PAN계/Rayon계 탄소 직물 하이브리드 복합재료의 역학적 특성 및 열적 특성에 관한 연구

김재홍*·박종규**·정경호*·강태진*

Mechanical and Thermal Properties of Phenolic Composite reinforced with Hybrid of PAN-based/Rayon-based Carbon Fabrics

Jae Hong Kim, Jong Kyu Park, Kyung Ho Jung and Tae Jin Kang

Abstract

The mechanical and thermal properties of PAN-based/Rayon-based carbon fabrics interply hybrid composite materials have been studied. Mechanical properties was improved with increasing amount of continuous PAN-based carbon fabrics. The erosion rate was calculated through torch test. The thermal conductivity of hybrid of spun PAN-based/continuous rayon-based carbon fabric is lower than others.

Key Words: carbon fiber, hybrid composite, thermal conductivity, ablation property

1. 서 론

탄소 섬유 복합재료는 비강도, 비강성이 우수하여 재료의 경량화를 기할 수 있으며, 내열성, 열전도도, 내약품성 등에서 우수한 특성을 가진다.

60년대 후반부터 최근까지 고체연료 로켓모터의 내열재료로 사용되어온 탄소 섬유/페놀 수지 복합재료에는 열전도도가 낮고 단열성이 우수하며, 표면이 매끈하지 않아 층간 전단강도 및 횡간 인장강도가 우수한 rayon계 탄소 섬유가 주로 사용되었으나, rayon계 탄소 섬유는 탄화수율이 20~30%에 불과하고 제조공정상 공해물질과 폐수가 많이 발생되며 가격 경쟁력이 떨어진다는 단점을 가지고 있어 대체 재료로서 PAN계 탄소 섬유에 대한 연구가 활발히 진행되고 있다.

* 서울대학교 재료공학부
** 국방과학연구소

PAN계 탄소 섬유는 rayon계 탄소 섬유에 비해 인장, 굽힘 강도 등의 기계적 특성이 우수하고, 가격 경쟁력이 뛰어난 반면, 열전도도가 높고 불균일한 삭마 특성을 나타내는 단점이 있다. 이러한 단점을 보완하기 위한 일환으로 상용 탄소 섬유의 탄화 온도보다 낮은 온도에서 탄화시킨 저온 탄소 섬유, 사용되는 직물구조 preform을 기존의 연속사에서 방적사로 적용하는 등 많은 연구가 진행되어 왔다.

본 연구에서는 PAN계 탄소 섬유의 기계적 물성을 유지하면서 저 열전도도와 높은 층간결합력 등 내열/단열 재료로서의 복합재료에 요구되는 주요 특성을 한층 더 향상시키기 위한 방안으로 층간 전단강도가 우수하고 열전도도가 낮은 rayon계 탄소 직물과 기계적 물성이 우수한 PAN계 탄소 직물을 하이브리드화한 복합재료를 제작하여 역학적 특성 및 열적 특성을 고찰하였고, 이를 위해 PAN계 탄소 직물 복합재료와 rayon계 탄소 직물 복합재료를 각각 제조하여 비교하였다.

사용된 탄소 섬유는 1500℃에서 탄화한 연속사

형태의 rayon계 탄소 섬유와 PAN계 탄소 섬유, 1100℃에서 탄화한 방적사 형태의 PAN계 저온 탄소 섬유를 사용하였고, 기지재로는 열분해 시에 탄화수율이 높고, 탄화하면서 표면에 다공질의 char를 형성하여 단열재 및 열 차폐재로서의 역할을 수행하는 페놀 수지를 사용하였다.

본 연구에서는 탄소/페놀 복합재료의 인장 강도와 층간 전단력을 측정하였고, 적층구조에 따른 삭마 특성의 차이를 알아보기 위하여 토치 테스트를 실시하였다. 이를 통해 삭마율과 단열지수를 측정하였으며 또한, 하이브리드를 통한 열전도도의 변화를 고찰하고자 복합재료의 면내방향과 수직방향의 열전도도를 측정하였다.

2. 실험

2.1 PAN계/rayon계 탄소 직물 복합재료의 제조

연속사 및 방적사 형태의 PAN계 탄소 직물과 연속사 형태의 rayon계 탄소 직물에 메탄올을 희석한 페놀 수지를 고르게 도포하여 프리프레그(prepreg)를 얻었다. 경화는 hot press에서 시행하였고, 압력은 50kgf/cm^{2}로 하였다. Curing cycle은 150℃에서 holding time 2시간을 적용하였다. 하이브리드 복합재료의 적층은 각 탄소 직물의 영향과 시편 두께를 고려하여 연속사 및 방적사 PAN계 탄소 직물과 rayon계 탄소 직물의 비가 2:1, 4:1인 4종류의 하이브리드 복합재료(PCRC2, PCRC4, PSRC2, PSRC4)를 제조하였다. 또한, 역학적 성질 및 열적 특성을 비교하기 위해 연속사/방적사 PAN계 탄소 직물 복합재료(PC/PS)와 연속사 rayon계 탄소 직물 복합재료(RC)도 각각 제조하였다.

2.2 기계적 특성 실험

2.2.1 인장 실험

인장 강력과 인장 계수를 측정하기 위하여 ASTM D3039-76의 방법에 따라 MTS Sintech 10/GL 시험기를 사용하여 인장 실험을 수행하였다. Cross-head speed는 5.0mm/min으로 하였고, 사용된 시편의 양 끝에 epoxy tab을 붙였다. 시편의 평균 두께는 3.5mm, 폭은 20mm, 지지 거리는 100mm가 되게 하였다. 인장 실험은 PC, PS, RC, PCRC2, PCRC4, PSRC2, PSRC4의 7종류의 시편에 대하여 실험을 하였으며, 한 종류당 5개의 시편을 사용하였다.

2.2.2 층간 전단력 실험

층간 전단력을 측정하기 위하여 ASTM D790의 방법에 따라 short beam shear test를 MTS Sintech 10G/L 시험기를 사용하여 수행하였다. 시편의 span to depth ratio는 4로 하였으며, cross-head speed는 1.3mm/min으로 하였다. 층간 전단력 실험은 PCRC2, PCRC4, PSRC2, PSRC4의 4종류의 시편에 대하여 실험을 하였다.

2.3 열적 특성 실험

2.3.1 토치 실험

하이브리드화가 탄소/페놀 복합재료의 삭마 특성에 미치는 영향을 알아보기 위하여 ASTM E285의 방법에 따라 토치 시험기(METCO inc.)를 사용하여 실험을 수행하였다. 토치 실험을 통해서는 삭마율과 단열 지수를 측정할 수 있으며, 실험에 사용된 시편은 가로, 세로 길이가 각각 100mm, 평균 두께는 10mm가 되게 하였다. 또한, 토치 팁과 시편 사이의 거리는 30mm가 되도록 유지하였다.

2.3.2 열전도도 측정

탄소/페놀 복합재료의 적층 구조에 따른 열전도도의 변화를 알아보기 위하여 복합재료의 열전도도를 측정하였다. 상온 열전도도 측정은 정상상태에서 총 입열량, 그리고 표준시편과 측정시편의 상·하 온도 차이를 측정하여 열전도도를 구하는 ASTM E1225 방법의 상온 열전도도 시험기를 사용하였다. 시편은 높이 20mm, 직경 12mm의 원기둥 형태이고, 열전도도는 단열 상태에서 적층된 직물의 평면 방향과 평행한 방향 및 직물에 대해 수직인 방향, 두 가지 방향에 대해 측정하였다.

3. 결과 및 고찰

3.1 기계적 특성

3.1.1 인장 실험 결과

인장 실험을 통해 얻은 각 시편의 인장 강도와 인장 계수를 Table 1에 나타내었다. Table 1에서

보듯이 인장 계수와 인장 강도는 연속사 PAN계 탄소 직물을 보강재로 사용한 시편에서 높은 값을 보였으며, 방적사 PAN계, 연속사 rayon계 탄소 직물을 보강재로 사용한 시편에서 상대적으로 낮은 값을 나타내었다. PS의 인장 강도 값이 낮은 이유는 방적사가 연속사에 비해 인장 강도가 낮을 뿐만 아니라 단섬유에 꼬임을 준 실이기 때문에 이로 인해 나타나는 섬유의 pull out 효과 때문으로 판단된다.

Table 1. 탄소/페놀 복합재료의 인장강도

시편	인장 강도 [MPa]	인장 계수 [GPa]
PC	194.5	16.6
PS	145.2	8.42
RC	120.2	10.4
PCRC2	230.54	14.87
PCRC4	209.37	14.86
PSRC2	160.02	10.39
PSRC4	167.28	11.86

3.1.2 층간 전단력 실험 결과

층간 전단력은 적층 복합재료에서 여러 역학적 물성에 중요한 영향을 미친다. Fig. 1은 short beam shear test를 통해 얻은 각 시편의 층간 전단력을 나타낸 그래프이다. Fig. 1에서 보듯이 층간 전단력은 하이브리드 종류에 따라 크게 영향을 받지는 않았으나, 연속사 PAN계 탄소 직물을 많이 사용한 하이브리드 복합재료에서 우수하게 측정되었다.

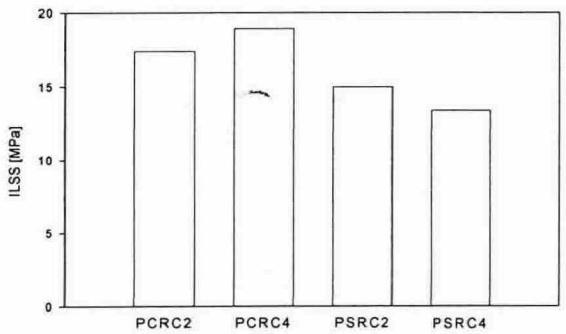

Fig. 1 하이브리드 복합재료의 ILSS

3.2 열적 특성

3.2.1 토치 실험 결과

내열 복합재료에서 중요한 특성 중의 하나인 삭마율(Erosion rate)이 보강재와 적층 순서에 따라 어떻게 달라지는지 Table 2에 나타내었다. 삭마율은 시편의 두께를 시편이 화염에 노출된 순간부터 시편이 화염에 의해 완전히 관통되는 데 걸린 시간으로 나눈 값으로 삭마율이 낮을수록 삭마 저항성이 우수하다는 것을 의미한다. Table 2에서 보듯이 PC의 삭마 저항성이 가장 우수하고, RC의 경우 다른 시편에 비해 삭마 저항성이 떨어짐을 확인할 수 있다.

Table 2. 탄소/페놀 복합재료의 삭마율

시편	삭마율 (mm/s)
PC	0.075
PS	0.098
RC	0.131
PCRC2	0.097
PCRC4	0.102
PSRC2	0.122
PSRC4	0.107

3.2.2 열전도도 실험 결과

PC, PS, RC와 4가지 다른 하이브리드 복합재료의 면내 방향과 수직 방향의 열전도도 결과를 Table 3에 나타내었다. 우선, 탄소 섬유는 섬유축 방향으로의 열전도도가 섬유축에 수직한 방향으로의 열전도도보다 10배 이상에 이를 정도로 이방성이 크기 때문에 섬유축 방향인 복합재료의 면내 방향과 수직 방향의 열전도도의 값이 큰 차이를 보인다. Table 3의 결과에서도 이를 확인할 수 있으며, 저열전도도 구현을 위해서는 방적사 PAN계 탄소 직물과 rayon계 탄소 직물을 하이브리드화한 복합재료가 면내 방향뿐만 아니라 수직 방향에서도 낮은 값을 보여 유리함을 확인할 수 있다.

Table 3. 탄소/페놀 복합재료의 열전도도

시편	면내 방향	수직 방향
PC	1.949	0.363
PS	1.639	0.409
RC	1.537	0.900
PCRC2	1.720	0.398
PCRC4	1.696	0.438
PSRC2	1.123	0.318
PSRC4	1.331	0.307

4. 결 론

전구체의 종류에 따라 PAN계/rayon계, 직물의 형태에 따라 연속사 및 방적사 탄소 직물로 하이브리드 복합재료를 제작하여, 기계적 특성과 삭마 특성 및 열전도도 특성을 PC, PS, RC와 비교·평가하였다. 인장 실험 결과 예상대로 연속사 PAN계 탄소 직물을 많이 사용한 하이브리드 복합재료가 가장 우수한 것으로 측정되었고, 층간 결합력 또한 하이브리드 종류에 크게 상관없이 연속사 PAN계 탄소 직물을 많이 사용한 복합재료에서 우수하게 측정되었다. 토치 실험을 통한 삭마율에서는 RC의 삭마 저항성이 가장 떨어짐을 확인할 수 있었다. 이는 rayon계 탄소 직물을 하이브리드화하여 적용하고자 했던 주요 이유가 삭마 특성의 향상에 있었음을 감안할 때 이 결과는 기대치와 다르다고 할 수 있다. 열전도도 실험에서는 방적사 PAN계 탄소 직물과 rayon계 탄소 직물을 하이브리드화한 복합재료가 면내 방향과 수직 방향 모두에서 유리한 것으로 확인되었다.

후 기

본 연구는 과학기술부 지정 국가지정연구실 사업의 과제 지원을 받아 이루어졌으며 이에 감사드립니다.

참고문헌

(1) B. D. Agarwal, "Analysis and Performance of Fiber Composite", John Wiley & Sons, INc., (1990)

(2) J. E. Parrott and Audrey D. Stuckes, "Thermal Conductivity of Solids", (1975)

(3) D. F. Adams and G. W. Hastings, "Carbon Fibers and Their Composites", p.253(1988)

(4) D. L. Schmidt and R. D. Craig, "Advanced carbon fabric/phenolics for thermal protection application", AFWAC-TR-81-4136, AFWAL, p.1-67(1982)

(5) Rohchon Park and Jyongsik Jang, "The effect of Hybridization on Mechanical Performance of Aramid/Polyethylene Intraply Fabric Composites", Com. Sci. Technol., 58, p.1621-1628(1998)

(6) H. A. Katzman, P. M. Adams, T. D. Le and C. S. Hemminger, "Characterization of low thermal conductivity PAN-based carbon fibers", Carbon, 32, p.379-391(1994)

(7) Springer G. S. and Tsai S. W., "Thermal Conductivities of Unidirectional Materials", Journal of Composite Materials, 1, p.166-173(1967)