

# 실험계획법을 이용한 필라멘트 와인딩 공정변수에 대한 연구

최창근\* · 이중희\* · 김병선\*\* · 김병하\*\* · 황병선\*\*

## A Study on the Processing Parameters of Filament Winding with Design of Experiment

C.K. Choi\*, J.H. Lee\*, B.S. Kim\*\*, B.H. Kim\*\* and B.S. Hwang\*\*

**Key Words:** Filament Winding(필라멘트 와인딩), Orthogonal Array Table(직교배열표), Processing Parameter(공정변수), Analysis of Variance(분산분석)

### Abstract

Processing parameters of filament winding were investigated by using design of experiment. To understand 4 main effects(fiber tension, impregnation pressure, processing rate, and temperature) and 3 interactions,  $L_{27}(3^{13})$  orthogonal array table was adopted. The used materials were carbon fiber and epoxy resin. Split disk test and short-beam test, which are the general test methods for filament wound composite material, were selected as evaluation methods for a filament wound part. The optimal processing parameters for the filament winding were easily found through the analysis of variance of the experimental results.

### 1. 서론

필라멘트 와인딩 공정은 수지가 함침된 연속적인 섬유상의 스트랜드(strand)나 필라멘트(filament)를 일정한 형상을 가진 맨드릴(mandrel)에 감아 일정 온도에서 일정 시간 동안에 경화시켜 복합재료 구조물을 성형하는 공정이다. 이러한 방식으로 성형된 제품은 원하는 방향으로 연속섬유를 위치시킬 수가 있어서 비강도와 비강성을 가졌을 뿐만 아니라 가볍고 다양한 형상으로의 제조가 용이하여 고압가스용기, 로켓모터케이스, 항공기의 동체, 유도탄의 발사관, 스키 폴과 같은 다양한 레저용품 등에서 사용이 꾸준히 계속되고 있다[1-4]. 이러한 필라멘트 와인딩은 사용되는 섬유의 처리공정에 따라서 크게 습식(wet

system)과 건식(prepreg system)의 2가지로 나누어진다. 건식은 이미 함침된 프리프레그(prepreg)를 원하는 형상에 감아서 성형하는 공법으로 프리프레그를 사용하기 때문에, 수지량이 일정하며 체결하고 복잡한 형상의 성형도 가능하지만 가격이 비싸고 냉장보관을 요하는 반면에, 습식은 공정 중에 섬유에 수지를 함침시키기 때문에 다소 취급이 불편하나, 가격이 싸고 보관이 용이하고 상온경화가 가능한 방식이다[1]. 건식의 경우에는 공정변수가 습식에 비하여 조절하기 용이하기 때문에 여러 문헌에서 이미 공정변수에 대한 많은 연구가 이뤄지고 있으나, 습식의 경우 성형 시에 많은 공정변수들이 하나의 주효과(main effect)에 의해서 지배되지 않고 다양한 변수들의 교호작용(interaction)도 함께 동반하게 되어 공정변수의 설정이 어렵다. 이러한 다양한 공정변수간의 교호작용을 살펴보기 위해서 여러 산업 분야에서 널리 사용이 이뤄지고 있는 실험계획법 중에서 직교배열표(orthogonal array table)를 사용하여 분산분석(analysis of variance)을 통해서 이러한 교

\* 전북대 자동차부품·금형기술혁신센터

\*\* 한국기계연구원 복합재료그룹

호작용과 주효과를 알아보고 제품이나 공정의 최적공정을 선정하고자 한다[2,5]. 본 연구에서는 이러한 최적화 조건의 선정을 위해서 탄소/에폭시 복합재료 시편을 제작하여 short-beam 실험, 링 형태의 시편에 대한 인장실험(split disk test) 등을 행한 후에 분산분석하였다.

## 2. 실험방법

### 2.1 실험계획법

필라멘트 와인딩 공정변수는 문헌조사와 현장에서 일반적으로 생산 시에 조절이 가능한 변수들에서 고려하였고, 고려된 인자 중에서 특성치에 큰 영향을 끼칠 만한 인자를 선별하여 선택하였다[1-4]. 인자로써 섬유장력(fiber tension), 함침압력(impregnation pressure), 공정속도(processing rate), 수지용기의 온도(temperature of resin bath)를 선정하였다. 인자들의 수준을 선정하기 위해서 예비실험을 행하였고, 예비실험을 통해서 일정 수준 이하에서는 낮은 특성치를 보였는데, 이러한 조건에서는 일반적인 성형이 행하지 않기 때문에, 영향을 미칠 수가 있는 일정 이상에서 수준을 선정하였다. 선정된 인자와 수준으로부터 인자간의 2차 교호작용까지 만을 고려하여 직교배열표(orthogonal array Table)를 작성하였다. 구성된 직교배열표는 4개의 주효과와 3개의 2차 교호작용을 배열할 수가 있는  $L_{27}(3^3)$ 을 선택하였고 그 인자와 교호작용은 Table.1과 같다.

### 2.2 시편제작

실험에서 사용된 수지는 (주)국도화학의 필라멘트 와인딩용 에폭시수지인 KBR-1729를 사용하

였고, 경화제로는 산무수물계열의 KBH-1089를 사용하였다. 보강재료로는 Toray사의 탄소섬유인 T700을 사용하였다. 수지의 경화특성을 살펴보기 위하여 DSC을 사용하였고, 파악된 경화특성을 통해서 선정된 경화온도는 110℃에서, 경화시간은 1시간으로 하였다. 여러 성형인자의 변화에 따른 특성을 관찰을 하기 위해 ASTM D2291에 의거하여 맨드릴(mandrel)을 제작하여 후프(hoop) 와인딩된 시편을 성형하였다. 시편의 제작을 위해서 사용된 필라멘트 와인딩 장비는 2축 와인딩 기계를 사용하였고 공정 중에 롤러의 함침압력을 측정하기 위해서 드럼(drum) 안에 로드셀을 설치한 수지용기를 자체 제작하였다. Fig.1은 수지용기의 개략도를 보이고 있다. 와인딩 시편의 내경은 146.05mm, 폭은 6.35mm이며, 두께는 split disk 시편 경우에 1~2mm, short-beam 시편의 경우에는 3.2mm로 제작하였다. 이때 성형은 후프방향으로만 행하였으며, 성형 후 오븐에 넣고 맨드릴을 회전시키면서 경화를 시켰다. 경화 후 탈형을 하여 short-beam 시편의 경우에는 diamond wheel cutter를 사용하여 길이를 13mm로 기계 가공을 행하였다.

### 2.3 실험

필라멘트 와인딩 시편에 대한 주인자의 효과를 파악하기 위해서 split disk 실험과 short-beam 실험을 행하였다. split disk 실험은 ASTM D2290에 준하여 행하였다. split disk 실험의 경우 시편의 Young's modulus값을 얻기 위해서 인장방향에서 30° 와 60° 의 위치에 각각 KYOWA사의 KFG-5-120-C1-23인 strain gage를 부착하여 인장방향의 Young's modulus를 측정하였다[3,4]. 인장 시에 치구에 의한 마찰력의 영향을 최소화하

Table 1 Factors and processing condition

Sign	Factors	Condition		
		1	2	3
A	Fiber tension(kgf)	1	2	3
B	Impregnation pressure(psi)	10	20	30
C	Processing rate(rpm)	5	10	15
D	Temperature of resin bath(℃)	15	25	35
AB	Interaction			
AC	Interaction			
BC	Interaction			

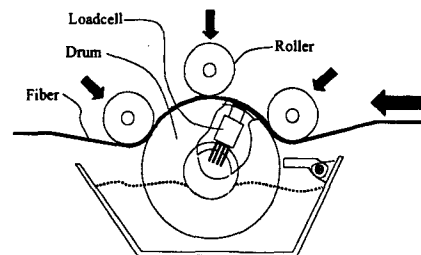


Fig.1 Schematic of the resin bath

기 위해서 흑연가루(graphite powder)를 치구에 고루 발라준 후에 split disk 시편을 치구에 장착 시키고 실험을 행하였다. Crosshead speed는 2.5 mm/min이고, Young's modulus를 측정하기 위해서 변형을 5000  $\mu\epsilon$  까지 인장 후에 다시 하중을 제거 하여 변형과 하중의 히스테리시스 루우프(hysteresis loop)를 구하고 이 값의 평균을 강성도로 선정하였다[3]. Short-beam 실험은 ASTM D2344에 준하여 실험을 행하였다. 사용된 시편은 ASTM D2291에 의거해서 제작되었고 span/thickness의 비는 4이며, crosshead speed는 1.3mm/min이다.

### 3. 결과 및 고찰

#### 3.1 Split disk test

본 실험에서 후프방향의 와인딩 시편의 기계적 특성치를 측정하기 위해 직교배열표[L<sub>3</sub>(3<sup>27</sup>)]를 사용하였다. 인장강도의 경우, 각각의 성형조건에 따라서 5개의 시편을 준비하여 실험을 행하였고 얻어진 특성치들은 분산분석 프로그램인 ANOVA-TM을 사용하여 분산분석을 행하였다. 분산분석표에서는 일반적으로 크게 작용할 것으로 생각되던 섬유장력보다는 다른 요인인 함침압력이나 공정속도에 의한 영향이 크게 나왔고 또한 이러한 교호작용도 유의한 수준임을 보이고 있다. 분산분석을 통한 최적 수준 조합은 A3B3C1D3일 때 strength값을 가장 크게 하는 조합이다. 이러한 최적 조합은 짜짐효과(interlacing effect), 롤러의 압착, 롤러와 드럼 사이에 형성되는 수지층 등에 따른 효과로 사려된다. 또한 인장강성의 평가를 위해서 각 조건 당 3개의 시편을 준비하여 실험을 행하였다. 특성치에 대한 분산분석을 행하였고 최적 조합은 A3B2C1이며, 얻

Table.2 An ANOVA table

Source	Split disk strength		Split disk modulus		Short-beam	
	DF	F <sub>0</sub>	DF	F <sub>0</sub>	DF	F <sub>0</sub>
A	2	5.04 <sup>▽</sup>	2	2.51 <sup>*</sup>	2	62.78 <sup>▽</sup>
C	2	12.06 <sup>▽</sup>	2	6.16 <sup>▽</sup>	2	57.89 <sup>▽</sup>
AC	4	7.11 <sup>▽</sup>	4	1.73	4	9.11 <sup>▽</sup>
B	2	7.24 <sup>%</sup>	2	-	2	29.75 <sup>▽</sup>
AB	4	4.48 <sup>▽</sup>	4	2.44 <sup>*</sup>	4	21.20 <sup>▽</sup>
BC	4	11.68 <sup>▽</sup>	4	3.36 <sup>▽</sup>	4	14.24 <sup>▽</sup>
D	2	3.44 <sup>▽</sup>	2	-	2	39.86 <sup>▽</sup>
(e)	114		64		249	
Total	134		80		269	

Confidence(%) : ☆ (90), + (95), ▽ (99)

어진 결과에서 공정속도와 압력이 크게 유의할 수준의 것이었다. 그리고 섬유 체적율로부터 얻어진 강정보다 측정된 강성이 약 10%정도 작았는데 이는 장력 등의 인자의 영향으로 인한 섬유의 불균일한 분포, 섬유 손상, 그리고 인장 시에 생성되는 국부적인 굽힘 현상에 의해서 야기되는 응력집중 때문에 다소 낮게 평가되는 것으로 사려된다. 측정된 섬유체적율은 53~63% 정도의 분포를 보이고 있다. 이 값은 질산용해법과 일치하는 값을 보였다.

#### 3.2 Short-Beam test

본 실험은 직교배열표에 주어진 성형조건에 따라서 성형을 행한 후에 실험 당 10개의 시편을 준비하여 특성치를 구하여 분산분석을 행하였다. 얻어진 분산분석의 최적 수준 조합은 A1B2C2D1이었다. 인자들이 특성치에 작용하는 영향은 장력과 공정속도가 매우 크게 작용함을 보였고 이어서 온도와 함침압력 등이 유의함을 보였다. 또한 다른 인자들 간의 교호작용도 얻어진 특성치에 유의한 수준으로써 작용함을 보였다.

### 4. 결론

필라멘트 와인딩 성형시 재료의 공정변수를 살펴보기 위한 본 연구를 통해서 다음과 같은 결과를 얻었다.

1. 탄소섬유/에폭시로 와인딩된 링시편의 강도·강성은 여러 공정변수들의 주효과와 교호작용에 크게 영향을 받고 있음을 보았고, 그 중에서 성형속도에 의한 영향이 가장 큼을 보았다.
2. 탄소섬유/에폭시로 와인딩된 시편의 short beam strength값은 장력, 함침압력, 공정속도, 온도 등에 크게 좌우됨을 보았다.
3. 탄소섬유/에폭시로 와인딩된 시편의 섬유체적율은 섬유장력, 함침압력, 성형속도, 온도 등에 크게 좌우함을 보았고, 이러한 섬유 체적율의 변화는 또한 와인딩된 시편의 기계적 특성과 밀접한 관계가 있음을 보았다.
4. 직교배열표를 이용한 실험에서 얻어진 특성치에 대한 분산분석을 통해서 와인딩된 성형품의 기계적 강도가 다양한 공정변수에 영향을 받음을 관찰하였고, 적은 실험을 통해서 원하는 물성을

갖는 최적의 성형조건을 찾을 수가 있었다.

### 참고문헌

1. Peters, S.T., Humphrey, W.D., Foral, R.F., Filament winding composite structure fabrication, SAMPE®
2. Cohen, D., "Influence of filament winding parameters on composite vessel quality and strength", Composites Part A, 28A, 1997, pp. 1359-1047
3. 윤성호, 김천곤, 조원만, "마찰력을 고려한 필라멘트 와인딩된 링 시편의 인장강성 평가기법", 대한항공우주학회지, 제23권, 제4호, 1995, pp.93-100
4. 황태경, 갈영순, 조원만, 정발, "NOL Rings 시험을 이용한 필라멘트 와인딩 공정 변수 연구", 한국복합재료학회지, 제4권, 제2호, 1991, pp. 62-70
5. 박성현, 현대실험계획법, 민영사

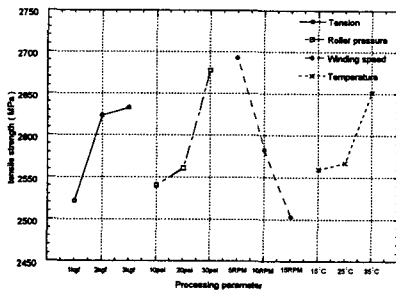


Fig.2 Split disk strength for individual facts

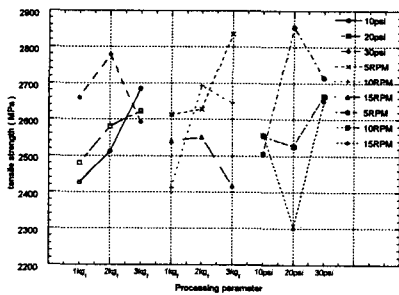


Fig.3 Split disk strength for interaction facts

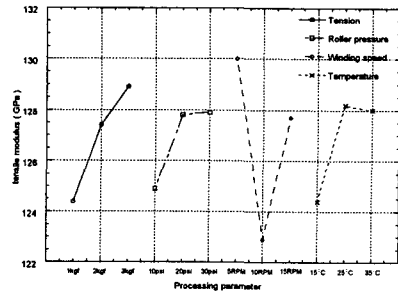


Fig.4 Split disk modulus for individual facts

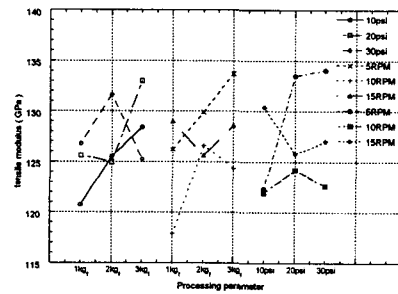


Fig.5 Split disk modulus for interaction facts

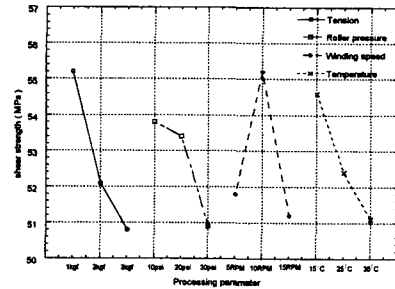


Fig.6 Interlaminar shear strength for individual facts

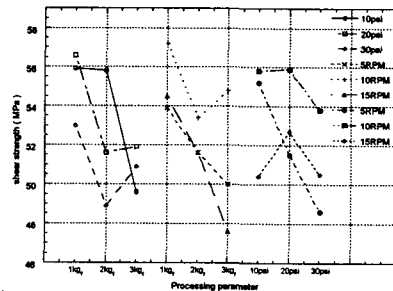


Fig.7 Interlaminar shear strength for interaction facts