〈 논문 〉

나노입자 혼합 복합슬러리를 이용한 반응소결 SiC 재료의 제조

이 상 필*

(2004 년 7 월 1 일 접수, 2004 년 11 월 8 일 심사완료)

Fabrication of Reaction Sintered SiC Materials by Complex Slurry with Nano Size Particles

Sang-Pill Lee

Key Words : C/SiC Complex Slurry(C/SiC 복합스러리), Flexural Strength(굽힘강도), Microstructure (미세조직), Nano Powder(나노 분말), Reaction Sintering SiC(반응소결 탄화규소)

Abstract

The efficiency of complex slurry preparation route for developing the high performance SiC matrix of RS-SiC_f/SiC composites has been investigated. The green bodies for RS-SiC materials prior to the infiltration of molten silicon were prepared with various C/SiC complex slurries, which associated with both the sizes of starting SiC particles and the blending conditions of starting SiC and C particles. The characterization of RS-SiC materials was examined by means of SEM, EDS and three point bending test. Based on the mechanical property-microstructure correlation, the process optimization is also discussed. The flexural strength of RS-SiC materials greatly depended on the content of residual Si. The decrease of starting SiC particle size in the C/SiC complex slurry was effective for improving the flexural strength of RS-SiC materials.

1. 서 론

에너지산업 및 우주항공산업 분야에서는 1000 ℃ 이상의 온도에서 적용할 수 있는 고 기능성 극 고온 구조재료의 개발이 활발히 진행되고 있다. 핵융합 에너지 분야에서는 고효율 에너지 생산시스템에 필요한 첨단 브랑케트 및 제 1 벽 재료의 개발을 위하여 세라믹 복합재료의 도입을 급속히 추진되고 있다.[1~3] 또한, 우주항공산업에서는 컴버스터(Combustor), 터빈 블래이드(Turbine blade)와 같은 고성능 가스터빈 시스템의 부품을 성형하기 위하여 실리사이드 계열의 금속간화합물, 세라믹 및 세라믹 복합재료를 중심으로 소재 개발을 추진해 왔다.[4~7] 세라믹 복합재료 중에서 SiC 섬유 강화 SiC 기지 복합재료(SiC_f/SiC)는 경량이면서 고온강도와 치수안정성이 우수하며, 내열재료 특유의 저온 취성이 없고 중성자 조사에 대한 유도 방사능 레벨이 극도로 작기 때문에 핵융합로 발전시스템 및 가스터빈 부품에 적용이 기대되고 있다. 최근 고온 안정성이 우수한 SiC 섬유가 개발됨에 따라 CVI 법(Chemical vapor infiltration), PIP(Polymer impregnation and pyrolysis)로 주류를 이루던 SiC_f/SiC 복합재료의 제조공법은 반응소결법(Reaction sintering; RS)과 고온가압법(Hot pressing; HP)으로 확대되고 있다.[8~12] SiC_f/SiC 복합재료의 특성을 개선하기 위해서는 고순도 SiC 기지재의 성형 및 치밀화가 매우 중요하다. PIP 법 및 CVI 법은 SiC 기지재가 강화섬유 구조물의 외부에서 먼저 형성되기 때문에 재료 내부에 공동이 많이 발생하여 재료 밀도가 낮은 치명적인 단점이 있다. 반응소결법은 SiC 입자과 C 입자를 함유한 예비성형체 속으로 용융 Si 를 침투시켜 새로운 결정성 β-SiC 상을 형성시키는 방법으로서 CVI 법 및 PIP 법의 주된 결점인 낮은 밀도에 의한 열전도율 감소를 보완할 수 있으며 정밀정형가공이 가능한 프로세스로 고려되고 있다. 그러나, 반응소결 과정에서 용융 Si 는 예비성형체 내부의 공공이나 기공을 채우므로 기계적 특성을 저하시키는 잔류 Si

* 회원, 동의대학교 기계공학부
E-mail : splee87@deu.ac.kr
TEL : (051)890-1662 FAX : (051)890-2232

가 존재한다. 고성능 SiC_f/SiC 복합재료를 개발하기 위한 반응소결법을 고도화하기 위해서는 잔류 Si 의 함량을 억제할 수 있는 제조공정을 체계적으로 확보하는 것이 중요하다. 잔류 Si 함량는 용융 Si 을 함침하는 공정을 통해 제어하기는 곤란하며 SiC 와 C 입자를 혼합한 복합슬러리의 제조상태 및 복합슬러리의 제작에 사용한 초기 SiC 의 입자 크기와 연계한 예비성형체의 제조공정 변화를 통하여 억제할 수 있을 것으로 생각된다. 반응소결 SiC 재료를 개발하기 위한 기존의 연구는 평균 입경이 약 1~12μm 인 SiC 입자를 C/SiC 복합슬러리의 제조에 사용하고 있다.[13,14] 나노 크기의 SiC 입자를 C/SiC 복합슬러리의 제작에 활용하는 것은 반응소결 SiC 재료의 미세조직과 기계적 특성에 상당한 영향을 미칠 것으로 생각된다. 초미세 SiC 입자와 C 입자들을 사용하여 균질한 C/SiC 복합슬러리를 제조하는 공정을 확립함으로써 잔류 Si 함량의 감소뿐만 아니라 잔류 Si 을 결정성 SiC 입자 주위에 균일하게 분산시켜 반응소결 SiC 재료의 특성을 개선할 수 있을 것으로 생각된다.

본 연구에서는 나노 크기의 SiC 입자들과 C 입자를 이용하여 다양한 C/SiC 복합 슬러리를 제조하고 SiC 입자 크기, C/SiC 배합비 등의 복합 슬러리의 제조공정이 반응소결 SiC 재료의 강도특성에 미치는 영향에 대해 제조 프로세스의 관점에서 평가하였다. 또한, 반응소결 SiC 재료의 미세 조직을 명확히 분석하고 잔류 Si 함량과 강도의 관계를 평가하였다.

2. 실험 방법

2.1 C/SiC 복합스러리의 제조

반응소결 SiC 재료의 특성은 예비성형체의 제작에 사용되는 C/SiC 복합슬러리의 균질성과 밀접한 관계를 가진다. C/SiC 복합슬러리는 SiC 입자, C 입자, 분산재, 증류수를 일정한 비율로 혼합하고 유성형 회전식의 볼 밀러(Ball miller)와 직경이 0.3 mm 인 SiC 볼을 사용하여 제작하였다. SiC 입자와 C 입자의 혼합공정에 사용한 회전수와 배합시간은 각각 150rpm 과 5, 24 시간으로 설정하였다. C/SiC 복합슬러리의 제조에는 약 30 nm 와 약 300 nm 의 평균 입경을 가지는 SiC 입자와 평균 입경이 약 85 nm 인 C 입자를 사용하였다. C/SiC 복합슬러리의 제조공정에 따른 반응소결 SiC 재료의 특성 변화를 조사하기 위하여 SiC 입자와 C 입자의 배합비는 0.3, 0.5, 0.7 로 하였으며 복합슬러리의 pH 농도는 3, 7, 11 로 변화시켰다.

2.2 반응소결 SiC 재료의 제조

반응소결 SiC 재료의 제조에 사용할 예비성형체는 일정한 가스압력으로 성형하는 가스 가압주조법으로 제작하였다. 함침장치에 설치한 사각형상의 금형에 액상의 C/SiC 복합슬러리를 넣고 8.0 MPa 의 가스압력으로 가압하여 예비성형체를 성형하였다. 제조한 예비성형체의 크기는 40 mm × 40 mm × 4 mm 로 하였다. SiC 재료는 예비성형체에 용융 Si 을 주입하는 반응소결법으로 제조하였다. 반응소결 공정에서는 예비성형체 내부에 존재하는 C 입자들은 용융 Si 와 반응하여 SiC 결정으로 전환되고 기공이나 공공들은 용융 Si 으로 채워져 치밀화가 수행된다. 용융 Si 의 함침온도와 함침유지시간은 각각 1450 ℃와 2 시간으로 하였으며 함침 중에는 6×10^{-2} Pa 의 진공분위기를 유지하였다. 반응소결 SiC 재료는 C/SiC 복합슬러리의 배합조건에 따라 각각 2 개를 제작하였으며 재료 표면을 다이아몬드 연삭기로 연마하여 40 mm × 40 mm × 3 mm 의 크기로 가공하였다.

2.3 반응소결 SiC 재료의 특성 평가

반응소결 SiC 재료의 소결밀도는 측정용 시험편을 # 1500 의 연마지를 사용하여 표면을 연마한 후 아르키메데스의 원리를 이용한 수중중량법을 사용하여 측정하였다. 정확한 밀도의 측정을 위하여 2 개의 소결재료에서 10 개의 시험편을 채취하여 사용하였다. 반응소결 SiC 재료의 내부에 존재하는 잔류 Si 의 함량은 측정한 소결밀도를 이용하여 결정하였다. 특히, 반응소결 SiC 재료의 제작에 사용한 C/SiC 복합 슬러리의 제조 변수에 따른 잔류 Si 의 함량을 평가하였다.

반응소결 SiC 재료의 미세조직은 에너지 분광분석기(EDS : Energy dispersive spectrometer)가 장착된 주사형 전자현미경(SEM; Scanning electron microscope)을 사용하여 분석하고 관찰하였다. 반응소결 SiC 재료의 강도특성은 7 개의 시험편을 사용하여 3 점 굽힘시험으로 상온에서 평가하였다. 특히, C/SiC 복합슬러리의 제조과정에서 사용한 C 입자와 SiC 입자의 배합비(C/SiC: 0.3, 0.5, 0.7), pH 농도(pH: 3. 7. 11) 및 SiC 입자 크기(30 nm, 300 nm)가 반응소결 SiC 재료의 굽힘강도에 미치는 영향에 대해 조사하였다. 굽힘시험편은 0.3 ㎛의 다이아몬드 입자를 사용하여 표면을 연마하여 두께 4 mm, 폭 4 mm, 길이 25 mm 인 크기로 제작하였다. 굽힘시험에 사용한 스팬(span) 길이와 크로스헤드(crosshead)의 속도는 각각 18 mm 와 0.5 mm/min 으로 하였다.

3. 실험결과 및 고찰

3.1 반응소결 SiC 재료의 미세조직

Fig. 1 는 C/SiC 복합슬러리의 제작에 사용한 초기 SiC 입자의 크기에 따른 반응소결 SiC 재료의 미세조직을 관찰한 결과를 나타낸다. C/SiC 복합슬러리는 C 입자와 SiC 입자를 0.5 의 배합비로 하여 5 시간 동안 150 rpm 의 혼합속도로 제작하였다. 또한, EDS 를 사용하여 미세조직에 존재하는 각 반응상을 분석하여 Table 1 에 나타내었다. 반응소결 SiC 재료는 C/SiC 복합슬러리의 제조에 사용된 초기 SiC 입자의 크기에 상관없이 소량의 기공이나 공공이 존재하는 치밀한 미세조직을 나타내었다. 그러나, 용융 Si 의 함침공정에서 예비성형체를 구성하는 C/SiC 복합슬러리의 C 입자들이 용융 Si 와 반응하여 SiC 상을 형성하는 동시에 예비성형체 내부에 존재하는 미세한 대부분의 기공 혹은 공공이 용융 Si 로 채워지기 때문에, 반응소결 SiC 재료의 미세조직은 크게 SiC 상과 잔류 Si 상으로 구성되어 있다. 특히, Table 1 의 EDS 분석 결과에 의하면, 미세조직에는 Si 와 C 의 함량에 따라 두 가지 종류의 SiC 상이 형성되어 있다. 다시 말하면, Si/C 의 비율이 약 0.9 인 준결정성 SiC 상(Near stoichiometric SiC)과 Si/C 의 비율이 약 1.7 인 Si 의 함량이 높은 SiC 상(Si rich SiC)이 미세조직을 형성하고 있다. 이러한 미세조직의 불균질성은 SiC 상의 주위에 반응하지 않은 C 입자와 잔류 Si 가 미세하게 존재하기 때문이다.[15] 또한, C/SiC 복합슬러리의 제조를 위해 30 nm 의 초기 SiC 입자를 사용한 경우, 많은 양의 잔류 Si 상이 존재하는 조직적 불안정을 나타내고 있다. 이것은 초기 SiC 입자의 크기가 매우 작으므로 응집현상이 쉽게 발생하여 C/SiC 복합 슬러리가 불균질하기 때문에 발생한 것으로 생각된다.

Fig. 2 는 C 입자와 SiC 입자(30 nm)를 0.5 의 배합비로 하여 24 시간 동안 150 rpm 의 혼합속도로 혼합하여 조제한 C/SiC 복합슬러리를 사용하여 제조한 반응소결 SiC 재료의 미세조직을 나타낸다. Fig. 1(b)와 Fig. 2 의 결과로부터, C/SiC 복합슬러리의 혼합시간은 반응소결 SiC 재료의 미세조직에 크게 영향을 미친다는 것을 알 수 있다. 다시 말하면, C/SiC 복합슬러리의 혼합시간을 5 시간으로 하여 제조한 반응소결 SiC 재료의 미세조직[Fig. 1(b)]에 존재하고 있는 잔류 Si 상은 C/SiC 복합슬

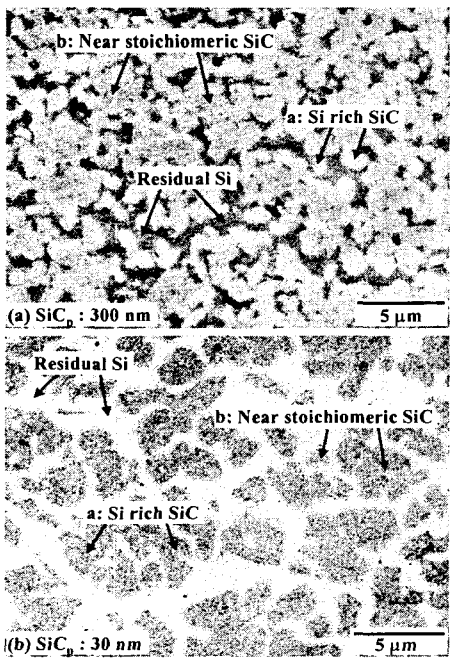

Fig. 1 Microstructures of RS-SiC materials depending on the size of starting SiC particles used for the preparation of C/SiC complex slurry. (C/SiC ratio: 0.5)

Table 1 Chemical composition of a and b portions displayed in Fig.2, as identified by the EDS quantitative analysis

Portion	Si (atom %)	C (atom %)
a	63	37
b	48	52

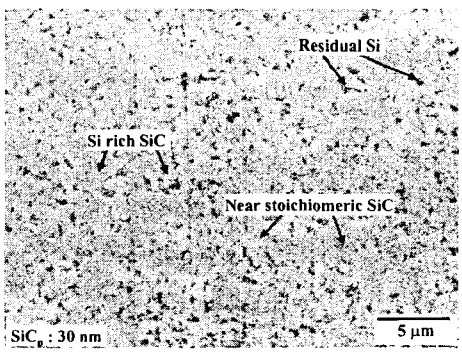

Fig. 2 Microstructure of RS-SiC material with the C/SiC complex slurry prepared by the blending condition of 150 rpm and 24 hours. (SiC$_p$: 30 nm, C/SiC ratio: 0.5)

러리의 혼합시간을 24 시간으로 증가함에 따라 크게 감소하고 있다. 이것은 C/SiC 복합슬러리의 혼합시간을 증가시킴에 따라 SiC (30 nm) 분말과 C 분말 (85 nm)이 균질하게 혼합되었기 때문인 것으로 생각된다. 그러나, EDS 의 분석에 의하면, Fig. 2 에 나타낸 반응소결 SiC 재료의 미세조직은 여전히 Si 와 C 의 함량이 서로 다른 준 결정성 SiC 상과 Si 의 함량이 높은 SiC 상을 형성하고 있다.

3.2 반응소결 SiC 재료의 밀도 및 잔류 Si 함량

Fig. 3 은 C/SiC 복합슬러리의 제조에 사용한 pH 농도가 반응소결 SiC 재료의 소결밀도와 잔류 Si 의 함량에 미치는 영향을 나타낸다. C/SiC 복합슬러리는 C 입자와 300 nm 입경의 SiC 입자를 0.5 의 배합비로 혼합하여 5 시간 동안 150 rpm 의 혼합속도로 조제하였다. C/SiC 복합슬러리를 함유한 예비성형체에 대한 용융 Si 의 함침은 우수한 밀도를 제공한다는 것을 알 수 있다. 반응소결 SiC 재료는 pH 7 의 C/SiC 복합슬러리를 사용함으로써 다소 우수한 결과를 나타내고 있다. 그러나, 측정오차범위를 간주하면 C/SiC 복합슬러리의 조제에 사용한 pH 농도는 반응소결 SiC 재료의 소결밀도와 잔류 Si 함량에 그다지 영향을 미치지 않는 것으로 생각된다. 반응소결 SiC 재료는 C/SiC 복합슬러리의 pH 농도에 상관없이 약 3.1 g/cm^3 의 밀도와 약 20 %의 잔류 Si 함량을 나타내었다.

Fig. 4 는 C/SiC 복합슬러리의 제조에 사용한 C 입자와 SiC 입자의 혼합비가 반응소결 SiC 재료의 소결밀도와 잔류 Si 의 함량에 미치는 영향을 나타낸다. C/SiC 복합슬러리는 C 입자와 300 nm 입경의 SiC 입자를 혼합하여 pH 7 의 농도를 유지하면서 5 시간 동안 150 rpm 의 혼합속도로 조제하였다. 반응소결 SiC 재료의 소결밀도는 C/SiC 복합슬러리의 배합비에 따라 변화하고 0.5 의 C/SiC 혼합비에서 약 3.1 g/cm^3 의 우수한 밀도를 나타내었다. 특히, 반응소결 SiC 재료의 미세조직에 존재하는 잔류 Si 의 함양은 C/SiC 복합슬러리의 제조에 관계하는 C 와 SiC 입자의 혼합비에 크게 의존하고 있다. C/SiC 혼합비가 0.3, 0.5, 0.7 인 복합슬러리를 사용한 경우, 반응소결 SiC 재료의 잔류 Si 함량은 각각, 30 %, 19 %, 27 %를 나타내었다. 이러한 연구의 결과로부터, 반응소결 SiC 재료에 높은 밀도와 낮은 잔류 Si 함량을 제공하기 위한 C/SiC 복합슬러리의 제조 조건은 평균 입경이 300 nm 인 초기 SiC 분말을 사용하는 경우에 0.5 의 C/SiC 혼합비를 우선적으로 선택할 수 있다.

Fig. 5 는 C/SiC 복합슬러리의 제조에 사용한 SiC 입자 크기와 혼합시간이 반응소결 SiC 재료의

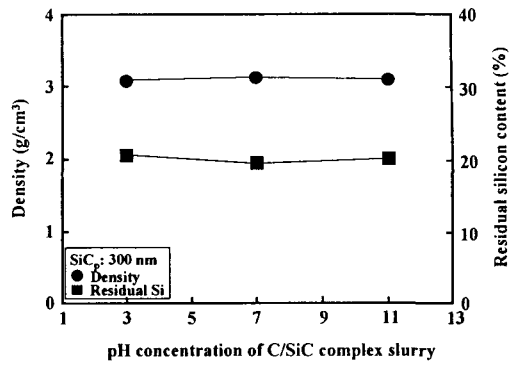

Fig. 3 Effect of pH concentration of C/SiC complex slurry on the sintered density and the residual silicon content of RS-SiC materials. (C/SiC ratio : 0.5)

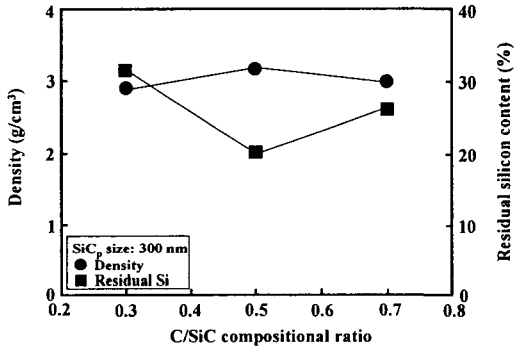

Fig. 4 Effect of compositional ratio of C and SiC particles used for the preparation of complex slurry on the sintered density and the residual Si content of RS-SiC materials.

소결밀도와 잔류 Si 의 함량에 미치는 영향을 나타낸다. C/SiC 복합슬러리는 C 입자와 30 nm 와 300 nm 의 입경을 가지는 SiC 입자를 0.5 의 배합비로 혼합하고 pH 농도를 7 로 유지하면서 각각 5 시간과 24 시간 동안 150 rpm 의 혼합속도로 조제하였다. C/SiC 복합슬러리를 5 시간 동안 혼합한 경우, 초기 SiC 입자 크기가 감소할수록 반응소결 SiC 재료의 소결밀도는 조금 감소하지만 잔류 Si 의 함량은 크게 증가하고 있다. 300 nm 입경의 SiC 입자를 함유하고 있는 C/SiC 복합슬러리를 사용한 반응소결 SiC 재료는 약 19 %의 잔류 Si 함량을 나타내는 반면에 C/SiC 복합슬러리의 제조에 30 nm 입경의 SiC 입자를 사용한 경우에는 약 37 %의 잔류 Si 함량을 나타내었다. 이것은 Fig, 1(b)의 미세조직에서 알 수 있듯이 초기 SiC 입자 크기가

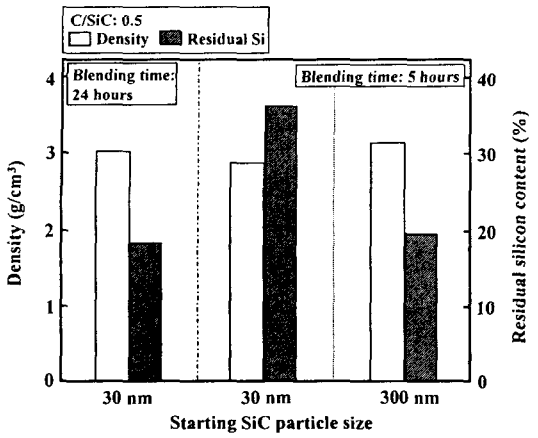

Fig. 5 Effect of starting SiC particle size and blending time for the preparation of C/SiC complex slurry on the sintered density and the residual Si content of RS-SiC materials

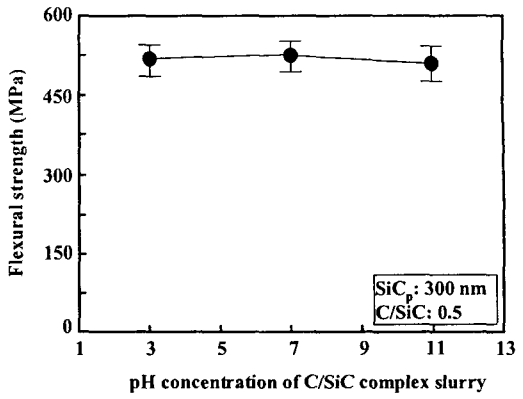

Fig. 6 Effect of pH concentration of C/SiC complex slurry on the flexural strength of RS-SiC materials

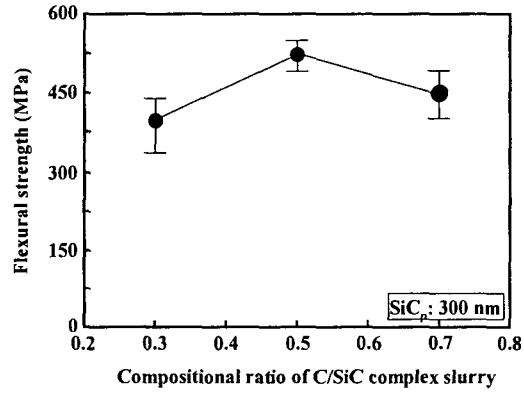

Fig. 7 Effect of compositional ratio of C and SiC particles used for the preparation of complex slurry on the flexural strength of RS-SiC materials

크게 감소함에 따라 30 nm 입경의 SiC 입자가 서로 응집되어 잔류 Si 가 광범위하게 분포하기 때문이다. 그러나 30 nm 입경의 SiC 입자를 사용하여 C/SiC 복합슬러리를 제조하는 경우, 반응소결 SiC 재료의 잔류 Si 함량은 SiC 입자과 C 입자의 혼합시간을 증가시킴으로써 감소할 수 있다는 것을 알 수 있다. 다시 말하면, 30 nm 입경의 SiC 입자와 C 입자의 혼합시간을 24 시간으로 증가시킴에 따라, 반응소결 SiC 재료는 약 3.0 g/cm^3 의 소결밀도를 유지하면서 약 17 %의 잔류 Si 함량을 나타내고 있다. 이것은 혼합시간의 증가에 의해 C/SiC 복합슬러리의 균질성이 개선되었기 때문이라고 생각된다.

3.3 반응소결 SiC 재료의 강도특성

Fig. 6 은 C/SiC 복합슬러리의 제조에 사용한 pH 농도가 반응소결 SiC 재료의 굽힘강도에 미치는 영향을 나타낸다. 반응소결 SiC 재료의 제조에는 C 입자와 300 nm 입경의 SiC 입자를 0.5 의 배합비로 혼합하고 5 시간 동안 150 rpm 의 혼합속도로 조제한 C/SiC 복합슬러리를 사용하였다. 반응소결 SiC 재료는 오차범위를 간주하면 C/SiC 복합슬러리의 pH 농도에 관계없이 거의 동일한 수준의 굽힘강도를 나타내고 있다. 이것은 Fig. 3 의 결과에서 알 수 있듯이 C/SiC 복합슬러리의 pH 농도가 변화하더라도 반응소결 SiC 재료는 유사한 소결밀도와 잔류 Si 의 함량을 소유하기 때문인 것으로 생각된다.

Fig. 7 은 C/SiC 복합슬러리의 제조에 사용한 C 입자과 SiC 입자의 혼합비가 반응소결 SiC 재료의 굽힘강도에 미치는 영향을 나타낸다. 반응소결 SiC 재료의 제작에 사용한 C/SiC 복합슬러리는 C 입자와 300 nm 입경의 SiC 입자를 혼합하여 pH 농도를 7 로 유지하면서 5 시간 동안 150 rpm 의 혼합속도로 조제하였다. 반응소결 SiC 재료의 굽힘강도는 C/SiC 복합슬러리의 제조에 사용한 C 입자와 SiC 입자의 혼합비에 크게 영향을 받으며 0.5 의 C/SiC 배합비에서 가장 우수한 굽힘강도를 나타내었다. C/SiC 입자의 배합비가 0.3, 0.5 및 0.7 인 경우에 반응소결 SiC 재료의 굽힘강도는 각각 약 390 MPa, 약 530 MPa 및 약 450 MPa 을 나타내었다. Fig. 4 의 결과에 따르면, 이러한 현상은 C 입자와 SiC 입자의 배합비가 증가함에 따라 반응소

결 SiC 재료의 잔류 Si 함량이 0.5 의 C/SiC 배합비에서 크게 감소하기 때문인 것으로 생각된다.

Fig. 8 은 C/SiC 복합슬러리의 제조에 사용한 초기 SiC 입자 크기와 혼합시간이 반응소결 SiC 재료의 굽힘강도에 미치는 영향을 나타낸다. C/SiC 복합슬러리는 C 입자와 30 nm 와 300nm 의 입경을 가지는 SiC 입자를 0.5 의 배합비로 혼합하고 pH 농도를 7 로 유지하면서 혼합시간을 각각 5 시간과 24 시간으로 변화시켜 150 rpm 의 혼합속도로 조제하였다. 반응소결 SiC 재료의 굽힘강도는 C/SiC 복합슬러리의 제조에 사용한 초기 SiC 입자 크기와 혼합시간에 크게 의존하고 있다. C/SiC 복합슬러리의 혼합시간을 5 시간으로 설정한 경우, 초기 SiC 입자 크기를 감소함에 따라 반응소결 SiC 재료의 굽힘강도는 크게 감소하였다. C/SiC 복합슬러리의 제조를 위해 300 nm 입경의 SiC 입자를 사용한 경우에는 반응소결 SiC 재료는 약 530 MPa 의 굽힘강도를 나타내는 반면에 30 nm 입경의 SiC 입자를 사용한 경우에는 약 360 MPa 의 굽힘강도를 나타내고 있다. 그러나, 30 nm 입경의 SiC 입자를 사용한 경우에 C/SiC 복합슬러리의 혼합시간를 24 시간으로 증가시킴에 따라 반응소결 SiC 재료의 굽힘강도는 약 580 MPa 로서 크게 개선되고 있다. 이와같이, C/SiC 복합슬러리의 제조에 사용한 초기 SiC 입자 크기와 혼합시간에 따라 변동하는 반응소결 SiC 재료의 굽힘강도는 미세조직에 존재하는 잔류 Si 의 함량과 밀접한 관계가 있다.

Fig. 9 는 반응소결 SiC 재료의 굽힘강도와 잔류 Si 함량의 상관관계를 나타낸다. 반응소결 SiC 재료의 굽힘강도는 초기 SiC 입자 크기, C/SiC 배합비 및 pH 농도와 같은 C/SiC 복합슬러리의 제조조건에 따라 변화하는 잔류 Si 함량에 강력하게 의존하고 있다. 다시 말하면, 반응소결 SiC 재료의 미세조직에 존재하는 잔류 Si 함량이 감소함에 따라 굽힘강도는 급격히 증가하고 있다. 이러한 현상은 미세조직에 존재하는 잔류 Si 함량의 감소가 상대적으로 고강도의 반응소결 SiC 상의 생성 비율을 증대시키기 때문인 것으로 생각된다. 본 연구의 결과에 따르면, 반응소결 SiC 재료는 C/SiC 복합슬러리의 제조에 30 nm 입경의 SiC 입자를 사용하여 결정된 약 17 %의 잔류 Si 함량에서 가장 우수한 굽힘강도(약 580 MPa)를 나타내었다. 따라서, 고성능 반응소결 SiC 재료를 개발하기 위해서는 초기 C 입자와 SiC 입자의 균일한 분산을 통하여 잔류 Si 의 함량을 억제할 수 있는 C/SiC 복합슬러리의 제조방법을 확보하여 미세조직을 안정화하는 것이 중요하다고 생각된다.

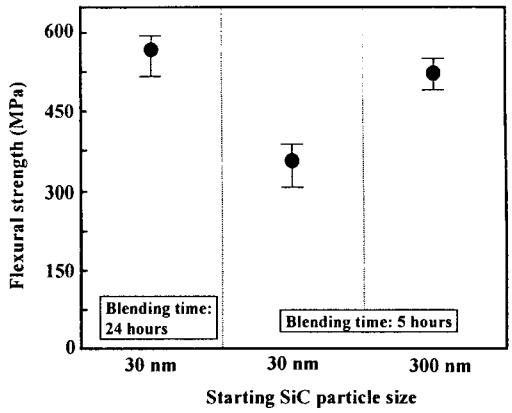

Fig. 8 Effect of starting SiC particle size and blending time used for the preparation of C/SiC complex slurry on the flexural strength of RS-SiC materials. (C/SiC ratio: 0.5)

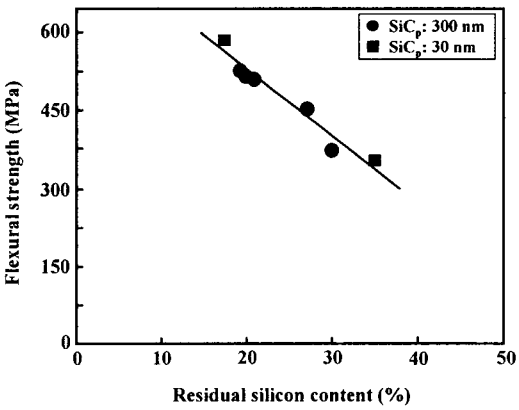

Fig. 9 Relationship between flexural strength and residual silicon content in RS-SiC materials

4. 결 론

(1) 반응소결 SiC 재료의 미세조직에는 C/SiC 복합슬러리의 제조에 사용한 초기 SiC 입자 뿐만 아니라 준 결정성 SiC, Si 의 함량이 높은 SiC 및 잔류 Si 가 형성되었다.

(2) 반응소결 SiC 재료의 소결밀도와 잔류 Si 함량은 C/SiC 복합슬러리의 제작 조건에 크게 의존하였다. 특히, C 입자와 300 nm 입경의 SiC 입자를 0.5 의 배합비로 혼합한 C/SiC 복합슬러리를 사용한 경우에, 반응소결 SiC 재료의 소결밀도와 잔류 Si 함량은 각각 3.1g/cm^3, 19 %를 나타내었다.

(3) C/SiC 복합슬러리의 제작에 30 nm 입경의

SiC 입자를 사용한 경우에는 C 입자와 SiC 입자의 혼합시간을 증가시키는 방안이 잔류 Si 함량의 억제에 유효하였다.

(4) 반응소결 SiC 재료의 굽힘강도는 잔류 Si 의 함량이 증가함에 따라 급격히 감소하였다. 반응소결 SiC 재료는 C/SiC 복합슬러리의 제조에 30 nm 입경의 SiC 입자를 사용하여 결정된 약 17 %의 잔류 Si 함량에서 가장 우수한 약 580 MPa 의 굽힘강도를 나타내었다.

후 기

본 논문는 2002 년도 한국학술진흥재단의 지원에 의하여 연구되었습니다. (KRF-2002-003-D00147)

참고문헌

(1) Fenici, P. Frias, A.J. Jones, R.H. Kohyama, A. and Snead, L.L. (1998). "Current Status of SiC/SiC Composites R&D," *J. of Nuclear Materials*, Vol 258~263, pp. 215~225.

(2) Hasegawa, A., Kohyama, A., Jones, R.H. Snead, L.L., and Fenici, P., 2000, "Critical Issues and Current Status of SiC/SiC Composites for Fusion," *Journal of Nuclear Materials*, Vol. 283~287, pp. 128~137.

(3) Kohyama, A., Seki, M., Abe, K., Muroga, T., Matsui, H., Jitsukawa, S. and Matsuda, S., 2000, "Inreractions Between Fusion Materials R&D and Other Technologies," *Journal of Nuclear Materials*, Vol. 283~287, pp. 20~27.

(4) Nishio, K., Igashira, K., Take, K. and Suemitu, T., 1998, "Development of the Combustor Liner Composed of Ceramic Matrix Composite (CMC) ," *Journal of the Turbine Society of Japan*, Vol. 26, pp. 102~106.

(5) Brewer, D., 1999, "HSR/EPM Combustor Material Development Program," *Materials Science and Engineering*, A261, pp. 284~291.

(6) Petrovic, J. J. and Vasudenvan, A. K., 1999, "Key Developments in High Temperature Structural Silicides," *Material Science and Engineering*, A261, pp. 1~5.

(7) Sang-Pill Lee and Han-Ki Yoon, 2002, "Fabrication and Fracture Properties of Nb/$MoSi_2$ Laminate Composites," *Trans. of the KSME A*, Vol. 26, No. 6, pp. 1047~1052.

(8) Katoh, Y., Kotani, M., Kishimoto, H., Yang, W. and Kohyama, A., 2000, "Properties and Radiation Effects in High-temperature Pyrolyzed PIP-SiC/SiC," *Journal of Nuclear Materials*, Vol. 289, pp. 42~47.

(9) Yang, W., Noda, T., Araki, H., Yu, J. and Kohyama, A., 2003, "Mechanical Properties of Several Advanced Tyranno-SA fiber-reinforced CVI-SiC Matrix Composites," *Materials Science and Engineering*, A345, pp. 28~35.

(10) Dong, S., Katoh, Y. and Kohyama, A., 2003, "Processing Optimization and Mechanical Evaluation of Hot Pressed 2D Tyranno-SA/SiC Composites," *Journal of the European Ceramic Society*, Vol. 23, pp. 1223~1231.

(11) Kameda, T., Suyama, S., Itoh, Y. and Goto, Y., 1999, "Development of Continuous SiC Fiber-Reinforced Reaction Sintered SiC Matrix Composites," *Journal of the Ceramic Society of Japan*, Vol. 107, pp. 327~334.

(12) Lee, S.P., Katoh, Y., Park, J.S., Kohyama, A., Suyama, S. and Yoon, H.K., 2001, "Microstructural and Mechanical Characteristics of SiC/SiC Composites with Modified-RS Process," *Journal of Nuclear Materials*, Vol. 289, pp. 30~36.

(13) Suyama, S., Katoh, Y., Kohyama, A. and Itoh, Y., 2002, "Effect of Residual Silicon Phase on Reaction-sintered Silicon Carbide," *Ceramic Transactions*, Vol. 144, pp. 181~185.

(14) Wilhelm, M., Kornfeld, M and Wruss, W., 1999, "Development of SiC-Si Composites with Fine-grained SiC Microstructures," *Journal of European Ceramic Society*, Vol. 19, pp. 2155~2163.

(15) Lee, S.P., Katoh, Y. and Kohyama, A., 2001, "Microstructure Analysis and Strength Evaluation of Reaction Sintered SiC/SiC Composites," *Scripta Materialia*, Vol. 44, No. 1, pp. 153~157.