

論文

Thermoforming용 장섬유 강화 복합재료의 성형공정에 관한 연구
- Double Belt Lamination Process의 해석 -

홍정표*** · 정충식* · 이우일* · 김이곤**

A Study on the Processing of Continuous Fiber Reinforced
Composite Materials for Thermoforming
- Analysis of Double Belt Lamination Process -

Jeong-Pyo Hong***, Chung-Sig Jeong*, Woo-Il Lee* and E-Gon Kim**

ABSTRACT

Thermoforming process using long fiber reinforced thermoplastic sheet composites has many advantages including short cycle time and recyclability. However, due to high viscosity of thermoplastic melt, impregnation is very difficult. In this study, mechanism of impregnation during double belt lamination process was investigated. A small scale double belt press was designed and built for experiments. In the model, the deflection of the belt was estimated using finite difference technique and pressure distribution was obtained. The degree of impregnation was calculated using Darcy's law with calculated pressure distribution. The volume fraction and the permeability of the glass fiber mat were measured. The experiments were performed for different belt speeds and temperatures. Agreement between the numerical results and the experimental data was found to be satisfactory.

초 록

장섬유 강화 열가소성수지 복합재료판의 열간성형법은 공정주기가 짧고 재활용이 가능하나, 수지의 점도가 높아 함침이 힘들다. 본 연구에서는 열가소성수지 복합재료판의 연속적인 생산이 가능한 Double Belt Lamination Process 중 매트 내로의 수지가 함침되는 미케니즘 연구와 수지와 매트 물성 측정 및 이의 모델링을 병행하였다. Double Belt Lamination Process에서 벨트가 받는 인장력에 의한 압력을 계산하기 위하여 벨트의 형상을 유한차분법으로 구하였다. 계산된 압력분포로 Darcy's Law를 이용하여 함침도를 계산했다. 유리섬유 매트의 섬유부피분율 및 투과율도 실험에 의해 측정 후 각각 모델링하였다. 상기한 모델링의 타당성을 검증하기 위하여 여러 조건하에서 실험을 하였다. 실험으로 얻어진 시편을 Thin Section으로 만들어 현미경으로 관찰하여 모델링에 의한 함침도 결과와 비교하였다. 비교한 결과 실험과 모델에 의한 결과가 잘 일치함을 볼 수 있었다.

* 서울대학교 기계공학과

** 국민대학교 기계설계학과

*** 현재 대우중공업 주식회사 근무중

1. 서 론

최근, 자동차의 경량화를 위해서 고안되어 각광을 받고 있는, 장섬유강화 플라스틱쉬이트의 열간성형법(Thermoforming)이 있다. 제품의 기계적 강도가 뛰어난 열경화성 수지를 기지재료로 하는 SMC(Sheet Molding Compound)가 자동차공업에서 먼저 실용화되었지만, 공정주기가 꽤 길고(한 사이클에 2~3분 정도 소요), 생산성 및 성형 그리고 자원 재활용(Recycling)에 몇가지 결점이 있었다. 그래서 이러한 점들을 보완한 것이 장섬유강화 열가소성수지 복합재료판의 열간성형법이다. 열간성형에서는 열가소성 수지를 기지재료로 사용하므로, 열가소성 수지 특유의 잇점을 살릴 수 있다. 즉, 수지의 용점보다 약간 높은 온도로 원적외선 가열기로 미리 가열해서 수지를 녹인 후, 금형속에 넣고 가압성형하므로, 여러가지 두꺼운 제품이 얻어지고, 화학 반응에 소요되는 시간이 필요없어 사이클에 소요되는 시간도 SMC의 1/3~1/5정도이다. 열간 성형법에 사용되는 재료는 열가소성 수지와 장섬유를 미리 섞어 놓은 판재인데, 열가소성 수지의 점도가 일반적으로 상당히 높기 때문에 함침에 상당한 어려움이 있다. 특히 연속적으로 함침이 일어나도록 해야 하는데, 이를 위하여는 보통 Fig.1에서와 같은 Double Belt Press를 사용한다.

본 연구에서는 연속적인 함침이 가능한 Double Belt Lamination Process의 설계 및 제작과, 공정 중 다공질체인 장섬유매트 속으로 고분자가 함침되는 미커니즘을 연구하였다. 전술한 바와 같이 열가소성 수지는 보통 그 점도가 매우 높아 함침

과정이 매우 어렵다. Double Belt Lamination Process에서 함침에 영향을 미치는 주요 인자는 수지의 온도, 수지가 받는 압력, 벨트의 속도등이다. 이들 인자가 함침에 어떻게 영향을 미치는가 알아내기 위해서 제작한 Double Belt Lamination Process를 이용하여 실험과 해석을 행하였다. 이러한 해석을 위하여는 모재로 사용한 폴리프로필렌(Polypropylene) 수지와 유리섬유 매트(Mat)의 물성이 요구되며, 이의 측정 및 모델링도 병행하였다.

2. 수학적 모델링

Double Belt Lamination Process에서 매트는 로울러와 벨트에 의해 눌러져 압력을 받는다. 또 이

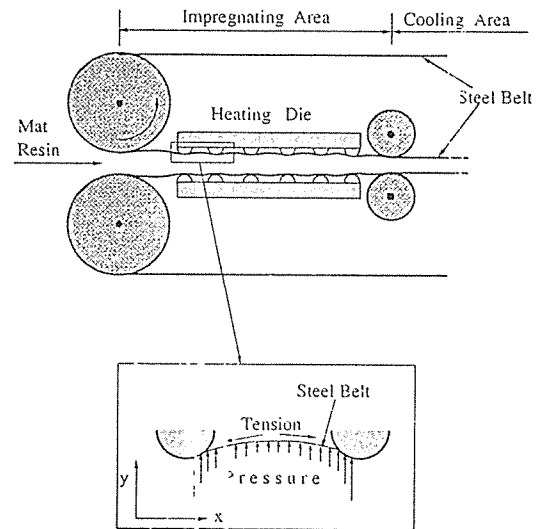


Fig.2. Illustration of the pressure generated between the steel belts.

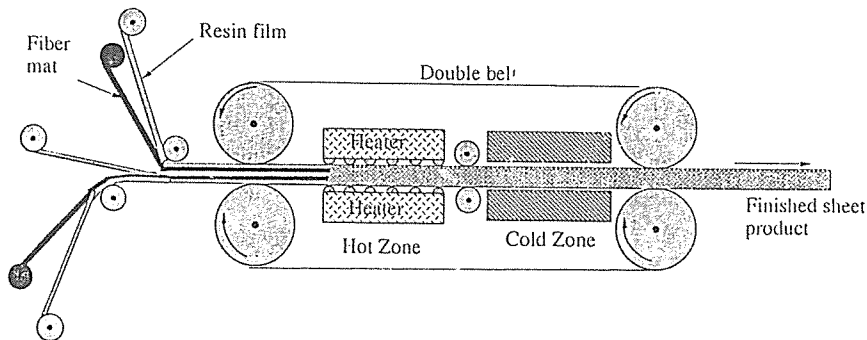


Fig.1. Schematic of the double belt lamination process.

압력은 매트 두께를 결정하며, 매트의 두께는 압력의 함수이다. 따라서, 반복기법에 의하여 벨트의 형상 및 매트가 받는 압력이 결정되어야 한다. 이때 벨트는 얇기 때문에 휨(Bending)에 의한 힘이 인장력(Tension)에 의한 힘보다 매우 작으므로 휨에 의한 효과는 무시할 수 있다. Fig.2는 벨트의 변형에 대한 개략도이다.

2-1. 수치 해석

상기한 문제에 대한 지배방정식은 다음과 같다.

$$F_T \frac{d^2 y}{dx^2} = p \quad \dots\dots\dots (1)$$

여기서 F_T 는 벨트의 장력이고, y 는 벨트의 수직방향 변위, 그리고 p 는 압력을 나타낸다. 압력 p 는 섬유 부피분율 v_f 의 함수가 되며, 다음의 식으로 표시할 수 있다[1~2].

$$p = A_s \frac{\sqrt{\frac{v_f}{v_0} - 1}}{\left(\sqrt{\frac{v_a}{v_f} - 1}\right)} \quad \dots\dots\dots (2)$$

여기서 A_s , v_0 , v_a 는 재료의 고유한 성질을 나타내며, 실험에 의하여 결정된다.

여기서 압력은 매트의 섬유 부피분율의 함수이므로, 철판 사이의 간격 즉 y 의 값에 의해 결정된다. 또한 y 의 값으로 매트의 두께를 계산하기 위해서는 그곳에서의 잔여 수지의 두께를 감안해야 하므로 함침율이 동시에 계산되어야 한다. 경계조건 또한 로울러에 의한 철판의 제한조건이 있어 로울러와 철판이 분리되는 위치를 알아야 하므로 경계조건도 반복기법에 의해 구해야 한다. 따라서 윗식들을 풀기 위해서는 반복기법을 적용하여야 하며, 본 연구에서는 유한차분법에 의하여 식(1)을 차분화한 후 반복기법에 의하여 해를 구하였다.

2-3. 함침도 계산

상기한 방법에 의해 압력분포가 구해지면, 다음과 같은 Darcy's Law를 이용하여 함침도를 계산할 수 있다[3].

$$v = - \frac{K}{\eta} \frac{dp}{dy} \quad \dots\dots\dots (3)$$

벨트 사이의 공간을 길이 방향으로 여러개의 미소 구간으로 나누어서 각 구간 내에서는 압력이 평균 압력으로 일정하다고 가정하면, i 번째의 미소 구간에 대하여 함침된 부분의 두께는 압력, 점도, 투과성 및 시간에 대하여 다음과 같이 쓸 수 있다 [3].

$$\frac{dy_f}{dt} = \frac{K_i}{\eta} \frac{(p_i - p_a)}{y_f} \quad \dots\dots\dots (4)$$

여기서 y_f 는 매트내의 함침된 부분의 y 좌표이며, K_i 는 구간 i 에서의 투과성(Permeability)를, p_i 는 구간 i 에서의 압력을 나타낸다.

식(4)를 미소 구간 i 에 대하여 적분하면

$$\frac{y_{f(i+1)}^2 - y_{f(i)}^2}{2} \frac{K_i}{\eta} (p_i - p_a) \Delta t \quad \dots\dots\dots (5)$$

이 되어, 구간 $i+1$ 에서의 함침된 부분의 좌표는 다음의 식으로 쓸 수 있다.

$$y_{f(i+1)} = \sqrt{\frac{2K_i}{\eta} (p_i - p_a) \Delta t + y_{f(i)}^2} \quad \dots\dots\dots (6)$$

또한 Δt 는 길이가 Δx 인 i 번째 미소 구간에서 복합재료가 머무는 시간이므로 $\Delta t = \Delta x / V$ 로 쓸 수 있다. 그러면 구간 i 에서의 함침도는 전체 두께에 대한 함침된 부분의 두께로 정의할 수 있으며, 다음과 같이 계산할 수 있다.

$$D_{imp(i)} = \frac{y_{f(i+1)}}{\text{total thickness}} \quad \dots\dots\dots (7)$$

2-4. 물성치

2-4-1. 폴리프로필렌 수지

폴리프로필렌 수지는 비뉴우튼 유체이므로 점도는 전단율과 온도의 함수이다. 그러나 함침이 일어날 때는 전단율이 아주 작으므로 점도는 온도만의 함수라고 가정하였다. 따라서 점도는 온도의 함수로 아래와 같은 식에 의하여 표시하였으며, 필요한 계수의 값들은 점도계(Rheometrics RMS800)를 이용하여 측정, 데이터를 Curve Fitting함으로서 구하였다[3].

$$\eta(T) = B \exp\left(\frac{T_b}{T}\right) \quad \dots\dots\dots (8)$$

여기서

$$\begin{aligned} B &= 18.895 \text{ (Pa} \cdot \text{sec)} \\ T_b &= 3,701 \text{ (}^\circ\text{CK)} \end{aligned} \quad \dots\dots\dots (9)$$

2-4-2. 유리 섬유 매트

매트의 두께는 압력의 함수이다. 매트의 투과성 (Permeability)은 매트의 섬유부피 분율의 함수이므로 매트의 투과성도 압력의 함수라 할 수 있다. 따라서 실험에 사용된 유리섬유매트(Needling을 거친 한국화이버 CM600A)의 섬유부피분율 및 투과성을 실험에 의해 측정하여 압력의 함수로 Fig. 3과 Fig. 4에서 보는 바와같이 Curve Fitting하여 사용하였다[1~2]. 섬유부피분율과 압력의 함수관

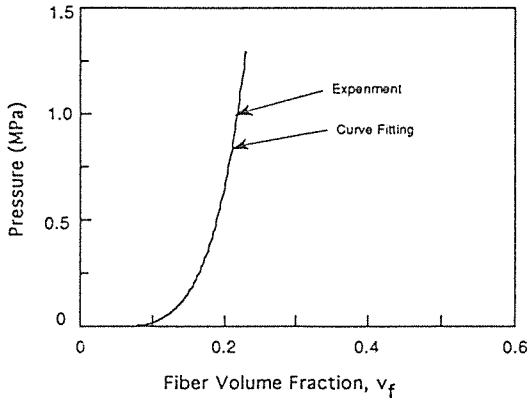


Fig. 3. The relationship between the fiber volume fraction and the pressure. Comparison between the experimental data and the model.

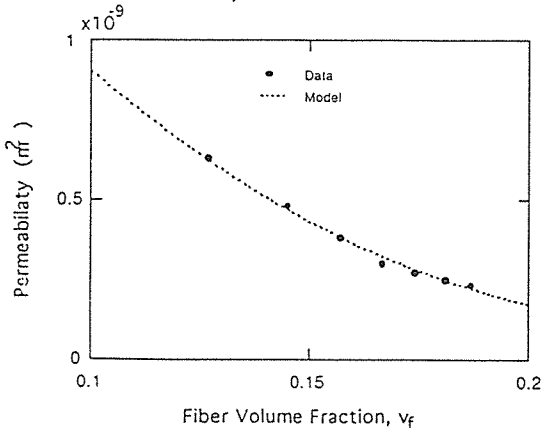


Fig. 4. Permeability as a function of the fiber volume fraction. Comparison between the data and the model.

계로는 식(2)를 사용하였으며, 투과성과 섬유부피 분율과의 함수관계로는 실험값의 관계를 잘 기술할 것으로 보이는 다음의 식을 사용하였다.

$$K = \alpha(\beta - v_f)^4 \quad \dots\dots\dots (10)$$

여기서 α 와 β 는 Curve Fitting에 의하여 얻을 수 있는 계수들이다. 실험으로 구한, 식(2)와 (10)에 필요한 계수의 값들은 다음과 같다.

$$\begin{aligned} A_s &= 2,475,600 \text{ (Pa} \cdot \text{sec)} \\ v_0 &= 0.075 \\ v_a &= 1.0 \\ \alpha &= 1.198 \times 10^{-7} \text{ (m}^2\text{)} \\ \beta &= 0.395 \end{aligned} \quad \dots\dots\dots (11)$$

2-5. 수치 해석 결과

전술한 바와 같이 수치 해석을 수행할 때 식 자체가 비선형이고, 경계 조건 또한 계산 중에 결정되는 것이므로 반복계산을 행해야 한다.

수치 계산을 수행한 결과, 얻어진 벨트 속도 및 벨트의 장력에 대한 다이 내부에서의 압력의 분포를 각각 Fig. 5 및 Fig. 6에 도시하였다. 각 롤러의 전후에서 급격한 압력의 변화가 있음을 관찰할 수 있다. Fig. 7에는 이렇게 계산된 압력 분포에 따른 출구에서의 함침도를 각각 다른 공정온도에 대하여

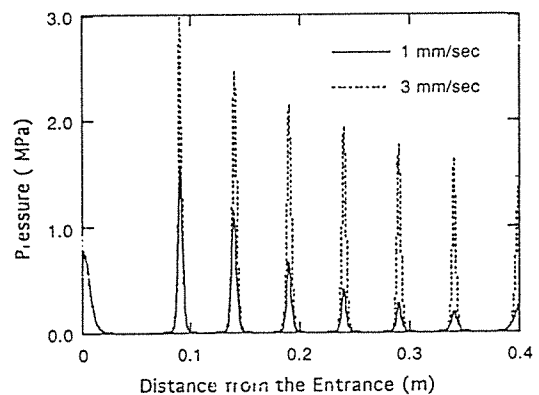


Fig. 5. Variation of pressure as a function of the distance from the entrance for two different belt speeds. Belt tension is 200N/m and the distance from the entrance is measured along the x-axis from the center of the drive roller. Result by the model.

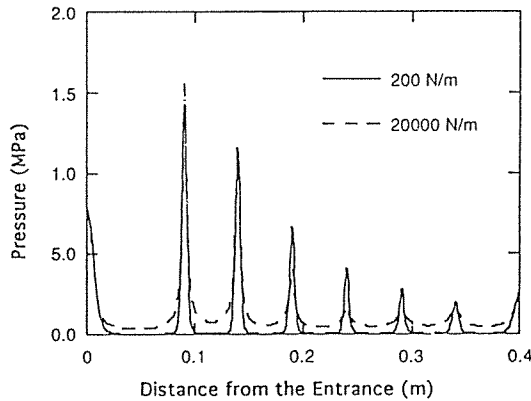


Fig. 6. Variation of pressure as a function of the distance from the entrance for different belt tensions. Pulling speed is 1mm/sec and the distance from the entrance is measured along the x-axis from the center of the drive roller. Result by the model.

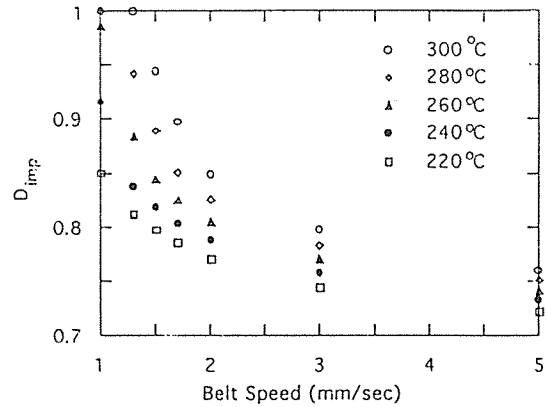


Fig. 7. Degree of impregnation at the end of the impregnating section for different belt speeds and different temperatures. Result by the model.

3. 실험

벨트 속도에 대한 함수로 도시하였다. 그림에서와 같이, 벨트 속도가 빠를수록 벨트 내부의 압력은 증가하였으나, 매트가 벨트 내부에 있는 시간이 감소하므로 오히려 함침도가 떨어짐을 알 수 있다. 또한 가열부 온도가 낮을수록 수지의 점도가 증가하므로 같은 벨트 속도에서 압력은 증가하나, 점도 증가로 인한 매트로의 함침이 어려워져 오히려 함침도가 떨어짐을 알 수 있다. 따라서 함침도를 높이기 위해서는 수지가 열분해 되지 않는 범위내에서 가열부의 온도 증가와 벨트 속도의 감소 및 벨트 길이의 증가가 필요하다.

모델의 정당성을 입증하기 위하여 실험을 행하였다. 실험을 위하여 행하였다. 실험을 위하여 Double Belt Press를 실험실 규모로 제작하여 사용하였다.

3-1. 실험 장치

실험 장치인 Double Belt Press의 개략도는 Fig. 8에 표시되어 있다. 실험 장치는 크게 두 부분으로 나누어지는데, 첫번째는 함침을 위한 가열부이다. 이 곳에서 수지가 가열에 의해 용융되며 동시에 압력을 받아 매트 속으로 함침이 된다. 두번째는

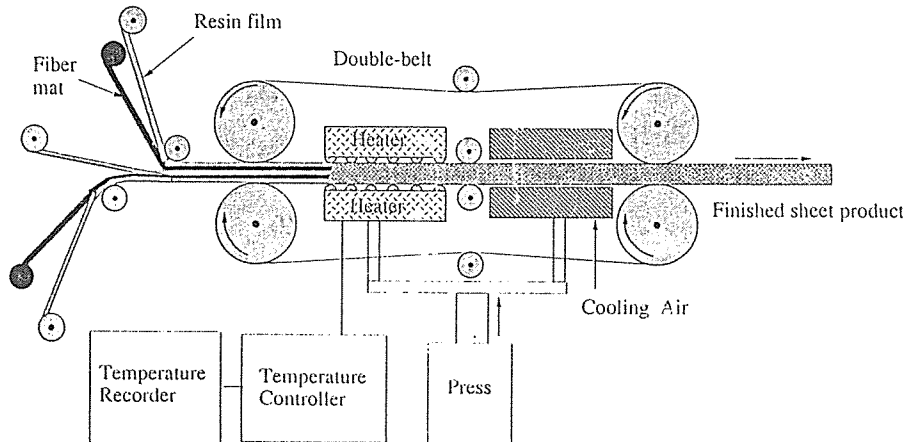


Fig. 8. Schematic of the experimental setup used in this study.

냉각부인데 함침이 이루어진 재료가 벨트 내부에서 냉각이 이루어짐으로서 굳게 된다.

Double Belt Press는 Fig.8에서와 같이 구동로울러 4개, 냉각부와 가열부를 분리하는 중간로울러 2개, 벨트의 장력을 조절해주는 로울러 2개, 가열부와 냉각부로 구성되어 있다. 전체 길이가 1m, 구동로울러는 지름이 15cm, 가열부 30cm로 제작하였다. 가열부는 6개의 로울러를 부착하여 재료가 이곳을 통과할 때 마다 압력이 가해져 함침이 이루어지도록 하였고, 냉각부에서는 압축 공기를 분사하여 냉각하였다. Double Belt는 내열성과 내부식성을 갖춘 0.5mm 두께의 스테인레스 철판을 사용하였다. 또한 제품의 두께를 변화시킬 수 있게 하기 위하여 상하로울러의 간격을 조절할 수 있도록 제작하였다.

3-2. 실험 방법

실험에서 제품의 두께는 4mm로 하고 유리섬유 매트 3장에 두께 0.5mm의 폴리프로필렌 수지 6장을 겹쳐서 실험하였다. 실험은 3가지의 벨트 속도(0.4, 1.25, 1.8mm/sec)의 3가지의 다른 온도(220°C, 260°C, 300°C)에 대하여 수행하였다.

실험한 결과를 관찰하기 위하여 하나의 시편 당 4개의 단면을 잘라 색소를 넣은 수지를 진공 펌프를 이용하여 시편의 가공에 주입하여 숙성시킨 후 Thin Section을 만들었다. 완성된 Thin Section을 현미경으로 관찰하고 광학현미경을 이용, 사진을 찍었다. 함침이 되지 않는 부분은 사진에서 색소에 의해 판단되므로 이를 이용하면 함침도를 보다 정확하게 구할 수 있다. 이렇게 얻은 결과를 Fig.9~11에서 보는 바와 같이 수치해석의 결과와 비교하였다. 그림에서와 같이 비교적 잘 일치되는 결과를 얻을 수 있었다.

4. 결 론

열간성형용 장섬유강화 열가소성수지 복합재료 판을 연속적으로 제조하는 공정을 설계, 제작하여 제품을 제조하였다. 열간성형용 장섬유강화 열가

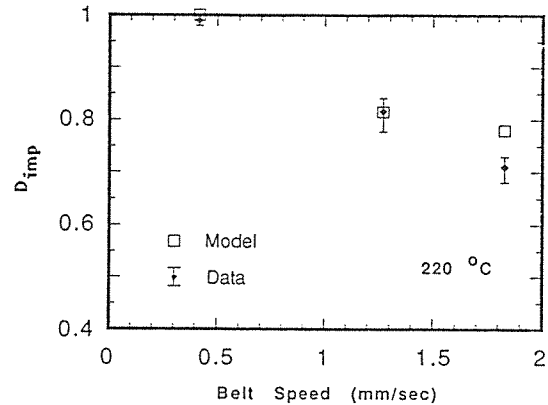


Fig.9. Degree of impregnation as a function of belt speed at 220°C. Comparison between the experimental data and the result by the model.

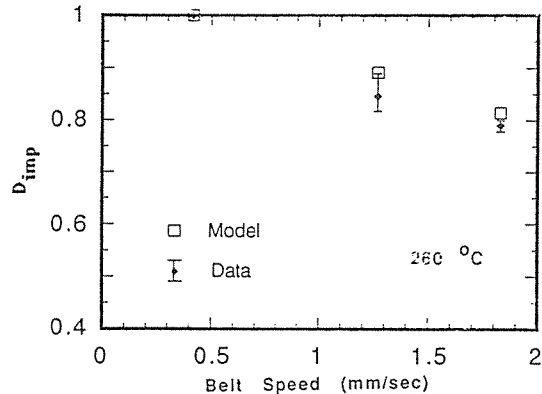


Fig.10. Degree of impregnation as a function of belt speed at 260°C. Comparison between the experimental data and the result by the model.

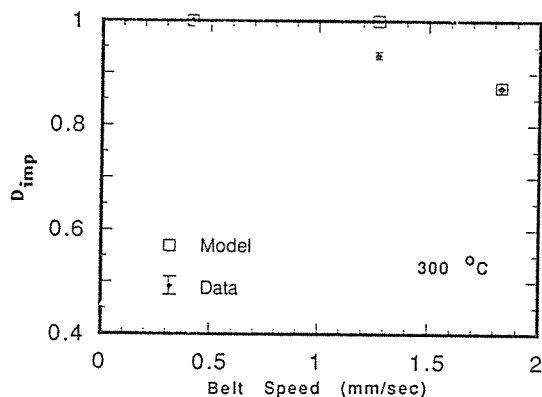


Fig.11. Degree of impregnation as a function of belt speed at 300°C. Comparison between the experimental data and the result by the model.

소성수지 복합재료판을 연속적으로 제조하는 공정

에서, 수지가 유리섬유매트에 함침되는 과정을 수학적으로 모델링하여 수치해석하였다. 또한 모재로 사용한 폴리프로필렌수지와 유리섬유 매트의 물성의 측정 및 모델링도 병행하였으며 실험을 동시에 수행하여 모델의 타당성을 검증하였다. 수치 해석과 실험을 수행한 결과 함침도를 높이는 주요 인자는 수지가 열분해 되지 않는 범위내에서의 가열부 온도 증가, 벨트 속도의 감소, 벨트 길이의 증가이다. 이들 결과를 바탕으로 생산성 향상 및 주위 조건에 맞는 최적의 다이를 설계할 수 있는 기초를 마련하였다.

후 기

본 연구는 92년도 교육부 첨단공학(신소재 분야) 학술연구비 지원으로 수행되었으며 관계자 여러분께 감사드립니다.

참 고 문 헌

1. Gutowsky, T.G., Cai, Z., Bauer, S., Boucher, D., Kingery, J. and Wineman, S., "Consolidation Experiments for Laminate Composites," Journal of Composite Materials, Vol.21, pp.650-669, 1987.
2. Gutowsky, T.G., Morigaki, T. and Cai, Z., "The Consolidation of Laminate Composites," Journal of Composite Materials, Vol.21, pp.172-188, 1987.
3. J.W. Seo and W.I. Lee, "A Model of Resin Impregnation in Thermoplastic Composites," Journal of Composite Materials, Vol.25, pp.1127-1137, 1991.