

## 층상 및 섬유상 $Al_2O_3$ 거시복합체의 파괴거동

신동우 · 윤대현 · 박삼식 · 김해두\*

경상대학교 재료공학부 무기복합재료연구실, 첨단소재연구소  
\*한국기계연구원 재료기술연구부 요업재료그룹  
(1997년 6월 10일 접수)

### Fracture Behavior of $Al_2O_3$ Macro-composites with Layered and Fibrous Structures

Dong-Woo Shin, Dae-Hyun Yoon, Sam-Sik Park and Hai-Doo Kim\*

Ceramic Matrix Composites Lab., AMRI, Division of Materials Science and Engineering,  
Gyeongsang National University, Kyungnam, Chinju 660-701, Korea

\*Ceramic Materials Group, KIMM, Kyungnam, Changwon 641-101, Korea

(Received June 10, 1997)

#### 요 약

두 종류의 취성재료를 사용하여 제조된 두 종류의 복합체 구조에 대하여 비취성파괴 현상을 3점 곡강도 시험을 통하여 고찰하였다. 먼저 세라믹과 유사한 취성파괴를 나타내면서도 시편 제작이 용이한 모사재료를 이용하여 층상형과 섬유상형 구조를 가지는 거시복합체를 제작하였다. 더불어 지름 ~3 mm의  $Al_2O_3$  섬유상과 두께 ~2 mm의  $Al_2O_3$  판상을 이용하여 약한 계면층을 가진 층상형 및 섬유상형 구조의 알루미늄/알루미늄 거시복합체를 제조하였다. 취성재료로 제조된 두 종류의 구조에 대하여 곡강도 및 파괴에너지를 조사하여 구조변화에 따른 기계적 물성을 비교하였다. 모사시편의 경우, 같은 크기의 단체 강도에 대한 복합체 강도의 비가 층상형은 0.6, 섬유상형은 약 0.2를 보여주었다. 층상형에 대한 섬유상형 구조의 파괴에너지의 비는 0.47를 나타내었다.  $Al_2O_3/Al_2O_3$  복합체에서도 같은 부피의 단체 곡강도에 비하여 층상형 및 섬유상형 구조의 강도비가 각각 약 0.6과 0.2였으며, 층상형 구조의 파괴에너지에 대한 섬유상형 구조의 파괴에너지의 비는 약 0.6 이었다. 위의 결과로부터 층상형의 구조가 섬유상형 구조에 비하여 높은 곡강도와 파괴에너지를 나타내는 것으로 확인되었다.

#### ABSTRACT

Non-brittle fracture behaviour of the two composite structures made of two different brittle materials was investigated using 3-point bending test. First, the layered and fibrous macro-composites were fabricated using the material easily formed, yet showing a brittle fracture behaviour similar to ceramics. The layered and fibrous  $Al_2O_3/Al_2O_3$  composites with weak interface were also fabricated using plate of 2 mm thickness and rod of 3 mm diameter respectively. Comparison of the mechanical properties between these two structures was performed in the lights of flexural strength and work of fracture for the composites consisting of  $Al_2O_3$  and simulated materials respectively. The strength ratio of layered structure to the monolith of same volume was 0.6 and the ratio of fibrous one was about 0.2 for the composites made of simulated brittle material. The ratio of the work of fracture of the fibrous to the layered was 0.47. For  $Al_2O_3/Al_2O_3$  composites, the strength ratio of layered and fibrous structures to the monolith with same volume were about 0.6 and 0.2 respectively. The ratio of work of fracture of the fibrous to the layered was 0.6. These confirmed that the layered structure was superior to the fibrous one in terms of flexural strength and work of fracture.

**Key words :** Non-brittle ceramic structure, Layered structure, Fibrous structure,  $Al_2O_3/Al_2O_3$  composites

1. 서 론

세라믹스는 일반적으로 예기치 못한 상황에서 잘 깨지는 취성파괴의 단점이 있다. 고인성 세라믹스 획득을 위해 수행되는 연구 방법에는 질화규소질 세라믹스와 같이 미세구조의 제어에 의한 방법<sup>1)</sup>과 고강도 세라믹 섬유를 보강하는 방법<sup>2)</sup>등이 연구되고 있다. 질화규소질 세라믹스의 경우 세라믹스의 특징인 취성파괴를 극복하지 못하여 파괴인성, 즉 K<sub>IC</sub>값이 10 MPa√m 이상을 넘지 못하고 있으며, 섬유 강화 복합체는 고가의 세라믹 섬유와 복잡한 공정, 기계적 물성의 비등방성 그리고 1300°C 이상에서 유기금속 전구체로부터 제조된 세라믹 섬유의 물성이 급격히 저하되는 문제점을 극복하지 못하고 있다.<sup>3-5)</sup>

비교적 용이한 공정을 통하여 파괴에너지가 높은 세라믹스를 얻기 위해서는, 기존의 취성 세라믹스를 이용하여 쉽게 구조제어가 가능한 범위에서 거시구조를 변형함으로써 높은 파괴에너지를 가지는 비취성 구조를 얻는 방법을 고려할 수 있다. 이는 섬유 강화 복합체의 파괴에너지 증진기구인 약한 계면층에 의한 균열의 진행 방향 조절을 통하여 파괴에너지의 증진을 도모하는 방법<sup>6-8)</sup>을 거시적 관점에서 응용한 것이다. 이러한 종류의 복합체는 1990년 Clegg에 의해 제안된 충상형 복합체<sup>9)</sup>와 1988년 Coblenz 등에 의해 소개된 섬유상 단체<sup>11)</sup>가 있다. Clegg는 약 200 μm 두께의 SiC 위에 graphite를 코팅하여 적절한 다음 가압성형하여 충상형 복합체를 제조하였으며, 이 경우 단체에 비하여 약 100배 이상 파괴에너지가 향상된 결과를 보여주었다.<sup>9,10)</sup> 섬유상 단체의 경우 지름 약 200~300 μm의 SiC 또는 Si<sub>3</sub>N<sub>4</sub> 장섬유에 BN 또는 Graphite 등의 약한 계면층을 코팅한 후 가압소결하여 파괴에너지가 단체에 비하여 수십 배 향상된 결과를 보여주었다.<sup>12-15)</sup> 그러나 파괴에너지 및 강도 관점에서 이러한 두 종류의 구조를 직접적으로 비교한 연구는 아직 보고되지 않고 있다.

본 연구의 목적은 간단한 제조 공정을 통하여 충상형 구조와 섬유상형 구조를 제조하고 두 구조간의 강도 및 파괴에너지를 비교함으로써, 취성재료를 이용하여 그 구조를 변환하여 보다 우수한 기계적 물성을 나타내는 비취성 복합체의 제조 가능성을 제시하고자 한다. 이러한 목적을 위하여 먼저 세라믹과 같은 취성파괴를 나타내면서도 시편제작이 용이한 모사재료를 이용하여 구조의 조절 범위를 수 밀리미터 범위로 확대해서 충상형과 섬유상형 구조를 제작한 후, 강도 및 파괴에너지를 비교 분석하였다. 또한 대표적인 세라믹스인 알루미늄을 이용하여 약한 계면층을 형성시켜 충상형 및 섬유상형 구조를 제작하여 두 종류의 구조간의 강도 및 파괴에너지

를 비교하였다. 본 연구를 통하여 비교적 쉽게 시편 제작이 가능한 모사재료를 이용한 세라믹스의 파괴 현상 연구의 가능성과, 실제 세라믹스에서의 구조 변환에 따른 강도 및 파괴에너지의 차이를 보여주고자 한다.

2. 실험방법

본 연구의 실험과정을 Fig. 1에 도시하였다. 먼저 세라믹스와 같은 취성파괴를 나타내는 모사재료를 얻기 위하여 황을 과량으로 첨가한 고무를 제조하였다. 약 69 w/o 천연고무(RSS#1)에 31 w/o 황을 섞어서 혼합한 후, 2 mm와 4 mm 두께를 가지는 두 종류의 고무판을 성형하였다. 이 고무판을 계면층 없이 적층, 가압하여 ~28 mm×20 mm×7 mm크기의 단체 고무시편을 제작하였다. 또한 두께 2 mm와 4 mm의 고무판에 각각 실리콘 고무를 코팅하여 약한 계면층을 형성한 후, 4 mm는 5층, 2 mm는 10층을 적층하여 크기가 ~28 mm×21 mm×75 mm 인 두 종류의 충상형 구조를 제작하였다. 섬유상형 구조는 두께 2 mm 고무판을 폭이 4 mm 되게 자른 후 역시 실리콘 고무로 코팅하여 약한 계면층을 형성한 후, 계면층이 서로 엇갈리게(벽돌쌓기 모양) ~31 mm×21 mm×75 mm 크기의 시편을 제작하였다. 이렇게 제작된 시편들은 130°C의 오토클레이브에서 8시간 동안 경화시켰다. 제작한 모사시편 중 2 mm판으로 10층 적층한 충상형과 섬유상형 구조는 Fig. 2에 도시하였다. 시편에 존재하는 실리콘 고무로 형성된 약한 계면

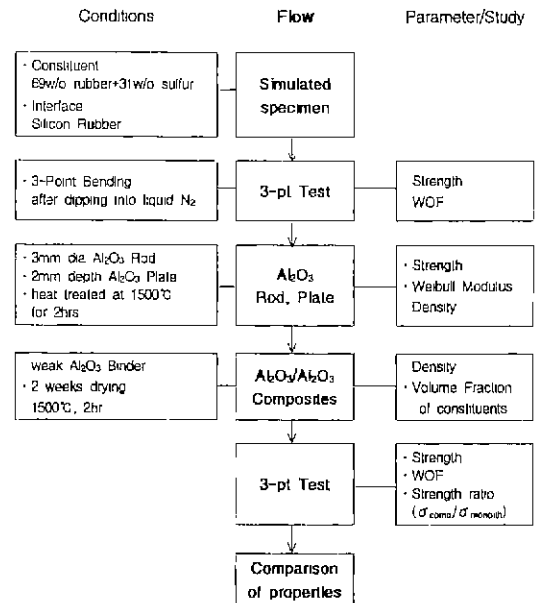


Fig. 1. Flow chart showing the experimental procedure.

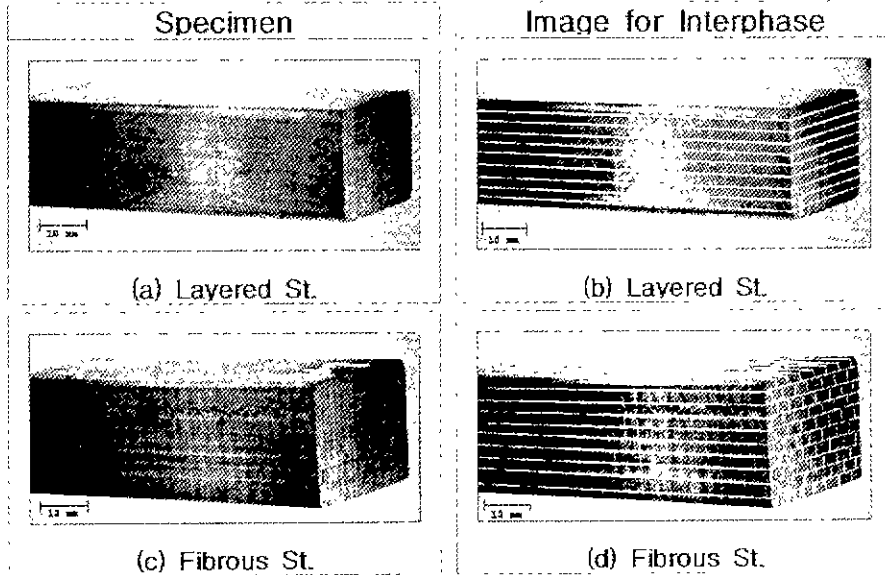


Fig. 2. Layered and fibrous specimens consisting of plate with 2 mm depth and rectangular fiber made of brittle rubber. The interface which was not distinguishable well in pictures as shown (a) and (c) was emphasized in (b) and (d) respectively using a graphic technique.

층이 실제 사진에서는 구별되지 않은 이유로 컴퓨터 이미지에서 실제 계면층을 따라 흰선으로 표시하였다.

모사재료로 제작된 복합체 구조간의 기계적 물성을 평가하기 위하여 3점 곡강도 시험을 행하였다. Fig. 3은 모사 단체 시편의 3점 곡강도 측정시 시험조건에 따른 파괴양상 그래프이다. 상온에서 0.5 mm/min의 크로스헤드 속도의 조건으로 시험한 경우 고무의 특성인 연성을 나타내었다. 그러나 액체 질소(-196°C)에 30분 담근 직후, 크로스헤드 속도 2 mm/min로 시험하였을 때 Fig. 3(b)에서 보여주듯 세라믹스와 같은 취성파괴 거동을 나타내었다. 모든 모사시편의 시험은 취성파괴를 나타내는 후자의 조건으로 행하였다. 각 시편들을 SiC 연마지로 표면 및 모서리를 연마하여 액체 질소에 담근 직후 지지점간 거리 50 mm의 조건에서 크로스헤드 속도 2 mm/min로 변위에 따른 하중의 데이터를 구하여 곡강도 및 파괴에너지를 계산하였다. 파괴에너지는 하중과 변위 곡선에서 첫 번째 하중 감소가 나타나는 점을 균열이 생성되는 응력이라 가정하여 그 점으로부터 면적을 구한 후 시편의 파괴 단면적의 2배 값으로 나누어 값을 얻었다.

$Al_2O_3/Al_2O_3$ 의 복합체의 경우 먼저 압출법으로 지름이 3 mm인 원주와 두께가 5 mm, 폭이 30 mm인  $Al_2O_3$  성형체를 제조하였다. 성형체를 350 MPa의 압력으로 정수압성형(Cold Isostatic Pressing)하고 SiC 연마지로 연마하여 약 2 mm 두께의 판상으로 만든 후 1500°C에

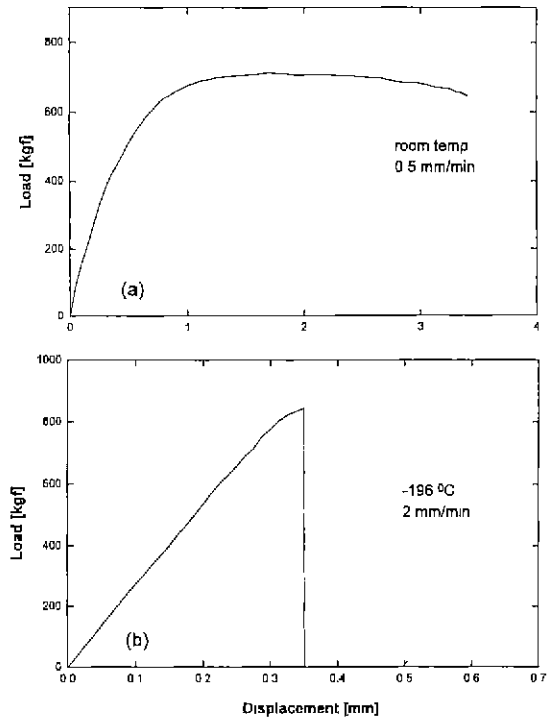


Fig. 3. Load-displacement behaviors for the simulated monolithic specimens in 3-point bending. Test conditions were (a) room temperature and cross head speed of 0.5 mm/min (b) after dipping into liquid  $N_2$  of -196°C and cross head speed of 2 mm/min.

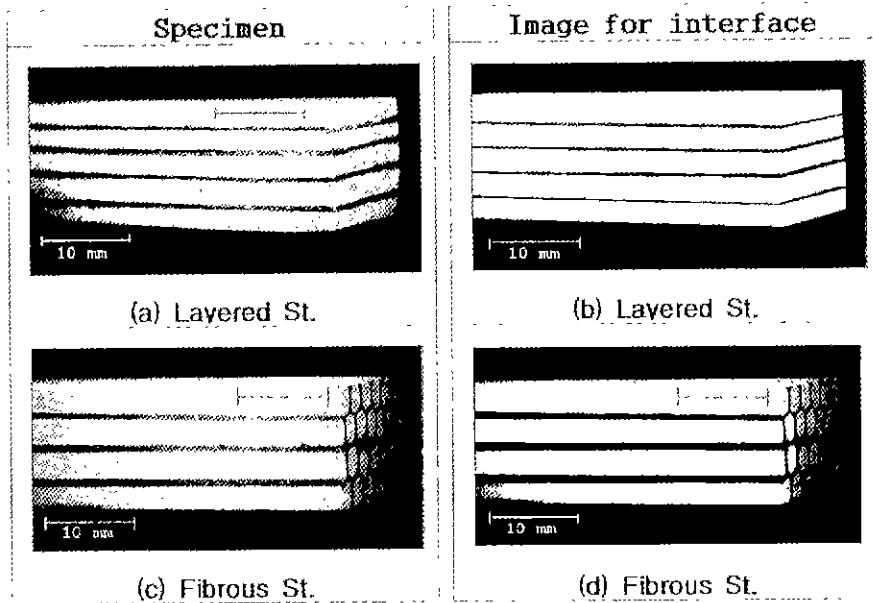


Fig. 4. Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>/Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> composites consisting of (a) Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> plate of 2 mm thickness and (c) Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> rod of 3 mm diameter. The interface of composite was emphasized in the images shown in (b) and (d) respectively.

서 2시간 열처리하였다. 열처리한 Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 판 및 원주의 밀도 및 기공율을 측정하였다. 원주 50개 및 판 40개를 지지점간거리 35 mm, 크로스헤드 속도 0.5 mm/min의 조건으로 3점 곡강도를 측정하여 구성요소의 Weibull 계수를 구하였다.

제조된 알루미늄 원주 및 판을 알루미늄 주성분인 결합제(상품명 : cerabon)로 결합강도 약 15 MPa의 약한 계면층을 형성하여 섬유상형과 층상형 구조를 제작하였다. 시편을 상온 → 40°C → 80°C → 110°C 순으로 10일간 건조한 후 1500°C에서 2시간 열처리하였다. 섬유상형 구조는 ~19 mm × 13 mm × 45 mm, 층상형 구조는 ~12 mm × 9 mm × 50 mm 의 크기로 절단하고 표면 및 모서리를 연마하였다. Fig. 4는 본 실험에서 사용된 알루미늄/알루미나 거시복합체를 보여주고 있다. 복합체의 구조를 Image Analyzer를 사용하여 각 구조에 있어서 원주 및 판이 차지하는 분율을 계산하였다. 3점 곡강도 시험은 지지점간 거리 35 mm, 0.1 mm/min의 크로스헤드 속도로 만능시험기를 이용하여 각각 6개씩 행하였다.

### 3. 결과 및 고찰

#### 3.1. 모사시편의 곡강도 및 파괴에너지

각 구조별로 6개의 시편을 시험하여 최소값과 최대값을 제외한 4개의 곡강도 평균값은 단체는 55 MPa, 2

mm판을 10층 적층한 층상형은 34 MPa, 4 mm판을 5층 적층한 층상형은 40 MPa, 섬유상형은 10 MPa이었다. 파괴에너지는 2 mm판을 10층 적층한 층상형이 1290 ± 240 J/m<sup>2</sup>, 4 mm판 5층 적층한 층상형이 1010 ± 210 J/m<sup>2</sup>이었으며 섬유상형이 600 ± 130 J/m<sup>2</sup>이었다.

3점 곡강도 측정 시 균열 성장 거동과 파괴 거동 사진을 Fig. 5에 나타내었다. 층상형의 경우 약한 계면층을 따라 균열이 성장하는 과정을 잘 보여주고 있으며 섬유상형의 경우 섬유상이 pull-out된 파괴 표면을 보여준다.

모사시편의 3점 곡강도 측정으로부터 얻은 강도 및 변위 곡선은 Fig. 6 과 7에 도시하였다. y축을 단체에 대한 복합체의 강도비 ( $\sigma/\sigma_*$ ), x축을 크로스헤드의 변위로 하여 나타내었다. 판의 두께와 층수가 다른 두 종류의 층상형 구조에 대하여, 2 mm판으로 10층 적층한 구조가 4 mm판으로 5층 적층한 구조보다 최대강도는 낮지만 최대 응력 이후에 층으로 파괴되는 양상을 보이면서 높은 파괴에너지를 나타낸다 이는 같은 부피내에서 계면이 차지하는 분율은 복합체를 구성하는 plate의 두께가 얇을수록 증가한다는 사실로부터 설명 가능하다. 층상형의 구조에 있어서는 계면의 부피분율이 작으면 작을수록 단체에 가까운 파괴 양상을 보이게 된다.<sup>10)</sup> 2 mm판으로 10층 적층된 경우가 4 mm판으로 5층 적층된 구조에 비하여 상대적으로 적층된 층수가 많음에 따라 약한 계면의 분율이 크다. 따라서 2 mm판을 10층 적층한 층상형은 최대강도는 낮지만 파괴에너지는 높게

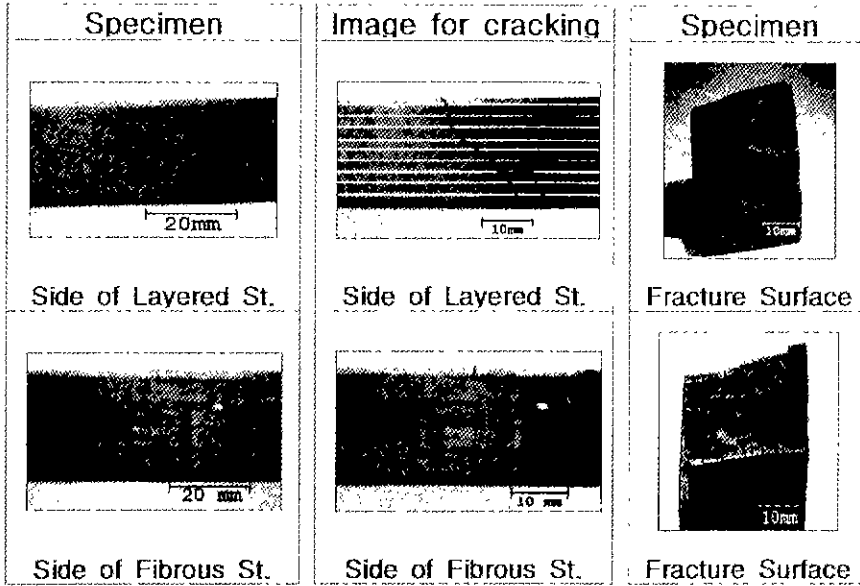


Fig. 5. Cracking pattern and fracture surface of the simulated specimens after 3-point bending test.

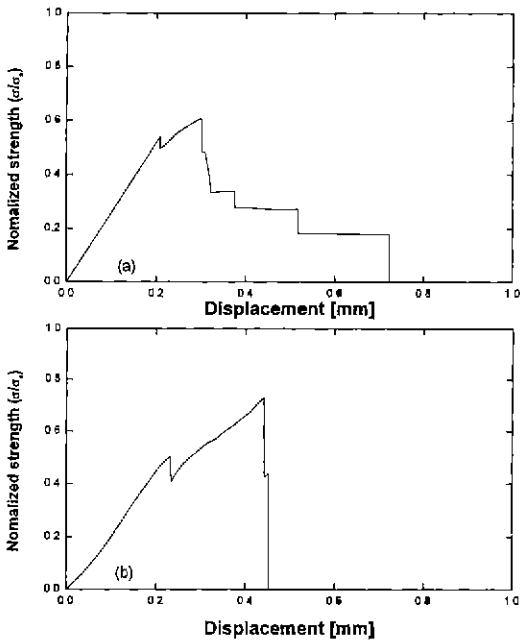


Fig. 6. Normalized stress-displacement curves for the layered specimens consisting of simulated brittle material. (a) 10 layered structure with the plate of 2 mm thickness, (b) 5 layered structure with the plate of 4 mm thickness.

나타나게 된다. 5층 적층된 층상형의 경우 최대하중 이후, 더 이상의 에너지 흡수 없이 거의 취성파괴 양상을

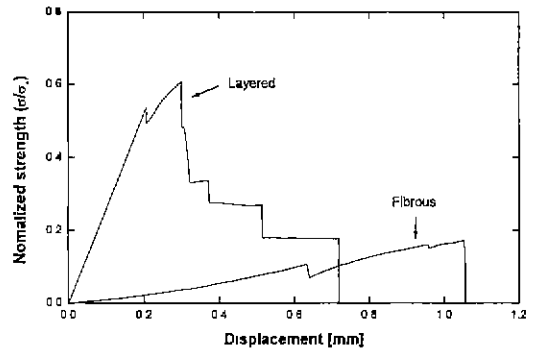


Fig. 7. Comparison of normalized stress-displacement curve of fibrous composites with that of layered simulated specimens tested in three-point bending.

보인다. 이는 깨지지 않은 층들이 축적된 하중을 견디지 못할 때 한꺼번에 파괴가 일어나기 때문이다. 그러나 Fig. 6(a)의 경우도 복합체를 구성하고 있는 층의 수 (10층) 만큼 10분의 하중감소는 나타나지 않았다. 두 종류의 층상형 모두 최대 강도에 이르기 전에 응력꺾임이 발생하였는데 이는 최대 인장응력면에 있는 크랙에서 기인한다<sup>16)</sup>고 볼 수 있다. Fig. 7에서 층상형 구조는 단체 곡강도의 0.5 부근에서 파괴가 일어나기 시작하여 최대강도 이후에도 계속 한층 한층 파괴되는 양상을 보이고 있으며, 섬유상형 구조는 단체 곡강도의 0.1에서 파괴가 일어나기 시작하여 최대강도에서 완전파괴가 일어

**Table 1.** Comparison of the Mechanical Properties of Simulated Specimens.

Structure	Strength(MPa)	Strength ratio to monolith( $\sigma/\sigma_*$ )	WOF(J/m <sup>2</sup> )	WOF ratio to layered st.
Monolith	55±6	100%	-	-
Fibrous	10±1	18%	600±130	~47% (60%)
Layered	34±1 (40±3)	~60% (~73%)	1290±240 (1010±210)	100% (100%)

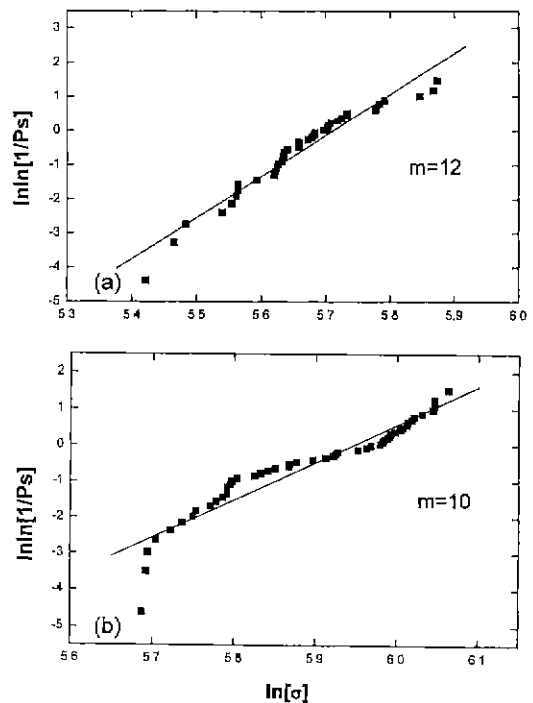
The value in parenthesis were obtained from the 5 layered structure with 4 mm thick plate.

났음을 알 수 있다. Table 1은 3점 곡강도 측정 데이터로부터 얻어진 모사시편의 구조에 따른 기계적 물성을 비교, 분석한 표이다. 층상형 및 섬유상형 구조의 강도가 같은 크기의 단체의 강도에 대하여 60%, 18% 이었으며 파괴에너지는 섬유상형 구조가 층상형 구조의 약 47%였다. 파괴에너지의 계산에 있어서 첫 번째 하중감소 이후에 파괴에 필요한 일을 계산하여야 하므로 단체의 경우는 고려하지 않았다.

**3.2. Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>/Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 복합체의 곡강도 및 파괴에너지**

Table 2에 복합체 구성 요소인 원주, 판, 결합체 및 각 거시복합체의 물성을 나타내었다. 각 복합체에 있어서 원주 및 판이 차지하는 비율은 Image Analyzer를 이용하여 측정된 결과 각각 0.66 과 0.74였다. 계면결합력을 측정하기 위하여 알루미늄 사각시편을 반으로 절단한 후 결합체로 결합하여 3점 곡강도를 측정하는 간접적인 방법을 이용하였으며 그 결과 약 15 MPa이었다. 알루미늄 결합체를 사용하여 상온에서 결합, 건조 한 후의 결합력, 상온 결합 후, 1500°C에서 2시간 열처리 한 후의 결합력은 같은 값(15 MPa)을 나타내었다. 층상 및 섬유상형 복합체의 구성 요소인 원주 및 판의 Weibull 계수를 계산하기 위하여 지름 3 mm 원주 및 두께 2 mm 판을 3점 곡강도 시험 후 y축을 lnln(1/Ps), x축을 lnσ로 하여 얻은 그래프를 Fig. 8에 나타내었다. 여기서 Ps는 주어진 응력하에서의 생존확률, σ는 3점 곡강도를 의미한다. 파괴가 인장 응력이 걸리는 시편의 인장표면에 있는 균열로부터 일어나는 것이 아니고 곡강도 시험 내의 인장응력을 받는 전 부피에 퍼져있는 균열에 의해

일어난다고 가정하고 최소자승법에 의해 Weibull 계수를 구하였다.<sup>17)</sup> Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 원주의 Weibull 계수 m = 10.44 ± 0.39, Weibull strength σ<sub>0</sub> = 381 MPa 이었으며, Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>



**Fig. 8.** Weibull plot and weibull function for (a) Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> plate with 2 mm thickness (b) Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> rod with 3 mm dia. The strength values were determined in 3-point bending test.

**Table 2.** Properties of the Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>/Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> Composites and the Constituent Materials

Type	Density	Porosity(%)	Weibull modulus	Volume fraction	Bonding strength (MPa)
Rod	Monolith	3.466	0.13	10	-
	Fibrous	3.117	9.45	-	0.66
Plate	Monolith	3.442	0.38	12	-
	Layered	3.313	4.14	-	0.74
Interphase(cerabon)	2.811	4.73	-	-	15

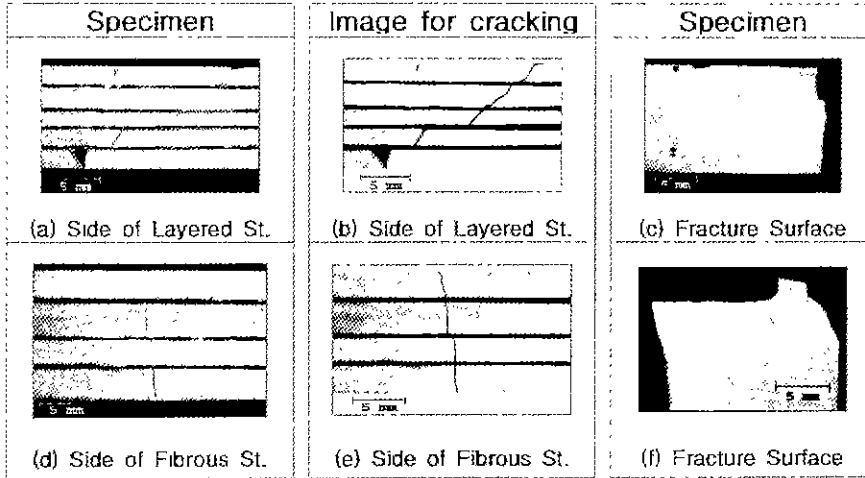


Fig. 9. Cracking pattern of layered and fibrous  $\text{Al}_2\text{O}_3$  composites after 3-point bending test.

판은  $m = 12.04 \pm 0.29$ ,  $\sigma_0 = 302 \text{ MPa}$  이었다.

Fig. 9는 3점 곡강도 측정 후 파괴된 알루미늄/알루미늄 복합체의 균열전파(a와 d) 및 파괴표면(c와 f)을 보여준다. 모사시편과 마찬가지로 층상형 구조에서 균열이 약한 계면층을 따라 전파된 모습을 볼 수 있으며 섬유상형 구조의 파괴 표면에서는  $\text{Al}_2\text{O}_3$  rod가 pull-out된 것을 확인할 수 있다(f). 복합체 구성 요소인 섬유상(원주)  $\text{Al}_2\text{O}_3$ 의 평균 강도는 360 MPa이고 Weibull 계수는 10이었으며, 층상을 구성하는  $\text{Al}_2\text{O}_3$  판의 평균 강도는 290 MPa이고 Weibull 계수는 12였다. 이러한 구성요소의 물성과 계면 결합력이 15 MPa 일 때 두 복합체 모두 약한 계면층을 따라 균열이 전파됨을 알 수 있다. 하중과 변위 데이터로부터 얻은 복합체의 강도는 층상형이  $137 \pm 11 \text{ MPa}$ , 섬유상형이  $\sim 52 \pm 8 \text{ MPa}$ 이었으며 파괴에너지는 층상형이  $1840 \pm 330 \text{ J/m}^2$ , 섬유상형이  $1140 \pm 290 \text{ J/m}^2$ 이었다. Fig. 10은 복합체의 강도를 같은 부피의 단체의 강도에 대한 비로 나타낸 그래프이다. 이 때 같은 부피의 단체의 강도는 Fig. 8에서 구한 Weibull 계수를 이용하여 강도는 응력을 받는 부피가 증가함에 따라 감소한다는 사실로부터 계산하였으며<sup>16)</sup> 그 결과 원주 및 판의 단체강도는 각각 258 MPa과 236 MPa이었다. 층상형과 섬유상형을 갖는 모사시편의 응력-변위 곡선(Fig. 7)과 같은 형태의 구조를 갖는  $\text{Al}_2\text{O}_3$  복합체의 응력-변위 곡선(Fig. 10)을 비교해보면, 두 재료 모두 층상형 구조가 섬유상형 구조에 비하여 높은 파괴에너지 및 최대 강도를 나타낼 수 있다. Table 3은 알루미늄/알루미늄 복합체의 기계적 물성 측정 결과를 비교한 표인데 강도에 있어서 층상형 및 섬유상형 구조가 각각 단체에 비해 58%, 20%로 감소하였으며 파괴에너지는 섬유상형 구조가 층상형의 62% 정도

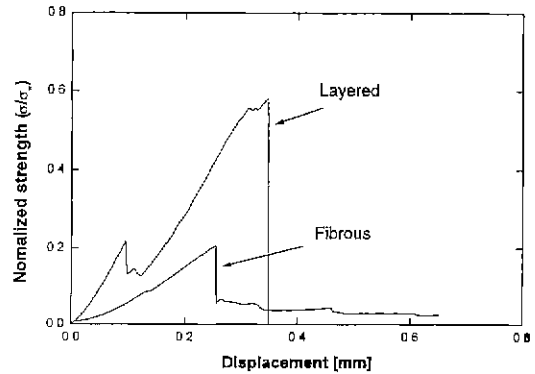


Fig. 10. Comparison of the normalized stress-displacement curve of layered  $\text{Al}_2\text{O}_3$  composite with fibrous  $\text{Al}_2\text{O}_3$  composite in 3-point bending test.

를 나타내었다.

같은 부피의 단체  $\text{Al}_2\text{O}_3$ 의 곡강도에 비하여 섬유상형  $\text{Al}_2\text{O}_3$  복합체의 강도비(20%)가 층상형의 강도비(60%)보다 낮은 이유는 크게 다음의 세 가지 이유에 기인한다. 첫째는 층상형과 섬유상형간의 구조의 차이에 의한 균열 전파 경로의 차이이다. 층상형의 경우 약한 결합력(15 MPa)을 갖는 계면층과 강한  $\text{Al}_2\text{O}_3$ 층이 번갈아 배열되어 있으므로 계면층은 불연속적으로 존재하게 된다. 따라서 일단 생성된 균열은 약한 계면을 따라 성장하다가 강한  $\text{Al}_2\text{O}_3$ 층에 의해서 균열 성장이 억제되는 과정을 반복하게 되어 파괴에너지가 향상될 뿐 아니라  $\text{Al}_2\text{O}_3$ 층이 강도 증진에 기여한다. 그러나 섬유상형의 경우는 약한 계면이 시편 전체에 연속적으로 존재하므로 일단 생성된 균열은 강한  $\text{Al}_2\text{O}_3$  섬유상의 주위를 따라 빠르게

**Table 3.** Comparison of the Mechanical Properties between the Fibrous and the Layered Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>/Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> Composites.

Structure		Strength(MPa)	Strength ratio to monolith	WOF (J/m <sup>2</sup> )	WOF ratio to layered st.
Rod	Monolith	258	100%	-	-
	Fibrous	52±8	~20%	1140±290	62%
Plate	Monolith	236	100%	-	-
	Layered	137±11	~58%	1840±330	100%

취성파괴가 일어나므로 낮은 파괴에너지 및 강도를 나타내게 된다. Fig. 7과 10은 층상형의 비취성 파괴 거동과 섬유상형 취성 파괴 거동을 잘 보여주고 있다. 둘째는 약한 계면층이 차지하는 분율이 클수록 시편의 강도는 저하된다. 층상형 시편의 경우 Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> plate 분율이 74% 기공율이 4.14%로서 계면층의 분율이 약 22%이다. 섬유상형은 Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> rod의 분율이 66%, 기공율이 9.45%이므로 계면층의 분율은 약 24.5%이다. 섬유상 시편의 계면층이 차지하는 분율이 층상형에 비하여 약 2.5% 더 크나 그 차이가 작으므로 계면층의 분율 차이가 기계적 물성에 미치는 직접적인 영향은 크지 않으리라 예상된다. 셋째는 제조 과정 중 유입된 기공에 의한 강도 감소이다. 기공율이 클수록 큰 기공이 존재할 확률이 높아지며, 기공 영역을 제외한 소결체의 단위 면적당 걸리는 응력의 크기는 커진다. 본 연구에서 사용된 시편은 가압 소결에 의해서 제조된 것이 아니라, 상온에서 Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>를 주성분으로 하는 결합체를 사용하여 Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> plate와 Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> rod를 결합시킨 후 장시간 건조 열처리하여 제조되었다. 이런 과정 중 계면 결합층이 수축하여 Table 3에서 보여주듯 비교적 많은 기공이 생성되었다. 층상형 시편은 평균 4%의 기공율을 나타내었고 섬유상형은 약 9.5%의 기공율을 보여주었다. 이러한 높은 기공율은 섬유상 복합체의 낮은 강도비에 직접적인 영향을 주게 된다. 기공율이 크면 탄성계수는 급격히 감소하게 되고, 큰 기공의 존재 확률이 높아서 섬유상형 복합체의 강도는 저하된다. Fig. 10의 응력-변위 곡선에서 섬유상형 시편의 경우 초기 직선의 기울기가 층상형에 비해 낮은 것은 섬유상형의 Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> rod의 낮은 분율 및 높은 기공율에 기인한다.

섬유상형과 층상형의 강도비의 차이는 크게 구조의 차이에 의한 계면층의 존재 형태와 제조 공정 과정에서 유입된 기공율의 차이의 관점에서 설명가능하다. 모사 시편의 경우 단체 강도에 대한 섬유상형 시편의 강도비는 약 20%, 층상형의 같은 부피의 단체에 대한 강도비는 약 70%로서, 비교되는 Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 시편의 값인 20%와 60%에 거의 일치하고 있다. 취성 고무를 사용한 모사시편 제조시에는 가압 단계를 거치므로 층상형과 섬유상

형 모두 기공이 거의 존재하지 않는다. 즉 기공의 영향을 무시하였을 때 구조에 따른 계면의 존재 형태의 차이에 의한 강도비가 Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 시편의 강도비와 거의 일치하는 결과를 나타내고 있다는 사실로 미루어, 섬유상형 Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 복합체의 낮은 강도는 구조의 차이에 기인하는 균열의 전파 경로의 차이인 첫 번째 원인에 의해서 보다 적절히 설명되어질 수 있다.

같은 구조를 가지는 복합체에 있어서 계면의 분율에 따라 강도와 파괴에너지는 반대의 경향을 가지게 된다. 약한 계면의 분율이 작을수록 최대 강도는 증가하나, 균열의 성장이 제한되어 취성 파괴의 정도가 크며, 계면의 분율이 높을수록 최대 강도는 감소하나 계면을 따라서 균열이 성장하여 파괴에너지가 증가한다. 그러나 Fig. 7과 10에서 보여주듯 계면의 분율이 적은 층상형이 강도나 파괴에너지에 있어서 더 높은 값을 나타내고 있다. 이는 다른 구조를 가지는 복합체의 물성 비교에 있어서는 계면의 분율도 중요하지만, 그 보다는 계면 형태 즉 균열 전파의 경로가 파괴에너지에 더 많은 영향을 미치고 있음을 알 수 있다. 층상형의 경우 한 층이 파괴된 후 균열이 계면을 따라 성장하다가 다음 층의 가장 약한 부분에서 균열이 성장하므로, 한 층을 파괴시킨 후 다시 새로운 계면을 따라 균열이 성장하는 과정을 되풀이한다. 따라서 한 번 파괴가 시작되면 연결된 약한 계면을 따라 막힘없이 쉽게 성장할 수 있는 섬유상형보다 균열의 성장을 위해 더 많은 에너지가 요구되어 층상형이 섬유상형보다 약한 계면의 분율이 작으면서도 강도 및 파괴에너지가 높게 된다.

#### 4. 결 론

세라믹과 같은 취성파괴 거동을 하는 모사재료를 이용하여 층상형과 섬유상형 복합체를 제조하여 구조 변화에 따른 곡강도 및 파괴에너지 차이를 시험한 후, Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>를 성분으로 한 층상형 및 섬유상형 거시복합체를 제작하여 기계적 물성을 비교한 결과 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다.

1. 모사 시편의 경우 층상형 구조의 곡강도는 섬유상



형 구조의 곡강도의 약 3배였으며, 파괴에너지는 층상형이 섬유상형 구조보다 2배 정도 높았다.

2.  $Al_2O_3/Al_2O_3$  시편 역시 층상형 구조의 곡강도가 섬유상형 구조의 곡강도의 약 3배였으며, 파괴에너지는 층상형이 섬유상형 구조에 비해 2배 정도 높았다.

3. 취성파괴를 하는 재료로 구성된 층상형 구조가 섬유상형 구조에 비해 강도 및 파괴에너지가 우수하였다.

4. 모사시편과  $Al_2O_3/Al_2O_3$  복합체 시편에서 구조 변화에 따른 곡강도와 파괴에너지의 변화 경향은 같은 양상을 보여주었다. 이는 취성파괴를 하는 세라믹스의 비취성 구조를 연구할 때, 제작이 용이한 취성파괴 고무시편을 사용하여 구조 변화에 따른 기계적 물성 변화를 예측할 수 있음을 보여준다.

### 감사의 글

본 연구는 교육부 학술진흥재단 '96 신진교수 연구비(과제명: 새로운 비취성 복합세라믹 구조의 개발)의 지원에 의하여 수행되었으며, 이에 감사드립니다. 아울러 본 연구의 수행을 위하여 많은 도움을 주신 (주) 동서조 철구 박사님, 정화특수고무 흥철석 이사님께 감사드립니다.

### REFERENCES

1. A. Giachello, P. Martinengo, G. Tommasini and P. Popper, "Sintering and Properties of Silicon Nitride Containing  $Y_2O_3$  and  $MgO$ ," *Am. Ceram. Soc. Bull.*, **59**(12), 1212-1215 (1980)
2. E. Fitzer and R. Gadow, "Fiber-Reinforced Silicon Carbide," *Am. Ceram. Soc. Bull.*, **65**(2), 326-35 (1986).
3. T. Mah, N.L. Hecht, D.E. McCullum and J.R. Hoenigman, "Thermal Stability of SiC Fibres (Nicalon)." *J. Mat. Sci.*, **19**, 1191-1201 (1984).
4. G. Simon and A.R. Bunsell, "Creep Behaviour and Structural Characterization at High Temperature of Nicalon SiC Fibre," *J. Mat. Sci.*, **19**, 3658-3670 (1984).
5. T. Yamamura, Y. Waku, T. Ishikawa and T. Yamamoto, "Compatibility of New Continuous Si-Ti-C-O Fibre for Composites." pp. 19-28 in Looking Ahead for Materials and Processes, Ed. by I. de Boossu, G. Briens and P. Lissac, Elsev. Sci. Pub. B.V. Amsterdam, 1987.
6. R. J. Kerans, R. S. Hay and N. J. Pagano, "The Role of the-Fiber-Matrix Interface in Ceramic Composites," *Ceramic Bulletin*, Vol. 68, No. 2 (1989).
7. M. D. Thouless, O. Sbaizero, L. S. Sigl, and A. G. Evans, "Effect of Interface Mechanical Properties on Pullout in a SiC-Fiber-Reinforced Lithium Aluminum Silicate Glass-Ceramic," *J. Am. Ceram. Soc.*, **72**(4), 525-32 (1989).
8. M. P. Harmer, H. M. Chan, and G. A. Miller, "Unique Opportunities for Microstructural Engineering with Duplex and Laminar Ceramic Composites," *J. Am. Ceram. Soc.*, **75**(7), 1715-28 (1992).
9. W. J. Clegg, K. Kendall, N. M. Alford, T. W. Button and J. D. Brichall, "A Simple Way to Make Tough Ceramics," *Nature*, Vol. 347, 455-457 (1990).
10. W. J. Clegg, "The Fabrication and Failure of Laminar Ceramic Composites," *Acta. metall. mater.* Vol 40, No. 11, 3085-3093 (1992).
11. W. S. Coblenz, "Fibrous Monolithic Ceramic and Method for Production," U. S. Pat. No. 4772524 (1988).
12. S. Baskaran, S. D. Nunn, D. Popovic and John W. Halloran, "Fibrous Monolithic Ceramics · I, Fabrication, Microstructure, and Indentation Behavior," *J. Am. Ceram. Sci.*, **76**(9), 2209-16 (1993).
13. S. Baskaran and J. W. Halloran, "Fibrous Monolithic Ceramics : II, Flexural Strength and Fracture Behavior of the Silicon Carbide/Graphite System," *J. Am. Ceram. Soc.*, **76**(9), 2217-24 (1993).
14. S. Baskaran and J. W. Halloran, "Fibrous Monolithic Ceramics : III, Mechanical Properties and Oxidation Behavior of the Silicon Carbide/Boron Nitride System," *J. Am. Ceram. Soc.*, **77**(5), 1249-55 (1994).
15. G. Hilmas, A. Brady, U. Abdali, G. Zywicki and J. Halloran, "Fibrous Monoliths: Non-brittle Fracture from Powder-processed Ceramics," *Mater. Sci. and Eng.*, **A195**, 263-268 (1995).
16. C. A. Folsom, F. W. Zok and F. F. Lange, "Flexural Properties of Brittle Multilayer Materials : II, Experiments," *J. Am. Ceram. Soc.*, **77**(8), 2081-87 (1994).
17. J. B. Wachtman, "Statistical Treatment of Strength," pp 89-115, Mechanical Properties of Ceramics, Ed. by John Wiley & Sons, A Wiley Interscience Publication, London, 1996.
18. A. S. Jayatilaka, "Volume Effect," pp 130-131 in Effects of Volume and Loading System, Fracture of Engineering Brittle Materials, Applied Science Publishers Ltd, London. 1979.