

# 2-D Braided Textile 금속복합재료의 성형과 특성 해석

이상관\* · 김효준\* · 변준형\* · 홍순형\*\*

## Fabrication and Analytical Characterization of 2-D Braided Textile Metal Matrix Composites

Lee Sang-Kwan, Kim Hyo-Joon, Byun Joon-Hyung and Hong Soon-Hyung

**Key Words:** 2-D braided textile metal matrix composites, preform, vacuum assisted squeeze casting, carbon fiber, aluminum, elastic constant, volume averaging method

### Abstract

A new 2-D braided textile metal matrix composite was developed and characterized. The constituent materials consist of PAN type carbon fiber as reinforcements and pure aluminum as matrices. The braided preforms of different braider yarn angles were fabricated. For a fixed bundle size of 12K, three braider yarn angles was selected: 30°, 45°, and 60°. The braided preforms were infiltrated with pure Al by vacuum assisted squeeze casting. Through the investigation of melt pressing methods and the effects of process parameters such as applied pressure, and pouring temperature, the optimal process conditions were identified as follows: applied pressure of 60MPa, pouring temperature of 800°C. Using the measured geometric parameters, 3-D engineering constants of metal matrix composites have been determined from the elastic model, which utilizes the coordinate transformation and the averaging of stiffened and compliance constants based upon the volume of each reinforcement and matrix material.

### 1. 서 론

직조형 복합재료 (textile composites)는 자동화된 프리폼 제조 기법을 통하여 생산비 감소를 가져올 수 있기 때문에 항공 우주 및 전자 산업 분야에서 관심의 대상이 되고 있다. 직조 구조는 구조물의 일체성 뿐만 아니라 near-net-shape 제조가 가능하기 때문에 잠재력이 매우 높다. 직조형 복합재료는 고분자를 기지 재료로 하는 복합재료가 대부분 활용되고 있으나, 금속을 기지재료로 하는 직조형 복합재료는 제조 공정상의 난점으로 인하여 제조 사례가 거의 보고 되지 않고 있다. 그러나 직조형 금속 복합재료는 직조형 고분자 복합재료와 마찬가지로 생산성이 높고, 복잡

한 형상의 부품 성형이 가능하고, 손상 허용치가 증가하는 장점뿐만 아니라 기지 금속이 가지는 장점인 고온 특성, 내충격성, 피로 특성이 향상되는 많은 장점을 가지고 있어 제조 공정만 개발된다면 그 응용 분야는 아주 다양해지리라 예상된다.

따라서 본 연구에서는 용탕단조법(squeeze casting)을 이용하여 제조 공정을 최적화하고, 직조형 금속복합재료의 탄성 계수를 예측하여 특성을 분석함으로써 직조형 금속복합재료의 응용 가능성을 제시하고자 한다.

### 2. 시제 제조

#### 2.1 프리폼 제조

##### 2.1.1 2차원 브레이드(braid) 구조

2차원 브레이드 직물은 서로 위나 아래로 지나가는 두 종류의 섬유로 이루어져 있다. Fig.1(a)는 브레이드를 개략적으로 보여주고 있는데, 이 구조를 결정하

\* 한국기계연구원 재료공정연구부

\*\* 한국과학기술원 재료공학과

는 가장 중요한 인자는 피치길이(h)와 브레이딩 섬유  
의 각도( $\theta$ )이다. 이 둘은 서로 역 비례의 관계를 가  
지며 피치길이가 증가하면 섬유각도는 작아진다. 브  
레이딩 섬유각도는 복합재료의 기계적 특성을 좌우하  
는 것으로서 이 값의 정확한 측정은 매우 중요하다.  
그리고 축방향 섬유(axial yarns)는 제품의 치수 안  
정성이나 길이 방향의 기계적 특성을 향상시키기 위  
한 것으로 브레이딩 섬유 사이에 삽입된다. 즉, 이러  
한 브레이드 직물은 길이 방향에 대하여 섬유가  $\pm$   
 $\theta$ ,  $0^\circ$  로 이루어져 있기 때문에 3축 브레이드  
(triaxial braid)라고 한다.

최소단위 구조(unit cell)는 브레이딩 과정의 기계  
적 반복성에 의하여 브레이드의 기하학적 형상이 최  
소 단위의 구조에 의해 반복되는 것을 말하는데, 이  
구조의 확인은 브레이드의 기하학적 특성 (섬유 방향,  
섬유체적률 등)을 구하거나 복합재료의 기계적 특성  
을 예측하는 데 필요하다. Fig.1(b)은 최소 단위 구조  
를 도식적으로 나타낸 것이다. 여기서 최소단위 구조  
는 그림의 사각형으로 표시된 부분이며 두께 방향으  
로는 튜브 전체의 두께이다. 최소단위의 종축방향의  
길이는 피치길이(h)이며 둘레방향의 길이는 w이다.

### 2.1.2 2차원 브레이드(braid) 프리폼 제조

3축 브레이드 프리폼을 제조하기 위하여 카본섬유  
(T700S, 12K, Toray)를 사용하였으며, 종축섬유는 16  
개, 브레이딩 섬유는 32개를 브레이딩 기계에 장착하  
였다. 튜브형 맨드릴을 프리폼 이송 장치인 캐터필러  
에 고정된 후 30cm/분의 속도로 이송 하였다. 한 층  
의 브레이드 두께는 약 0.7 mm 이므로 전체 두께가  
2mm 정도가 되도록 여러장을 적층하였다. Fig.2는  
브레이딩 기계에서 프리폼이 제조되는 모습과 브레이  
딩된 프리폼의 외형을 보인 것이다.

본 연구에서는 브레이딩 각도에 대한 기계적 특성  
을 조사하기 위하여 브레이딩 각도가  $\pm 30^\circ$ ,  $\pm 45^\circ$ ,  
 $\pm 60^\circ$  인 세가지 종류의 프리폼을 제조하였다.

## 2.2 시제 제조

2차원 브레이드 직조형 금속 복합재료를 squeeze  
casting을 이용하여 성공적으로 제조하기 위해서는  
기존의 입자 강화 금속복합재료보다 제조 공정을 더  
세밀하게 조절하여야 한다. 그 이유를 가압력의 관점  
에서 설명하면, 입자 강화 금속복합재료와 같은 기존  
의 금속복합재료의 경우에는 보강재와 기지 금속간의  
나쁜 젖음성(wettability)과 유동 저항에 의한 압력 손

실을 감안하여 가압력을 결정하면 큰 문제가 없으나  
직조형 금속복합재료는 함침에 필요한 요구 가압력과  
브레이드 패턴을 붕괴시키지 않는 가압력을 동시에  
결정하여야 하기 때문이다.

그러므로 본절에서는 직조형 금속복합재료의 제조  
공정을 개발하기 위하여 요소 성형 공정 연구를 통하  
여 기본적인 공정을 결정한 다음, 제조 조건의 최적  
화 연구를 수행하였다. 본 연구에서 선택한 구성재료  
는 보강섬유로는 PAN계 탄소 섬유를 사용하였고, 기  
지 금속으로는 98% 순도의 순 알루미늄을 사용하였  
다.

### 2.2.1 요소 성형 공정

탄소 섬유의 산화반응으로 인한 손상의 정도를 관  
찰함으로써 실제 탄소섬유 강화 Al 기지 금속복합재  
료(Carbon/Al)의 제조에 있어서 분위기 필요성을 확  
인하였다. 산화 반응에 의한 탄소 섬유의 손상정도는  
TGA 실험을 통한 탄소섬유의 온도 변화와 시간에  
따른 무게변화를 측정함으로써 구하였다. TGA측정은  
탄소섬유를 아세톤에서 10분 동안 초음파세척을 실  
시하여 sizing층을 제거한 후 상온(25°C)에서 1000°C까  
지 실시하였다.

Fig.3은 TGA 시험 결과를 나타내는 것으로 400°C  
에서 무게 감소가 시작되어 600°C까지는 섬유의 무게  
변화가 거의 일어나지 않았으나 750°C 이상에서는 급  
격한 무게 변화가 일어났다. 이러한 무게 변화의 원  
인은 탄소 섬유의 산화에 의한 것으로 이를 방지하기  
위해서는 시제 제조 시에 불활성이나 진공 분위기 유  
지가 반드시 필요하다.

### 2.2.2 Squeeze casting 제조공정의 최적화

기존 연구 결과<sup>(1)</sup>를 토대로 가압력 및 가압유지시  
간을 변화시키면서 제조공정의 최적화를 시도하였다.  
가압력과 Al 용탕온도가 낮을 경우 액상기지가 보강  
섬유내로의 함침이 불가능하다고 판단되어 용탕의 유  
동성 및 가압력을 충분히 전달하기 위하여 Table 1.  
에 나타난 바와 같이 비교적 고온, 고압의 제조 조건  
하에서 금속복합재료를 제조하였다.

Fig.4는 용탕 온도 800°C, 가압력 60MPa, 가압유지  
시간 1분, 일축가압법(uniaxial pressure method)으로  
시편을 제조한 결과를 나타낸 미세 조직 사진이다.  
일축 가압법의 경우는 미세 조직 사진에 나타난 바와  
같이 거의 모든 제조 조건에서 미함침영역이 존재하  
였으므로 시편하부로의 가압력 전달이 용이하지 않음

을 알 수 있었다. Fig.4(b)는 가압 방법으로 정수압(hydrostatic pressure)을 사용하고 Fig.4(a)와 같은 조건으로 제조한 금속복합재료를 나타낸 것으로 건전한 금속복합재료를 보여 주고 있다. Fig.4(c)는 섬유 다발내의 단면을 주사전자 현미경으로 관찰한 결과를 나타낸 것으로 섬유다발내의 고부피분을 영역의 함침이 완벽하였고 직조패턴의 훼손 없이 금속복합재료의 제조가 이루어졌음을 알 수 있었다.

### 3. 특성 해석

#### 3.1 탄성 계수 예측

직조형 금속복합재료의 기계적인 특성은 섬유와 기지재료의 성질과 직물구조를 기본으로 한 기하학적 모델로부터 구할 수 있다. 공간상으로 배열된 섬유의 재료 주 방향은 우리가 알고자 하는 좌표방향과 일치하지 않으므로 응력-변형도 관계를 좌표 변환하는 방법이 필요하다.

브레이딩 섬유는 두께 및 길이방향에 대하여 방향성이 있지만 그 변형특성은 좌표변환을 수행하면 원하는 좌표계로 성분분해(decompose) 된다. 따라서, 브레이딩 섬유의 특별한 형상은 더 이상 문제시되지 않고 단지 직교 등방 재료의 층으로 간주될 수 있다. 3축 브레이드 복합재료는 네 가지 요소 즉,  $\theta$  방향의 브레이딩 섬유, 종축섬유 및 기지재료로 되어 있기 때문에 이 복합재료는 서로 다른 재료가 4개의 층으로 구성되어 있다고 볼 수 있다. 단위구조를 보면, 이러한 층은 길이 방향으로 배열되어 있고, 하중이 복합재료의 x-방향으로 가해질 때 각 층은 변형도(strain)가 일정하다고 가정할 수 있다. 따라서, 각 층의 강성상수를 체적에 대하여 평균하면 전체 복합재료의 유효강성상수를 얻을 수 있다. 복합재료의 유효강성상수를 역 변환 한 후 단위 셀 부피에 대하여 평균하면 다음과 같은 식으로 나타낼 수 있다.

$$C_{ij} = C_{ij}^a \frac{V_a}{V_t} + C_{ij}^{bp} \frac{V_b}{2V_t} + C_{ij}^{bm} \frac{V_b}{2V_t} + C^m (1 - V_y)$$

여기서  $C_{ij}^a$ ,  $C_{ij}^{bp}$ , 및  $C_{ij}^{bm}$  는 종축섬유 및  $\theta$  방향의 브레이드 섬유의 강성이며,  $C^m$  은 기지재료의 [6 x 6]행렬 강성 상수이다. 위 식의 강성상수를 연성상수로 역 변환하면 3축 브레이드 복합재료의 탄성계수 및 포와송 비는 다음 식으로 표시된다.

$$E_{xx} = \frac{1}{S_{11}^c}, \quad E_{yy} = \frac{1}{S_{22}^c}, \quad E_{zz} = \frac{1}{S_{33}^c}$$

$$G_{yz} = \frac{1}{S_{44}^c}, \quad G_{zx} = \frac{1}{S_{55}^c}, \quad G_{xy} = \frac{1}{S_{66}^c}$$

$$\nu_{xy} = \frac{-S_{21}^c}{S_{11}^c}, \quad \nu_{xz} = \frac{-S_{13}^c}{S_{33}^c}, \quad \nu_{yz} = \frac{-S_{32}^c}{S_{22}^c}$$

Table 3.은 브레이드 섬유단면 형상으로부터 측정된 형상 계수를 나타낸 것이며, Table 4.는 탄성 계수 예측을 위하여 사용한 형상 데이터와 물성 데이터를 나타낸 것이다. Table. 5는 체적 평균법을 이용하여 예측한 탄성 계수의 값을 나타낸 것이다.

### 4. 결론

1. 2차원 브레이드 직조형 금속복합재료의 보강섬유인 탄소 섬유는 TGA 시험 결과 400°C에서 산화반응이 일어나 섬유 손상이 일어나므로 제조 시에 분위기는 진공이나 불활성 분위기에서 수행하여야 한다. 섬유 패턴을 붕괴시키지 않으면서 함침을 가능하게 하는 제조 조건은 정수압 조건에서 용탕온도 800°C, 가압력 60MPa, 금형 온도 450°C이다.

2. 체적 평균법을 이용하여 2차원 브레이드 금속복합재료의 탄성 계수를 예측하였으며, 이 방법을 이용하면 다른 형태의 직조형 금속복합재료의 탄성계수의 예측이 가능하다. 본 연구에서 예측한 탄성계수의 값은 브레이드 각도가  $\pm 30^\circ$  인 금속복합재료의 경우, x, y 및 z 방향의 탄성계수는 각각 119.6 GPa, 54.7 GPa, 51.5 GPa 이다.

### 참고문헌

- (1) Jin Kim, Sang-Kwan Lee, Eui-Jin Jun, "The Bonding Strength at the Fiber/Matrix Interface of Metal Matrix Composites", ASTM STP1080, p.183, 1990.
- (2) Joon-Hyung Byun, "The analytical characterization of 2-D braided textile composites", Comp.Sci. & Tech. vol.60, p. 705, 2000.

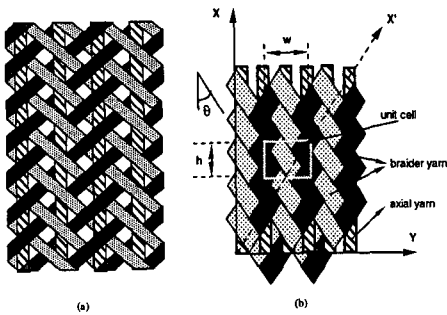


Fig.1 2-D braided textile preform: (a) schematic pattern; (b) compact structure.

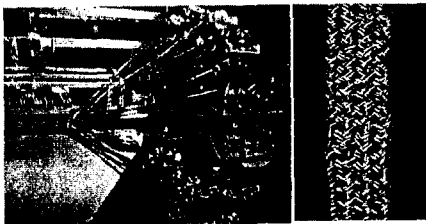


Fig.2 Manufacturing process of triaxial braided carbon preform(left) and triaxial braided carbon preform(right)

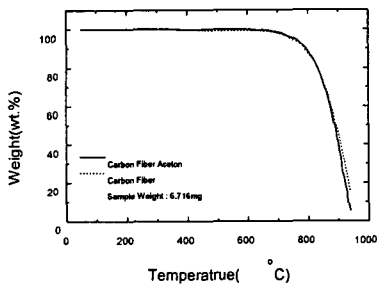
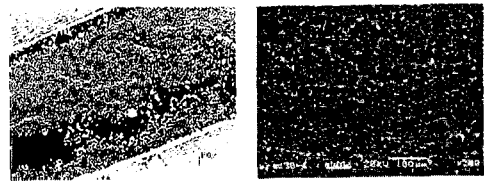


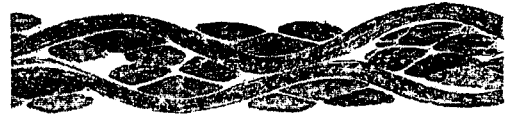
Fig.3 TGA analysis result with temperature and time under air atmosphere.

Table 1. Experiment conditions for optimum process.

제조 조건	
가압력(MPa)	50,60
가압유지시간(분)	1,2,3
용탕온도(°C)	750, 800, 900
금형예열온도(°C)	400
가압방식	정수압, 일축가압



(a) (b) (c)



< in the braider yarn direction : +30° >

(b)

Fig.4 Microstructures of 2-braided textile MMC(carbon/Al): (a)uniaxial press method; (b) hydrostatic press method; (c) microstructure in braider yarn orientation

Table 2. Yarn architecture of braids

Arch. Code	Axial Yarn (K)	Braider Yarn (K)	Braider Angle (Deg.)	No. Layers	Axial Yarn Vol.	Unit Cell Size hwt (mm)
ss30	12	12	30	3	0.3	4.96/5.36/1.5
ss45	12	12	45	3	0.26	4.00/7.65/1.27
ss60	12	12	60	3	0.2	3.64/9.55/1.41

Table 3. Input data for model prediction

Arch. Code	Geometric Data			Mechanical Data	
	$t_a$ (mm)	$f_a$ (mm)	$\lambda$	Carbon Fiber	Pure Al
ss30	0.62	4.20	1	$E_{1f}=230(\text{GPa})$	$E_m=69(\text{GPa})$
ss45	0.49	5.78	1	$E_{2f}=40.0(\text{GPa})$	$G_m=25.9(\text{GPa})$
ss60	0.46	6.37	1	$G_{12f}=24(\text{GPa})$ $G_{23f}=14.3(\text{GPa})$	$\nu_m=0.33$
				$\nu_{12f}=0.26$	

Table 4. Prediction results

Arch. Code	$E_{xx}$ (GPa)	$E_{yy}$ (GPa)	$E_{zz}$ (GPa)	$G_{yz}$ (GPa)	$G_{zx}$ (GPa)	$G_{xy}$ (GPa)	$\nu_{xy}$
ss30	119.6	54.7	51.5	19.2	24.6	34.9	0.42
ss45	89.9	68.4	56.5	21.7	23.3	37.1	0.38
ss60	74.9	90	57.9	23.4	22	34.4	0.28