

적층복합재료구조물의 변형에 미치는 제작조건과 작동조건의 영향에 대한 실험적 고찰

팜탄닛* · 엄영진**†

Experimental Investigation of the Effect of Manufacturing and Working Conditions on the Deformation of Laminated Composite Structures

Pham Thanh Nhut*, Young-Jin Yum**†

ABSTRACT: Fiber-reinforced plastic (FRP) is applied to fabricate the main structures of composite boats. Most of them are made from molds. These products deform after releasing from the mold and they also deform in high temperature environment. Therefore, experimental investigation and evaluation of deformation of laminated composite structures under various manufacturing and working conditions are necessary. The specimens of L-shape and curve-shape were made from unsaturated polyester resin and fiberglass material. Input factors (independent variables) are percentage of hardener and manufacturing temperature and four levels of working temperature and output factor is the deformation which is measured on these specimens. From the results, it was observed that the higher the hardener rate and temperature, the lower the deformation. When the working temperature increased, the specimens showed great variations for the initial deformation values. Besides, the values of deformation or input factors could be predicted by regression equations.

초 록: 섬유강화플라스틱(Fiber-reinforced plastic, FRP)은 복합재료 보트를 만드는 데 주 구조물로 사용되고 그것들 대부분은 몰드에서 만들어진다. 이러한 제품들은 몰드에서 분리될 때나 높은 온도의 환경에서 변형이 생긴다. 그러므로 다양한 제작 및 작동 조건에서 적층복합재료 구조물의 변형에 대한 실험적 조사 및 평가는 필수적이다. 불포화 폴리에스테르수지와 유리섬유를 이용하여 L-shape과 Curve-shape 시편을 제작하였다. 경화제 비율과 제작온도, 네 가지 작동온도가 입력인자(독립변수)로 사용되었고 출력인자는 시편에서 측정되는 변형이다. 결과로부터 경화제 비율이 높을수록 또한 제작온도가 높을수록 변형이 작게 생김을 알 수 있었다. 작동온도가 상승할 때 초기 변형 값에 따라 큰 변화를 보였다. 또한 변형 값이나 입력인자들은 회귀 방정식으로부터 예측할 수 있었다.

Key Words: 폴리에스테르 수지(polyester resin), 유리섬유(fiberglass), 변형(deformation), 제작조건(manufacturing condition), 작동조건(working condition)

접수: 2013년 6월 27일, 게재승인: 2013년 8월 27일

*울산대학교 대학원 기계공학과

**†울산대학교 기계공학부, Corresponding author(E-mail: yjum@ulsan.ac.kr)

1. 서 론

적층복합재료는 높은 비강도, 비탄성계수와 같은 우수한 성질과 저렴한 가격 때문에 널리 사용되고 있다. 매트릭스로는 불포화 폴리에스테르, 에폭시 또는 비닐에스테르수지를 사용하였다. 이러한 수지의 경화작업은 경화제와 수지 사이에서 발열반응을 일으켜서 경화 후에는 재료가 수축한다. RTM(Resin transfer molding)을 이용하여 유리섬유 강화 복합재료를 만들 때는 수지(Resin)를 주입하기 전에 섬유를 몰드(Mold) 속에 위치시킨다. 몰드를 제거한 뒤에는 제품의 형상은 가끔 몰드에서 나온 것과 다르다. 이러한 복합재료구조의 변형은 제조공정, 강도 및 심미적인 영향을 줄 수 있다. 특히 복잡한 모양의 제품은 변형을 조절하기 힘들기 때문에 높은 정확성을 가지기 어렵다. 작업환경에서의 온도 또한 구조의 변형에 영향을 준다. 실제로 몇몇 복합재료들은 보트의 벌크헤드(Bulkhead), 바닥, 프레임 등과 같은 고온의 환경에서 사용된다. 그러므로 적층복합재료구조물의 변형에 대한 실험적 고찰 및 평가는 필수적이다.

적층복합재료의 온도와 변형과 관련된 많은 연구들이 연구자들에 의해 수행되었다. Yoon 등[1]은 에폭시의 열팽창에 대한 이방성의 영향에 대해 조사하고 분석하였는데 에폭시의 화학적 수축이 탄소/에폭시 복합재료 보강재 구조의 왜곡을 유발함을 밝혔다. 재료주축방향에서 열팽창 계수와 탄성 성질은 온도 변화에 따라 특징지어졌다. 그리고 그들은 곡면 적층판의 왜곡을 예측하기 위해 컴퓨터를 이용한 방법을 사용하였다. Dano 등[2]은 복합재료구조물의 열변형을 보상하기 위해 MFC(Macro-fiber composite) 액추에이터를 사용한 연구를 하였다. 구체적인 목적은 복합재료 판의 표면에 접착된 MFC 액추에이터가 열이 유발한 변형에 대응하여 잘 작동이 되는지를 유한요소해석과 실험적 방법으로 알아보는 것이다. Kim 등[3]은 열하중으로 인한 원형 준등방적층판 거울의 표면 변형을 유한요소해석으로 분석하였다. Sun 등[4]은 C-shape으로 형성된 열경화성 복합재료 적층 고온 다이어프램(Diaphragm)의 품질에 미치는 성형온도의 효과를 고찰하였다. C-shape의 구조물과 함께 탄소섬유/에폭시 수지 프리프레그 적층을 위한 이중 다이어프램을 사용한 성형 공정의 메카니즘도 논의되었다. 이 외에도 섬유 방향이나 적층 순서에 의한 구조물의 변형과 관련된 많은 다른 연구들이 있다[5-8].

위의 연구들로부터 복합재료구조물의 변형의 원인이 많다는 것을 알 수 있다. 하지만 본 연구에서는 열적 요소에 초점을 맞추었다. 직접적인 열의 근원은 복합재료 적층판의 제작 및 작동조건으로부터 나온다. 그리고 간접적인 열의 근원은 경화반응에서 나온다. 경화제의 함유비율은 높고, 발열반응은 강하다. 게다가 어떤 구조물들은 선박의 엔진룸과 같은 높은 온도 환경에 놓여있어야 하며 그것들 또한 변형된다. 따라서 L-shape과 Curve-shape 두 가지 종류의

복합재료 시편에 대한 경화제의 함유비율, 제작 온도 요소(제작조건) 그리고 작동온도(작동조건) 등을 변화시켜가면서 복합재료구조물의 변형을 평가하려고 한다.

2. 이론과 실험

2.1 방법

경화제의 비율과 온도 두 개의 파라미터를 바꾸면서 L-shape과 Curve-shape 시편을 제작하였다. 24시간 후에 모든 시편의 변형을 측정한다. 그리고 모든 시편을 오븐을 이용하여 4가지 레벨의 온도로 48시간 동안 열을 가한 후 변형을 다시 측정한다. 시편의 변형은 세 점에서 측정되고 평균값을 기록한다. 동시에 다중회귀모형(Multiple regression model)이 실험식을 주기 위해 사용된다. 시편의 변형은 실험결과와 회귀방정식에 기초하여 평가된다.

2.2 이론

직접적인 변형 측정평가 외에도 실험결과들은 회귀방정식에 의해 논의되는데 다중선형 비선형 회귀모형을 사용하였다[9].

선형 모델의 일반적인 방정식은 다음과 같이 주어진다.

$$y = \beta_0 + \beta_1 x_1 + \beta_2 x_2 + \dots + \beta_k x_k + e \quad (1)$$

· y 는 종속변수

· x_1, x_2, \dots, x_k 는 독립변수

· $E(y) = \beta_0 + \beta_1 x_1 + \beta_2 x_2 + \dots + \beta_k x_k$ 는 모델의 결정론적인 부분

· β_i 는 독립변수 x_i 의 기여를 결정한다.

· e 는 랜덤오차로서 평균 0과 표준편차 σ 인 정규분포로 가정한다.

여기서 독립변수들은 다음과 같다.

x_1 = 경화제의 함유비율, %

x_2 = 온도, °C

그리고 독립변수는 변형량(Def. mm)이다.

비선형모델에서 다음과 같은 일반적인 형태를 사용할 수 있다.

$$y = \beta_0 + \beta_1 x_1^2 + \beta_2 \sqrt{x_2} + \dots + \beta_3 \log x_3 + \dots \quad (2)$$

$Z_1 = x_1^2, Z_2 = \sqrt{x_2}, Z_3 = \log x_3, \dots$ 등으로 정의함으로써 위의 관계는 선형 형태로 다시 쓸 수 있다.

$$y = \beta_0 + \beta_1 Z_1 + \beta_2 Z_2 + \beta_3 Z_3 + \dots \quad (3)$$

실험데이터는 SPSS 소프트웨어(Statistical Package for the Social Science)를 사용하여 처리하였다.

2.3 재료 및 시편 준비

샘플은 L-shape 15 종류, Curve-shape 15종류로 나누었다 (Table 1). 우븐(Woven, density of 570 g/m²)과 매트(Mat, density of 300 g/m²) E-glass 섬유가 사용되었고 폴리에스테르 수지와 경화제(Methyl ethyl ketone peroxide-MEKP-925)가 사용되었다. 폴리에스테르의 물성치를 Table 2에 나타내었다. 섬유유리/폴리에스테르[mat/woven/mat/woven]를 4겹으로 하여 3 mm 두께의 시편을 만들었다. L-shape 시편은 알루미늄 몰드에서, Curve-shape 시편은 복합재료 몰드에서 만들어졌다.

모든 몰드는 두 종류의 시편을 위해 두 부분으로 나누어졌다. 몰드와 시편의 기하학적 파라미터들은 Fig. 1에 나타내었다. 수지와 섬유는 몰드 위에 45:55의 중량 비율로 쌓았다. 먼저 0.5%와 1% vol. MEKP-925 경화제를 수지에 섞었고 각각의 몰드에 사용되었다. 그리고 그것들을 15°C의 드라이오븐에 1시간 동안 넣어두었다. 같은 온도에서 두 번째는 경화제 비율을 1.5%와 2%, 세 번째는 2.5%로 하였다. 거동은 25°C와 35°C에서 똑같다(Fig. 2). 경화제 비율과 온도는 제조사의 기준값에 기초하여 선택되었다(Table 2). 그리고 나서 시편들에 다시 4 level의 열을 가한다(50, 60, 70 & 80°C).

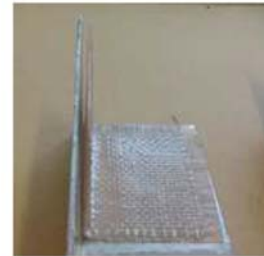
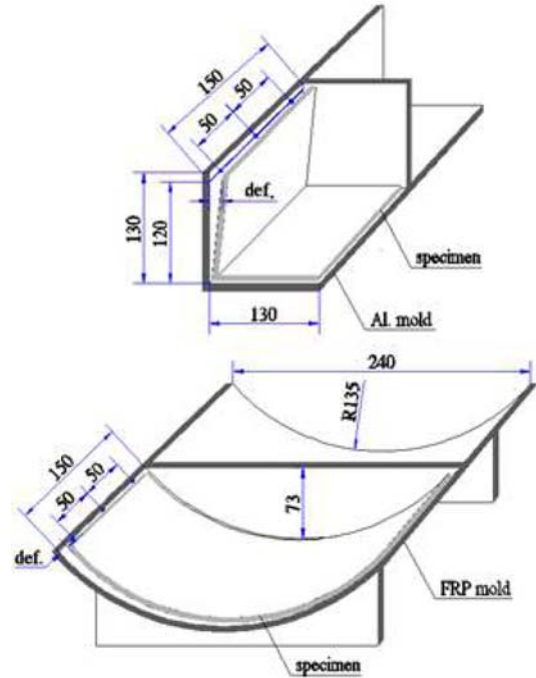


Table 1. Code of specimens

Types	Hard. %	Code of specimens		
		15°C	25°C	35°C
L-shape	0.5	L-H0.5-T15	L-H0.5-T25	L-H0.5-T35
	1.0	L-H1.0-T15	L-H1.0-T25	L-H1.0-T35
	1.5	L-H1.5-T15	L-H1.5-T25	L-H1.5-T35
	2.0	L-H2.0-T15	L-H2.0-T25	L-H2.0-T35
	2.5	L-H2.5-T15	L-H2.5-T25	L-H2.5-T35
Curve-shape	0.5	C-H0.5-T15	C-H0.5-T25	C-H0.5-T35
	1.0	C-H1.0-T15	C-H1.0-T25	C-H1.0-T35
	1.5	C-H1.5-T15	C-H1.5-T25	C-H1.5-T35
	2.0	C-H2.0-T15	C-H2.0-T25	C-H2.0-T35
	2.5	C-H2.5-T15	C-H2.5-T25	C-H2.5-T35

Table 2. Properties of polyester resin

Parameters	Units	Values
Type	-	CF-180
Density	g/cm ³	1.1-1.2
Viscosity at 25°C	CP	450±50
Gel time at 25°C	minute	12-15
Catalyst(MEKP) at 25°C	%	~1.0
Peak temperature	°C	138

Fig. 1. Geometric parameters of molds and specimens.

3. 결과 및 토의

3.1 변형에 대한 제작조건의 효과

시편의 변형은 Mitutoyo micro scale에 의해 측정되었다. 세 개의 측정 포인트 위치는 Fig. 1에 묘사한 것과 같이 50 mm 간격이다.

Fig. 3과 같이 경화제 비율이 높을수록 또한 높은 온도에서 더 낮은 변형을 보여주었다. 이것은 경화과정에서 수지의 수축과 섬유의 늘어남으로 인해 변형이 발생한 것으로 설명할 수 있다. 먼저 수축은 상당한 크기로 발생하고 섬유

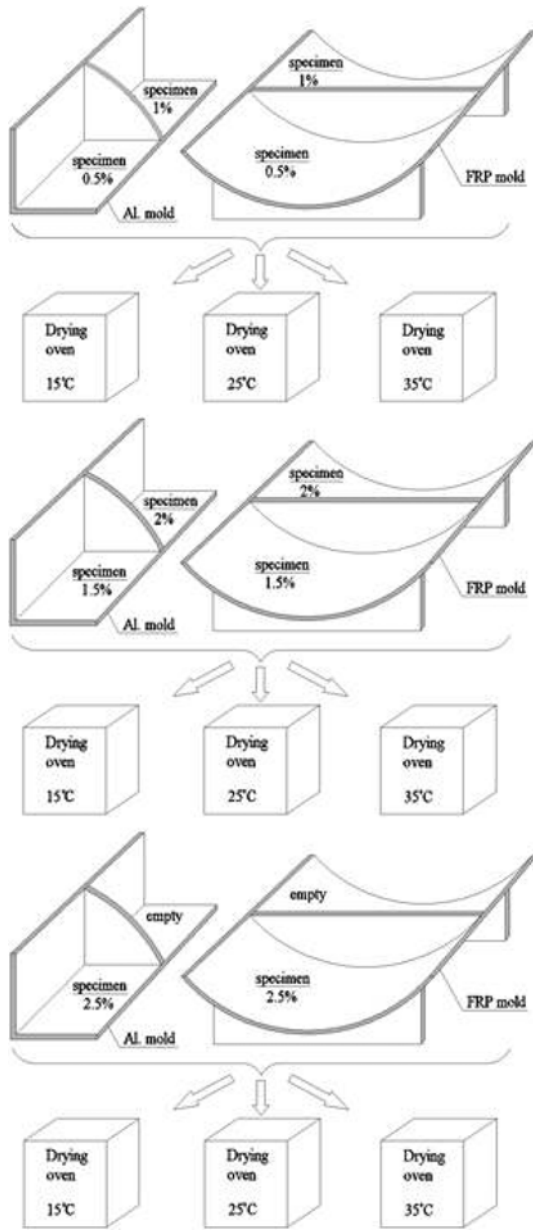
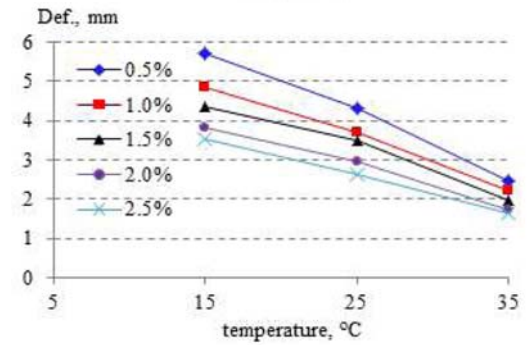
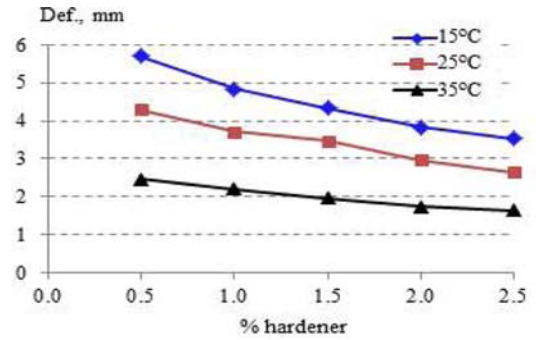


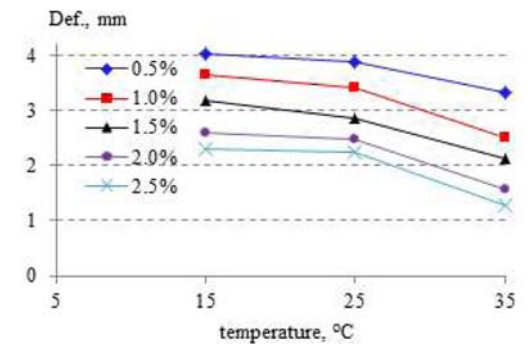
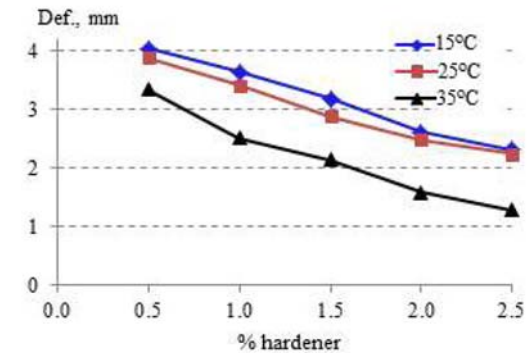
Fig. 2. Manufacturing process.

또한 같이 움직인다. 온도가 증가할 때(제작조건 상승), 섬유는 90°에서부터 더 큰 각도(L-shape) 또는 135 mm에서부터 더 큰 반경(Curve-shape)으로 늘어난다. L-shape 시편의 변형은 경화제 비율과 온도에 따라 거의 선형적으로 변했지만 curve-shape 시편의 경우는 온도에 대해서 비선형적이었다. 이 경우 온도가 15°C에서 25°C로 증가할수록 변형은 조금씩 감소하다가 25°C 이상에서 빠르게 감소하였다.

Fig. 4(a)는 변형량을 L-shape의 높이 120 mm로 나눈 변형비율, Fig. 4(b)는 변형량을 curve-shape의 최대굴곡량 73 mm로 나눈 변형비율을 나타낸 것으로 변형을 더 분명하게 판단할 수 있게 해준다. 낮은 수준의 입력인자들(H0.5-T15)의 경우 변형비율은 꽤 높았다(L-shape의 경우 4.75%, curve-



(a) L-shape specimens



(b) Curve-shape specimens

Fig. 3. Results of deformation.

shape의 경우 5.53%). 변형비율의 최소값(L-shape의 경우 1.36%, curve-shape의 경우 1.74%)은 H2.5-T35의 경우이었다. 구조물 변형의 감소를 위한 보다 현실적인 목적을 위해 Table 2에서와 같이 제조사가 권고한 25°C에서 1% 내외보다 높은 비율의 경화제를 사용해야 함을 알 수 있다.

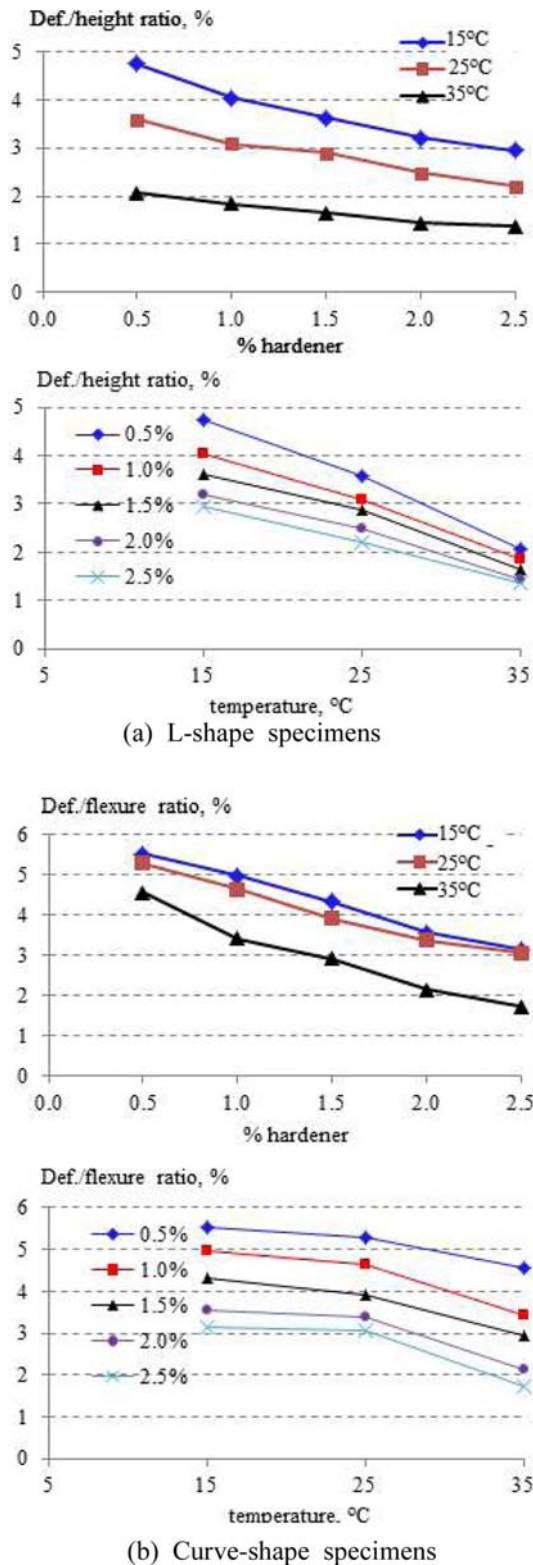


Fig. 4. Results of deformation ratio.

3.2 변형에 대한 작동조건 효과

각각 48시간동안 열을 가한 후에 시편들의 변형을 측정하였다. 결과는 Fig. 5에 나타내었다. 제작조건(경화제 비율,

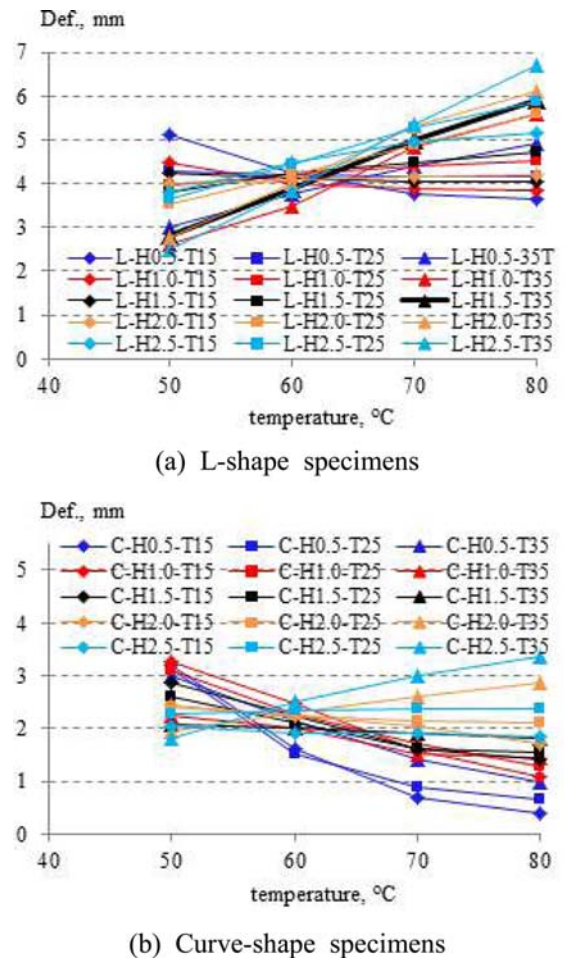
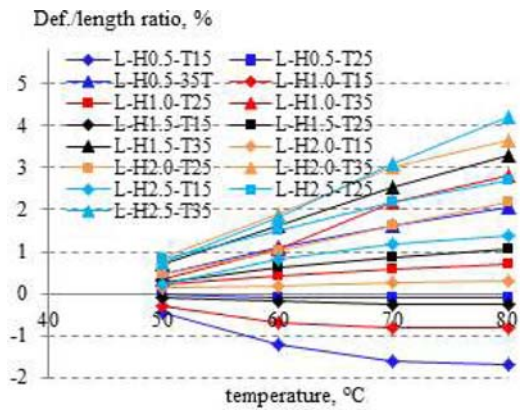


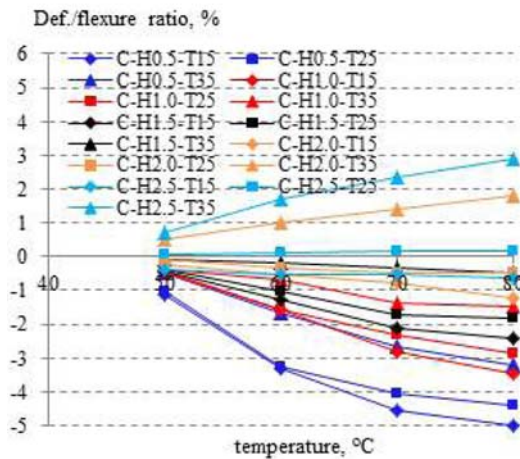
Fig. 5. Results of deformation.

온도)이 높은 경우 50°C에서 더 작은 변형이 발생하였다. 온도가 50°C에서 80°C로 증가할 때 L-shape의 시편의 변형은 대부분 증가하였고, curve-shape 시편의 경우 대부분 감소하였다. L-shape의 최대변형값은 6.7 mm를 나타냈고 최대 변형범위는 (L-H2.5-T35)의 경우 4.2 mm이다. 그리고 curve-shape의 최소변형값은 0.40 mm이고 최대변형범위는 (L-H0.5-T15)의 경우 2.80 mm이다. 온도가 70°C 이상에서는 변형이 서서히 증가하였다.

평가를 쉽게 하기 위해 제작조건에 의한 초기 변형을 제외하고 변형비율을 계산하였다(Fig. 6). 도표는 온도가 상승했을 때 각 구조물이 특정한 안정적인 변형 상태를 가지고 있음을 보여준다. L-shape의 경우 이 상태가 L-H0.5-T25에서 4.2 mm 근처였고 curve-shape의 경우 C-H2.5-T25에서 2.3 mm의 근처값이었다. 만약 시편의 첫 번째 변형(50°C에서)이 이 값들보다 높았다면 변형은 온도와 반대로 감소할 것이다. 이것은 제작조건에 의해 시편 내부에 생기는 잔류응력에 의한 것으로 생각된다. 즉 작동온도가 상승함에 따라 수지는 수축하고 섬유는 신장되어서 안정된 상태에 이른다고 볼 수 있다.



(a) L-shape specimens



(b) Curve-shape specimens

Fig. 6. Results of deformation ratio excluding initial def.

3.3 제작조건으로 변형 예측

SPSS 소프트웨어에 입력하기 위해 변형결과들을 정리하였다(Table 3). 두 입력인자들(독립변수들)은 Hard.(%)와 Temp.(°C)이고, 출력인자(종속변수)는 Def./height과 Def./flexure 비율이다. 분석은 L-shape과 curve-shape 시편이 독립적으로 수행되었다. 입력과 출력 사이의 연관성 및 회귀는 단순과 다중모형이 고려되었고 선형과 비선형 모델 모두 고려하였다.

단순회귀선형모형에서 종속변수에 대한 각 요소의 level 효과를 평가하기 위해 두 독립변수는 분리되어 고려되었다. SPSS 소프트웨어에서 Table 3의 데이터를 사용하여 Table 4와 같은 값을 얻었다.

여기서 R은 상관계수, R²은 다중결정계수, p는 유의수준을 나타낸다.

L-shape의 경우 온도 상관 계수는 높았지만 경화제 비율은 낮았다. 이것은 변형에 대해 온도가 밀접한 영향을 가지고 있는 반면 경화제 비율 인자는 약한 관계를 나타내는 것을 의미한다. 이 외에도 온도 인자만 통계적으로 중요성을

Table 3. Input data for SPSS

(a) L-shape specimens

No. of spec.	Hard., %	Temp., °C	Def./height, %
L-H0.5-T15	0.5	15	4.75
L-H0.5-T25	0.5	25	3.58
L-H0.5-T35	0.5	35	2.06
L-H1.0-T15	1.0	15	4.03
L-H1.0-T25	1.0	25	3.08
L-H1.0-T35	1.0	35	1.83
L-H1.5-T15	1.5	15	3.61
L-H1.5-T25	1.5	25	2.89
L-H1.5-T35	1.5	35	1.64
L-H2.0-T15	2.0	15	3.19
L-H2.0-T25	2.0	25	2.47
L-H2.0-T35	2.0	35	1.44
L-H2.5-T15	2.5	15	2.94
L-H2.5-T25	2.5	25	2.19
L-H2.5-T35	2.5	35	1.36

(b) Curve-shape specimens

No. of spec.	Hard., %	Temp., °C	Def./flexure, %
C-H0.5-T15	0.5	15	5.53
C-H0.5-T25	0.5	25	5.30
C-H0.5-T35	0.5	35	4.57
C-H1.0-T15	1.0	15	4.98
C-H1.0-T25	1.0	25	4.66
C-H1.0-T35	1.0	35	3.42
C-H1.5-T15	1.5	15	4.34
C-H1.5-T25	1.5	25	3.93
C-H1.5-T35	1.5	35	2.92
C-H2.0-T15	2.0	15	3.56
C-H2.0-T25	2.0	25	3.38
C-H2.0-T35	2.0	35	2.15
C-H2.5-T15	2.5	15	3.15
C-H2.5-T25	2.5	25	3.06
C-H2.5-T35	2.5	35	1.74

Table 4. Simple regression analysis

(a) L-shape specimens

Factors	β_0	β_1	R	R ²	p
Hard.	3.701	-0.643	0.470	0.221	0.077
Temp.	5.285	-0.102	0.861	0.741	0.000

(b) Curve-shape specimens

Factors	β_0	β_1	R	R ²	p
Hard.	5.666	-1.258	0.827	0.684	0.000
Temp.	5.469	-0.068	0.513	0.263	0.051

가졌고(p-value는 매우 작다) 경화제 인자는 그렇지 않았다(p-value > 5%). 그러나 curve-shape의 경우 완전히 반대였다. 그래서 우리는 각각의 인자에 대해 회귀방정식을 결정할 수 없었다.

선형다중회귀모형을 위해 두 개의 독립변수(x_1, x_2)가 함께 고려되었다. SPSS 소프트웨어의 결과는 Table 5에 나타났다. 선형다중회귀방정식은 다음과 같다.

L-shape case:

$$\text{Def.} = 6,249 - 0.643(\text{hard.}) - 0.102(\text{temp.}) \quad (4)$$

Curve-shape case:

$$\text{Def.} = 7.356 - 1,258(\text{hard.}) - 0.068(\text{temp.}) \quad (5)$$

식 (4)와 (5)를 Table 3의 데이터와 함께 체크하여 결과 오차를 Table 6에 나타내었다.

Table 5로부터 변형에 대한 두 개의 입력 요소의 관계는

매우 밀접하였고($R > 0.9$) 모두 통계적으로 중요하였고 p-values는 영 또는 영에 가까웠다. 그러나 오차값은 두 경우 모두 컸다(대부분 5% 이상). 즉, 식 (4),(5)는 쓸 수 없다.

비선형다중회귀모형에서 많은 방정식 형태들을 테스트한 후에(Square, cube, square root, log, etc.) 두 개의 입방근 방정식(6 & 7)이 선택되었다. 이 방정식들은 좋은 연관성과 통계적으로 중요한 level, 그리고 오차를 만족시켜주었다(거의 5%보다 낮음). 결과는 Table 7과 8에 나타났다.

비선형 다중회귀방정식은 다음과 같다.

L-shape case:

$$(\text{Def.})^{1/3} = 1.989 - 0.107(\text{hard.}) - 0.018(\text{temp.}) \quad (6)$$

Curve-shape case:

$$(\text{Def.})^{1/3} = 2.062 - 0.178(\text{hard.}) - 0.01(\text{temp.}) \quad (7)$$

식 (6)과 (7)은 경화제 비율과 온도에 대한 변형값 또는 변

Table 5. Linear multiple regression analysis

(a) L-shape specimens					
Factors	β_0	β_1	R	R ²	p
Hard.	-0.643	6.249	0.981	0.962	0.000
Temp.	-0.102				0.000
(b) Curve-shape specimens					
Factors	β_0	β_1	R	R ²	p
Hard.	-1.258	7.356	0.973	0.947	0.000
Temp.	-0.068				0.000

Table 6. Errors of linear multiple regression equation

No. of spec.	Error, %	
	L-shape	Curve-shape
L-H0.5-T15	7.42	-3.31
L-H0.5-T25	5.66	4.96
L-H0.5-T35	-14.44	4.57
L-H1.0-T15	-1.14	-2.09
L-H1.0-T25	0.78	5.41
L-H1.0-T35	-11.26	-9.12
L-H1.5-T15	-4.00	-2.65
L-H1.5-T25	5.38	3.84
L-H1.5-T35	-4.54	-6.27
L-H2.0-T15	-7.62	-7.47
L-H2.0-T25	2.31	6.80
L-H2.0-T35	3.26	-15.07
L-H2.5-T15	-5.83	-1.49
L-H2.5-T25	4.50	17.61
L-H2.5-T35	21.21	-6.03

Table 7. Nonlinear multiple regression analysis

(a) L-shape specimens					
Factors	β_0	β_1	R	R ²	p
Hard.	-0.107	1.989	0.986	0.973	0.000
Temp.	-0.018				0.000
(b) Curve-shape specimens					
Factors	β_0	β_1	R	R ²	p
Hard.	-0.178	2.062	0.962	0.926	0.000
Temp.	-0.010				0.000

Table 8. Errors of nonlinear multiple regression equation

No. of spec.	Error, %	
	L-shape	Curve-shape
L-H0.5-T15	0.92	-3.00
L-H0.5-T25	2.89	1.33
L-H0.5-T35	-2.60	2.42
L-H1.0-T15	-1.30	-1.45
L-H1.0-T25	1.57	2.32
L-H1.0-T35	-2.36	-1.58
L-H1.5-T15	-1.60	-0.76
L-H1.5-T25	3.22	2.25
L-H1.5-T35	-1.63	-0.86
L-H2.0-T15	-2.24	-1.82
L-H2.0-T25	1.98	3.14
L-H2.0-T35	-1.40	-4.80
L-H2.5-T15	-1.33	0.01
L-H2.5-T25	2.09	6.00
L-H2.5-T35	1.48	-5.07

형값에 대한 경화제 비율과 온도를 결정할 수 있도록 해준다. 실제로 이 인자들은 구체적인 제작조건을 만들어준다. 따라서 식 (6)과 (7)은 더 광범위하게 적용되어야 한다.

4. 결 론

두 개의 입력인자(경화제 비율과 온도)가 L-shape과 curve-shape 적층복합재료구조물의 변형에 미치는 영향을 평가하기 위해 실험과 해석을 수행하였다. 결과는 만약 경화제 비율과 온도가 감소한다면 변형은 증가할 것임을 보여주었다. L-shape 시편의 변화는 거의 선형적이었지만 curve-shape은 온도가 15°C에서 25°C로 증가할 때 약간 감소하였고 25°C가 넘어서는 급격히 감소하였다. 작동조건에서 온도가 50°C에서 80°C로 상승할 때 변형은 4.2 mm(L-H0.5-T25)와 2.3 mm(C-H2.5-T2.5)에서 안정적이었다. 작동조건으로부터의 초기 변형값이 너무 크거나 너무 작은 경우 변형의 변화가 심했다. 이외에도 실험적 회귀방정식으로부터 변형을 예측할 수 있거나 입력인자를 결정할 수 있었다. 이 식을 이용하면 구체적인 제작조건으로부터 구조물의 변형을 계산할 수 있고 반대로 요구되는 변형을 만족시키기 위한 온도나 경화제 비율을 선택할 수 있다.

후 기

이 논문은 2012년 울산대학교 연구비에 의하여 연구되었음.

참고문헌

1. Yoon, K.J., and Kim, J.-S., "Effect of Thermal Deformation and Chemical Shrinkage on the Process Induced Distortion of Carbon-epoxy Curved Laminates", *Journal of Composite Materials*, Vol. 35, No. 3, 2001, pp. 253-263.
2. Dano, M., Gakwaya, M., and Julliere, B., "Compensation of Thermally Induced Distortion in Composite Structures Using Macro-fiber Composites", *Journal of Intelligent Material Systems and Structures*, Vol. 19, 2008, pp. 225-233.
3. Kim, K.P., and Hale Richard, D., "Analysis of Surface Deformation Due to Thermal Load on Circular Quasi-isotropic Laminate Mirrors", *American Institute of Aeronautics and Astronautics*, 2008.
4. Sun, J., Gu, Y., Li, M., Ma, X., and Zhang, Z., "Effect of Forming Temperature on the Quality of Hot Diaphragm Formed C-shaped Thermosetting Composite Laminates", *Journal of Reinforced Plastics and Composites*, Vol. 31, No. 16, 2012, pp. 1074-1087.
5. Kerboua, B., Addabedia, E., Tounsi, A., and Sereiri, Z., "Thermal Impact and the Fiber Orientation Effect of Structures Reinforced by Composites FRP, the New Prestressed Laminates Model", *Journal of Thermoplastic Composite Materials*, Vol. 25, No. 4, 2012, pp. 491-504.
6. Onall, L., and Adanur, S., "Effect of Stacking Sequence on the Mechanical Properties of Glass-carbon Hybrid Composites Before and After Impact", *Journal of Industrial Textiles*, Vol. 31, No. 4, 2002, pp. 225-271.
7. Lin, H.-J., Lai, W.-M., Huang, H.-D., and Kuo, Y.-M., "Discussion on the Cause of Print-through Phenomenon of FRP and Several Improvement Methods", *Journal of Composite Materials*, Vol. 44, No. 17, 2010, pp. 2111-2126.
8. Kuo, Y.-M., Lin, H.-J., Lee, Y.-H., and Lai, W.-M., "Study of the Decrease in Print-through Phenomenon on Fiber-reinforced Plastic Material", *Journal of Reinforced Plastics and Composites*, Vol. 30, No. 24, 2011, pp. 1989-2001.
9. Dougherty, C., *Introduction to Econometrics* (third edition), Oxford University Press, 2007.
10. Lewis-Beck, M.S., *Regression Analysis. Int. Handbooks of Quantitative Application in the Social Sciences*, Vol. 2, 1993.