[논 문] 한국재료학회지
Korean Journal of Materials Research
Vol. 3, No. 5 (1993)

실험계획법을 이용한 탄소섬유/페놀수지의 경화 cycle연구

하헌승 · 이진용 · 조동환 · 윤병일
국방과학연구소 고분자 복합재료 연구실

A Study of the Cure Cycle of Carbon Fiber/Phenolic Resin by the Experimental Design

Hun Seung Ha, Jin Yong Lee, Donghwan Cho, Byung Il Yoon
Polymer and Composites Materials Research Team, Agency for Defense Development, Yusung P.O. Box 35, Taejeon, 305-600, Korea.

초 록 다구찌의 실험계획기법을 이용하여 탄소섬유/페놀수지의 경화싸이클을 연구하였다. 본 연구에서는 1인자 2수준과 7인자 3수준의 조합실험으로 구성된 $L_{18}(2^1\times3^7)$ 직교배열표를 사용하였고, 특성치로 굴곡강도와 기공률을 선정하여 실험하였다. 실험계획법의 압축성형 인자로는 8개의 성형인자(승온속도, 가압온도, 성형압력, 경화온도, 경화온도에서의 유지시간, 냉각속도 및 탈기포)가 고려되었으며, 이들 성형인자가 탄소섬유/페놀수지 복합재료의 물성에 미치는 영향을 고찰하였다. 분산분석법으로 실험결과를 분석한 결과, 탄소섬유/페놀수지 복합재료의 굴곡강도에 가장 큰 영향을 미치는 성형인자는 성형압력이고, 기공률에 가장 큰 영향을 미치는 성형인자는 경화온도임이 밝혀졌다.

Abstract In this paper the cure cycle of carbon fiber/phenolic resin was investigated by the Taguchi Method in an experimental design. Experiments were systematically performed using $L_{18}(2^1\times3^7)$ orthorgonal array table of the experimental design. In the experimental design, eight compression molding parameters (heating rate, pressing temperature, pressing rate, molding pressure, curing temperature, dwell time at curing temperature, cooling rate and degassing) were considered and the effects of the parameters on the flexural strength and the apparent porosity of carbon fiber/phenolic composites were investigated. The analysis of variance for the experimental results indicated that molding pressure and curing temperature are the most significant parmeters in the flexural strength and the apparent porosity of carbon fiber/phenolic resin composites, respectively.

1. 서 론

오늘날 열경화성수지를 매트릭스로한 섬유강화 복합재료는 여러분야에 사용되고 있다. 특히, 보강섬유로 탄소섬유를 사용한 탄소섬유강화 플라스틱(Carbon Fiber Reinforced Plastics, CFRP)은 종래의 금속재료의 비해 비강도 및 비탄성률등의 기계적성질이 우수할 뿐만 아니라, 내부식성 및 내약품성등의 여러 장점이 있어 스포츠용품분야, 우주항공분야 및 자동차등의 분야에 주로 사용되고 있다.[1]

일반적으로 섬유강화 복합재료의 물리적, 기계적성질은 사용된 수지의 경화싸이클에 영향을 받는다. 섬유강화 복합재료의 경화공정은 제조회사로부터 추천된 경화 싸이클을 그대로 사용하는 경우와 시행오차적인 실험적 방법 및 분석모델을 통하여 얻는 경화싸이클을 사용하는 경우가 있다.[2] 그러나, 제조회사로부터 추천된 경화싸이클은 보통 조그만 양의 시료들에 대한 실험결과로 결정되었기 때문에 대부분의 경우 적용시키기에 부적절하다. 시행오차적인 실험적 방법에 의한 경화싸이클 결정은 시간이 너무 소비되는 단점이 있는 반면에, 분석적 모델에 의한 경화싸이클 결정은 최적의 경화싸이클을 결정할 수 있다는 장점이 있지만, 측정하기 어려운 많은 양의 데이타가 요구되고 생산공정에서 제조공정을 조절하는 데는 사용하기 어려운 단점들이

있다. 최근에 여러분야에서 많은 관심과 논의의 대상이 되고 있는 합리적인 실험계획법(Experimental Design)[3-6]에서의 다구찌 방법(Taguchi Method)은 제품 및 공정의 설계 또는 개선을 위해서 직교배열표(Orthogonal Array Table)라 불리는 실험계획을 이용하여 그 실험결과를 분산분석(Analysis of Variance)을 통하여 분석함으로써 제품이나 공정의 최적조건을 결정하는 방법이다. 이런 다구찌방법을 사용하는 장점중의 하나로는 연구실의 실험에서 미처 고려하지 못한 다른 요인들이 복잡하게 얽힌 생산현장에서도 연구실에서 결정한 여러 공정변수의 최적조건이 그대로 적용될 가능성이 높다는 점이다[7].

따라서, 본 연구에서는 다구찌방법을 이용하여 탄소섬유/페놀수지 molding compound의 압축성형(Compression Molding)시 사용될 경화싸이클을 결정하고자 하였다. 아울러 최종복합재의 물성에 영향을 미치는 여러 압축성형 인자들의 상대적인 기여도를 고찰하였다. 본 실험에서의 실험계획법에 의한 실험결과 분석은 확률통계적 분산분석법인 ANOVA-TM 프로그램을 이용하여 처리하였다. 이때, 특성치(Characteristic Value)로는 굴곡강도(Flexural Strength)와 기공률(Apparent Porosity)을 선정하여 분산분석을 하였다.

2. 실험 방법

2-1 실험 재료

본 연구에서는 미국의 Fiberite Co. 제품인 K-627 molding compound를 사용하였다. 이 재료는 석유핏치(Petroleum pitch)계 탄소섬유와 레졸형의 페놀수지(Resol type Phenolic resin)로 구성된 B-staged molding compound로, 그들의 물리적 특성은 다음과 같다. Molding compound의 길이는 38mm, 수지함량(Resin Content)은 38.5-42.5wt% 그리고 휘발분 함량(Volatile Content)은 3.5-5.0wt%였다.

2-2 인자(Factor)선정

실험계획법의 인자는 문헌조사를 통하여 섬유강화 플라스틱의 압축성형시 최종복합재의 물성에 영향을 미칠 수 있는 거의 모든인자를 포함하도록 선정하였다. 본 연구에서 고려된 인자는 승온속도(Heating Rate), 가압온도(Pressing Temperature), 가압속도(Pressing Rate), 성형압력(Molding Pressure), 경화온도(Curing Temperature), 경화온도에서의 유지시간(Dwell Time at Curing Temperature), 냉각속도(Cooling Rate), 탈기포(Degassing)의 8개 압축성형 인자를 선정하였다.

2-3 수준(Level)설정

앞에서의 압축성형 인자중 가압온도와 경화온도 수준을 설정하기 위해서 RDS-Ⅱ (Rheometrics Dynamics Spectrometer-Ⅱ) 분석과 탈기포 시점을 결정하기 위해서 TGA (Thermogravimetric Analyzer) 분석을 하였다.

RDS-Ⅱ분석 : 탄소섬유/페놀수지 molding compound의 제조에 사용된 레졸형 페놀수지의 유변학적 성질(Rheological Properties)을 알기 위하여 RDS-Ⅱ를 이용하여 온도에 따른 수지의 점도변화를 측정하였다. 측정조건은 지름이 25mm인 disposable parallel plate를 사용하여 두 plate사이의 간격을 1.5mm로 유지시켜 frequency가 1Hz, strain이 10%인 조건을 사용하여 2℃/min의 승온속도로 175℃까지 측정하였다.

TGA분석 : 탄소섬유/페놀수지 molding compound의 온도에 따른 중량변화를 관찰하기 위하여 TGA분석을 하였다. 사용된 기기는 Dupont 951 Thermogravimetric Analyzer였으며, 측정조건은 5℃/min의 승온속도로 300℃까지 공기중에서 측정하였다.

2-4 특성치 측정

실험계획법의 특성치로는 굴곡강도와 기공률을 선정하였다. 굴곡강도는 ASTM D-790에 의거한 3점 굴곡시험(3-Point Bending)방법으로 측정하였다. 이때, span 길이와 두께의 비는 16 : 1로 하였으며, 사용된 시편의 크기는 길이 80mm, 폭 15mm, 두께가 3.2mm이였다. 기공률은 ASTM C-373에 의거한 수중치환법으로 측정하였다. 측정에 사용된 시편의 수는 6개로 이들은 모두 동일한 성형조건으로 제조되었다. 6개의 시편에 대한 평균값을 특성치로 하여 ANOVA-TM 프로그램을 사용하여 분석하였다.

2-5 성형 방법

실험계획법으로 탄소섬유/페놀수지 molding compound의 경화 싸이클을 찾기위한 복합재료성형은 프레스(MTP-14, Tetrahedron Ltd.)를 이용한 압축성형(Compression molding)법을 사용하였다. 38mm 길이의 molding compound를 80℃로 예열되어 있는 100mm×100mm 크기의 금형내에 무질서하게 주입한 다음 20분간 유지시켰다. 그 이후의 성형조건은 실험계획법의 직교배열표에 나타난 각 성형인자에 대해 설정된 수준으로 구성된 경화 싸이클을 사용하였다. 여기서, 탈기포공정은 성형온도가 탈기포 시점에 도달하면 그동안 가해준 성형압력을 제거하여 금형을 한차례 열어준 다음에 다시 본래의 성형압력을 가해주는 방법을 사용하였다.

3. 결과 및 고찰

3-1 수준 결정

RDS-Ⅱ 분석 결과 Molding compound 제조에 사용된 페놀수지의 온도에 따른 점도변화는 Fig. 1과 같다. Fig. 1에서 보는 바와같이, 온도가 상승함에 따라 페놀수지의 점도가 감소하다가 105℃에서 최소점도값을 나타낸 후 150℃까지 10^4배 정도로 급격하게 증가되는 현상을 관찰할 수 있었다. 일반적으로 섬유강화플라스틱의 압축성형시 성형압력을 가해주는 시점은 경화과정중에 생성되는 반응부산물에 의한 기공의 생성을 최대로 억제하고, 매트릭스 수지에 대한 섬유의 분포상태를 좋게 하기 위하여 점도가 가장 낮은 온도범위에서 성형압력을 가해준다. 따라서, 실험계획법에서 선정된 가압온도 수준은 100℃를 기준으로하여 ±20℃의 온도범위로 설정하였다. 또한 105℃부터는 수지의 경화반응이 시작되어 가교결합(Crosslinking)이 형성됨에 따라 점도가 급격히 증가하다가 150℃이후부터는 경화반응이 거의 끝나 점도가 약간 증가되는 현상을 관찰할 수 있었다. 복합재료의 성형시 경화온도가 너무 높으면 수지의 경화반응이 격렬하게 일어나고 섬유와 경화된 수지사이의 열팽창계수 차이로 인해 성형온도에서 상온으로 냉각될 때 복합재 내에 많은 결함이 발생하여 물성이 저하된다.[5] 그러므로 실험계획법에서 선정된 경화온도 인자에 대한 수준은 160℃를 기준으로 하여 ±10℃의 온도범위로 설정하였다.

TGA 분석결과 탄소섬유/페놀수지 molding compound의 중량변화곡선 및 휘발분발생속도를 나타내 주는 미분중량변화곡선을 Fig. 2에 나타내었다. 이 그림에서 보면, 온도가 올라감에 따라 molding compound의 중량이 감소되는 현상과 미분중량변화곡선으로 부터 90℃와 145℃부근에서 휘발분의 발생속도가 크게 나타남을 알 수 있다. 본 연구에서 사용된 재료는 B-stage로 제조되었기 때문에 120℃까지의 중량감소는 주로 molding compound에 흡착된 수분의 휘발에 의해 발생된 것으로 사료되며, 그 이후의 중량감소는 페놀수지의 경화반응에 의해 생성된 반응부산물의 휘발에

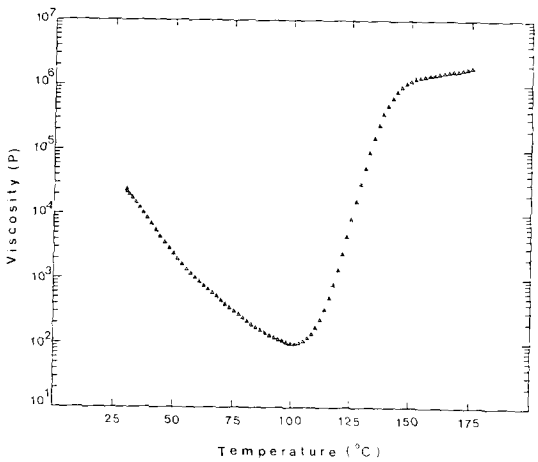

Fig. 1. Temperature Dependence of the Viscosity of Phenolic Resin Used in Chopped Molding Compound Measured by RDS-Ⅱ Rheometer.

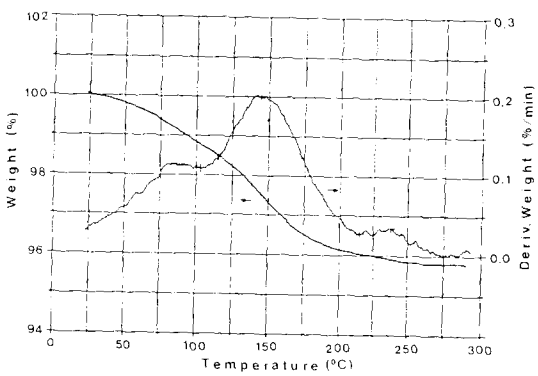

Fig. 2. TGA Thermogram of the Carbon Fiber/Phenolic Resin Chopped Molding Compound.

의해 발생된 것으로 판단되었다. 페놀수지의 경화반응에 의한 중량감소가 145℃에서 최대로 발생되는 현상으로부터 성형인자로 설정된 탈기조시점은 145℃로 설정하였고, 수준은 탈기조과정을 거치는 것과 거치지 않는 두 경우를 고려하였다. 그 외의 성형인자들에 대한 수준은 현재 공업적으로 사용되고 있는 페놀수지의 압축성형 조건을 고려하여 설정하였다. 각 성형인자들에 대해 설정된 수준을 Table 1에 나타내었다.

Table 1. Factors and Levels Used in This Study.

SIGN	FACTORS	LEVELS		
		1	2	3
A	Heating Rate(℃/min)	1.1	2.2	4.4
B	Pressing Temperature(℃)	80	100	120
C	Pressing Rate(ton/min.)	0.45	2.27	4.54
D	Molding Pressure(kg/㎠)	70	1406	2109
E	Curing Temperature(℃)	150	160	170
F	Dwell time at curing temperature(min.)	60	90	120
G	Cooling Rate(℃/min.)	1.1	2.2	3.3
H	Degassing	Yes	NO	–

3-2 직교 배열표

앞에서 선정된 성형인자와 수준으로 부터 작성된 1인자 2수준과 7인자 3수준의 조합실험으로 구성된 $L_{18}(2^1\times3^7)$ 직교배열표(Orthogonal Array Table)를 Table 2에 나타내었다. 여기서, A-H는 Table 1의 인자들에 대한 기호를 나타내고, column내의 1, 2, 3은 Table 1에서 설정된 수준들을 나타낸다. Table 1을 보면, L_{18}직교배열표는 18줄로 구성되어 있음을 알 수 있는데, 이는 수행할 총 실험수를 표시하기 때문에 직교배열표를 이용한 다구찌 방법은 18번의 실험을 통하여 1인자 2변수와 7인자 3변수의 영향을 모두 파악할 수 있을 뿐만 아니라, 이들 변수들의 조합중에서 최적의 조합을 결정할 수 있기 때문에 최적의 공정을 찾는데 소요되는 시간을 단축시킬 수 있다.

3-3 굴곡강도에 대한 성형인자들의 영향

본 연구에 사용된 직교배열표의 각 줄에 나타난 성형인자들에 대한 수준의 조합으로 구

Talbe 2. A $L_{18}(2^1\times3^7)$Orthogonal Array Table Used in This Study.

Exp. No.	Factors							
	H	A	B	C	D	E	F	G
1	1	1	1	1	1	1	1	1
2	1	1	2	2	2	2	2	2
3	1	1	3	3	3	3	3	3
4	1	2	1	1	2	2	3	3
5	1	2	2	2	3	3	1	1
6	1	2	3	3	1	1	2	2
7	1	3	1	2	1	3	2	3
8	1	3	2	3	2	1	3	1
9	1	3	3	1	3	2	1	2
10	2	1	1	3	3	2	2	1
11	2	1	2	1	1	3	3	2
12	2	1	3	2	2	1	1	3
13	2	2	1	2	3	1	3	2
14	2	2	2	3	1	2	1	3
15	2	2	3	1	2	3	2	1
16	2	3	1	3	2	3	1	2
17	2	3	2	1	3	1	2	3
18	2	3	3	2	1	2	3	1

성된 경화싸이클로 압축성형한 결과, 성형품의 밀도는 1.53-1.57g/cm³였으며, 섬유의 부피함량(Fiber Volume Fraction)은 0.47-0.53이었다. 성형싸이클이 다름에도 불구하고 성형품의 섬유 부피함량에 있어서 큰 차이가 없었다.

굴곡강도는 직교배열표에 의해 주어진 성형조건에 따라 한번의 실험당 6개의 시편에 대한 평균값을 특성치로 하였으며, 6개 시편의 평균값에 대한 편차는 ±10%로 다소 크게 나타났다. 동일한 성형조건으로 제조되었음에도 불구하고 큰 편차가 나타난 점으로 미루어 보아, 이는 성형품 내에서 섬유배향(Fiber Orientation)이 quasi-isotropic random 배향을 나타내어 각 측정시편마다 다소 섬유의 배향이 약간씩 다르기 때문에 나타난 현상으로 판단되었다. 굴곡강도에 대하여 ANOVA-TM 프로그램을 이용하여 분석한 분산분석표를 Table 3에 나타내었다. 여기서, rho%는 실험결과에 대한 각 인자의 상대적인 기여도로써 rho%가 큰 인자 일수록 특성치에 큰 영향을 미치는 주요인자임을 표시한다. 그외의 여러 항들에 대한 설명은 Table 3의 note에 나타내

Table 3. An ANOVA Table Analyzed from the Experimentally Obtained Data of Flexural Strength.

Source	Pool	Df	S	V	F	S′	rho%
H	[N]	1	66.932	66.932	380.295	66.580	12.48
A	[Y]	2	0.352	0.176			
B	[N]	2	17.353	8.676	49.295	17.001	3.18
C	[N]	2	84.977	42.488	241.409	84.625	15.82
D	[N]	2	177.127	88.563	503.199	176.775	33.05
E	[N]	2	88.323	44.161	250.915	87.971	16.45
F	[N]	2	63.583	31.791	180.631	63.231	11.82
G	[N]	2	15.098	7.549	42.892	14.746	2.76
H×A	[N]	2	21.152	10.576	60.091	20.800	3.89
e1	[N]	0	0.000				
e2	[N]	0	0.000				
(e)		2	0.352	0.176		2.992	0.56
Total(Raw)	[-]	17	534.898	31.465			

Note) Source ; Factors and Errors
Pool ; Pooling toggle for source
Df ; Degree of freedom(=level-1)
S ; Sum of squares of source
V ; Variance of source
F ; F value of source(=V/(e))
S′ ; Pure sum of squares of suurce(=s-(e))
rho% ; Percent contribution of source($=S'/\Sigma S' \times 100$)
e2 ; Interaction error
e1 ; Repetition error
(e) ; Pooled error

었다. Table 3을 살펴보면, 탄소섬유/페놀수지의 압축성형시 복합재의 굴곡강도에 가장 중요한 영향을 미치는 인자는 성형압력(rho%=33.05%)이며, 경화온도, 가압속도 및 경화온도에서의 유지시간 등의 인자들도 복합재의 굴곡강도의 영향에 기여함을 알 수 있었다. 각 성형인자들의 수준에 따른 굴곡강도의 변화를 Fig. 3에 나타내었다. 이 그림에서 보면, 승온속도는 본 인자에서 설정된 수준범위 내에서는 복합재의 굴곡강도에 미치는 영향이 크지 않음을 알 수 있다. 또한, 굴곡강도가 우수한 복합재를 제조하기 위해서는 탈기포를 하고 가압온도는 80℃, 가압속도는 0.45ton/min, 성형압력은 1,406Kgf/cm^2, 경화온도는 160℃, 경화온도에서의 유지시간은 120min, 냉각속도는 2.2℃/min의 경화조건을 사용해야 하는 것이 바람직한 것으로 판단되었다.

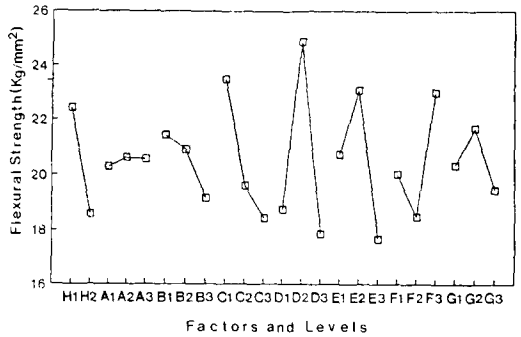

Fig. 3. Flexural Strength Changes with the Levels of Individual Factors in an Experimental Design.

3-4 기공률에 대한 성형 인자들의 기여도

기공률은 6개의 시편에 대한 평균값을 특성치로 사용하였으며, 평균값에 대한 편차는 ±2%였다. 기공률에 대해서 ANOVA-TM프로그램을 이용하여 분석한 분산분석표를 Table 4에 나타내었다. 여기서, 여러 항들에 대한 설명은 Table 3의 note와 같다. Table 4을 보면, 압축성형시 복합재의 기공률에 가장

Table 4. An ANOVA Table Analyzed from the Experimentally Obtained Data of Apparent Porosity.

Source	Pool	Df	S	V	F	S′	rho%
H	[N]	1	0.146	0.146	24.333	0.140	4.77
A	[N]	2	0.460	0.230	38.333	0.448	15.26
B	[N]	2	0.102	0.051	8.500	0.090	3.07
C	[Y]	2	0.012	0.006			
D	[N]	2	0.223	0.111	18.500	0.211	7.19
E	[N]	2	1.555	0.777	129.500	1.543	52.57
F	[N]	2	0.062	0.031	5.167	0.050	1.70
G	[N]	2	0.066	0.033	5.500	0.054	1.84
H×A	[N]	2	0.309	0.154	25.667	0.297	10.12
e1	[N]	0	0.000				
e2	[N]	0	0.000				
(e)		2	0.012	0.006		0.102	3.48
Total(Raw)	[-]	17	2.935	0.173			

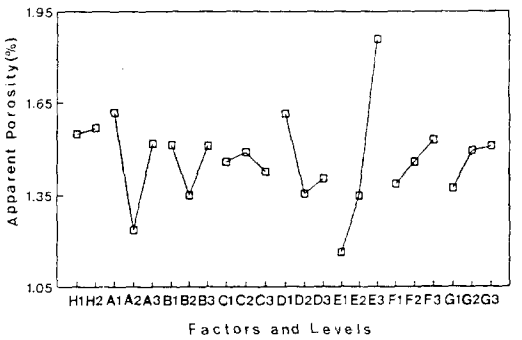

Fig. 4. Apparent Porosity Changes with the Levels of Individual Factors in an Experimental Design.

두드러진 영향을 미치는 성형인자는 경화온도(rho%=52.57%)이며, 승온속도와 성형압력도 어느 정도 영향이 있음을 알 수 있다. 각 성형인자들의 수준에 따른 기공률의 변화를 Fig. 4에 나타내었다. Fig. 4를 보면, 탈기포와 가압속도는 본 연구에서 설정된 수준범위 내에서는 기공률에 미치는 영향이 작음을 알 수 있고, 기공률이 적은 복합재를 제조하기 위해서는 승온속도는 2.2℃/min, 가압온도는 100℃, 성형압력은 1406Kgf/cm^2, 경화온도는 150℃, 경화온도에서의 유지시간은 60min, 냉각속도는 1.1℃/min의 경화조건을 사용해야 함을 알 수 있다.

3-5 실험계획법에 의한 경화싸이클

각 성형 인자들의 수준이 복합재의 굴곡강도와 기공률에 미치는 영향으로 부터 탄소섬유/페놀수지의 경화싸이클을 결정하였다. 굴곡강도와 기공률에 대한 성형인자들의 영향을 살펴보면, 경화온도, 경화온도에서의 유지시간 및 냉각속도에서 차이가 발생하였다. 경화온도가 150℃, 경화온도에서의 유지시간이 60min, 냉각속도가 1.1℃/min인 경우 복합재의 기공률이 가장 적은 반면에, 경화온도 160℃, 경화온도에서의 유지시간이 120min, 냉각속도가 2.2℃/min인 경우 복합재의 굴곡강도가 가장 큰 점으로 미루어 경화온도 150℃에서 60분간 유지 조건에서는 매트릭스 수지의 완전한 경화가 이루어지지 않은 것으로 판단되었다. 또한, 냉각속도가 2.2℃/min인 경우가 1.1℃/min인 경우에 비해 복합재의 기공률이 크지만 굴곡강도가 높고 경화공정에 걸리는 시간을 단축시키므로 최종 경화싸이클에서 2.2℃/min의 냉각속도를 결정하였다.

이상의 연구 결과로 부터, 다구찌의 실험계획법에 의해 결정된 탄소섬유/페놀수지의 경화싸이클을 Fig. 5에 나타내었다. Fig. 5의 경화싸이클을 사용하여 제조된 탄소섬유/페놀수지 복합재의 물성은 굴곡강도가 3514Kgf/cm^{2}이였으며, 기공률은 1.4%를 나타내었다. 굴곡강도는 크게 증가하였으나 기공률은 평균값에 머물고 있는데, 이는 냉각속도에 대한 최적수준을 결정할 때 기공률 보다는 굴곡강도에 중점을 두고 결정하였기 때문에 나타난 현상으로 판단되었다.

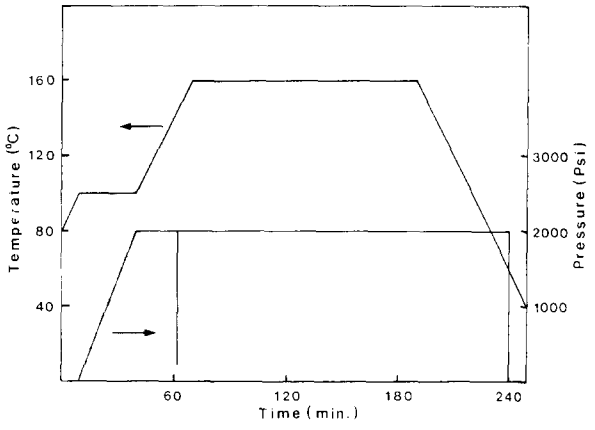

Fig. 5. A Cure Cycle of Carbon Fiber/Phenolic Resin Decided by the Taguchi Method in an Experimental Design.

4. 결 론

다구찌의 실험계획법을 토대로 탄소섬유/페놀수지의 경화싸이클을 연구한 결과 다음과 같은 결론을 얻었다.

1. 실험계획법을 이용함으로써 경화싸이클을 결정하는 시간을 줄일 수 있었다.

2. 탄소섬유/페놀수지의 압축성형시 복합재의 물성에 영향을 미치는 성형 인자 및 그들의 기여도는 굴곡강도인 경우 성형압력>경화온도>가압속도 순으로 중요하게 작용하였고, 기공률의 경우에는 경화온도>승온속도>성형압력 순으로 기여도가 큰 것으로 규명되었다.

3. 실험계획법에 의해 결정된 본 연구에서 사용된 탄소섬유/페놀수지의 최적 경화싸이클은 다음과 같다.

승온속도 : 2.2℃/min
경화온도 : 160℃
가압속도 : 0.45ton/min
경화온도에서의 유지시간 : 120min
가압온도 : 100℃
냉각속도 : 2.2℃/min
성형압력 : 1406Kgf/cm^2
탈기포 : 145℃

참 고 문 헌

1. 林幹夫 外, 炭素纖維의 應用技術, 116-131 (1984).
2. P.R. Ciriscioli, G.S. Springer, Smart Autoclave Cure of Composites, Technomic, Stanford Univ., (1990).
3. M.S. Phadke, Quality Engineering Using the Robust Design, AT & T. Bell Lab., Prentice Hall, (1989).
4. David Jackson, Reaction Injection Molding, 7thSymposium on Taguchi Methods, 19-26 (1989).
5. Brett R.M. Kyle, Investigations of a Plastics Reprocessing Process, 7th Symposium on Taguchi Methods, 389-400(1989).
6. Shaun W. Hill & James J, DeMates, Dynamic Analysis of EPDM Extrusion Using Taguchi Methods, 7th Symposium on Taguchi Methods, 403-415(1989).
7. 田口玄一, 品質工學講座 1, 改發, 設計 階段의 品質工學, 日本規格協會, 도쿄, (1988).
8. J. Delmote, Technology of Carbon and Graphite Fiber Composties, Van Nostrand Reinhold Co., New York, (1981).