

SiC Whisker의 분산과 Al₂O₃-SiC Whisker 복합재료의 기계적 성질

정수종 · 이주완 · 김득중* · 신유선** · 강석중**

대한중석공업(주)

*성균관대학교

**한국과학기술원

(1993년 4월 6일 접수)

SiC-Whisker Dispersion and Mechanical Properties of Al₂O₃-SiC Whisker Composite

Soo-Jong Jeong, Joo-Wan Lee, Deug-Joong Kim*, Yu-Seon Shin** and Suk-Joong L. Kang**

Korea Tungsten Co. Ltd.

*Sung Kyun Kwan University

**Korea Advanced Institute of Science & Technology

(Received April 6, 1993)

요 약

Al₂O₃-SiC 휘스커 2상 복합재료에서 SiC whisker를 균일하게 분산시키기 위한 전처리 조건을 구하였고 분산 상태와 휘스커 함량에 따른 기계적 성질의 변화를 고찰하였다. SiC 휘스커를 pH가 10.45로 조절된 용액에서 ball milling 후 초음파 처리를 하였을 때 SiC 휘스커가 매우 균일하게 분산된 조직을 얻을 수 있었다. 소결체는 hot press로 제조하였으며 소결밀도는 휘스커 함량이 40 vol%까지 증가함에 따라 감소하였으나 모두 98% 이상으로 양호하였다. 복합체의 기계적 성질은 SiC whisker의 분산상태에 따라 크게 변화하였으며 양호한 기계적 성질을 얻기 위하여는 균일한 분산이 필수적이었다. 복합체의 기계적 성질은 휘스커의 함량에 따라서 증가하였고 SiC whisker의 함량이 20~30 vol%일 때 가장 우수한 기계적 성질을 나타내었다.

ABSTRACT

The pretreatment condition for uniform distribution of SiC whisker in Al₂O₃-SiC_w composites has been determined and the mechanical properties of the composites with various whisker contents have been measured. Good dispersion of the whisker can be obtained in a solution of pH=10.45 by ball milling and ultrasonic treatment. The relative density of hot pressed composites decreases with the whisker content up to 40 vol%, but is found to be satisfactory, over 98% for all samples. The mechanical property of the composites is sensitive to the whisker dispersion. Uniform distribution of the whisker is critical in order to guarantee good mechanical property. The samples containing 20~30 vol% whisker show the best mechanical property within the studied range.

1. 서 론

세라믹 재료의 본질적인 문제인 취성을 개선하고 구조재료로 이용하기 위한 연구가 현재 활발히 진행되고 있다. Al₂O₃의 경우 강도와 탄성계수 및 열적 안정성이 우수한 SiC whisker나 균열전파시의 상전이를 이용할 수 있는 ZrO₂가 강화재로서 유용한 것으로 밝혀져 있

으며 이들 2상 복합재료는 특히 절삭공구용 tip으로도 이용되고 있다. 또한 최근에는 위의 두 가지 강화제를 동시에 첨가하는 다상강화(multiphase strengthening)에 대한 연구도 진행되고 있다^{1,2)}.

휘스커 강화 복합재료의 경우 휘스커에 섞여 있는 불순물의 제거와 휘스커의 균일한 분산은 소결체의 기계적 성질을 증진시키기 위하여 필수적인 것으로 알려져

있다⁴⁾. 일반적으로 SiC whisker의 크기가 작아질수록 표면의 화학적 반응성이 커져서 서로 달라붙어 응집체를 형성하려는 경향이 커지는데, 실제로 상업적으로 시판되는 SiC whisker는 뭉침 덩어리가 입자형태로 존재할 뿐 아니라 미반응 SiC 구형입자도 함유하고 있다. 이러한 휘스커의 덩어리나 미반응 입자는 복합체내에서 공정결함(processing flaw)을 형성하여 파괴원으로 작용할 수 있으므로 반드시 제거하여야 하는 것으로 알려져 있다. 미반응 SiC 입자는 산이나 염기처리를 통하여 제거할 수 있다⁵⁾. 한편 덩어리상의 휘스커는 휘스커의 표면영역에 형성된 확산 전기 이중층을 이용하여 pH가 조절된 수용액내에서 풀어줄 수 있다. 따라서 휘스커의 전처리는 보통 SiC whisker 덩어리를 풀어주고, SiC whisker내의 불순물을 제거하는 과정으로 이루어진다.

본 연구에서는 SiC whisker 강화 Al₂O₃ 복합재료에서 휘스커와 기지분말을 균일하게 분산시키기 위한 전처리 조건을 구하였으며 이에 따른 기계적 성질의 변화를 측정하였다. 특히 분산 수용액의 pH와 초음파 분산의 영향을 조사하였으며 휘스커 함량에 따른 미세조직과 기계적 성질을 기존재료와 비교, 검토하였다.

2. 실험방법

시편은 Al₂O₃ 분말과 SiC whisker, Mg(NO₃)₂·6H₂O, Y₂O₃를 원료분말로 사용하여 제조하였다. Al₂O₃ 분말은 일본의 Sumitomo Chemical Co.의 AKP-30 grade로서 회사측에서 제시한 순도는 99.9% 이상이고, 입도는 0.3~0.5 μm, BET 표면적은 5~10 m²/g이었다. SiC whisker는 일본 Tokai Carbon Co.(상품명 Tokawhisiker)의 제품으로 제시된 whisker의 직경은 0.1~1.0 μm, 길이는 10~100 μm이고 β상이었다. 한편 소결조제로서 MgO는 일본 Hayashi사의 EP급(순도 99% 이상) Mg(NO₃)₂·6H₂O를 사용하였으며 0.1 wt% 첨가하였다. Y₂O₃는 99.99%의 일본 Shin-Etsu Chemical Co. 제품으로 1 wt% 첨가하였다.

pH에 따른 휘스커의 분산정도를 구명하기 위하여 0.4 g씩의 휘스커를 pH가 각각 9.56, 10.18, 10.45, 10.64로 조절된 45 ml의 증류수에 넣고 10분간 초음파 분산을 행한 다음 10분 동안 정지시켰다. 이때, pH는 NH₄OH 용액을 증류수에 적정하여 조절하였다. Fig. 1은 정지 후에 가라앉은 휘스커 덩어리의 중량분율을 측정된 결과로서 pH가 10.45에서 가장 좋은 분산특성을 보여주고 있다. 따라서 이 점에서 정전기적 반발력이 최대가 됨을 알 수 있다. 여기서 침강분율(sedimented fraction)이 대부분 80%를 넘는 이유는 구매된 휘스커에 뭉친 덩어

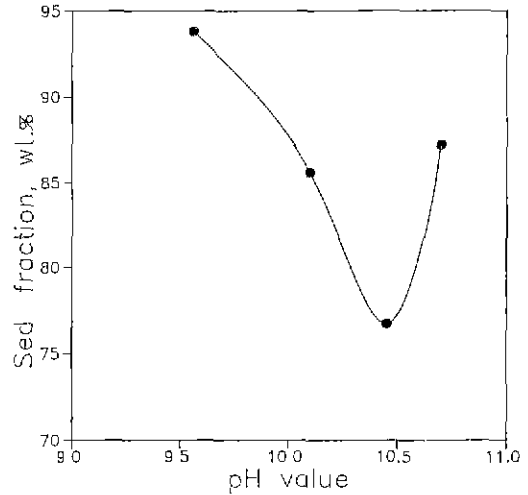


Fig. 1. Sedimented weight fraction of dispersed whisker slurry at various pH values.

리가 많았기 때문이다. pH가 10을 넘을 경우에는 Al₂O₃의 zeta potential 역시 SiC whisker와 마찬가지로 상당히 큰 음의 값을 가지므로⁶⁾ 10.45의 pH값은 Al₂O₃의 분산에도 적합한 값이 될 것으로 판단하여 Al₂O₃와 SiC whisker 혼합 슬러리 분산시의 pH값은 10.45로 정하였다.

휘스커의 뭉친 덩어리를 풀어주기 위하여 pH가 10.45인 증류수에서 1시간 동안 플라스틱 통과 불을 사용하여 밀링(milling)하였다. 밀링 후의 슬러리는 초음파 처리한 뒤 10분 동안 중력침강시켜 슬러리에서 상부에 뜬 부유물과 하부에 가라앉은 침전물(뭉쳐진 whisker 덩어리 혹은 오염물질)을 제거하고 중간부분을 oven에서 건조시킴으로써 최종적으로 원료분말로서의 휘스커를 얻었다. 한편 Al₂O₃ 분말도 휘스커와 마찬가지로 밀링과 침강처리를 통하여 응집체를 제거하였다.

시편은 보통의 일반적인 요업체 제조공정을 따라 제조하였다. 우선 Al₂O₃에 MgO와 Y₂O₃를 소결조제로 첨가한 뒤 10시간 동안 플라스틱 볼 밀링한 후 전처리된 휘스커를 첨가하고 15시간 동안 다시 볼 밀링하였다. 이때 혼합 슬러리의 pH는 전술한 바와 마찬가지로 10.45로 조절하였다. 혼합 슬러리의 균일한 분산상태를 그대로 유지한 채 건조시키기란 매우 중요할 뿐 아니라 어려운 공정으로, 본 실험에서는 슬러리를 자석 교반기로 계속 저어주면서 가열, 건조하였고, 건조속도를 가능한한 빠르게 하기 위해서 적외선 램프와 석고 폼드를 동시에 이용하였다. 건조된 혼합분말은 분쇄 후 50 mesh의 체로 체질하였다.

건조된 분말은 1850°C에서 40분 동안 20 MPa의 압력으로 Ar 분위기 하에서 고온가압소결(hot pressing)하였다. 먼저 혼합분말을 BN이 도포된 흑연 다이 속에 넣고 Ar 가스로 3회 이상 세척한 뒤 0.2 torr까지 뽑은 후 승온하였다. 약 1시간 동안 1200°C까지 승온한 뒤 30분간 유지시켜 시편의 내부에서 발생하는 가스를 제거한 다음 Ar 가스를 1기압 이상으로 넣은 후 다시 1850°C까지 40분 만에 가열하고 그 온도에서 압력을 20 MPa로 올리고 40분간 유지한 다음 냉각하였다.

복합소결체 내에서 휘스커의 분산상태는 미세연마된 경면에서 광학현미경으로 관찰하였다. 소결체의 물성으로는 밀도 이외에 Vickers 경도, 3점 꺾임강도 및 파괴인성을 측정하였다. 시편의 소결밀도는 Archimedes 원리에 의한 수침법으로 측정하였고, 상대밀도는 소결밀도를 혼합물에 의한 이론밀도로 나눈 백분율의 값으로 하였다. Vickers 경도는 현미경 조직을 관찰하기 위하여 준비한 경면에 10 kg의 하중을 Vickers diamond indenter로 15초 동안 준 뒤 하중을 제거하고 생성된 압흔의 길이로부터 환산된 경도값을 얻었다⁶⁾. 꺾임강도(Modulus of Rupture, MOR)는 span 간격이 10 mm인 3점법으로 폭 3 mm, 높이 2 mm, 길이 13 mm인 막대모양 시편으로부터 얻었다. 시편은 diamond wheel(600 grid)로 가공한 후 모따기를 하고 B₄C 입자로 10분간 입자표면을 lapping하여 완성하였고, 꺾임시험시 하중은 50 kg, crosshead 속도는 0.1 mm/min으로 하였다.

시편의 상온 파괴인성은 ISB(Indentation Strength-in-Bending)법으로 측정하였다. 썩임강도 시험편의 한면의 중앙에 하중 5 kg의 Vickers 압입을 시킨 후 썩힌 부위에 최대 인장응력이 주어지도록 하여 3점 꺾임강도 시험을 하였고, 파괴인성값은 Chantical 등⁷⁾의 다음 식으로 구하였다.

$$K_c(ISB) = 0.59 \times (E/Hv)^{1/8} \times (\sigma_{\text{ub}} \times Pi^{1/3})^{3/4}$$

E = 탄성계수

Hv = Vickers 경도

σ_{ub} = 압입된 시편의 강도

Pi = 압자 하중

위 식에서 탄성계수(E)로는 Al₂O₃와 SiC의 고유 탄성계수 값인 412 GPa과 450 GPa로부터 혼합법칙에 의한 값을 택하였다.

3. 실험결과 및 고찰

3.1. 미세구조 및 밀도

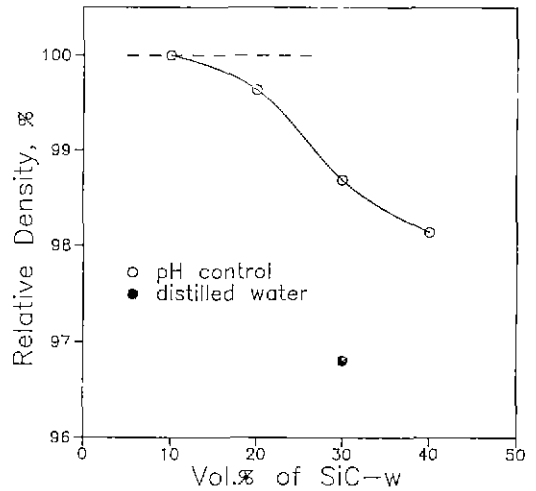


Fig. 2. Variation of relative density of Al₂O₃-SiC whisker composites with whisker content

Fig. 2는 SiC whisker의 양에 따른 Al₂O₃ 시편의 소결밀도의 변화로서 휘스커 함량이 증가됨에 따라 감소하나 hot press 공정을 거친 관계로 30~40% 휘스커를 첨가하여도 상대밀도가 98.1%를 넘어 비교적 치밀한 조직이 얻어졌음을 알 수 있다. 그러나 전처리를 하지 않은 휘스커를 그대로 사용한 경우(Fig. 2의 distilled water)는 밀도가 상대적으로 낮았는데 이 결과로부터 whisker의 분산이 시편의 치밀화에 매우 중요함을 알 수 있다.

휘스커의 함량이 증가함에 따라 치밀화가 억제되는 이유로는 첫째, 소결이 진행됨에 따라 Al₂O₃ 기지상에 원주방향의 인장응력이 생기고 휘스커 내부에 방사상의 압축응력이 형성되어 이러한 일시적인 응력이 소결의 구동력을 감소시키고 둘째, 휘스커와 휘스커의 교차점에 있는 기지분말이 먼저 소결되면서 휘스커의 단단한 골격구조(skeletal structure)를 형성하기 때문인 것으로 알려져 있다⁸⁾.

Fig. 3은 30% 휘스커를 첨가한 Al₂O₃ 소결체의 휘스커면의 광학현미경 조직으로 pH 조절과 초음파 분산의 영향을 나타내고 있다. Fig. 3(a)는 pH 조절과 초음파 처리를 한 시편의 미세구조로서 휘스커가 Al₂O₃ 기지상에 균일하게 분산되어 있는 것을 보여주고 있지만, Fig. 3(b)는 as-received whisker를 pH 조절과 초음파 처리없이 그대로 사용하여 제조한 소결체의 조직으로 휘스커의 분산상태가 대단히 나쁘고, Al₂O₃ 응집체인 공정결함도 많이 존재하고 있음을 볼 수 있다. Fig. 3(c)는 현재 국외에서 제조되어 시판되고 있는 Al₂O₃-30 vol% SiC whis-

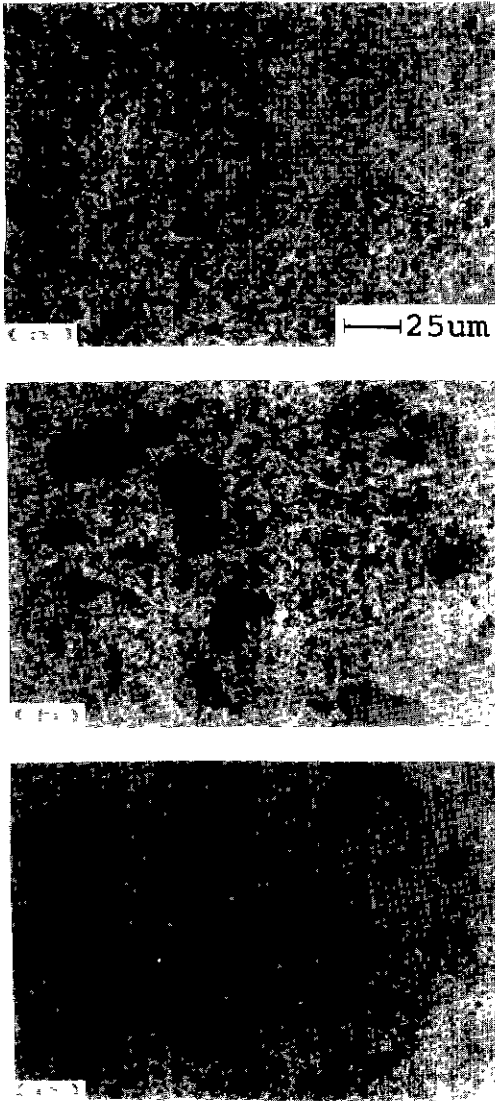


Fig. 3. Optical micrographs of the Whisker plane of Al₂O₃-30 SiC(vol%) Whisker composites: (a) Specimen with pH control during processing, (b) Specimen without pH control(just milling in distilled water) and (c) commercial Al₂O₃-SiC.

ker 복합체인 Al₂O₃-SiC_i의 휘스커 면의 조직을 보여주는데 휘스커의 분산상태가 그다지 양호하지는 못하고 휘스커의 크기가 본 연구에서 사용된 휘스커보다 더 작다. 한편 Fig. 3(a)는 Al₂O₃ 기지상의 분산도 양호하게 이루어졌음을 보여준다.

한편 Fig. 4(a)와 (b)는 각각 20%와 40% 휘스커가 첨가된 시편의 미세조직으로 Fig. 3의 미세조직과 비교할

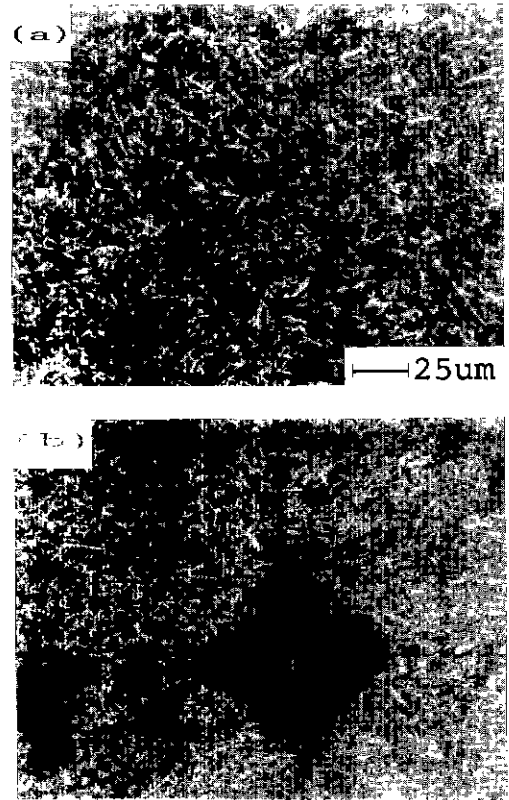


Fig. 4. Typical micrographs of (a) Al₂O₃-20 SiC Whisker composite and (b) Al₂O₃-40 SiC Whisker composites. In (b), the area of indentation is included.

때 휘스커량의 증가에 따라 휘스커의 분산상태가 나빠지고 공정결합이 증가함을 볼 수 있다. 이 결과는 휘스커 함량이 증가함에 따라 혼합체의 점도가 증가하여⁵⁾ 휘스커의 분산이 용이하지 않으며 휘스커끼리 응집되는 정도가 증가하기 때문인 것으로 생각된다. 휘스커의 분산은 상대적으로 알루미나 분산의 의미를 가지므로 휘스커 함량 증가에 따라 알루미나 분산의 중요성이 증대될 것이다. Fig. 3(a)에서 볼 수 있는 바와 같이 알루미나의 분산은 양호한 것으로 나타나 본 연구에서 결정한 휘스커의 분산조건이 알루미나의 분산조건과 유사한 것으로 생각되어 휘스커 함량에 따른 각각의 분산조건은 결정하지 않았다. 그러나 휘스커 함량이 많을수록 알루미나의 분산도 상대적으로 중요할 것이므로 휘스커와 알루미나의 분산조건을 각각 결정하는 것이 바람직할 것으로 생각된다.

3.2. 기계적 성질

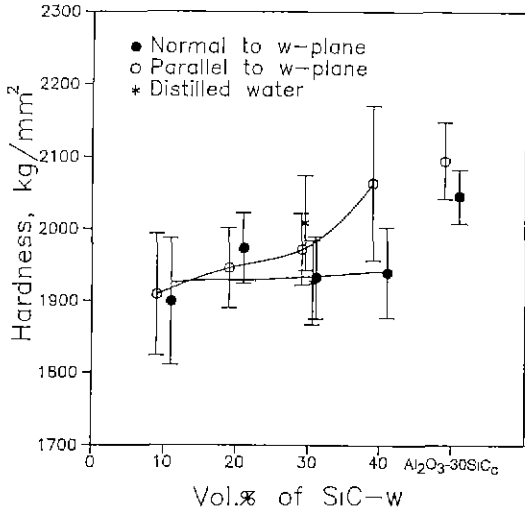


Fig. 5. Vickers hardness of Al₂O₃-SiC Whisker composites.

각 시편에 대하여 측정된 Vickers 경도값을 Fig. 5에 도시하였다. 시편의 면에 따라 경도도 변하는데, 휘스커 함량이 증가됨에 따라 휘스커 면인 압축면의 경도가 증가하여 압축면에 수직인 면의 경도보다 높아지는 경향을 보인다. 또한 휘스커면과 수직인 면에 대한 값은 휘스커 함량에 따라 크게 변하지 않고 1950 kg/mm² 정도의 값을 나타낸다. 반면에 이들의 경도는 모두 기존 제품인 Al₂O₃-SiC_c의 경도보다 약 100 kg/mm² 정도 낮은 값을 보였는데 이와 같은 이유는 휘스커의 제조회사나 다른 관계로 휘스커의 순도나 처리에 따라 휘스커 자체의 물성이 다를 수 있고 또한 Fig. 3에서 보듯이 휘스커의 크기가 다른 것에서도 찾아질 수 있으나 정확한 원인은 알 수 없다.

Fig. 6은 휘스커 함량에 따른 복합소결체의 격임강도로서 휘스커 함량이 증가됨에 따라 강도가 증가하여 20% 휘스커 함량에서 최고값을 나타낸 후 그 이상의 휘스커 함량에서는 다시 감소하는 경향을 보이고 있다. 휘스커의 함량에 따라서 복합체의 강도가 증가하는 이유는 첫째, 휘스커에 의하여 시편이 강화되었기 때문이고 둘째, 휘스커에 의하여 Al₂O₃ 기지의 입자성장이 억제되었기 때문이다. 그러나 휘스커가 30 vol% 이상 첨가되면 복합체의 밀도도 감소하고 휘스커의 분산특성도 저하되어 재료의 강도가 감소된다. 30 vol% 이상의 휘스커 함량에서 복합체의 강도가 다시 감소하는 것은 이와 같은 강도저하 현상이 위의 강화현상보다 우세하게 작용했기 때문인 것으로 판단된다.

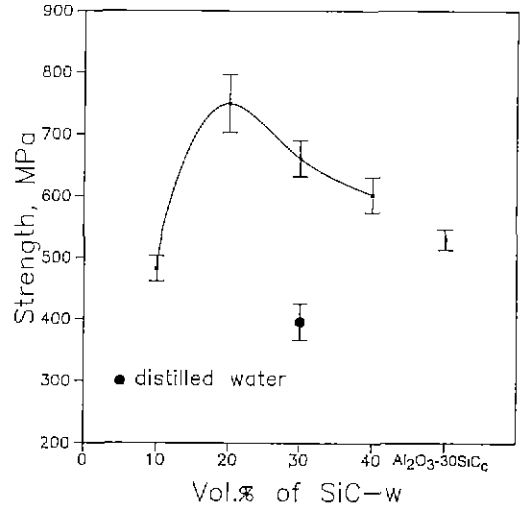


Fig. 6. Bend strength of various Al₂O₃-SiC Whisker composites.

Al₂O₃-SiC whisker 복합체의 기계적 성질이 휘스커의 분산상태에 의하여 좌우된다는 점을 생각할 때 기계적 성질의 비교는 휘스커의 전처리 과정과 아울러 행해져야 할 것이다. Tieg와 Becher²⁾는 휘스커의 전처리로서 초음파 분산만을 실시하였을 때 20 vol%의 휘스커 함량에서 700 MPa 정도의 강도를 얻었다. 또한 Homeny 등⁴⁾은 10 이상의 pH에서 분산처리→초음파 처리→7의 pH에서 불 밀링의 순서로 휘스커 분산처리 후 가압소결법으로 제조하였을 때 30 vol%의 휘스커 함량에서 약 600 MPa 정도의 강도를 갖는 것으로 보고하였다. 이에 비하여 본 연구에서 제조한 시편의 강도는 20~30 vol% 휘스커 함량에서 650~750 MPa 정도의 강도를 보여 이들의 결과보다 우수한 것으로 나타났다.

한편 똑같이 30 vol%의 휘스커가 첨가된 복합재료라도 pH 조절과 초음파 분산의 전처리를 거치지 않은 경우 (Fig. 6에서 distilled water로 표시)에는 격임강도 값이 400 MPa로 매우 낮아서 순수한 Al₂O₃의 물성값에도 못 미치고 있는데 이 것은 위의 설명과 부합하는 현상이다. 즉 전처리 과정을 거치지 않은 시편(Fig. 7(b))은 전처리 과정을 거친 시편(Fig. 7(a))에 비하여 휘스커의 분산특성이 나빠서 크게 성장한 Al₂O₃ 입자가 공정결함을 형성하고 있다. 따라서 Al₂O₃-SiC 복합체의 기계적 특성은 휘스커의 분산특성에 의하여 절대적으로 좌우됨을 알 수 있으며 이는 이전의 연구결과⁴⁾와 유사한 것이다.

한편 Fig. 6에는 기존의 Al₂O₃-SiC whisker 복합체인 Al₂O₃-SiC_c의 강도도 함께 나타내었는데 본 연구에서

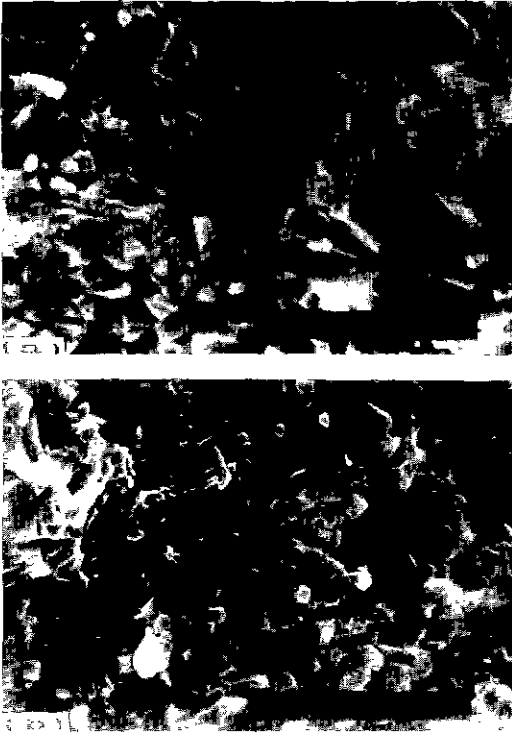


Fig. 7. SEM photographs of fracture surface of Al₂O₃-30 SiC Whisker composites (a) with pH control and (b) without pH control(just milling in distilled water).

제조한 시편의 강도보다 훨씬 낮다. 이러한 이유는 휘스커의 순도나 크기 등의 차이에도 기인하겠지만 두 시편의 미세구조의 차이(Fig. 3)에서도 찾아볼 수 있다. 즉 Al₂O₃-SiC₂의 휘스커 분산상태가 본 연구에서 제조한 시편의 분산상태보다 나쁜 것도 중요한 이유인 것으로 생각된다. 이러한 결과는 본 연구에서 행한 pH 조절을 통한 휘스커의 최적분산이 Al₂O₃-SiC whisker 복합체의 기계적 성질 향상에 중요하다는 것을 보여주는 것이다.

Fig. 8은 ISB법으로 측정된 Al₂O₃-SiC복합체의 파괴인성을 보여준다. 파괴인성도 강도와 마찬가지로 휘스커에 의한 강화효과와 공정결함에 의한 강도저하 현상 중에서 어느 것이 더 우세하게 작용하는가에 따라 그 값이 달라진다고 볼 수 있다. Fig. 8에 나타난 바와 같이 파괴인성도 강도의 결과와 유사하게 휘스커 함량에 따라 증가하다가 일정한 휘스커 함량(40 vol%) 이상에서 기공과 미분산 휘스커와 같은 공정결함에 의하여 다시 감소하는 경향을 보인다.

기존의 Al₂O₃-SiC₂의 파괴인성은 본 연구에서 제조한

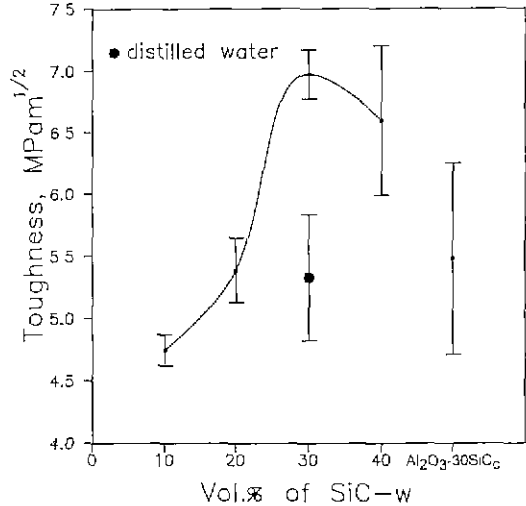


Fig. 8. Fracture toughness of Al₂O₃-SiC Whisker composites obtained by indentation strength-in-bending method.

시편의 파괴인성보다 훨씬 낮은 값을 보였는데 이는 적임강도의 경우와 마찬가지로 휘스커 성질 차이에도 그 원인이 있겠으나 주로 휘스커의 분산상태가 나쁘고 휘스커의 길이도 짧아서 균열의 전파를 효과적으로 저지하지 못했기 때문인 것으로 생각된다. 또한 휘스커의 전처리를 하지 않은 시편(Fig. 8에서 distilled water)의 파괴인성도 전처리를 거친 시편보다 매우 낮은 값을 나타내어 전처리 과정의 중요성을 알 수 있다. 한편 측정된 파괴인성은 5~7 MPam^{1/2}으로서 가압소결법으로 제조한 대개의 다른 연구결과^{9,10}인 6~9 MPam^{1/2}보다는 낮은 값이나 그 원인은 확실치 않다. 다만 세라믹과 같은 취성재료에서 측정방법이나 조건에 따라서 파괴인성의 절대값이 달라지는 것이 일반적인 현상인 점, 또한 ISB 방법으로 파괴인성을 측정하였을 때 여타의 방법으로 측정할 경우에 비하여 일반적으로 낮은 값을 보이는 점 등을 감안하면 절대값의 차이는 큰 의미를 지니지 못하는 것으로 보여진다. 이와 같은 결론은 상용화된 Al₂O₃-SiC₂의 파괴인성보다 본 연구에서 제조한 시편의 파괴인성이 높다는 것에서도 뒷받침될 수 있다.

4. 결 론

Al₂O₃ 분말 및 SiC whisker에 대한 pH 조절과 SiC whisker에 대한 초음파 처리를 함으로서 휘스커와 Al₂O₃가 균일하게 분산된 미세조직을 얻을 수 있었고, 그에

따라 기계적 성질을 증진시킬 수 있었다. 휘스커 함량이 증가됨에 따라 밀도는 완만하게 감소하였으나, 모든 시편의 상대밀도는 98.1%를 넘었다. 이러한 결과는 휘스커에 대한 전처리과정을 거치지 않은 시편의 밀도가 매우 낮았던 것으로 미루어 휘스커의 분산처리가 절대적임을 의미한다.

휘스커 함량이 증가됨에 따라 휘스커 면에 대한 경도는 증가하였으나, 휘스커 면과 수직인 면에 대한 값은 큰 변화가 없었다. 또 휘스커 면에 대한 경도가 휘스커 면과 수직인 면에 대한 값보다 더 높게 나타났다. 휘스커 함량이 증가함에 따라서 강도와 파괴인성도 증가하였다. 그러나 휘스커 함량이 30 vol%를 넘으면 복합체의 분산이 불균일하게 되고 밀도가 저하되어 기계적 성질이 다소 감소하였다. 이상의 결과로부터 Al_2O_3 -SiC whisker 복합체에서 보다 우수한 기계적 성질을 얻기 위하여는 밀도와 휘스커의 분산성이 저하되지 않는 한도내에서 휘스커의 함량을 최대로 하였을 때 기계적 성질이 가장 좋을 것으로 판단된다. 따라서 휘스커의 분산을 개선하고 시편을 완전치밀화시키기 위한 노력이 앞으로 계속 요구된다고 하겠다.

REFERENCES

1. N. Claussen and G. Petzow, "Whisker Reinforced Zirconia Toughened Ceramics," in Tailoring Multiphase and Composite Ceramics, edited by R. Tresseler et al., Plenum Publishing Co., New York, 649-662 (1986).
2. M. Buhmer and E.A. Almond, "Mechanical Properties and Wear Resistance of a Whisker-Reinforced Zirconia-Toughened Alumina," *Mat. Sci. Eng.*, A105-106 (1988).
3. R. Lundberg, B. Nyberg, K. Willander, M. Persson and R. Carlsson, "Processing of Whisker Reinforced Ceramics," *Composites*, **18**(2), 125 (1987).
4. J. Homeny, W.L. Vaughn and M.K. Ferber, "Processing and Mechanical Properties of SiC-Whisker- Al_2O_3 -Matrix Composites," *Am. Ceram. Soc. Bull.*, **66**(2), 333-338 (1987).
5. M.D. Sacks, H.-W. Lee and O.E. Rojas, "Suspension Processing of Al_2O_3 /SiC Whisker Composites," *J. Am. Ceram. Soc.*, **71**(5), 370-79 (1988).
6. M.-Y. Lee and M.K. Brun, *Cer. Sci. Eng. Proc.*, 863 (1983).
7. P. Chantical, G.R. Antis, B.R. Lawn and D.B. Marshall, "A Critical Evaluation of Indentation Techniques for Measuring Fracture Toughness: II, Strength Method," *J. Am. Ceram. Soc.*, **64**(9), 539 (1981).
8. M.J. Hoffmann, A. Nagel, P. Greil and G. Petzow, "Slip Casting of SiC Whisker Reinforced Si_3N_4 ," *J. Am. Ceram. Soc.*, **72**(5), 765 (1989).
9. T.N. Tieggs and P.F. Becher, "Sintered Al_2O_3 -SiC Whisker Composite," *Am. Ceram. Soc. Bull.*, **66**(2), 339-42 (1987).
10. P.F. Becher, T.N. Tieggs, J.C. Ogle and W.H. Warwick, "Toughening of Ceramics by Whisker Reinforcement"; pp. 61-73 in Fracture Mechanics of Ceramics, Vol. 7 edited by G.C. Bradt, A.G. Evans, D.P.H. Haselman and F.F. Lange, Plenum Press, New York (1986).