

고압 자전연소 소결법을 이용한 섬유강화 복합체의 제조

방환철 · 고철호 · 임동원 · 김봉섭 · 최태현* · 윤준도

경남대학교 대학원 재료공학과

*대구공업대학교 세라믹공학과

(2000년 2월 14일 접수)

Fabrication of Fiber-Reinforced Composites by High Pressure Self-Combustion Sintering Method

Hwancheol Bang, Cheolho Go, Dongwon Im, Bongseob Kim, Taehyen Choi* and Jondo Yun

Department of Materials Engineering, Graduate School, Kyungnam University, Masan 631-701, Korea

*Department of Ceramics, Taegu Technical College, Taegu, 704-721, Korea

(Received February 14, 2000)

초 록

탄소섬유와 티타늄 분말로부터 섬유강화 티타늄기 복합체를, 그리고 탄소섬유, 알루미늄, 산화티타늄 분말로부터 알루미늄기 복합체를 고압자전연소소결법을 이용하여 합성과 동시에 치밀화함으로써 제조할 수 있었다. 제조한 복합체들은 짧은 탄소섬유가 평면방향으로 배향된 상태로 잘 분산되어 있었다. 합성된 티타늄기 복합체는 Ti 첨가량이 증가할수록, 또는 반응시간이 증가할수록 밀도가 증가하였으며 원섬유 표면의 사이징제를 제거하고 합성함으로써 탄소섬유와 기지상 사이에 존재하는 미세기공을 제거할 수 있었다. 알루미늄기 복합체내의 섬유는 반응이 진행됨에 따라 탄소섬유에서 탄화티타늄 섬유로 변화해 가는 단계적 모습을 보였다. 섬유 주변의 여러 상과 기지상에 대한 성분을 조사하였고, 과단면 분석과 비커스 경도를 측정하였다.

ABSTRACT

Dense composites of titanium matrix and Al_2O_3 matrix with reinforcements of carbon or titanium carbide fibers were successfully fabricated by high-pressure self-combustion sintering method or combustion reaction under 30 MPa of uniaxial pressure with an aid of external heating in vacuum. It was found that the fibers were uniformly distributed in the matrix, and aligned in a plane perpendicular to the pressure axis. As a mole ratio of Ti/C or reaction time increased, the density of Ti-matrix composite increased. Micro pores around fibers could be removed by using clean carbon fibers without sizing agent on their surface. The evolution of carbide fibers from carbon fibers was observed. The composition of the various phases around fibers were analyzed.

Key words : Carbon fibers, Composites, Microstructure, Self-propagating high-temperature synthesis, High-pressure self-combustion sintering

1. 서 론

자전연소 합성법은 반응물의 높은 반응열을 이용하는 방법으로 미세한 분말상의 반응물질을 혼합하여 점화시키면 자발적 반응이 이루어지며, 원하는 물질이 합성된다. 이 반응을 이용하면 다량의 세라믹을 값싸고 신속하게 합성할 수 있고, 높은 연소온도로 반응물에 포함된 휘발성의 불순물을 증발시켜 순도가 높은 세라믹을 얻을 수 있다는 장점이 있다.¹⁻⁶⁾ 자전연소합성법은 분말합성에는 이점이 있으나, 치밀한 세라믹을 제조하기 위해서는 고온에서 이미 합성된 분말을 다시 미분쇄하여 소결하여야 하므로, 공정상의 비효율 요소가 있고 이미 만들어진 유용한 미세구조가 파괴되는 불리한 점이 있다. 이를 개선하기 위하여 합성과 소결의 두 공정을 결합한 즉석 연소합성-치밀화 복합공정이 개발되었는

데, 자전연소반응을 일으킨 후 즉시 가압하는 방법,⁷⁾ 가압 상태에서 자전연소합성을 일으키는 방법,⁸⁾ 자전연소반응 후 충격파를 가하는 방법,^{9,10)} 압연을 하며 자전연소반응을 일으키는 방법^{11,12)} 등이 그것이다. 가압상태에서 자전연소합성을 일으키는 방법으로서, 야마다¹³⁾ 등은 고압자전연소소결법을 개발하여 시편에 압력을 가하면서 점화를 시켜 95% 이상 치밀한 TiB_2 , SiC 등을 제조하였다. 이 방법은 합성율이 높고 비교적 간단한 장치로 치밀한 세라믹이나 복합체를 즉석에서 제조할 수 있는 이점이 있다.

TiC, TaC, ZrC, SiC 등 금속의 탄화물은 고경도, 고용점, 내열성, 내마모성이 우수하기 때문에 우주 항공 기계부품, 내화 내열재료, 등 구조재료로서 널리 사용된다. 또한, 세라믹, 금속 복합체의 강화재 이차상으로 사용되는데, 입상보다는 섬유상의 이차상을 사용하는 것이 물성 향상에 도움이

된다는 것은 잘 알려져 있다. 그러나, 섬유상 탄화물은 일반적인 방법으로는 제조가 어렵고, 단가가 높은 단점을 가지고 있다. 최근, 섬유상 탄화물을 자전연소합성법을 이용하여 손쉽게 제조하려는 시도가 있어 왔다.¹⁴⁻¹⁷⁾ 멀린스 등은 자전연소합성법으로 탄소섬유와 티타늄 분말로부터 탄화티타늄 섬유의 제조에 성공하였다.¹⁴⁾ 방환철 등은 자전연소합성법으로 TiC를 비롯한 ZrC, NbC, B₄C, SiC 물질에서도 섬유를 제조하였고 이들 섬유의 형성 메커니즘을 연구하였다.¹⁷⁾ 윤준도 등은 이들 탄화물 섬유를 상압 또는 가압소결하여 알루미늄기 복합체 치밀체를 제조하였으나, 섬유상 이차상을 얻는데는 실패하였다. 이는 소결구동력을 얻기 위한 분쇄공정에서 섬유가 모두 깨졌기 때문이었다.¹⁸⁾ 섬유상 이차상을 가지면서 치밀질 복합체를 제조하기 위해서는 섬유합성과 치밀화를 동시에 일으킬 수 있는 복합공정을 이용하면 될 것으로 보이나, 현재까지 이같은 방법을 시도한 연구보고는 없었다. 따라서, 본 연구에서는 연소합성-치밀화 복합공정의 하나인 고압자전연소소결법을 이용하여 티타늄기 또는 알루미늄기 섬유강화 복합체의 제조를 시도하였고, 제조된 복합체의 미세구조와 성분에 대한 분석을 실시하여 그 공정을 평가하였다.

2. 실험방법

티타늄기와 알루미늄기의 두가지 복합체를 고압자전연소합성법으로 제조하였다. 먼저, 티타늄기 복합체의 원료 분말로는 티타늄 분말과 탄소섬유(태광산업, 직경 6.8 μm, 길이 1 mm)를 사용하였다. 티타늄 분말의 탄소섬유에 대한 몰비가 1, 2, 3, 4가 되도록 칭량한 후 각각을 유발에서 혼합하였다. 알루미늄기 복합체의 원료 분말로는 같은 종류의 탄소섬유, 산화티타늄 분말, 및 알루미늄 분말을 사용하였으며, 각각을 3 : 3 : 4의 몰비로 칭량한 후 유발에서 혼합하였다. 이와 같이 각각 혼합한 분말에 유압프레스로 30 MPa의 일축 압력을 가하여 직경 20 mm의 원통형 펠렛을 성형 제조하였다.

각각의 방법에 따라 제조한 성형체를 Fig. 1과 같은 고압자전연소소결 장치내 진공 분위기 중에서 30 MPa의 압력을 가하며 반응을 시켰다. 발열체의 전력을 8 kW로 하고 유지시간을 변화시키며 시편을 합성하였다. 합성된 시편을 아르키메데스의 원리를 이용하여 밀도를 측정하였다. 합성된 시편을 분쇄, 절단, 또는 파단하여 엑스선 회절분석 장치와 주사전자 현미경을 이용하여 상 분석 및 미세구조 분석을 실시하였으며, 초박형(ultra thin) 윈도우 장착 엑스선 분광분석기(EDS)를 이용하여 탄소를 비롯한 성분분석을 실시하였다. 미소경도계를 이용하여 하중 1 kg으로, 유지시간은 10 초로 하여 비커스 경도를 측정하였다. 사용한 탄소섬유의 표면은 에폭시 화합물이 주성분인 사이징제로 코팅되어 있었는데, 사이징제의 효과를 알아보기 위하여 사이징제를

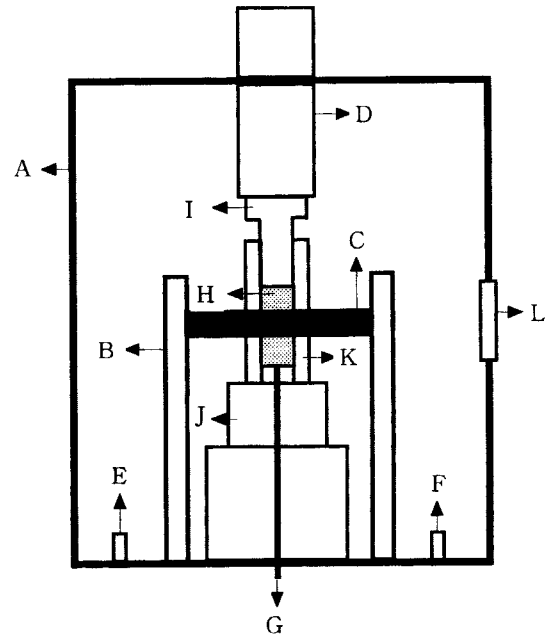


Fig. 1. Schematic diagram of the reaction chamber. A: chamber, B: electrode, C: carbon heater, D: ram, E: vacuum valve, F: gas inlet, G: thermocouple(C-type), H: sample, I: upper plunger, J: support, K: graphite mold, L: window.

제거한 탄소섬유로 복합체를 합성하고 비교하였다. 사이징제의 제거는 아세톤 용해, 초음파 세척, 여과의 과정들을 세 번 반복하여 실시하였다.

3. 결과 및 고찰

3.1. Ti기 복합체 시편의 제조 (TC 시편)

반응 시간을 1, 3, 6분으로 변화시키며 제조한 Ti-C 복합체 시편(이하 TC 시편)의 엑스선 회절분석 결과를 Fig. 2에 나타내었다. 시편내에는 합성된 TiC와 미반응 티타늄이 공존하고 있으며, 반응 시간의 증가에 따라 미반응 티타늄의 양이 감소하고, 반응생성 TiC의 양이 늘어남을 알 수 있었다. 탄소 피크가 검출되지 않은 것은 탄소섬유의 결정도가 낮기 때문이다. Fig. 3에서 보는 바와 같이 주사전자 현미경 관찰에 의하면 섬유들이 파손되지 않고 잘 분산되어 있는 것을 알 수 있다. 여기에서 기지상 내에 검은 색깔의 것이 섬유상인데, 둥근 것은 가로로 잘린 단면을, 길쭉한 것은 세로로 잘린 단면을 보이고 있다. 대부분의 섬유 단면이 원형을 볼 때, 가압 방향에 수직인 수평면상으로 섬유들이 배향되어 있다는 것을 알 수 있다. 섬유와 기지상과의 사이에 중간 박기를 갖는 중간층이 관찰되는데, 반응 시간이 증가함에 따라 중간층의 두께가 증가하는 것을 볼 수 있다. 이는 선행 연구에서 고찰한 바와 같이¹⁸⁾ 반응 도중에 탄소 섬유의 표면에서 탄소 섬유와 티타늄 간의 계면 반응에 의

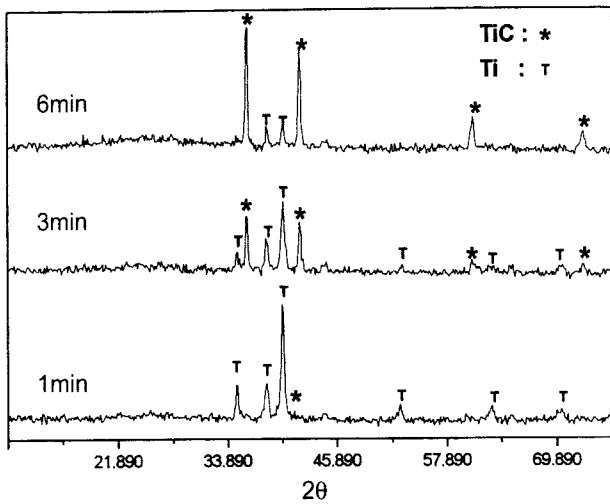
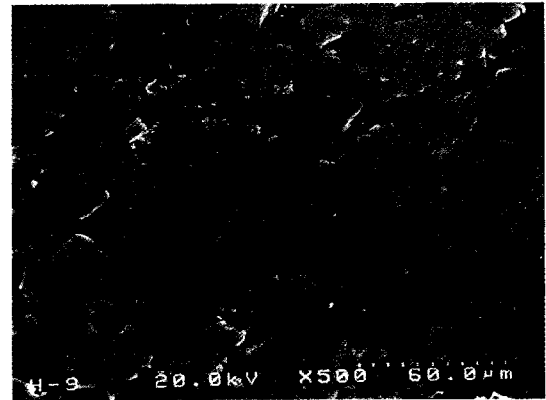


Fig. 2. XRD spectra of the Ti-C specimens (hereafter TC specimens) synthesized for various reaction times.

하여 탄화티타늄이 형성되고 반응이 진행됨에 따라 탄화티타늄 층이 두꺼워지기 때문이다. 각 층에 대한 엑스선 분광 분석(EDS) 결과는 예상한 대로 섬유는 탄소질, 중간층은 탄화티타늄질, 기지상은 티타늄질로 나타났다(Fig. 4). 탄화티타늄의 경우 탄소 피크가 낮게 나타난 것은 탄소의 $K\alpha$ 선 엑스선은 에너지가 0.282 keV로 매우 낮아서 검출기에서의 검출효율도 작고 시편내에서 흡수량도 크기 때문에 검출 엑스선량이 시편내 함유량보다 매우 작게 나타나기 때문이다. 또한, 탄소섬유내에서 검출된 티타늄의 양도 실제보다 과장되어, 그 실제량은 피크 강도의 1/10 이하의 작은 것이다. 반응 시간에 따라 밀도는 증가하는 것으로 나타났는데, Fig. 5에서 보는 바와 같이, 반응시간이 1분에서 12분으로 증가함에 따라 밀도는 3.17 g/cm^3 에서 3.7 g/cm^3 로 증가하였다. 이는 반응 도중 가열과 압력에 의하여 치밀화가 일어나며, 또한, 출발 원료인 탄소보다 비중이 높은 TiC가 합성됨에 따라 시편 전체의 밀도가 증가한 때문인 것으로 사료된다.

티타늄기 복합체의 섬유분율 변화 효과를 보기 위하여 티타늄 대 탄소의 몰비(이하 Ti/C 비율)를 1에서 4까지 변화시켜 합성 실험하였다. 합성된 시편의 미세구조 관찰결과, Fig. 6에서 보는 바와 같이 Ti/C 비율이 증가할수록 섬유의 분율이 줄어들고, 섬유의 분산도가 더 높아져서, 섬유의 부분적 뭉침에 의해 생성되는 거대 기공의 갯수가 감소하였는데, Ti/C 비율이 3 이상에서는 거대 기공을 거의 찾아볼 수 없었다. 밀도 측정 결과도(Fig. 7) 이와 비슷하여 Ti/C 비율이 증가함에 따라 밀도가 증가하지만, Ti/C 비율이 3 이상에서는 거의 변화가 없었다.

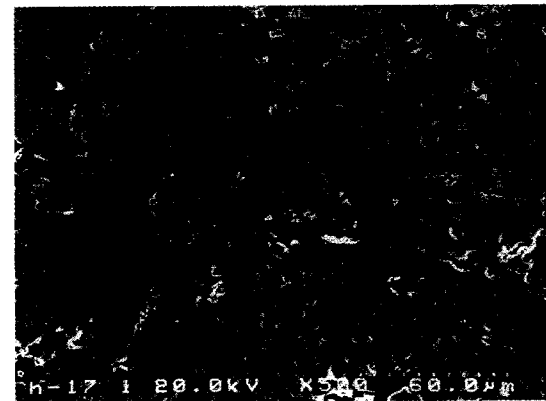
합성한 시편의 미세구조상에는 탄소섬유의 뭉침에 의한 거대 기공 이외에도 1~2 마이크로 크기의 미세 기공들이 다수 존재하고 있었다. 이 미세 기공들이 탄소 섬유와 기지상간의 계면 근처에 주로 존재하고 있으므로, 탄소 섬유 표



(a)



(b)



(c)

Fig. 3. SEM micrographs of TC specimens synthesized for various reaction times: a) one, b) three, and c) six minutes.

면에 코팅된 사이징제가 원인일 가능성이 있었다. 사이징제는 에폭시 성분으로 되어 있고 에폭시는 고온 반응중 분해하여 가스를 발생시킬 수 있기 때문이다. 따라서, 그 영향을 조사하기 위하여 사이징제를 아세톤 세척으로 제거한 뒤 복합체를 합성하고, 그 미세구조를 사이징제를 제거하지 않고 합성한 시편의 그것과 비교하였다. Fig. 8에서 보는 바와 같이 사이징제를 제거하지 않은 경우에는(Fig. 8a) 시편내 섬유 주위에 많은 미세 기공들이 존재하고, 사이징제를 제거

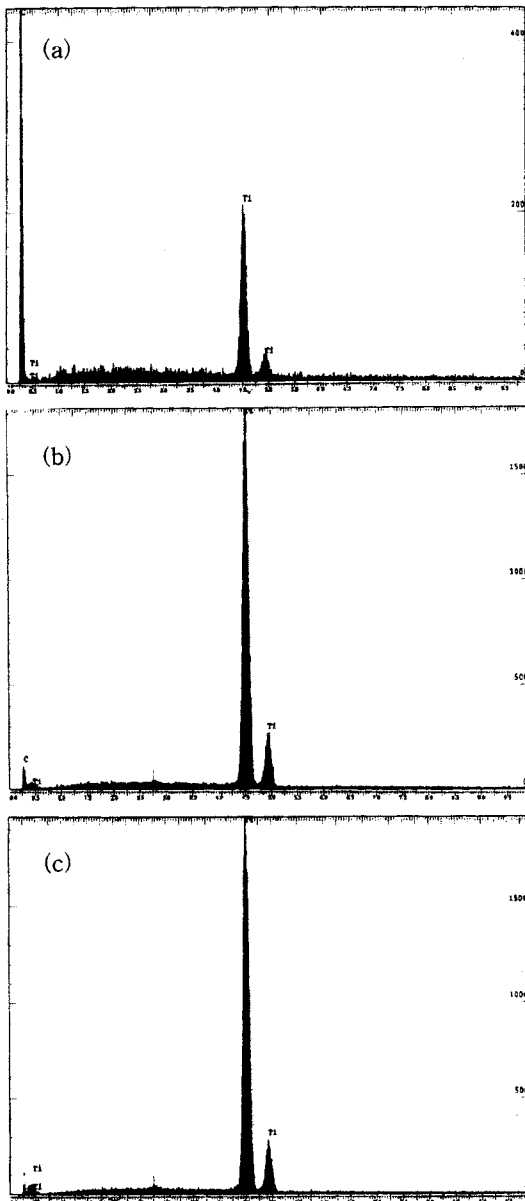


Fig. 4. EDS results obtained from a) the fiber, b) reaction layer, and c) the matrix of the TC specimen.

한 경우에는(Fig. 8b) 시편내 섬유 주위에 미세기공이 거의 존재하지 않음을 알 수 있다.

합성한 TC 시편은 티타늄 금속 기지상에 배향된 탄소섬유를 갖고 있으므로 기계적 물성의 향상이 기대된다. 시편에 꺾임 응력을 가하여 파괴한 후 그 파단면 관찰 사진과 비커스 경도 시험결과를 Fig. 9와 Fig. 10에 실었다. 그림에서 보는 바와 같이, 평면파괴를 보이는 파단면상에서 섬유가 다수 뿔힌 모습을 하고 있다. 밖으로 드러난 섬유의 직경이 약 6 마이크로미터로 탄소섬유의 그것과 비슷하며 디본딩된 것을 볼 때 시편의 파괴에너지를 흡수할 수 있을 것으로 생각된다.¹⁹⁾ Ti/C비가 3인 시편에서 측정된 경도값은 평

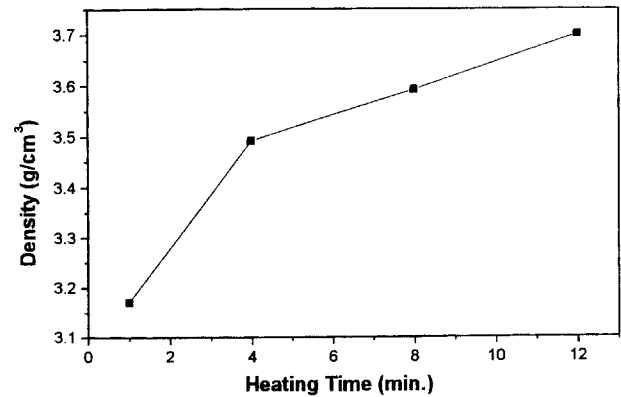
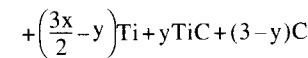
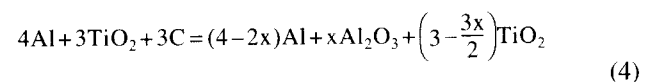


Fig. 5. Variation of density of TC specimens with increasing the reaction time.

균 281 Hv이었고, 와이블 계수는 5.8이었는데, 순수 티타늄의 경도값 110 Hv보다 높은 값을 나타내었다.²⁰⁾

3.2. Al₂O₃기 복합체 시편의 제조 (AT 시편)

알루미늄 분말, 산화티타늄 분말, 및 탄소섬유를 혼합하여 고압 자전연소 소결법으로 반응을 일으키면 시편(이하 AT 시편)내에서는 다음 (1)식과 같이 산화티타늄과 알루미늄이 테르밋 반응을 일으켜 티타늄과 산화알루미늄이 형성되고, (2)식과 같이 환원된 티타늄과 탄소섬유가 반응하여 탄소티타늄이 형성된다.



시편을 단열조건에서 합성반응을 일으키면 반응이 거의 완결되어 (1)+(2)=(3)식과 같이 알루미늄과 TiC 섬유만이 남아 있겠지만, 다른 물질과 접촉에 의하여 빠른 열손실이 일어날 때는 반응의 속도도 느려지며 반응이 완결되지 않아서 (4)식과 같이 부분적으로 미반응한 알루미늄, 산화티타늄, 탄소섬유, 티타늄이 남아있게 된다. 여기에서 x는 반응(1)이 완결되지 않았을 때의 알루미늄 생성 몰수이고 y는 반응(2)가 완결되지 않았을 때의 탄소티타늄 생성 몰수이다. 실험에서 합성한 AT 시편에 대한 X-선 회절분석결과(Fig. 11)는 시편내에 반응 생성물인 알루미늄, 탄소티타늄과 미반응 알루미늄, 티타늄과 함께 중간 반응 생성물인 TiO₂, Ti₂O₃, 등 Ti_nO_{2n-1}이 혼재되어 있음을 알려준다.

합성한 시편의 미세구조를 관찰하면 Fig. 12에 보는 바와 같이, 검은 색과 어두운 색의 둥근 또는 길쭉한 모양을 갖

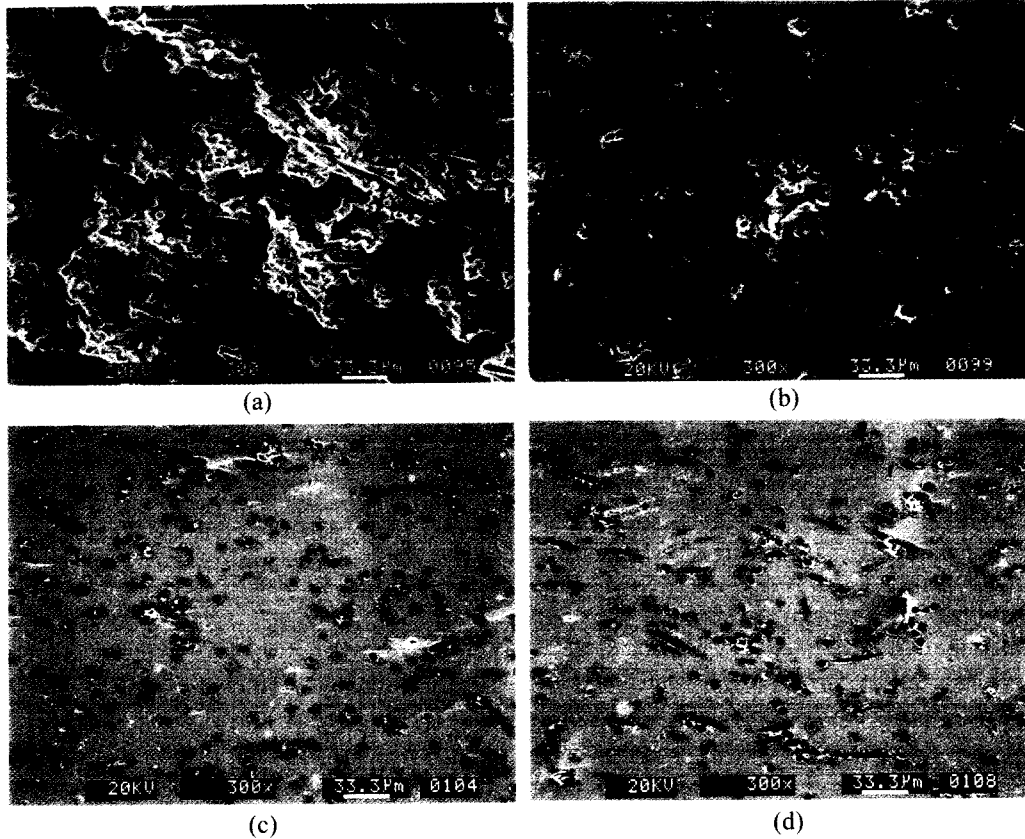


Fig. 6. Microstructure of the synthesized TC specimens with Ti/C mole ratios of a) one, b) two, c) three, and d) four. Note the decrease in the porosity with the increase in the Ti/C ratio.

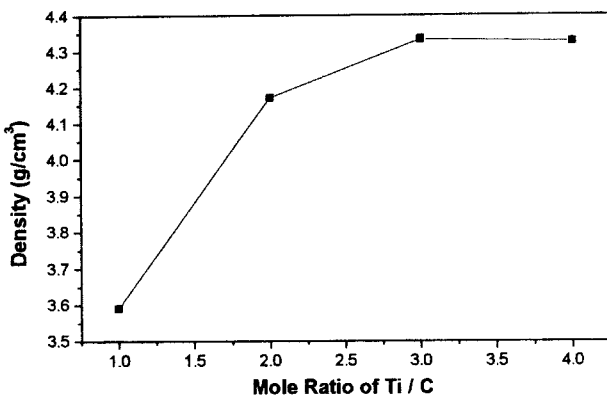
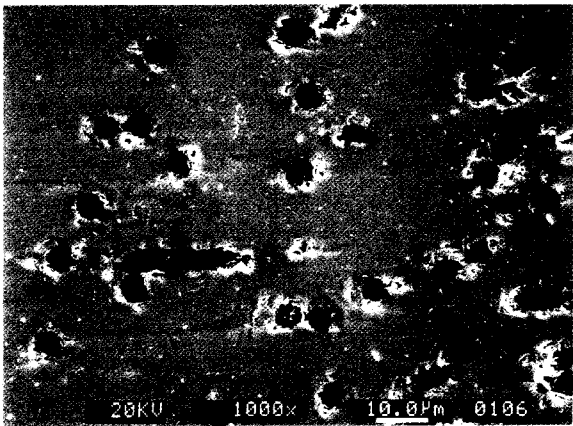


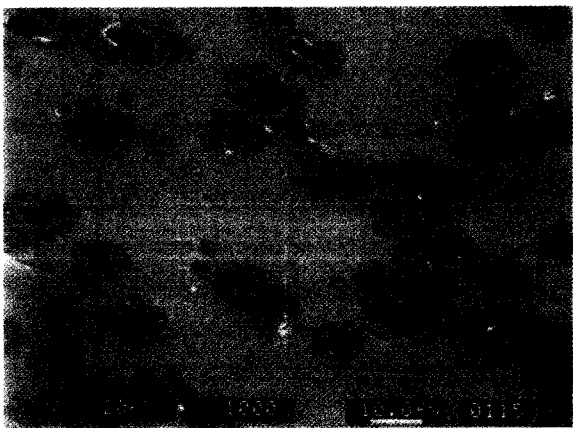
Fig. 7. Variation of density of the TC specimens with increasing Ti/C mole ratio.

섬유들이 존재하는데, 많은 섬유들이 원형 단면을 보이는 것으로 볼 때 섬유들이 가압 방향에 수직 방향인 수평면상에 배향되어 있는 것으로 사료된다. 지지상에 밝은 부분이 군데군데 보이는데 이는 알루미늄이 산화되어 형성된 알루미늄이나 입자가 포함되어 있어서 약간의 차징이 일어나기 때문이다. 또한, 시편내에서 TiC 섬유가 반응하는 과정을 관찰할 수 있었는데, 그에 따른 미세구조를 Fig. 13에 나타내었

다. Fig. 13a는 탄소섬유가 완전히 반응하지 않은 미반응 상태이고, Fig. 13c는 탄소섬유가 완전히 반응한 반응완료 상태를 나타내고, Fig. 13b는 그 중간 단계의 반응도중 상태를 나타내고 있다. 이를 엑스선 분광분석(EDS)하여 보면, Fig. 14에서 보는 바와 같이, 섬유 중심은 티타늄을 소량 함유하는 탄소로 되어있고(14a), 회색 콘트라스트의 반응된 부분은 알루미늄을 소량 함유하는 탄화티타늄이며(14c), 탄소섬과 탄화티타늄 껍질 사이에 Ti-Al-O 층이 형성되어 있는 것을 알 수 있다(14b). 같은 시편내에서 이와 같이 다른 반응 진척도를 보이는 것은 알루미늄과 산화티타늄이 완전히 섞이지 않아서 탄소 섬유주위에 환원 티타늄이 형성되었는가의 여부에 따라 섬유의 반응조건이 달라지기 때문으로 생각된다. Fig. 13을 다시 보면 미반응 탄소섬유 주변의 지지상은 어두운 색의 단일 콘트라스트를 갖고 있으며 반응도중 또는 반응완료 섬유 주변의 지지상은 밝은 상과 어두운 상이 균일하게 섞여 있는 복합체인 것을 알 수 있다. 엑스선 분광분석 결과, 미반응 탄소섬유 주변의 지지상은 Fig. 15a에서 보는 바와 같이 티타늄과 산소로 이루어져 있어서 지지상이 완전히 환원되지 않은 산화티타늄인 것을 보여주고 있고 반응완료 탄소섬유 주변의 지지상은 일부 티타늄과 알루미늄, 산소로 이루어져 있어서(Fig. 15b) 테르밋 반응이



(a)



(b)

Fig. 8. Microstructure of the synthesized TC specimens using carbon fibers from which sizing agent was a) not removed, and b) removed. Note the presence of fine pores around the fibers in a) specimen, and the absence in b).

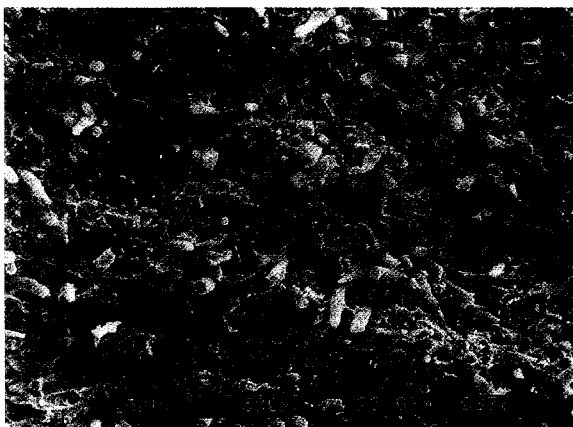


Fig. 9. Fractograph of the synthesized TC specimen showing that the fibers were pulled out.

완료된 산화알루미늄, 티타늄 복합체라는 것을 보여주고 있다. 합성한 시편의 파단면에서는 Fig. 16과 같이 평면파괴면

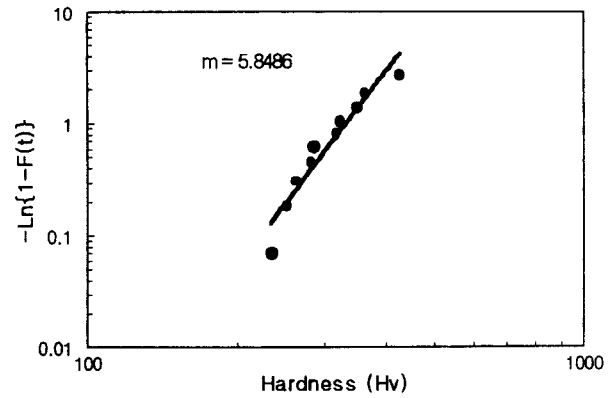


Fig. 10. Failure rate and hardness of the synthesized TC specimen of Ti/C ratio of three.

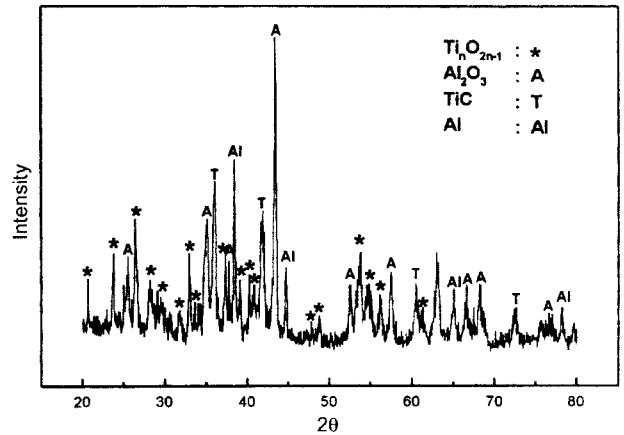


Fig. 11. X-ray diffraction spectra for the synthesized AT specimen.

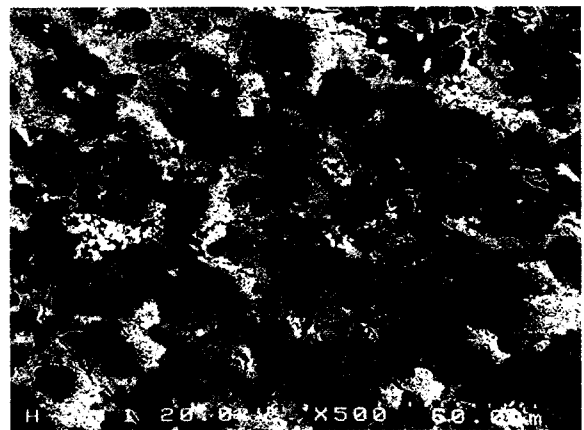


Fig. 12. Microstructure of the synthesized AT specimen.

에서 부분적으로 섬유가 뽑힌 모습이 관찰된다. 드러난 섬유 또는 구멍의 직경이 약 5-6 마이크론인 것으로 보아 미반응 또는 부분반응 탄소섬유가 뽑힌 것으로 생각된다. 합성한 AT 시편의 마이크로비커스 경도를 측정된 결과, Fig.

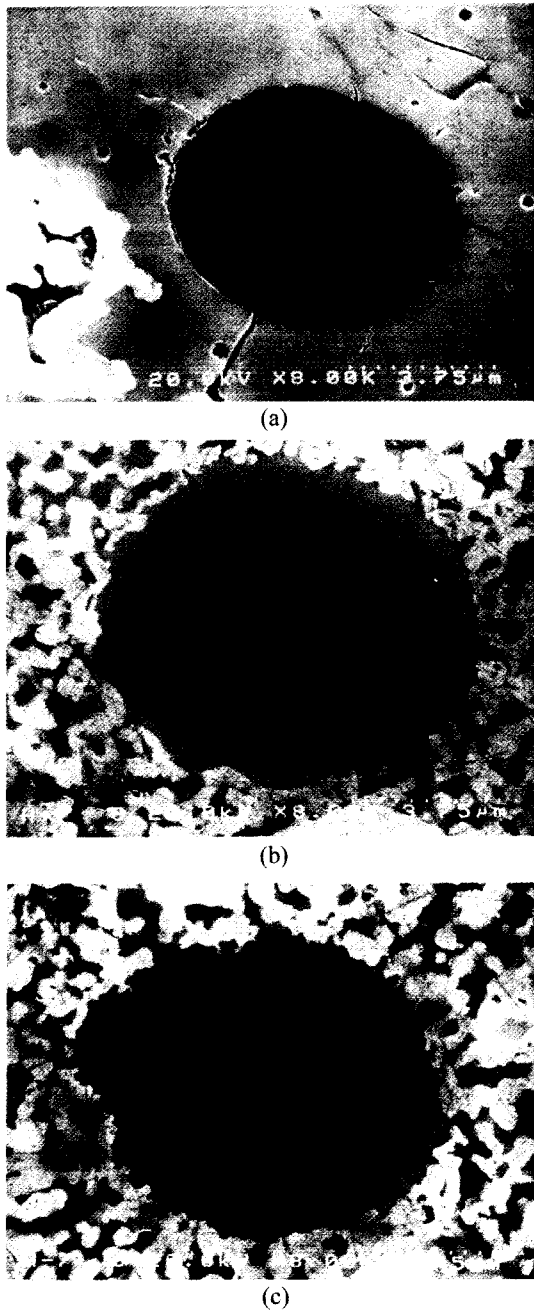


Fig. 13. Microstructure of AT specimen showing a) unreacted, b) half-reacted, and c) reacted fibers.

17과 같이, 경도값은 347 Hv로 나타났으며, 측정된 경도값을 중위 순위법을 이용하여 와이볼 통계 분석한 결과, 와이볼계수가 8.4이었다.

4. 결 론

1. 고압자전연소소결법으로 30 MPa의 압력하에 연소합성 반응을 일으켜 치밀한 티타늄기와 알루미늄기 함유강화 복합

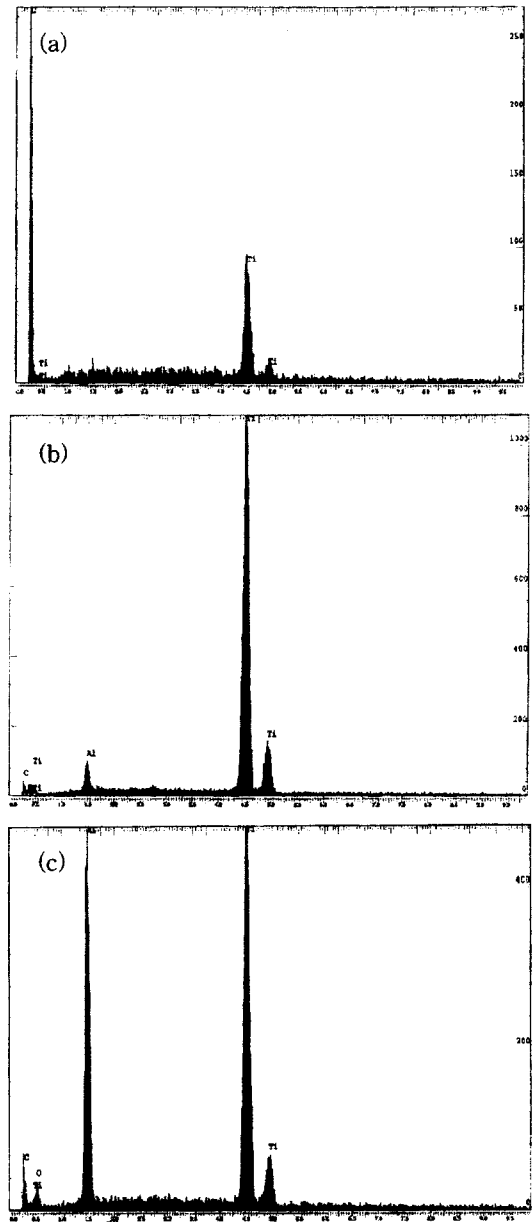


Fig. 14. EDS data from a) the core, b) the shell, and c) the intermediate layer between them, of the half-reacted fiber in the AT specimen of Fig. 13b.

합체를 제조할 수 있었으며, 제조된 복합체의 미세구조 관찰결과, 두 경우 모두 탄소섬유가 잘 배향된 상태로 분산되어 있었다.

2. 티타늄기 복합체내의 섬유는 탄소섬유로 밝혀졌고 섬유와 기지상 사이에 탄화티타늄 중간반응층이 형성되어 있었다. 알루미늄기 복합체내의 섬유는 미반응 탄소섬유, 중간반응 탄소-탄화티타늄 섬유, 반응완료 탄화티타늄 섬유로 밝혀졌고 이들에 대한 성분을 조사하였다.

3. 티타늄기 복합체는 반응시간이 길수록 치밀화와 TiC의 반응도가 증가하여 밀도가 증가하였으며, Ti의 첨가량이 증

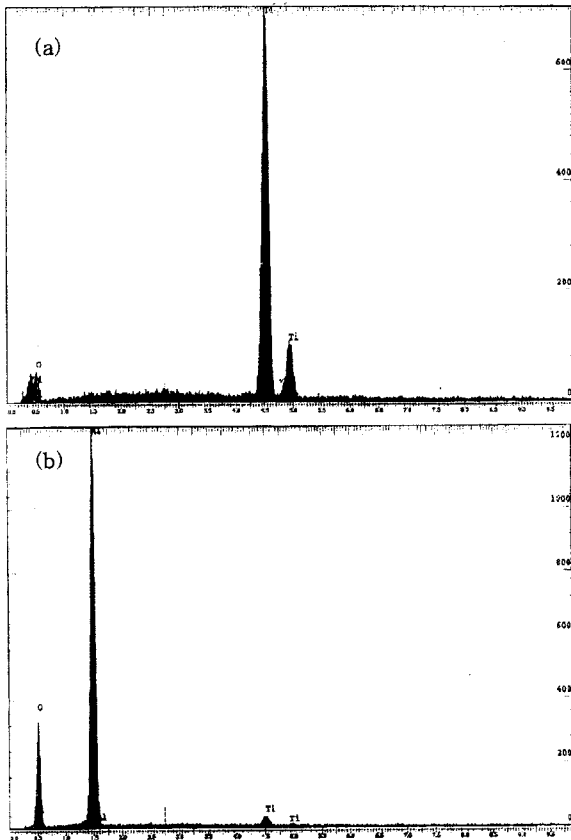


Fig. 15. EDS data from the matrix area around a) unreacted, and b) reacted fibers of Fig. 13.

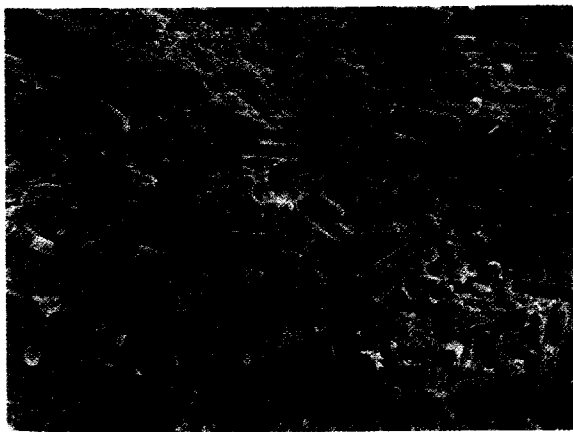


Fig. 16. Fractograph of AT specimen showing fibers pulled out of the sample.

가할수록 섬유분산이 좋아져서 밀도가 증가하였다. 탄소섬유 표면의 사이징제를 제거함으로써 섬유와 기지상의 계면에 생성된 미세기공을 제거할 수 있었다.

감사의 글

본 논문은 1997년 한국학술진흥재단의 공모과제 연구비

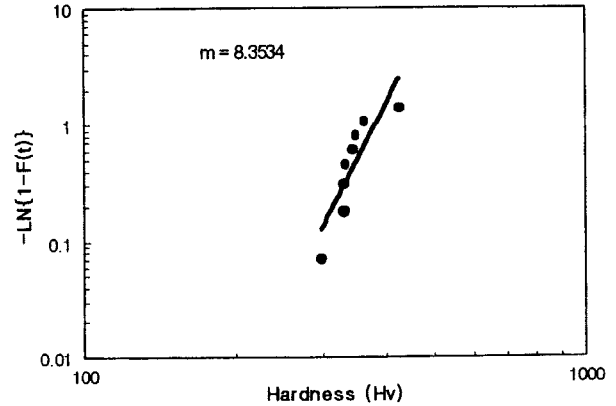


Fig. 17. Failure rate and hardness of the synthesized AT specimen.

에 의하여 연구되었습니다. 본 저자들은 인하대학교의 최상욱 교수님, 한국기계연구원의 한유동 박사님, 그리고 경남대학교 공동기기센터의 기술적인 도움에 감사드립니다.

REFERENCES

1. V. Hlavacek, "Combustion Synthesis: Historical Perspective," *Ceram. Bull.*, **79**(2), 240-243 (1991).
2. J. W. McCauley, "A Historical and Technological Perspective on SHS," *Ceram. Eng. Sci. Proc.*, **11**(9-10), 1137-1191 (1990).
3. K. A. Golubjatnikov, G. C. Stangle and R. M. Spriggs, "The Economics of Advanced Self-Propagating High-Temperature Synthesis Materials Fabrication," *Am. Ceram. Soc. Bull.*, **72**(12), 96-102 (1993).
4. 한유동, 송인혁, "SHS 공정의 기술현황," *요업기술*, **10**(2), 162-172 (1995).
5. 연소합성 연구회 편집, 이희철 번역, "연소합성의 화학," 반도체출판사, 1995.
6. L. L. Wang, Z. A. Munir and Y. M. Maximov, "Thermite Reactions: Their Utilization in the Synthesis and Processing of Materials," *J. Mater. Sci.*, **28**, 3693-3708 (1993).
7. J. Holt and Z. Munir, "Combustion Synthesis of Titanium Carbide: Theory and Experiment," *J. Mater. Sci.*, **21**, 251-259 (1986).
8. Y. Miyamoto, "New Ceramic Processing Approaches Using Combustion Synthesis under Gas Pressure," *Am. Ceram. Soc. Bull.*, **69**(4), 686-690 (1990).
9. L. J. Kecskes, T. Kottke and A. Niiler, "Microstructural Properties of Consolidated Titanium Boride and Titanium Carbide," *J. Am. Ceram. Soc.*, **73**(5), 1274-1282 (1990).
10. L. J. Kecskes, R. F. Benck and P. H. Netherwood, "Dynamic Compaction of Combustion-Synthesized Hafnium Carbide," *J. Am. Ceram. Soc.*, **73**(2), 383-387 (1990).
11. R. R. Rice, "Assessment of the Application of SPS and Related Reaction Processing to Produce Dense Ceramics," *Ceram. Eng. Sci. Proc.*, **11**(9-10), 1226-1250 (1990).
12. J. Subrahmanyam and M. Vijayakumar, "Self-Propagating High-Temperature Synthesis," *J. Mater. Sci.*, **27**, 6249-6273

- (1992).
13. O. Yamada, Y. Mitamoto and M. Koizumi, "High Pressure Self-Combustion Sintering of Silicon Carbide," *Am. Ceram. Soc. Bull.*, **64**(2), 319-21 (1985).
 14. M. E. Mullins and E. Riley, "The Effect of Carbon Morphology on the Combustion Synthesis of Titanium Carbide," *J. Mater. Res.*, **4**(2), 408-411 (1989).
 15. Y. Choi, M. E. Mullins, K. Wijayatilleke and J. K. Lee, "Fabrication of Metal Matrix Composites of TiC-Al through Self-Propagating Synthesis Reaction," *Metall. Trans. A*, **23A**, 2387-2392 (1992).
 16. 윤준도, 방환철, "자전연소합성반응중 속빈 TiC 섬유의 형성기구," 한국 세라믹 학회지, **37**(4), 332-337 (2000).
 17. 방환철, 윤준도, "자전연소합성법에 의한 여러가지 섬유상 및 입상 탄화물의 제조," 한국 재료 학회지, **10**(5), (2000).
 18. J. Yun and H. Bang, "Preparation of Titanium Carbide Fiber-Reinforced Alumina-Ceramic Matrix Composites by Self-Propagating High-Temperature Synthesis," *Kor. J. Ceram. Soc. (International Edition)*, **4**(3), 171-175 (1998).
 19. B. Lawn, *Fracture of Brittle Solids*, Chapter 7, Cambridge University Press, 1975.
 20. *Materials Properties Handbook: Titanium Alloys*, ASM International, Materials Park, OH, USA, 1994.