

## 論文

## 티타늄 금속기 복합재료의 미시-기계적 특성에 관한 연구

하태준\*, 김태원\*\*

## A Study on the Micro-mechanical Characteristics of Titanium Metal Matrix Composites

T-J. Ha\*, T-W. Kim\*\*

## ABSTRACT

Vacuum hot pressing has been used for the development of titanium metal matrix composites using foil-fiber-foil technique. Subsequent micro-mechanical characteristics of the composites are then investigated by means of several experimental methods. The levels of consolidation, together with mechanism based failure processes of the materials have been analyzed by employing a thermo-acoustic emission technique. 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 finished products. In industrial applications, both qualitative and quantitative evaluations of the material-mechanical characteristics are particularly important, and therefore must be included in process development. The present paper represents a methodology by which this can be achieved.

## 초 록

고온진공가압 기술 및 포일-섬유-포일 방식을 이용하여 티타늄 금속기 복합재료를 개발하였으며, 완성된 복합재료의 미시-기계적 특성평가를 위해 다양한 실험을 수행하였다. 또한 열-음향방출 실험을 통해 강화공정 진행정도와 더불어 공정 중 발생한 복합재료의 결함을 검출하고, 변형기구를 바탕으로 한 파손과정을 분석하였다. 결과에서 보듯이 강화공정 중 발생하는 섬유 손상뿐만 아니라 냉각 과정에서의 섬유와 모재간의 열팽창 차이에 따른 미시손상이 복합재료의 기계적 성능에 영향을 미침을 확인하였다. 금속기 복합재료의 개발과 이를 이용한 산업으로의 적용은 완성된 복합재료의 미시-기계적 특성에 대한 정량-정성적인 분석과 함께 적합한 평가를 요구하며 따라서 공정 개발에 반드시 수반되어야 한다.

**Key Words :** 금속기 복합재료(metal matrix composites, MMCs), 강화공정(consolidation), 미시-기계적 특성(micro-mechanical characteristics), 잔류응력(residual stress), 열-음향방출기법(thermo acoustic emission technique)

## 1. 서 론

티타늄금속기 복합재료(titanium matrix composites)는 우

수한 비강도, 내마모성, 고온특성 등에 따라 항공우주분야 및 방위산업재료뿐만 아니라 초고속 운송수단 등 다양한 영역으로 그 응용의 범위를 넓혀가고 있는 추세이다[1-3].

\* 한양대학교 기계설계학과 대학원

\*\*+ 한양대학교 기계공학부, 교신저자(E-mail:twkim@hanyang.ac.kr)

Table 1 Characteristics 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 $^{\circ}\text{C}$

그러나 이와 같은 우수한 기계적 특성이 있음에도 불구하고 예비성형체 제작과정에서의 오염, 고온성형공정에서의 부적절한 조건 혹은 후처리 과정에서의 잘못 등으로 인해 모재 손상, 강화재 손상 및 계면에서의 파손 등이 발생하게 되며 그 결과 완성된 복합재료의 성능 저하를 초래하게 된다[4]. 따라서 요구되는 환경과 조건을 충족시킬 수 있는 최적의 생산기술 개발이 선행되어야 함은 물론, 완성된 금속기 복합재료의 적합한 사용을 위하여 강화재 및 계면의 손상, 강화재의 불균일 분포에 따른 성능저하, 구성재료의 열팽창 차이에 의해 발생하는 잔류응력의 영향, 강화재와 모재의 계면강도 등 미시-기계적 성능평가를 체계적으로 고려하여야 한다.

본 연구에서는 포일-섬유-포일(FFF) 방식[5] 및 고온진공가압(vacuum hot pressing, VHP) 기술[5]을 이용하여 연속섬유 강화 티타늄금속기 복합재료를 제작하였다. 강화공정 기술과 관련하여 온도, 압력 등과 같은 주요 공정변수들에 따른 거동 특성을 분석하고 비파괴적 기법인 열-음향방출(Thermo-AE, thermo acoustic emission)실험을 수행하여 공정에 따른 기공의 변화와 강화공정 중 발생한 모재 및 강화재의 손상을 정량-정성적으로 평가하였다. 또한 섬유 손상 및 잔류응력, 계면 특성 등 재료-기계적 특성 연구를 위해 완성된 복합재료에 대한 미시-기계적 실험을 수행하였으며 이들의 결과로부터 복합재료의 기계적 성질, 변형기구를 바탕으로 한 파손과정 등을 체계적으로 고찰하였다.

## 2. 실험

### 2.1 강화공정 실험

티타늄금속기 복합재료 제작과 관련하여, 기지재료는 두께 80~150  $\mu\text{m}$ 의 Ti-6Al-4V foil이 사용되었으며, 강화재는 직경 140  $\mu\text{m}$ 인 SiC 섬유가 이용되었다. 각각의 재료 특성은 Table 1과 같다. 실험에 사용된 고온진공가압장치는 카본가열 방식 및 유압식 압력제어 방식으로 온도와 압력을 각각 조절하였고, 열전대를 성형 다이 부근에 배치하여 강화공정에 따른 온도의 변화를 관측하였으며 하중방향 변위측정은 정밀 제작된 디지털 다이얼 게이지를 사용하였다.

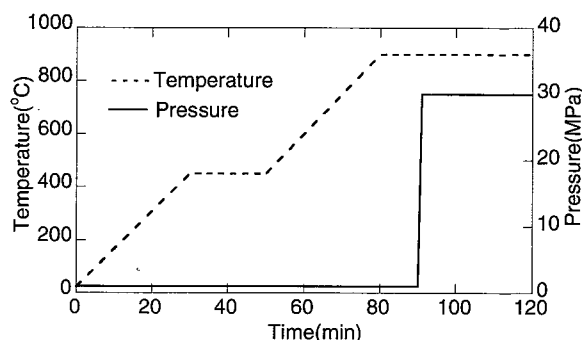


Fig. 1 Consolidation cycles for VHP test.

섬유 번들은 ball screw 방식의 섬유 와인딩 장치를 이용하여 일정한 섬유간 간격을 유지할 수 있도록 하였으며, 유기 접착제(PMMA)를 이용하여 고정된 후 섬유의 길이방향에 수직하게 절단하여 제작하였다. 화학적으로 밀링 가공된 Ti-6Al-4V 포일은 원하는 두께로 연마 후 불순물 제거를 위해 최종 세척한 후 사용하였다. 이와 같은 과정을 통해 준비된 섬유 번들과 포일을 실험 조건에 맞게 반복 적층하여 예비성형체로 완성하였다. 준비된 예비성형체를 오픈 채널(open channel)형태의 인코넬(inconel) 성형 다이 내부에 장착하여 VHP장비 내에 삽입한 후, Fig. 1과 같은 온도와 압력 사이클을 통해 강화공정을 수행하였고 성형공정 동안  $10^{-3}$  torr의 진공도를 유지하였다. 완성된 복합체의 성능 저하를 초래할 수 있는 불순물로 작용될 수 있는 유기접착제는 450  $^{\circ}\text{C}$  온도에서 30분간 완전 연소, 제거시켰으며, 목적온도에 도달한 후 온도와 압력이 일정하게 유지된 상태에서 성형체의 수직변위의 변화가 발생하지 않을 때까지 강화공정을 수행하였다. 강화공정 완료 후 노냉 하였으며 일련의 후처리 과정을 거쳐 기계-재료특성 시험을 위한 시편을 완성하였다.

### 2.2 열-음향방출 실험

물리적인 힘에 의해 변형이나 파괴가 일어나면 재료 내부에 축적되어 있던 변형에너지는 파면 형성 에너지, 열에너지, 격자 변형 에너지, 그리고 탄성파와 같은 여러 형태로 변환된다. 이때 외부로부터 계속 장치의 힘에 의해 가시적으로 검출된 탄성파를 AE 신호라 하며 이러한 파동을 압전 센서를 이용하여 검출함으로써 재료 내부의 결함을 확인하게 된다[6]. 특히 열-음향방출 실험은 기계적으로 무부하인 상태에서 열 사이클을 시편에 가하여 발생하는 AE 신호를 측정하는 방법으로 최근 복합재료의 미시 파손기구 해석 등에 많이 사용되고 있다[7,8]. 본 연구에서는 열-음향방출 실험에 의해 측정된 신호의 발생 수, 에너지와 진폭, 시간-주파수 특성 등의 결과를 통해 각각의 신호특성을 체계적으로

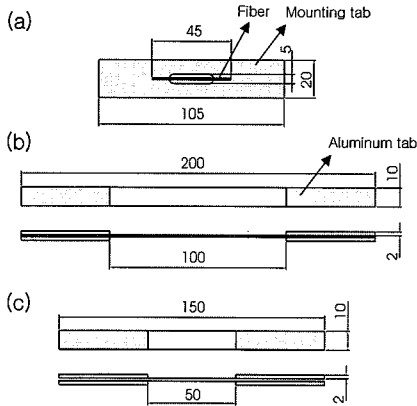


Fig. 2 Dimensions of tensile test specimens : (a) single fiber (b) matrix, and (c) composite(unit:mm).

분류하였다. 또한 복합재 내부 기공의 분포에 따른 강화공정의 진행 정도와 함께 공정 중 발생한 복합재료 시편 내부에 존재하는 미소결함을 검출하고 이에 대응하는 손상기구를 추정하였으며, 이상과 같은 결과를 바탕으로 티타늄 금속기 복합재료의 강화공정에 따른 정량-정성적인 특성을 평가하였다.

열-음향방출 실험을 위하여, AE 측정 장치를 PC에 연결하고 석영판을 전기로 속에 배치시킨 후 wave-guide 봉의 한 쪽 끝에 커플러(couplant)인 그리스를 이용하여 시편을 부착하고 다른 쪽 끝에는 AE 센서를 부착하여 석영판 내부에 투입하였다. 시편에서 발생하는 AE 신호는 wave-guide 봉을 통해 전달되어 봉의 바깥쪽 끝에 설치된 AE 센서에 의해 감지된다. 또한 석영판내의 온도는 열전대를 wave-guide 봉의 반대편에 삽입하여 측정하였다. 시편은 상온에서 160 °C 까지 평균 가열속도 5.3 °C/min으로 가열한 후 다시 상온까지 냉각하였으며 총 냉각시간은 1시간 30분이 소요되었다. 열 사이클이 가해지는 동안 AE 신호가 발생하였으며 센서를 통해 신호의 발생 수, 진폭, 에너지를 각각 측정하였다.

### 2.3 잔류응력 측정 및 인장실험

강화공정 완료 후 냉각과정에서 섬유와 모재의 열 팽창 차이로 인해 발생하는 복합재 내부의 잔류응력 및 공정 중 발생하는 섬유의 기계적 성능 저하를 평가하기 위해 모재 부식을 통한 섬유추출실험(matrix etching method)[9,10]을 수행하였다. 실험에 사용된 복합재료 시편의 크기는 145×10×2 mm이며 섬유 체적분율은 0.3으로 제작하였다. 한편 섬유는 85 % H<sub>2</sub>O, 10 % HF, 5 % HNO<sub>3</sub>의 혼합 용액을 사용하여 상온에서 20분 동안 기지재료를 부식시켜 제거한 후 추출하였으며 세척, 건조하여 사용하였다. 이와

같은 방법으로 추출된 섬유와 공정 전 원래 복합재료 시편의 상대길이 변화량을 측정하여 섬유의 잔류 변형률을 계산하였다.

섬유 인장실험을 위한 시편은 Fig. 2(a)와 같이 mounting tab을 이용하여 제작하였으며 균일 인장속도 0.3 mm/min을 부과하여 거동 특성을 분석하였다. 또한 공정 완료 후 추출된 섬유 강도와의 비교를 위해 변형 전 초기 섬유의 인장실험 역시 같은 조건으로 수행하였다. 기지재료와 복합재료의 인장시편은 각각 Fig. 2(b) 및 Fig. 2(c)와 같이 제작되었으며 표면을 연마한 후 시편 장착시의 손상(gripping damage) 방지를 위해 알루미늄 탭을 양단에 부착하였다. 인장실험 조건은 섬유 인장실험과 동일하게 수행하였다.

### 2.4 섬유 push-out 실험

복합재료의 계면강도는 강화섬유와 기지재료의 접착강도를 말하며 이러한 계면강도가 너무 낮으면 섬유에 의한 강화 효과를 기대하기 어렵고 반대로 너무 높으면 복합재료의 파괴인성을 저하시키는 요인이 된다. 따라서 계면강도는 복합재료의 성능에 중요한 영향을 미치게 되며 이러한 계면전단강도 평가를 위하여 섬유 push-out 실험[11]을 수행하였다. 즉 섬유 체적분율이 0.3인 복합재료를 섬유의 길이 방향과 수직하게 절단하여 최종 두께 1 mm로 절단면을 연마하였으며 이를 직경 1 mm 구멍의 지지대에 장착하였다. Micro X-Y stage를 이용하여 섬유와 압축 봉(push rod)의 끝이 일치하도록 정렬한 후 압축 봉을 0.03 mm/min으로 하강시키며 하중과 변위를 관찰하였으며 이때의 최대 하중 값을 이용하여 계면전단강도를 계산하였다.

## 3. 결과 및 고찰

### 3.1 강화공정 실험 결과

티타늄금속기 복합재료의 개발과 관련하여, 먼저 최적의 강화공정 조건을 선정하기 위해 주요 공정변수들에 따른 실험결과를 분석하였다.

Fig. 3은 동일한 기하학적 조건 및 섬유의 체적분율 하에서 온도를 달리한 경우 강화공정 동안 발생한 성형체의 하중 방향의 변위를 나타내며, Fig. 4는 같은 조건에서 압력을 달리한 경우 상대밀도의 변화를 나타낸 그래프이다. 결과에서 보듯이 티타늄금속기 복합재료의 경우 온도보다는 압력에 더욱 빠른 강화공정이 진행됨을 확인하였다. 또한 강화공정이 진행될수록 성형체의 상대밀도 변화율이 작아지게 되고, 강화가 완료될수록 현저히 느린 속도로 공정이 진행됨을 알 수 있었다. 이는 공정의 진행에 따라 잔류하는, 강화섬유와 이웃한 두 박판의 사이에 존재하는 cusped 형태의 미세 기공이 쉽게 제거되지 않음에 기인된다. 한편 금속기

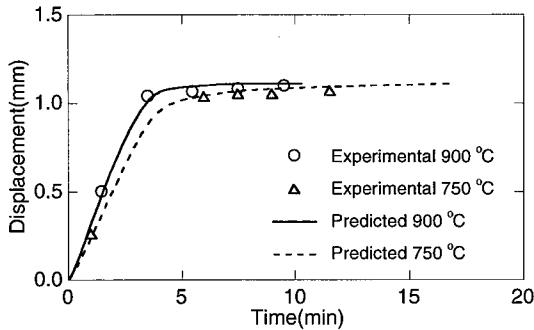


Fig. 3 Variations of loading direction displacement for the two different temperatures under 50 MPa.

복합재료의 충전 거동 해석과 관련한 구성방정식 개발과 모델링 결과에서 제시한 바와 같이[5], 다공성재료의 기공의 표면적이 작을수록 작용하는 평균응력의 효과는 감소하며 따라서 표면적이 넓을수록(i.e., 섬유-포일-섬유 방식에서 있어서는 섬유간 간격의 증가 및 두 층간의 섬유가 이루는 각도의 증가로 인해 기공의 표면적이 넓어짐) 평균응력이 미치는 효과는 증가하게 된다. 공정의 진행에 따른 기공의 변화는 복합재 제작에 중요한 요소로 고려되어야 하며 따라서 열-음향방출기법 등을 이용하여 충전 거동의 정량·정성적인 분석 및 고찰을 수행하였다.

### 3.2 열-음향방출 실험 결과

강화공정과 관련하여 복합재료 내부의 미세적 변화에 따른 특성 해석을 위해 열-음향방출기법을 이용하여 완성된 복합재료 시편의 내부에 존재하는 미세기공의 상태를 측정, 분석하였다. Fig. 5(a), (b)는 목표 온도에 도달한 후 각각 3분과 10분 동안 강화공정이 진행된 시편의 사진이며 Fig. 6(a), (b)는 이러한 시편의 열-음향방출 실험결과이다. 부과된 열 사이클 동안 측정된 AE 신호 발생 수를 온도와 시간에 따라 표시하였으며, 강화공정이 3분간 진행된 시편에 비해 10분간 진행된 시편에서 AE 신호의 발생수가 현저하게 감소한 것을 확인할 수 있었다. 이러한 열-음향방출 기법을 이용한 분석결과는 강화공정 실험 및 조직관찰을 통해 측정된 기공의 분포 결과[5]와 잘 일치함을 알 수 있었으며 이를 통해 복합재료 제작 시 강화공정의 진행정도를 열-음향방출 기법을 통해 정량적으로 평가할 수 있음을 확인하였다.

복합재료에서 발생하는 손상의 종류는 크게 모재 손상, 계면 손상, 섬유 손상 등으로 나눌 수 있으며 AE 신호는 이러한 손상의 원인과 종류에 따라 각각 다른 신호 특성을 보이게 된다[7,12]. 실험을 통해 측정된 AE 신호를 시간·주파수 영역에서 해석함으로써 시편 내부에 존재하는 기공의

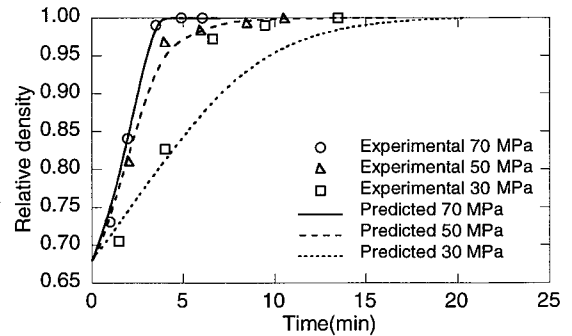
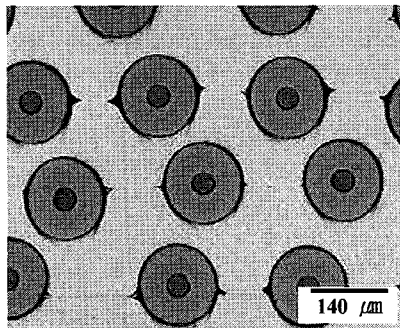


Fig. 4 Variations of relative density for the three different pressures at 750 °C.

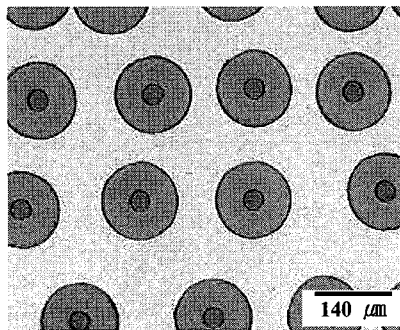
Table 2 Classification of AE signals

	Type I	Type II	Type III
Amplitude (dB)	30~45	45~60	60~
Energy	0~15	15~45	45~
Frequency (kHz)	0~200	50~350	50~450
Intensity	0.01~0.1	0.1~0.5	0.5~3.0
Failure mechanisms	Matrix failure	Matrix failure and interface debonding	Fiber fracture

분포 및 강화공정 중 발생하는 구성재료의 손상 특성을 분석하였다. 이를 위해 상용 프로그램인 MATLAB을 사용하였으며 시간·주파수 분석법인 단시간 푸리에 변환(short time Fourier transform, STFT)을 이용하여 신호를 처리하였다. 열 사이클 동안 발생된 AE 신호는 진폭과 에너지, 시간·주파수 특성 등을 고려하여 Table 2와 같이 세 가지 형태로 분류할 수 있으며, Fig. 7은 STFT를 이용하여 AE 신호를 처리한 결과이다. type-I은 주파수 대역이 0~200 kHz이며 신호발생 초기에 강도가 높은 특징을 가지는 반면, type-II는 주파수 대역이 50~350 kHz이며 신호 중반의 강도가 높다. 한편 type-III는 주파수 대역이 50~450 kHz이며 다른 신호들에 비해 전체적으로 강도가 높은 특징을 나타내며, 그림의 오른쪽 히스토그램은 이와 같은 신호의 강도를 나타낸다. 또한 type-I으로부터 type-III로 감에 따라 신호의 강도가 증가함을 알 수 있다. 낮은 진폭, 에너지, 주파수 대역을 가지는 type-I 신호는 강화공정 3분을 거친 시편에서 많이 발생하였으나 강화공정 시간이 증가함에 따라 발생 빈도는 감소하였으며 강화공정이 완료된 시편에서는 발생하지 않았다. 따라서 type-I 신호는 복합재료 내에 잔존하는

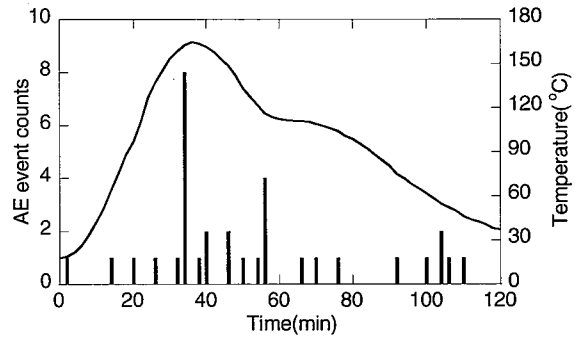


(a)

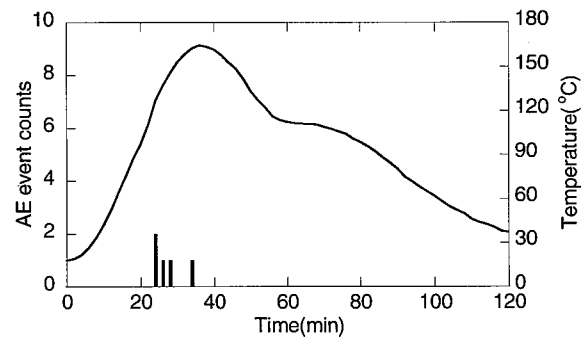


(b)

Fig. 5 Photographs showing (a) partially consolidated composite with cusped pores, and (b) fully consolidated composite.

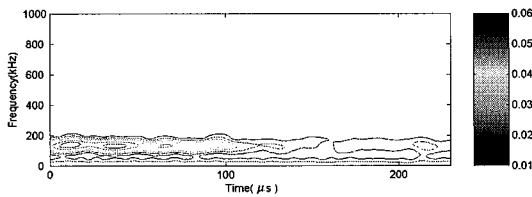


(a)

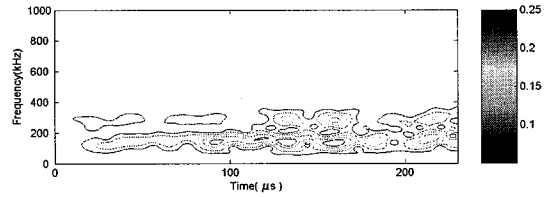


(b)

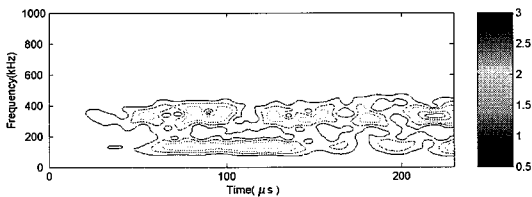
Fig. 6 Thermo AE behavior of (a) partially consolidated for 3 min, and (b) fully consolidated for 10 min.



(a)



(b)



(c)

Fig. 7 Results of short time Fourier transform for AE signals: (a) type-I, (b) type-II, and (c) type-III signals.

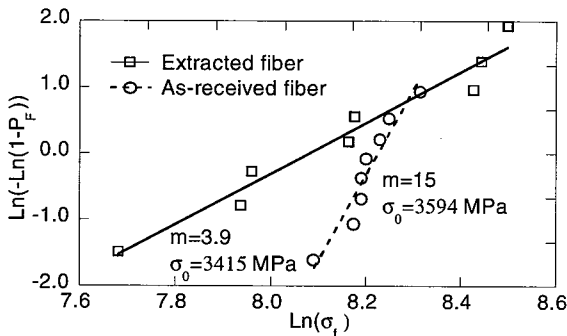


Fig. 8 Comparison of fiber strength distributions before and after consolidation.

기공 부위에 열응력이 가해짐에 따라 발생한 모재 손상이 원인이라 추정 할 수 있다. type-II 신호는 시편 모두에서 발생하였으며 강화공정 진행정도와 무관한 비율로 발생하였다. 이는 열응력에 의한 모재의 손상과 더불어 계면 분리에 의한 손상이 원인이라고 생각된다. 마지막으로 type-III 신호는 높은 진폭과 에너지를 가지며 폭넓은 대역의 주파수 영역에 분포하므로 섬유 파단이 원인으로 판단된다 [7,13].

### 3.3 미시-기계적 특성 실험 결과

금속기 복합재료의 강화공정에서의 불균일 하중과 이에 따른 모재의 불균일 응력분포와 변형은 섬유의 국부적인 굽힘을 동반하게 되며 따라서 강화공정 완료 후 섬유의 손상 및 파단을 유발시킨다[14,15]. 강화공정 중 발생한 섬유 손상에 대한 분석은 완성된 복합재료의 성능평가에 필수적이라 할 수 있으며 이를 위하여 모재부식 실험을 통해 추출된 섬유와 초기 제공된 섬유의 인장실험 결과를 바탕으로 섬유의 통계적 강도 분포를 2-parameter Weibull 함수를 사용하여 계산하였다. 누적 손상 확률  $P_F$ 는 아래의 식으로 나타낼 수 있으며

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

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 3604 MPa에서 강화공정 후 3151 MPa로 약 12 % 감소하였음을 확인하였다. Fig. 8은 변형 전 섬유와 강화공정 완료 후 추출한 섬유의 인장강도 분포를 나타낸 결과이다. 표 1에 나타난 섬유의 UTS는

초기 제공된 섬유의 강도인 반면에 그림에 표시된  $\sigma_0$ 는 섬유의 인장실험 결과를 바탕으로 계산된 통계적 강도를 나타낸다. 강화공정을 거친 섬유의 Weibull 계수와 함께 섬유의 통계적 강도 역시 감소한 것을 확인할 수 있으며, 이는 예비성형제 제작 과정에서의 강화섬유 표면 손상, 강화공정 중 작용압력의 과다 또는 하중의 불균일 분포로 인한 섬유 손상이 주된 원인으로 볼 수 있다.

Table 3 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

구성재료의 잔류응력은 concentric cylinder model[16]을 이용하여 계산하였으며 결과는 Table 3과 같다. 섬유의 열팽창계수가 모재의 열팽창계수에 비해 작기 때문에 강화공정 완료 후 900 °C에서 상온으로 냉각되는 과정에서 섬유는 압축 잔류응력이, 모재는 인장 잔류응력이 각각 발생한 것을 확인할 수 있다.

복합재료의 계면전단강도  $\tau$ 는 섬유 push-out 실험에 의해 얻어진 하중 값을 이용하여 다음과 같이 계산할 수 있다.

$$\tau = \frac{P}{\pi d t} \quad (2)$$

이 때  $P$ 는 작용하중,  $d$ 는 섬유의 직경,  $t$ 는 시편의 두께이다. 계면전단강도는 평균 118 MPa로 계산되었으며, 따라서 이들의 결과를 바탕으로 아래와 같이 복합재료의 응력을 계산할 수 있다.

### 3.4 금속기 복합재료의 인장거동

섬유강화 금속기 복합재료는 모재를 통해 섬유에 전달되는 하중의 증가에 따라 누적된 손상이 임계 치에 도달할 경우 급격한 파손에 이르는 것으로 알려져 있다[15].

복합재료의 기계적 특성을 해석함에 있어 Gunde1 등[17]은 강화공정 중 발생하는 섬유의 손상과 냉각과정 중 발생하는 섬유와 모재의 잔류응력, 계면특성 등 금속복합재의 미시-기계적 특성을 고려하여 복합재료의 인장응력  $\sigma$ 를 다음과 같이 변형률  $\epsilon$ 의 함수로 제시하였으며 여기서  $V_f$ 는

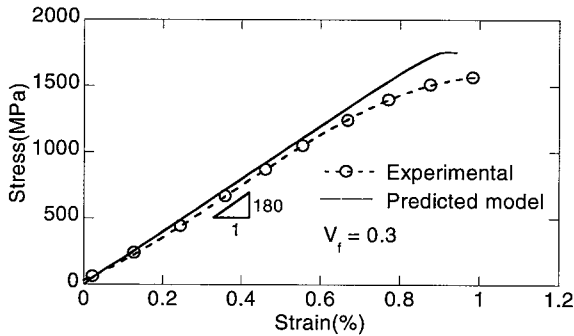


Fig. 9 Comparison of longitudinal tensile stress-strain curves.

$$\sigma(\epsilon) = V_f \left[ \frac{\sigma_c^{m+1}}{[(\epsilon + \epsilon_f^*)E_f]^m} \right. \\ \left. \{1 - e^{-(\epsilon + \epsilon_f^*)E_f / \sigma_c^{m+1}}\} - \sigma_f^* \right] \\ + (1 - V_f)[\sigma_m(\epsilon + \epsilon_m^*) - \sigma_m^*] \quad (3)$$

섬유의 체적분율,  $E_f$ 는 섬유의 탄성계수,  $\sigma_c$ 는 섬유의 특성 강도(characteristic strength),  $\sigma_f$ 와  $\sigma_m$ 은 각각 섬유와 모재의 인장응력을 의미하며,  $\epsilon_f^*$ ,  $\epsilon_m^*$ 은 각각 섬유와 모재의 잔류 변형률을,  $\sigma_f^*$ ,  $\sigma_m^*$ 은 잔류응력을 나타낸다. Fig. 9는 이와 같은 이론적 응력-변형률과 인장실험 결과를 비교한 그래프이다. 변형률 0.7 % 이후부터 실험치와 계산 결과가 차이가 발생하였으며 이는 강화공정 중 발생하는 섬유의 파단 혹은 섬유 불균일 분포 등 복합재료 내에 존재하는 또 다른 미소결함에 기인된 것으로 생각할 수 있다. 실험을 통해, 복합재료의 인장응력은 선형적으로 증가한 후 약 1100 MPa 근방에서 비선형적으로 변화함을 확인하였다. 이는 혼합법칙(rule of mixture)으로 계산한 결과인 1400 MPa보다 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 잔류 변형률에 기인된 결과로 해석할 수 있다.

#### 4. 결 론

본 연구에서는 포일-섬유-포일 방식 및 고온진공가압 방법을 이용하여 연속섬유강화 티타늄금속기 복합재료를 제작하였으며 첫째, 강화공정기술과 관련하여 온도, 압력 등의 주요 공정변수들에 따른 거동특성을 분석하였고, 둘째, 비파괴적 기법인 열-음향방출실험을 통해 기공의 진전과

공정 중 발생한 모재 및 강화재의 손상을 정량-정성적으로 분석하였다. 아울러 완성된 복합재료의 성능평가를 위해 구성재료의 손상 연구, 잔류응력 해석, 계면특성 분석 등을 수행하였고 이를 바탕으로 미시-기계적 거동특성과 연관된 파손기구를 비교, 분석 및 고찰하였다.

- (1) 강화공정 실험을 통해 온도, 압력 그리고 초기 상대 밀도 등이 중요한 공정 변수로 작용함을 확인하였다.
- (2) 열-음향방출 실험을 통해 강화공정의 진행정도를 정량적으로 평가할 수 있었으며 측정된 신호에 대한 에너지, 진폭, 시간-주파수 특성 해석을 수행하여 모재 손상, 계면손상, 섬유 파단 등 손상원인에 따른 파손 기구를 규명하였다. 분석 결과를 통해 저 에너지, 저 진폭(30-45 dB), 낮은 주파수 대역(0-200 kHz)을 갖는 AE 신호의 원인은 모재 손상으로, 고 에너지, 고 진폭(60 dB-), 넓은 주파수 대역(50-450 kHz)의 신호는 섬유 파단에 의한 손상으로 구분할 수 있었다.
- (3) 완성된 복합재료 섬유의 강도는 초기 섬유의 인장강도에 비해 평균 12 % 저하되었음을 확인하였으며 또한 공정 완료 후 냉각과정에서 섬유와 모재의 열팽창 차이로 인해, 섬유는 압축 잔류응력을, 모재는 인장 잔류응력을 받음을 확인하였다.
- (4) 복합재료에 대한 인장실험을 수행하여 섬유 손상과 잔류응력 등 미시-기계적 특성이 복합재료의 거동특성에 미치는 영향을 확인할 수 있었으며 섬유의 압축 잔류 변형률로 인해 복합재료의 파단 변형률이 약 0.2 % 증가하였음을 알 수 있었다.

#### 후 기

본 연구는 산업자원부 지정 한양대학교 신뢰성분석연구센터의 지원을 받아 수행되었으며, 이에 감사 드립니다.

#### 참고문헌

- 1) Mall, S., Fecke, T., and Foringer, M.A., *Titanium Matrix Composites: Mechanical Behavior*(Ed., Mall, S. and Nicholas, T.), Technomic publishing, 1998, pp. 1-22.
- 2) Guo, Z.X., "Towards cost effective manufacturing of Ti/SiC fibre composites and components," *Materials Science and Technology*, Vol. 14, 1998, pp. 864-872.
- 3) Partridge, P.G. and Ward-Close, C.M., "Processing of advanced continuous fibre composites: Current practice and potential developments," *International Materials Reviews*, Vol. 38, No. 1, 1993, pp. 1-23.

- 4) Duva, J.M., Curtin, W.A., and Wadley, H.N.G., "An ultimate tensile strength dependence on processing for consolidated metal matrix composites," *Acta. metall. mater.*, Vol. 43, No. 3, 1995, pp. 1119-1126.
- 5) 김준완, 김태원, "SiC-Ti 금속기 복합재료의 강화거동에 관한 미시역학적 모델," 한국복합재료학회지, 제16권, 3호, 2003, pp.1-8.
- 6) Miller, R.K., McIntire, P., *Nondestructive testing handbook*, 2nd ed., Vol. 5, American Society for Nondestructive Testing, 1987, pp. 12-19.
- 7) Choi, N.S., Kim, Y.B., Kim, T.W., and Lee, K.Y., "Detection of microfracture processes in composite laminates by thermo-acoustic emission," *Journal of Materials Science*, Vol. 38, 2003, pp. 1013-1019.
- 8) Sato, N., Kurauchi, T., and Kamigaito, O., "Detection of damage in composite materials by thermo-acoustic emission measurement," *Journal of Composite Materials*, Vol. 22, 1988, pp. 447-458.
- 9) Güngör, S., "Residual stress measurements in fibre reinforced titanium alloy composites," *Acta materialia*, Vol. 50, 2002, pp. 2053-2073.
- 10) Fang, Q., Sidky, P.S., and Hocking, G.M., "Residual stresses in titanium matrix composites (TMC) in thermomechanical cycling using matrix etching," *Science and Engineering*, A288, 2000, pp. 293-297.
- 11) Honda, K. and Kagawa, Y., "Debonding criterion in the pushout process of fiber-reinforced ceramics," *Acta mater.*, Vol. 44, No. 8, 1996, pp. 3267-3277.
- 12) Takashima, K., Fox, K.M., Barney, C., Pursell, J.G. and Bowen, P., "Characterisation of acoustic emission signals during fracture and fatigue of SiC fibre reinforced titanium alloy composites," *Materials Science and Technology*, Vol. 12, 1996, pp. 917-922.
- 13) 김영복, 민대홍, 이덕보, 최낙삼, "열하중을 받는 복합재료 적층판의 손상에 대한 열-음향방출 해석," 비파괴 검사학회지, Vol. 21, No. 3, 2001, pp. 261-268
- 14) Curtin, W.A., "Theory of mechanical properties of ceramic-matrix composites," *J. Am. Ceram. Soc.*, Vol. 74, No. 11, 1991, pp. 2837-2845.
- 15) Curtin, W.A. and Zhou, S.J., "Influence of processing damage of fiber-reinforced composites," *J. Mech. Phys. Solids*, Vol. 43, No. 3, 1995, pp. 343-363.
- 16) Ramamurty, U., Dary, F.C., and Zok, F.W., "A method for measuring residual strains in fiber-reinforced titanium matrix composites," *Acta mater.*, Vol. 44, No. 8, 1996, pp. 3397-3406.
- 17) Gundel, D.B. and Wawner, F.E., "Experimental and theoretical assessment of the longitudinal tensile strength of unidirectional SiC-fiber/titanium-matrix composites," *Composites Science and Technology*, Vol. 57, 1997, pp. 471-481.