

論文

다구찌 실험 계획법을 이용한 탄소섬유/페놀수지 복합재료의 물성 최적화 연구

장정식* · 김상우*

Mechanical Properties Optimization of Carbon Fiber/Phenolic Resin composites using Taguchi Experimental Design.

Jyongsik Jang* and Sang Woo Kim*

ABSTRACT

Green body of carbon/carbon composite was fabricated by carbon fiber/phenolic resin system and carbonization and densification processes of carbon fiber/phenolic resin system have been carried out by resin impregnation method. In order to optimize the mechanical properties of carbon fiber/phenolic resin composites, Taguchi experimental design method has been introduced to analyze the several experimental factors during the carbonization and densification of carbon/carbon composite. Judging from the result of Taguchi experimental design method, heating rate, carbonization temperature, specimen thickness, carrier gas flow rate and molding pressure were considered as the important factors for the improvement of mechanical properties of carbonized carbon fiber/phenolic resin composites.

초 록

탄소/탄소 복합재료용 Green body는 탄소섬유/페놀수지에 의해 제조하였으며, 탄화 공정 및 고밀도화 공정은 탄화 시편에 대한 수지함침법에 의해 시도되었다. 다구찌 실험 계획법이 탄소섬유/페놀수지 복합재료의 기계적 물성의 최적화를 위하여 사용되었으며, 탄소/탄소 복합재료의 탄화공정과 고밀도화공정 실험에 영향을 주는 중요 인자들을 통계적인 방법으로 분석하였다. 다구찌 실험 계획법에 의하면 가열속도, 탄화온도, 시편두께, 운반가스유속 및 성형압력이 탄화된 탄소섬유/페놀수지 복합재료의 기계적 물성에 중요한 인자로 고려되어졌으며, 결국 탄성율과 층간 전단 강도에 영향을 주는 인자들이 유사한 경향을 나타내었다.

1. 서 론

탄소섬유 강화 탄소복합재료(탄소/탄소 복합재

료)는 탄소섬유와 탄화 매트릭스에 의해 구성되어지며, 고온특성이 매우 우수하고 고강도, 고탄성율, 높은 열전도도, 낮은 열팽창계수를 가지고 있어 초고온용 첨단소재로 각광을 받고 있다[1~19]. 이같은

+ 1993년 월 일 접수

* 정회원, 서울대학교 공과대학 공업화학과

탄소/탄소 복합재료는 수지 함침법과 탄화수소 열 분해에 의한 화학증착법에 의해 제조되어진다[20~22]. 수지 함침법의 경우 열경화성 수지인 페놀수지 등을 매트릭스로 하여 탄화, 고밀도화, 흑연화 과정에 의해 탄소/탄소 복합재료가 제조되어지며, 제조된 탄소/탄소 복합재료는 매트릭스의 특성, 탄화방법, 탄화 매트릭스의 미세구조와 형태, 매트릭스/탄소섬유의 계면 접착력에 의해 그것의 물성이 좌우되게 된다[23, 24]. 따라서 탄소/탄소 복합재료의 제조 과정에서 탄화공정과 고밀도화 공정은 필수적인 단계이므로, 본 연구에서는 탄소섬유/페놀수지 복합재료를 탄소/탄소 복합재료의 Green body로 제조하여, 이의 탄화 공정과 고밀도화 공정을 대구찌 실험 계획법을 이용하여 고찰하고자 시도하였다.

탄소/탄소 복합재료의 탄화 공정 및 고밀도화 공정에서는 많은 구성 성분과 실험조건에 의해 최종물성이 좌우되게 되며 관련 인자(factor)들에 의해 실험 결과가 영향을 받게 된다. 이처럼 복잡한 시스템을 관련인자들을 변화시키면서 최적조건을 찾기위한 분석을 행하게 되면 시간과 노력이 너무 많이 소비되게 되고 합리적인 분석이 어렵게 된다. 이에 효율적인 통계 분석 방법인 실험 계획법(experimental design)을 이용하여 복잡한 시스템의 효과적인 분석을 행하는 연구가 최근에 이루어지고 있는 실정이다[25~27]. 본 연구에서는 실험 계획법중 하나이며 근래에 생산과정의 품질관리 기법으로 각광받고 있는 대구찌 방법(Taguchi method)을 이용하여 탄소섬유/페놀수지의 탄화 공정 및 고밀도화 공정의 최적화를 위한 분석을 행하였다.

대구찌 방법은 기존의 실험 계획법과는 달리 어떤 실험의 최적 조건을 결정하는 기준을 특성치의 산포로 정하고 있으며 특성치의 산포가 가장 적은 실험 조건을 최적 조건으로 결정한다. 특성치의 산포는 생산자의 제어가 어려운 잡음인자(noise factor)에 의해 발생되며 S/N(Signal to Noise ratio) 값에 의해 산포의 정도를 알 수 있다. S/N 값은 특성치의 성질에 따라 다르게 정의되는데 본 실험에서는 망대특성(望大特性, Larger is better), 즉 특성치 값이 클수록 좋은 경우의 S/N 값을 사용하였고 그 정의는 다음과 같다.

$$S/N = -10 \log \left[\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \frac{1}{y_i^2} \right]$$

여기서 y_i 는 특성치이며 n 은 실험 반복수이다. 특성치의 산포는 S/N 값이 클수록 줄어들기 때문에 S/N값이 가장 큰 실험 조건을 최적 조건으로 정하게 된다. 그리고 망대특성의 경우는 S/N값이 가장 큰 조건이 산포가 가장 적을 뿐만 아니라 동시에 특성치 자체의 값도 가장 큰 경우가 되므로 효과적인 분석이 이루어지게 된다. 이러한 잇점으로 인해 대구찌 방법은 생산 과정의 품질 관리 기법으로 많이 활용되고 있다.

본 실험에서의 특성치는 탄소섬유/페놀수지 복합재료의 탄화 공정 및 고밀도화 공정에서 중요한 물성으로 다루어지는 층간 전단 강도(Interlaminar Shear Strength)와 굴곡 탄성율(Flexural Modulus)이며, 통계 package로 ANOVA-TM을 사용하여 위의 두 특성치의 최적 조건에 대한 연구를 수행하였다.

2. 실험

1) 인자와 직교 배열표

본 실험에서 사용된 인자와 각 인자의 수준을 표1에 수록하였다. 직교 배열표로는 혼합형 직교 배열표의 일종인 $L_{18}(2^1 \times 3^7)$ 형을 사용하였으며 표 2에 나타

Table 1. Factors and levels used in this experiment

Factors	Levels		
	1	2	3
A : Molding pressure(atm)	1	20	
B : Heating rate(°C/hr)	100	50	10
C : Thickness(mm)	1	2	4
D : Carrier gas rate(cc/min)	80	100	120
E : Final carbonization temperature(°C)	1000	1100	1200
P : Position in sample(noise factor)	5 positions		

내었다. $L_{18}(2^1 \times 3^7)$ 형 직교 배열표는 1개의 2수준 인자와 7개의 3수준 인자를 배치할 수 있는데 본 실험에서는 특성치에 큰 영향을 미치리라 추측되는 총 5개의 제어인자를 사용했고 나머지는 데이터 분석의 정확도를 높이기 위해 3개의 오차항으로 배치하였다. 또한 비제어 인자, 즉 잡음인자는 복합재료의 위치로

Table 2. Orthogonal array table of $L_{18}(2^1 \times 3^7)$ and measured values of characteristic value

Factor Row NO. Exp. No.	A	B	C	D	E	e	e	e	Interlaminar Shear Strength(MPa)					Flexural Modulus(GPa)				
	1	2	3	4	5	6	7	8	Noise Factor									
	P1	P2	P3	P4	P5	P1	P2	P3	P4	P5	P1	P2	P3	P4	P5			
1	0	0	0	0	0	0	0	0	17.1	16.6	16.4	16.1	16.9	20.9	30.8	21.4	32.0	30.8
2	0	0	1	1	1	1	1	1	17.9	18.3	18.9	18.4	17.8	31.5	33.9	35.0	34.0	35.0
3	0	0	2	2	2	2	2	2	18.3	18.7	19.4	19.2	19.0	35.4	37.9	36.1	39.1	41.1
4	0	1	0	0	1	1	2	2	18.1	18.3	17.9	18.8	18.6	61.4	60.0	63.3	58.1	57.3
5	0	1	1	1	2	2	0	0	19.3	19.9	20.4	19.4	20.6	60.3	62.6	60.0	67.2	63.3
6	0	1	2	2	0	0	1	1	19.9	20.1	19.9	20.8	19.9	61.4	60.3	63.3	58.1	58.3
7	0	2	0	1	0	2	1	2	21.1	20.5	21.0	20.2	19.7	73.3	76.8	74.6	79.8	79.4
8	0	2	1	2	1	0	2	0	22.8	22.1	21.4	22.5	21.1	80.4	84.6	87.1	86.4	84.5
9	0	2	2	0	2	1	0	1	22.3	21.8	21.4	22.5	21.1	84.1	88.3	85.8	90.1	93.3
10	1	0	0	2	2	1	1	0	20.8	20.1	20.3	18.8	19.6	45.1	47.4	48.0	49.6	47.1
11	1	0	1	0	0	2	2	1	20.1	20.7	20.4	21.0	21.4	44.5	42.2	41.0	43.6	39.7
12	1	0	2	1	1	0	0	2	20.8	21.5	21.1	21.0	23.2	50.5	51.7	49.1	53.7	53.3
13	1	1	0	1	2	0	2	1	22.0	21.1	21.7	22.8	22.5	81.5	80.4	83.1	80.5	76.7
14	1	1	1	2	0	1	0	2	22.7	23.1	22.3	23.6	23.8	74.9	77.9	79.8	80.0	76.8
15	1	1	2	0	1	2	1	0	23.7	23.2	22.9	22.2	24.0	80.0	82.3	79.0	85.0	85.2
16	1	2	0	2	1	2	0	1	23.0	24.0	23.9	24.8	24.4	101.6	108.9	98.8	114.2	121.0
17	1	2	1	0	2	0	1	2	24.0	25.0	23.6	25.7	26.5	106.4	105.1	100.0	99.9	113.8
18	1	2	2	1	0	1	2	0	25.2	25.7	24.3	26.2	27.2	103.7	108.1	112.4	105.0	115.4

정하였으며 그 위치를 5개로 나누어 각 위치에 대해 위의 두 특성치를 측정하여 S/N값을 계산하였다. S/N의 정의에서 n이 5인 경우, 즉 총 5회 실험을 반복한 경우에 해당된다.

2) 재료

실험재료는 미국 Celanese사의 PAN계 고강도 탄소섬유인 G-30 cloth를 사용하였으며, 탄소 섬유 의 물성을 표 3에 나타내었다. 함침용 페놀수지는 Monsanto사의 SC-1008 레졸형 페놀수지를 사용하였으며 수지의 성분은 표 4와 같다.

Table 3. Properties of G-30 fabric

Fiber	Fiber diameter (μm)	Density (g/cm ³)	Tensile Strength (Ksi)	Tensile Modulus (Msi)
Celanese G-30 fabric	6.93	1.75	514.0	34.4

Table 4. Properties of SC-1008 phenol resin

Density(g/cm ³)		1.134
Composition (%)	Solid content	60.1
	Free phenol	10.3
	Isopropanol	23.3
	Methanol	4.0
	Water	2.6

3) 실험

본 실험에서 사용된 탄소섬유는 Dichloromethane을 이용하여 Soxhlet 추출장치로 5일 동안 추출하여 탄소섬유 표면의 불순물을 제거하였다. 이와 같이 표면처리된 탄소섬유는 진공 오븐을 이용하여 상온에서 0.1torr 진공하에서 2일간 건조를 행하였다. 이와 같이 표면처리된 탄소섬유를 페놀수지에 함침시켰고, 페놀수지 속에 함유된 용제는 상온에서 7일간 건조하여 제거하였으며, 얻어진 프리프레그(prepreg)를 이용하여 탄소/탄소 복합재료의 Green body를 제조

하였다. Green body를 제조하기 위해서 금속 Molder 를 사용하였으며, Gren body 제조를 위한 경화 조건은 압력 250psi이며, 몇 단계를 거쳐 경화를 시도하였다. SC-1008 페놀수지는 초기 경화 온도가 높으면 수지속에 남아있는 미반응 페놀이 휘발하게 되며 Green body 내부에 많은 기포를 생성하게 된다. 낮은 온도에서 1차 경화를 시도한 후, 단계적으로 온도를 상승시켜 줌으로써 시편 내부까지의 열전달을 용이하게 해 줄 수 있으며, 또한 Green body 내외부의 온도차에 따른 thermal crack도 방지할 수 있다. 본 실험에서 시도한 경화 반응 단계는 그림 1과 같다.

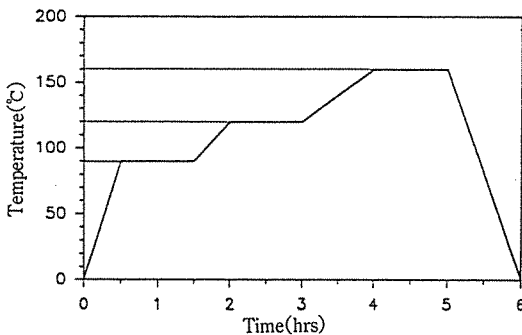


Fig. 1. Typical curing cycle of carbon fiber/penolic resin green body(pressure : 250psi)

경화된 Green body를 다이아몬드 톱이 부착된 절삭기를 이용하여 길이 7cm, 폭 1cm의 크기로 절삭하여 탄화시편을 제조하였다. 탄화 공정 및 고밀도화 공정의 시편 두께에 의한 영향을 고찰하기 위해 두께는 1mm, 2mm, 4mm로 변화시켰으며, 탄화로를 이용하여 헬륨 분위기하에서 가열 속도를 변화를 변화시키면서 탄화 연구를 행하였다. 탄소/탄소 복합재료의 Green body를 탄화시키기 위하여 사용된 탄화로는 연구목적에 고려하여 주문 제작된 tube형 탄화로를 사용하였다.

수지 함침법에 의한 탄화 공정은 페놀수지의 경화 조건, 시편의 두께 및 형태, 수지의 함량, 탄화 속도 등에 따라 달라질 수 있다. 본 연구에서는 탄화 공정의 열처리 속도를 변화시키면서 여러가지 조건에 따른 탄화 형태를 탄화물의 기계적 물성, 수율, 미세구조의 형태를 중점적으로 고찰하고자 하였다. 탄화 공정에 의해 형성된 탄화물은 페놀수지를 이용하여

수지 함침법에 의해 재함침을 시도하였다. 수지 함침 공정은 압력과 온도가 주요 변수로 작용되므로 수지 함침용 고압솥을 제작하여 이들의 영향을 알아보았다. 제작된 고압솥은 압력인자의 연구를 위해 질소 가스를 주입하여 함침로 내의 압력을 조절하였으며, 또한 외부에 가열장치와 온도 controller를 부착하여 내부 온도를 조절하여 사용하였다.

특성치로 선정된 굴곡 탄성율을 측정하기 위하여 ASTM D-790M에 의거하여 UTM(Universal Testing Machine, Instron 4201)을 사용하여 3점 굽힘 시험에 의해 측정하였다. 사용된 지지대 간격은 30mm로 고정하였으며 지지대 간격과 시편 두께의 비가 16이 되도록 고정하였다. 측정에 사용된 load cell은 50kg이었으며 head 속도는 0.5mm/min이었다. 굴곡 탄성율은 응력-변형 곡선의 초기 기울기를 이용하여 구하였다[29].

여러가지 조건에 의해 탄화된 시편의 층간 전단 강도는 ASTM D4475-85에 의거하여 UTM(Instron Model 1350)을 사용하였다. 시편의 치수는 길이 2cm, 폭 1cm로 하였으며 표식선 길이는 1.5cm로 고정하여 측정하였다[30].

3. 결과 및 고찰

1) 분산 분석

층간 전단 강도와 굴곡 탄성율의 측정 결과를 표 2에 나타내었다. 또한 S/N data 분산 분석의 결과를 표 5, 6에 나타내었으며 표 7에는 각 실험에서의 S/N 값을 나타냈다. 분산 분석의 결과를 요약하면 다음과 같다. 층간 전단강도의 경우, 성형 압력(A)과 가열 속도(B)가 물성에 가장 큰 영향을 주었으며, A×B, 즉 A와 B의 교호 작용(interaction)은 유의성(물성에 대한 영향)이 적어 pooling되었다. 이때 유의성의 여부는 유의 확률을 0.10으로 하여 F분포의 F값으로 판별하였다. 한편 굴곡 탄성율의 경우는 가열 속도, 성형 압력의 순으로 유의성이 가장 컸고 역시 A×B가 pooling되어 층간 전단 강도의 경우와 유사한 경향을 보였다.

위의 분산 분석 결과를 종합하면, 가열 속도, 성형 압력 등은 두 특성치 모두에 매우 큰 유의성이 있었고

Table 5. ANOVA Table of Interlaminar Shear Strength

Factors	S	Df	V	F	S ²	p (%)
A	7.751	1	7.751	2583.643	7.748	45.06
B	7.627	2	3.814	1271.317	7.622	44.33
C	1.607	2	0.804	267.883	1.601	9.31
D	0.160	2	0.080	26.627	0.154	0.89
E	0.025	2	0.013	4.183	0.019	0.11
e	0.016	6	0.003			
A×B	0.008	2	0.004			
(e)	0.024	8	0.003		0.051	0.30
Total	17.195	17	1.011			

Table 6. ANOVA Table of Flexural Modulus

Factors	S	Df	V	F	S ²	p (%)
A	27.34	1	27.34	441.99	27.28	13.36
B	172.44	2	86.22	1393.77	172.31	84.37
C	1.63	2	0.81	13.15	1.50	0.74
D	0.50	2	0.25	4.04	0.38	0.18
E	1.84	2	0.92	14.88	1.72	0.84
e	0.24	6	0.04			
A×B	0.25	2	0.13			
(e)	0.49	8	0.06		1.05	0.51
Total	204.24	17	12.01			

시편 두께는 층간 전단 강도에 비교적 유의성이 컸다. 그러나 운반 가스 유속, 최종 탄화 온도 등은 두 특성치에 상대적으로 적은 유의성을 나타내었으며 성형 압력과 가열 속도의 교호 작용은 유의성이 없었다.

2) 최적 조건의 결정

ANOVA-TM의 response table을 통해 최적 조건을 결정하였고 그중 level average graph를 그림2, 3에 나타내었다. Level average값이 가장 큰 인자의 수준이 최적 조건이며 층간 전단 강도의 경우 A2, B3,

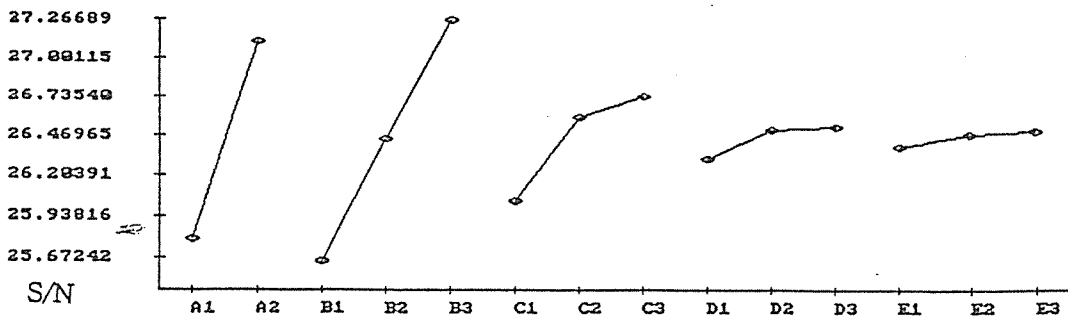


Fig. 2. Level average graph of Interlaminar Shear Strength

Table 7. S/N values of Characteristic values

Exp. No.	Interlaminar Shear Strength	Flexural Modulus
1	24.40	29.76
2	25.22	30.58
3	25.48	31.54
4	25.27	35.55
5	25.98	35.92
6	26.06	35.59
7	26.21	37.69
8	26.87	38.54
9	26.78	38.91
10	25.97	33.51
11	26.32	32.47
12	26.63	34.25
13	26.85	38.10
14	27.27	37.82
15	27.30	38.29
16	27.60	40.67
17	27.93	40.40
18	28.21	40.74

C3, D3, E3(A2는 A인자의 2번째 수준을 표시)로 결정되었다. 이 수준 조합에서 층간 전단 강도값이 가장 큰 동시에 그 산포가 가장 적으며, 다시 말하면 시료의 모든 위치에서 고른 물성을 나타낸다고 볼 수 있는 것이다. 또한 굴곡 탄성율도 층간전단강도와 마찬가지로 A2, B3, C3, D3, E3가 최적조건으로 결정되었다.

결론적으로 층간 전단 강도와 굴곡 탄성율의 최적 조건의 인자와 수준은 다음과 같다.

- A2 : molding pressure 20atm
- B3 : heating rate 10°C/hr
- C3 : thickness 4mm
- D3 : carrier gas rate 120cc/min

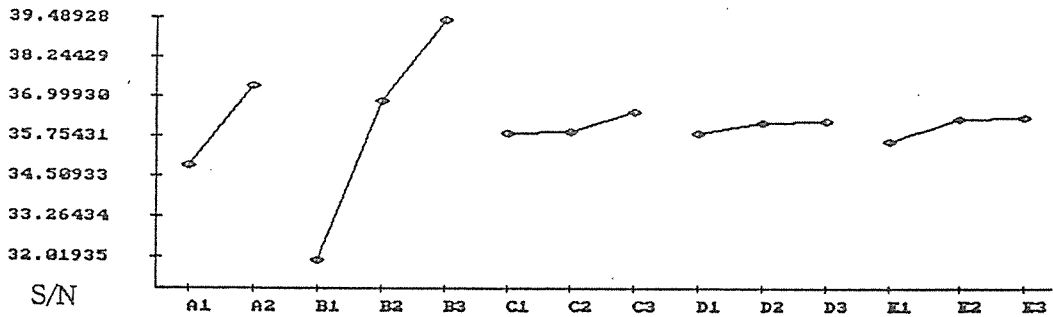


Fig. 3. Level average graph of Flexural Modulus

E3 : final carbonization temperature 1200°C

3) 예측값의 결정과 확인

위에서 구한 최적 조건에서의 층간 전단 강도와 굴곡 탄성율의 S/N값을 예측하였다. 층간 전단 강도의 최적 조건에서의 예측값은 28.32(± 0.23)으로 평균값 26.46보다 7.03% 향상된 값으로 실험 계획법을 실험에 적용함으로써 산포도의 감소와 물성의 향상을 가져올 수 있음을 보여 주고 있다. 또한 굴곡 탄성율의 경우도 평균값 36.13에서 41.56(± 0.43)으로 15.03%의 향상이 예측되었다.

실제로 최적 조건에서의 확인 실험 결과 S/N 값이 층간 전단 강도는 28.22, 굴곡 탄성율은 40.94로 나타나 대구찌 방법을 통한 분석이 타당함을 알 수 있었다.

4) 손실함수(Loss Function)

위에서 예측된 최적조건의 S/N값을 통해 다음과 같이 정의되는 손실함수 값을 구할 수 있게 된다.

$$L(y_i) = A\Delta^2 \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \frac{1}{y_i^2}$$

A : 허용한계점에서의 손실액, Δ : 허용한계

손실함수, L(y_i)는 S/N과 함께 대구찌 방법에서 가장 중요한 개념이며, 실제로 산업적 생산과정에 적용되었을 경우 물성(품질)의 산포로 인한 손실액을 나타낸다. 층간 전단 강도의 S/N값은 평균값보다 최적 조건의 값이 1.86의 증가를 가져왔고 이는 $\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \frac{1}{y_i^2}$ 값이 $10^{\frac{1.86}{10}} = 1.53$ 배 만큼 감소함을 나타내므로 손실함수 역시 1.53배 만큼 감소하게 된다.

굴곡 탄성율의 경우 S/N값이 5.43 증가하여 같은 계산으로 손실함수가 3.49배 만큼 감소함을 알 수 있었다. 결론적으로 대구찌 실험계획법을 적용함으로써 실제 생산과정에서의 손실액을 층간 전단 강도의 경우는 1.53배, 굴곡 탄성율의 경우는 3.49배 만큼 감소시킬 수 있음을 알 수 있었다.

4. 결 론

탄소섬유/페놀수지 복합재료의 물성 연구에 대구찌 실험 계획법을 적용시킴으로써 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다.

- ① 최소한의 반복 실험을 통해 분산 분석을 행하여 인자들이 물성에 영향을 주는 정도를 정확히 판별할 수 있었으며, 성형 압력과 가열 속도가 두 특성치, 즉 층간 전단 강도와 굴곡 탄성율에 가장 큰 영향을 주는 것으로 나타났다.
- ② 최적 조건의 결정시 대구찌 방법을 적용함으로써 물성의 값이 가장 크고 동시에 산포가 가장 적은 조건을 구할 수 있었으며, 실험 계획법을 적용시키지 않을 때보다 S/N 값이 층간 전단 강도는 7.03%, 굴곡 탄성율은 15.03%의 향상이 예측되어 물성의 향상과 산포의 감소를 가져올 수 있었다. 또한 이 예측치를 실제 실험을 통해 검증함으로써 실험 계획법의 타당성을 확인할 수 있었다.
- ③ 위에서 구한 최적 조건을 실제 산업적 생산과정에 적용함으로써, 산포로 인해 발생하는 손실액을 층간 전단 강도는 1.53배, 굴곡 탄성율은 3.49배

만큼 감소시킬 수 있음을 예측할 수 있었다.

참 고 문 헌

1. D.L.Schmidt, SAMPE J.8,9(1972).
2. H.M.Stoller and E.R.Frye, Carbon-carbon materials for aerospace applications, in : Pro-c. of AIAA/AIME 10th Structures, Structural Dynamics and Materials Conference, New Orleans, p.193 (1969).
3. W.W.Kotlensky and J.Paapas, Mechanical properties of CVD infiltrated composites, 9th Biennial Conf. on Carbon, Boston, Paper MP-26 (1969).
4. L.E.Mcallister and A.R.Taverna, The development of high strength three dimensionally reinforced graphite composites, Paper presented at the American Ceramic Society 73rd Ann. Meeting, Chicago(1971).
5. L.E.Mcallister and A.R.Taverna, Three-dimensionally reinforced carbon-carbon composites, 10th Biennial Conf. on Carbon, Bethlehem, PA, paper No.FC-40(1971).
6. L.E.McAllister and A.R.Taverna, Development and evaluation of 3D carbon-carbon composites, in : Proc. of 17th Nat. SAMPE Symp. (SAMPE, Azusa) p. III-A-3(1972).
7. L.E.McAllister and A.R.Taverna, Composition-constructon relationships in 3-D carbon-carbon composites, Paper prescnted at Pacific Coast Resional Meeting of the American Ceramics Society, Los Angele(1974).
8. L.E.Mcallister and A.R.Taverna, A study of composition-construction variation in 3-D carbon-carbon composites, in : E.Scala, E.Anderson, I. Toth and B.Noton, eds., Proc. of Internat. Conf. on Composites Materials Vol. I (Metallurgical Society of AIME, New York)p. 307(1976).
9. E.Fitzer and A.Burger, The formation of carbon-carbon composites by thermally decomposing carbon fiber reinforced thermosetting polymers, Internat. Conf. on Carbon Fibers, Their Composites and Applications, London, 1971, Paper No.36(1971).
10. D.W.Bauer, W.V.Kotlensky, J.W.Warren and W.H.Smith, Fabrication and CVD carbon infiltration of carbon and graphite filament wound cylinders, 10th Biennial Conf. on Carbon, Bethlehem. PA, Paper FC-36(1971).
11. D.W.Bauer and W.V.Kotlensky, CVD carbon infiltration and strength for fabric lay-up carbon-carbon composites, 10th Biennial Conf. on Carbon, Bethlehem, PA, Paper FC-37(1971).
12. C.K.Mullen and P.J.Roy, Fabrication and properties description of AVCO 3-D carbon-carbon cylinder materials, in : Proc. 17th Nat. SAMPE symp. (SAMPE, Azusa)p. III-A-W(1972).
13. A.Levine, High pressure densified carbon-carbon composites, Part II : Testing, 12th Biennial Conf. on Carbon, Pittsburg(1975).
14. W.Chard and D.Niesz, High pressure densified carbon-carbon composites, Part I : Processing procedures, 12th Biennial Conf. on Carbon, Pittsburg (1975).
15. P.Lamicq, Recent impro ements in 3-D carbon-carbon materials, AIAA/SAE 13th Propulsion conf., Orlando, Paper No. 77-882(1977).
16. E.Fitzer, E.H. Geigl and W.Hutiner, Studies on matrix precursor materials for carbon-carbon composites, in : Proc.of 5th London Internat. Carbon and Graphite conf. Vol.I(Society of Chemical Industry, London)p.493(1978).
17. E.Fitzer, L.M. Huttner, L.M.Manocha and D.Wolter, Carbon fiber reinforced composites for internal bone-plates, in : Proc.of 5th London Internat. Carbon and Graphite Conf. Vol.1(Society of Chemical Industry, Lond-on)p.454(1978).
18. H.Girard, The preparation of high density carbon-carbon composites, in : Proc. 5th London

Internat. Carbon and Graphite Conf. Vol. I (Society of Chemical Industry, London), p.483 (1978).

19. W.L.Lachman, J.A.Crawford and L.E. Mcallister, Multidirectionally reinforced carbon-carbon composites, in : B.Noton, R.Signorelli, K.Street and L.Phillips, eds, Proc. of Internat. Conf.on Composite Materials(Metallurgical Society of AIME, New York)(1978).

20. W.V.Kotlensky, Deposition of Pyrolytic Carbons in Porous Solids in Chemistry and Physics of carbon, Vol.9, P.L.Walker, Jr. and P.A. Thrower, Ed., Marcel Dekker p.173(1973).

21. J.C.Bokros, Deposition, Structure and Properties of Pyrolytic Carbon in Chemistry and Physics of carbon, Vol. 5, P.L.Walker, Jr., Ed., Marcel Dekker p. 1-118(1969).

22. M.A.Kanter "Diffusion of Carbon Atoms in Natural Graphite Crystals", Phys. Rev., 107, 655(1957).

23. C.R. Choe, J.Jang and B.Yoon, J.Korean

Society for Composites Materials, 3, 1(1990).

24. C.R.Choe, J.Jang and B.Yoon, J. Korean Society for Composites Materials, 3, 11(1990).

25. R.N.Kacker "Off-Line Quality Control, Parameter Design, and the Taguchi Method", Journal of Quality Technology, 17, 176-209 (1985).

26. V.N.Nair(Ed), "Taguchi's Parameter Design : A Panel Discussion", Technometrics, 34, 127-161(1992),

27. G.Taguchi, and M.S.Phadke, "Quality Engineering Through Design Optimization", in Conference Record, GLOBECOM 84 Meeting, IEEE Communication Society(Atlanta, GA, November), pp. 1106-1113(1984).

28. S.H.Park, Applied Experimental Design, Youngjimoonhwasa, Seoul(1990).

29. American Society for Testing and Materials(ASTM) D 790 M(1987).

30. American Society for Testing and Materials(ASTM) D 4475-85(1987).