

3 차원 직조형 금속복합재료의 제조와 특성분석

이상관*, 변준형*, 홍순형**

Fabrication and Characterization of Al Matrix Composites Reinforced with 3-D Orthogonal Carbon Textile Preforms

Sang-Kwan Lee*, Jun-Hyung Byun* and Soon Hyung Hong **

Key Words : elastic constants, textile carbon/Al metal matrix composites, pressure infiltration casting, orthogonal woven fabric, unit cell, coordinate transformation, volume averaging

ABSTRACT

3-D orthogonal woven carbon/Al composites were fabricated using a pressure infiltration casting method. Especially, to minimize geometrical deformation of fiber pattern and Al_4C_3 formation, the process parameters of the minimum pressurizing force, melting temperature, delay and holding time of molten aluminum pressurizing was optimized through the PC-controlled monitoring system. Resonant ultrasound spectroscopy (RUS) was utilized to measure the effective elastic constants of 3-D orthogonal woven carbon/Al composites. The CTE measurement was conducted using strain gages in a heating oven.

1. 서 론

직조형 금속복합재료(Metal Matrix Composites, MMCs)는 직조형 고분자 복합재료가 가지는 장점과 함께 금속 기지가 가지는 고온 특성을 보완한 신 개념의 재료이다. 현재까지 plain-woven fabric을 보강재로 이용한 2 차원 직조형 금속복합재료가 전자 패키징용 재료로 개발된 사례⁽¹⁾가 있으나 weaving 기술을 이용한 3 차원 개념의 직조형 금속복합재료가 개발된 사례는 거의 없다. 3 차원 직조형 금속복합재료는 기계적/열적 특성의 재단 능력 외에도 자동화된 프리폼(preform) 제조 기법을 통한 생산비 감소와 복잡한 형상의 부품 성형이 가능하고, 손상 허용치가 증가하는 장점이 있다. 특히 woven 직물은 상호 직각 방향으로 안정성이 뛰어나고 일방향 금속복합재료보다 더 균형적인 평면 성질을 가지고 있으므로 충격 저항치가 더욱 증가하게 된다⁽²⁾.

따라서 본 연구에서는 3 차원 직조형 금속복합재료의 제조 공정을 개발하고, 기계적/열적 특성 분석을 통하여 그 응용 가능성을 확인하고자 한다. 본 연구에서 사용한 보강 섬유로는 PAN 계 탄소 섬유(T300, Toray Carbon Co.)를 사용하였으며, 기지 금속으로는 99.9%의 순 알루미늄을 사용하였다.

2. 프리폼 제조

3 차원 직조형 복합재료의 프리폼을 제조하기 위하여 자체 제작한 직조 장비를 이용하여, 구조물용으로 가장 활용도가 높은 3 차원 woven 직물 프리폼의 패턴을 설계하여 컴퓨터로 lift diagram을 작성한 다음 컴퓨터 제어 하에서 3 차원 직물 프리폼을 직조하였다. 직조한 3 차원 패턴은 Fig.1에 나타나 있는 바와 같이 orthogonal (ORT) 형태이다. 이 패턴은 두께 방향으로 섬유가 관통되므로 보강 효율이 가장 우수함을 예상할 수 있고, 길이 방향으로도 섬유의 굴곡이 생기지 않기 때문에 그 방향으로의 강도 및 강성도가 우수하다.

프리폼을 제조하기 위하여 사용한 섬유는 PAN(polyacrylonitrile) 계 탄소섬유(T700S, Toray

* 한국기계연구원 재료기술연구소 복합재료그룹

** 한국과학기술원 재료공학과

Carbon Co.)이며, warp 섬유와 fill 섬유는 섬유 다발이 12K(12,000 가닥)인 섬유를 사용하였으며, 두께 방향의 보강 섬유는 섬유 다발이 3K 인 섬유를 사용하였다. Fig. 2 는 직조 완료된 ORT 구조의 3 차원 직물 프리폼으로 두께가 7mm, 폭이 50mm 이다.

3. 제조 및 특성 분석

3.1 제조

직조형 금속복합재료는 Pressure Infiltration Casting (PIC) 공정을 이용하여 제조하였다. Fig. 3 은 직조형 금속복합재료의 제조를 위하여 사용한 pressure infiltration casting 장치의 개요도를 나타낸 것이다. 공정은 제조 공정 동안의 온도 변화를 기록하면서 가압시기별로 시편 제조를 통하여 최적화하였다. Fig. 4 는 용탕 온도를 800 °C, 프리폼 예열 온도를 450 °C로 고정한 상태에서 Al 용탕을 급탕한 후 가압을 하지 않은 상태에서 프리폼 표면 온도 변화를 기록한 결과를 나타낸 것이다. 프리폼 표면은 Al 급탕 후 대략 100 초가 지나면 응고가 시작되는 구간에 도달하고, 이로부터 대략 200 초가 지나면 응고가 완료됨을 알 수 있었다. 이 결과로부터 가압 시기를 크게 세 조건으로 나누었다. 즉, 용탕을 급탕한 후 응고가 시작되는 시점(A 시점), 응고 구간 (B 지점) 그리고 응고가 완료되는 시점(C 지점)으로 나누었다.

Fig. 5 는 용탕 온도를 800 °C, 프리폼 예열 온도를 450 °C, 가압력을 60MPa 로 고정한 상태에서 가압시기별로 직조형 복합재료를 제조한 결과를 나타낸 것이다. Fig. 5(a)는 A 시점에서 가압을 한 결과를 나타낸 사진으로 높은 가압력으로 프리폼 패턴이 붕괴되어 있음을 보여 주고 있다. 또한 일부의 용탕이 금형 공차 틈새에 끼이게 되어 금형의 이형이 거의 불가능하였다. 따라서 용탕을 부은 직후의 가압시기는 적절하지 않음을 알 수 있었다. Fig. 5(b)는 B 구간 (전반부)의 가압시기에서 복합재료를 제조한 결과를 나타낸 것으로 함침이 비교적 잘 일어 났음을 보여 주고 있다. 이 시기는 용탕이 금형 벽면에서는 응고가 진행되어 고상으로 존재하고 프리폼 표면은 액상으로 존재하는 구간으로 추정할 수 있다. 실험적인 결과로부터 이 시점에서 가압을 전전한 직조형 금속복합재료를 제조할 수 있음을 알 수 있었다. Fig. 5(c)는 B 구간(후반부)의 가압 시기에 복합 재료를 제조한 결과를 나타낸 것으로 가장 자리 부근에 부분적으로 함침이 되지 않은 미 함침 영역이 존재함을 알 수 있다. 이는 응고가 진행되어 프리폼 가장 자리 부분이 이미 고상으로 존재하기 때문이다. Fig. 5 (d)는 C 시점의 가압시기에서 복합재료를 제조한 결과를 나타낸 것으로 함침이 거의 일어 나지 않음을 보여 주고 있다. C 시점의 가압 시기는 금

형 벽면 뿐만 아니라 프리폼 표면도 응고가 대부분 진행되어 프리폼 내부로 함침이 거의 불가능함을 알 수 있었다.

이상의 실험 결과로부터 최적화된 제조 조건은 용탕 온도 800 °C, 프리폼 예열온도 450 °C, 가압력 60MPa, 가압지연시간 150sec 이며, Fig.6 은 이 조건으로부터 제조한 시편의 단면 사진으로서 직조패턴의 붕괴없이 프리폼 형상을 유지하면서 함침이 잘 일어 났음을 보여 주고 있다

3.2 특성 분석

Resonant Ultrasound Spectroscopy (RUS)⁽³⁾ 를 이용하여 직조형 금속복합재료의 탄성 계수를 측정하였다. 측정용 샘플은 제조된 시편으로부터 electric-discharge machining (EDM) 으로 절단하여 5mm(L) x 4mm(W) x 2mm(T)의 치수가 되도록 최종 연마하였다. 시편의 길이 축은 warp 섬유 방향과 평행하게 배열되도록 하였다.

직조형 금속복합재료의 열적 특성을 평가하기 위하여 스트레인 게이지를 이용하여 열팽창 계수를 측정하였다⁽⁴⁾. 열팽창 계수 측정에 사용된 시편의 크기는 20mm x 20mm이며, 열팽창 계수 측정을 위한 시편준비는 두개의 고온용 스트레인 게이지(WK-06-062AP-350, Micro-Measurement)를 시편의 중심선에서 길이 방향에 대하여 대칭으로 접착하였다. 온도 변화에 의한 오차를 최소화하기 위하여 고온용 접착제(M-Bond 610)와 테프론 코팅 리드선을 사용하였다. 준비된 시편은 상온에서 2 시간 정도 유지하여 안정화시킨 후 상온에서 200 °C 까지 20 °C 의 온도 간격으로 상승시켰으며, 각 측정 온도 구간에서는 시편이 온도 평형에 도달할 때까지 충분히 유지 시킨 다음 열변형을 측정하였다. Table 1 은 RUS 를 이용하여 측정한 탄성 계수와 스트레인 게이지를 이용하여 열팽창 계수를 측정한 결과를 나타낸 것이다. 이상의 결과로부터 본 연구에서 제조한 3 차원 직조형 금속복합재료는 기계적 특성과 열적 특성이 요구되는 열관리 재료용으로 응용이 가능함을 알 수 있었다.

4. 결 론

1. 두께 방향으로 섬유가 보강된 3 차원 프리폼 제조 기술을 확보하였으며, 본 연구에서 제조한 orthogonal 형태의 프리폼 외에도 layer-to-layer, through-the-thickness 형태의 프리폼 제조가 가능하였다.
2. Pressure infiltration casting 의 경우, 중요한 제조 공정 인자는 가압 시기이며, 실험을 통하여 결정한 최적의 가압시기는 용탕이 금형 벽면에서 응고가 진행되어 고상으로 존재하고 프리폼 표면은 액상으로 존재하는 구간이다.
3. 탄성 계수 및 열팽창 계수측정 결과, 3 차원

직조형 탄소 섬유강화 금속복합재료는 치수 안정성이 요구되는 우주환경 부품이나 전자 패키징용 발열 재료로서 응용이 가능함을 알 수 있었다.

참고문헌

- (1) J.Korab, P. Stefanik et al, Composites PartA, Vol.33,pp133-136,2002
- (2) Ishikawa, T. and T.W. Chou, AIAA Journal, Vol.21, No.12, pp1714-1721, 1983
- (3) H.Y. Jung, Y.M. Cheong et al, Scripta Materialia, Vol.41, No.12, pp1261-1267, 1999
- (4) K.J.Yoon, J.S. Kim, J. of Comp., Vol.34, No.2, 2000

Table 1 Engineering constants and coefficients of thermal expansion for ORT composites

Characteristics		Data
Engineering Constants	E_{xx} (GPa)	89.9
	E_{yy} (GPa)	117.1
	E_{zz} (GPa)	59.4
	G_{yz} (GPa)	20.2
	G_{zx} (GPa)	18.8
	G_{xy} (GPa)	23.4
	ν_{yz}	0.438
	ν_{zx}	0.329
	ν_{xy}	0.138
Coefficient of thermal expansion ($\times 10^{-6}/^{\circ}\text{C}$)	α_{xx}	6.6
	α_{yy}	5.8

note) x : longitudinal stuffer yarn direction
y : fill yarn direction
z : thickness direction

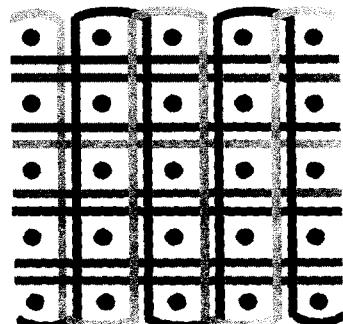


Fig.1 Schematic diagram of 3-D multi-layered woven preforms: Orthogonal



Fig.2 3-D orthogonal carbon woven preform

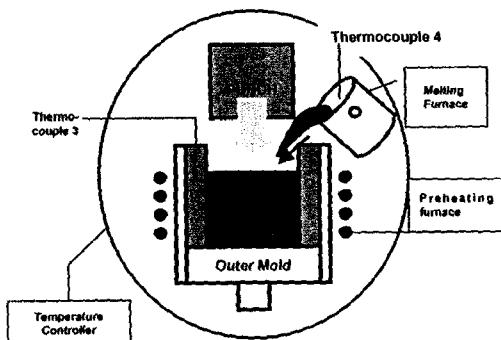


Fig.3 Schematic drawing of vacuum assisted pressure infiltration casting

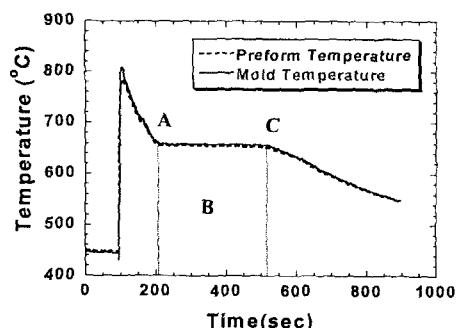
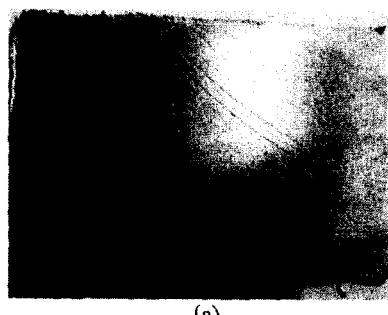


Fig. 4 Cooling curve on surface of 2-D woven preform after pouring of molten Al.

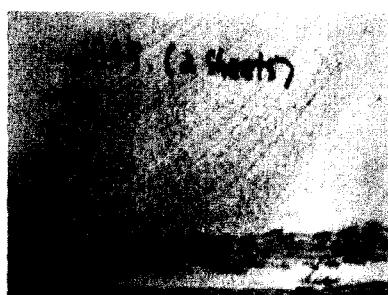


(d)

Fig.5 Photograph of metal matrix composites manufactured with the delayed time for pressure applications: (a) 100sec (A point); (b)75 ~ 150sec(B point); (c)150 ~ 250 sec; (d) 250sec(C point



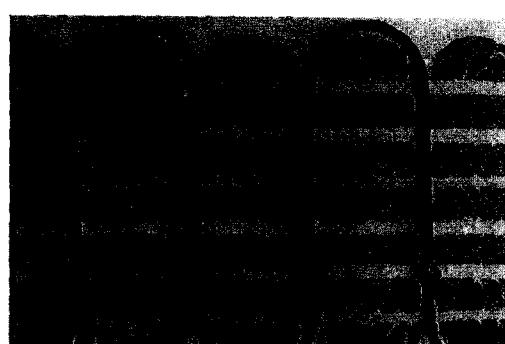
(a)



(b)



(c)



(a)



(b)

Fig.6 Photographs of cross-section perpendicular to fiber direction for 3-D orthogonal woven fabric reinforced Al matrix composites : (a) the width direction ; (b) the longitudinal yarn direction.