

코디어라이트 - SiC 위스커 복합재료의 기계적 성질과 강화기구

강 대 갑 · Weiskopf *

대한중석광업 주식회사

*Max-Planck 연구소, 서독

(1986년 9월 10일 접수)

Mechanical Properties and Strengthening Mechanisms of Cordierite - SiC Whisker Ceramic Composites

T. K. Kang and K. L. Weiskopf *

Korea Tungsten Mining Co.

*Max-Planck Institute, Stuttgart, FRG.

(Received September 10, 1986)

ABSTRACT

Flexural strength, fracture toughness and strengthening mechanisms of cordierite ceramics reinforced by SiC whiskers up to 40 vol. % were investigated. The specimens were hot pressed at 1,250°C for 30 min under 28.5 MPa pressing pressure in Ar atmosphere. The porosity increased with the SiC whisker content. Flexural strength and single edge notch beam fracture toughness were measured up to 1,000°C. Extrapolating to zero porosity, the reinforced composites exhibited increasings in flexural strength and fracture toughness with the SiC whisker content. The composites were strengthened mainly by load transfer, crack impediment and partially by crack deflection mechanisms. Impurities played an important role in determining the mechanical properties of the composites.

I. 서 론

코디어라이트($2\text{MgO} \cdot 2\text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 5\text{SiO}_2$)는 열팽창계수가 매우 낮은 세라믹 소재로서¹⁾ 열충격에 강한 특성을 보이고 있어서 자동차 배기가스 정화 촉매담체²⁾ 등에 널리 쓰이고 있으며 낮은 열팽창계수와 낮은 유전상수 특성을 바탕으로 새로운 집적회로 포장소재(IC package material)³⁾로 개발되고 있다. 그러나 코디어라이트는 기계적 강도가 낮은 것이 가장 큰 취약점이었다. 최근 고도기능 세라믹 소재의 기계적 강도를 높이고자 하는 여러가지 방법 중에서 세라믹 위스커로

세라믹 소재를 강화시키는 세라믹 기지상-세라믹 위스커 복합재료 제조 방법이 개발되어 주로 Al_2O_3 계 소재의 기계부품 및 고온 구조재료 연구에 각광을 받고 있다.^{4~6)} 여러 종류의 세라믹 위스커 중에서 높은 강도, 높은 탄성계수 그리고 고온에서의 우수한 화학안정성을 갖는 SiC 위스커가⁷⁾ 그중에서 가장 커다란 가능성을 보이고 있다. 따라서 본 연구는 코디어라이트에 SiC 위스커를 첨가시켜 코디어라이트 - SiC 위스커 복합재료를 만듦으로써 코디어라이트의 낮은 기계적 강도를 보강하고자 하였으며 이에 따른 상온 및 고온에서의 기계적 특성 변화, 즉 폭강도 및 인성 변화, 파

단면 특성 변화를 관찰하였고 그리고 본 복합재료의 강화기구를 조사하였다.

II. 실험 방법

실험에 사용한 원료로는 시판되고 있는 코디어라이트 분말과 SiC 위스커를 사용하였다. 코디어라이트분말은 유리상 내에서 결정석출 방법으로 제조된 것으로서 주사 전자 현미경으로 관찰된 평균입도는 약 5 μm 이었으며 소량의 잔류 유리질을 함유하고 있었다. 코디어라이트 분말의 화학조성은 무제분율로 14.5% MgO, 34.9% Al₂O₃, 그리고 50.6% SiO₂로서 코디어라이트의 화학조성 13.8% MgO, 34.9% Al₂O₃, 그리고 51.3% SiO₂에서 약간 벗어났다. 또한 사용된 원료 SiC 위스커의 크기는 지름 0.05~0.2 μm, 길이 10~40 μm으로 가느다란 원주형이었다.

우선 코디어라이트 분말을 Al₂O₃-SiO₂계 애트리터(attritor)를 써서 분쇄하였다. 이때 분쇄된 코디어라이트 입자의 크기는 주사 전자 현미경 관찰로 <1 μm으로 어림되었다. 제조된 코디어라이트 슬러리에 SiC 위스커를 소결체에서의 부피분율로 0, 10, 20, 30 그리고 40% 되게 첨가하였다. 건조된 분말을 흑연금형에 넣어 Ar 분위기에서 28.5 MPa 압력으로 1250°C 30분 가압소결(hot pressing)하여 직경 약 35mm 두께 약 5mm의 원반형 시편으로 소결한 후 이를

기 2~3 μm의 다이아몬드 분말로 연마한 다음 단면적 3.6×2.8mm의 각주형 시편으로 절단하였다.

시편의 소결밀도는 물속에서 부력을 이용하여 측정하였고 미세조직 및 파단면은 광학 혹은 주사전자 현미경으로 관찰하였다. 기계적 성질을 관찰하기 위하여 상온, 600°C 그리고 1000°C에서 곡강도, σ_b, 와 파괴인성, K_{Ic},를 바깥 받침거리 20mm, 안쪽 받침거리 7mm인 4점 받침을 써서 측정하였다. 2개씩의 시편으로부터 얻어진 SiC 위스커 함량 40% 조성의 측정값을 제외한 그 외의 모든 σ_b 값은 5개씩의 각주형 시편으로부터 얻어졌다.

K_{Ic}는 single edge notch beam (SENB) 방법으로 측정되었다. 각주형 시편에 폭이 약 200 μm, 그리고 깊이가 시편두께의 0.1~0.3배 되게 칼날홈집을 넣어 준 다음 위의 4점 받침을 써서 측정하였다. 2~3개씩의 시편으로부터 얻어진 SiC 위스커함량 40% 조성의 측정값을 제외한 그 외의 모든 K_{Ic} 값은 3~5개씩의 시편으로부터 얻어졌다.

III. 실험 결과

주사 전자현미경으로 관찰된 코디어라이트 조성 시편의 입도는 2~3 μm으로 어림되었다. SiC 위스커가 첨가된 다른 조성 시편의 입도를 별도로 정량적으로 측정하지는 않았으나 코디어라이트 조성 시편의 입도보다 상당히 미세한 것으로 관찰되었으며 이는 코디어라이트 기지상의 입제면 이동이 SiC 위스커에 의하여 방해받았기 때문으로 생각된다. SiC 위스커는 소결체 내에서 방향성을 갖고 있었다. 미세조직에서 길이 대 지름의 비율이 매우 큰 SiC 위스커가 가압소결 방향에 수직으로 배열하고 있었으며 가압소결 방향에 수직인 평면 내에서는 불규칙하게 배열하고 있었다.

코디어라이트-SiC계 상태도에 관한 연구보고가 아직 없어서 확실히는 알 수 없으나 본 연구에서의 미세조직 관찰로 부터는 코디어라이트와 SiC가 서로 반응하여 새로운 상을 형성하거나 또는 용해도를 나타내는 것 같지 않았다. 이에따라 코디어라이트와 SiC의 밀도를 각각 2.51과 3.21 g/cm³로 하여 각 시편의 상대밀도를 측정한 결과, SiC 위스커 함량이 증가할수록 시편의 기공률이 증가하였다. 즉 SiC 위스커 함량이 높아질수록 기밀화가 어려웠다.

4점 받침을 써서 여러 온도에서 측정된 σ_b를 Fig. 1에 도시하였다. 전반적으로 σ_b 값은 모든 측정 온도에서 SiC 위스커 함량이 증가함에 따라 높아져서 20~30% 조성에서 최대값을 나타내었으며 40% 조성에서 다시 감소하였다. 상온에서의 σ_b 값이 고온에

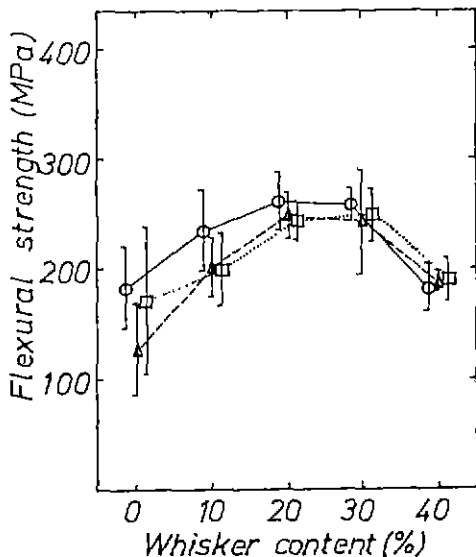


Fig. 1. Flexural strength of hot pressed cordierite-SiC whisker composites; at room temperature (-○-), 600°C (-△-) and 1000°C(-□-)

시의 측정치 보다 대체로 높았으며 또한 SiC 위스커 함량이 증가할수록 상온과 고온에서 측정된 σ_b 값의 차이가 감소하여 SiC 위스커 함량 40% 조성 시편은 모든 측정 온도에서 거의 같은 σ_b 값을 나타내었다. 최대값은 SiC 위스커 함량 20% 조성 시편의 상온 σ_b 260 MPa 이었으며 코디어라이트 조성 시편의 600 °C σ_b 값 130 MPa 이 최소값이었다.

그러나 시편의 상대밀도 변화와 비교하여 볼 때 이러한 σ_b 변화 특성이 시편내의 기공으로부터 크게 영향을 받았으리라고 쉽게 예측된다.

재료의 기계적 물성에 대한 기공의 영향을 보정하여 주기 위하여 많은 연구결과⁴⁾가 발표되었으나 가장 일반적으로 쓰이는 보정식은

$$S = S^0 \exp(-b \times p)^{9)}$$

로서 S는 보정되지 않은 측정된 기계적 물성치, S^0 는 기공의 영향이 보정된, 즉 완전 치밀화 되었음을 가정하였을 때의 재료의 기계적 물성치, b는 상수, 그리고 p는 기공률이다. 재료에 따라 그리고 기계적 물성의 종류에 따라 상수 b의 값이 다르다.

곡강도에 대한 기공의 영향을 보정하기 위하여는 윗식의 S 및 S^0 에 σ_b 와 σ_b^0 를 대입하면 된다. 곡강도를 위한 상수 b에 대하여 많은 연구결과^{10,11)}가 있으나 코디어라이트-SiC 위스커 복합재료의 b값에 대한 연구결과는 아직 보고된 바 없다. Mussier와 Shafer³⁾는 몰라이트와 몰라이트-코디어라이트 복합재료의 곡강도에 대한 기공률의 영향을 보정하여 주기 위하여 상수 b의 값으로 3을 사용하였다. 그러나 많은 연구결과를 종합하여 Rice¹²⁾는 많은 종류의 요입재료의 곡강도를 위한 b 값이 4 ± 2 의 범위내에 있다고 보고하였다. 본 연구에서는 Rice가 제시한 b값의 중간값인 4를 코디어라이트 및 코디어라이트-SiC 위스커 복합재료의 b값으로 취하여 측정된 σ_b 에 대한 기공의 영향을 보정하였다.

Fig. 2에 도시한 바와 같이 기공률이 보정된 시편의 σ_b^0 값은 SiC 위스커에 의한 뚜렷한 강화효과를 보이고 있다. σ_b^0 값은 SiC 위스커 함량이 증가함에 따라 거의 직선적으로 증가하여 위스커 함량 40%에서 430 ~ 450 MPa에 이르게 된다. 이 값은 코디어라이트 조성 시편 상온 σ_b^0 의 약 2.4배, 600 °C σ_b^0

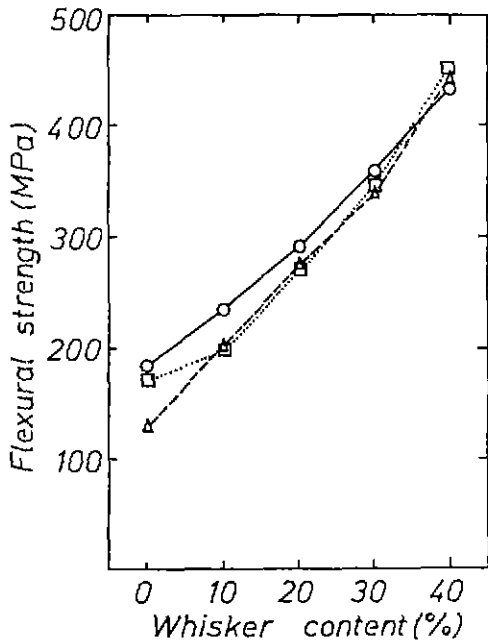


Fig. 2: Expected flexural strength of hot pressed cordierite-SiC whisker composites by zero porosity; at room temperature (○-), 600°C (-△-) and 1000°C (-□-).

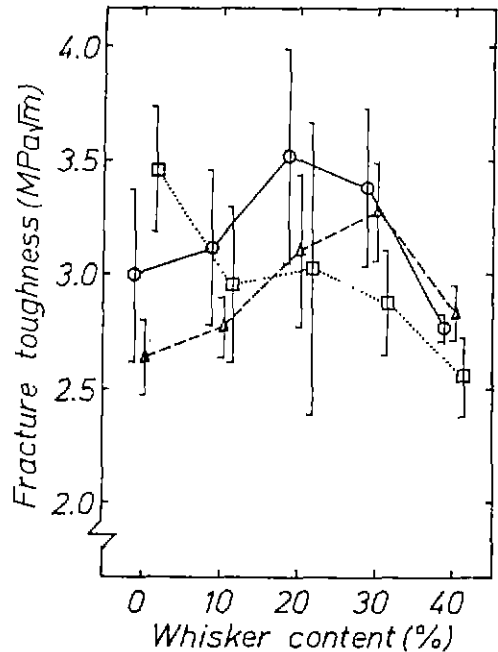


Fig. 3: Fracture toughness of hot pressed cordierite-SiC whisker composites; at room temperature (○-), 600°C (-△-) and 1000°C (-□-).

의 약 3.5배 그리고 1000°C σ_b° 의 약 2.6배에 해당된다. 즉 코디어라이트는 SiC 위스커에 의하여 강화되었다고 할 수 있다. 상온에서의 σ_b° 값이 고온에서의 측정치보다 대체로 높았으며 코디어라이트 조성 시편을 제외한 나머지 조성 시편의 600°C 와 1000°C σ_b° 값은 거의 유사하였다.

여러 온도에서 single edge notch beam 방법으로 측정된 K_{Ic} 를 Fig. 3에 도시하였다. σ_b 의 변화에 비하여 각 측정값의 산포가 컸으며 상온 및 600°C에서의 K_{Ic} 변화는 σ_b 의 변화와 유사하게 SiC 위스커 함량 20~30%에서 최대값을 나타내었다. 1000°C에서의 K_{Ic} 는 위스커 함량이 증가할수록 계속 감소하는 경향을 나타내었다. 최대값은 위스커 함량 20%에서 상온 K_{Ic} 3.5 MPa \sqrt{m} 이었고 최소값은 위스커 함량 40%에서 1000°C K_{Ic} 2.6 MPa \sqrt{m} 이었다.

K_{Ic} 에 대해서도 앞에서 설명한 것과 같은 방법으로 S에 K_{Ic} 를 그리고 S°에 K_{Ic}° 를 대입하여 기공의 영향을 보정하였다. 코디어라이트-SiC 위스커 복합재료의 파괴인성에 대한 기공률보정 연구 보고도 아직 없기 때문에 Rice¹¹⁾가 많은 종류의 요입체들의

파괴에너지를 분석하여 얻은 상수 $b=2$ 를 적용하였다. Fig. 4에 도시된 바와 같이 기공률이 보정된 시편의 K_{Ic}° 값도 σ_b° 의 경우와 같이 SiC 위스커에 의한 뚜렷한 인성증가 효과를 보이고 있다. SiC 위스커 함량이 증가함에 따라 인성이 증가하여 위스커 함량 40%에서 각각 최대값을 나타내고 있다. 즉 위스커 함량 40% 조성 시편의 K_{Ic}° 는 3.9~4.4 MPa \sqrt{m} 이다. 1000°C의 K_{Ic}° 값 중에서 SiC 위스커 함량이 낮은 몇몇 조성을 제외하면 K_{Ic}° 값은 대체로 측정온도가 높아질수록 낮은 값을 보이며 그 몇몇 위스커 함량이 낮은 시편들, 즉 코디어라이트 조성, 위스커 함량 10% 및 20% 조성 시편들의 K_{Ic}° 가 상온 및 600°C에서의 경향과 대비하여 볼 때 예상보다 높은 값을 보이고 있다.

주사 전자현미경으로 관찰된 파단면은 Fig. 5에 나타낸 바와 같이 SiC 위스커 함량 및 온도에 따라 매우 다른 특징을 나타내었다. 코디어라이트 조성 시편들은 모든 측정 온도에서 입자관통파단 양상(transgranular fracture mode)을 보였다. Fig. 5a와 같이 코디어라이트 조성 시편에서는 입자관통파단에 의한 매우 평활한 파단면이 관찰되었으며 특히 600°C에서의 파단면은 더욱 평활하였다. 1000°C에서도 파단면은 거의 대부분 입자관통파단 양상을 보이고 있었으나 단지 파단이 처음 시작된 부근에서는 Fig. 5b와 같이 입자관통파단과 입계파단(intergranular fracture mode)의 두 파단양상이 혼합된 상태를 보였다. 그러나 Fig. 5b 이외의 곳에서는 상온 및 600°C에서와 같이 평활한 파단면을 이루는 입자관통파단을 나타내었다.

SiC 위스커를 함유하고 있는 시편들의 파단면은 위스커함량과 온도에 따라 조금씩 변하였다. 파단면의 전체적인 표면상태는 Fig. 5c와 d에서 보듯이 코디어라이트 조성 시편의 파단면 보다 매우 울퉁불퉁하였으며 위스커 함량이 증가할수록 울퉁불퉁한 정도가 심하여졌다. SiC 위스커는 거의 대부분 파단면에서 잘려졌다. 위스커 함량이 적은 시편에서는 위스커 인출(pull-out)이 거의 무시될 만큼 적었으나 위스커 함량이 많을수록 그리고 온도가 높을수록 위스커 인출이 조금씩 관찰되었다. 그러나 SiC 위스커 사이에 있는 코디어라이트 기지상은 항상 입자관통파단을 보이고 있었다. SiC 위스커는 Fig. 5d에서 보듯이 원료상태일 때의 원주형에서 변형되어 6각 기둥모양을 이루어 위스커가 떨어져 나간 자리에 각이 진 홈이 파여 있었으며 또한 많은 SiC 위스커들의 속이 비어 있는 것이 특징이었다.

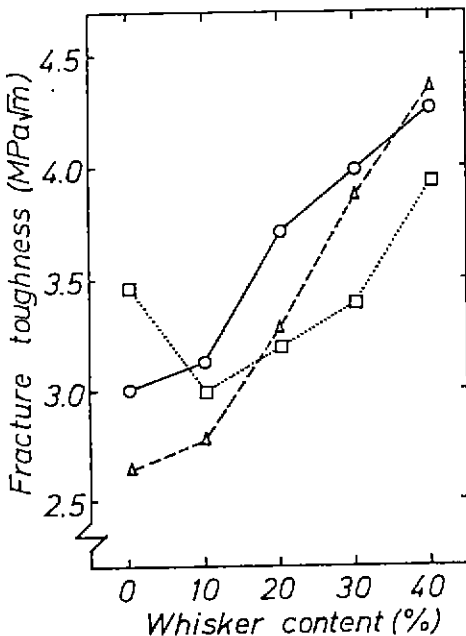


Fig. 4. Expected fracture toughness of hot pressed cordierite-SiC whisker composites by zero porosity; at room temperature (—○—), 600°C (---△---) and 1000°C (---□---).

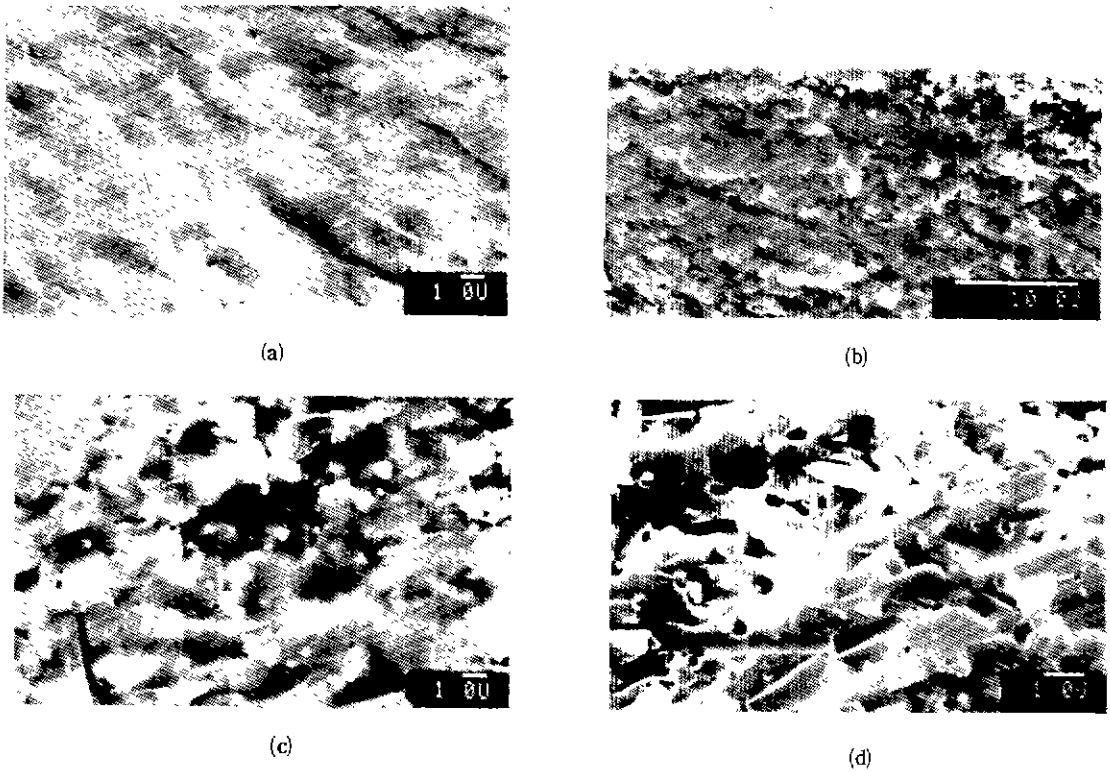


Fig. 5. Fracture surfaces of hot pressed specimens; a) cordierite at room temperature, b) cordierite at 1000°C, c) cordierite-10% SiC whisker composite at room temperature and d) cordierite-20% SiC whisker composite at 1000°C.

IV. 고찰

세라믹 기지상-세라믹 위스커 복합재료의 강화 기구¹²⁾ 중에서 중요한 것으로 1) 위스커의 부하부담 (load transfer), 2) 균열진행 방해 (crack impediment), 3) 균열진행 굴절 (crack deflection), 4) 위스커 인출 (whisker pull-out), 5) 열팽창계수 차이에 의한 내부응력 (prestressing by thermal mismatch) 등을 들 수 있다.

이 강화기구들의 특징을 살펴 보면, 먼저 위스커의 부하부담 기구와 균열진행방해 기구의 특성은 변형량 (strain) 보다는 주로 강도 (strength)를 높임으로써 재료를 강화시키는 것이다. 즉 위스커의 강도와 탄성률이 높을수록 또한 강도와 탄성률이 높은 위스커의 함량이 증가할수록 복합재료의 강도가 증가하게 된다. 온도가 높아질수록 복합재료의 강도는 떨어지게 되는데 이는 주로 온도 상승에 따른 위스커 탄성률의 감소에 기인한다.

균열진행굴절 기구 (crack deflection)는 균열의

진행경로를 굴절 연장 시킴으로써 재료를 강화시키는 것으로써 강도가 높은 위스커의 함량이 증가할수록 그리고 특히 온도가 증가할수록 더욱 중요한 강화기구가 되며 주로 재료의 강도를 증가시킨다.

위스커 인출 기구는 최근 가장 주목을 받는 강화기구로써 세라믹 기지상-위스커 계면강도가 너무 높아서 위스커가 파단면 표면 위치에서 절단되며 이에 따라 재료의 즉시적인 파단 (catastrophic failure)이 초래되는 경우보다 오히려 적당한 계면강도에서 위스커가 상당한 거리를 절단되지 않은 채 기지상에서 뿔려 나오는 경우 복합재료의 강도와 인성이 현저히 증가하며 재료의 완전 파단 까지 상당한 변형량을 수반하게 된다. Rice¹³⁾ 등은 위스커 강화 복합재료와 유사한 fiber 강화복합재료에서 세라믹 기지상과 fiber 사이의 계면강도를 조절하여 fiber의 인출을 야기시키기 위하여 SiC 및 Al₂O₃ fiber를 얇게 피복 (coating)한 후 여러가지 세라믹 기지상과의 복합재료를 만든 결과 현저한 강도 및 인성 증가를 얻을 수 있었다.

열팽창계수 차이에 의하여 형성된 내부응력에 의한

강화 기구의 특징은 기지상과 위스커의 열팽창계수 차이가 크거나 온도차이가 커서 형성된 내부응력이 커질수록 파괴강도가 증가하며 동시에 변형률도 늘어나게 된다는 것이다. 이 때의 내부응력은 기지상의 열팽창계수보다 위스커의 열팽창계수가 커서 이에 따라 기지상에 작용하는 압축응력을 발하며 이러한 내부 응력은 온도가 높아질수록 급격히 감소하는 특성을 갖고 있다.

위에 열거한 여러 강화기구는 재료에 따라 단독으로 혹은 몇몇 기구가 복합적으로 작용하게 된다. 이 중에서 본 연구의 코디어라이트-SiC 위스커 복합재료의 강화기구로서 먼저 위스커에 의한 부하부담 기구를 들 수 있다. 즉 Fig. 2와 Fig. 4에 나타난 바와 같이 코디어라이트보다 월등히 높은 강도를 가진 SiC 위스커의 함량이 증가함에 따라 모든 측정 온도에서 강도 및 인성이 거의 일차함수적으로 증가한 것으로 보아 우선 SiC 위스커에 의한 부하부담 기구로 코디어라이트 기지상이 강화된 것임을 알 수 있다.

한편 코디어라이트 조성 시편은 입자관통파단에 의한 정확한 파단면을 보인 반면 위스커 함량이 증가할수록 시편의 파단면이 거칠어졌으며 특히 위스커 함량이 적은 시편에서는 위스커 인출이 거의 관찰되지 않고 강한 SiC 위스커가 파단면 위치에서 절단된 점으로 보아 강한 SiC 위스커에 의한 균열진행방해 기구 (crack impediment) 가 작용한 것으로 생각된다. 또한 위스커 함량이 증가할수록 파단면이 훨씬 거칠어진 점으로 미루어 균열진행 방해 기구 이외에 균열진행 굴절 기구도 재료의 강화에 기여한 것으로 생각되며 한편 위스커 인출이 위스커 함량이 많은 시편에서 그리고 온도가 높은 경우에서만 약간 관찰된 것으로 보아 위스커 인출 기구의 기여는 적은 것으로 여겨진다.

상온부터 1000°C 사이의 범위에서 코디어라이트와 SiC의 열팽창계수는 평균적으로 각각 $1.57 \times 10^{-6}/^{\circ}\text{C}$ 및 $4.7 \times 10^{-6}/^{\circ}\text{C}$ 으로써 분산되어 있는 SiC 위스커의 열팽창률이 코디어라이트 기지상의 열팽창률보다 훨씬 크다. 이에 따라 내부응력 형성에 의한 강화기구를 생각할 수 있는데 Fig. 2와 4에서 보듯이 시편의 강도가 고온에서 감소하였으며 온도에 따른 인성의 변화 경향도 대체적으로 온도가 높아질수록 인성이 급히 감소하는 추세를 띠고 있다. 따라서 열팽창계수 차이에 의하여 생성된 내부응력도 시편의 강화에 기여한 것으로 생각된다.

앞에서 설명한 5가지 강화기구 이외에 본 연구의 코디어라이트-SiC 위스커 복합재료의 기계적 성질에 영향을 미친 또 하나의 인자로 제 3상, 즉 유리상의 존재를 들 수 있다. 본 연구에서 주사전자현미경 관찰

등으로는 유리상의 존재를 입증하지 못하였으나 본 연구에 사용된 코디어라이트 원료분말 자체가 앞에서 설명한 바와 같이 소량의 유리질을 함유하고 있었으며 한편 Al_2O_3 - SiO_2 계 에트리티로 분쇄하는 과정에서 소량의 Al_2O_3 및 SiO_2 성분 등이 원료분말에 혼입되어 이들 불순물이 가압소결 후 코디어라이트 기지상과 SiC 위스커 사이의 계면에 유리상을 형성하였으리라고 생각된다. 이렇게 형성된 유리상과의 반응에 의하여 SiC 위스커의 모양이 원주형에서 6각 기둥 모양으로 변하였고 또한 시편의 기계적 성질이 영향을 받게되었다. 본 연구에서와 같은 장비를 사용하여 제조한 코디어라이트-SiC 위스커 복합재료에 대한 다른 연구에서 전자현미경관찰 결과 불순물에 의하여 SiC 위스커 표면에 얇은 계면층이 형성된 것이 보고된 바 있다.¹⁵⁾

Fig. 4에서 SiC 위스커 함량이 낮은 시편들의 1000°C K_{1c} 가 예상보다 높은값을 나타내었고 Fig. 5b에 보인 바와 같이 1000°C에서 코디어라이트 조성 시편이 파괴 시발점 부근에서 상당한 정도의 입체파단양상을 보인 것은 높은 온도에서 미량의 유리상이 약간의 점성을 나타내었기 때문이다. 또한 SiC 위스커를 함유하고 있는 복합재료 시편의 파단면에서 위스커 인출이 적게 관찰된 이유도 코디어라이트 기지상과 SiC 위스커 사이에 높은 마찰력 (friction force)이 형성되어 SiC 위스커가 코디어라이트 기지상에서 뿔려 나오지 못한 채 절단되었기 때문이다.

종합적으로 볼 때 본 코디어라이트-SiC 위스커 복합재료의 강화에는 먼저 위스커의 부하부담 기구, 균열진행방해 기구, 균열진행굴절 기구 그리고 유리상의 존재가 가장 크게 기여하였고 위스커 인출 기구와 열팽창계수 차이에 의한 내부응력 생성 강화기구들도 부분적으로 기여한 것으로 생각된다. 그러나 위스커의 부하부담 기구, 균열진행방해 기구 및 균열진행굴절 기구 중에서 어느 것이 더 크게 기여하였는지 그리고 특히 열팽창계수 차이에 의한 내부응력형성 강화기구의 기여도가 얼마나 컸는지는 본 연구에서 밝혀지지 않았다.

V. 결 론

- 1) 기공률의 영향을 보정할 경우 위스커 함량이 증가함에 따라 시편의 강도와 인성이 대체로 증가하였다.
- 2) 코디어라이트-SiC 위스커 복합재료의 강화기구는 주로 위스커의 부하부담기구 (load transfer), 균열진행방해 기구 (crack impediment), 그리고 균열진행굴절 기구 (crack deflection)라고 생각한다.

3) 원료 및 시편제조 과정에서 혼입된 불순물이 시편의 인성과 파단면양상에 커다란 영향을 미쳤다.

후 기

본 연구는 Max-Planck 연구소(서독, Stuttgart) G. Petzow 교수의 지원으로 수행되었으며 이에 감사드립니다.

REFERENCES

- 1) I.M. Lachman et al., "Thermal Expansion of Extruded Cordierite Ceramics", *Am. Ceram. Soc. Bull.*, **60**(2) 202 (1981).
- 2) I.M. Lachman and R.M. Lewis, "Anisotropic Cordierite Monolith", U.S. Patent 3 885 977, May 27 (1975).
- 3) B.H. Mussler and M.W. Shafer, "Preparation and Properties of Mullite/Cordierite Composites", presented at the 85th Annual Meeting of the Am. Ceram. Soc., Chicago (1983).
- 4) G.C. Wei and P.F. Becher, "Development of SiC-Whisker-Reinforced Ceramics", *Am. Ceram. Soc. Bull.*, **64**(2) 298 (1985).
- 5) P.F. Becher and G.C. Wei, "Toughening Behavior in SiC-Whisker-Reinforced Alumina", *J. Am. Ceram. Soc.*, **67**(12) C-267 (1984).
- 6) A.H. Chokshi and J.R. Porter, "Creep Deformation of an Alumina Matrix Composite Reinforced with Silicon Carbide Whiskers", *J. Am. Ceram. Soc.*, **68**(6) C-144 (1985).
- 7) J.J. Petrovic and R.B. Roof, "Fracture Toughness of a Beta-SiC Whisker", *J. Am. Ceram. Soc.*, **67**(10) C-219 (1984).
- 8) R.W. Rice, "Treatise on Materials Science and Technology", Vol. II, pp. 199-381 Ed. R.C. MaC-Crone, Academic Press, New York (1977).
- 9) W. Duckworth, "Discussion of Ryshkewitch Paper", *J. Am. Ceram. Soc.*, **36**(2) 68 (1953).
- 10) F.P. Knudsen, "Dependence of Mechanical Strength of Brittle Polycrystalline Specimens on Porosity and Grain Size", *J. Am. Ceram. Soc.*, **42**(8) 376 (1959).
- 11) J.E. Baily and N.A. Hill, "The Effect of Porosity and Microstructure on the Mechanical Properties of Ceramics", *Proc. Brit. Ceram. Soc.*, No. 15, 15 (1970).
- 12) R.W. Rice, "Mechanics of Toughening in Ceramic Matrix Composites", *Ceram. Eng. Sci. Proc.*, Vol. 2 (7-8) 661-701 (1981).
- 13) R.W. Rice, J.R. Spann, D. Lewis and W. Coblenz, "The Effect of Ceramic Fiber Coatings on the Room Temperature Mechanical Behavior of Ceramic-Fiber Composites", *Ceram. Eng. Sci. Proc.*, Vol. 5 (7/8) 614-624 (1984).
- 14) W.D. Kingery, H.K. Bowen and D.R. Uhlmann, "Introduction to Ceramics", p. 595, 2nd Ed. John Wiley and Sons., Inc., New York (1975).
- 15) K.L. Weisskopf, private communication.