

## 코디어라이트-SiC 위스커 복합재료에서 측정방법에 따른 파괴인성치의 변화

강대갑 · Weisskopf \*

대한중석광업 주식회사

\*Max-Planck 연구소, 서독

(1987년 3월 3일 접수)

## Influence of Testing Method on the Fracture Toughness of Cordierite-SiC Whisker Ceramic Composites

T.K.Kang and K.L. Weisskopf \*

Korea Tungsten Mining Co.

\*Max-Planck Institute, Stuttgart, F R G

(Received March 3, 1987)

### 요 약

0%에서 40%까지의 SiC 위스커 함량을 갖는, 가압소결(hot Pressing)로 제조된 코디어라이트-SiC 위스커 복합재료의 파괴인성,  $K_{IC}$ , 를 압자압입후 균열길이 측정법(IC) 및 압자압입 후 파괴법(IS)과 single edge notched beam법(SENB)으로 측정하였다. 측정된  $K_{IC}$  결과를 거울면 반지름측정법(MZ)으로 구한, 균열분파경계선에서의 응력확대계수,  $K_B$ , 와 비교함으로써 각 방법으로 구한  $K_{IC}$  값의 신뢰성을 검토하였다. 코디어라이트-SiC 위스커 복합재료에 대해서는 IS법이 다른 측정방법보다 좀 더 타당성있는  $K_{IC}$  값을 내는 것으로 평가되었다.

### ABSTRACT

Fracture toughness of hot pressed cordierite-SiC whisker ceramic composites contained up to 40 vol.% SiC whiskers were determined by using the indentation crack length (IC), indentation strength-in-bending (IS), and single-edge notched-beam (SENB) methods. The results were compared to stress intensity factor,  $K_B$ , at the crack branching boundary measured by using the mirror zone radius (MZ) method. IS method seems to provide a more reasonable estimation of fracture toughness than other methods for these composites.

### I 서 론

구조재료용 정밀요업제품이 자동차엔진 부품에서 부

터 내마모부품에 이르기까지 넓은 범위에서 점차 실용화되어 가고 있다. 최근 가장 주목을 받고있는 구조재료용 정밀요업제품 소재로서 위스커 강화 복합재료(ce-

ramic whisker reinforced ceramic matrix composites)를 들 수 있다. 위스커 강화 복합요업재료는 복합재료 중에서 가장 최근에 연구 개발되고 있는 재료로써 기지상과 위스커가 모두 요업소재로 된 복합재료이다. 위스커로써는 기계강도와 화학안정성 그리고 고온특성이 좋은 SiC 위스커<sup>2)</sup>가 일반적으로 널리 쓰이고 있다. Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 기지상에 SiC 위스커를 분산시킨 복합재료<sup>2~4)</sup>와 열충격저항은 우수하나 기계적강도가 낮은 코디어라이트에 SiC 위스커를 분산시킨 복합재료<sup>5)</sup> 및 Si<sub>3</sub>N<sub>4</sub>-SiC 위스커 복합재료<sup>6)</sup>에 관한 연구등이 보고되어 있다.

그러나 아직도 구조재료용 정밀요업제품이 이용에 상당한 제약을 받고 있는 가장 커다란 이유는 이들 소재의 파괴인성(fracture toughness, K<sub>IC</sub>)이 아직 충분히 높지 않기 때문이다. 한편 이들 재료의 연구개발 및 설계에 있어서 파괴인성을 정확히 그리고 신뢰성있게 측정하는 것이 매우 중요한 일이나 현재 사용되고 있는 여러가지 파괴인성 측정방법<sup>7)</sup>이 저마다 서로 다른 측정치를 나타내며 또한 몇몇 측정방법은 측정조건으로부터 커다란 영향을 받고 있어서 연구결과와 상호비교 등에 많은 어려움을 주고있다.

위스커로 강화된 복합요업재료에 대하여 측정방법에 따른 K<sub>IC</sub> 값의 변화를 다룬 연구보고는 아직 많지 않다. Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>-SiC 위스커 복합재료에서 압자압입 후 파괴법(indentation strength-in-bending, IS)이 압자압입 후 균열길이 측정법(indentation crack length, IC)보다 높은 K<sub>IC</sub> 값을 보였고<sup>2)</sup> DCB(double cantilever beam)법이 short-rod 법보다 높은 값을 나타내었다.<sup>8)</sup> SiC 위스커로 강화시킨 Si<sub>3</sub>N<sub>4</sub>계 복합재료에서 IC법으로 얻은 K<sub>IC</sub> 값이 CN(chvron notch)법으로 얻은 값보다 낮게 나타났으며 이는 SiC 위스커가 분산되어 있는 복잡한 미세조직에서 IC법에 의한 예리한 균열의 끝을 판별하기 어려웠기 때문으로써 전자주사현미경으로 균열의 길이가 정확하게 측정될 수 있다면 CN법으로 얻은 결과에 근접하게 될 것이라고 보고 되었다.<sup>9)</sup> 그러나 코디어라이트-SiC 위스커 복합요업재료에서의 측정방법과 K<sub>IC</sub> 변화에 관한 보고는 아직 없었다.

본 연구에서는 코디어라이트-SiC 위스커 복합재료에 대하여 측정방법에 따른 K<sub>IC</sub> 측정결과와 변화를 관찰하였다. 파괴인성 측정방법으로는 최근 가장 주목을 받고 있는 IC 및 IS 법과 보편적으로 널리 쓰이는 single-edge notched beam법(SENB)을 사용하였으며 이들 K<sub>IC</sub> 측정결과를 저울던 반지를 측정법(mirror zone radius, MZ)으로 구한 균열분파(分派)경계

선에서의 응력확대계수, K<sub>B</sub>, 와 비교함으로써 그들의 신뢰성을 고찰하였다.

## II. 실험방법

코디어라이트 분말과 SiC 위스커를 원료로 하여 1250 °C Ar 분위기에서 28.5 MPa의 압력으로 30분간 가압소결(hot pressing)하였으며 시편의 조성이 소결체에서 SiC 위스커의 부피분율로 0, 10, 20, 30 및 40% 되게 하였다. 소결된 시편을 2~3 μm 굵기의 다이아몬드 분말을 써서 연마한 후 단면적 3.6 mm × 2.8 mm의 각주형 시편으로 절단하였다. 시편제조에 대한 좀 더 상세한 내용은 이미 보고된 바 있다.<sup>5)</sup>

절단된 각주형 시편으로 부터 4가지 측정법, 즉 IC법, IS법, SENB법 그리고 MZ법으로 상온에서의 K<sub>IC</sub> 및 K<sub>B</sub>를 측정한 후 각 측정치를 비교하였다.

IC법을 위하여, 절단된 각주형 시편의 한면은 1 μm 굵기의 다이아몬드 분말로 더욱 곱게 연마한 다음 적절한 압자압입부하, 즉 코디어라이트 조성 시편은 19.6~29.4 N, SiC 위스커를 10% 함유한 시편은 49N 그리고 그 이외의 조성 시편들은 98N의 부하로 균열을 생성시킨 다음 광학현미경으로 균열의 길이를 측정하였다. 균열의 길이로 부터 K<sub>IC</sub>를 계산하는 데에 여러가지 형태의 공식들이 제안되어 있으나 본 연구에서는 이 중에서 중요한 위치를 차지하는 아래의 세가지 공식을 사용하였다.

a) Evans 와 Charles 의 식<sup>8,9)</sup>

$$\frac{K_{IC}}{H\sqrt{a}} = 0.057 \left(\frac{E}{H}\right)^{2/5} \left(\frac{c}{a}\right)^{-3/2} \dots\dots\dots (1)$$

b) Lawn 과 동료의 식<sup>10)</sup>

$$\frac{K_{IC}}{H\sqrt{a}} = 0.028 \left(\frac{E}{H}\right)^{1/2} \left(\frac{c}{a}\right)^{-3/2} \dots\dots\dots (2)$$

c) Anstis 와 동료의 식<sup>11)</sup>

$$K_{IC} = 0.016 \left(\frac{E}{H}\right)^{1/2} \left(\frac{P}{c}\right)^{3/2} \dots\dots\dots (3)$$

여기서 H는 경도, E는 탄성계수, a와 c는 각각 대각선 압흔길이와 대각선 균열길이의 1/2, 그리고 P는 압자압입부하이다. SiC 위스커를 40% 함유한 조성의 K<sub>IC</sub>는 시편의 높은 기공률로 인하여 측정하지 못하였다.

IS법을 위하여, 각주형 시편에 Vickers 압자를 시편조성에 따라 9.8~392 N 범위의 부하로 압입시켜

균열을 생성시켜준 다음, 압흔이 생긴 시편을 아래받침거리 12mm인 3점받침을 써서 0.1mm/min의 cross head speed로 파괴한 후 Chantikul 과 동료<sup>12)</sup>들이 유도한 아래의 식(4)를 써서 K<sub>IC</sub>를 계산하였다.

$$K_{IC} = 0.59 \left(\frac{E}{H}\right)^{1/2} (\sigma_i \cdot P_i^{1/3})^{3/4} \dots\dots\dots (4)$$

여기서 P<sub>i</sub> 및 σ<sub>i</sub>는 압자압입부하 및 압흔이 난 시편의 곡강도이다. IS법에 의한 K<sub>IC</sub> 결과는 조성에 따라 9~12개 썩의 시편으로 부터 얻어졌다.

SENB법을 위하여, 먼저 각주형 시편에 다이어먼드를 입힌 얇은 회전날을 사용하여 홈집(notch)을 넣어 주었다. 홈집의 폭은 약 200 μm이었으며 홈집의 깊이와 시편두께의 비율은 0.1~0.25의 범위에 있었다. 홈집이 난 시편을 바깥받침거리 20mm, 안쪽받침거리 7mm인 4점받침을 써서 0.1mm/min의 cross head speed로 시편을 파괴한 후 아래의 식(5)를 써서 K<sub>IC</sub>를 계산하였다.

$$K_{IC} = \sigma_n \cdot d^{3/2} \cdot Y \dots\dots\dots (5)$$

$$Y = 1.99 - 2.41 \left(\frac{d}{w}\right) + 12.97 \left(\frac{d}{w}\right)^2 - 23.19 \left(\frac{d}{w}\right)^3 + 28.8 \left(\frac{d}{w}\right)^4 \dots\dots\dots (5)$$

여기서 σ<sub>n</sub>은 홈집이 난 시편의 곡강도, d는 홈집의 깊이, Y는 시편형상에 따른 보정상수이며 w는 시편의 두께이다. SENB법에 의한 K<sub>IC</sub> 결과는 조성에 따라 3~5개 썩의 시편으로 부터 얻어졌다.

MZ법을 위하여, 먼저 각주형 시편을 위의 4점받침을 써서 0.1mm/min의 cross head speed로 파괴한 다음 파단면에서 입체광학현미경으로 균열이 분파되기 시작하는 경계선까지의 반지름을 측정 한 다음 Swain과 Claussen<sup>13)</sup>이 사용한 식(6)을 써서 균열 분파경계선에서의 응력확대계수, K<sub>B</sub>를 계산하였다.

$$K_B = \sigma_b \cdot r_m^{1/2} \cdot Z \dots\dots\dots (6)$$

$$Z = \frac{2}{\sqrt{\pi}} \left(1.02 - 1.46 \frac{r_m}{w}\right)$$

여기서 σ<sub>b</sub>는 곡강도, r<sub>m</sub>은 균열분파경고선까지의 반지름, 그리고 Z는 보정상수이다. MZ법에 의한 K<sub>B</sub> 결과는 조성에 따라 5~6개 썩의 시편으로 부터 얻어졌으며 SiC 위스커를 40% 함유한 조성의 K<sub>B</sub>는 파단면이 매우 불규칙하여 측정하지 못하였다.

III. 결과 및 고찰

위의 여러 방법으로 측정 한 각 조성의 K<sub>B</sub>와 K<sub>IC</sub> 값을 Fig.1에 도시하였다. 전반적으로 K<sub>B</sub>와 K<sub>IC</sub> 값이 코디어라이트 조성에서 가장 낮은 값을 보이며, SiC 위스커 함량이 증가함에 따라 이들 값도 증가하여 위스커함량 20% 혹은 30%에서 최대값을 보인 다음, 30% 혹은 40% 함량에서 다시 감소하고 있다. 이와 같이 위스커 함량 30~40%에서 낮아진 이유는 이미 보고된 바와 같이<sup>14)</sup> 8.3 및 21.4%나 되는 높은 기공률에 기인한 것으로 생각된다. K<sub>B</sub> 및 모든 K<sub>IC</sub> 값 중에서 K<sub>B</sub> 값이 가장 높은 값을 나타내고 있다. 대부분의 K<sub>IC</sub> 값들이 전반적으로 K<sub>B</sub>의 변화와 유사한 경향을 보이고 있다. MZ법의 K<sub>B</sub>와 IS법 및 IC법 식(2)의 K<sub>IC</sub> 값이 거의 동일한 변화 경향을 보인 반면, IC법의 식(1)과(3)의 K<sub>IC</sub> 값은 이들보다 조금 급한 변화를 나타내고 있으며 SENB법은 특히 코디어라이트 조성의 K<sub>IC</sub> 값이 다소 높게 나타나는 등 다른 방법에 비하여 비교적 완만한 K<sub>IC</sub> 값의 변화를 보이고 있다. K<sub>IC</sub> 값 중에서는 SENB법 IS법 및 IC법의 식(1)로 구한 K<sub>IC</sub> 값이 높았으며 IC법의 식(2)가 가장 낮은 값을 나타내고 있다.

IC법은 Evans와 Charles<sup>15)</sup>에 의하여 최초로 수식화되었는데 그들은 압자압입에 의한 균열생성과 K<sub>IC</sub>

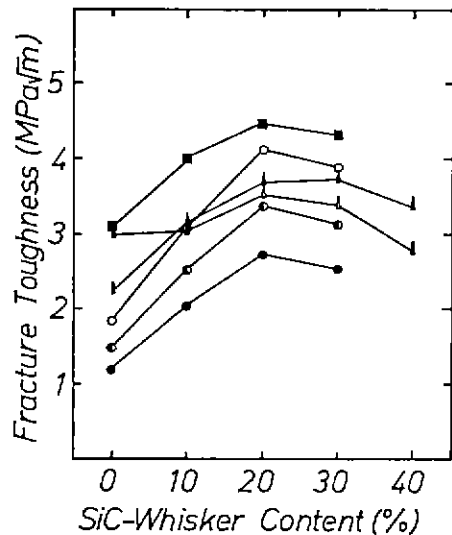


Fig. 1. K<sub>B</sub> values of cordierite-SiC whisker composites measured by MZ method (-■-) and K<sub>IC</sub> values by various methods; SENB(-△-), IS(-▲-), IC Eq(1)(-○-), IC Eq(2)(-●-) and IC Eq(3)(-●-).

의 관계를 변형 및 파괴에 대한 이론적 고찰이 아닌 단순한 차원분석법 (dimension analysis) 과 실제자료에 대한 곡선맞춤 (curve fitting) 으로 오류정정<sup>9)</sup> 을 거쳐 식 (1) 을 얻었다. Evans 와 Charles 의 결과를 더욱 발전시켜 Lawn 과 동료<sup>10)</sup> 는 IC법에 대한 이론적인 정립을 보였다. 그들은 압자압입에 의한 균열 성장기구를 탄성성분과 잔류성분으로 구분하여 해석함으로써 이론적으로 식 (2) 를 유도하였으며 식 (2) 를 써서 Evans 와 Charles<sup>9)</sup> 의 자료를 분석한 결과 식 (1) 을 쓸 때보다 훨씬 양호한 곡선맞춤을 보였다. Anstis 와 동료<sup>11)</sup> 는 Lawn 과 동료<sup>10)</sup> 가 이룬 이론적인 결과를 DCB (double cantilever beam) 법 및 DT (double torsion) 법으로 측정된 여러가지 재료의 K<sub>IC</sub> 값과 비교하여 보정함으로써 식 (3) 을 얻었다.

식 (3) 을 재정리하면

$$\frac{K_{IC}}{H\sqrt{a}} = 0.034 \left(\frac{E}{H}\right)^{1/2} \left(\frac{c}{a}\right)^{-3/2} \dots\dots\dots (7)$$

이 되며 이때 식 (7) 은 식 (2) 와 상수항만 차이를 보이는, 실질적으로 동일한 결과가 된다. 그러나 Anstis 와 동료<sup>11)</sup> 가 K<sub>IC</sub> 값 보정에 사용한 자료에는 위스커 강화 복합재료 및 코디어라이트의 K<sub>IC</sub> 자료는 없었다.

Fig. 1에서 보듯이 IC법의 식 (1)~(3) 으로 구한 K<sub>IC</sub> 값 중에서 식 (1) 로 구한 값이 가장 높았고 식 (2) 로 구한 값이 가장 낮았다. 그러나 이들 세식은 거의 동일한 K<sub>IC</sub> 변화경향을 나타내었다. Vickers 압자를 압입시키면 표면에서는 방사형 균열 (radial crack) 이 관찰되고 내부에서는 만월형의 원주형 균열 (median crack) 과 측면균열 (lateral crack) 이 생성된다. 본 연구에서 코디어라이트 - SiC 위스커 복합재료 시편의 압자압입에 의한 내부균열 생성을 주사현미경으로 관찰하였다. Fig. 2에 나타난 바와같이 코디어라이트 조성 시편은 기계적 강도가 매우 낮고 파괴인성도 낮아서 낮은 압자압입부하에도 화살표가 가리키듯이 측면균열이 매우 크게 성장하면서 압흔 주위가 깨어졌다. (Fig. 2 a). 한편 SiC 위스커가 10% 함유된 복합재료시편에서는 Fig. 2b에 나타난 바와 같이 만월형의 원주형 균열이 형성되었고 또 측면균열도 관찰되었다. 그러나 위스커 함량 20% 시편에서는 만월형이 아닌 반타원형에 가까운 원주형 균열이 보이고 있으며 (Fig. 2c), 특히 기공률이 더욱 높아지는 위스커 함량 30~40% 시편에서는 압자압입부하의 일부분이 압흔 아래 부분에 있던 기공이 부서짐에 따른 치밀화 현상 (densification) 으로 손실 (accomodate) 되는 경향을 나

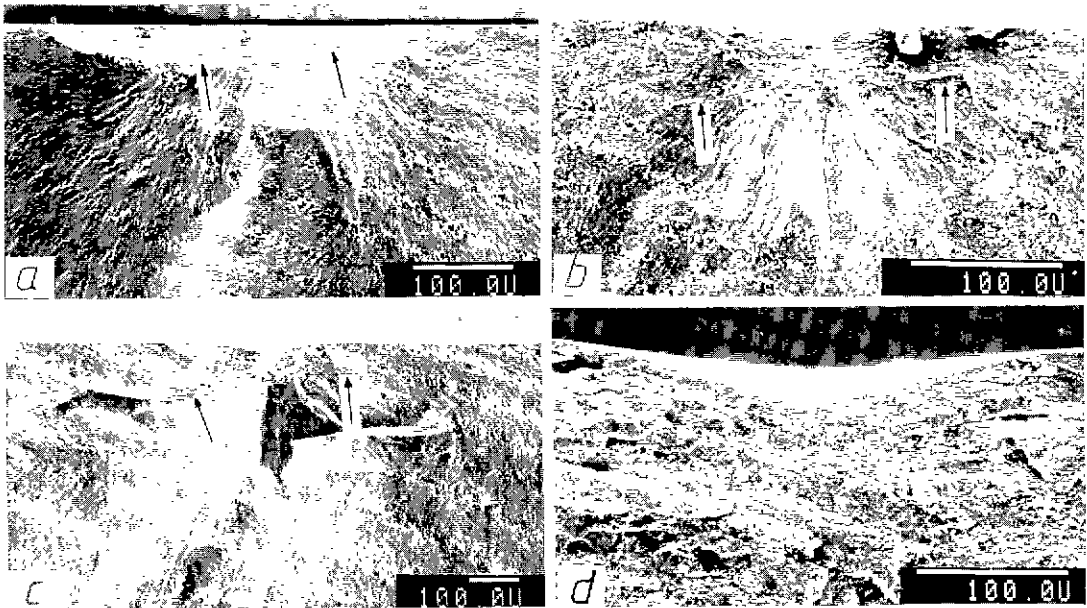


Fig. 2. Indentation crack developments in cordierite - SiC whisker composites with various whisker contents : a) 0% b) 10% c) 20% and d) 40%

타내었다(Fig. 2d).

IS 법은 압자압입 방법에 고전역학을 도입한 것으로서 IC 법에 있어서 가장 문제가 되는 잔류응력 성분(residual stress)의 영향과 이에 따른 느린 균열성장(slow crack growth)의 영향을 배제하며 오히려 압자압입에 의하여 생성된 균열을 하나의 controll flaw로 사용함으로써  $K_{Ic}$ 를 구하는 방법으로써 Lawn과 동료<sup>10)</sup>의 이론을 발전시킨 Chantikul과 동료<sup>12)</sup>에 의하여 유도되었다. IS 법은 시편은 압자를 압입시켜 균열을 생성시킨 다음 곡강도 측정법으로 시편을 파괴하기 때문에 끝이 매우 예리하여 판별하기 어려운 균열의 길이를 측정하지 않아도 되는 장점을 갖고 있다. 식(4)에 나타난 바와 같이 IS 법에서는 주어진 재료에 대하여

$$\sigma_1 \cdot P_1^{1/3} = \text{const.} \quad \dots\dots\dots (8)$$

를 만족시켜야 한다. 본 연구에 사용된 시편에 대하여  $\sigma_1$ 와  $P_1$ 의 관계를 조사하였다. Fig. 3에 나타난 바와 같이 SiC 위스커를 함유한 복합재료시편에서는 식(8)이 대체로 만족되었으나 코디어라이트 조성 시편에서는 식(8)에서 약간 벗어나는 경향을 보였다. 한편 Chantikul과 동료는 식(4)의 상수항을 구하기 위하여

Anstis와 동료<sup>13)</sup>가 식(3)의 보정에 사용한 실제  $K_{Ic}$  자료를 사용하였다. 따라서 식(3)과(4)는 같은 재료에 대하여 같은  $K_{Ic}$  값을 보여야 한다. 그러나 Fig. 1에서 보듯이 본 연구의 코디어라이트 - SiC 위스커 복합재료에 대한 경우 IS 법과 IC 법의 식(3)은 거의 유사한 변화경향을 보이고 있으나 IS 법이 IC 법의 식(3)보다 항상 약간 높은 값을 보이고 있다.

SENB 법은 끝이 매우 예리한, 즉 홈끝반지름(notch radius)이 영(零)인 경우를 가정하고 있다. 그러나 실제에 있어서 홈끝반지름이 영이 되게 가공하기는 어려우며 실제 가공된 홈끝은 상당한 크기의 반지름을 갖게 된다. 이에 따라 SENB 법의 가장 큰 단점은  $K_{Ic}$  값이 홈끝반지름에 심하게 영향을 받는다는 점이다. 홈끝반지름이 작을수록  $K_{Ic}$  값이 감소하여, 홈끝반지름의 크기를 영이 되도록 의삽함으로써 재료의 고유  $K_{Ic}$  값을 얻는다.<sup>15)</sup> 홈질가공방법에 따라서도 SENB 법이 영향을 받는데 초음파가공과 다이어던드날가공방법이 서로 다른  $K_{Ic}$  값의 변화경향을 보인다. 이것은 가공방법에 따른 홈끝의 가공결함(notch root damage)의 차이에 기인한 것으로서<sup>16)</sup> 이와 같은 홈끝의 가공결함이 고온에서의 열처리(annealing)로 제거될 수 있다고 보고되었다.<sup>15)</sup> SENB 법에 의한  $K_{Ic}$  값은 또한 재료의 미세조직으로 부터도 영향을 받는다.  $Al_2O_3$  시편의 경우 특히 입자가 미세한 경우( $< 5 \mu m$ )  $K_{Ic}$  값이 과대평가(over estimated)되며<sup>17)</sup>  $Al_2O_3 - ZrO_2$ <sup>14)</sup> 및 TZP- $Y_2O_3$ <sup>18)</sup>에서는 홈끝부위의  $ZrO_2$  입자 상변태에 의하여  $K_{Ic}$  값이 크게 영향을 받았다.

Fig. 1에서 보듯이 SENB 법으로 구한  $K_{Ic}$  값은 다른 방법으로 구한 값들에 비하여 비교적 완만한 변화를 보였고 코디어라이트 조성 시편의  $K_{Ic}$  값이 높게 나타나는 특징을 보였다. 식(5)를 재정리하면  $\sigma_n$ 과  $K_{Ic}$ 가 일차함수관계를 갖게 된다. SENB 법에 대한 신뢰성을 검토하는 한 방법으로  $\sigma_n$ 과  $K_{Ic}$  관계를 Fig. 4에 도시하였다. Fig. 4에서 보듯이  $\sigma_n - K_{Ic}$  관계는 거의 원점을 지나는, 그러나 다소 뚜렷하지 않은 일차함수관계를 나타내었다.

균열분파 경계선에서의 응력확대계수,  $K_B$ 를 MZ 법으로 구하기 위하여 파단면에서 균열분파 경계선을 측정하여야 한다. 본 연구에서는 파단면의 평탄도가 시편 조성에 따라 커다란 차이를 보였다. 코디어라이트 조성 시편의 파단면은 아주 평탄하여 거울면영역의 경계선을 명확히 판별할 수 있었다. 그러나 SiC 위스커를 함유한 복합재료 시편의 파단면은 매우 불규칙하였다. Fig. 5와 같이 10% SiC 위스커 함유 시편(Fig. 5a)보다 위스커함량이 높은 30% 함유 시편(Fig. 5

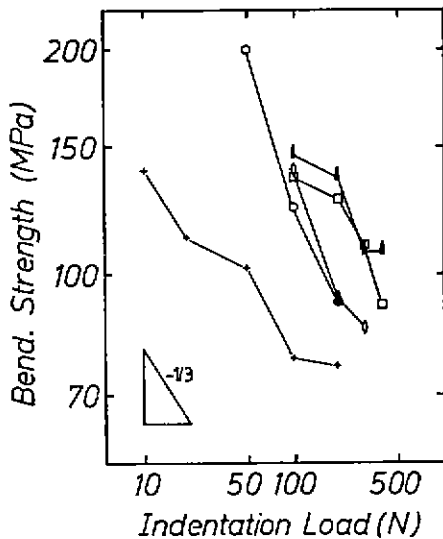


Fig. 3. Changes of bending strength with indentation load of cordierite - SiC whisker composites with various whisker contents : 0% (-+-) 10% (-○-), 20% (-□-), 30% (-△-) and 40% (-◇-).

b)의 파단면이 더욱 불규칙하였다. 이에 따라 균열분과 경계선을 뚜렷이 구별하기 어려웠으므로 비교적 평탄한 중앙부분과 불규칙하게 변하기 시작하는 부분을 임의의 기준으로 구별하여  $K_B$ 를 구하였다. Fig. 1에서 보듯이  $K_B$ 값이 다른  $K_{IC}$ 값들보다 높았으며 SENB법에 의한  $K_{IC}$ 값을 제외한 다른  $K_{IC}$ 값들의 변화경향과 동일한 경향을 보였다. 식 (6)을 재정리하면  $\sigma_b$

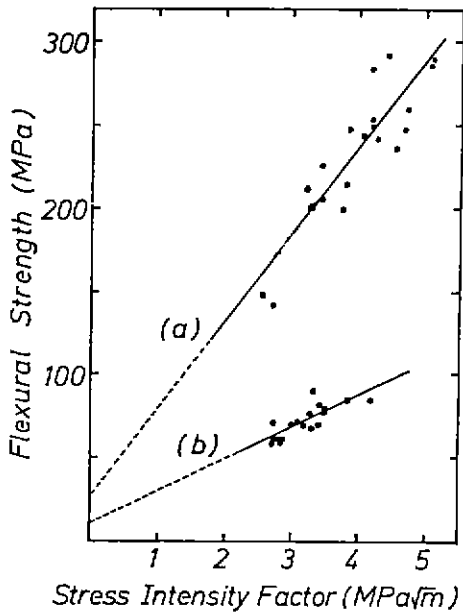


Fig. 4. Changes of flexural strength with stress intensity factor in cordierite-SiC whisker composites : a)  $\sigma_b - K_B$  by MZ method and b)  $\sigma_b - K_{IC}$  by SENB method.

와  $K_B$ 가 일차함수관계를 갖게 된다. SENB법의 경우와 같은 방법으로 MZ법의 신뢰성을 검토하기 위하여  $\sigma_b - K_B$ 관계를 Fig. 4에 도시하였다. 불규칙한 파단면 특성으로 인하여 측정오차가 크게 발생되어 신뢰도가 낮으리라 예상되었던  $\sigma_b - K_B$ 관계가 오히려 SENB법의 경우보다 뚜렷한 일차함수관계를 보였다.

IC, IS 및 SENB법 중에서 어느 방법이 코디어라이트-SiC 위스커 복합재료의  $K_{IC}$  측정방법으로 적합한가를 명확히 결론 짓기에는 본 연구의 결과자료가 부족하여 어려운 상황이나, 위에서 설명된 상단점과 신뢰성 그리고 측정치의 변화경향을 비교함으로써 유추하여 볼 수 있다.

Swain과 Claussen<sup>14)</sup>은  $Al_2O_3 - ZrO_2$  시편의 IS 및 SENB법으로 구한  $K_{IC}$ 값에 대한 신뢰도를 비교하기 위하여 파단면관찰로부터 측정된  $K_B$ 를 비교의 기준으로 사용하였다. 본 연구에서와 같이 파단면이 불규칙한 복합재료 시편에서 정확한  $K_B$ 값을 구하기 어렵다는 염려가 있었으나 Fig. 4에 나타난 바와 같이  $\sigma_b - K_B$ 관계가 거의 원점을 지나는 일차 함수관계를 이루고 있으며 Fig. 1에서 보듯이  $K_B$ 값의 변화가 전반적인  $K_{IC}$ 변화와 유사하다는 점으로 미루어 보아 본 연구에서 측정된  $K_B$ 값이 Swain과 Claussen<sup>14)</sup>이 사용한 의미를 잘 유지하고 있다고 생각된다.

SENB법은 흠결반지름의 크기, 흠집 가공방법, 시편의 미세조직 등 많은 인자로부터 영향받는다라는 단점이 있으며 Fig. 4에 나타난 바와 같이 비교적 낮은 신뢰도를 보이고 있고 Fig. 1에서도 전반적인  $K_{IC}$ 변화경향으로부터 가장 동떨어진 경향을 나타내고 있다.

IC법에 의한 세가지 방법 중에서 대표식이라 할 수 있는 것은 IC법에 대한 이론을 확립한 Lawn과 동료<sup>10)</sup>의 식 (2)이다. IC법의 세식 중에서 식 (2)가 MZ법

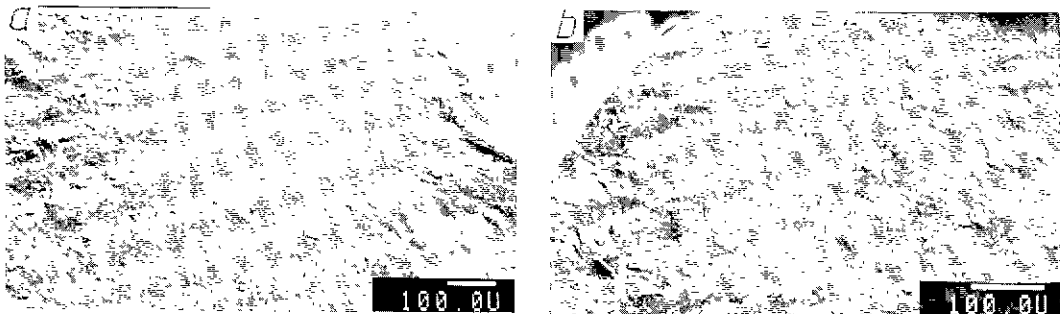


Fig. 5. Fracture surfaces of composites : a) cordierite-10% SiC whisker and b) cordierite-30% SiC whisker

의  $K_B$ 와 가장 유사한 변화경향을 보이고 있으나, 본 연구에 사용된 여러 방법 중에서 가장 낮은  $K_{IC}$  값을 나타내고 있다. IC법은 또한 복잡한 미세조직을 가지며 특히 기공률이 높은 경우 예리한 균열의 길이를 정확하게 측정하기 어렵다는 단점이 있다.

IS법에 의한  $K_{IC}$  값은 Fig. 3의  $\sigma_1 - P_i$  관계에서 양호한 신뢰성을 보이고 있고 Fig. 1에서 보듯이  $K_B$  및 IC법 식 (2)의  $K_{IC}$ 와 매우 유사한 경향을 보이며 전체적으로도 측정치가 밀집된 지역에 위치하고 있다. IS법은 또한 판별하기 어려운 균열의 길이를 측정할 필요가 없고 미세조직에 제약을 받지 않으며 측정방법이 간편하다는 장점을 갖고 있다.  $Al_2O_3 - ZrO_2$  시편에서도 IS법이 SENB법보다 신뢰성이 높다고 보고 되었다.<sup>14)</sup> 이와 같은 점으로 볼 때 본 연구의 코디어라이트-SiC 위스커 복합재료의  $K_{IC}$  값으로써 IS법으로 구한 값이 다른 방법으로 구한 값보다 신뢰성이 높다고 생각된다.

#### IV. 결 론

코디어라이트-SiC 위스커 복합재료의  $K_{IC}$ 를 IC, IS 및 SENB 법으로 측정하여 그 신뢰성을 검토한 결과, IS법이 가장 양호한 신뢰성을 보였다. 또한, 비록 파단면이 불규칙하였음에도 불구하고 MZ법으로 구한  $K_B$ 가 여러 방법으로 측정된  $K_{IC}$  값들의 신뢰성 평가에 대한 비교의 기준이 될 수 있었다.

#### “후기”

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

#### REFERENCES

1. J. J. Petrovic and R.B. Roof, "Fracture Toughness of a Beta-SiC Whisker", *J. Am. Ceram. Soc.*, **67** (10) C-219 (1984).
2. 강대갑, 권오중, Weisskopf, "Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> - SiC 위스커 복합재료의 기계적 특성", *요업학회지*, **29** (3) 62-66 (1986).
3. G. C. Wei and P.F. Becher, "Development of SiC - Whisker - Reinforced Ceramics", *Am. Ceram. Soc. Bull.*, **64** (2) 298 (1985).
4. P.F. Becher and G.C. Wei, "Toughening Behavior in SiC - Whisker - Reinforced Alumina", *J. Am. Ceram. Soc.*, **67** (12) C-267 (1984).
5. 강대갑, Weisskopf, "코디어라이트 - SiC 위스커 복합재료의 기계적 성질과 강화기구", *요업학회지*, **23** (6) 59-65 (1986).
6. K. Ueno and S. Sodeoka, "Fracture Toughness of SiC Whisker Reinforced Si<sub>3</sub>N<sub>4</sub> Ceramics", *J. Ceram. Soc. Jpn.*, (94) 981 (1986).
7. S. W. Freiman, "A Critical Evaluation of Fracture Mechanics Techniques for Brittle Materials", "Fracture Mechanics of Ceramics", vol. 6, 27-45, ed. R. C. Bradt et al., Plenum Press, New York - London (1983).
8. A. G. Evans and E. A. Charles, "Fracture Toughness Determinations by Indentation", *J. Am. Ceram. Soc.*, **59** (7-8), 371 (1976).
9. D. B. Marshall and A. G. Evans, "Reply to 'Comment on Elastic/Plastic Indentation Damage in Ceramics: the Median/Radial Crack System'", *J. Am. Ceram. Soc.*, **64** (12) C-182 (1981).
10. B. R. Lawn, A. G. Evans and D. B. Marshall, "Elastic/Plastic Indentation Damage in Ceramics: the Median/Radial Crack System", *J. Am. Ceram. Soc.*, **63** (9-10), 574 (1981).
11. G. R. Anstis, P. Chantikul, B. R. Lawn and D. B. Marshall, "A Critical Evaluation of Indentation Techniques for Measuring Fracture Toughness: I, Direct Crack Measurements", *J. Am. Ceram. Soc.*, **64** (9), 533 (1981).
12. P. Chantikul, G. R. Anstis, 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).
13. B. Gross and J. E. Srawley, "Stress - Intensity Factors for Single - Edge Notch Specimens in Bending and Tension by Boundary Collocation of a Stress Function", Technical Note D-2603, NASA, Jan. (1965).
14. M. V Swain and N. Claussen, "Comparison

- of  $K_{IC}$  Values for  $Al_2O_3$ - $ZrO_2$  composites Obtained from Notched - Beam and Indentation Strength Techniques”, *J. Am. Ceram. Soc.*, **66** (2), C-27 (1983).
15. R. F. Pabst, “Determination of  $K_{IC}$ -Factors with Diamond-Saw-Cuts in Ceramic Materials”, “Fracture Mechanics of Ceramics,” vol. 2, 555, ed. R. C. Bradt et al., Plenum Press, New York-London (1974).
16. K. Y. Chia, S. G. Seshadri and M. Srinivasan, “Notching Techniques Used in SENB Fracture Toughness Testing”, *Ceram. Eng. Sci. Proc.*, **7** (7-8) 795 (1986).
17. B. Mussler, M. V. Swain and N. Claussen, “Dependence of Fracture Toughness of Alumina on Grain Size and Test Technique”, *J. Am. Ceram. Soc.*, **65** (11) 566 (1982).
18. A. W. Paterson and R. Stevens, “Comparison of Indentation and Notched Bar Toughness of TZP Ceramics: Relevance to Models of the Fracture Process”, *Int. J. High Techn. Ceramics*, (2) 221 (1986).