manufactured by a Pre-ceramic-Polymer-Impregnation Method," *Compos. Sci. Technol.*, **59** 853-59 (1999).
9. S. M. Dong, Y. Katoh, A. Kohyama, S. T. Schwab, and L. L. Snead, "Microstructural Evolution and Mechanical Performances of SiC/SiC Composites by Polymer Impregnation/Microwave Pyrolysis (PIMP) Process," *Ceram. Int.*, **28** 899-905 (2002).
10. A. Sayno, C. Sutoh, S. Suyama, Y. Itoh, and S. Nakagawa, "Development of a Reaction-Sintered Silicon Carbide Matrix Composite," *J. Nucl. Mater.*, **271-272** 467-71 (1999).
11. S. P. Lee, Y. Katoh, T. Hinoki, M. Kotani, and A. Kohyama, "Microstructure and Bending Properties of SiC/SiC Composites Fabricated by Reaction Sintering Process," *Ceram. Eng. Sci. Proc.*, **21** [3] 339-46 (2000).
12. S.M. Dong, Y. Katoh, and A. Kohyama, "Processing Optimization and Mechanical Evaluation of Hot Press 2D Tyranno-SA/SiC Composites," *J. Eur. Ceram. Soc.*, **23** 1223-31 (2003).
13. S.M. Dong, Y. Katoh, and A. Kohyama, "Preparation of SiC/SiC Composites by Hot Press, using Tyranno-SA Fiber as Reinforcement," *J. Am. Ceram. Soc.*, **86** [1] 26-32 (2003).
14. S.P. Lee, M. Imai, and T. Yano, "Fabrication and Mechanical Properties of Oriented SiC Short-Fiber-Reinforced SiC Composites by Tape Casting," *Mater. Sci. Eng.*, **A 339** 90-5 (2003).