

고온진공가압 티타늄 금속기 복합재료의 미시-기계적 특성에 관한 연구

하태준* · 김태원**

A Study on the Micro-mechanical Characteristics of Vacuum Hot Pressed Titanium Metal Matrix Composites

T-J. Ha, T-W. Kim

Key Words: Metal Matrix Composites, Consolidation, Micro-mechanical characteristics, Residual stress

Abstract

Vacuum hot pressing has been used for the development of Ti-MMCs using foil-fiber-foil method, and subsequent micro-mechanical characteristics of the composites are evaluated by means of several experimental processes. As shown by the results, fiber strength degradation occurs during the consolidation, and particularly residual stresses results from the thermal expansion mismatch between fiber and matrix materials during cooling process are incorporated in the changes of mechanical properties of the composites. In industrial applications, the processing conditions avoiding micro-material failures are important together with the properties of finished products, and therefore should be included in the assesment of the material characterization.

1. 서 론

연속섬유강화 티타늄금속기 복합재료 (continuous fiber reinforced titanium matrix composites)는 우수한 비강도, 내마모성, 고온특성 등에 따라 항공우주분야 및 방위산업재료뿐만 아니라 초고속운송수단 등 다양한 영역으로 그 응용의 범위를 넓혀가고 있는 추세이다[1].

그러나 이와 같은 우수한 기계적 특성이 있음에도 불구하고 금속기 복합재료는 일반적으로 예비 성형체 제작과정에서의 오염, 고온성형공정에서의 부적절한 조건 혹은 후처리 과정에서의 잘

못 등으로 인해 모재 손상, 강화재 손상 및 계면에서의 파손 등이 발생하게 되며 그 결과 완성된 복합재료의 성능 저하를 초래하게 된다[2]. 따라서 요구되는 환경과 조건을 충족시킬 수 있는 최적의 생산공정 기술이 개발되어야 함은 물론, 완성된 금속기 복합재료의 적합한 사용을 위한 기계-재료적 특성뿐만 아니라 강화재 및 계면의 손상, 강화재의 불균일 분포에 따른 성능저하, 구성재료의 열팽창계수 차이에 의해 발생하는 잔류응력의 영향, 강화재와 모재 계면강도 등 미시-기계적 성능평가를 총체적으로 고려하여야 한다.

본 연구는 포일-섬유-포일(FFF) 방식[3] 및 고온진공가압(Vacuum hot pressing, VHP) 방법[3]을 이용하여 연속섬유강화 티타늄금속기 복합재료를 제작하였으며 완성된 복합재료에 대한 구성재료의 손상 및 잔류응력, 계면 특성 등을 실험을 통해 평가하고 나아가 미시-기계적 거동특성과 파

* 한양대학교 기계설계학과 대학원

** 한양대학교 기계공학부 교수

Table 1 Mechanical properties of fiber and matrix materials

	SiC fiber	Ti-6Al-4V foil
Name(type)	SCS-6	AMS9411F
Modulus(GPa)	400	114
UTS(MPa)	3450	1029
CTE($\times 10^{-6}/^{\circ}\text{C}$)	4.1	12.13 at 900 $^{\circ}\text{C}$

손을 관찰, 분석하였다.

2. 복합재료 인장강도 모델

섬유강화 금속기 복합재료는 모재를 통해 섬유에 전달되는 하중의 증가에 따라 누적된 손상에 의한 섬유의 파단과 그에 따른 축적된 파단량이 임계치에 도달할 경우 급격한 파손에 이르는 것으로 알려져 있다[1].

복합재료의 기계적 특성을 해석함에 있어 Gundel 등[4]은 강화공정 중 발생하는 섬유의 손상과 냉각과정 중 발생하는 섬유와 모재의 잔류응력, 계면특성 등 금속복합재료의 미시-기계적 특성을 고려하여 복합재료의 인장응력 σ 를 아래와 같이 복합재료의 변형률 ε 의 함수로 제시하였으며

$$\sigma(\varepsilon) = V_f \left[\frac{\sigma_c^{m+1}}{[(\varepsilon + \varepsilon_f^*)E_f]^m} \{1 - e^{-(\varepsilon + \varepsilon_f^*)E_f/\sigma_c}\} - \sigma_f^* \right] + (1 - V_f)[\sigma_m(\varepsilon + \varepsilon_m^*) - \sigma_m^*] \quad (1)$$

여기서 V_f 는 섬유의 체적분율, E_f 는 섬유의 탄성계수, σ_c 는 섬유의 특성강도(characteristic strength), σ_f^* 와 σ_m^* 은 각각 섬유와 모재의 인장응력을 의미하며, ε_f^* , ε_m^* 은 각각 섬유와 모재의 잔류 변형률을, σ_f^* , σ_m^* 은 잔류응력을 나타낸다. 실험적으로 측정된 기계-재료특성을 바탕으로 따라서 임의 복합재에 대한 변형에 따른 응력을 구할 수 있게 된다.

3. 실험

3.1 금속기 복합재료 제작

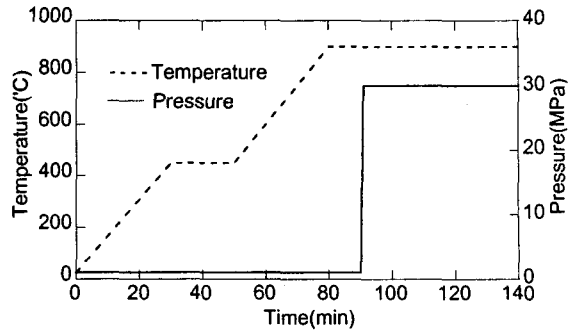


Fig. 1 Consolidation cycles for VHP test.

본 연구에 사용된 티타늄금속기 복합재료의 모재는 Ti-6Al-4V foil을, 강화재로는 직경 140 μm 인 SiC 섬유를 사용하였으며 이들 재료의 특성은 Table 1과 같다. 실험에 사용된 고온진공가압장비는 카본 가열 방식 및 유압식 압력 제어방식으로 온도와 압력을 각각 조절하였고, 열전대를 성형다이 부근에 배치하여 강화공정에 따른 온도의 변화를 관측하였으며 하중방향 변위 측정은 정밀 제작된 디지털 다이얼 게이지를 사용하였다.

섬유 번들은 ball screw 방식의 섬유 와인딩 장치와 유기 접착제(PMMA)를 이용하여 제작하였으며 화학적으로 밀링 가공된 Ti-6Al-4V 포일은 원하는 두께로 연마 후 불순물 제거를 위해 최종 세척하여 사용하였다. 이와 같은 과정을 통해 제작된 섬유 번들과 포일을 요구되는 복합재의 사양을 고려하여 반복 적층하여 예비성형체를 완성하였다. 한편 성형다이 내부에 준비된 예비성형체를 장착하여 VHP장비 내에 삽입한 후 Fig. 1과 같은 온도와 압력 사이클을 통해 강화공정을 수행하였으며 성형공정동안 10^{-3} Torr의 진공도를 유지하였다. 강화공정 완료 후 평균속도 3.9 $^{\circ}\text{C}/\text{min}$ 으로 냉각 하였으며 후처리 가공을 통해 기계-재료특성 시험을 위한 시편을 완성하였다.

3.2 잔류변형률 측정 및 인장실험

강화공정 완료 후 냉각과정에서 섬유와 모재의 열팽창계수의 차이로 인해 발생하는 복합재 내의 잔류응력과 강화공정 중 발생하는 섬유의 기계적 성능 저하를 평가하기 위해 모재 부식을 통한 섬유 추출 실험을 수행하였다. 실험에 사용된 복합재료 시편의 크기는 145 \times 10 \times 2mm이며 섬유 체적분율은 0.3으로 제작하였다. 한편 섬유는 85% H₂O, 10% HF, 5% HNO₃의 혼합 용액을 사용하

여 상온에서 20분 동안 기지재료를 부식시켜 제거한 후 추출하였으며 세척, 건조하여 사용하였다. 이와 같은 방법으로 추출된 섬유와 원래 시편의 상대길이 변화량을 측정하여 섬유의 잔류 변형률을 계산하였다.

섬유 인장실험을 위한 시편은 Fig. 2(a)와 같이 mounting tab을 이용하여 제작하였으며 균일 인장 속도 0.3mm/min를 부과하여 거동 특성을 분석하였다. 또한 추출된 섬유강도와 비교를 위해 변형전 초기 섬유의 인장실험 역시 같은 조건으로 수행하였다. 기지재료와 복합재료의 인장시편은 Fig. 2(b) 및 Fig. 2(c)와 같이 각각 제작되었으며 표면을 연마한 후 알루미늄 탭을 양단에 부착하였다. 인장실험 조건은 섬유 인장실험과 동일하게 수행하였다.

3.3 섬유 push-out 실험

복합재료의 계면전단강도 평가를 위하여 섬유 push-out 실험을 수행하였으며 이들 과정은 다음과 같다. 즉 섬유 체적분율이 0.3인 복합재료를 섬유의 배열방향과 수직하게 절단하여 최종 두께 1mm로 절단면을 연마하였으며 이를 직경 1mm 구멍의 support base에 장착하였다. Micro X-Y stage를 이용하여 섬유와 압축봉(push rod)의 끝이 일치하도록 정렬한 후 압축봉을 0.03mm/min으로 하강시키며 하중과 변위를 관찰하였다.

4. 결과 및 고찰

4.1 섬유 강도 및 인장특성

인장실험 결과를 바탕으로 섬유의 통계적 강도 분포를 2-parameter Weibull 함수를 이용하여 계산하였다. 누적 손상 확률 P_F 는 아래의 식으로 나타낼 수 있으며

$$P_F = 1 - \exp \left[\left(-\frac{L}{L_0} \right) \left(\frac{S_f}{S_0} \right)^m \right] \quad (2)$$

여기서 L 은 섬유의 길이, L_0 는 무차원화를 위한 임의의 기준 길이이며 S_f 는 섬유의 인장강도, S_0 는 Weibull 섬유 강도 매개변수, m 은 Weibull 계수이다.

인장실험 결과 섬유의 평균 인장강도는 초기 3604MPa에서 3151MPa로 약 12% 감소하였음을

확인하였다. Fig. 3은 변형 전 섬유와 강화공정 완료 후 추출한 섬유의 인장강도 분포를 나타낸 결과이다. 강화공정을 거친 섬유의 Weibull 계수가 감소한 것을 확인할 수 있으며 이는 예비성형체 제작 과정에서의 강화섬유 표면 손상, 강화공정 중 작용압력의 과다 또는 하중의 불균일 분포로 인한 손상이 주된 원인으로 볼 수 있다.

4.2 잔류응력 및 계면부 특성

구성재료의 잔류응력은 concentric cylinder model[5]을 이용하여 계산하였으며 결과는 Table 2와 같다. 섬유의 열팽창계수가 모재의 열팽창계수에 비해 작기 때문에 강화 공정 완료 후 900°C에서 상온으로 냉각되는 과정에서 압축 잔류응력이 발생하고 모재는 인장 잔류응력이 발생한 것을 확인할 수 있다.

복합재료의 계면전단강도 τ 는 섬유 push-out 실험에 의해 얻어진 하중 값을 이용하여 아래와 같이 계산할 수 있다.

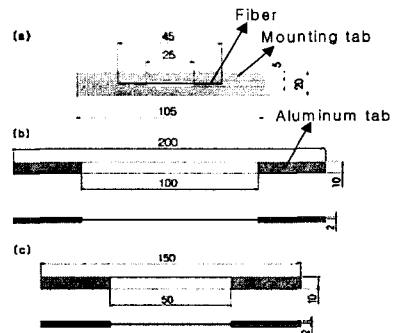


Fig. 2 Dimensions of tensile test specimens : (a) single fiber, (b) matrix and (c) composite. (unit : mm)

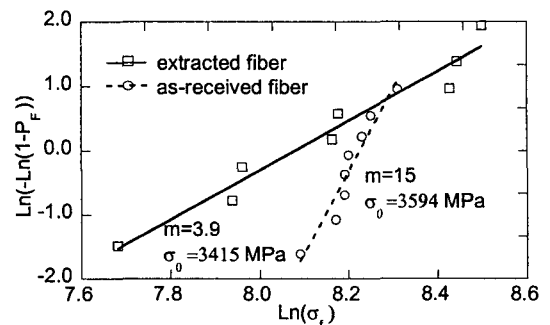


Fig. 3 Comparison of fiber strength distributions before and after consolidation.

Table 2 Results of matrix etching method

Fiber extension(μm)	330
Fiber strain(%)	-0.23
Matrix strain(%)	0.30
Longitudinal fiber stress(MPa)	-1087
Longitudinal matrix stress(MPa)	466

$$\tau = \frac{P}{\pi dt} \quad (3)$$

이 때 P 는 작용하중, d 는 섬유 직경, t 는 시편의 두께이다. 계면전단강도는 평균 118MPa로 계산되었으며 이상과 같은 결과를 바탕으로 식(1)에서 제시한 복합재료의 응력을 계산하였다.

4.3 복합재료의 인장거동

실험을 통해, 복합재료의 인장응력은 선형적으로 증가한 후 약 1100MPa 근방에서 비선형적으로 변화함을 확인하였다. 이는 혼합법칙(Rule of Mixture)으로 계산한 결과인 1400MPa보다 작은 값으로, 모재의 항복과 함께 강화공정에 따른 강도가 저하된 섬유의 파단이 시작되기 때문으로 판단된다. 또한 복합재료는 변형률 1%에서 파단되었으며 이는 초기 섬유의 파단 변형률 0.8%에 비해 증가된 값으로, 강화공정을 통해 발생한 섬유의 압축 잔류변형률의 영향에 기인된 결과로 해석할 수 있다.

Fig. 4는 실험결과와 미시-기계적 특성을 반영한 이론적 응력-변형률 특성을 나타내며 그래프에서 알 수 있듯이 변형률 0.7% 이후부터 실험치와 계산결과가 차이가 발생하였으며 이는 강화공정 중 발생하는 섬유의 파단 혹은 섬유 불균일 분포 등 복합재료 내에 존재하는 또 다른 미소결함에 기인된 것으로 생각할 수 있다.

4. 결 론

포일-섬유-포일 방식 및 고온진공가압 방법을 이용하여 연속섬유강화 티타늄금속기 복합재료를 개발하였으며 성능평가를 위한 미시-기계적 실험을 수행하였다. 강화공정을 완료한 섬유의 강도는 평균 12% 저하되었으며 공정 완료 후 냉각과정에서 섬유는 압축 잔류응력을, 모재는 인장 잔류응력을 받음을 확인하였다. 또한 개발된 복합

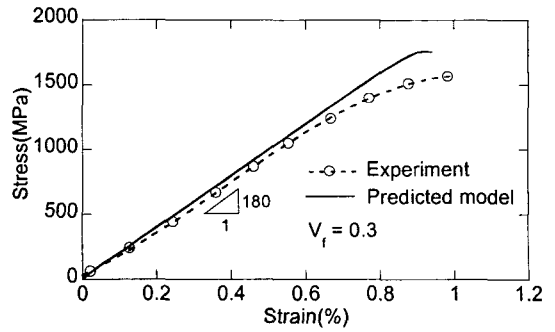


Fig.4 Comparison of longitudinal tensile stress-strain curves.

재료에 대한 인장실험을 수행하여 섬유 손상과 잔류응력 등 미시-기계적 특성이 복합재료의 거동특성에 미치는 영향을 확인할 수 있었으며 섬유의 압축 잔류변형률로 인해 복합재료의 파단 변형률이 약 0.2% 증가하였음을 알 수 있었다. 한편 보다 정확한 복합재료의 성능평가를 위해서는 섬유 손상 및 잔류응력 분석뿐만 아니라 섬유의 불균일 분포와 강화공정에서의 섬유 파단 등 다양한 미시적 연구가 필요하게 되며 이들과 관련한 후속 연구가 현재 진행 중이다.

후 기

본 연구는 한국과학재단 목지기초연구(R01-2000-000-00294-0)지원으로 수행되었음.

참고문헌

- (1) Mall, S., Fecke, T., and Foringer, M. A., Titanium Matrix Composites: Mechanical Behavior(Ed., Mall, S. and Nicholas, T.), Technomic publishing, 1998
- (2) Duva, J. M., Curtin, W. A., and Wadley, H. N. G., Acta. metall. mater., 1995, Vol. 43, No. 3, 1119-1126
- (3) 김준완, 김태원, 한국복합재료학회지, 2003, Vol. 16, No. 3, 1-8
- (4) Gundel, D. B., Wawner, F. E., Composites Science and Technology, 1997, Vol. 57, 471-481
- (5) Ramamurty, U., Dary, F. C., and Zok, F. W., Acta mater., 1996, Vol. 44, No. 8, 3397-3406