

## 수지이동 성형공정에서 섬유직조내의 수지유동에 관한 연구

이동하\* · 김성우\*\* · 이기준

서울대학교 화학공학과  
(1993년 5월 27일 접수)

### A Study on the Resin Flow through Fibrous Preform in Resin Transfer Molding Process

Dong Ha Lee\*, Seong Woo Kim\*\* and Ki Jun Lee

Department of Chemical Engineering, Seoul National University, Seoul 151-742, Korea  
(Received May 27, 1993)

#### 요 약

수지이동 성형공정에서 수지가 섬유직조망에 함침될 때의 투과계수와 수지의 표면장력으로 인하여 유동진전 면에서 발생하는 모세관압을 실험적으로 측정하였다. 두 종류의 섬유직조망에 대해서 기공율이 증가함에 따라 투과계수는 증가한다. 수지, 섬유 그리고 공기가 서로 다른 세개의 상을 구성함으로써 수지의 표면장력의 영향을 받는 비정상상태의 투과계수가 수지가 섬유직조망에 포화된 정상상태에서 측정된 투과계수보다 본 실험에서 수행된 모든 기공율 범위에서 크다는 것을 보여주었다. 수지 유동진전면에서 발생하는 모세관압은 기공율이 감소함에 따라 증가하였고, 섬유직조망의 기공율이 0.469인 경우에는 금형입구에서의 수지주입압력의 25%에 해당되는 모세관압이 발생하는 것으로 나타났다. 따라서, 낮은 압력으로 가공이 이루어지는 RTM 공정에서의 수지유동현상을 정확히 해석하기 위해서는 반드시 모세관압을 가공조건으로 고려해야 한다는 것을 제시할 수 있었다. 또한, 본 연구에서 사용된 임의배향 섬유 직조망에 대해 실리콘 오일과 유리섬유 계면의 동적접촉각 측정을 통하여 섬유배향 및 기공의 분포를 나타내는 형상인자의 값을 구함으로써 실제 RTM 공정에서 발생하는 모세관압을 예측할 수 있는 기초자료를 제시하였다.

**Abstract**—This experiment determined the permeability of the woven fabric preforms impregnated by resin during Resin Transfer Molding (RTM) process and capillary pressure generated at the advancing flow front due to the resin surface tension. The unsteady state isotropic/anisotropic permeabilities were measured as a function of porosity. It was found that the permeability of unsteady state was larger than that of the steady state, which depended highly on porosity and structural characteristics of fibrous preforms. The capillary pressure corresponding 25% of the resin injection pressure at the gate was induced when the porosity was 0.469. Accordingly, capillary pressure should be considered as a process condition in order to analyze the resin flow phenomena during the RTM process. In addition, the form factor describing fiber orientation and pore distribution for the random glass fiber mat was obtained by measuring the dynamic contact angle between glass fiber and silicon oil. Consequently, the form factor determined in this study will serve data to predict capillary pressure induced during the RTM process.

**Keywords:** Resin Transfer Molding, Impregnation Process, Permeability, Capillary Pressure, Form Factor

\*Ssang Yong Oil Refining Co., Ltd., R&D Center

\*\*Samsung Chemical Technology Center, Taejon 2-6, Korea

## 1. 서 론

섬유직조 강화 고분자 복합재료는 고분자 재료의 기계적 물성을 향상시키기 위해 고분자 수지상에 섬유직조를 강화한 것으로써 소재내의 섬유의 부피 분율을 증가시켜 소재의 열적, 기계적 물성을 향상시킬 수 있으므로 최근들어서 항공산업 등에서 그 사용이 크게 증가하고 있다. 섬유직조 강화 열경화성 복합재료 제조공정에는 열경화성 수지로 부분 함침된 프리프레그를 적층하여 열과 압력으로써 경화시키는 오토클레이브 공정과 건조직조를 금형내에 적층한 후 수지를 주입하여 함침시킨 후 경화단계를 거치는 RTM 공정 등이 있다. RTM 공정은 기존의 고분자 복합재료 제조공정에 비해 생산성이 비교적 좋고 여러 복잡한 형태의 제품생산도 가능할 뿐만 아니라 성형 중간제품인 프리프레그의 보관에 관한 문제가 없고, 저압 공정으로서 운전비가 적게드는 잇점들을 지니고 있어 최근에 더욱 각광을 받고 있다. RTM 공정에 의해 생산된 최종제품의 물성은 섬유의 부피분율, 섬유직조의 배향 등에 의해서 영향을 받으며, 또한 제조공정 중의 수지와 섬유직조간의 함침에 의해서도 결정되는 것으로 알려져 있다.

함침공정은 수지의 유변학적 물성과 섬유직조내의 기공구조와 관계된 투과계수 그리고 섬유직조와 수지 사이의 표면특성에 의해서 크게 영향을 받는다. 특히, 섬유직조의 투과성과 수지의 표면장력이 함침공정에 가장 큰 영향을 미치는 변수로 고려될 수 있으나 이와 관련된 연구는 거의 미진한 편이다.

복합재료 제조공정에서 수지가 섬유다발 속으로 함침되면서 충전될 때의 수지유동에 관한 연구는 거시적인 측면에서 토양이론에 근거를 둔 Darcy의 법칙을 적용함으로써 주로 이루어져 왔다. 그동안 많은 연구가들은 열경화성 수지로 함침된 프리프레그내를 수지가 흐르는 정상상태에서의 투과계수를 측정하여 실제 오토클레이브 공정에 적용하는데 초점을 맞추어 왔다. 그러나 RTM 공정에서 수지가 공기와 자유표면을 형성하면서 건조된 섬유직조에 함침될 때의 비정상상태 투과계수를 구하기 위한 실험적 방법이 요구되었다. Adams 등[1, 2]은 비등방성 섬유직조의 타원형 유동에 대해서 이방향성의 비정상상태 투과계수를 실험적으로 동시에 측정할

수 있는 방법을 제시하였고, 실제로 이를 여러가지 종류의 섬유직조에 적용시켜 투과계수에 영향을 미치는 섬유직조의 구조에 관해 연구하였다. Williams [3]는 비정상상태의 투과계수가 정상상태의 투과계수보다 크며 이는 수지의 표면장력이 자유경계면에서 작용하기 때문이라고 설명하였다. Y.R. Kim 등 [4]은 실험적인 연구를 통하여 한층의 섬유직조의 투과계수와 압축비에 관한 결과로부터 다층으로 구성된 섬유직조의 투과계수를 측정할 수 있는 실험적인 모델식을 제시하였다. 또한 그들은 투과계수에 영향을 미치는 인자로서 섬유직조의 구조, 기공율, 수지의 유량, 그리고 수지의 포화도 등에 대해서 연구하였다.

표면장력은 복합재료 공정에서 상당히 중요한 역할을 차지하는 것으로 알려져 있는데, 이는 복합재료내의 기공의 형성과 이동이 수지의 표면장력과 직접적으로 관련이 있기 때문이다. 또한, 표면장력은 수지유동진전면에 모세관압을 유발하여 함침과 가공성을 향상시킬 수도 있다. K.J. Ahn 등[5]은 섬유직조의 비정상상태 투과계수와 모세관압을 동시에 측정하였고, 그 결과로서 기공율이 낮은 경우에 저압공정에서의 수지주입 압력에 비해 무시할 수 없는 모세관압을 얻었다. 또한 예측시 수지와 탄소섬유의 접촉각 자료로부터 평면방향의 수지유동에 대한 탄소평직 섬유직조의 기공 형상배열 인자를 구하였다.

본 연구에서는 유리섬유로 된 능직섬유직조와 임의배향직조 사이로 실리콘 오일이 흐를 때 비정상상태의 투과계수를 측정함으로써 함침공정에서의 섬유직조의 특성을 규명하고자 하였다. 임의배향 섬유직조의 경우 기공율에 따른 모세관압을 결정하였고 유리섬유와 실리콘 오일간의 동적접촉각 측정을 통하여 임의배향직조의 기공에 따른 형상배열인자를 구하였다.

## 2. 이 론

### 2.1. 등방성직조의 투과계수와 모세관압

섬유직조를 흐르는 수지의 유동은 거시적으로 뉴턴성 유체가 다공성 매질내를 흐를 때 압력구배와 유속의 선형관계를 나타내는 Darcy의 법칙으로 표현될 수 있다. 길이  $L$ , 폭  $W$ , 높이  $h$ 로 이루어진

섬유직조내를 흐르는 수지의 유동은 Darcy의 법칙으로부터 다음과 같이 표현된다.

$$\underline{V} = -\frac{K}{\eta} \cdot \nabla P \quad (1)$$

여기서  $\underline{K}$ 는 투과계수를 나타내는 텐서이며,  $\eta$ 는 수지의 점도,  $\nabla P$ 는 압력구배,  $\underline{V}$ 는 superficial velocity이다. 섬유직조내의 압력구배가 선형이라고 가정하고, 전체압력은 금형입구에서의 압력과 섬유직조에 수지가 함침되면서 유동진전면에서 수지의 표면장력에 의해서 발생하는 모세관압의 합으로 간주하면 1차원 비정상상태 유동은 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$\frac{dX_f}{dt} = \frac{K_d}{\eta\phi} \frac{(\Delta P_c + \Delta P_m)}{X_f} \quad (2)$$

여기서  $K_d$ 는 비정상상태 투과계수이며,  $X_f$ 는 침투길이,  $t$ 는 시간,  $\Delta P_m$ 은 금형입구에서의 압력,  $\Delta P_c$ 는 모세관압이다.  $\phi$ 는 금형내에서 섬유직조의 기공의 부피가 차지하는 비율로서 아래의 식으로 표시된다.

$$\phi = 1 - \frac{h\xi}{n\rho_f} \quad (3)$$

여기서  $n$ 은 섬유직조의 갯수,  $h$ 는 금형의 두께,  $\xi$ 는 표면밀도,  $\rho_f$ 는 섬유의 밀도이다. 식 (2)를 적분하면 다음과 같은 식을 얻을 수 있다.

$$X_f^2 = \frac{2K_d t \rho_f}{\phi \eta} (\Delta P_m + \Delta P_c) \quad (4)$$

윗 식에서 수지의 점도와 섬유직조의 기공율이 정해지면 금형입구에서의 압력을 변화시키면서 침투길이를 일정한 시간간격마다 측정함으로써 비정상상태의 투과계수와 모세관압을 동시에 측정할 수 있다. 또한 금형내의 섬유직조가 완전히 함침된 후에는 섬유-공기-수지로 이루어진 계면이 더이상 존재하지 않으며 Darcy의 식은 아래와 같이 표시된다.

$$Q = \frac{K_w A \Delta P_m}{\eta L} \quad (5)$$

여기서  $Q$ 는 섬유직조 사이를 흐르는 수지의 유량,  $A$ 는 단면적을 나타내며  $K_w$ 는 정상상태에서의 투과계수를 나타낸다.

일반적으로 모세관압은 하나의 원통형 기공에 대해서 다음과 같은 Young-Laplace식으로 표시된다.

$$\Delta P_c = \frac{4\sigma \cos\theta}{D_e} \quad (6)$$

여기서  $\sigma$ 는 수지의 표면장력,  $\theta$ 는 수지와 섬유간의 접촉각,  $D_e$ 는 모세관 기공의 대응지름이다. 이론적으로, 모세관 기공의 대응지름은 기공과 섬유의 지름에 의해 표현될 수 있으며, 이를 식 (6)에 적용하면 다음과 같은 식을 얻을 수 있다.

$$\Delta P_c = \frac{F}{D_f} \frac{1-\phi}{\phi} \sigma \cos\theta \quad (7)$$

여기서  $F$ 는 섬유직조내에서 모세관 형상의 기공의 배열을 나타내는 형상인자로서 일방향성 섬유직조의 경우, 섬유직조내의 모세관의 방향과 수지의 유동 방향이 같은 경우에는 4, 수직인 경우에는 2의 값을 갖는다. 실제, 섬유직조의 경우에는 직조내의 모세관의 형상 배열이 매우 복잡하므로 식 (7)에서 보듯이 기공율과 모세관압의 선형관계에서부터 배열형상인자를 결정하게 되며 이를 위해서는 섬유와 수지간의 동적 접촉각과 수지의 표면장력을 측정하여야 한다.

## 2.2. 비등방성 섬유직조의 투과계수

비등방성 섬유직조의 투과계수는 일정한 두께를 갖는 금형의 중심에 위치한 입구로부터 수지가 타원형으로 섬유직조에 함침될 때 장축과 단축의 길이를 시간에 따라 측정함으로써 구할 수 있다. 2차원 평면유동에 대하여 식 (1)은 아래와 같이 변환된다.

$$\frac{\partial^2 P}{\partial x_1^2} + \alpha \frac{\partial^2 P}{\partial x_2^2} = 0 \quad (8)$$

$$P = P_0 \quad \text{at } x_1^2 + x_2^2 = 0$$

$$P = P_f \quad \text{at } R(x_1, x_2, t)$$

여기서  $\alpha$ 는 1, 2 방향의 주방향 투과계수들의 비를 나타내는 비등방성도이며,  $P_0$ 는 금형입구에서의 압력,  $P_f$ 는 수지유동 진전면에서의 압력이다. 식 (8)을 타원좌표계로 좌표 변환하여 해석해를 구하면 다음과 같다.

$$F(\xi, \eta) = (\xi - \xi_0) \left[ \frac{\sinh(2\xi)}{4} + \frac{\xi}{2} \right]$$

$$-\frac{\cos^2\eta(\xi_j - \xi_0)^2}{2} + \frac{\cosh(2\xi_0) - \cosh(2\xi_j)}{8} + \frac{\xi_0^2 - \xi_j^2}{4} = \left[ \frac{\alpha}{1-\alpha} \right] \Phi \quad (9)$$

$$\xi_0 = \ln \left[ \frac{1 + \alpha^{0.5}}{(1 - \alpha)^{0.5}} \right]$$

$$\xi_{j1} = \sinh^{-1} \left[ \frac{R_{j1}}{R_0} (1/\alpha - 1)^{-1/2} \right]$$

$$\xi_{j2} = \cosh^{-1} \left[ \frac{R_{j2}}{R_0} (1 - \alpha)^{-1/2} \right] \quad (10)$$

식 (9)에서  $\Phi$ 는 무한차원 시간으로서  $K\Delta Pt/\phi\eta R_0^2$ 로 주어지며  $R_0$ 는 금형입구의 반지름이다. 비등방성 투과계수를 구하는 방법은 먼저  $\alpha (= K_2/K_1)$ 를 가정하고 시간에 따라 측정된  $R_{j1}(t)$ ,  $R_{j2}(t)$ 로 식 (10)에 대입하여  $\xi_{j1}$ ,  $\xi_{j2}$ 를 구한다. 식 (9)에 의해 계산된  $F(\xi, \eta)$ 와 무차원시간의 관계를 선형적인 식으로 표현했을 때 그 제곱편차가 최소가 되는  $\alpha$ 값을 반복계산을 통하여 결정함으로써 비등방성 투과계수를 구하게 된다.

### 3. 실험

투과계수와 모세관압을 측정하기 위한 실험장치는 Fig. 1과 같다. 질소가스의 압력에 의해서 실리콘 오일이 섬유직조가 채워져 있는 금형내부로 주입될 때의 유동현상을 카메라로 촬영하여 관찰하였다.

서로 다른 점도를 가지는 두 종류의 실리콘 오일을 함침유체로서 사용하였으며 섬유직조로는 유리섬유로 만들어진 임의 배향직조와 1/4능직을 사용하였다. 실험물질들에 대한 물성들은 Table 1과 2에 주어져 있다. 섬유직조의 표면밀도는 실험적으로 여러번 측정하여 얻은 평균값이고, 밀도는 문헌치를

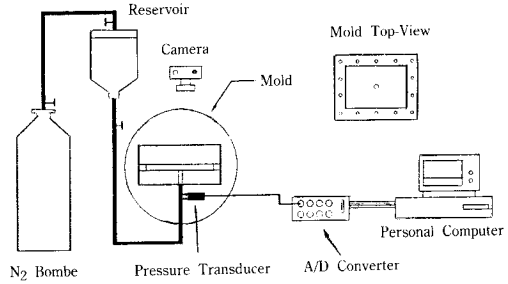


Fig. 1. Schematic diagram of experimental set-up.

사용하였다. 실리콘 오일의 전단속도에 따른 점도의 변화는 Rheometrics Mechanical Spectrometer (RMS)로 측정하였으며, 넓은 범위의 전단속도에서 뉴턴성 유체의 특성을 갖는 것을 확인할 수 있었다. 유리섬유 한 가닥의 둘레길이는 Scanning Electronmicrograph(SEM)을 이용하여 측정하였다. 금형입구에서의 압력은 압력센서(Valcom VPRF)에 의해 시간에 따라서 측정되어 아날로그/디지털 변환기를 통해 컴퓨터에 저장된다. 금형의 윗 단은 유동형태를 명확하게 관찰하기 위해 투명한 아크릴로 제작되었으며, 함침공정 중 외부로부터 가해진 압력에 의해서 변형되는 것을 막기 위해 2.0 cm의 두께로 제작되었다. 아래판도 같은 이유로 두꺼운 알루미늄 판으로 제작되었다. 두 평행판 사이의 두께는 여러가지 종류의 두께를 가지는 강철판으로 이용하여 유지하였다. 금형내부도 수지가 충전될 때 새는 것을 막고 섬유직조를 고정시키기 위해서 접착성 및 변형성이

Table 2. Material properties of silicone oil

	viscosity (Pa·sec)	surface tension (dyne/cm)	density (g/cm <sup>3</sup> )
silicone	0.860	21.20	0.970
oil <sup>(1)</sup>	2.598	21.22	0.970

<sup>(1)</sup>Shin-Etsu KF96

Table 1. Material properties of preforms

	material	type	weave balance	surface density (10 <sup>-2</sup> g/cm <sup>2</sup> )	fiber diameter (μm)
random mat <sup>(1)</sup>	glass	random	—	4.48	14.8
bidirectional fabric	glass	twill(1/4)	unbalanced	1.06	10.0

<sup>(1)</sup>Han-Kook fiber No. 450

좋은 Sealant tape을 사용하였다. 고체인 유리와 액체인 실리콘 오일간의 동적 접촉각은 Cahn Dynamic Contact Angle Analyzer(Gibertini Elettronica s.r.l. DCA-322)를 사용하여 측정하였다. 섬유 한가닥을 집착재로 후크에 고정시킨 후에 실리콘 오일이 담긴 비이커에 잠기게 하여 이때 후크에 걸리는 힘의 변화로부터 동적 접촉각을 측정하였다.

### 4. 결과 및 검토

#### 4.1. 투과계수

임의배향 섬유직조를 'beam' 형태로 절단하여 두 평행판 사이에 채운 후 수지에 압력을 가하여 섬유직조의 길이 방향으로 수지가 퍼져 나갈 때 정해진 시간간격마다 사진촬영을 통하여 수지의 침투길이를 측정하였다. Fig. 2는 섬유직조의 기공율이 0.539인 경우 여러 주입압력에 대해서 수지의 침투길이의 제곱을 시간에 따라서 나타낸 것이다. 식 (4)에서 정의된 것처럼 선형관계를 보여주고 있으며 Darcy의 법칙이 거시적인 측면에서 수지의 함침공정을 잘 묘사해주고 있음을 알 수 있다.

Fig. 3은 섬유직조가 완전히 함침되고 난 후 정상상태에 도달하였을 때 섬유직조의 여러 기공율에 대해서 주입압력과 유량의 관계를 나타낸 것이다. 이러한 선형 관계식의 기울기로부터 식 (5)를 이용

하여 정상상태의 투과계수를 결정할 수 있다. 수지 침투 길이에 대한 주입압력의 영향을 Fig. 4에 나타냈다. 식 (4)에서 표현된 것처럼 Fig. 4의 기울기와 절편으로부터 비정상상태의 투과계수와 유동진전면에서 수지의 표면장력에 의하여 발생하는 모세관압을 구할 수 있다.

Fig. 5는 임의배향 섬유직조에 대해서 기공율에 따른 정상상태의 투과계수와 비정상상태의 투과계수를 비교하여 나타낸 것이다. 기공율이 증가함에 따라서 두 상태의 투과계수는 낮은 기공율 영역에

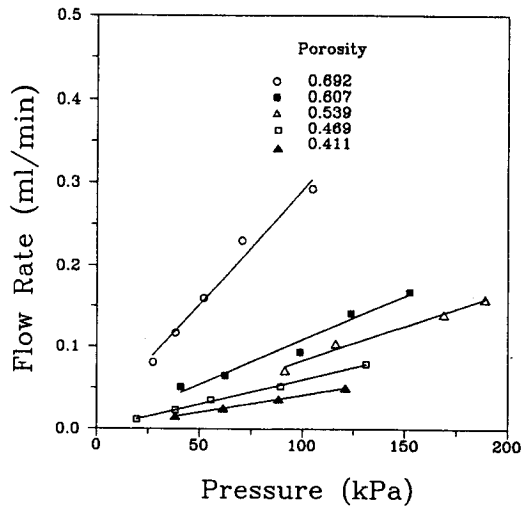


Fig. 3. Flow rate as a function of pressure.

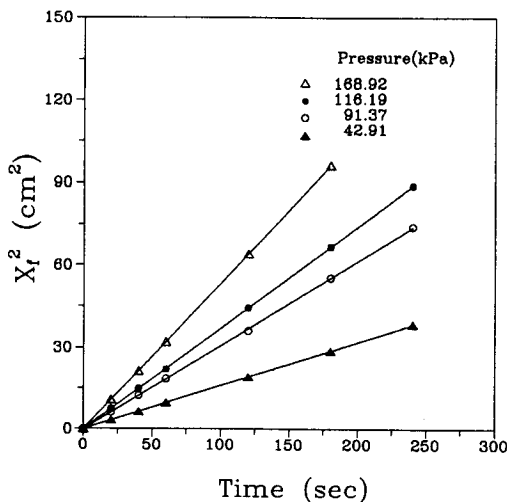


Fig. 2. Square of resin penetration length as a function of time at different pressure (porosity=0.539).

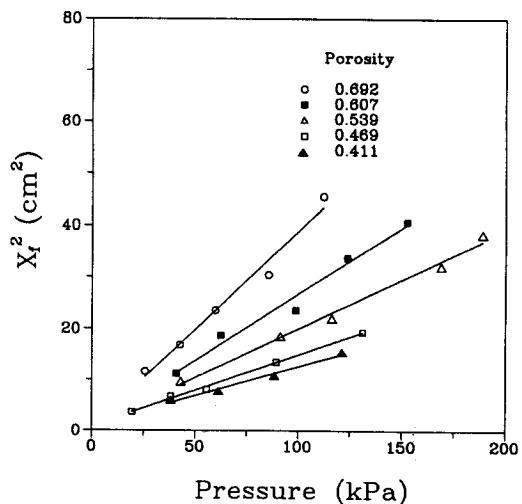


Fig. 4. Square of resin penetration length as a function of applied mechanical pressure ( $t_p=60$  sec).

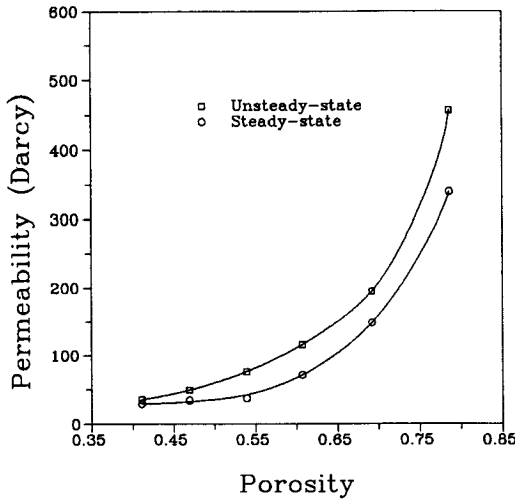


Fig. 5. Permeability as a function of porosity for random mat.

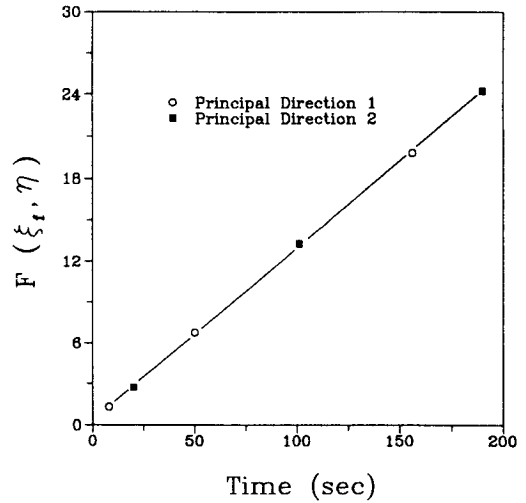


Fig. 7. Anisotropic data plot (viscosity=2.598 Pas, porosity=0.501, pressure=81.06 kPa).

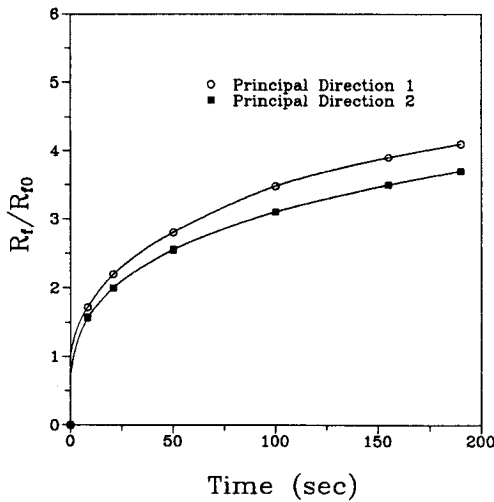


Fig. 6. The radial flow front advancement of bidirectional fabric (viscosity=2.598 Pas, porosity=0.501, pressure=81.06 kPa).

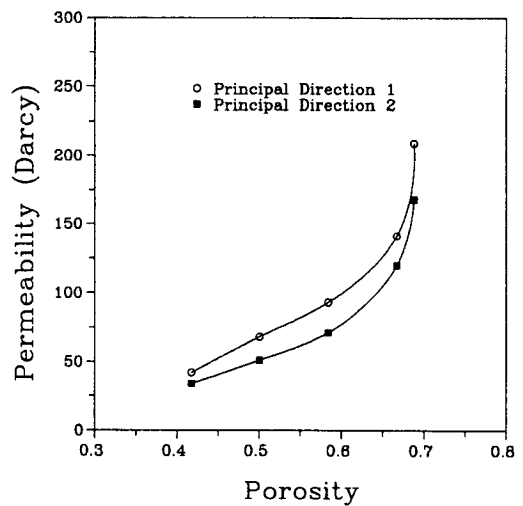


Fig. 8. Permeability as a function of porosity for bidirectional fabric.

서는 완만하게 증가하다가 0.6 이상의 기공율 범위에서는 섬유직조 사이의 계면의 영향으로 인하여 급격하게 증가함을 보여준다. 즉, 기공율이 작은 경우에는 섬유직조들이 밀착되어 있어 층사이 기공의 영향은 무시될 수 있으나 기공율이 높은 경우, 미세한 압축력으로 인하여 섬유직조들이 접해 있는 계면의 기공이 투과성에 중요한 영향을 미치는 것으로 해석될 수 있다. 또한, 비정상상태의 투과계수

가 실험이 수행된 기공율 범위에서 정상상태의 투과계수보다 큰 것으로 나타났는데, 이는 수지의 표면장력에 의하여 유동전면에 유발된 압력에 기인한 것으로 생각된다.

Fig.6은 비등방성 능직에 수지가 금형 중심으로 부터 타원 형태로 퍼져 나갈 때 시간에 따라서 각각 1방향과 2방향으로의 반지름을 나타낸 것이다. 타원형의 장축 방향으로 정의되는 주응력 방향 1의

반지름이 단축방향으로 정의되는 방향 2의 그것보다 크다는 것을 알 수 있다.

Fig. 7은 식 (9), (10)을 이용하여 계산한 결과로 얻은  $F(\xi, \eta)$ 와 시간의 관계를 나타낸 것이며 반복 계산에 의해서 제곱편차가 최소가 되는 선형식을 보여주고 있다. 주응력 방향의 투과계수는 Fig. 7의 기울기로부터 결정된다. 비등방성 능직에 대하여 기공율에 따른 투과계수는 Fig. 8에 나타내었다. 비등방성 투과계수는 기공율에 따라 증가하며 기공율이 0.6 이상인 경우에는 급격하게 증가하였다. 1/4 능직의 비등방성 정도( $\alpha$ )는 평균적으로 0.82이며 실험이 수행된 기공율 영역( $0.417 < \phi < 0.689$ )에서 거의 일정한 값을 유지하였다. 이로부터 특정한 기공율을 유지하기 위해 금형에 가해주는 압력에 의해서는 섬유직조의 비등방성에 영향을 주는 기공의 구조적 특성은 거의 변하지 않는다는 것을 알 수 있었다.

4.2. 모세관압

Fig. 9는 임의배향 직조에 대해서 기공율에 따른 모세관압의 변화를 나타낸다. 기공율이 증가하는 경우에 모세관압은 감소하게 되는데, 기공율이 가장 낮은 경우( $\phi=0.469$ )에 6.4 kPa에 해당하는 최대의 모세관압을 얻었다. 이는 금형입구에서의 수지주입 압력의 25% 정도를 차지하는 것으로 나타났다. 일반적으로 RTM 공정에서는 재료의 기계적 성질을

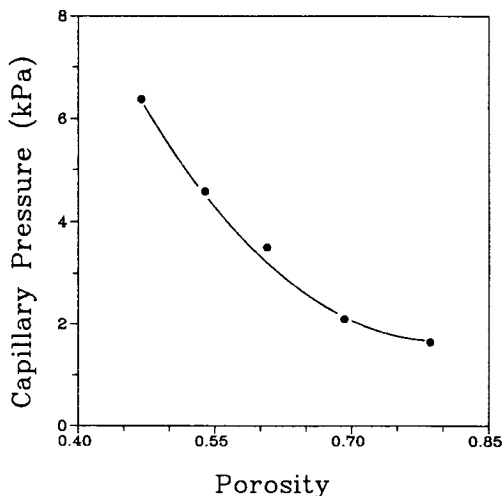


Fig. 9. Capillary pressure as a function of porosity.

향상시키기 위하여 섬유의 부피분율을 증가시키므로 기공율이 낮고, 기공형성과 관계된 섬유와 수지간의 함침정도를 향상시키기 위하여 가공압력이 낮다. 따라서 RTM 공정을 해석함에 있어서 모세관압은 고려되어야 한다. Fig. 10은 기공율에 따른 모세관압을 나타낸 것으로서 식 (7)에서 정의된 것처럼 선형관계를 나타낸다. 유리 섬유와 실리콘 오일간의 동적 접촉각 및 표면장력을 측정하면 Fig. 10의 기울기로부터 임의배향직조의 기공배열 형상인자를 구할 수 있다.

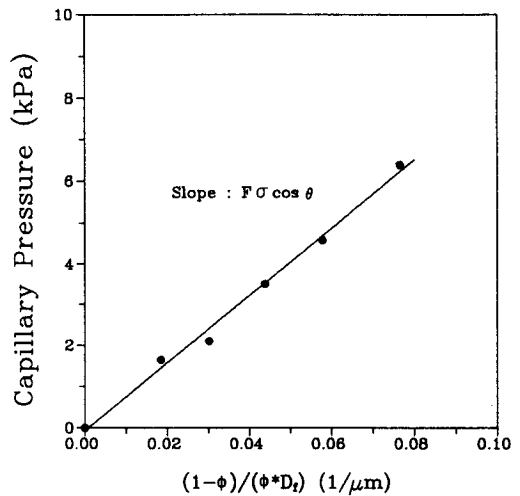


Fig. 10. Capillary pressure as a function of porosity.

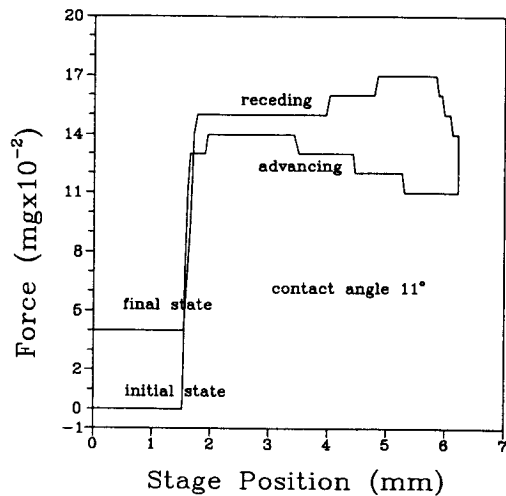


Fig. 11. Tensiometric diagram of a glass fiber and silicone oil.

Fig. 11은 유리섬유와 실리콘 오일간에 작용하는 힘을 Cahn Dynamic Contact Angle Analyzer로 측정된 값을 나타낸 것이다. 이것으로부터 섬유가 실리콘 오일에 잠기기 전에는 중력만이 작용되다가 잠기면서 표면장력과 부력이 발생하는 것을 알 수가 있다. 일반적으로 동적 접촉각은 capillary number가 아주 작을 때는 일정한 값을 유지하지만 capillary number가 증가하면서 커지는 것으로 알려져 있다. 본 실험에 사용된 섬유직조의 평균 capillary number는  $2 \times 10^{-3}$ 이었고, 잠김속도는  $50 \mu\text{m}/\text{sec}$ 으로 유지하였다. 이 capillary number에서의 유리섬유와 실리콘 오일의 접촉각은  $11^\circ$ 였고, 이 값으로부터 임의배향 섬유직조의 형상인자값 3.7을 구하였다. 이것은 일방향성 섬유직조의 측방향의 형상인자값 ( $F=4$ )에 가까운 것이다.

## 5. 결 론

RTM 공정에서 수지가 섬유직조에 함침될 때의 수지유동 특성에 관한 연구를 유동 가시화 실험을 통하여 수행하였다. 섬유직조의 배향구조와 기공율에 따른 투과계수와, 유동전면에서 수지의 표면장력에 기인한 모세관압을 측정하였다.

임의배향 섬유직조의 정상상태 및 비정상상태 투과계수는 기공율이 증가함에 따라 증가하였고, 비정상상태의 투과계수가 표면장력으로 인한 모세관압의 작용으로 정상상태의 값보다 큰 경향을 보였다.

유리섬유와 실리콘 오일간의 동적접촉각과 표면장력의 측정을 통해서 구한 임의배향조직내 모세관의 배열형상인자 값은 3.7이며, 이는 일방향성 섬유직조에 대한 측방향의 값( $F=4$ )에 근접함을 알 수 있었다.

모세관압은 기공율이 감소함에 따라 증가하여 기공율이 0.469인 경우에는 6.4 kPa에 해당하는 모세관압을 측정하였다. 이는 금형입구 압력의 25%에 해당하는 값으로서, 가공압력이 낮은 RTM 공정의 해석에서는 모세관압을 무시할 수 없다는 것을 제시할 수 있다.

## 기 호

A : cross sectional area of the mold

$D_e$  : equivalent diameter of the capillary probe  
 $D_f$  : fiber diameter  
 $F$  : form factor defined in Eq'n. 7  
 $h$  : laminate thickness  
 $\mathbf{k}$  : permeability tensor  
 $k_1$  : permeability of the principal direction 1  
 $k_2$  : permeability of the principal direction 2  
 $k_u$  : unsteady state permeability  
 $k_w$  : steady state permeability  
 $L$  : length of the preform  
 $n$  : number of the layer  
 $P_m$  : applied mechanical pressure  
 $P_c$  : capillary pressure  
 $Q$  : flow rate  
 $R$  : radius of the fiber  
 $R_0$  : radius of the gate  
 $R_{\theta 1}$  : radius of the principal direction 1  
 $R_{\theta 2}$  : radius of the principal direction 2  
 $t$  : time  
 $\mathbf{v}$  : superficial velocity tensor  
 $x_f$  : penetration length  
 $\alpha$  : degree of anisotropy  
 $\eta$  : resin viscosity  
 $\theta$  : contact angle  
 $\zeta$  : surface density of the fibrous preform  
 $\rho_f$  : mass density of the fiber  
 $\sigma$  : surface tension of the resin  
 $\Phi$  : dimensionless time  
 $\phi$  : porosity

## 참고문헌

1. K.L. Adams, W.B. Russel, and L. Rebenfeld, *Int. J. Multiphase Flow*, **14**, 203 (1988).
2. K.L. Adams, B. Miller, and L. Rebenfeld, *Polym. Eng. Sic.*, **26**, 1434 (1986).
3. J.G. Williams, C.E.M. Morris, and B.C. Ennis, *Polym. Eng. Sci.*, **14**, 413 (1974).
4. Y.R. Kim, S.P. McCathy, J.P. Fanucci, S.C. Nolet, and C. Koppernaes, 22nd SAMPE Technical Conference, 16 (1991).
5. K.J. Ahn, J.C. Seferis, and J.C. Berg, *Polym. Eng. Sci.*, **12**, 146 (1991).