

추진기관 노즐용 Needle Punch 탄소/탄소 복합재료 제조

조대현* · 조채욱* · 이종문* · 구형희** · 이재열** · 윤남균***

초 록

추진기관용 노즐에 사용하는 대표적인 소재로는 흑연소재와 탄소/탄소 복합재료를 들 수 있다. 흑연 소재는 열충격 저항성이 취약하여 사용 중 파손의 발생가능성이 높아 현재는 열충격 저항성이 우수한 탄소/탄소 복합재료를 주로 사용하고 있다. 본 연구를 통하여 수입에 의존하였던 Quasi-3D 구조의 니들펀치(Needle Punch) 프리폼을 국산화 개발하였다. 본 연구에서는 니들펀치 프리폼의 제조 공정 및 밀도화 공정을 다루고자 한다.

Key Words: 니들펀치 프리폼, 니들펀치 탄소/탄소 복합재료, 열구배 화학기상침착공정

1. 서 론

탄소/탄소 복합재료(C/C Composites)는 고부가가치 첨단소재이며, 현재에도 높은 제조비용 때문에 거의 우주항공분야나 군수산업분야에만 국한되어 있으며, 국가적 차원에서 사용범위가 제한 받고 있는 실정이다. 우수한 초고온 내삭마 및 기계적 특성이 요구되는 추진기관 노즐용에 주로 흑연소재가 사용되고 있으나 사용 중 급격한 온도의 변화에 따른 열충격 저항성이 취약하여 소재의 균열 및 파손을 유발시킨다. 따라서 열충격 저항성이 우수한 소재 개발의 요구에 니들펀치(Needle Punch)된 C/C 복합재료를 주로 사용하고 있다.

니들펀치는 기본적으로 적층된 섬유층의 표면

* DACC

** 국방과학연구소 4본부 4부

*** 국방과학연구소 1본부 6부

또는 이면에서 여러 종류의 니들을 사용하여 반복적으로 상하운동에 의해 펀칭함으로써 기계적으로 서로 엉켜 일정한 두께와 섬유 밀도를 갖는 섬유층이 형성되게 하는 제조 방법이다. 니들펀치는 적층 구조에서 평면으로 배열된 섬유를 니들의 상하 반복운동에 의해 두께 방향으로 보강시킴으로써 층간 결합력을 형성하나, 과도한 니들펀치는 평면방향의 섬유 손상을 초래하기 때문에 니들의 펀치밀도를 적절히 조절해야 우수한 층간 결합력을 갖는 프리폼을 제조할 수 있다.

현재 우수한 삭마 및 열충격 저항성을 지닌 C/C 복합재료의 니들펀치 프리폼에 수입에 의존하고 있으며, 품질안정성 유지와 수급 용이성에 대한 부적합으로 이에 국산화개발이 절실하다고 할 수 있다. 본 연구에서는 니들펀치 프리폼의 제조 공정 및 여러 밀도화 공정 중 열구배 화학기상침착공정(TG CVI)을 소개하고자 한다.

2. 실험

2.1 니들펀치(Needle punch) 프리폼의 제조

니들펀치 프리폼의 물성은 니들의 종류, 펀치 밀도, 프리폼의 직조 방향 및 프리폼의 이송과 니들의 행정속도에 따라 결정된다. 이러한 니들펀치 공정조건의 제어가 복합재료의 물성을 결정하는 중요한 요인으로 작용한다. 또한, 제작된 프리폼 내부에는 니들이 존재하지 않아야 하며 니들에 의한 결함은 복합재료 제조 시 불량률의 원인이 될 수 있다.

본 실험에 사용된 니들펀치 장비는 그림 1과 같이 프리폼을 제조하는 니들펀치부, 프리폼을 이송하는 이송부로 나뉘지며, 장비 사양은 표. 1과 같이 이송속도, 니들펀치 행정으로 제조공정을 분류할 수 있다. 프리폼을 개발하기에 앞서 우수제품의 벤치마킹을 표. 2와 같이 수행하였으며, 프리폼의 층간 직물두께 및 구조가 불균일함을 알 수 있었다. 이는 C/C 복합재료의 기계적 강도에 영향을 미칠 수 있다. 원소재인 옥시팬 섬유와 기계적 물성에 영향을 미치는 Layer 두께는 표. 3과 같이 프리폼을 제조하였다.

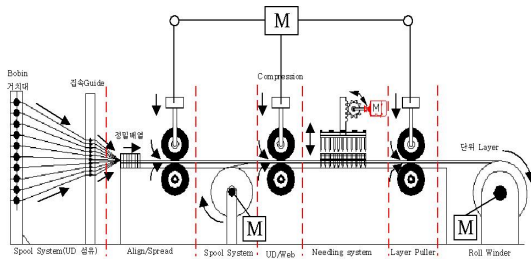


Fig. 1. 니들펀치 장비 개략도

Table 1. 니들펀치 장비 사양

구분	장비사양
프리폼 크기	1,100 × 1,100mm
이송속도	Max. 400mm/min
니들행정	Max. 200rpm

프리폼 제작은 옥시팬 섬유를 균일한 두께의 단일방향(UD, Uni-direction) 직물로 직조하였으며, 0/90° 방향으로 UD직물을 적층하고 한 층(Layer)당 십자방향으로 2회 니들펀치 하였다.

Table 2. 프리폼 벤치마킹

구분	사양
탄화 후 밀도	0.45g/cc
Layer 두께	1.0mm
섬유종류	Oxi-PAN fiber

Table 3. 국산화 프리폼 제조공정

구분	사양
탄화 후 밀도	0.45g/cc
이송속도	70

2.2 열구배 화학기상침착(TG CVI) 공정

탄소/탄소 복합재료의 제조공정의 주된 특징은 예비성형체인 다공성의 프리폼 내부에 고분자 수지를 탄화시켜 얻을 수 있는 resin-char, 메탄 및 프로판과 같은 탄화수소 가스를 열분해시 생성되는 열분해탄소(pyrocarbon), 또는 이들 두 종류가 혼합된 기지로 생성시키는 등 다공성의 프리폼 내부로 기지 재료를 침투 및 증착시켜 밀도를 증가시키는데 있다. 이들 제조 방법 중 탄화수소 가스를 열분해시켜 생성되는 열분해탄소를 기지재료로 생성시키는 열구배 화학기상침착 공정은 기존의 등온 화학기상침착 공정과는 달리 프리폼의 내부와 외부의 온도 구배를 형성시켜 열분해탄소의 증착이 프리폼 내부에서 외부로 진행되도록 유도하는 공정으로 공정속도가 빠르고 균일한 밀도화에 매우 유리한 공정이다.

그림 2는 열구배 화학기상침착공정을 수행하기 위한 공정로의 개념도이다. (1)은 발열체인 히터이며 (2)는 증착시키고자 하는 프리폼이다.

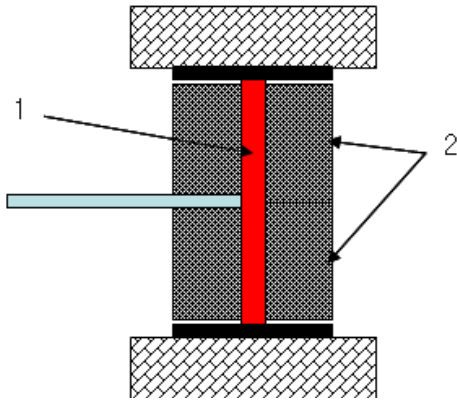
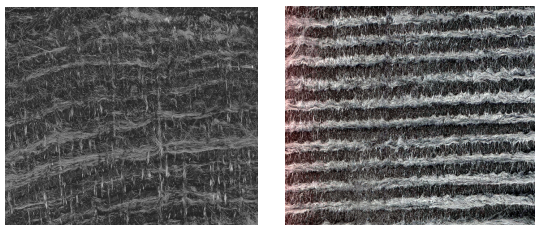


Fig. 2. 열구배 화학기상침착 공정로 개념도

TG CVI 공정 조건 실험은 증착온도 900~1000°C (3조건 : $T1 < T2 < T3$)사이에서 증착속도는 시간당 약 0.2에서 1.0mm 정도의 4가지 조건($R1 < R2 < R3 < R4$)에서 수행하였다.

3. 결 과

니들펀치의 다양한 공정조건들로부터 최적의 니들펀치 프리폼을 제작하였으며, 그림 3에서 (1)벤치마킹 프리폼, (2)국산화 프리폼 단면을 보여주고 있다. 벤치마킹 프리폼은 층간간격이 불규칙하며 한 층의 두께도 일정하지 않은 것으로 볼 수 있다. 그에 비해 본사에서 개발한 프리폼은 층간 간격이 0.8mm로 일정하고 규칙적인 배열로 되어있다. 또한, 프리폼 단면 사진을 통해 두께 방향으로의 보강이 잘되어 있음을 확인할 수 있다.



(1)벤치마킹 프리폼

(2)국산화 프리폼

Fig. 3. 니들펀치 프리폼의 단면사진

TG CVI 공정은 탄화수소가스의 열분해 증착 반응이 매우 제한된 반응영역에서 일어나고 시간에 따라 그 영역이 프리폼 표면으로 이동하는 과정이므로 공정속도와 반응온도는 C/C 복합재료의 최종 밀도에 상호 교호작용이 크다. 일정 온도조건에서 공정속도를 빨리하면 반응영역의 공간 내에서의 열분해 탄소의 증착이 기공을 채울 수 있는 시간이 짧아지므로 최종적으로 얻어지는 재료의 밀도는 낮아지게 되고 일정공정속도 조건에서 공정온도가 높아지면 열분해 탄소의 증착속도는 증가하지만 제한된 반응영역내의 병목 형태의 열린 기공의 입구가 우선적으로 막히는 현상으로 최종밀도가 낮아지는 결과를 가져올 수 있다. 또한 반응영역의 두께는 프리폼의 열전도도에 직접 관계되므로 프리폼 종류(탄소섬유의 형태, 탄소섬유의 부피분율 등)에 따라 동일조건에서 서로 다른 최종밀도를 얻게 되므로 이러한 공정변수는 TG CVI 공정에서 매우 중요하다.

그림 4는 $T1, T2, T3$ 의 온도 조건에서 공정속도는 $R1, R2, R3, R4$ 로 하여 처리한 시편의 원주방향으로의 밀도분포를 나타낸 것이다. $T1$ 조건에서는 $R1$ 공정속도에서 높은 밀도 값을 나타내며 그 이상의 공정속도에서는 낮은 밀도 값을 보이고 있다. $T2$ 조건에서는 $R2$ 의 공정속도에서 가장 높은 밀도 값과 밀도 균일성을 보여주고 있으며, 다른 공정속도에서도 $T1$ 와 $T2$ 의 경우보다 나은 결과를 보여 준다. $T3$ 조건에서는 공정속도가 $R4$ 의 경우 밀도 값 뿐 아니라 균일성이 현저히 나빠지고 있음을 알 수 있다. 그러나 시편의 끝단 부분을 제외하고는 전반적으로 모든 조건(온도 vs. 공정속도)에서 밀도 균일성이 3% 이내로 양호한 결과를 보여 주고 있다.

그림 5는 프리폼을 TG CVI 처리 후 평균밀도와 기공률을 나타낸 그래프이다. 모든 온도조건에서 공정속도가 빨라지면 얻어지는 시편의 밀도는 감소함을 알 수 있다. $T1$ 조건에서 공정속도의 증가에 따른 밀도감소는 $R2$ 이상에서 크게 나타나고, $T2$ 조건에서는 공정속도 증가에 따른 밀도 감소가 완만하게 일어남을 알 수 있다. 그러나 $T3$ 조건에서는 $R2$ 까지는 일정한 밀도 값

을 보이다가 그 이상에서 밀도가 급격히 감소된다. 이와 같은 결과는 일정 공정속도에서 T1 조건은 프리폼 공간을 효과적으로 증착시키는데 필요한 열분해 탄소의 증착속도 보다 낮고 T2 조건은 열분해 탄소의 증착속도와 비슷한 속도이며 T3 조건은 실제 증착속도는 크지만 기공의 막히는 영향이 지배적으로 작용하여 밀도감소가 크게 나타난 결과로 생각된다. 결론적으로 밀도 증가 관점에서는 T2 온도 조건이 이상적이며 R1 조건에서 가장 높은 밀도(1.84g/cc)와 낮은 기공률(3.5%)을 얻을 수 있다. 그리고, 동일한 조건에서 처리한 프리폼의 열전도도 값의 경향은 처리 조건에 따른 최종밀도의 거동과 유사하였다.

그림 6은 프리폼을 각각의 온도 및 공정속도 조건에서 처리한 시편을 저배율(x60)의 광학현미경으로 관찰한 사진으로 전술한 공정조건에 따른 평균 밀도 값의 경향성을 보여주고 있다. T3 조건에서는 T1와 T2 조건 보다 공정속도가 증가함에 따라 큰 기공들이 많이 분포하고 있음이 뚜렷이 관찰되며, 가장 높은 밀도 값과 공정속도에 따른 평균 밀도 값의 감소가 작은 조건인 T2의 경우 미세구조가 다른 조건보다 균일함을 알 수 있다.

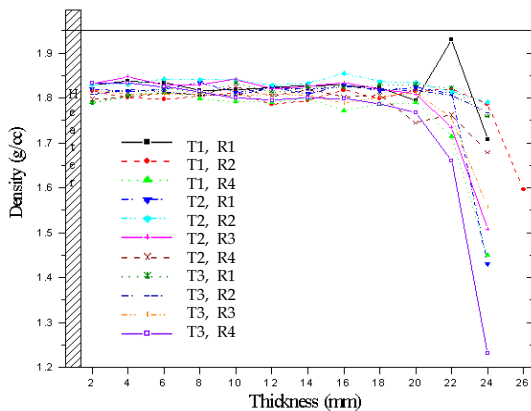


Fig. 4. 공정속도 및 온도에 따른 원주방향 밀도분포도

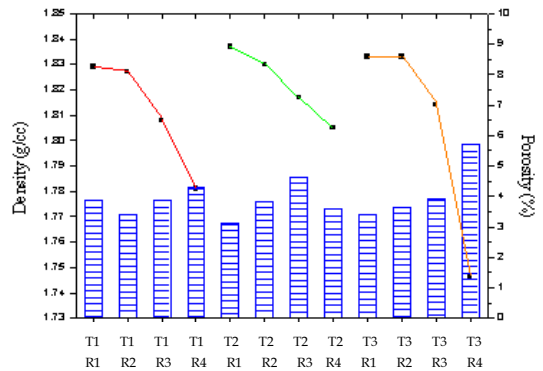


Fig. 5. TG CVI 처리 후 평균밀도와 기공률

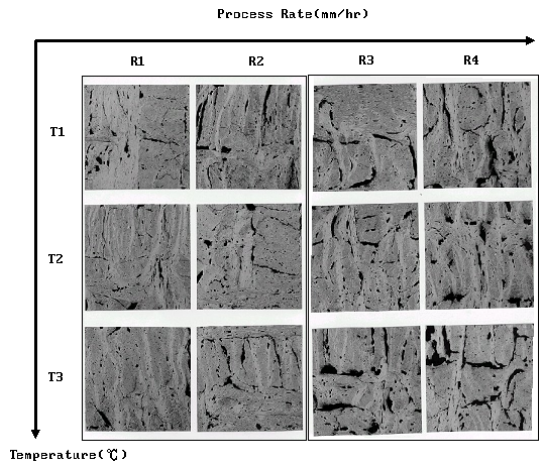


Fig. 6. TG CVI 처리 후 미세조직 사진

본 연구에서는 전술한 TG CVI 공정만으로 일정 이상의 밀도화를 시키는 방법은 시간적, 비용적으로 비효율적 및 밀도화 한계가 있으므로 C/C 복합재료 제조 방법 중 두 가지를 병행하여 노즐용 C/C 복합재료를 제조하였다. 즉, TG CVI공정과 피치 함침탄화공정을 병행하고 있으며 TG CVI 처리 후 피치 함침탄화 공정을 연속적으로 수행하여 TG CVI 후 존재하는 미세기공을 피치 기지로 채워 밀도를 높이고 있다.