

# FPS 공정에 의한 열경화성 복합재 유효성 검증 연구

김진현\*·엄문광\*·변준형\*·이상관\*·전영준\*

## A Study on Property of Thermoset Composite in FPS Process

J-H Kim, M-K Um, J-H Byun and S-K Lee

### Abstract

Among the various manufacturing processes of composites, the tape lay-up process of thermoset prepreg has many advantages compared to autoclave or hot press forming. It has a high potential to process automation and continuous fabrication.. Fiber placement developed as a logical combination of filament winding and automated tape placement to overcome some of the limitations of each manufacturing method. Fiber placement uses a compaction device to apply direct contact between the incoming materials in the fiber placement head and Heat is added to the materials at the nip point of the compaction roller. This paper will discuss property of thermoset composite as compaction and heat effect in Automated fiber placement

**Key Words:** Tape lay up, FPS(Fiber Placement System), Automation

### 1. 서 론

섬유강화 복합재료는 외부로부터의 하중을 감당하는 강화 재료(Reinforcement)와 강화 재료를 결합하고 보호하는 기지 재료(Matrix)로 구성되어 있다. 복합재료는 이종(異種), 이방성 물질으로 인해 요구 물성 충족에 대한 유연성이 높고 고성능을 요구하는 우주항공용 부품에서부터 일반적인 기계부품 등에 이르기까지 다양한 분야에 적용되고 있다. 섬유강화 복합재료의 경우 현재 널리 적용되고 있는 복합재료 제작 공정은 수적층 방법을 이용한 오토클레이브 진공백 성형공정(Autoclave Vacuum Bag Molding Process), 압축성형 공정(Compression Molding Process), 수지 충전 공정(Resin Transfer Molding Process) 등이

있다. 수적층을 이용한 공정들의 경우 제품의 형상이 3차원일 때 2차원 프리프레그의 특성상 형상 적응성이 떨어지고, 설계 시에 설정한 방향으로 보강재를 적층할 수 없어 제품의 강도 구현에도 어려움이 많으므로 이러한 문제점을 해결하기 위해 대체 할 수 있는 테이프 레이업(Tape Lay-up) 성형 공정에 대해 유효성 검증을 위한 시험을 행하였다. 테이프 레이업 성형 공정의 경우 크고 복잡한 복합재료 구조물을 제조하는 기술로 다양한 형상에 대해서 제작이 가능하며, 섬유배열을 정확하게 할 수 있어 제품 형상의 정밀화와 구조물성 극대화가 가능하다. 또한 자동화된 연속 성형 공정이 가능하므로 제품의 재연성과 생산성이 뛰어나다.[1]

그러나 섬유 자동 연속 적층 공정은 프리프레그 적층시 압착 용착을 위한 열원, 압착롤러 및 공정 속도향상 등의 변수에 따라 성형품의 기계적 물성이 현저히 달라 질 수 있으므로 공정 변수 최적화에 관한 연구가 필요하다.

\* 한국기계연구원 복합재료그룹

또한, 섬유 자동 연속 적층 기술은 수적층법의 대표적 대체 기술 중 하나이므로, 연속 적층 공정의 유효성을 검증하기 위해서는 수적층법에 의한 Autoclave로 제작된 시편과 구조적 물성에 관한 비교가 필요하다. 따라서 본연구에서는 섬유 자동 연속 적층 장비로 제조한 시편과 오토클레이브 공정에 의한 시편의 기본 물성을 비교하고, 미세 조직을 관찰하였다.

## 2. 자동 연속 적층 공정

본 논문에서는 열경화성 복합재료를 성형하기 위하여 섬유 자동 연속 적층 장비(Fiber Placement System)를 이용하였다. 섬유 자동 연속 적층 장비는 크게 두개의 부분으로 나눌 수 있다. 먼저, 테이프형 프리프레그를 적층하는 섬유 자동 적층 헤드부와 섬유 자동 적층 헤드부를 움직이는 구동부로 이루어져 있다. 다시 섬유 자동 적층 헤드부는 테이프형 프리프레그를 공급 할 수 있는 테이프 공급장치부, 프리프레그 테이프의 층간을 압착 시키는 가압 로울러부, 테이프형 프리프레그를 가열하기 위한 열원부로 나누어진다. 실험에서 열경화성 프리프레그 테이프의 경우 상온에서 프리프레그의 점도가 높아지는 것을 방지하기 위해 테이프 공급장치에 냉각장치를 설치하였으며 온도를 -6.5도로 유지 하였다. 섬유 자동 연속 적층 장비의 가압 로울러부는 압력 조절장치를 설치하여 프리프레그가 압착되는 압력을 일정하게 유지할 수 있도록 하였으며 로울러의 소재는 열전달이 작은 고무 소재를 사용하였다. Fig. 1은 섬유 자동 연속 적층 장비의 헤드부이다.

섬유 자동 연속 적층 장비에서 열원은 레이저 가열방식, 초음파 가열방식, 고온가스 가열방식 등이 있다. 레이저 가열방식의 경우 고질의 복합 재료를 생산하는 데에 유망한 열원으로 입증 되었으나[2] 비용 면에서 어려움이 있으며, 초음파 가열 방식의 경우 레이저 가열방식에 비해 비용 면에서 장점이 있으나 프로세스 제어와 크기를 조절하기 힘든 문제가 있어 본 연구에서는 질소 가스를 이용한 가열방식을 사용하였다. 질소 가스 가열방식의 경우 복잡한 복합재료 구조와 구성요소가 다른 다양한 시스템 요구에도

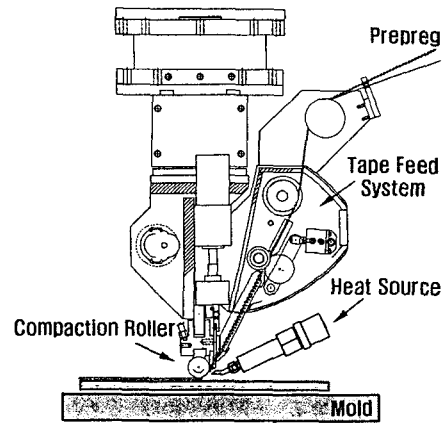


Fig. 1 섬유 자동 연속 적층 장비의 헤드부 구성

폭 넓게 적용할 수 있으며, 작업성 및 비용적인 면에서도 주요한 열원으로 입증된 바 있다.[3,4,5]

## 3. 기본 성형 물성 시험 연구

본 연구에서는 오토클레이브 공정 대비 연속 적층 공정의 유효성 검증을 위하여 각 공정으로 제작한 기초 물성 및 건전성을 분석하였다. 오토클레이브 성형 공정의 경우는 경화중 압력을 가하지 않았을 때와 경화중 5.5 atm 압력을 가하였을 때의 시편을 각각 제작하였다. 섬유 자동 연속 적층 공정에서는 압착력을 10kgf로 가하고 열원을 사용하지 않았을 때와 열원을 사용하였을 때의 시편을 각각 제작하였다. 시편은 0도 방향과 90도 방향에 대하여 ASTM 규격에 따른 인장, 압축, 층간전단 시험을 시행하였다.

### 3.1 재료선정

현재 국내에서는 섬유 자동 적층 장비 전용의 복합재가 생산 되지 않으며 생산되는 Tape Type Prepreg의 경우 FPS 공정 모재로 적용하기에 어려움이 있어 기존 SK Chemical사의 Sheet Roll Type Prepreg (USN125BX)를 10mm 간격으로 절단하여 사용하였으며 재료의 물성을 Table 1.에 나타내었다.

	SK Chemical (Sheet Roll Type)
Carbon 섬유	TR 30(≒T 700)
Width	10mm
수지 함양	33%
Thickness	0.122mm

Table 1. 사용된 재료 물성

### 3.2 시험 방법

인장시험은 ASTM3039 규격에 따라 시행하였으며, 하중은 변위 제어를 통하여 2mm/min의 속도로 제어하였고, 탄성계수 (Young's Modulus)와 프와송 비(Poisson's Ratio)를 구하기 위하여 시편의 중앙에 스트레인 케이지를 부착하였다.

압축시험은 ASTM3410 규격에 따라 시행하였으며, 하중은 변위 제어를 통하여 1.5mm/min의 속도로 제어하였고, 탄성계수 (Young's Modulus)를 구하기 위하여 시편의 중앙에 스트레인 케이지를 부착하였다.

충간 전단시험은 ASTM2344 규격에 따라 시행하였으며, 하중은 변위 제어를 통하여 1.3mm/min의 속도로 제어하였다. 상기 모든 시험은 Instron 4206을 사용하였다.

### 3.3 시험 결과

인장 및 압축시험 결과는 Table 2 및 Table 3에 주어지 있다. 시험 결과를 보면 Autoclave 무압력 공정과 연속적층 무열원 공정 시편의 물성 특성에 비해 Autoclave 5.5 atm 압력 조건의 시편과 연속적층공정 열원을 가한경우에 인장, 압축강도와 modulus가 높게 나타났으며 특히, Autoclave 5.5 atm 압력 조건과 연속적층공정 열원을 가한경우의 물성은 유사하게 나타남을 확인하였다. 이는 Autoclave 공정을 대체하기 위한 연속적층 공정의 경우에 열원을 가하고, 압착력을 가한 경우 프리프레그의 압, 용착 거동의 향상으로 인해 기계적 물성이 열원을 가하지 않은 경우보다 증가함을 알 수 있다.

충간 전단 시험 결과는 Table 4에 주어지 있다. Autoclave 5.5atm 공정의 경우에 충간전단 강도가 가장 높음을 보여주며 연속적층 공정의 경우는 열원을 가하고 10 kgf로 압착한 경우에도 Autoclave 5.5atm 시편의 강도에 미치지 못하는

CASE	Tensile strength (MPa)		Tensile Elastic modulus (GPa)	
Autoclave	X <sub>T</sub>	1926	E <sub>1</sub>	115.3
No Pressure	Y <sub>T</sub> , Z <sub>T</sub>	45	E <sub>2</sub> , E <sub>3</sub>	6.9
Autoclave	X <sub>T</sub>	2000	E <sub>1</sub>	131
5.5atm	Y <sub>T</sub> , Z <sub>T</sub>	61	E <sub>2</sub> , E <sub>3</sub>	8.2
연속적층공정	X <sub>T</sub>	1945	E <sub>1</sub>	128
무열원,10kgf	Y <sub>T</sub> , Z <sub>T</sub>	42	E <sub>2</sub> , E <sub>3</sub>	7.2
연속적층공정	X <sub>T</sub>	2030	E <sub>1</sub>	132
100℃,30slpm	Y <sub>T</sub> , Z <sub>T</sub>	52	E <sub>2</sub> , E <sub>3</sub>	8.6
10kgf				

Table 2. 인장시험 결과

CASE	Compressive strength (MPa)		Compressive Elastic modulus (GPa)	
Autoclave	X <sub>c</sub>	720.5	E <sub>1</sub>	109.2
No Pressure	Y <sub>c</sub> , Z <sub>c</sub>	125.5	E <sub>2</sub> , E <sub>3</sub>	8.2
Autoclave	X <sub>c</sub>	820.1	E <sub>1</sub>	138.1
5.5atm	Y <sub>c</sub> , Z <sub>c</sub>	120.9	E <sub>2</sub> , E <sub>3</sub>	17.7
연속적층공정	X <sub>c</sub>	786.1	E <sub>1</sub>	119.5
무열원,10kgf	Y <sub>c</sub> , Z <sub>c</sub>	115.7	E <sub>2</sub> , E <sub>3</sub>	12.3
연속적층공정	X <sub>c</sub>	820.1	E <sub>1</sub>	129.8
100℃, 30slpm	Y <sub>c</sub> , Z <sub>c</sub>	120.9	E <sub>2</sub> , E <sub>3</sub>	16.7
10kgf				

Table 3. 압축 시험 결과

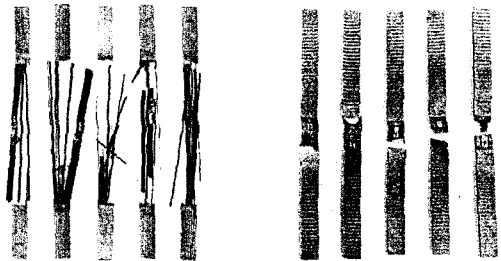


Fig 2 인장시험 . 압축 시험 후 시편

것으로 보아 압착하중 10kgf 에서는 Prepreg 사이의 압, 용착이 충분히 이루어지지 못한 것으로 예상되며, 두께 방향의 강도를 향상시키기 위한 압착 하중의 정량화가 필요함을 예상 할 수 있다.

	Autoclave No Pressure	Autoclave 5.5atm	연속적층 공정 무열원 10kgf	연속적층 공정 100oC 30slpm 10kgf
Shear strength (MPa)	66.60	80.81	64.94	65.32

Table 4. 층간 전단 시험 결과

#### 4. 시편 건전성 분석 : 미세조직관찰

Autoclave 공정과 연속 적층 공정으로 제작한 시편에 대하여 기공율과 섬유체적률을 측정하였다. 시편 관찰을 위하여 광학현미경(NIKON사 EPIPHOT200)을 사용하였으며, Mounting 된 시편 단면을 Sand paper(사포)와 Emery cloth(연마천), Diamond paste(3 μm, 1 μm)로 두께방향으로 폴리싱(Polishing)을 하면서 ×50 배율로 시편의 단면을 관찰하였다. Table 6 은 Autoclave 공정(No Pressure, 5.5atm)과 연속 적층 공정(10, 20, 30kgf)으로 제작한 시편의 단면을 관찰한 사진이다. 사진에서 볼 수 있듯이 통상적인 Autoclave 공정(5.5atm)에 의한 시편과 비교해 보면 연속 적층 공정에서는 압착력이 20kgf 이상이면 기공을 및 섬유 체적률이 Autoclave 5.5 atm 공정 시편에 근접함을 확인 할 수 있었다. 미세 조직 관찰의 결과에 의하면 연속 적층 공정에서 압착 하중 조건을 10kgf에서 30kgf로 증가시키면 시편 단면 내부의 기공율이 줄어들고 섬유 체적률이 증가함을 확인할 수 있는데 이는 연속 적층 공정에서 압착 하중을 30kgf로 증가시키면 두께 방향의 층간 전단 강도가 향상되어 질 수 있음을 확인하였다.

#### 4. 결 론

본 연구에서는 섬유 자동 연속 적층 공정의 유효성 검증을 위하여 오토클레이브 공정과 자동 연속 적층 공정으로 기본 형상 시편을 제조하여 기초물성시험을 수행하여 비교 분석하고, 미세 조직 관찰을 통하여 시편 건전성을 확보하여 공

제작방법	압력 및 압착조건	기공율 (%)	섬유 체적률 (67% prepreg)
Autoclave	No Pressure	4.56	68.96
	5.5atm	0.35	76.15
연속적층공정  (100℃, N <sub>2</sub> 유량 30slpm, 헤드속도 38.1mm/s)	10kgf	3.72	70.85
	20kgf	0.62	73.44
	30kgf	0.54	75.48

Table 5. 공정에 따른 기공율 함유 결과

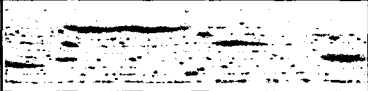

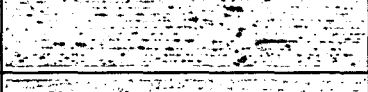
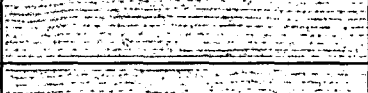
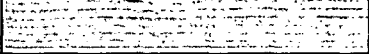
제작방법	압력 및 압착 조건	시편 단면 관찰 사진
Autoclave	No Pressure	
	5.5atm	
연속적층 공정  (100℃, N <sub>2</sub> 유량 30slpm, 헤드속도 38.1mm/s)	10kgf	
	20kgf	
	30kgf	

Table 6. 시편 미세 조직 관찰 결과

정 기술 최적화를 위한 데이터를 획득 하였으며 다음과 같은 결과를 얻었다.

1. 수적층에 의한 Autoclave 성형 시편과 FPS (섬유자동 연속 적층) 공법에 의해 성형된 시편은 공정 변수를 달리하여도 인장, 압축 강도의 경우에는 큰 변화가 없음을 보였다.

2. 복합재 두께 방향의 강도와, Delamination 의 특성을 확인할수 있는 층간전단 시험의 경우 Autoclave-가압5.5atm 의 시편 물성이 Autocalve-무압력, FPS-물열원, FPS-열원,무압착력 공정의 경우보다 층간전단강도가 높았다.

3. 섬유자동 연속 적층의 경우와 Autoclave 시편의 경우 공정 변수를 달리한 경우의 미세조직 관찰을 통하여 압착력과 열원을 적절히 적용한 FPS 공정의 성형 시편의 건전성이 향상됨을 확인 하였으며, 본 공정 시편에 대한 층간전단 시험에 대한 향후 연구의 필요함을 확인하였다.

## 후 기

본 연구는 기본연구사업 및 국가지정연구실사업(NRL)의 지원으로 진행되었습니다. 이에 관계자 여러분께 감사드립니다.

## 참고문헌

- (1) Air & Space Europe, Vol.3, No.3/4, 2001, pp.119-121
- (2) S. K. Mazumdar and S. V. Hoa, 38th Intern. SAMPE Sympo., 189 (1993)
- (3) Steiner, K. V., R. Pitchumani, B. M. Bauer and J. W. Gillespie, Jr. "Experimental Verification of Modeling and Control for Thermoplastic Tow Placement" 40th International SAMPE Symposium, 1995, pp.1550-1559
- (4) Roderic, C. D., R. Pitchumani and J. W. Gillespie, Jr. "Simulation of the Transient