

열변형을 고려한 열경화성수지 복합재료의  
펠트루전 공정에 관한 연구  
A Study on the Pultrusion Process of Thermosetting Composites  
Considering Thermally Induced Deformation

김대환, 이우일  
서울대학교 기계공학과

ABSTARCT

A synthesized model of pultrusion process considering thermally induced deformation was established. The model was composed of liquid resin flow model, thermo-chemical analysis and linear elastic analysis. In order to verify the above-mentioned models, several experiments were performed. A laboratory scale pultrusion line was established and glass/polyester composites were fabricated. The experimental results were compared with the calculated ones. The model successfully could estimate degree of cure, pulling force and amount of process-induced deformation.

Key Words : pultrusion, thermoset resin, process induced deformation, pulling force, finite element method

주요어 : 펄트루전, 열경화성수지, 열변형, 당김힘, 유한요소법

1. 서론

펠트루전 공정은 일정단면의 복합재료를 연속적으로 생산하는 공정으로 다른 공정에 비해 생산성이 매우 우수한 특징이 있다. 펄트루전 공정에는 열경화성 수지와 열가소성 수지가 모두 쓰일 수 있지만 전통적으로 열 경화성 수지가 많이 쓰여져 왔다. 열 경화성 수지 복합재료의 펄트루전 공정은 수지 함침통 (resin bath)을 통과하면서 수지가 함침된 섬유 다발이 가열 다이를 통과 하면서 경화되어 성형 되는 연속적인 생산공정이다 (Fig.1).

이러한 열경화성 수지 복합재료의 생산성을 향상 시키며 양질의 제품을 생산하기 위하여는 공정 조건에 따른 최종 제품의 특성을 파악하고 이를 공정조건과 장치 설계에 반영하여야 한다. 이를 위하여는 수지와 강화섬유의 물리적 특성을 파악하고 이를 반영한 온도-경화도 모델과 수지 유동 모델 그리고 경화된 복합재료의 응력해석을 종합적으로 수행하여야 한다 (Fig.2). 기존의 펄트루전에 관한 연구는 몇 가지

모델을 제시하고 있으나 주로 온도-경화도 모델에 집중되어 있으며 그나마 단편적으로 제시되어 펄트루전 현상의 종합적인 규명은 미흡한 면이 많다 [1, 2, 3]. 본 연구에서는 펄트루전 공정을 종합적으로 해석할 수 있는 모델을 제시하고 실험실 규모의 펄트루전 장치를 제작하여 실제 제품을 생산함으로써 이를 실험적으로 규명하였다.

2. 모델

2.1 가열 다이내에서의 복합재료의 거동

가열 다이 입구 부분에서 수지는 액체 상태이지만 가열에 의하여 점차 경화되어 점도가 급격히 상승하며 고화된다. 따라서 젤점 (gel point) 이전의 수지는 액체로 이후의 수지는 고체로 취급할 수 있다 (Fig.3) 가열 다이의 입구 부분은 테이퍼로 되어 있어서 섬유 다발의 유입을 원활하게 하고 미처 다이 속으로 유입

되지 못하는 수지로 인하여 당김 방향 반대로의 유동이 형성된다. 이로 인해 다이내의 압력은 상승하고 당김 방향 반대로의 항력이 발생한다. 테이퍼 부를 지나 평활부에서 수지의 압력은 다이벽면에서의 얇은 수지막의 전단에 의하여 다소간 감소하다가 젤점을 지나서는 복합재의 열팽창과 경화 수축에 의해 다이 벽면에 가해지는 압력이 상승 혹은 하강하게 된다. 이때 고화된 복합재료는 다이 벽면에 마찰을 발생시키고 이로 인해 당김힘이 크게 증가하게 된다.

아래의 온도-경화도 모델은 다이내에서의 복합재료의 온도 분포를, 수지 유동 모델은 다이내부에서 액체 상태의 수지의 압력을 각각 예측한다. 고화된 이후의 다이 벽면에 미치는 압력은 선형 탄성 모델을 통하여 구해 낼 수 있다. 이러한 압력 해석 결과를 바탕으로 전체 다이에 미치는 복합재료의 힘을 구함으로써 당김힘을 예측 할 수 있다.

## 2.2 온도-경화도 모델

복합재료의 내부 온도는 에너지 방정식을 풀어서 계산할 수 있다.

$$\rho c V_p \frac{\partial T}{\partial z} = \frac{\partial}{\partial x} \left( k \frac{\partial T}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left( k \frac{\partial T}{\partial y} \right) + u'' \quad (1)$$

여기서  $\rho$ ,  $c$  는 각각 복합재료의 밀도와 비열을 나타내며 이는 각각의 강화섬유와 기지재료 의 물성치 및 섬유 부피분율  $v_f$  의 함수로 나타내어 진다.  $V_p$  는 당김속도를 나타내며 경화에 의한 발열량을  $u''$  은 경화도의 시간변화율에 비례한다. [4]

## 2.3 수지유동 모델

수지가 함침된 섬유다발이 테이퍼 다이를 통과할 때 미처 다이 안으로 유입되지 못한 유동에 의한 역방향 유동이 발생하며 이 유동은 다공성 매질 사이로 흐르는 유동으로 간주하여 Darcy 의 법칙으로 근사 될 수 있다. 질량보존을 고려하면 수지의 압력구배는 다음과 같이 표현된다 [4].

$$\frac{dp}{dz} = V_p \eta \frac{4K}{R_f^2} \frac{v_f(z)^2}{(1-v_f(z))^\beta} \left( 1 - \frac{v_f}{v_f(L_i)} \right) \quad (2)$$

여기서  $K$  는 Kozeny 상수이다. 위 식은 다음과 같

이 무차원 화 될 수 있다 [2]. 사각형상 단면의 다이 (Fig.4) 인 경우를 생각해 보면 압력을 무차원화 하여 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$p^*(\zeta) = p(z) \left/ \left( \frac{4K}{R_f^2} \eta V_p L_i \right) \right. \quad (3)$$

$$\frac{dp^*}{d\zeta} = \frac{v_f(\zeta)^2}{(1-v_f(\zeta))^\beta} \left( 1 - \frac{v_f(\zeta)}{v_f(1)} \right) \quad (4)$$

$$v_f(\zeta) = v_f(1) \frac{1}{C_r(1-\zeta) + \zeta} \quad (5)$$

여기서 무차원화 된 압력은 복합재료의 최종섬유부피분율  $v_f(L_i)$ 와 두개의 무차원 변수 즉,  $\zeta = z/L_i$  와  $C_r = h(0)/h(L_i)$  만의 함수임을 알 수 있다.

이를 검증하고 Kozeny 상수  $K$  를 결정하기 위하여 다양한 테이퍼형상의 다이와 다양한 실험조건에서 실험을 수행하였다. 유체는 수지와 점도가 비슷한 글리세린을 사용하였다. Fig.5 에서 보는바와 같이 서로 다른 길이와 높이에 대해서도 비슷한 결과가 나왔으며 이는 무차원화가 가능함을 보여 준다. 또한 모델과 실험결과도 비교적 잘 일치함을 알 수 있다.

테이퍼 부분을 지나 평활부에서 초기에는 수지는 여전히 액체상태이다. 벽면 근처에는 수지의 얇은 막이 형성되고 이 막의 전단력에 의해 압력이 하강한다 (Fig.6). 벽면근처의 얇은 수지막은 Couette 유동으로 근사할 수 있으며 이의 속도 분포는 다음과 같다.

$$u^* = \frac{1}{2\eta} \frac{dp}{dz} (y^{*2} - \delta y^*) + \frac{V_p}{\delta} y^* \quad (6)$$

벽면에서의 전단응력과 압력의 힘 평형에 의해 다음과 같은 압력 변화식이 구해진다.

$$\frac{dp}{dz} = -\frac{V_p \delta}{\eta} \left/ \left( \frac{A(1-v_f)}{\ell} - \frac{\delta}{2} \right) \right. \quad (7)$$

여기서  $\ell$  은 제품단면의 모서리 길이 이다.

## 2.4 열변형 및 응력해석

젤점 이후의 복합재료는 고체로 간주하여 선형 탄성 해석을 통하여 응력과 열변형량을 구하였다. 필트루전의 경우 복합재의 형상은 당김 방향( $z$  방향)으로의 길이가 단면 방향 보다 훨씬 길기 때문에 평면변

형 문제(plane strain problem)로 생각할 수 있으며 지배 방정식은 다음과 같다. [5,6]

$$D^T E D u - D^T E \varepsilon_0 = 0 \quad (8)$$

여기서  $u$ ,  $\varepsilon_0$  는 각각 변위 벡터와 열변형에 의한 변형율을 나타내며 미분행렬  $D$  와 강성행렬  $E$  는 각각 다음과 같이 나타내어 진다.

$$D = \begin{bmatrix} \frac{\partial}{\partial x} & 0 \\ 0 & \frac{\partial}{\partial y} \\ \frac{\partial}{\partial y} & \frac{\partial}{\partial x} \end{bmatrix} \quad (9)$$

$$E = \frac{E_1}{(1 + \nu_1)(1 - \nu_1 - 2\nu_2^2)} \begin{bmatrix} 1 - \nu_1\nu_2^2 & \nu_1 + \nu_1\nu_2^2 & 0 \\ \nu_1 + \nu_1\nu_2^2 & 1 - \nu_1\nu_2^2 & 0 \\ 0 & 0 & \frac{1 - \nu_1 - 2\nu_2^2}{2} \end{bmatrix} \quad (10)$$

여기서 하첨자 1, 2 는 각각 단면방향 ( $x, y$ )과 단면에 수직인 방향 ( $z$ ) 을 나타내며  $\nu = E_1 / E_2$  이다. 이 방정식의 경계조건은 복합재가 수축하여 다이로부터 떨어지기 전에는 벽면에 수직인 방향의 변위가 0 이며 다이에서 떨어진 이후에는 표면응력을 0 으로 주었다.

### 2.5 당김힘 해석

당김힘은 테이퍼 부분에서 가해지는 압력에 의한 힘, 다이 평활부에서의 전단응력에 의한 힘, 젤점 이후부터 다이에서 떨어질 때 까지는 고화된 복합재가 다이 벽면에 가하는 마찰력으로 나누어 볼 수 있다. 당김힘은 아래와 같이 이 세 힘들의 합으로 정리 될 수 있다.

$$F = \int_0^{\ell} (p(z)\ell_1 \sin\theta) dz + \int_{\ell_1}^{\ell} \ell \left( \frac{V_2 \eta}{\delta} - \frac{1}{2} \frac{dp}{dz} \delta \right) dz + \int_{\ell_1}^{\ell} \left( \mu_f \int_i \sigma_N dl \right) dz \quad (11)$$

### 3. 실험

앞서 제시한 모델을 실험적으로 검증하기 위하여

실험실 규모의 펠트루전 장치를 제작하였다. 앞서 말한바와 같이 장치는 수지 합침장치, 가열다이, 풀러 및 절단기로 구성되어 있다. (Fig.1) 유리 섬유 (RS 4400-36 E-Glass fiber, LG-Owens Corning) 와 불포화 폴리에스터 (280 및 825L, 세운화성)을 사용하였으며 섬유부피분율은 58% 이다. 가열 다이의 길이는 600 mm 이며 PID 제어기에 의해 온도를 제어할 수 있도록 하였다. 단면은 12mm x 6mm 의 사각형이다. 다이의 5 곳에 평면 다이아프램 압력계를 설치하여 벽면에 가해지는 압력을 측정하도록 하였다. 다이는 슬라이딩 베어링위에 설치하고 로드셀을 장치하여 당김힘을 측정하였다. 공정중에 열전대를 섬유다발 사이에 삽입하여 복합재 내부의 온도를 다이를 따라가며 측정할 수 있도록 하였다. 공정도중 당김을 중지하여 급속히 경화 시킴으로써 복합재가 경화 수축에 의해 다이에서 떨어지는 점을 관찰 할 수 있었다.(Fig.7)

### 4. 수치해석

에너지 방정식과 선형탄성 방정식을 유한요소법을 이용하여 시간에 따른 온도, 경화도, 압력 및 열변형량 등을 계산 하였다. 전체적인 계산의 흐름은 순서도 (Fig.8) 에 나타난 바와 같다. 계산은 실험과 비교하기 위하여 사각 단면의 다이의 경우 대칭성을 고려하여 그 1/4 을 20 x 10 개의 4 절점 요소를 사용하여 계산하였고, 또한 열 변형 현상을 잘 보여줄 수 있는 구조물로서  $\Gamma$  자형의 앵글의 1/2 을 계산해 보았다.

### 5. 결과 및 토의

Fig.9 에 복합재료 내부의 온도 변화를 실험값과 계산값을 비교하여 나타내었다. 비교적 잘 일치함을 볼 수 있다. 실험에서 측정된 압력값과 계산된 값을 Fig.10 에, 다이에서 떨어지는 점을 Fig.11 에 비교 하였다. 다이온도와 당김속도에 따른 당김힘의 변화를 Fig.12 에 나타내었다. 이상에서 보는 바와 같이 당김속도가 빨라 질수록 압력이 상승하고 젤점과 다이에서 떨어지는 점이 후퇴하여 당김힘이 증가하는 것을 볼 수있다.  $\Gamma$  자형 제품의 최종적인 변형량과 잔류 응력 분포를 그림에 그 계산값을 Fig.13 에 나타내었다

다. 그림에서 보는 바와 같이 T자형 제품에서는 경화도 차이에 기인하는 Spring-in 현상을 관찰 할 수 있었다.

### 후기

본 연구의 일부는 선도기술개발과제 (No.6-1-32) 의 지원에 의하여 행하여 졌으며, 관계자 여러분에게 감사 드린다

### 참고문헌

1. Sumerak, J. E. 1985. *Proceedings of the 40th SPI RP/C*. Session 2-B.
2. Batch, G. L. 1989. Crosslinking Free Radical Kinetics and Pultrusion Processing of Composites. Ph.D Thesis. University of Minnesota
3. Moschiar, S.M., Reboredo, M.M., Kenny, J.M. and Vazquez, A. 1996. *Polymer Composites*, 17:478-485.
4. Kim, D., Han, P., Jin, G. and Lee, W.I. 1997 *Journal of Composite Materials*, 31:2105-2122.
5. Zienkiewicz, O.C., Taylor, R.L. 1989. "The Finite Element Method" 4th ed. McGraw-Hill.
6. Becker, E. B. , Carey, G.F. and Oden, J.T. 1981. "Finite Elements", Prentice-Hall.

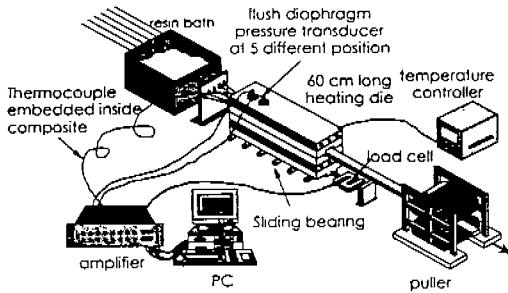


Fig.1 Schematic sketch of pultrusion process and experimental setup

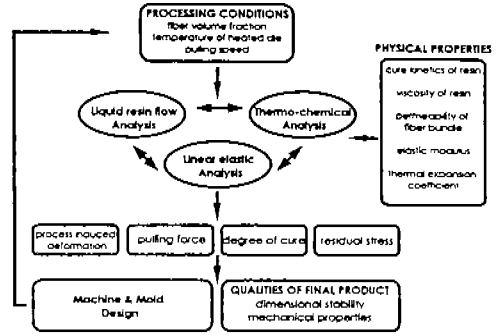


Fig.2 Studying issues on pultrusion process

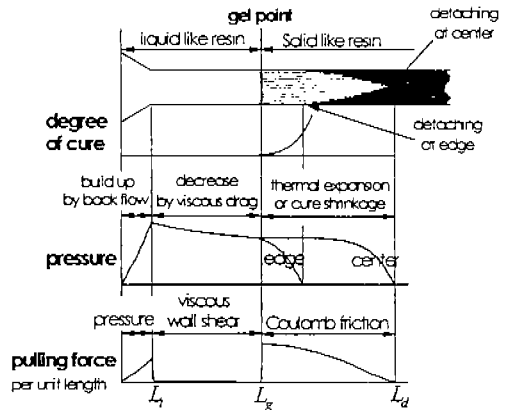


Fig.3 Behavior of composite in the heating die

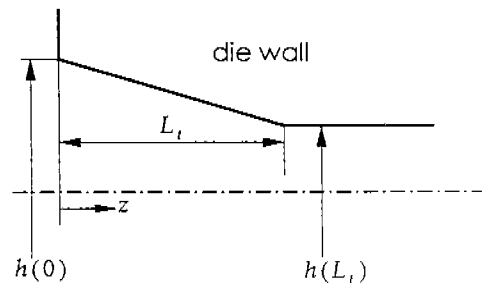


Fig.4 Schematic view of tapered die geometry

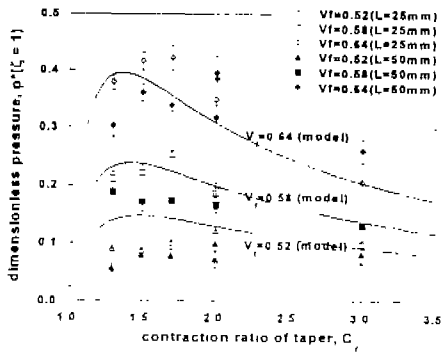


Fig.5 Comparisons between pressure build up model and experimental results

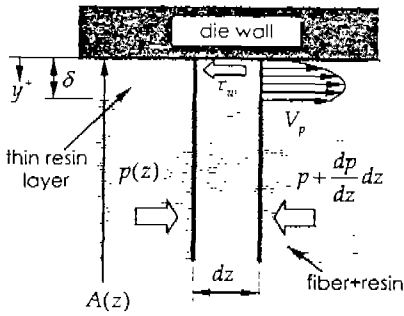


Fig.6 Schematic view of resin behavior at the flat region of the die

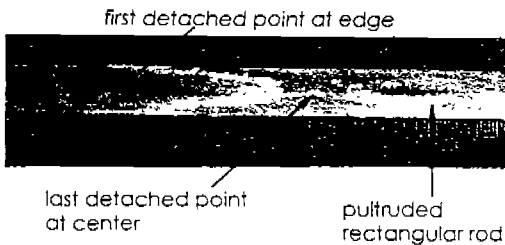


Fig.7 Photograph of pultruded composite product showing detached point

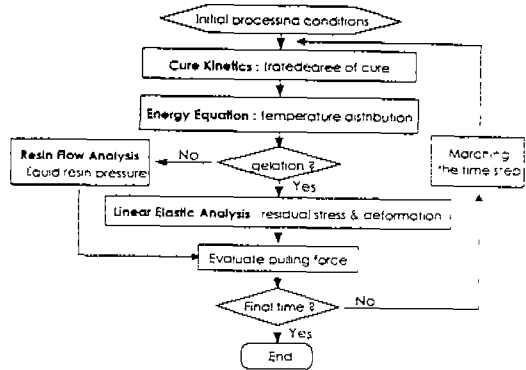


Fig 8 Flow chart of the solution procedures

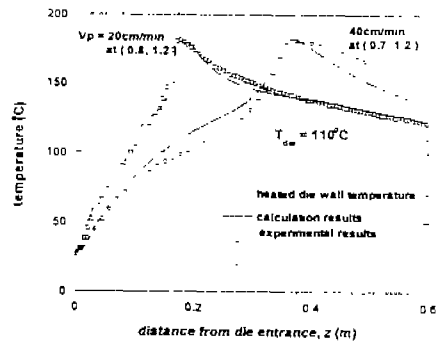


Fig.9 Temperature variation along the die at the thermocouple location (comparisons between the measured data and numerical results). The thermocouple location was (x,y) mm from die center.

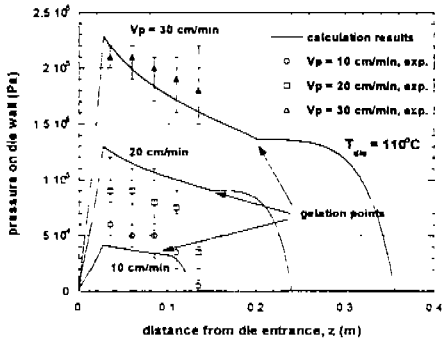


Fig.10 Pressure applied on the die surface along the die length (comparisons with the measured data and numerical results)

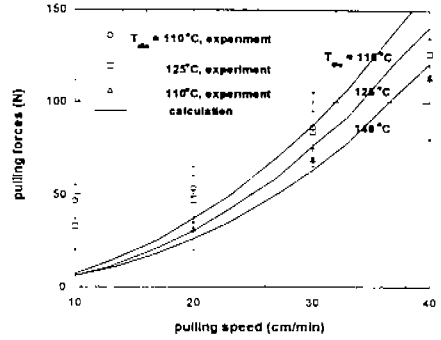


Fig.12. Pulling forces as a function of pulling speed for different die temperatures.

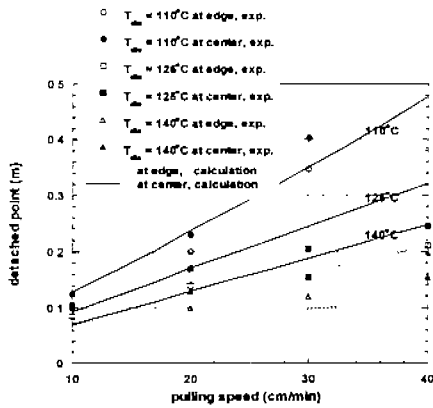


Fig.11 Detached points as a function of pulling speed.

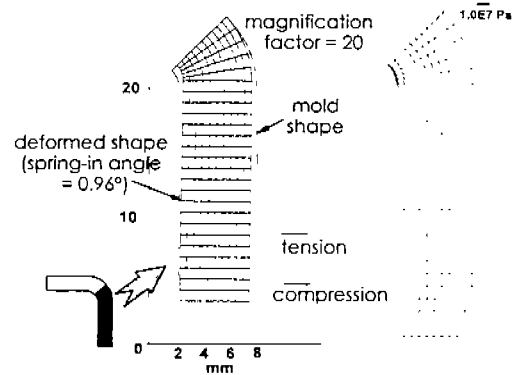


Fig.13 The deformed shape and principal residual stresses of pultruded composite L-shape angle. The nominal die temperature was 125 °C and the pulling speed was 20cm/min.