

論文

PMC / Al₂O₃ / PMC 판상복합재료의 3점 굽힘 변형에 의한 파괴 거동

홍순형* · 김희영* · 이재락**

Fracture Behavior by Three Point Bending of
PMC / Al₂O₃ / PMC Laminated Composites

S.H. Hong*, H.Y. Kim* and J.R. Lee**

ABSTRACT

The three point bending behavior of a monolithic Al₂O₃ and PMC / Al₂O₃ / PMC laminated composites has been investigated. The PMC / Al₂O₃ / PMC laminated composites were fabricated by bonding two plane woven fiber reinforced polymer matrix composite(PMC) layers with 1.2mm thickness on both surfaces of an Al₂O₃ plate with 3.8mm thickness. Four types of PMC / Al₂O₃ / PMC laminated composites were fabricated using four different kinds of PMCs, i.e., Carbon(0/90)₄, Carbon(+45/-45)₄, Aramid(0/90)₄ and Aramid(+45/-45)₄. The fracture behavior of the PMC / Al₂O₃ / PMC laminated composites was strongly affected by the properties of the PMCs. The three point bending process of the PMC / Al₂O₃ / PMC laminated composites could be divided into three regimes(I, II, III) in stress-strain curves related with the initiation and propagation of crack. In regime I, from the start point up to the first load drop, the PMC / Al₂O₃ / PMC laminated composites deformed elastically. The first load drop was related with the crack initiation in Al₂O₃ layer of the PMC / Al₂O₃ / PMC laminated composite, and the crack initiation stress in Al₂O₃ layer is proportional to the elastic modulus of laminated PMC. In regime II, from the first load drop up to the second load drop, the PMC layer deformed elastically and the crack was opened in Al₂O₃ layer. The crack propagation behavior in regime III, from the second load drop up to the complete fracture, is dependent on the ratio of flexural strength of PMC to shear strength at the Al₂O₃ / PMC interface. The C(0/90) / Al₂O₃ / C(0/90) and A(0/90) / Al₂O₃ / A(0/90) laminated composites, in which the laminated PMCs have higher flexural strengths, fractured by the debonding at Al₂O₃ / PMC interfaces. While, the C(+45/-45) / Al₂O₃ / C(+45/-45) and A(+45/-45) / Al₂O₃ / A(+45/-45) laminated composites, in which the laminated PMCs have lower flexural strengths, fractured by the deformation of outer laminated PMC layers.

초 록

단일 Al₂O₃와 PMC / Al₂O₃ / PMC 판상복합재료의 3점 굽힘 변형 특성을 조사하였다. PMC / Al₂O₃ / PMC 판상복합재료는 Al₂O₃ 판재의 양면에 각각 평면직조된 섬유강화 고분자기지 복합재료(PMC)를 접합하여 제조되었으며, PMC는 Carbon(0/90)₄, Carbon(+45/-45)₄, Aramid(0/90)₄ 및 Aramid(+45/-45)₄의 4종류가 사용되었다. PMC / Al₂O₃ / PMC 판상복합재료의 파단은 적층된

* 한국과학기술원 재료공학과

** 한국화학연구소 고분자복합재료연구실

PMC에 따라 다른 경로를 보이는데, Carbon(0/90)₄와 Aramid(0/90)₄를 적층한 판상복합재료는 Al₂O₃층의 crack 생성 후 계면 분리에 의해 파단되는 반면, Carbon(+45/-45)₄와 Aramid(+45/-45)₄를 적층한 판상복합재료는 PMC층의 파괴가 발생하였다. PMC / Al₂O₃ / PMC 판상복합재료의 3점 굽힘 변형 거동은 crack의 생성과 전파 거동에 따라 세 영역(I, II, III)으로 나누어 진다. 영역 I은 원점에서 첫번째 응력강하가 발생할 때까지 탄성변형을 하는 구간이다. 첫번째 응력강하는 Al₂O₃층에서의 crack 생성과 관계 있으며 Al₂O₃층의 crack 생성 응력은 적층된 PMC층의 탄성계수에 비례하였다. 영역 II는 첫번째 응력강하에서 두번째 응력강하까지의 구간으로 Al₂O₃층은 crack이 생성후 전파되고 PMC층은 PMC의 탄성변형을 하는 구간이다. 영역 III은 두번째 응력강하후 파괴때까지의 구간으로 영역 III에서의 파단 경로는 PMC의 강도와 계면의 강도의 비에 의해 결정되며, 굽힘강도가 높은 PMC를 적층한 C(0/90) / Al₂O₃ / C(0/90)와 A(0/90) / Al₂O₃ / A(0/90) 판상복합재료는 PMC층의 소성변형중 계면 전단응력이 계면강도에 도달하여 Al₂O₃ / PMC 계면에서 분리가 발생하는 반면, 굽힘강도가 낮은 PMC를 적층한 C(+45/-45) / Al₂O₃ / C(+45/-45)와 A(+45/-45) / Al₂O₃ / A(+45/-45) 판상복합재료는 PMC층의 파괴가 발생하였다.

1. 서 론

세라믹재료는 비강도와 경도가 높고, 고온 내산화성, 내열 및 내마모성이 우수하기 때문에 고온 구조용재료로 개발이 유력시되고 있으나, 세라믹재료 고유의 취성으로 인하여 공업적인 응용에 큰 제한을 받고 있다.

세라믹재료의 인성을 증가시키기 위하여 소량의 이상 원소를 첨가하거나 미세구조를 조절하여 세라믹재료 자체의 인성을 증가시키는 방법 그리고 세라믹재료의 복합재료화 등 여러 방향으로 연구가 진행되고 있으나, 세라믹 재료 자체의 인성의 증가는 한계가 있기 때문에 최근에 세라믹 기지에 강화재를 첨가한 세라믹 복합재료가 주목받고 있다. 세라믹기지 복합재료에 관한 연구는 크게 두가지 관점으로 나눌 수 있는데, 첫째, SiC / Al₂O₃[1], SiC / Si₃N₄[2], C / Al₂O₃[3], SiC / glass[4] 및 C / glass[5] 등과 같이 세라믹기지에 장섬유 또는 단섬유를 강화한 섬유강화 세라믹 복합재료로서 단일 세라믹재료에 비해 큰 인성의 증가를 나타낸다. 섬유강화 세라믹 복합재료에서의 인성의 증가는 crack deflection[6], fiber pull-out[7], fiber bridging[8] 및 microcracking[9] 등의 기구에 의해 에너지를 흡수하기 때문인 것으로 제안되고 있다. 둘째, 세라믹 판재를 세라믹 또는 금속 판재와 적층한 판상복합재료로서 단일 세라믹 판재에 비해 인성이 크게 향상되는 것으로 보고 되었다. Clegg

등[10]의 연구에 의하면 파괴흡수에너지가 단일 SiC 판상의 경우 28J/m²인데 비해 SiC/SiC 판상형 복합재료에서 6kJ/m²으로 큰 증가를 나타내었다. 세라믹 / 세라믹 판상복합재료에서의 파괴인성의 증가는 주로 계면에서의 crack deflection에 의한 기구와 관련있는 것으로 제안되고 있다[11]. 한편, 세라믹 판재에 금속판재를 적층한 세라믹 / 금속 복합재료에서의 파괴인성의 증가는 Leng등[12, 13]에 의해서 보고되었는데, 세라믹 / 금속 복합재료에서의 파괴인성의 증가는 연성이 큰 금속재료가 세라믹에서의 crack전파를 억제하는 crack tip shielding 기구와 계면에서의 crack deflection 기구에 의한 것으로 알려지고 있다[13].

본 연구에서는 Al₂O₃의 양면에 섬유강화 고분자 복합재료(PMC)를 적층하여 세라믹 / 고분자 판상복합재료를 제조한 후 단일 Al₂O₃와 PMC / Al₂O₃ / PMC 복합재료의 3점 굽힘 변형에 의한 특성을 조사하였다. 적층된 PMC로는 carbon과 aramid 섬유를 강화한 두가지 PMC를 사용하였으며 각각 (0/90)₄와 (+45/-45)₄의 두 방향으로 적층되었다. PMC / Al₂O₃ / PMC 판상복합재료에서 3점 굽힘 변형중 각 층에서의 crack 생성 및 전파특성을 조사하였고, PMC의 탄성계수가 Al₂O₃층의 crack 생성에 미치는 영향과 적층된 PMC의 강도와 PMC / Al₂O₃ 계면의 강도가 crack 전파 특성에 미치는 영향을 분석하였다. 적층된 PMC층이 PMC / Al₂O₃ / PMC 복합재료의 3점 굽힘 시험에 의한 파괴에너지에 미치는 영향을 조사하였다.

2. 실험방법

본 연구에 사용된 판상복합재료는 Al₂O₃층의 양면에 섬유강화 고분자 복합재료(PMC)를 적층한 sandwich형 복합재료이다. 적층재료로 사용된 PMC 판재는 epoxy 기지에 부피분율 60%의 carbon 또는 aramid 섬유로 구성되어 있다. 기지인 epoxy는 78%의 TGDDM(tetraglycidyl ether of diaminodiphenyl sulfone, MY720 from Ciba Geigy), 21%의 4,4'-diaminodiphenyl sulfone 그리고 1%의 BF₃MEA(boron trifluoride mono ethyl amine)으로 구성되어 있다. 강화재로 사용된 섬유 mat는 평면 직조된 carbon 섬유(#6644B from Toray)와 aramid 섬유(T720 from Teijin)의 두 종류이다. Carbon 섬유와 aramid 섬유강화 mat를 (0/90)와 (+45/-45)의 두가지 적층각도로 4층을 적층하여 C(0/90), C(+45/-45), A(0/90) 및 A(+45/-45)의 네가지 prepreg를 제조하였다. 이때 C는 carbon 섬유강화 고분자 복합재료를 의미하며, A는 aramid 섬유강화 고분자 복합재료를 의미한다. 이렇게 준비된 prepreg를 autoclave내에서 0.5MPa의 압력을 가한 상태에서 120℃에서 45분 유지후 170℃에서 2시간 동안 경화처리를 하여 네가지의 PMC를 제조하였다.

PMC / Al₂O₃ / PMC 판상복합재료는 autoclave 내에서 두께 1.2mm의 PMC층을 두께 3.8mm인 Al₂O₃판의 양쪽면에 FM123-2 접착제로 접착하여 제조하였다. Al₂O₃는 태평세라믹(주)에서 구입한 98.5% 순도의 소결된 재료를 사용하였다. PMC와 Al₂O₃의 접착은 autoclave 내에서 80℃에서 30분 유지후 150℃에서 3시간 유지하였다. 위와 같은 방법으로 C(0/90) / Al₂O₃ / C(0/90), A(0/90) / Al₂O₃ / A(0/90), C(+45/-45) / Al₂O₃ / C(+45/-45) 및 A(+45/-45) / Al₂O₃ / A(+45/-45)의 네가지 종류의 판상복합재료를 제조하였다.

PMC판재, Al₂O₃판재, PMC / Al₂O₃ / PMC의 판상복합재료의 파괴거동을 조사하기 위해 3점 굽힘 시험을 상온에서 Instron을 사용하여 1mm/min의 일정한 crosshead 속도로 적층면에 수직인 방향으로 하중을 가하여 실시하였다. PMC판재와 Al₂O₃판재

의 탄성계수와 굽힘강도는 ASTM D-790을 이용하여 3점 굽힘 시험중 측정된 하중과 변위의 곡선으로부터 계산하였다. PMC / Al₂O₃ / PMC의 판상복합재료의 3점 굽힘 시험 방법은 굽힘강도와 계면의 강도를 측정하기 위하여 short beam method를 이용한 ASTM D-2344를 이용하여 같은 종류의 시편을 2회이상 실시하였다. 3점 굽힘 시험 시편의 치수는 PMC판재의 경우 10mm×50mm×1.2mm, Al₂O₃ 판재의 경우 10mm×50mm×3.8mm, PMC / Al₂O₃ / PMC 판상복합재료의 경우 10mm×50mm×6.5mm이었으며 notch없이 span의 길이는 30mm로 시험하였다. PMC / Al₂O₃ / PMC의 판상복합재료의 3점 굽힘 시험시편중 crack 전파양상을 조사하기 위하여 시험 도중에 사진기를 이용하여 시편의 crack 상태를 촬영하였다.

3. 결과 및 고찰

3점 굽힘 시험으로 측정된 Al₂O₃ 판재와 PMC 판재의 탄성계수와 굽힘 강도를 Table 1에 나타내었다. PMC의 탄성계수와 굽힘강도는 탄소섬유를 강화한 PMC가 아라미드 섬유를 강화한 PMC보다 높은 값을 나타내었으며, 같은 종류의 섬유를 강화한 PMC를 비교하면 (0/90)로 적층한 경우가 (+45/-45)로 적층하였을 때보다 높은 값을 나타내었다.

PMC / Al₂O₃ / PMC 판상복합재료의 3점 굽힘 시험중 crack의 전파양상을 Fig.1에 나타내었다. PMC / Al₂O₃ / PMC 판상복합재료의 3점 굽힘 시험중 Al₂O₃층에서 crack이 최초로 생성되었으며 변형이 진행됨에 따라 crack이 전파되어 Al₂O₃ / PMC 계면에 도달하였다. 이때 Al₂O₃ / PMC 계면에 도달한

Table 1. The flexural moduli and flexural strengths measured by the three point bend tests of a monolithic Al₂O₃ and polymer matrix composites.

Material	E(GPa)	σ(MPa)
Al ₂ O ₃	62 ± 3.7	140 ± 11
Carbon(0/90) ₄ / Epoxy	23 ± 0.8	360 ± 13
Carbon(+45/-45) ₄ / Epoxy	10 ± 0.6	220 ± 14
Aramid(0/90) ₄ / Epoxy	14 ± 0.8	240 ± 13
Aramid(+45/-45) ₄ / Epoxy	5 ± 0.3	150 ± 8

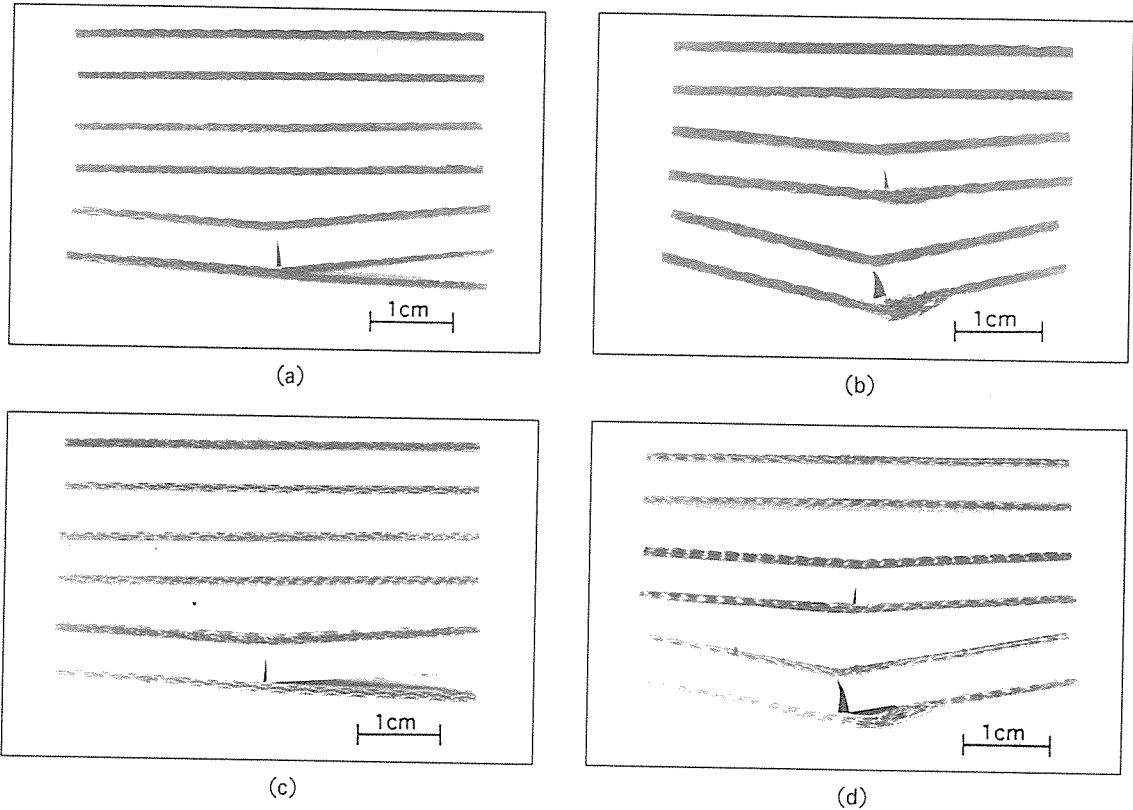


Fig. 1. The crack initiation and propagation processes during three point bend test of PMC/ Al_2O_3 /PMC laminated composites: (a) C(0/90)/ Al_2O_3 /C(0/90), (b) C(+45/-45)/ Al_2O_3 /C(+45/-45), (c) A(0/90)/ Al_2O_3 /A(0/90), (d) A(+45/-45)/ Al_2O_3 /A(+45/-45).

crack은 적층된 PMC의 특성에 따라 계면을 따라 전파하여 계면분리가 발생하거나 또는 PMC층의 소성변형을 일으키는 것이 관찰되었다. C(0/90)/ Al_2O_3 /C(0/90)과 A(0/90)/ Al_2O_3 /A(0/90) 판상 복합재료의 경우는 Al_2O_3 /PMC 계면이 분리되어 파괴되었으며 반면에 C(+45/-45)/ Al_2O_3 /C(+45/-45)와 A(+45/-45)/ Al_2O_3 /A(+45/-45) 판상 복합재료의 경우에는 PMC층에서 상당한 소성변형이 발생한 후 파괴가 발생하였다.

3점 굽힘 시험중에 하중이 주어짐에 따른 PMC/ Al_2O_3 /PMC 판상복합재료의 응력과 변형률의 상태를 Fig. 2에 도식적으로 나타내었다. 3점 굽힘 시험중 y축과 z축은 물리적인 구속을 받지 않으므로 $\sigma_y = \sigma_z = \tau_{yz} = \tau_{zx} = 0$ 이라 가정할 수 있다. 따라서 3점 굽힘 시험중 임의의 지점에서 작용하는 응력상태는

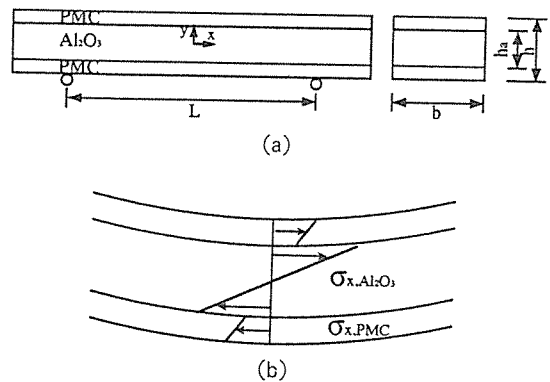


Fig. 2. The distribution of stress during three point bend test of PMC/ Al_2O_3 /PMC laminated composite: (a) the dimension of three point bend test specimen, (b) the distribution of stress in Al_2O_3 layer and in PMC layers.

simple beam의 가정에 의해 굽힘 moment에 의한 x축방향의 인장응력 σ_x 와 전단력 τ_{xy} 로 표시된다. 단일재료는 3점 굽힘 중 응력이 중성면(neutral surface)에서의 거리에 따라 일정한 기울기로 증가하지만 판상복합재료의 경우에는 Fig.2(b)에서 보는 바와 같이 적층된 재료의 탄성계수에 따라 응력의 기울기가 다르게 나타난다. 즉 탄성계수가 큰 Al₂O₃층은 응력의 기울기가 큰 반면 탄성계수가 작은 PMC층은 거리에 따른 응력의 기울기가 작게 나타난다. 이에 따라 3점 굽힘 시험중 Al₂O₃층과 PMC층에서 중성면에서의 거리에 따른 응력의 상태를 탄성변형의 범위내에서 풀면 아래의 식으로 나타낼 수 있다.

$$\sigma_{Al_2O_3} = \frac{\sigma_u}{k}, \quad y \leq \left| \frac{h_a}{2} \right| \quad \dots\dots\dots (1)$$

$$\sigma_{PMC} = \sigma_{Al_2O_3} \frac{E_{PMC}}{E_{Al_2O_3}} = \frac{\sigma_u}{k} \frac{E_{PMC}}{E_{Al_2O_3}}, \quad \left| \frac{h_a}{2} \right| \leq y \leq \left| \frac{h}{2} \right| \quad \dots\dots\dots (2)$$

$$\sigma_u = \frac{3PLy}{bh^3} \quad \dots\dots\dots (3)$$

$$k = \left[\frac{E_{PMC}}{E_{Al_2O_3}} - 1 \right] \left[1 - \left(\frac{h_a}{h} \right)^3 \right] + 1 \quad \dots\dots\dots (4)$$

이때 $\sigma_{Al_2O_3}$ 는 Al₂O₃층의 응력, σ_{PMC} 는 PMC층의 응력, σ_u 는 균일한 재료로 가정했을 때의 겉보기 응력, P는 하중, L은 span의 길이, h는 시편이 두께, h_a 는 Al₂O₃층의 두께, b는 시편의 폭, E_{PMC} 는 적층된 PMC의 탄성계수, $E_{Al_2O_3}$ 는 Al₂O₃층의 탄성계수, k는 적층된 PMC의 탄성계수와 두께에 의해 결정되는 재료 상수이고, y는 중성면에서 임의의지점까지의 거리이다.

단일 Al₂O₃ 판재와 PMC / Al₂O₃ / PMC 판상복합재료의 3점 굽힘 시험에 의해 측정된 응력-변형률 곡선을 Fig.3에 나타내었다. 응력은 균일한 재료로 가정했을 때 $y = \frac{h}{2}$ 인 지점에서의 응력이고, 변형률은 같은 지점에서 인장응력에 의한 변형률로 나타내었다. Fig.3(a)에서 보는 바와 같이 단일 Al₂O₃ 판재는 최대응력까지 탄성변형 후 곧 소성변형없이 파단되었다. 이에 비해 판상복합재료는 Fig.3(b)~(e)에서 보는 바와 같이 최대응력과 파괴되기가

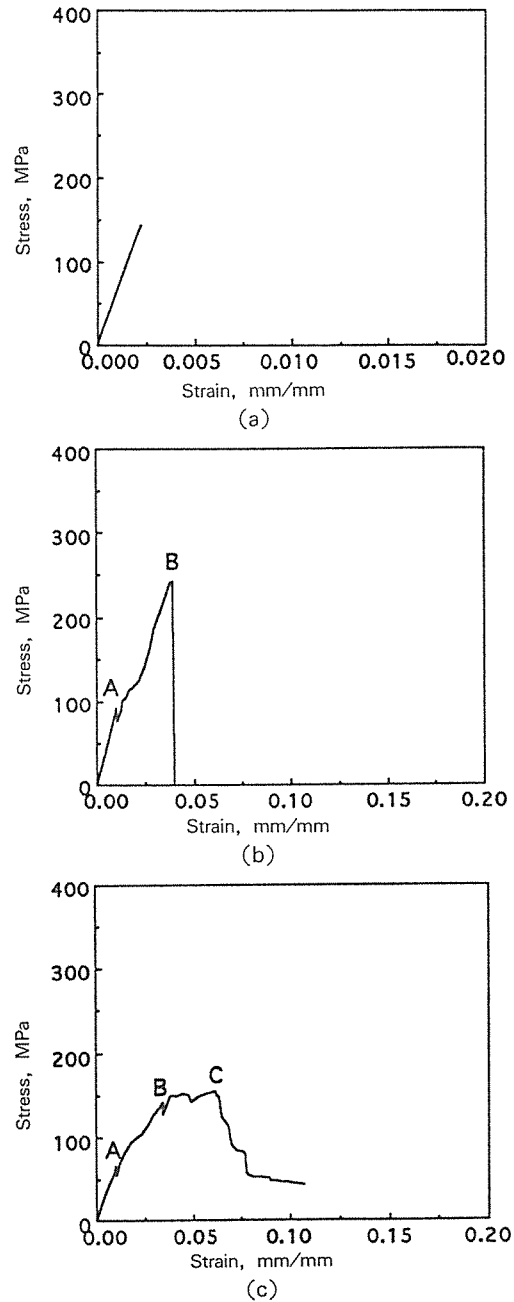


Fig. 3. The stress-strain curves obtained from three point bend test of a monolithic Al₂O₃ and PMC/Al₂O₃/PMC laminated composites:
 (a) monolithic Al₂O₃,
 (b) C(0/90)/Al₂O₃/C(0/90),
 (c) C(+45/-45)/Al₂O₃/C(+45/-45).

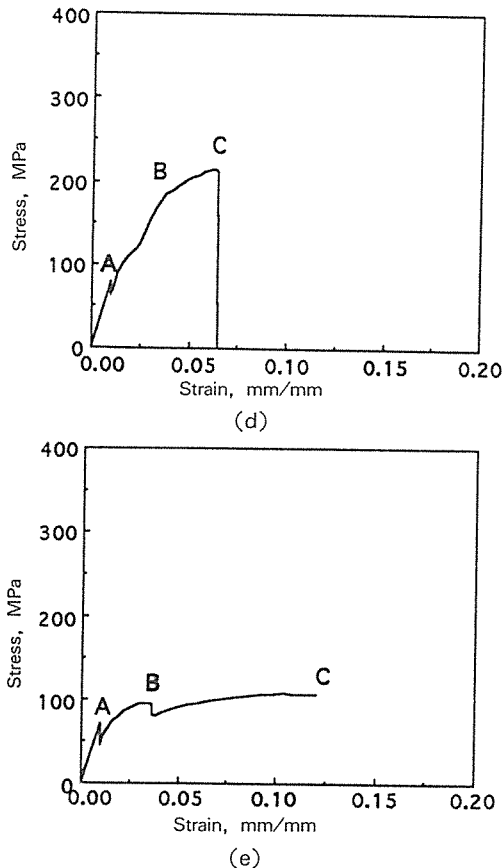


Fig. 3. (Continued)

(d) A(0/90)/Al₂O₃/A(0/90),
 (e) A(+45/-45)/Al₂O₃/A(+45/-45).

지의 변형률이 증가되어 파괴인성이 크게 향상되었다. PMC/Al₂O₃/PMC 판상복합재료의 3점 굽힘 변형특성은 적층된 PMC의 강화섬유 종류와 적층 각도에 따라서 크게 영향을 받는 것이 확인되었다. Fig. 3(b) 및 Fig. 3(d)의 C(0/90)/Al₂O₃/C(0/90)과 A(0/90)/Al₂O₃/A(0/90) 판상복합재료는 최대 응력에 도달한 후 바로 응력이 0으로 감소하면서 파괴되는데 비해, C(+45/-45)/Al₂O₃/C(+45/-45)와 A(+45/-45)/Al₂O₃/A(+45/-45) 판상복합재료는 최대응력 후 상당한 소성변형이 진행된 후 파괴되는 것이 관찰되었다.

3점 굽힘 시험중의 변형특성은 Fig. 3에서 관찰된 crack의 생성 및 전파거동에 따라 세 영역으로 나눌

수 있다. 영역 I은 원점에서 첫번째 응력강화가 발생하는 A점까지로 응력이 직선적으로 증가하는 구간이다. 영역 I에서 모든 PMC/Al₂O₃/PMC 판상복합재료는 탄성변형을 나타내었다. 3점 굽힘 시험 중 crack의 생성과 전파 거동과 응력-변형률 곡선을 비교하면 점 A에서의 응력강화는 Al₂O₃층의 crack 발생에 의한 것으로 판단된다. Fig. 3(b)~(e)에서 알 수 있듯이 Al₂O₃층에서 crack이 발생하는 A점까지의 변형률은 거의 일정하지만 A점의 응력은 적층된 PMC의 특성에 따라 달라진다. 영역 II은 첫번째 응력강화가 발생하는 A점에서 두번째 응력강화가 발생하는 B점사이의 구간이다. 영역 II에서 PMC층은 탄성변형을 하고, Al₂O₃층은 변형이 증가함에 따라 crack이 벌어지게 되는데, 양쪽면의 PMC층이 crack전파를 막아 단일 Al₂O₃판재와 같이 crack 생성 후 바로 파단되는 것이 억제되었다. 이 구간에서의 응력은 변형률에 따라 증가하여 두번째 응력강화가 발생하는 B점에 이른다. B점에서 두번째 응력강화는 적층된 PMC의 특성에 따라 PMC층의 crack 생성이나 또는 Al₂O₃/PMC층의 계면 분리에 의한 것으로 판단된다. B점 이후의 crack 전파 특성은 적층된 PMC에 따라 두가지 경우로 나누어 진다. 탄성계수와 굽힘강도가 큰 PMC를 적층한 C(0/90)/Al₂O₃/C(0/90) 판상복합재료는 Al₂O₃/PMC 계면의 분리에 의해 B점에서 파단되는 반면에 탄성계수와 굽힘강도가 낮은 PMC를 적층한 A(0/90)/Al₂O₃/A(0/90), C(+45/-45)/Al₂O₃/C(+45/-45)와 A(+45/-45)/Al₂O₃/A(+45/-45) 판상복합재료는 Al₂O₃/PMC 계면에서 파단되지 않고, PMC층의 변형이 발생하였다. 영역 III은 A(0/90)/Al₂O₃/A(0/90), C(+45/-45)/Al₂O₃/C(+45/-45)와 A(+45/-45)/Al₂O₃/A(+45/-45) 판상복합재료에서 나타나는데, Fig. 3(c)~(e)에서 보듯이 B점에서의 두번째 응력강화 후의 구간이다. 영역 III에서의 crack 전파 특성은 두가지로 나눌 수 있는데, A(0/90)/Al₂O₃/A(0/90) 판상복합재료는 최대응력인 C점까지 변형후 계면 분리에 의해 파단되었고, C(+45/-45)/Al₂O₃/C(+45/-45)와 A(+45/-45)/Al₂O₃/A(+45/-45) 판상복합재료는 계면의 완전한 분리가 발생하지 않고, 적층된

PMC층의 소성변형이 발생하였다. 적층된 PMC의 종류에 따라 B점에서 crack의 전파경로가 다른 것은 Al₂O₃ / PMC의 계면강도와 적층된 PMC의 굽힘강도에 의해 결정된다. 즉 C(0/90) / Al₂O₃ / C(0/90)와 A(0/90) / Al₂O₃ / A(0/90) 판상복합재료는 (PMC의 굽힘강도)/(인장응력)의 비가 (계면강도)/(전단응력)의 비보다 크기 때문에 계면에서 파괴되는 반면에 C(+45/-45) / Al₂O₃ / C(+45/-45)와 A(+45/-45) / Al₂O₃ / A(+45/-45) 복합재료는 (PMC의 굽힘강도)/(인장응력)의 비가 (계면강도)/(전단응력)의 비보다 작기 때문에 PMC층에서 파괴가 발생하는 것으로 판단된다.

Fig. 3에서 알 수 있듯이 영역 I, II에서 각 PMC / Al₂O₃ / PMC 복합재료의 변형특성은 유사하지만 A점과 B점에서의 응력은 적층된 PMC에 따라서 다르다. PMC / Al₂O₃ / PMC 복합재료는 영역 I에서 탄성변형을 진행하다가 A점에서 Al₂O₃층에 crack이 발생하므로 A점의 응력은 각 판상복합재료에서 Al₂O₃층의 파괴강도와 관련이 있다. 즉, PMC / Al₂O₃ / PMC 판상복합재료에서 3점 굽힘 시험중 하중이 증가하여 Al₂O₃층에 작용하는 응력이 Al₂O₃의 파괴강도와 같게 되었을때 A점에서 응력강하가 발생하게 된다. 각 판상복합재료에서 적층된 Al₂O₃층의 파괴강도가 일정하다고 가정하면, A점의 결보기 응력(σ_u)은 식(1)에서 알 수 있듯이 적층된 PMC의 탄성계수와 두께에 의해 결정되는 상수 k 에 비례한다. 각 판상복합재료에서 상수 k 값과 결보기 응력(σ_u)의 관계를 Fig. 4에 나타내었으며 3점 굽힘 시험에 의해 측정된 결과와 식(1)에 의해 계산된 결보기 응력이 거의 비슷한 값을 보이고 있음이 확인되었으며 k 값이 증가함에 따라 결보기 응력이 증가하는 경향이 일치하는 것을 보여주고 있다. B점에서의 응력은 Al₂O₃ / PMC 계면강도와 적층된 PMC의 굽힘강도에 의해서 결정된다. Al₂O₃ / PMC 계면에서 분리가 발생하는 C(0/90) / Al₂O₃ / C(0/90) 판상복합재료의 경우는 Al₂O₃ / PMC 계면의 강도에 의해서 B점의 응력이 결정되고, PMC층에서 변형이 발생하는 A(0/90) / Al₂O₃ / A(0/90), C(+45/-45) / Al₂O₃ / C(+45/-45)와 A(+45/-45) / Al₂O₃ / A(+45/-45) 판상복합재료의 경우는 적층된

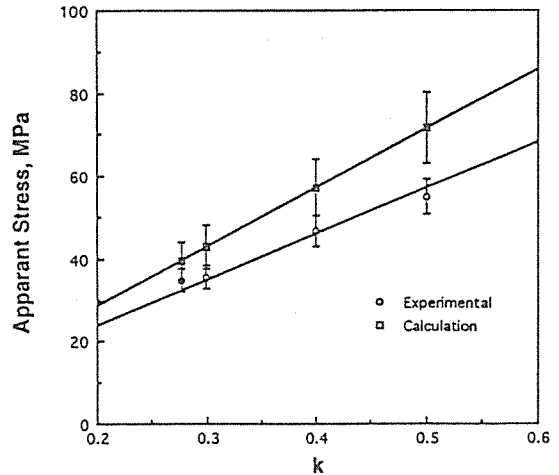


Fig. 4. The variation of the measured and calculated apparent stresses at point A in Fig. 3 with varying constant k .

PMC의 굽힘강도에 의해 B점의 강도가 결정된다.

PMC / Al₂O₃ / PMC 판상복합재료에서 두가지 다른 파단양상은 PMC층의 인장응력이 PMC층의 굽힘강도와 같아지는 경우와 Al₂O₃ / PMC 계면의 전단응력이 계면강도와 같아지는 경우의 두가지 다른 파괴경로로 나누어 설명할 수 있다. 영역 II에서

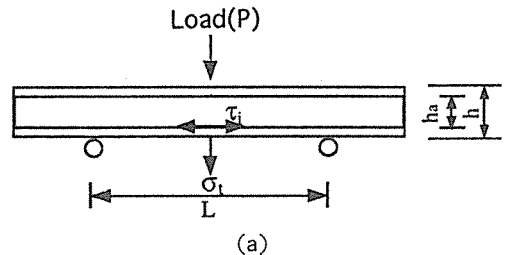


Fig. 5. The schematic representation of two different fracture modes during three point bend tests of PMC / Al₂O₃ / PMC laminated composite: (a) the three point bending specimen showing the tensile stress (σ_t) at PMC layer and the shear stress (τ_i) at Al₂O₃ / PMC interface induced by applied load (P), (b) the distribution of stress in Al₂O₃ layer and in PMC layers in regime II, (c) the stress-load curve showing the interface debonding when the flexural strength is higher than the critical tensile stress, (d) the stress-load curve showing the fracture of PMC layer when the flexural strength is lower than the critical tensile stress.

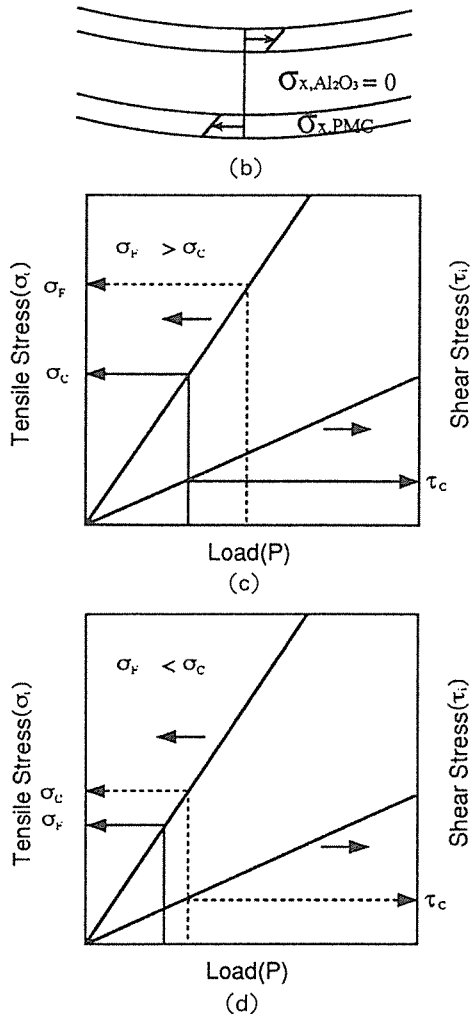


Fig. 5. (Continued)

PMC / Al₂O₃ / PMC 판상복합재료의 3점 굽힘 시험중 응력의 분포를 Fig.5에 나타내었다. 영역 II에서

Al₂O₃층은 이미 crack이 발생하였기 때문에 Al₂O₃층의 응력은 0이라 가정하였고, PMC층은 탄성변형에 의해 응력이 직선적으로 증가한다. 3점 굽힘 시험중 PMC층의 최하단에 작용하는 최대인장응력과 Al₂O₃ / PMC 계면에서의 전단응력은 각각 아래의 식에 의해서 계산된다.

$$\sigma_t = \frac{3PLh}{2b(h^3 - h_a^3)} \quad \dots\dots\dots (5)$$

$$\tau_i = \frac{3P(h^2 - h_a^2)}{2b(h^3 - h_a^3)} \quad \dots\dots\dots (6)$$

이때 P 는 부하되는 하중이고, L 은 span 길이, b 는 시편의 폭, h 는 시편의 두께, h_a 는 Al₂O₃층의 두께이다. 그리고, σ_t 는 하중 P 가 증가함에 따라서 PMC의 최하단에 작용하는 인장응력이고, τ_i 는 Al₂O₃ / PMC 계면의 계면 전단응력이다. σ_t 와 τ_i 는 Fig.5에 도시한 바와 같이 하중이 증가함에 따라 서로 다른 기울기로 직선적으로 증가하게 된다.

하중이 증가함에 따라 crack이 전파하여 Al₂O₃ / PMC 계면에 도달하면 시편이 파괴되는 B점에서 계면 분리 또는 PMC층의 파괴의 두가지 다른 경로로 진행될 수 있다. 각 PMC / Al₂O₃ / PMC 판상복합재료에서 식(5)와 (6)에 의해 계산된 B점과 C점에서의 인장응력과 전단응력을 Table 2에 나타내었다. PMC / Al₂O₃ / PMC 판상복합재료에서 Al₂O₃ / PMC 계면은 동일한 접촉조건으로 접촉되었기 때문에 계면강도는 같다고 가정하였다. Table 2의 계산 결과를 비교하면 계면에서 분리가 발생한 C(0/90) / Al₂O₃ / C(0/90) 판상복합재료의 B점에서의 전단응력과 A(0/90) / Al₂O₃ / A(0/90) 판상복합재료의 C점에서의 전단응력(τ_i)은 Al₂O₃ / PMC의

Table 2. The tensile stresses at outer PMC layer and the shear stresses at Al₂O₃ / PMC interface of PMC / Al₂O₃ / PMC laminated composites measured at point B and C in stress-strain curves (Fig. 3) obtained by three point bend tests.

	σ_B (MPa)	σ_C (MPa)	τ_B (MPa)	τ_C (MPa)	Fracture Mode
C(0/90) / Al ₂ O ₃ / C(0/90)	310 ± 30	—	24 ± 2.2	—	Interface Debonding at B
C(+45 / -45) / Al ₂ O ₃ / C(+45 / -45)	170 ± 12	180 ± 14	16 ± 1.1	17 ± 1.3	Fracture of PMC layer
A(0/90) / Al ₂ O ₃ / A(0/90)	240 ± 12	270 ± 15	19 ± 1.0	21 ± 1.1	Interface Debonding at C
A(+45 / -45) / Al ₂ O ₃ / A(+45 / -45)	120 ± 5	140 ± 5	9 ± 0.5	11 ± 0.5	Fracture of PMC layer

계면강도와 같음을 알 수 있다. 계면에서의 전단 응력(τ_i)이 계면강도(τ_c)와 같을 때의 인장응력을 임계인장강도(σ_c)로 정의하면, Table 2에서 Al₂O₃ / PMC의 계면강도는 21~23MPa정도이고, 임계인장강도는 270~310MPa 정도임을 알 수 있다. 따라서 Fig.5(c)에 나타난 것과 같이 PMC의 굽힘강도(σ_F)가 임계인장강도보다 높은 PMC를 적층한 C(0/90) / Al₂O₃ / C(0/90) 판상복합재료는 B점에서 계면분리가 발생하였고, 반면에 Fig.5(d)에 나타난 것과 같이 PMC의 굽힘강도(σ_F)가 임계인장강도보다 낮은 PMC를 적층한 A(0/90) / Al₂O₃ / A(0/90), C(+45/-45) / Al₂O₃ / C(+45/-45)와 A(+45/-45) / Al₂O₃ / A(+45/-45) 판상복합재료의 경우는 B점에서 PMC층의 변형이 시작되었다. 즉 PMC층의 변형이 발생하는 판상복합재료의 경우에 Table 1과 Table 2를 서로 비교하면 B점에서의 응력이 적층된 PMC의 굽힘강도에 비례하는 것을 알 수 있다. 영역III은 PMC의 변형이 발생한 후의 구간으로 적층된 PMC에 따라서 다른 변형특성을 나타내었다. A(0/90) / Al₂O₃ / A(0/90) 판상복합재료는 PMC층의 변형시작후 인장응력이 증가하여 C점에서 임계인장응력에 도달하여 계면에서 분리가 발생한 반면, C(+45/-45) / Al₂O₃ / C(+45/-45)와 A(+45/-45) / Al₂O₃ / A(+45/-45) 판상복합재료의 경우는 최대 인장응력이 임계 인장응력에 도달하지 못하고 계속적인 PMC층의 변형에 의해 파괴되는 것으로 생각된다.

3점 굽힘 시험중 각 구간별 에너지 흡수와 전체 에너지 흡수를 Table 3에 나타내었다. 영역 I에서의 에너지 흡수는 적층된 PMC의 탄성계수에 비례한다. 이는 PMC / Al₂O₃ / PMC 판상복합재료의 탄성변형

에너지는 PMC의 탄성 변형 에너지와 Al₂O₃의 탄성변형 에너지의 합인데, 각 복합재료에서 Al₂O₃의 탄성변형 에너지는 일정하기 때문이다. 영역II에서의 에너지 흡수는 복합재료의 파괴 양상에 따라서 달라진다. PMC층에서 파괴가 발생하는 A(0/90) / Al₂O₃ / A(0/90), C(+45/-45) / Al₂O₃ / C(+45/-45)와 A(+45/-45) / Al₂O₃ / A(+45/-45) 판상복합재료의 경우는 영역II의 변형이 PMC의 탄성 변형이므로 에너지 흡수가 PMC의 탄성변형 에너지에 비례한다. 반면에 Al₂O₃ / PMC 계면에서 분리가 발생하는 C(0/90) / Al₂O₃ / C(0/90) 복합재료는 계면 강도가 일정하기 때문에 전단응력이 계면 강도에 도달하는 변형률에 비례하게 된다. 영역III에서는 변형이 전적으로 PMC층의 파괴와 관련이 있으므로 에너지 흡수는 PMC의 파괴 인성에 비례하게 된다. 결론적으로 PMC / Al₂O₃ / PMC에서 Al₂O₃의 crack 생성강도와 파괴에너지를 증가시키기 위해서는 탄성계수가 큰 PMC를 적층하는 것이 효과적이고, 전체적인 파괴 에너지를 증가시키기 위해서는 높은 강도와 인성을 갖는 PMC를 적층하는 것이 효과적이다. 이와함께 Al₂O₃ / PMC의 계면 강도를 증가시켜 계면 분리를 억제함으로써 전체 파괴 에너지를 증가시키는 것이 매우 중요하다고 판단된다.

4. 결 론

단일 Al₂O₃ 판재와 4가지 종류의 고분자 복합재료를 Al₂O₃의 양면에 적층한 PMC / Al₂O₃ / PMC 판상복합재료의 3점 굽힘 변형 특성을 조사하였다. 3점 굽힘 시험에 의한 PMC / Al₂O₃ / PMC 판상복합

Table 3. The energies absorbed in each regimes during three point bending of a monolithic Al₂O₃ and PMC/Al₂O₃/PMC laminated composites.

	Energy Absorbed (kJ/m ²)			
	E _I	E _{II}	E _{III}	Total
Al ₂ O ₃	0.5 ± 0.1			0.5 ± 0.1
C(0/90) / Al ₂ O ₃ / C(0/90)	1.4 ± 0.1	14 ± 2.6	0.2 ± 0.1	15 ± 2.8
C(+45/-45) / Al ₂ O ₃ / C(+45/-45)	1.0 ± 0.07	7 ± 0.9	21 ± 3.2	29 ± 4.2
A(0/90) / Al ₂ O ₃ / A(0/90)	1.1 ± 0.1	11 ± 1.2	16 ± 1.6	28 ± 2.9
A(+45/-45) / Al ₂ O ₃ / A(+45/-45)	0.9 ± 0.09	5 ± 0.4	>30 ± 10	>40 ± 10

재료의 파괴에너지는 단일 Al_2O_3 판재에 비하여 100배 이상 크게 증가하였으며 $\text{PMC} / \text{Al}_2\text{O}_3 / \text{PMC}$ 판상복합재료의 파괴거동은 적층된 PMC에 따라 크게 영향을 받는다. $\text{PMC} / \text{Al}_2\text{O}_3 / \text{PMC}$ 판상복합재료의 3점 굽힘 변형 거동은 crack의 생성과 전파거동에 따라 세가지 영역(I, II, III)으로 나누어진다. 영역 I 은 원점에서부터 Al_2O_3 층에서 crack이 생성되어 응력-변형을 곡선에서 첫번째 응력강화가 발생하는 A점까지의 구간으로 Al_2O_3 와 PMC층이 모두 탄성변형을 하는 영역이다. Al_2O_3 층에서 crack이 발생하는 A점에서의 응력은 적층된 PMC의 탄성계수에 비례하였고, 영역 I 에서의 에너지는 PMC의 탄성계수에 비례하였다. 영역 II 는 A점에서 $\text{Al}_2\text{O}_3 / \text{PMC}$ 계면이 분리되어 응력 변형을 곡선에서 두번째 응력강화가 발생하는 B점까지의 구간으로 PMC층은 탄성변형하며, crack이 발생한 Al_2O_3 층은 양면에 적층된 PMC에 의해 파단이 억제되는 영역이다. B점의 응력은 (PMC의 강도)/(인장응력)의 비와 (계면의 강도)/(계면에서의 전단응력)의 비에 의해 결정되며, 굽힘강도가 높은 PMC를 적층한 $\text{C}(0/90) / \text{Al}_2\text{O}_3 / \text{C}(0/90)$ 판상복합재료는 $\text{Al}_2\text{O}_3 / \text{PMC}$ 계면에서 분리가 발생하였고, 굽힘강도가 낮은 PMC를 적층한 $\text{A}(0/90) / \text{Al}_2\text{O}_3 / \text{A}(0/90)$, $\text{C}(+45/-45) / \text{Al}_2\text{O}_3 / \text{C}(+45/-45)$ 와 $\text{A}(+45/-45) / \text{Al}_2\text{O}_3 / \text{A}(+45/-45)$ 판상복합재료는 PMC층에서 소성변형이 발생하였다. 영역 III 은 PMC의 소성변형이 진행되는 영역으로 $\text{A}(0/90) / \text{Al}_2\text{O}_3 / \text{A}(0/90)$ 판상복합재료는 PMC층의 소성변형중 계면 전단응력이 계면강도에 도달하여 $\text{Al}_2\text{O}_3 / \text{PMC}$ 계면에서 분리가 발생하는 반면, $\text{C}(+45/-45) / \text{Al}_2\text{O}_3 / \text{C}(+45/-45)$ 와 $\text{A}(+45/-45) / \text{Al}_2\text{O}_3 / \text{A}(+45/-45)$ 판상복합재료는 PMC층의 파괴가 발생하였다.

References

1. P.F. Becher and G.C. Wei, J. Am. Ceram. Soc., Vol.67, 1984, p.298.
2. R.W. Rice, Ceram. Eng. Sci. Proc., Vol. 2, 1981, p.661.
3. R.A.J. Sambell, D.H.Bowen and D.C. Phillips, J. Mater. Sci., Vol.7, 1972, p.663.
4. K.M. Prewo and J.J. Brennan, J. Mater. Sci., Vol.7, 1972, p.1201.
5. D.H. Bowen, D.C. Phillips, R.A.J. Sambell and A. Briggs, in Proceedings of the International Conference on the Mechanical Properties of Materials, Society of Metals, 1972, p.123.
6. K.T. Faber and A.G. Evans, Acta Met., Vol.31, 1983, p.565.
7. M.D. Thouless and A.G. Evans, Acta Met., Vol.36, 1988, p.517.
8. A.G. Evans and R.M. Mcmeeking, Acta Met., Vol.34, 1986, p.2435.
9. A.G. Evans and K.T. Faber, J. Am. Ceram. Soc., Vol.67, 1984, p.255.
10. W.J. Clegg, K.Kendall, N.Mcn. Alford, T.W. Button and J.D. Birchall, Nature, 1990, p.455.
11. A.J. Phillips, W.J. Cleff and T.W. Clyne, Composites, Vol.24, 1993, p.166.
12. M. Manoharan, L. Ellis and J.J. Lewandowski, Scripta Metall. Mater., Vol.24, 1990, p.1515.
13. Y. Leng and T.H. Courtney, Metall. Trans. A, Vol.21A, 1990, p.2159.