

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

강지웅* · 권오현†

*부경대학교 대학원 안전공학과 · 부경대학교 안전공학과
(2004. 12. 14. 접수 / 2005. 5. 11. 채택)

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

Ji-Woong Kang* · Oh-Heon Kwon†

Department of Safety Engineering, Pukyong National University
(Received December 14, 2004 / Accepted May 11, 2005)

Abstract : The strong continuous fiber reinforced metal matrix composites (MMCs) are recently used in aerospace and transportation applications as an advanced material due to its high strength and light weight. 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 order to be able to utilize these MMCs effectively and with safety, it must be determined their elastic plastic behaviors at the 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. Using proposed model, the effects of the interface region and fiber arrangement in MMCs on the distributions of stress and strain are evaluated. The stress distributions of a thin multi layer interface have much less changes compared with conventional perfect interface. 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

최근 들어 각종 기계나 부품 또는 구조물 등에 사용되는 재료가 금속재료에서 세라믹 복합재료나 금속기지 복합재료(Metal Matrix Composite; 이하 MMC)와 같은 우수한 기계적 특성을 가지는 재료들로 대체되고 있는 실정이다¹⁻³⁾. 특히, 자동차 산업과 항공 산업의 경우 그 재료의 기계적인 강도 향상 뿐만 아니라 구동시의 연비향상에 까지 큰 영향

을 미칠 수가 있으며, 레저 산업이나 스포츠 산업의 경우 제품의 중량은 감소되는 반면 그 강도는 향상되어 제품의 신뢰성 향상 및 사용자의 편의에 큰 도움을 줄 수가 있다. 특히 MMC의 경우는 기존의 금속재료에 입자나 위스커 또는 섬유 등과 같은 강화재를 삽입하여 기존의 금속재료에서는 얻을 수 없었던 경량화, 고강도, 고강성, 내열성 및 내마모성 등을 얻을 수 있도록 개발되어 각종 공학 분야에 그 수요가 엄청난 증가추세에 있다^{4,5)}. 특히 MMC의 경우는 구조재나 기능재로서 부품이나 제품의 특성에 맞게 필요한 방향으로만 강도와 강성을 높여서 조절할 수 있다는 큰 장점을 가지고 있

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

지만 섬유와 기지 사이의 계면특성에 의해 중요한 영향을 받는 특성을 가진다⁶⁾. 섬유방향 하중 하에서의 장섬유강화 MMC는 금속기지체의 취약점을 보완한 강화섬유의 특성으로 인하여 우수한 성능을 보여 왔으나 계면특성의 영향을 많이 받게 되는 횡방향 하중 하에서는 기지에서 섬유로 하중이 전달되는 과정에서 각각의 물성치의 차이와 계면에서의 급격한 응력변화를 등으로 인해 종방향의 성능에 비해 훨씬 낮은 성능을 나타낸다⁷⁾. 이러한 특성으로 인하여, 횡하중을 받는 MMC의 계면에 대한 탄소성 응력장 거동평가는 중요하다 할 수 있다. 저자 등⁸⁾은 정방형섬유배치구조를 가지는 경우에 대하여 횡방향하중하에서의 응력장 분포해석을 행하였다. 따라서 본 논문에서는 앞서 수행한 해석결과⁸⁾를 토대로 Hexagon 섬유 배치구조를 가지는 SiC/Ti-15-3 MMC에 대하여 횡하중 하에서 섬유체적비에 따른 계면에서의 응력장분포에 대한 탄소성거동을 평가하였다. 또한 계면특성에 대한 평가는 다층계면모델 (Multi layer interface model)을 이용하였다.

2. 수치해석모델

본 논문에서는 Hexagon 섬유 배치구조를 가지는 SiC장섬유강화 MMC의 단면을 모델링하여 2차원 평면변형을 수치해석을 수행하였다. MMC 복합재의 수치해석에서 2차원 평면변형율의 해는 충분한 정도있는 해를 얻을 수 있다.⁹⁾ 섬유와 기지의 요소들은 2차원 사각형 8절점 요소를 사용하였다. Fig. 1 대한 유한요소모델을 나타내고 있다. 대칭의 경계조건을 고려하여 미소영역의 모델 1/4을 모델링하였다. Fig. 1에서 θ 는 횡축을 기준으로 계면상에 존재 하는 요소의 응력장위치를 나타내는 각도이다. 횡하중 하에서 MMC의 계면영역은 섬유와 기지 사이의 물성치변화에 따른 높은 응력 변화가 예상되어지고 또한 MMC제조시 기지와 의 접착력을 고려한 표면처리층을 상정하여 전보⁸⁾에서 제시된 다층계면 모델을 적용하였다. 다층계면모델은 섬유와 기지사이 에 경계층을 삽입한 것으로 계면경계가 기지와 것으로 가정하였다. Fig. 2는 재료특성치로서 탄성계수 변화에 대한 경계층 정의를 나타낸다. 식 (1)처럼 경계층 탄성계수는 섬유와 기지 사이에서 비례적으로 주어진다.

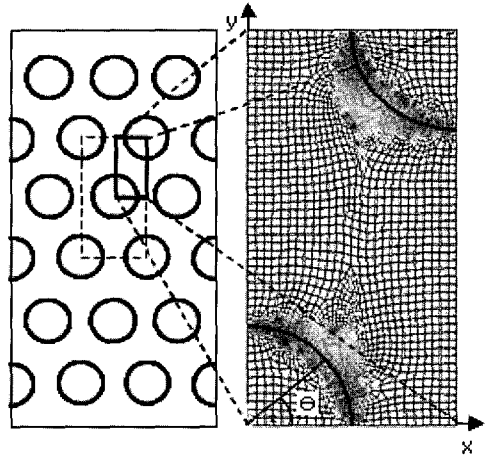


Fig. 1. Finite element model for the hexagonal array fiber reinforced Ti-15-3 matrix composite with three thin layer

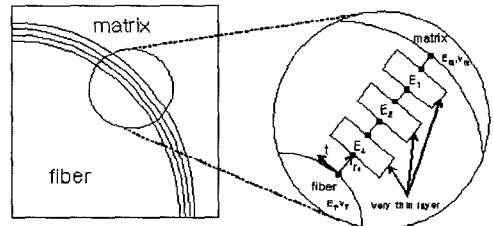


Fig. 2. Definition of multi thin interface layer modeling.

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

	Elastic Modulus (GPa)	Poisson's Ratio	Yield Strength (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

$$E_n = C E_{n-1} (n = 2, 3, 4, 5) \quad E_m \leq E_n \leq E_f \quad (1)$$

여기서 C 는 비례상수이며 E_m, E_f 는 각각 기지와 섬유의 탄성계수를 나타내고, E_n 은 각 layer에서의 값을 나타낸다. 각 경계층에서의 응력 및 변위는 연속성을 가지며 계면은 완전접합된 상태로 해석한다. 계면에 따른 변위 u 의 연속성은 다음 식처럼 쓸 수 있다.

$$\Delta u = \begin{bmatrix} u_{r_n} \\ u_t \end{bmatrix} = \vec{u}_1 - \vec{u}_f = 0 \quad (2)$$

여기서 u_i 및 u_j 은 각각 경계층의 변위 및 섬유층의 변위 벡터를 나타낸다. 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. Layer1~3의 물성치는 기지에서 섬유로 그 물성치가 선형적으로 변화하도록 하였다. 섬유와 Layer1은 선형탄성거동을 간주하였으며 기지 와 Layer2-3는 bilinear 탄소성 거동을 하는 것으로 간주하였다. 인장실험에 의하여 얻어지는 탄소성 재료 거동 곡선식은 다음식으로 주어진다.

$$\sigma_e = 88\epsilon_p \text{ (GPa)} \quad : \text{탄성역} \quad (3)$$

$$\sigma_p = 0.675 + 5\epsilon_p \text{ (GPa)} \quad : \text{소성역} \quad (4)$$

여기서 ϵ_p 는 진변형율이고, σ_e 와 σ_p 는 각각 탄성 진응력 및 소성진응력이다. 따라서 기지는 항복강도 716MPa를 가지는 bilinear 거동을 하며, 등방 가공 경화 법칙을 가진 von Mises 항복조건을 가진다.

섬유체적비는 복합재료의 단위체적당 차지하는 강화섬유의 체적비를 나타내는 것으로

$$v_f (\%) = \frac{V_f}{V_c} \times 100 \quad (5)$$

으로 주어진다. 여기서 V_f 및 V_c 는 각각 섬유 및 복합재료 전체 체적을 나타낸다. 본 연구에서 v_f 는 5~60%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

3.1. x축상의 응력분포

Fig. 3은 동일 섬유체적비($v_f=40\%$)를 가지는 각기 다른 하중수준하에서 x축에 따른 섬유와 기지의 무차원등가응력분포(σ_{eqv} : 등가응력, σ_y : 항복응력)를 나타내었다. 기존 단층계면모델의 경우 하중을 1에서 2GPa로 증가시키기에 따라 그 최대값은 1.55, 1.83, 2.27 그리고 3.01로 각각 계면에 위치하

였다. 응력은 섬유 중심에서 계면에 이르기까지 거의 고른 분포를 보이다가 계면에 도달 직전부터 상승하여 계면에서 최대값에 도달한 후 급격한 감소를 나타내어 섬유와 기지의 물성치 차이에 따른 계면취약성을 나타내었다. 반면에, 다층계면모델의 경우 계면에서의 최대값은 1.14로 동일 하중 하의 기존 계면모델에 비해 약 3배 정도 낮은 값을 나타내었으며 계면영역에서의 응력변화는 완만한 저하를 나타내었다. 이는 기지에서 섬유로 하중이 전달되는 과정에서 급격한 물성치 변화를 가지는 기존의 단층계면모델에 비해 다층계면모델의 경우 선형적으로 변화하는 물성치를 가지는 다층계면의 삽입 때문으로 여겨진다. 또한 다층계면의 삽입으로 인한 기지영역에 대한 영향은 없는 것으로 나타났다.

y축을 따른 무차원 등가응력분포 역시 x축의 경우와 유사한 경향을 나타내었다.

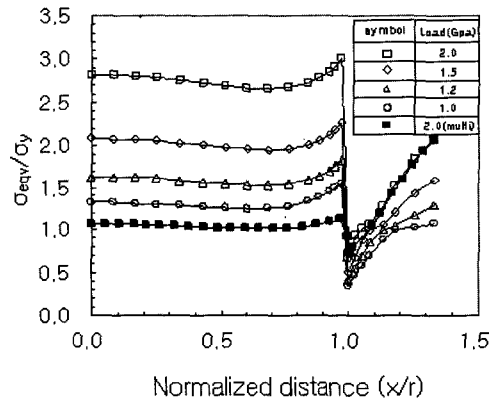


Fig. 3. Normalized stress distributions for elastic fiber and elastic-plastic matrix along the x-axis

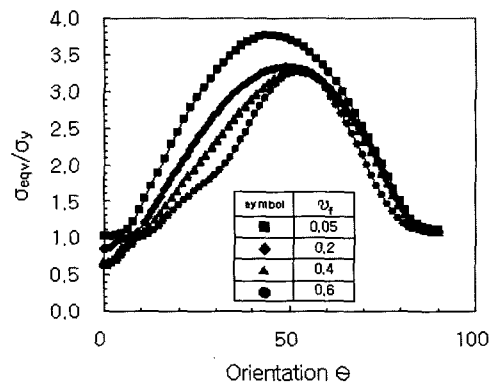


Fig. 4. Variation of the normalized von Mises stresses at the single interface according to volume fraction

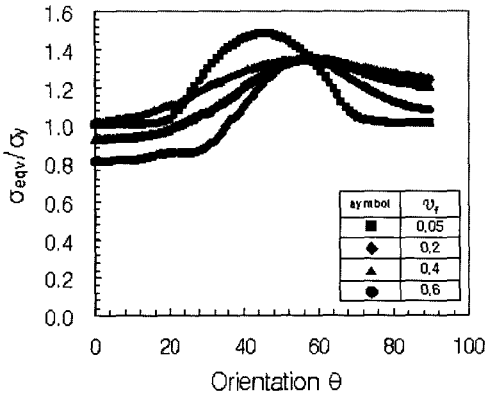


Fig. 5. Variation of the normalized von Mises stresses at the multi layer interface according to volume fraction

3.2. 계면영역의 응력분포

Fig. 4는 단층계면모델에 대해서 각기 다른 섬유체적비에 대한 무차원 등가응력분포의 변화를 나타내고 있다. 섬유체적비가 5~60%로 증가할 수록 각각의 최대값은 3.76, 3.33, 3.31 그리고 3.30으로 감소하였으며 그 위치는 45°~53°로 점차 증가하였다. 이는 섬유반경이 증가할 수록 섬유와 기지사이의 계면에 위치하는 최대응력값의 위치가 가까워지기 때문으로 여겨진다. 또한 일부 부분을 제외하고는 거의 전체영역이 항복응력을 넘어섰음을 알 수 있다. 섬유체적비($V_f=0.4$)의 경우 7° 이후부터 항복응력에 도달하여 이후 계속 증가하다가 대략 50°부근에서 3.29로 최대값에 도달한 후 급격히 감소하였다.

Fig. 5는 동일하중 하의 다층계면모델에 대해서 각기 다른 섬유체적비에 대한 무차원등가응력분포의 변화를 나타내고 있다. 섬유체적비가 5~60%로 증가할 수록 각각의 최대값은 1.48, 1.35, 1.347 그리고 1.34로 감소하였으며 그 위치는 단층계면모델에서처럼 섬유반경이 증가함에 따라 45°~56°로 점차 증가하였다. 단층계면모델과 비교하여 볼때 거의 60% 정도가 감소하였으며 이것은 계면에서의 선형적인 재료특성 때문에 응력집중현상이 완화되기 때문으로 여겨진다. 섬유체적비가 0.6인 경우를 제외한 나머지 모델은 20° 이후부터 항복응력에 도달하였다. 또한, 섬유체적비가 증가할수록 섬유간의 상호간섭으로 인하여 최대값 이후에서의 감소율이 저하됨을 나타내고 있다. 게다가 섬유체적비가 매우 작은 5%의 경우에는 단층계면모델의 경우와 유사하게 좌우 대칭형을 이루고 있으나 섬유체

적비가 더 큰 경우에는 약 55° 전후에서 최대등가응력이 형성되어 있음을 알 수 있다. 이것은 섬유 배열구조가 응력분포에 영향을 미치기 위해서는 섬유체적비가 최소 5%이상의 경우인 것을 나타낸다. 섬유체적비가 0.4의 경우에 약 20° 이후부터 항복응력에 도달하였으며 완만하게 증가하다가 57°에서 1.35로 최대값을 나타내었고 이후 완만한 감소 경향을 나타내었다.

3.3. 계면영역의 소성변형

Fig. 6은 동일 하중하의 단층계면모델에 대해 섬유체적비별로 소성변형의 변화를 나타내고 있다. 섬유체적비가 5~60%로 증가할 수록 각각의 최대값은 0.373, 0.314, 0.313 그리고 0.310으로 감소하였으며 그 위치는 Fig. 5의 응력분포에서와 같이 45°~53°로 점차 증가하였다. 또한, 거의 계면 전체영역에서 소성변형이 발생하였음을 알 수 있다. 정방형섬유배치 구조의 해석⁸⁾에서는 섬유체적비의 변화에 관계없이 좌우대칭형으로 주어졌으나 여기에서는 섬유체적비가 증가할 수록 계면에 따른 소성변형율의 증가곡선기울기가 감소되고 있음을 알 수 있다. 최대값이 형성되는 50° 전후부터는 섬유체적비의 차이에 관계없이 거의 동일한 변화를 나타내었다. 이것은 하중방향의 영향에 기인한 것으로 간주된다.

Fig. 7은 동일하중 하의 다층계면모델에 대해서 각기 다른 섬유체적비에 대한 소성변형의 변화를 나타내고 있다. 섬유체적비가 5~60%로 증가할 수록 각각의 최대값은 0.176, 0.110, 0.109 그리고 0.108로 감소하여 섬유체적비 5% 이외에는 거의

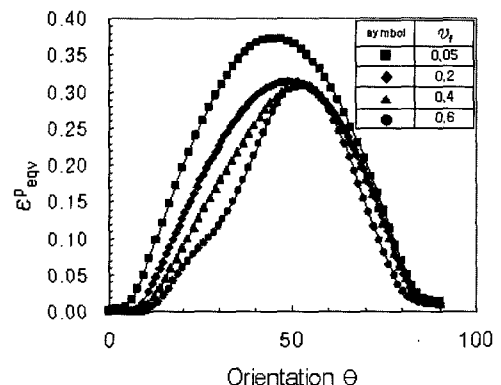


Fig. 6. Variation of the equivalent plastic strain at the single interface according to volume fraction

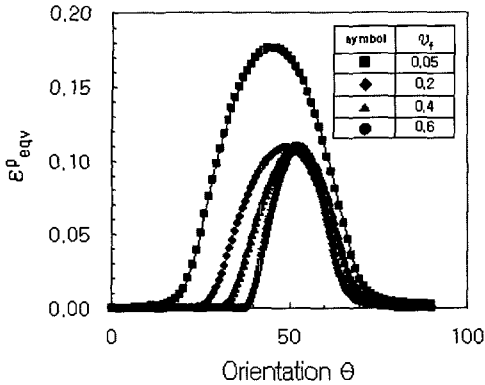
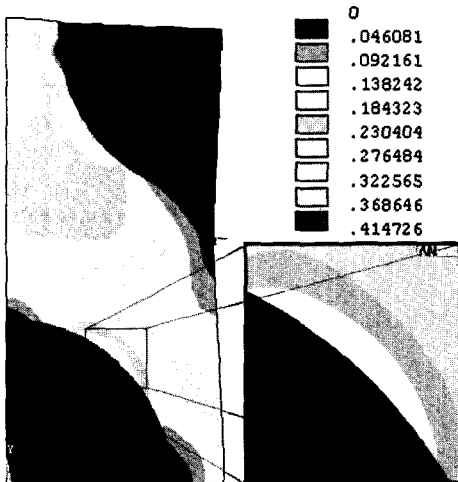
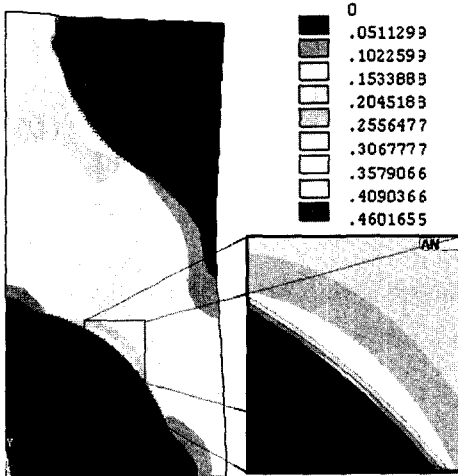


Fig. 7. Variation of the equivalent plastic strain at the multi layer interface according to volume fraction



(a) Single interface model



(b) Multi layer interface model

Fig. 8. The comparison of plastic strain contours for single and multi layer model

비슷한 최대값을 나타내었다. 또한 그 위치는 45°에서 53°로 점차 증가하였다. 소성변형은 일부 영역에서만 발생하였고 섬유체적비가 증가할수록 발생하는 영역의 범위는 줄어들었다. 단층계면모델의 경우에는 대략 10° 이후부터 계면전체 영역에서 소성변형이 발생한 반면에 다층계면모델의 경우는 약 30°~55°의 범위에서만 소성변형이 발생하였다. 최대값은 대략 3배정도의 차이를 나타내었다. 이는 선형적으로 변화하는 물성치를 가지는 다층계면의 삽입으로 인하여 계면응력상태가 완화되었기 때문으로 여겨진다.

Fig. 8은 섬유체적비 40%에 대한 단층계면모델과 다층계면모델의 소성변형등고선을 나타내고 있다. 소성변형은 계면과 기지영역에서 대략 $\theta=52^\circ$ 방향으로 발달되고 있음을 알 수 있다. 또 단층계면 모델에서는 계면에서 최대등가 소성변형율이 발생되어 방사형으로 진행되고, 다층계면의 경우는 기지쪽에서 발생하여 대략 52°방향 방사상으로 성장하였다. 이것은 소성변형이 탄소성응력거동을 하는 기지의 특성에 지배되기 때문인 것으로 생각된다. 게다가 섬유영역과 기지영역에서의 소성변형값이 급격한 변화를 보이는 단층계면모델과는 달리 다층계면모델에서는 계면층에서부터 점차적으로 변화하는 모습을 보이고 있다. 이처럼 다층계면모델의 도입은 섬유강화 MMC복합재의 응력평가에 유용한 수법이 될 것으로 여겨진다.

4. 결론

본 논문에서는 섬유체적비가 다른 Hexagon 배치 구조를 가지는 SiC/Ti-15-3 MMC에 대하여 횡방향 하중하에서 탄소성 유한요소응력해석을 수행한 결과 다음과 같은 결론을 얻었다.

- 1) 다층계면에서의 x축과 y축 von Mises 등가응력은 계면층의 삽입으로 인한 영향으로 계면상에서 완만한 변화를 나타내었으며, 정방형 섬유배치 구조의 결과와 유사한 경향을 나타내었다.
- 2) 계면영역에서의 von Mises 등가응력의 변화는 섬유체적비가 증가할 수록 그 최대값은 감소하였으며 그 발생위치는 $\theta=45^\circ$ 에서 57°로 증가하였다. Hexagon 섬유배치구조의 경우에도 다층계면을 적용하면 섬유체적비에 따른 응력 최대값은 기존의 모델에 비하여 2-3배 낮은 값을 나타내었다.

3) 계면영역에서의 소성변형에 대한 변화는 단층계면모델의 경우 거의 계면 전체영역에서 소성변형이 발생한 반면 다층계면모델의 경우 일부 구간에서만 소성변형이 발생하였다.

4) 제안된 다층계면모델은 섬유배치구조에 관계없이 횡하중을 받는 MMC복합재의 계면응력상태를 완화하는 특징을 나타내어 유용한 해석수법이 될 것으로 사료된다.

참고문헌

- 1) E.O. Akser and K.L. Choy, "Finite element analysis of the stress distribution in a thermally and transversely loaded Ti-6Al-4V/SiC fibre composite", composites: part A, Vol. 32, pp. 243~251, 2001.
- 2) J.D. Achenbach and H. Zhu, "Effect of interfacial zone on mechanical behavior and failure of fiber-reinforced composites", J. Mech. Phys Solids, Vol. 37, pp. 381~393, 1989.
- 3) Tae Hyo Park and George Z. Voyiadjis, "Damage analysis and elasto-plastic behavior of metal matrix composites using the finite element method", Engineering Fracture Mechanics, Vol. 56, pp. 623~646, 1997.
- 4) F. Schroter, H. Ismar and F. Streicher, "Numerical determination of damping in metal matrix composites", Mechanics of Composite Materials, Vol. 37, pp. 43~46, 2001.
- 5) Onur Sayman and Umran Esendemir, "An elastic-plastic stress analysis of simply supported metal-matrix composite beam under a transverse uniformly distributed load", Composites Science and Technology, Vol. 62, pp. 265~273, 2002.
- 6) S. G. Warriar, D. B. Gundel, B. S. Majumdar and D. B. Miracle, "Stress distribution in a transversely loaded cross-shaped single fiber SCS-6/Ti-6Al-4V composite", Scripta Materialia, Vol. 34, No. 2, pp. 293~299, 1996.
- 7) Z. Z. Du and 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.
- 8) 강지웅, 김상태, 권오현, "횡하중을 받는 SiC/Ti-15-3 MMC 복합재 계면영역에서의 탄소성 응력장분포거동(I)", 한국안전학회, 제19권, 4호, 2004.
- 9) S. A. Meguid and G. Shagal, "On the local elastic-plastic behavior of the interface in titanium/Silicon Carbide composite", Composites, Part A, Vol. 33, pp. 1629~1640, 2002.