

횡하중을 받는 SiC/Ti-15-3 MMC 복합재 계면영역에서의 탄소성 응력장분포거동(I)

강지웅* · 김상태* · 권오현†

*부경대학교 대학원 안전공학과 · 부경대학교 안전공학과
(2004. 7. 14. 접수 / 2004. 11. 10. 채택)

Elastic-Plastic Stress Distributions Behavior in the Interface of SiC/Ti-15-3 MMC under Transverse Loading(I)

Ji-Woong Kang* · Sang-Tae Kim* · Oh-Heon Kwon†

*Department of Safety Engineering, Graduate School of Pukyong National University
Department of Safety Engineering, Pukyong National University
(Received July 14, 2004 / Accepted November 10, 2004)

Abstract : Unidirectional fiber-metal matrix composites have superior mechanical properties along the longitudinal direction. However, the applicability of continuous fiber reinforced MMCs is somewhat limited due to their relatively poor transverse properties. Therefore, the transverse properties of MMCs are significantly influenced by the properties of the fiber/matrix interface. In this study, the interfacial stress states of transversely loaded unidirectional fiber reinforced metal matrix composites investigated by using elastic-plastic finite element analysis. Different fiber volume fractions (5-60%) were studied numerically. The interface was treated as three thin layer (with different properties) with a finite thickness between the fiber and the matrix. The fiber is modeled as transversely isotropic linear-elastic, and the matrix as isotropic elastic-plastic material. The analyses were based on a two-dimensional generalized plane strain model of a cross-section of an unidirectional composite by the ANSYS finite element analysis code.

Key Words : metal matrix composite(MMC), elastic-plastic finite element analysis, interface, fiber, matrix

1. 서 론

현재 유리섬유 강화 플라스틱복합재료 및 금속기지 복합재료(metal matrix composite; 이하 MMC)를 포함하여 여러 종류의 다양한 구조 및 성질을 지닌 우수한 복합재료가 개발되어 각종 산업분야에 적용되고 있으며 지금까지 활발한 연구가 이루어지고 있다¹⁻³⁾. 특히 MMC는 금속기지재에 입자, 위스커 및 섬유 등의 강화제를 삽입하여 기존의 금속재료에서는 얻을 수 없었던 경량화, 고강도, 고강성, 내열성 및 내마모성 등을 얻을 수 있도록 개발되어 항공, 우주, 자동차산업에서부터 레저산업에 이르기까지 각종 공학분야에 그 수요가 엄청난 증가추세

에 있다.

MMC는 모든 방향으로 강도나 강성이 같은 등방성 물질인 기존의 금속재료와는 달리 이방성 물질이므로 구조재나 기능재로서 부품이나 제품의 특성¹⁾에 맞게 필요한 방향으로만 강도와 강성을 높여서 조절할 수 있다는 큰 장점이 있다. 그러나 장섬유 강화 MMC는 섬유와 기지 사이의 계면에 의해 중요한 영향을 받는 특성을 가진다. 계면 특성은 일반적으로 계면강도나 파괴인성에 의해 결정된다. 더욱이 종방향 하중 하에서의 장섬유강화 MMC는 우수한 성능을 보여 왔으나 횡방향 하중 하에서는 기지에서 섬유로 하중이 전달되는 과정에서 각각의 물성치의 차이와 계면에서의 급격한 응력변화를 등으로 인해 적용성에 있어서 기대치보다 낮은 성능을 나타낸다.⁴⁾ 이러한 특성으로 인하여, 횡하중을 받는 MMC의 계면에 대한 탄소성응력장 거동평가는 중

†To whom correspondence should be addressed.
kwon@pknu.ac.kr

요하다 할 수 있다. 따라서 본 논문에서는 횡하중을 받는 균일 분포된 장섬유강화 SiC/Ti-15-3 MMC에 대해서 섬유체적비에 따른 계면에서의 응력장분포에 대한 탄소성거동을 평가하였다. 또한 계면특성평가는 다층계면모델을 이용하여 계면영역에서의 응력변화를 기존의 계면모델과 비교 검토하여 그 유용성을 나타내었다.

2. 수치해석

본 논문에서는 SiC장섬유강화 MMC의 단면을 모델링하여 2차원 평면변형을 수치해석을 수행하였다. 섬유와 기지의 요소들은 2차원 사각형 8절점 요소를 사용하였다. 계면영역은 섬유와 기지 사이의 물성치변화에 따른 높은 응력 변화가 예상되어지고 또한 MMC 제조 시 기지와 접착력을 고려한 표면 처리층을 상정하여 다층계면 모델을 제안하였다. 다층계면은 계면경계가 기지와 섬유사이에 비례적으로 각기 다른 기계적 물성치를 가지는 3개의 매우 얇은 층으로 구성된다. Fig. 1은 3개의 얇은 층이 삽입된 장섬유강화 MMC에 대한 유한요소모델을 나타내고 있다. 대칭의 경계조건을 고려하여 단일 섬유 전체의 모델 4분의 1을 모델링하였다. Fig. 1에서 θ 는 횡축을 기준으로 계면상에 존재하는 요소의 응력장위치를 나타내는 각도이다. 상정된 강화섬유는 SiC, 기지는 Ti-15-3 복합재료 차세대 초음속항공기 엔진 주재료로 사용된다. Table 1에 각기 다른 물성치를 가지는 3층에 대한 SiC 섬유와 Ti-15-3 기지의 물성치를 나타내었다.⁵⁾ Layer 1~3의 물성치는 기지에서 섬유로 그 물성치가 선형적으로 변화하도록 하였으며, 섬유와 Layer 1은 탄성거동을 기지와 Layer 2-3는 탄소성거동을 하는 것으로 간주하였다. 섬유체적비는 복합재료의 단위체적당 차지하는 강화 섬유의 체적비를 나타내는 것으로 $v_f(\%) = \frac{V_f}{V_c} \times 100$ 으로 주어진다. 여기서 V_f 및 V_c 는 각각 섬유 및 복합재료 전체 체적을 나타낸다. 본 연구에서 v_f 는 5~

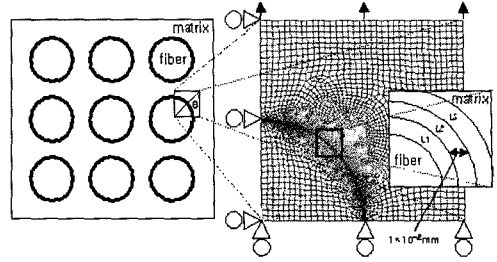


Fig. 1. Finite element model for fiber reinforced Ti-15-3 matrix composite with three thin layer under transverse loading.

60% 사이에서 4가지로 해석영역의 섬유반경을 변화시켰다. 또한 해석모델에 주어지는 최대응력은 1.0~2.0GPa의 4가지 응력수준에 대하여 평가 하였다. 유한요소해석은 상용프로그램인 ANSYS를 사용하였다.

3. 결과 및 고찰

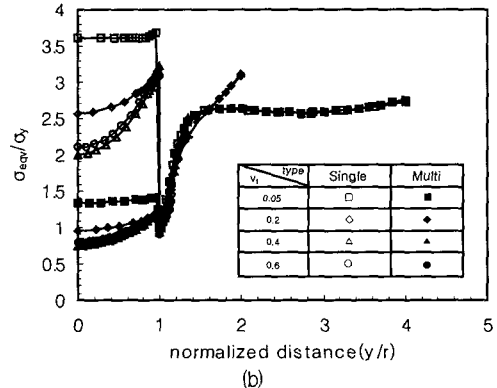
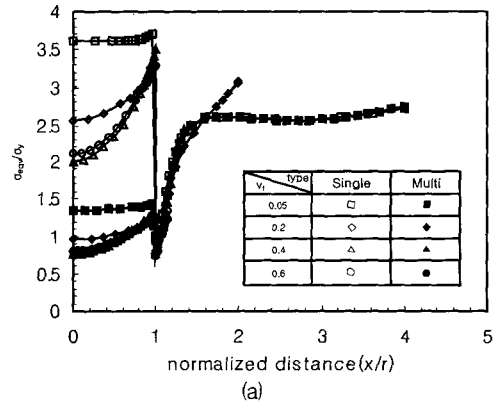


Fig. 2. Normalized equivalent stress distributions for elastic fiber and elastic-plastic matrix according to fiber volume fraction (a) along x-axis and (b) along y-axis.

Table 1. Mechanical properties of SiC fiber -Ti-15-3 matrix

	Young's modulus (GPa)	Poisson's ratio	σ_y (MPa)	Tangential modulus (GPa)
SiC	364	0.23	-	-
Layer 1	284	0.26	-	-
Layer 2	224	0.28	1882.5	5
Layer 3	164	0.3	1334.4	5
Ti-15-3	88	0.32	716	5

3.1. x-y축 상의 응력분포

Fig. 2의 (a)와 (b)는 동일 하중응력 (2GPa) 하에서 섬유체적비 별로 단층계면모델과 다층계면모델의 x축과 y축에 따른 섬유와 기지의 무차원 von Mises 등가응력분포를 나타내었다. 기존계면 모델에서는 최대 무차원 등가응력은 계면에서 발생되며 섬유체적비가 증가함에 따라 감소하는 경향을 나타내었다. 다층계면모델의 경우 최대 무차원 등가응력치는 기지쪽에서 발생되며 계면에서의 응력은 기존계면모델 보다 낮게 나타났다. 섬유영역에서 섬유체적비 5%의 경우 x축을 따라서 von Mises 응력 곡선이 거의 일정하지만, 20% 이상의 경우에는 계면에 가까워 질수록 상승하였다. 또 섬유체적비의 감소에 따라서는 더 높은 값을 나타내었다. 기지 영역에서 다층계면의 도입과 섬유체적비 변화에 의한 x축 상의 von Mises 등가응력치에 대한 영향은 없는 것으로 나타났다. Fig. 2(b)의 y축을 따른 응력분포 역시 x축의 경우와 유사하였다.

Fig. 3의 (a)와 (b)는 동일 섬유체적비 ($v_f=40\%$)에 있어서 각기 다른 하중 수준에서 단층계면모델과 다층계면모델의 x축과 y축에 따른 섬유와 기지의 무차원 등가응력분포를 나타내었다. x축에서의 무차원 등가응력분포는 단층계면모델의 경우, 각각의 하중에 대하여 그 최대 값은 모두 계면에 위치하며, 다층계면 모델의 경우 최대 값은 단층계면모델과 달리 기지에 위치하였다. 또한 다층계면 모델의 경우 단층계면모델에 비해 응력감소가 계면층을 지남에 따라 완만한 변화를 나타내는 반면 기지층에서 단층계면모델의 경우보다 훨씬 높은 값을 나타내었다. 이러한 특성은 각기 다른 비례적 물성치를 가지는 계면의 삽입 때문으로 여겨진다. 단층계면모델에서 하중이 2GPa일 때 x축을 따라서의 최대-최소 무차원 등가응력값은 3.5와 0.771로 나타났다. 다층모델의 경우는 2.45와 0.757로 각각 얻어져 최소값의 변화는 거의 없는 것으로 간주된다. y축을 따른 응력분포 역시 x축의 경우와 유사하였다.

3.2. 계면영역의 응력분포

Fig. 4는 동일 하중 최대응력 (2GPa) 하에서 각기 다른 섬유체적비 (v_f)에 따른 단층계면과 다층계면 영역에서의 무차원 등가응력분포의 변화를 나타내고 있다. 단층계면모델의 경우 계면의 전체영역이 항복응력을 초과하였으나 다층계면모델의 경우는 대략 $20^\circ\sim 70^\circ$ 정도의 범위에서만 항복응력에 도달하

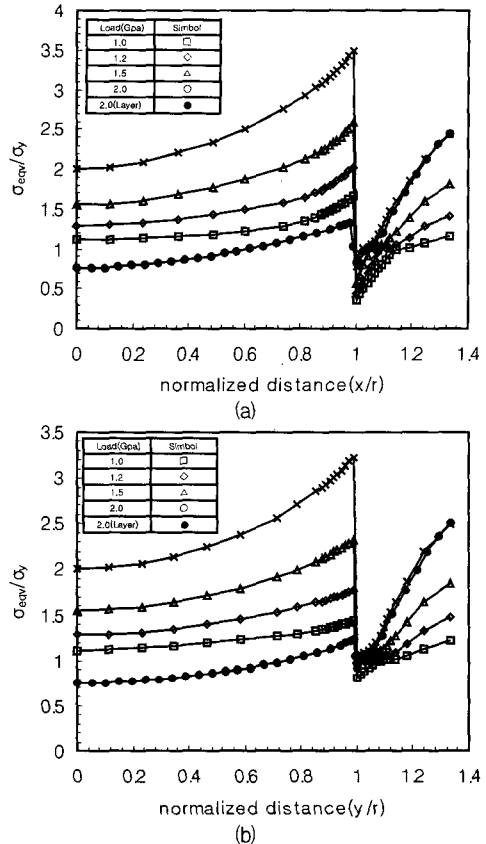


Fig. 3. Normalized equivalent stress distributions (a) along x-axis and (b) along y-axis for a different load level ($v_f=40\%$).

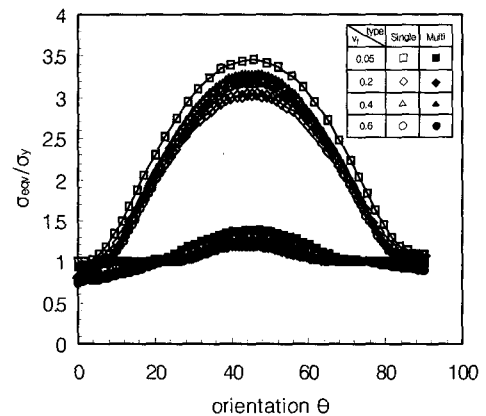


Fig. 4. Variation of the normalized von Mises stresses at the interface according to volume fraction (stress level 2GPa).

였다. 각각의 최대 값은 단층계면모델이 3.45, 3.04, 3.29, 3.18로 1.38, 1.19, 1.28, 1.23인 다층계면모델 보

다 대략 2.5배에서 3배정도를 나타내었으며, 대략 45°부근에 위치하였다. 또한 계면을 따른 방향 (θ)의 변화에 대한 급격한 등가응력 변화를 보인 기존의 단층계면모델에 비하여 다층계면모델의 경우는 매우 완만한 응력변화값을 나타내었다.

Fig. 5는 동일 하중 하의 각기 다른 섬유체적비에 대한 계면영역에서의 무차원 응력변화의 차이를 나타내고 있다. 최대값은 $\theta = 90^\circ$ 에서 나타났으며, 섬유체적비가 5%의 경우, 23° 방향각 이하에서는 압축응력분포를 나타냈으며 전체적으로 약 16° 부근 이후부터 θ 의 증가에 따라 반경방향 인장 무차원응력이 점점 증가하였다.

Fig. 6은 단층계면모델과 다층계면모델의 von Mises 등가응력 등고선분포의 예를 나타내고 있다. 다층계면모델의 경우 불성치가 선형적으로 변화하는 다층계면의 삽입으로 단층계면모델에 비해 계면에서의 응력변화가 점진적으로 완화함을 보이고 있다. 또한 최대 등가응력이 45°에서 발생됨을 알 수 있으며 x, y축상 근처에서 항복발생영역이 발달됨을 알 수 있다.

3.3. 계면영역의 소성변형

Fig. 7은 동일 하중 하에서 각기 다른 섬유체적비에 따른 단층계면과 다층계면영역에서의 소성변형의 변화를 나타내고 있다. 단층계면모델의 경우 계면내의 전체영역인 4°~5°에서 85°~90°까지 소성변형이 발생한 반면 다층계면모델의 경우 대략 20°~70°정도의 범위에서만 소성변형이 발생하였다. 각각의 소성변형에 대한 최대 값은 단층계면모델이 다층계면모델 보다 대략 2.5배에서 3배정도의 값을

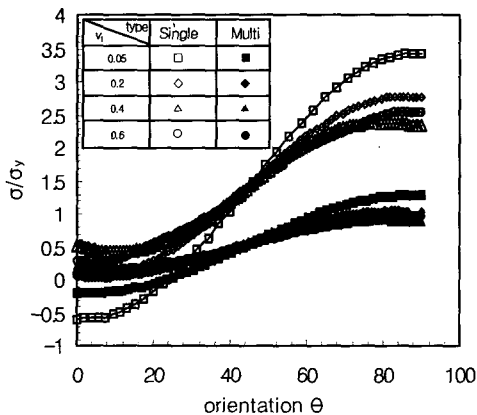


Fig. 5. Variation of the normalized radial stresses at the interface with a various fiber volume fraction.

나타내었으며, 대략 45°부근에 위치하여 좌우 대칭의 형태를 나타내었다.

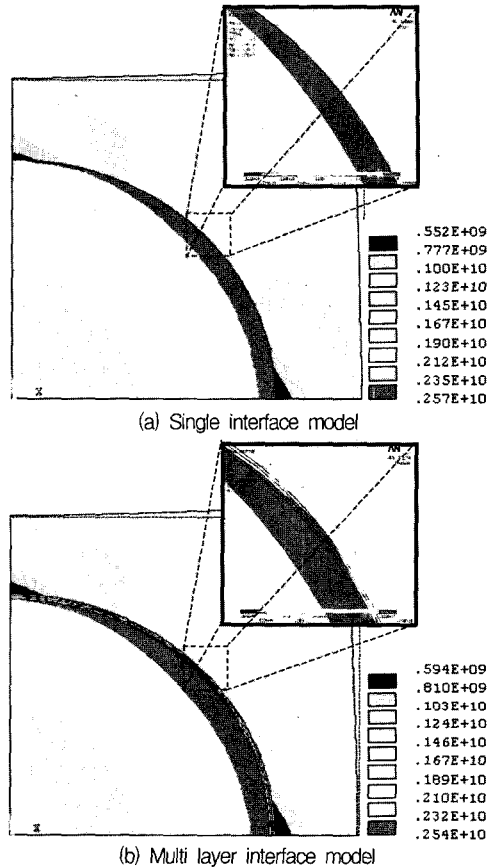


Fig. 6. The comparison of the equivalent von Mises stress contours for single and multi layer model ($v_f = 40\%$).

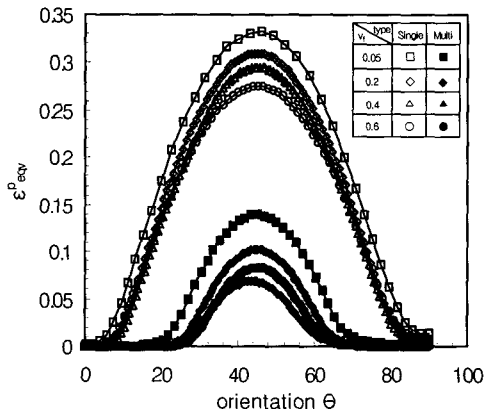


Fig. 7. Variation of the equivalent plastic strain at the interface according to the fiber volume fraction (stress level 2GPa).

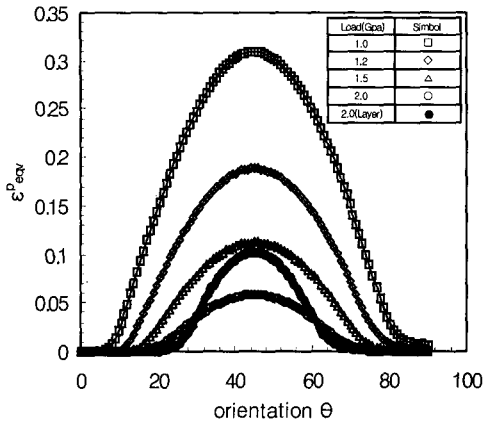


Fig. 8. Variation of the equivalent plastic strain at the interface with different loading($v_f = 40\%$).

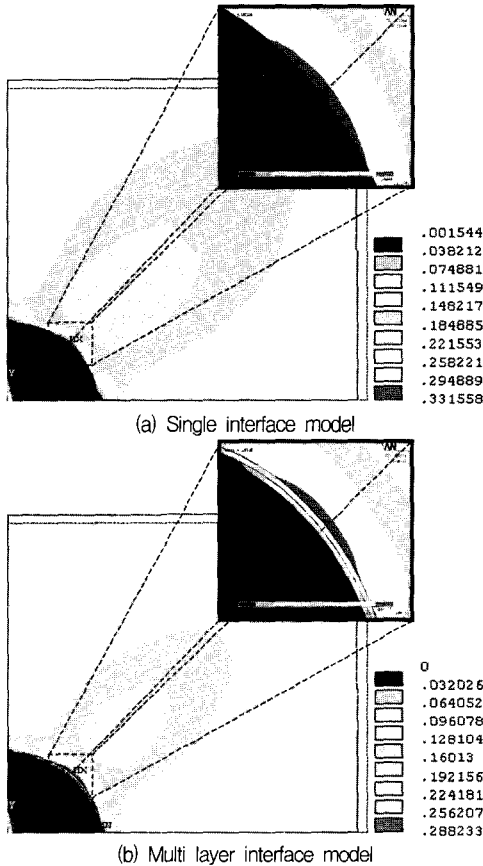


Fig. 9. The comparison of plastic strain contours for single and multi layer model($v_f = 5\%$).

Fig. 8은 동일 섬유체적비에 대해서 각기 다른 하중 수준에 따른 소성변형의 변화를 나타내고 있다. 동일 하중 하에서 최대 소성변형은 각각 3.09와 1.02

로 단층계면모델이 다층계면모델보다 약 3배정도로 나타났으며 두 모델 모두 최대값은 대략 45°부근에서 나타났다.

Fig. 9는 섬유체적비 5%에 대한 단층계면모델과 다층계면모델의 소성변형등고선을 나타내고 있다. 소성변형은 기지영역에서 $\theta = 45^\circ$ 방향으로 발달되고 있음을 알 수 있다. 또 단층계면모델에서는 계면에서 최대등가 소성변형율이 발생되어 방사형으로 진행되고, 다층계면의 경우는 기지쪽에서 발달되어 45°방향 방사상으로 성장하였다. 게다가 섬유영역과 기지영역에서의 소성변형값이 급격한 변화를 보이는 단층계면모델과는 달리 다층계면모델에서는 계면층에서부터 점차적으로 변화하는 모습을 보이고 있다.

4. 결론

본 논문에서는 횡하중을 받는 SiC/Ti-15-3 MMC에 대하여 섬유체적비를 변화시켜 계면에서의 응력장분포에 대한 탄소성 유한요소해석을 수행하였다.

그 결과 단층계면모델의 경우 x축과 y축에서의 von Mises 등가응력은 계면에서 급격한 변화를 나타내는 반면에, 다층계면모델의 응력분포는 각기 다른 물성치를 가지는 계면층의 삽입으로 인해 완만한 변화를 나타내었다. 또한 단층계면모델의 경우 최대응력치는 계면에서 나타난 반면에 다층계면모델의 경우는 기지에서 나타났다. 기지 영역에서는 다층계면의 도입으로 인한 von Mises 등가응력치에 대한 영향은 없는 것으로 나타났다.

계면영역에서의 von Mises 등가응력 및 소성변형의 변화는 단층계면모델의 경우 급격한 변화를 나타내는 반면에, 다층계면모델은 단층계면모델에 비해 완만한 변화를 나타내었다. 단층계면모델은 계면의 전체영역에서 소성변형이 발생하였고 다층계면모델은 일부영역(20°~70°)에서만 소성변형이 발생하였다. 또한 각각의 최대 값은 두 가지 계면모델 모두 45°부근에서 나타났다.

섬유체적비를 5~60%의 4가지로 변화시켜 해석한 결과 최대 von Mises 등가응력 및 소성변형은 동일 섬유체적비에서 단층계면모델이 다층계면모델보다 2.5~3배의 값으로 나타났다.

참고문헌

1) S.A. Meguid, G.Shagal, and R.Paskaramoorthy, "On

- the local elastic-plastic behaviour of the interface in titanium/silicon carbide composites”, *Composites: part A*, Vol. 33, pp. 1629~1640, 2002.
- 2) B. Fiedler, M.Hojo and S. Ochiai, “The influence of thermal residual stresses on the transverse strength of CFRP using FEM”, *Composites: part A*, Vol. 33, pp. 1323~1326, 2002.
 - 3) L. L. Shaw and D. B. Miracle, “Effects of an interfacial region on the transverse behavior of metal-matrix composites a finite element analysis”, *Acta mater*, Vol. 44, pp. 2043~2055, 1996.
 - 4) Z. Z. Du, F. W. Zok, “Limit stress conditions for weakly bonded fiber composites subject to transverse biaxial tensile loading”, *Int. J. Solids Structures*, Vol. 35, pp. 2821~2842, 1998.
 - 5) M. A. Foringer, D. D. Robertson and S. Mall, “A micromechanistic-based approach to fatigue life modeling of titanium-matrix Composites”, *Composites: Part B*, Vol. 28, pp. 507~521, 1997.
 - 6) J. M. M. de Kok and T. Peijs, “Deformation, yield and fracture of unidirectional composites in transverse loading”, *Composites: Part A*, Vol. 30, pp. 917~932, 1999.
 - 7) M. Werwer, A. Cornee, K. H. Schwalbe, “Local strain fields and global plastic response of continuous fiber reinforced metal-matrix composites under transverse loading”, *Computational Material Science*, Vol. 12, pp. 124~136, 1998.
 - 8) S. G. Warrior, M. A. M. Bourke and S. Krishnamurthy, “Assessment of the fiber/matrix interface bond strength in SiC/Ti-6Al-4V composites”, *Materials Science and Engineering A* 259, pp. 220~227, 1999.
 - 9) 이대길, 정광섭, 최진호, “복합재료 역학 및 제조 기술”, 시그마프레스, 서울, pp. 1~2, 1998.