

티타늄금속기 복합재료의 강화공정에 관한 미시역학적 모델링

김준완* · 김태원**

Micro-mechanical Modeling of the Consolidation Processes in Titanium Metal Matrix Composites

Jun W. Kim, T-W. Kim

Key Words : Metal Matrix Composites, Consolidation, Titanium alloy, Foil-Fiber-Foil, Superplasticity

ABSTRACT

Metal matrix composites(MMCs) are increasingly attractive for high technology components such as aerospace applications and transportations due to their high strength, stiffness, and toughness. Many processes for fabricating MMCs have been developed, and relatively simple Foil-Fiber-Foil method is usually employed in solid state consolidation processes. During the consolidation processes at high temperature, densification occurs by the inelastic flow of the matrix materials, and the process is coupled with the conditions of pressure, temperature and volume fraction of fiber and matrix materials. This is particularly important in titanium matrix composites, and thus a generic model based on micro-mechanical approaches enabling the evolution of density over time to be predicted has been developed. The model developed is then implemented into FEM so that practical process simulation has been carried out. Further the experimental investigation of the consolidation behavior of SiC/Ti-6Al-4V composites using vacuum hot pressing has been performed, and the results obtained are compared with the model predictions.

1. 서론

연속섬유강화 티타늄금속기 복합재료(continuous fiber reinforced titanium matrix composite)는 우수한 비강도, 내마모성, 고온특성 등에 따라 항공우주분야, 방위산업재료, 초고속운송수단 등 다양한 영역으로 그 응용의 범위를 넓히고 있는 추세이다[1]. 그러나 복합재 개발을 위한 고온성형시 강화재와 모재 사이의 기계적, 열적 특성 차이 및 생산환경으로 인해 모재 손상, 계면부 손상, 강화재 손상 등이 발생함에 따라 요구되는 조건을 만족시킬 수

있는 최적화된 고온가압 강화공정(consolidation process)의 개발이 선행되어야 한다. 또한 강화과정 동안 기지재료의 고온 비탄성거동(inelastic behavior) 해석과 함께 작용압력, 온도, 시간 뿐만 아니라 모재에 대한 강화재의 분포특성, 모재와 강화재의 상대부피분율 등 다양한 미소역학적 연구가 수반되어야 하며 이를 바탕으로 실제 복합재 개발현장에서 사용 가능한 보다 정밀한 모델이 제시되어야 한다.

본 연구는 따라서 티타늄금속기 복합재료 개발에 따른 강화공정과 관련하여 기지재료의 미세조직구조 조절이 가능하고 불순물에 의한 영향이 적은 Foil-Fiber-Foil(FFF) 방식을 이용한 강화공정실험을 수행하였고 미시역학적 이론과 다공성 재료의 변형 중 기공의 발전(evolution)에 따른 구성방

* 한양대학교 기계설계학과 대학원

** 한양대학교 기계공학부 교수

정식을 바탕으로 보강재와 기지금속의 변형거동을 고찰하였으며 유한요소해석을 통해 공정변수와 강화에 필요한 다양한 조건들을 실험 결과와 비교 연구하였다.

2. 강화공정 모델링

2.1 다공성재료와 구성방정식

강화공정 동안 재료의 변형거동 해석에 있어, 강화재는 완전 탄성체로, 기지재료는 고온 크리프 변형을 동반하는 점소성체로 고려된다[2,3]. 복합재 성형을 위해 고온고압을 인가하는 동안 내재된 기공들은 제거되어야 하며 따라서 Gurson[4]이 제시한 이론을 바탕으로 다공성 기지재료(porous matrix material)의 크리프 변형거동을 모사할 수 있었다. 복합재료 개발을 위한 예비성형체는 탄성 강화보강재와 다공성 크리프 기지재료로 구성되며 보강재인 섬유는 강체이고 무한한 길이를 가진 것으로 고려될 수 있으며 따라서 섬유의 길이방향에 수직인 평면변형률(plane strain) 조건을 적용할 수 있다. 기공의 분포 효과를 고려한 Tvergaard[5]의 모델로부터 기지재료의 유동포텐셜함수(flow potential function)는 다음과 같이 나타낼 수 있으며

$$\Phi = \frac{\sigma_e^2}{2} + 2p_d f \cosh k - 1 - p_d^2 f^2 \quad (1)$$

$$k = \frac{p_m \sigma_m}{2\sigma} \quad (2)$$

이때 f 는 기공의 체적분률, σ_e 는 다공성재료의 유효응력, $\bar{\sigma}$ 는 기공이 없는 기지재료의 평균유효응력, σ_m 은 다공성 기지재료의 평균응력을 나타내고, p_d 및 p_m 는 기공의 분포를 고려한 상수이다. 한편 다공성재료의 소성변형률속도(rate of plastic deformation)는 아래식으로 표현할 수 있고

$$D^p = \dot{\lambda} \frac{\partial \Phi}{\partial \sigma} \quad (3)$$

$$\dot{\lambda} = \frac{\frac{1}{\sigma} \sqrt{\frac{3}{2}} D^p \cdot D^p}{\sqrt{1 + f^2 - 2p_d f \cosh k + \frac{p_d^2 p_m^2 f^2}{2} \sinh^2 k}} \quad (4)$$

여기서 proportionality factor $\dot{\lambda}$ 은 내적(inner product) 연산에 의해 식(4)와 같이 계산된다. 식(1)~(4)를 통하여 강화공정에 따른 복합재의 충전률(densification rate)은 따라서 기공에 대한 상대밀도 R 과 체적변형률의 항으로 다음과 같이 계산할 수 있다.

$$\dot{R} = -(1-f)D_{kk}^p = -RD_{kk}^p \quad (5)$$

2.2 초소성 변형거동

기지재료로 사용되는 티타늄합금 Ti-6Al-4V는 고온에서 확산 크리프(diffusional creep), 결정립계 미끄러짐(grain boundary sliding) 그리고 전위 크리프(dislocation creep) 등과 같은 초소성거동을 수반한다[6]. 이와 같은 재료거동을 모사하기 위해 Kim 등[7]은 변형기구와 조직의 진전을 고려하여 다음과 같은 통합화된 구성방정식을 제시하였다.

$$\bar{\dot{\epsilon}}_p = \frac{\alpha}{d^\gamma} \sinh \left[\beta \left(\bar{\sigma} - X - \bar{\sigma}_y \right) \right] \quad (6)$$

$$\dot{X} = (C_1 - \gamma_1 X) \dot{p} \quad (7)$$

$$\dot{d} = \frac{\alpha_1 + \beta_1 \bar{\dot{\epsilon}}_p}{d^\mu} \quad (8)$$

여기서 $\bar{\sigma}_y$ 는 항복응력, X 는 내부응력, \dot{p} 는 유한소성변형률속도, d 는 결정립 크기를 나타내며 $\alpha, \beta, \gamma, C_1, \gamma_1, \alpha_1, \beta_1, \mu$ 는 온도 및 변형률속도와 관계되는 재료상수이다. 따라서 식(6)~(8)을 통해 기지재료의 변형거동에 따른 $\bar{\sigma}$ 를 계산할 수 있게 된다.

2.3 유한요소 응용

복합재 성형을 위한 보강재와 기지재료의 배열은 Fig. 1(a)와 같이 나타낼 수 있으며 강화공정에

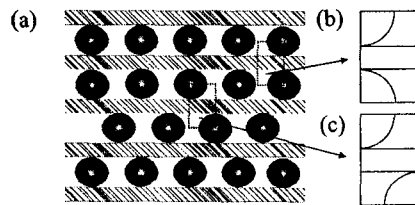


Fig. 1 (a)보강재와 기지재료의 배열 및 유한요소 해석을 위한 (b)사각 기본-셀 모델과 (c)삼각 기본-셀-모델

Table 1 실험에 사용된 재료특성

Material	Name(type)	Producer	Dimension(μm)	UTS(MPa)	Modulus(GPa)
SiC fiber	SCS-6	Textron	140(diameter)	3450	380
Ti-6Al-4V foil	AMS9411F	RMI Int.	80~150(thickness)	1029	114

따른 수치계산은 상용화된 비선형 유한요소 프로그램인 ABAQUS 와 UMAT 을 사용하였다. 해석에 이용된 모델은 Fig. 1(b) 및 (c)와 같이 강화섬유의 기하학적인 배열에 따른 영향을 고려하여 삼각 및 사각 형태의 기본-셀 모델을 설정하였다. 삼각 기본-셀 모델은 500 개의 평면변형을 4 절점 요소 (CPE4) 그리고 사각 기본-셀 모델은 370 개의 요소를 사용하여 각각 기지재료를 격자화하였다. 강화재료는 강체로 고려되었으며 기하학적인 대칭성을 고려하여 기본-셀 모델의 좌우측 외부 경계면은 작용압력에 대해 수직방향으로 구속되었고 보강재와 기지재료의 접촉 경계면의 마찰계수는 Nicolaou 등[8]의 결과와 비교를 위해 상수값 0.1 을 사용하였다. 기본-셀 모델을 이용한 강화공정의 상대밀도 R 은 복합재의 기하학적 구조로부터 초기 상대밀도 R_{ini} , 강화섬유의 직경 t_{fiber} , 기지재료의 박판 두께 t_{foil} , 섬유간 간격 l 그리고 기본-셀 모델의 하중방향 변위 $disp_{unit}$ 을 이용하여 다음과 같이 구할 수 있다.

$$R = \frac{t_{foil} l R_{ini} + 2\pi t_{fiber}^2}{(2t_{foil} + t_{fiber} - disp_{unit}) l} \quad (9)$$

3. 강화공정 실험

실험에 사용된 진공고온가압(Vacuum Hot Pressing; VHP) 장비는 고주파 유도코일방식과 기계식압력 제어방식으로 온도 및 압력을 각각 조절하였고 $10^{-5} \sim 10^{-4}$ torr 의 진공도를 유지할 수 있도록 하였다. 열전대를 성형체 다이에 용접 부착하여 강화공정에 따른 온도를 정밀 측정하였으며 성형체의

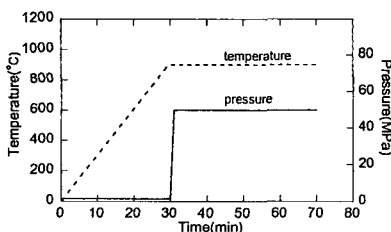


Fig. 2 강화공정의 온도 및 압력 사이클.

하중방향 변위 측정은 정밀 제작된 디지털 다이얼 게이지를 이용하였다. 실험에 사용된 시편은 ball screw 가 장착된 fiber winding 장치를 이용하여 예비성형체의 섬유간 간격을 160, 200, 240 μm 의 세 가지 형태로 제작하였으며 유기접착제를 이용하여 고정된 후 실험조건에 따라 80, 100, 120, 150 μm 의 두께로 가공한 Ti-6Al-4V 박판과 반복 적층하였다. 실험에 사용된 재료의 특성은 Table 1 과 같다. 복합재 제작을 위해 Fig. 2 와 같은 온도, 압력 사이클을 인가하였으며 성형체의 수직변위가 일정하게 유지될 때까지 강화공정을 수행하였다. 강화공정이 완료된 후 노냉하였으며 완성된 복합재 시편은 일련의 후처리 과정을 통해 기공의 진전 및 조직특성을 관측할 수 있었다.

4. 실험 결과 및 고찰

Fig. 3 은 강화공정 동안 발생한 하중방향의 변위를 나타낸다. 다공성재료에 대한 구성방정식과 기지재료의 초소성 변형거동식을 이용한 계산값과 실험값이 잘 일치함을 알 수 있으며 강화공정 초기에 발생한 변위는 공정이 진행될수록 일정하게 유지됨을 볼 수 있다. 또한 동일한 압력조건 하에서 온도가 증가함에 따라 강화공정이 빠르게 진행함을 알 수 있다. 한편 일정한 온도에서 압력조건에 따른 상대밀도의 변화는 Fig. 4 와 같고 결과에서 알 수 있듯이 압력이 높을수록 더욱 빠른 강화공정이 이루어지게 된다. Fig. 5 는 동일한 온도 및 압력조건 하에서 강화섬유 간격에 따른 결과를 나타낸다. 강화섬유 간의 간격이 클수록 조속한 강화공정이 진행됨을 보여주고 있으며 따라서 FFF 방식을 이용한 강화공정의 경우 보강재의 체적비와 초기 상대밀도에 직접 관계되는 섬유 간격

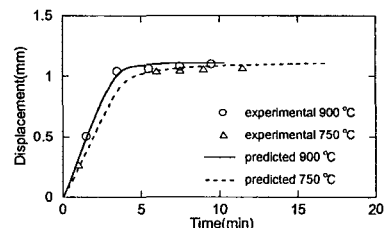


Fig. 3 작용 압력 50MPa: 온도에 따른 하중방향 변위.

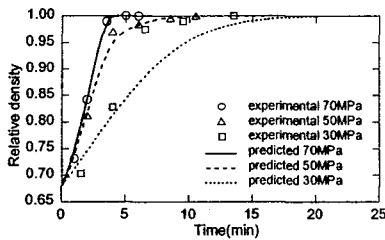


Fig. 4 온도 750 °C : 작용 압력에 따른 상대밀도 변화.

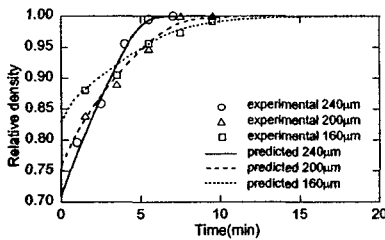


Fig. 5 온도 875 °C 작용 압력 50MPa: 섬유간 간격에 따른 상대밀도 변화.

은 공정변수의 결정에 중요한 인자가 됨을 알 수 있다. 한편 금속복합재 제작을 위한 강화공정에서 기지재료로 사용되는 박판재료 두께의 불균일성과 공정중에 발생하는 강화섬유의 swimming 등으로 인한 강화재의 배열특성은 실제의 복합재의 성능 및 강화공정에 큰 영향을 미치게 되며[8] 이와 같은 특성을 고찰하기 위해 기본-셀 모델을 이용한 유한요소해석을 수행하였다. Fig. 6 은 기본-셀

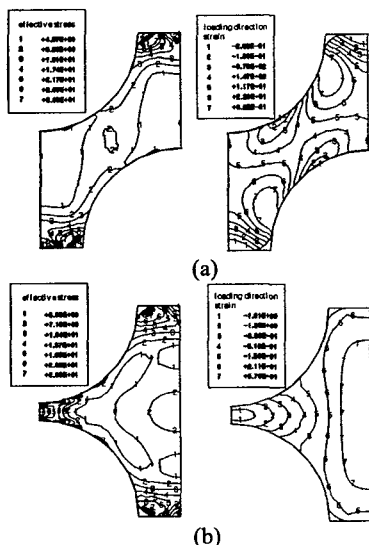


Fig. 6 온도 875 °C, 작용압력 50MPa, 섬유간격 200 µm, 박판두께 80 µm : 유한요소해석을 이용한 (a)삼각 기본-셀 모델 및 (b)사각 기본-셀 모델의 유효응력과 하중방향 변형률.

모델에서 강화공정이 완료되기 직전의 유효응력과 하중방향의 변형률을 나타낸다. 삼각 기본-셀 모델이 사각 기본-셀 모델보다 국부 변형률의 차이가 상대적으로 작고 동일한 작용 압력에서 더욱 빠른 강화공정이 이루어짐을 알 수 있으며 따라서 섬유배열의 기하학적인 형태는 강화공정에 큰 영향을 미치게 됨을 확인할 수 있다.

5. 결론 및 요약

본 연구는 FFF 방식을 이용한 SiC/ Ti-6Al-4V 연속섬유강화 금속기 복합재료 개발과 관련하여 미시역학적 이론을 바탕으로 강화재와 기지금속의 기계적 변형거동을 고찰하였으며 특히 다공성재료 및 초소성 기지재료와 연계된 구성방정식을 제시하였다. 고온가압 강화공정에서 요구되는 다양한 공정변수와 기하학적 인자 및 인가 조건들이 실험 결과와 함께 비교 연구되었으며 강화공정이 진행될수록 성형체의 상대밀도 변화율이 작아지게 되고, 강화가 완료될수록 현저히 느린 속도로 진행됨을 알 수 있었다. 한편 인가 온도 및 압력의 영향뿐만 아니라 강화섬유의 기하학적 배열에 따른 강화재와 기지재료의 초기 상대밀도 또한 공정에 중요한 변수가 됨을 알 수 있었고, 사각-기본셀 모델에서 삼각형태의 배열로 이동함에 따라 공정 소요시간이 단축됨을 알 수 있었다.

후 기

본 연구는 한국과학재단 목적기초연구(R01-2000-00294)지원으로 수행되었음.

참고문헌

- (1) William, C. H. Jr., Metal Matrix Composites: Processing and Interfaces(Ed., R. K. Everett, R. J. Arsenault), Academic Press, 1991
- (2) Bordere, S., Magny, C., Marchal, K., Ballet, M., and Levailant, C., J. of Materials Processing Technology, 1996, Vol. 62, 100-107
- (3) Dutton, R. E., Semiatin, S. L., and Goetz, R. L., Materials Science and Engineering, 1996, A221, 85-93
- (4) Gurson, A. L., Transactions of the ASME, 1977, Vol. 99, No. 1, 2-15
- (5) Tvergaard, V., Int. Journal of Fracture, 1981, Vol. 17, No. 4, 389-407
- (6) Hamilton, C. H., Proc. Symp. on Superplastic Forming, LA, CA, USA, 1984, 13-22
- (7) T W Kim, Dunne F P E, Proc Instn Mech Engrs, 1997, Vol. 211, 367-380
- (8) Nicolaou, P. D., Pehlier, H. R., and Saigal, S., Int. J. Mech. Sci., 1995, Vol. 37, No. 7, 669-690