

젖음성 제어를 이용한 탄소섬유/알루미늄 복합재료 제조

이용범* · 박상진* · 한준현*†

Carbon Fiber/Aluminum Composite Fabrication Using Wettability Control

Yongbeom Lee*, Sangjin Park*, Jun Hyun Han*†

ABSTRACT: Carbon fiber/aluminum (CF/Al) composites were successfully fabricated without pressure casting using wettability modification of carbon fiber. The wettability of liquid aluminum on carbon fibers was enhanced through electroless plating of copper on carbon fibers. Liquid aluminum was well infiltrated into carbon fiber bundles with Cu coating layer due to low wetting angle, and a lot of pores that existed in CF/Al composite without Cu coating on CF were greatly removed. However, a few tiny pores existed in carbon fiber bundles, which is due to not bad wettability between CF and Al but shrinkage cavity that was produced during cooling of CF/Al composite. The tiny pores could be effectively removed by a subsequent rolling.

초 록: 탄소섬유에 대한 액상 알루미늄의 젖음성이 매우 좋지 않기 때문에 통상적인 주조방법으로는 기공이 없는 건전한 탄소섬유/알루미늄 복합재료 제조가 어려워 이를 극복하기 위해서는 복합재료 주조 시 고온, 고압이 요구된다. 본 연구에서는 탄소섬유 표면에 무전해 도금에 의해 구리를 코팅함으로써 탄소섬유에 대한 알루미늄의 젖음성을 향상시켜 고온, 고압을 가하지 않고 액상의 알루미늄이 탄소섬유들 사이를 자발적으로 침투하여 내부 기공이 매우 적은 건전한 탄소섬유/알루미늄 복합재료를 제조할 수 있었다. 제조된 탄소섬유/알루미늄 복합재료 내 일부 탄소섬유 다발 안에서 미세기공이 발생하였으나 이 미세기공은 압연과 같은 후 가공에 의해 탄소섬유와 알루미늄 사이의 계면분리나 탄소섬유의 파괴 없이 효과적으로 제거될 수 있었다. 복합재료 제조 시 발생한 미세기공은 탄소섬유와 알루미늄의 젖음성 문제는 아니며 탄소섬유들 사이 공간을 효과적으로 채웠던 액상 알루미늄이 냉각되는 동안 수축으로 인해 일부 탄소섬유들 사이로부터 빠져 나가 수축공 형태의 기공이 발생한 것으로 판단된다.

Key Words: 탄소섬유(Carbon fiber), 복합재료(Composite materials), 알루미늄(Aluminum), 젖음성(Wettability)

1. 서 론

탄소섬유(Carbon fiber, CF)는 금속에 비해 가볍지만 강도와 탄성이 뛰어나며 높은 열, 전기 전도도와 낮은 열팽창계수 등 우수한 물리적 특성도 가지고 있어 자동차, 우주항공 등 여러 분야에 널리 사용되고 있다[1-3]. 탄소섬유는 독립적으로 사용될 수도 있지만 일반적으로 금속, 폴리머 기

에 첨가된 복합재료 형태로 많이 사용되고 있다. 그 중에서 알루미늄을 기지재료 이용하는 탄소섬유/알루미늄 복합재료는 높은 비강도와 탄성계수를 가지며 낮은 열팽창계수와 높은 열전도도를 가지고 있어 구조 및 열관리 재료로서 많은 활용가능성을 가지고 있다[4-6]. 그러나 탄소섬유에 대한 액상 알루미늄의 젖음성이 매우 좋지 않기 때문에 일반적인 주조방법으로는 기공이 없는 건전한 복합재료 제

Received 25 September 2015, received in revised form 30 October 2015, accepted 30 October 2015

*Dept. of Materials Science and Engineering, Chungnam National University, Daejeon 34134, Korea

*†Dept. of Materials Science and Engineering, Chungnam National University, Daejeon 34134, Korea, Corresponding author (E-mail: jghan@cnu.ac.kr)

조가 매우 어렵다.

주어진 기지재 표면에 대한 액상의 젖음성이란 일반적으로 젖음각 θ 에 의해 결정되며, 젖음각 θ 는 고상/액상/기상 상태의 상호 계면에너지와 관련되어 있다. 젖음각은 Young-Dupre식 (1)에 의해 다음과 같이 표현되는데,

$$\cos\theta = \frac{W_a}{\sigma_{LV}} - 1 \quad (1)$$

여기에서 W_a 는 고체 위에서의 액체의 접착력을 σ_{LV} 는 액상/기상 표면장력을 의미한다. 세라믹/금속 복합재료에서 W_a 는 금속과 세라믹 계면에서의 상호작용의 강도를 수치화한 것이며 이는 세라믹/금속 복합재료의 기계적 특성을 모델링할 때 항상 고려하는 부분이다[7].

현재 탄소섬유/알루미늄 복합재료 제조를 위해 많이 연구되고 있는 방법으로는 squeeze casting법이나 infiltration 법 등이 있다[8-12]. 이러한 방법들은 탄소섬유와 알루미늄 사이의 나쁜 젖음성을 극복하기 위해 고온, 고압을 이용하고 있으나 제조 비용이 증가할 뿐 만 아니라 탄소섬유와 알루미늄 사이의 젖음성 문제를 근본적으로 해결하지는 못하고 있다. 또한 고온에서 복합재료 제조 시 탄소섬유/알루미늄 계면에서 Al_4C_3 등의 화합물이 생성되어 복합재료의 특성을 저하시키는 요인이 되기도 한다[13].

따라서 본 연구에서는 고온, 고압을 가하지 않고서 기공이 없는 건전한 탄소섬유/알루미늄 복합재료를 제조하기 위해 알루미늄과 탄소섬유 사이의 젖음성 향상에 의한 무가압 주조를 시도하였으며 젖음성 향상은 탄소섬유 표면에 구리를 코팅하여 계면에너지를 제어함으로써 가능케 하였다. 또한 복합재료 제조 시 구리코팅에 의한 탄소섬유와 알루미늄의 직접적인 접촉 방지를 통해 Al_4C_3 생성을 억제하고자 하였다. 본 연구에서는 무전해 구리도금을 이용해서 탄소섬유 다발 표면에 균일한 구리 코팅층을 형성함으로써 알루미늄과 탄소섬유 사이의 젖음성 개선에 의한 액상 알루미늄의 자발적 infiltration을 유도하여 무가압 상태에서 복합재료를 제조하였으며, 젖음성 향상이 탄소섬유/알루미늄 복합재료 제조에 미치는 영향에 대해 고찰하였다. 복합재료 내의 탄소섬유 다발은 고정 지그를 이용하여 일 방향으로 배열시켰으며 광학현미경(Optical microscope, OM)과 주사전자현미경(Scanning electron microscope, SEM)을 이용하여 탄소섬유와 알루미늄의 복합화 과정을 분석하였다.

2. 실험 방법

2.1 무전해 구리도금

본 연구에 사용된 탄소섬유는 직경 $7\ \mu\text{m}$, 길이 200 mm인 PAN(Polyacrylonitrile)계 장섬유로서 한 다발에 12,000개의 탄소섬유로 구성되어 있다. 무전해 구리도금을 시행하기

Table 1. Process and constituent for Cu electroless plating

Process	Constituents
Sensitization	SnCl_2
	HCl
	H_2O
Activation	PdCl_2
	HCl
	H_2O
Electroless plating	$\text{CuSO}_4 \cdot 5\text{H}_2\text{O}$
	$\text{KNaC}_4\text{H}_4\text{O}_6 \cdot 4\text{H}_2\text{O}$
	HCHO
	NaOH
	$\text{NiSO}_4 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$
	H_2O

전에 탄소섬유 표면의 코팅제와 불순물을 제거하기 위해 450°C , 진공분위기(1×10^{-3} Torr)에서 1시간 동안 열처리를 진행하였으며 열처리 종료 후에 알코올에 세척하였다. 무전해 도금의 전처리(예민화 반응, 활성화 반응)시 다발형태로 구성되어 있는 탄소섬유들 사이까지 효과적인 전처리를 하기 위하여 초음파 교반을 사용하였으며, 무전해 구리도금의 전처리 용액 및 도금용액의 조성은 Table 1에 나타내었다[14]. 2시간 30분 동안 구리 무전해 도금을 진행하였으며, 도금용액의 온도는 35°C 에서 오차범위 $\pm 1^\circ\text{C}$ 내로 일정하게 유지되었다.

2.2 무가압 진공주조

젖음성 향상이 탄소섬유/알루미늄 복합재료 제조에 미치는 영향을 살펴보기 위해 열처리만 실시한 탄소섬유와 열처리 후 탄소섬유 표면에 구리도금 한 탄소섬유를 준비하였으며 두 섬유 모두 스테인리스강 지그를 이용하여 Fig. 1과 같이 일방향으로 4열 \times 4열 형태로 배열한 후 그라파이트 도가니 하단부에 장입하였다. 탄소섬유가 장착된 지그 위에 기지재료 사용할 알루미늄 합금(A1050, 99.5% 순도) 블록을 위치시켰으며 알루미늄 합금의 용융 시 합금표면

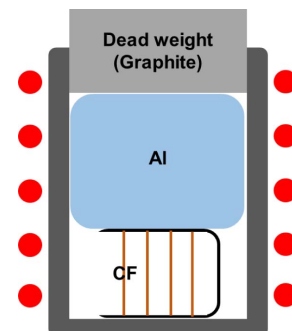


Fig. 1. Schematic of carbon fiber/Al composite fabrication

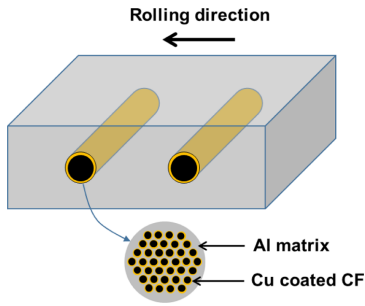


Fig. 2. Schematic of rolling process of carbon fiber/Al composite. Rolling direction is perpendicular to the fiber direction

의 산화막을 깨뜨려 구조를 원활하게 하기 위해 알루미늄 합금 블록 위에 작은 그라파이트 dead weight를 올려놓았다. 그림과 같이 장착된 도가니를 진공로에 넣고 진공을 뽑아 1×10^{-2} Torr 이하로 유지한 후 1시간 30분 동안 750°C까지 온도를 올렸다. 750°C에서 30분 동안 유지한 후 로에서 꺼내 공냉하여 탄소섬유/알루미늄 복합재료를 제조하였다.

2.3 냉간 압연

구리가 코팅된 탄소섬유를 이용하여 제조된 탄소섬유/알루미늄 복합재료 내에 존재하는 소수의 미세기공을 제거하기 위해 복합재료 제조 후 냉간압연을 실시하였으며, 압연에 의한 탄소섬유의 파괴를 억제하기 위해 압연 방향은 Fig. 2와 같이 탄소섬유의 길이방향에 대해 수직인 방향으로 하였다.

2.4 미세조직 관찰

무전해 도금에 의해 탄소섬유 표면에 코팅된 구리층의 코팅여부와 코팅층의 두께를 확인하기 위해 저배율 광학 현미경과 주사전자현미경을 이용하여 구리가 코팅된 탄소섬유의 표면과 측면을 관찰하였으며, 제조된 복합재료의 탄소섬유 다발 내 알루미늄의 침투여부와 기공발생 여부를 관찰하기 위해 탄소섬유가 배열된 방향에 수직인 방향으로 복합재료를 절단한 후 SEM과 EDS(Energy dispersive spectroscopy)를 이용하여 단면을 분석하였다.

3. 결과 및 고찰

Fig. 3은 저배율 현미경을 이용하여 무전해 구리도금을 실시한 후의 탄소섬유를 관찰한 사진이다.

그림에서 알 수 있는 바와 같이 검은 색의 초기 탄소섬유 색깔이 사라지고 밝은 구리 빛을 띠는 것으로 보아 탄소섬유 다발에 고르게 구리가 코팅된 것으로 보여진다. 구리 코팅층의 표면과 두께를 보다 자세히 관찰하기 위해 SEM을 이용하여 구리 코팅 전, 후 탄소섬유의 표면과 측면을 관찰하였다. Fig. 4(a)는 구리코팅 전 열처리된 탄소섬유의 표면

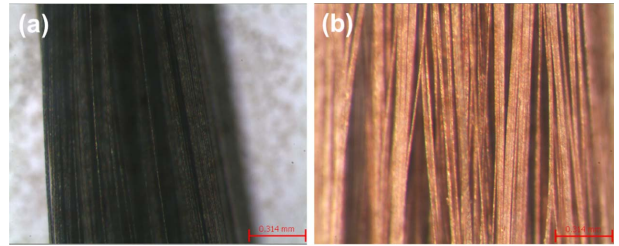


Fig. 3. Optical images of non-coated (a) and Cu-coated (b) carbon fibers

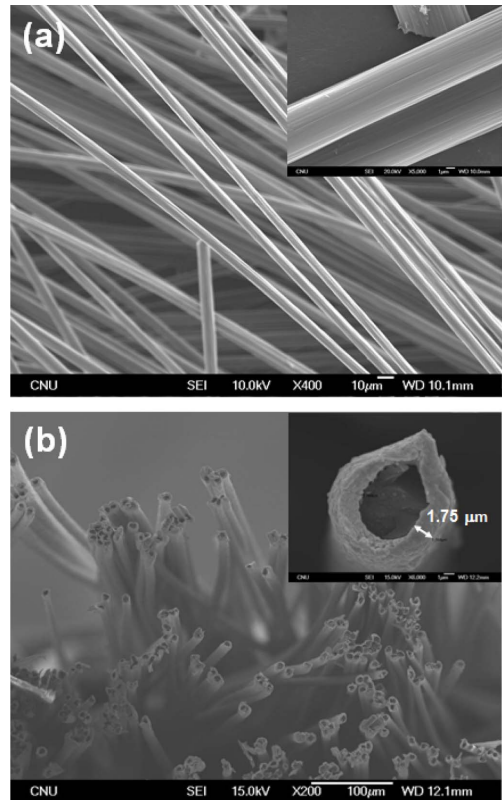


Fig. 4. SEM images of non-coated (a) and Cu-coated (b) carbon fibers. The insets are magnified images showing the surface and coating layer of carbon fibers

을 보여주고 있으며 열처리 후에 이물질이 존재하지 않는 깨끗한 표면이 얻어졌음을 알 수 있다. Fig. 4(b)는 열처리 후 구리 무전해 도금에 의해 탄소섬유 표면에 구리가 코팅되어 있는 것을 보여주고 있으며 12,000개로 이루어진 하나의 탄소섬유 다발 내 각각의 섬유들은 대체적으로 서로 뭉쳐있지 않으며 구리층으로 균일하게 잘 코팅되어 있음을 알 수 있다. 또한 Fig. 4(b)의 확대된 사진으로부터 구리 코팅층의 두께는 약 1.75 μm로 측정되었다.

Fig. 4에 보여준 것과 같은 구리를 코팅하지 않은 탄소섬유와 구리를 코팅한 탄소섬유를 이용하여 무가압 상태에서 탄소섬유/알루미늄 복합재료를 제조하였으며 제조 후 탄소섬유 방향에 수직인 방향으로 절단하고 연마한 다음

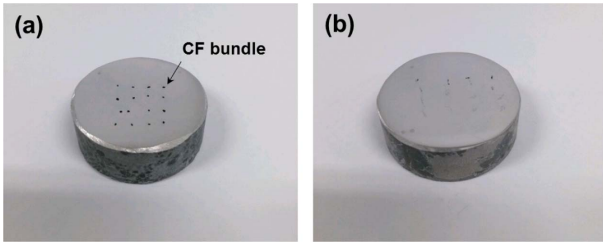


Fig. 5. Photographs of cross sections of non-coated (a) and Cu-coated (b) carbon fiber/Al composites

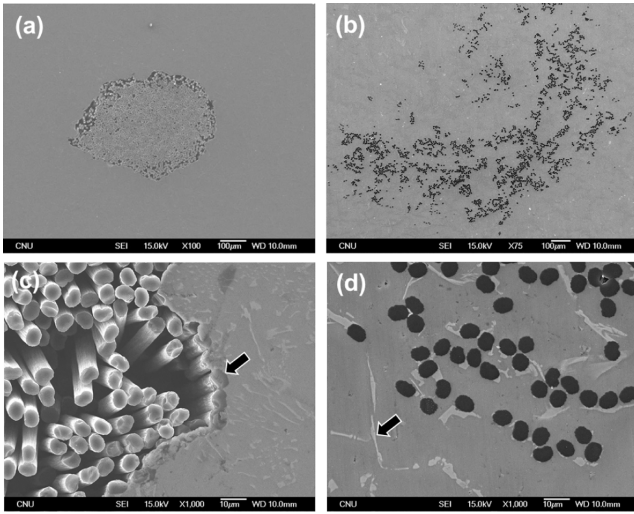


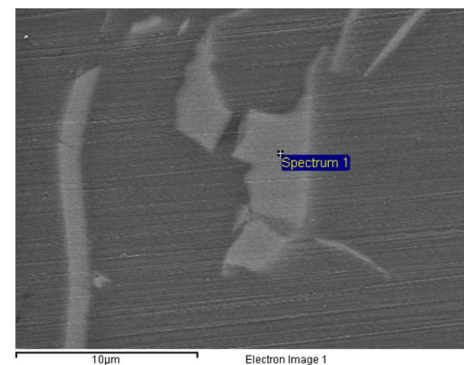
Fig. 6. SEM micrographs of non-coated CF/Al (a, c) and Cu-coated CF/Al (b, d) composites. (c) and (d) are magnified images of (a) and (b), respectively

단면을 관찰하였으며 Fig. 5에 디지털 사진기로 촬영한 사진을 나타내었다. Fig. 5(a)의 구리를 코팅하지 않은 탄소섬유를 이용하여 제조된 복합재료에서는 탄소섬유 다발로 보이는 까만 점들이 확연히 관찰되고 있지만 Fig. 5(b)의 구리를 코팅한 탄소섬유를 이용하여 제조된 복합재료에서는 탄소섬유 다발의 뚜렷한 존재가 보여지고 있지 않음을 알 수 있다. 구리코팅 유, 무에 따른 탄소섬유와 알루미늄의 복합화 차이를 좀 더 자세히 관찰하기 위하여 SEM을 이용하여 탄소섬유 다발 부근을 관찰하였으며 그 결과를 Fig. 6에 나타내었다. Fig. 6(a), (c)에서 보는 것과 같이 탄소섬유 표면에 구리도금을 하지 않은 시편에서는 탄소섬유와 알루미늄 사이의 복합화 즉, 알루미늄이 탄소섬유들 사이로 침투한 흔적이 전혀 발견되지 않았으며 탄소섬유들끼리 서로 뭉쳐있고 탄소섬유들 사이 뿐 만 아니라 탄소섬유와 알루미늄 사이에 많은 기공들이 존재하고 있음을 알 수 있다. 이는 Fig. 6(c)의 화살표로 표시한 부분과 같이 탄소섬유 다발 바깥층에 존재하는 탄소섬유들이 복합재료 주조 시 탄소섬유 다발 안으로의 액상 알루미늄 침투를 억제하고 있으며 이는 탄소에 대한 액상 알루미늄의 젖음각이 140° 정도로서 90° 보다 훨씬 크므로 [15] 표면장력에 의해 액상의 알

루미늄이 탄소섬유 밖으로 밀려나갔기 때문이다. 한편 Fig. 6(b), (d)의 탄소섬유 표면에 구리도금을 한 시편에서는 탄소섬유들이 알루미늄 기지에 넓게 분산되어 있으며 탄소섬유들 사이로 알루미늄이 잘 침투되어 있고 탄소섬유들 사이 혹은 탄소섬유와 알루미늄 기지 사이에서 기공들은 거의 발견되지 않고 있다. 즉, 기공 없이 탄소섬유와 알루미늄이 잘 접촉되어 있는 건전한 복합재료가 제조되었음을 알 수 있다. 이는 Ko[15], Lee[16] 등의 결과에서 알 수 있는 바와 같이 탄소에 구리가 코팅될 경우 액상 알루미늄의 젖음각이 90° 보다 크게 감소하므로 구리가 코팅된 탄소섬유 표면에 대한 액상 알루미늄의 젖음성이 향상되어 모세관 현상에 의해 탄소섬유들 사이로 알루미늄이 잘 침투했기 때문이다.

한편 Fig. 6(d)에서 화살표가 가리키는 부분과 같이 Al 기지내에 탄소섬유 이외에 다른 새로운 상이 생성된 것을 발견할 수 있으며 이 현상은 Fig. 6(c)의 구리가 코팅되지 않은 시편에서도 관찰되고 있다. 이 새롭게 생성된 상의 상분석을 위해 먼저 EDS를 이용한 성분분석을 진행하였으며 그 결과를 Fig. 7에 나타내었다. EDS 분석결과 다량의 Al과 함께 Fe와 Ni이 검출되었으며 이 결과를 바탕으로 XRD분석을 실시하였으며 그 결과 Fig. 8에 보여준 바와 같이 새롭게 생성된 상은 $Al_{75}Fe_{15}Ni_{10}$ 임을 확인할 수 있었다. 이 상은 탄소섬유/알루미늄 복합재료 제조 시 탄소섬유의 일방향 배열을 위해 사용된 스테인리스 합금 지그로부터 용출된 것으로 사료된다.

탄소섬유 표면에 구리를 코팅함으로써 탄소섬유에 대한 알루미늄의 젖음성을 크게 향상시켜 Fig. 6(b)와 같은 기공이 없는 건전한 복합재료를 제조하였으나, Fig. 9와 같이 제조된 탄소섬유/알루미늄 복합재료 내 일부 탄소섬유 다발



Element	wt %	at %
Al K	58.70	77.12
Fe K	29.44	18.69
Ni K	4.82	2.91
Pt M	7.05	1.28

Fig. 7. EDS analysis result of newly grown phase in Cu-coated carbon fiber/Al composite

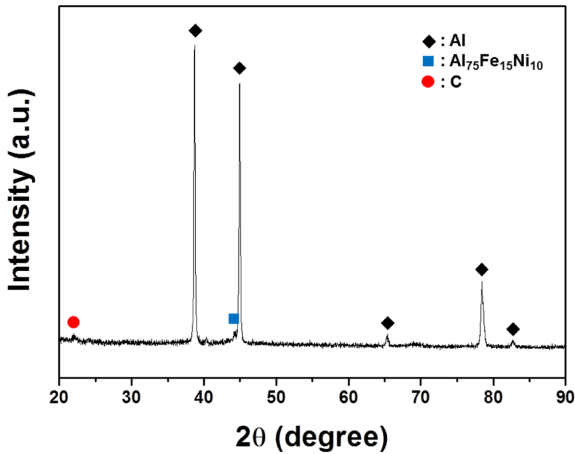


Fig. 8. XRD pattern of Cu-coated CF/Al composite

안에서는 미세기공이 발견되었다. 이 미세기공이 발생할 수 있는 요인을 고찰해 보면 크게 두 가지 요인이 가능하다. 첫째, 탄소섬유 표면의 trapped air가 진공 중에서도 모두 제거되지 않고 남아있거나, 탄소섬유 표면에 구리를 무전해 도금할 때 탄소섬유의 분산이 잘 이루어지지 않은 부분이 존재하여 일부 탄소섬유들이 뭉쳐있는 상태에서 구리가 코팅됨으로써 코팅 후 탄소섬유들 사이에 잔존하는 기공들이 복합재료 제조 후에도 남아있을 수 있다. 둘째, 복합재료 주조 시 발생할 수 있는 기공으로 액상의 알루미늄이 탄소섬유들 사이를 충분히 채우지 못하였거나, 고온에서는 잘 채워져 있었지만 복합재료의 냉각 시 알루미늄 기지의 수축에 따른 수축기공의 형태로 발생할 수 있다. 상기의 가능성들을 검토하기 위해 SEM과 EDS로 기공 내부를 분석한 결과 Fig. 9에서와 같이 기공 내부에 노출된 탄소섬유의 옆면에서 탄소와 더불어 다량의 알루미늄이 검출되었다. 이와 같은 결과는 복합재료 제조 시 탄소섬유 표면에 액상의 알루미늄이 젖었다고 하는 증거로서 위의 가능성들 중에서 마지막 가능성을 뒷받침 한다. 즉, 액상의 알루미늄이 탄소섬유 표면에 코팅된 구리층과의 우수한 젖음성으로 인해 탄소섬유들 사이로 효과적으로 침투하여 탄소섬유들 사이 공간을 채웠다가 냉각 시 수축으로 인해 일부 탄소섬유들 사이에 있던 액상 알루미늄이 빠져 나가 수축공 형태로 발생한 것으로 판단된다.

Fig. 9의 결과로부터 알 수 있는 바와 같이 복합재료 내 존재하는 미세기공은 알루미늄과 탄소섬유와의 젖음성과는 무관한 것으로서 액상 알루미늄의 수축 시 발생한 것이므로 탄소섬유와 알루미늄을 복합화 한 후 서냉하거나 냉각 후 가공에 의해 줄일 수 있다. 본 연구에서는 후 가공에 의해 이러한 미세 수축기공을 줄이고자 냉간압연을 실시하였으며 압연에 의한 탄소섬유의 파괴를 억제하기 위해 탄소섬유의 길이방향으로 연신이 일어나지 않도록 Fig. 2와 같이 압연방향을 탄소섬유에 수직한 방향으로 설정하였다.

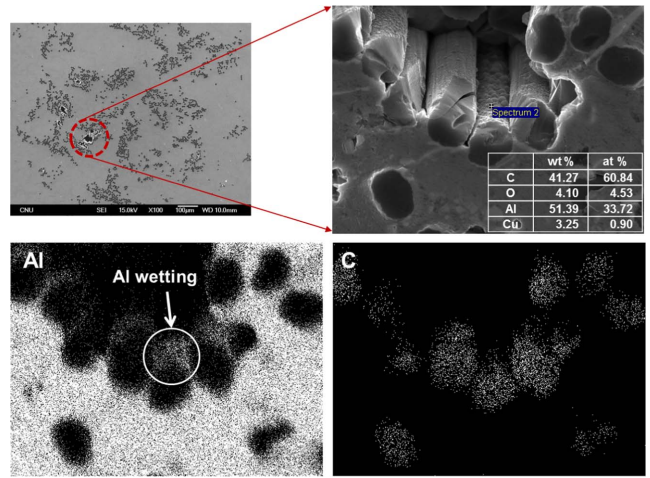


Fig. 9. SEM micrographs and EDS analysis results of micro-voids in Cu-coated CF/Al composite

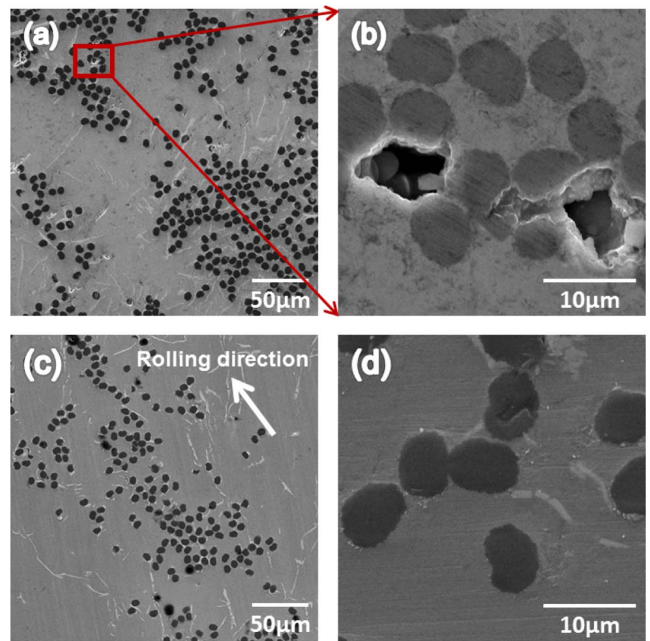


Fig. 10. SEM micrographs of Cu-coated CF/Al composite before (a, b) and after (c, d) cold rolling

상온에서 0.5 mm/pass씩 4회 압연 (압하율 36%)하였으며 압연 후 미세조직을 SEM으로 관찰하였고 그 결과를 Fig. 10에 나타내었다.

그림에서 알 수 있는 바와 같이 복합재료 제조 후 탄소섬유들 사이에 존재했던 미세 수축공들은 압연 후에 대부분 제거되었으며, 확대된 사진에서와 같이 압연에 의한 탄소섬유와 알루미늄 사이의 계면분리나 탄소섬유의 파괴도 관찰되지 않았다. 따라서 압연에 의한 복합재료 내 균열이 발생하지 않는 조건에서 탄소섬유들 사이에 존재하는 미세 기공들은 후속 압연에 의해 효과적으로 제거될 수 있음을 알 수 있었다.

6. 결 론

본 연구에서는 탄소섬유 표면에 무전해 도금을 이용하여 구리를 코팅함으로써 복합재료 제조 시 알루미늄과 탄소섬유 사이의 젖음성 개선에 의한 액상 알루미늄의 자발적 infiltration을 유도하여 무가압 상태에서도 내부기공이 매우 적은 건전한 탄소섬유/알루미늄 복합재료를 제조할 수 있었다. 하지만 제조된 탄소섬유/알루미늄 복합재료 내 일부 탄소섬유 다발 안에서 미세기공이 발생하였으며 생성 요인으로 탄소섬유와 알루미늄과의 우수한 젖음성으로 인해 탄소섬유들 사이 공간을 효과적으로 채웠던 액상 알루미늄이 냉각되는 동안 수축으로 인해 일부 탄소섬유들 사이로부터 빠져 나가 수축공 형태의 기공이 발생한 것으로 판단된다. 이러한 미세 기공들은 복합재료 제조 후 압연과 같은 후 가공에 의해 탄소섬유와 알루미늄 사이의 계면 분리나 탄소섬유의 파괴없이 효과적으로 제거될 수 있다.

REFERENCES

- Zweben, C., "Advances in Composite Materials for Thermal Management in Electronic Packaging", *Journal of the Minerals, Metals & Materials Society*, Vol. 50, No. 6, 1998, pp. 47-51.
- Edie, D.D., "The Effect of Processing on the Structure and Properties of Carbon Fibers", *Carbon*, Vol. 36, No. 4, 1998, pp. 345-362.
- Perez, O., Patriarche, G., and Lancin, M., "Interphases and Mechanical Properties in Carbon Fibres/Al Matrix Composites", *Journal of Physics*, Vol. 3, 1993, pp. 1693-1700.
- Li, S.H. and Chao, C.G., "Effects of Carbon Fiber/Al Interface on Mechanical Properties of Carbon Fiber Reinforced Aluminum Matrix Composites", *Metallurgical and Materials Transaction A*, Vol. 35A, 2004, pp. 2153-2160.
- Rams, J., Urena, A., Escalera, D., and Sanchez, M., "Electroless Nickel Coated Short Carbon Fibres in Aluminium Matrix Composites", *Composites: Part A*, Vol. 38, 2007, pp. 566-575.
- Park, K.Y., Lee, S.B., Kim, J.B., Yi, J.W., Lee, S.K., and Han, J.H., "Fabrication and Microstructure of Metal-Coated Carbon Nanofibers using Electroless Plating", *Journal of The Korean Society for Composite Materials*, Vol. 20, No. 5, 2007, pp. 43-48.
- Landry, K., Kalogeropoulou, S., and Eustathopoulos, N., "Wettability of Carbon by Aluminum and Aluminum Alloys", *Materials Science and Engineering A*, Vol. 254, 1998, pp. 99-111.
- Zhang, Y.H. and Wu, G.H., "Interface and Thermal Expansion of Carbon Fiber Reinforced Aluminum Matrix Composites", *Transactions of Nonferrous Metals Society of China*, Vol. 20, 2010, pp. 2148-2151.
- Liu, Z.G., Mang, X.B., Chai, L.H., and Chen, Y.Y., "Interface Study of Carbon Fibre Reinforced Al-Cu Composites", *Journal of Alloys and Compounds*, Vol. 504, 2010, pp. S512-S514.
- Hajjari, E., Divandari, M., and Mirhabibi, R., "The Effect of Applied Pressure on Fracture Surface and Tensile Properties of Nickel Coated Continuous Carbon Fiber Reinforced Aluminum Composites Fabricated by Squeeze Casting", *Materials and Design*, Vol. 31, 2010, pp. 2381-2386.
- Lee, M.H., Choi, Y.B., Sugio, K., Matsugi, K., and Sasaki, G., "Preparation of Unidirectional Carbon Fiber Preform for Aluminium Matrix Composites", *Materials Transactions*, Vol. 52, No. 5, 2011, pp. 939-942.
- Rohatgi, P.K., Tiwari, V., and Gupta, N., "Squeeze Infiltration Processing of Nickel Coated Carbon Fiber Reinforced Al-2014 Composite", *Journal of Materials Science*, Vol. 41, 2006, pp. 7232-7239.
- Li, S.H. and Chao, C.G., "Effects of Carbon Fiber/Al Interface on Mechanical Properties of Carbon Fiber Reinforced Aluminum Matrix Composites", *Metallurgical and Materials Transactions A*, Vol. 35A, 2004, pp. 2153-2160.
- Li, S.H., Li, X.R., Zhao, W.X., Ma, Q., Lu, X.B., and Wang, Z.L., "A Study of Low Temperature and Low Stress Electroless Copper Plating Bath", *International Journal of Electrochemical Science*, Vol. 8, 2013, pp. 5191-5202.
- Ko, Y.J., Yoon, J., Lee, J.H., and Han, J.H., "Effects of Cu Interlayer on the Wettability of Aluminum on Carbon", *Journal of Alloys and Compounds*, Vol. 574, 2013, pp. 526-531.
- Lee, K.K., Cho, K.Z., and Lee, D.J., "Wetting Improvement of SiC/Al Metal Matrix Composite by Cu Surface Treatment", *Korean Journal of Materials Research*, Vol. 11, No. 5, 2001, pp. 398-404.