

<연구논문>

## 수지이동 성형공정에서 기공형성에 미치는 모세관압의 영향에 관한 실험적 연구

이종훈 · 김세현 · 김성우\* · 이기준

서울대학교 응용화학부

\*경기대학교 첨단산업공학부

(1998년 8월 22일)

### An Experimental Study on the Effect of Capillary Pressure on the Void Formation in Resin Transfer Molding Process

Chong Hoon Lee, Sehyun Kim, Seong Woo Kim\* and Ki-Jun Lee

Division of Chemical Engineering, Seoul National University

\*Division of Advanced Industrial Engineering, Kyonggi University

(Received August 22, 1998)

#### 요 약

수지이동 성형공정에서 섬유직조가 수지에 의해 함침될 때 발생하는 기공 또는 나쁜 젖음성은 최종 성형품의 물성 저하에 심각한 영향을 미치게 된다. 본 연구에서는 함침공정에서의 수지 유동특성을 파악하고 기공 형성기구를 규명하기 위하여, 빔 형태의 금형을 대상으로 실리콘 오일과 평직형태의 유리섬유를 사용하여 미시적인 유동가시화 실험을 수행하였다. 시간과 압력에 따른 수지의 침투깊이를 측정함으로써 섬유직조의 기공률에 따른 비정상상태의 투과계수와 모세관압을 측정하였고, 낮은 조업압력과 낮은 기공률에서는 모세관압이 함침공정에서 중요한 가공변수임을 확인할 수 있었다. 비디오 카메라를 이용하여 유동전단면의 이동을 단점 확대 촬영하여 기공이 형성되는 과정을 미시적으로 관찰함으로써, 섬유와 수지의 표면에너지에 의해 발생하는 모세관압이 기공의 형성에 미치는 영향을 조사하였다. 그 결과, 수지충전을 유발하는 전체 구동압력에서 모세관압이 상대적으로 클수록 기공은 더욱 쉽게 생성되는 것으로 나타났다. 또한 수지의 점도와 섬유직조의 기공률이 각각 변화할 때, 모세관수에 따른 기공의 함량을 화상 해석 기법(image analysis technique)을 사용하여 정량적으로 측정하였다. 수지가 섬유직조 내로 함침될 때 임계모세관수( $Ca \sim 2.75 \times 10^{-3}$ ) 이상에서는 기공이 형성되지 않았으며, 그 이하에서는 모세관수가 감소함에 따라 기공의 함량이 지수적으로 증가하였다. 생성된 기공의 함량은 점도에 관계없이 유사한 변화 경향을 보였으며, 모세관수가 동일한 조건에서는, 기공률이 감소함에 따라 기공의 함량이 감소하였다.

**Abstract**—Flow-induced voids during resin impregnation and poor fiber wetting give serious effects on the mechanical properties of composites in resin transfer molding process. In order to better understand the characteristics of resin flow and to investigate the mechanism of void formation, flow visualization experiment for the resin impregnation was carried out on plain weaving glass fiber mats using silicon oils with various viscosity values. The permeability and the capillary pressure for the fiber mats of different porosities were obtained by measuring the penetration length of the resin with time and with various injection pressure. At low porosity and low operating pressure, the capillary pressure played a significant role in impregnation process. Video-assisted microscopy was used in taking the magnified photograph of the flow front of the resin to investigate the effect of the capillary pressure on the void formation. The results showed that the voids were formed easily when the capillary pressure was relatively high. No voids were detected above the critical capillary number of  $2.75 \times 10^{-3}$ , and below the critical number the void content increased exponentially with decrease of the capillary number. The content of void formed was independent of the viscosity of the resin. For a given capillary number, the void content reduced with the lower porosity of the fiber mat.

**Keywords:** Resin transfer molding process, Glass fiber mat, Permeability, Capillary pressure, Void content, Capillary number

#### 1. 서 론

고분자 복합재료는 기계적, 물리적 그리고 열적 특성의 향상을 위해서 고분자 수지에 섬유나 운모, 금속가루 등의 강화재를 물리적으로 혼합해서 만든 재료이다. 이러한 복합화를 통해 고분자 재료 자체가 갖는 물성보다 뛰어난

물성을 가진 재료를 얻을 수 있다. 이 재료는 기지재료인 고분자 물질 자체의 고성능화와 사용자가 원하는 목적에 맞는 방향으로의 성능 향상을 기할 수 있는 다양한 강화재의 개발 및 복합화 방법과 공정 등의 개선을 통해서 그 성능이 날로 향상되어 가고 있으며, 그 용도와 사용량이 증가하고 있다. 한편, 복합재료 제조에 사용되는 물질의

개발 및 특성 파악은 항상 고분자 물질의 가공조건을 염두에 두고 행해져야 하며, 복합재료의 물성 향상 및 생산원가의 절감 등에 지대한 영향을 미치는 실제 성형공정의 설계 및 성형 조업조건 최적화에 대한 연구가 필요하다.

수지이동 성형공정(RTM)은 앞에서 이미 언급된 여러 장점들을 지닌 대표적인 성형공정으로서 최근에 그 중요성이 크게 부각되고 있다. 특히 대량이나 중간량의 생산을 요구하는 제품을 큰 설비투자 없이 단기간에 안정되게 생산할 수 있을 뿐만 아니라, 수지이동 성형공정으로 만들 수 없는 제품은 없다고 할 정도로 융통성이 대단히 큰 공정이다[1].

수지이동 성형공정이란 미리 특정한 형태의 직조상 섬유를 금형 내에 채우고 수지를 충전 또는 함침시킨 후 금형 외부에서 적절한 열을 가하여 경화시키는 공정이다. 오토클레이브 공정에 비해 낮은 압력에서 수행되는 공정이기 때문에 크기가 큰 제품을 만드는데 유리하고, 금형에 고압이 걸리지 않으므로 금형 제작이 용이하며 설비투자비를 절감할 수 있다. 공정 순환시간이 짧기 때문에 작업비용이 적게 들고, 프리프레그를 사용하지 않으므로 섬유직조의 보관이 용이하다. 또한 기계적 압축에 의해서 형태가 만들어지는 것이 아니라 수지의 유압에 의해서 압축되기 때문에 복잡한 3차원 구조의 성형이 가능하다. 그러나 건조한 섬유직조 내를 수지가 공기를 밀어내면서 차들어가는 공정이므로 젖음성이 다소 떨어질 수 있으며 기공이 형성되기도 한다[2].

수지이동 성형공정에서는 섬유직조와 수지가 함침공정을 통하여 접촉을 하게 되고, 이 때의 상태가 경화공정을 거쳐 최종 물성에 영향을 미치게 되므로 함침공정에서 수지의 유동특성 파악이 요구된다. 함침공정은 수지의 화학유변학적 특성과 표면장력, 섬유직조의 배향, 구조, 기공률 그리고 섬유직조와 수지 사이의 계면특성의 영향을 받는다. 특히 섬유직조의 투과성과 수지의 표면장력이 함침공정에 가장 큰 영향을 미치는 변수인데 반해 이와 관련된 연구는 미진한 편이다.

복합재료 제조공정에서 수지가 섬유직조 내로 함침되면서 충전될 때의 수지유동에 관한 연구는 다공성 매질에서 유체의 유동에 대한 Darcy의 법칙을 적용함으로써 거시적이거나 정량적으로 수행되었다. 그 동안 많은 연구자들은 열경화성 수지로 함침된 프리프레그 내를 수지가 흐르는 정상상태에서의 투과계수를 측정하여 실제 오토클레이브 공정에 적용하는데 초점을 맞추어 왔다[3]. 그러나 수지이동 성형공정에서 수지와 공기가 자유표면을 형성하면서 건조된 섬유직조에 함침될 때의 비정상상태의 투과계수를 구하기 위한 실험적 방법이 요구되었다. 함침공정에 수반되는 수지유동은 섬유직조인 다공성 매질에의 투과계수, 그리고 고분자 수지의 물리적, 유변학적 성질에 의존하는 것으로 알려져 있으며, 투과계수는 섬유직조의 대부분이 비등방성 구조이므로 수지유동 방법과 방향에

의존한다. 비등방성 섬유직조의 타원형 유동에 대해서 이 방향성의 비정상상태 투과계수를 실험적으로 동시에 측정할 수 있는 방법이 제시되었고, 실제로 이를 여러 가지 종류의 섬유직조에 적용시켜 투과계수에 영향을 미치는 섬유직조의 구조에 관한 연구가 수행되었다[4,5].

수지의 표면장력은 복합재료 공정에서 수지에 의한 섬유직조의 젖음성을 결정하는데 중요한 역할을 하는 것으로 알려져 있다. 좋은 젖음성은 양질의 복합재료의 제조와 최종 성형품의 물성 향상에 필수적이다. 또한 표면장력은 모세관압에 따른 구동력을 유발시켜 건조된 섬유직조를 따라 흐르는 함침공정의 가공성을 개선할 수 있다. 일반적으로 모세관압 효과는 수지의 표면장력, 섬유와 수지간의 접촉각, 섬유직조의 구조, 기공률, 섬유직경, 기공의 배열 형태 등의 영향을 받는다. 섬유직조의 비정상상태 투과계수와 모세관압은 동시에 측정할 수 있으며, 이들 결과로부터 기공률이 낮은 경우에는 저압공정에서의 수지 주입압력에 비해서 모세관압을 무시할 수 없음이 알려졌다[6].

섬유직조 내의 유동은 미시유동과 거시유동으로 구별할 수 있다. 미시유동은 섬유직조 내부의 유동으로 제한할 수 있는 데 이와 같은 상황하에서는 수지 유동에 필요한 공간이 매우 좁기 때문에, 이 때의 유동은 수지 주입압력이 아닌 섬유직조의 구조와 관련된 모세관압이 지배적으로 작용하게 된다. 거시유동은 섬유직조들 사이의 흐름을 말하는 데, 투과계수와 같은 성질은 거시유동으로부터 결정된다. 그러나 실제 복합재료의 수지유동이나 기공형성과 관련된 문제는 미시유동으로부터 결정되며 이것의 해석이 중요한 문제가 된다.

실제 섬유직조 내의 수지 유동에서 거시적인 총괄유속과 섬유직조 내부의 유속이 다르게 나타나며 이들 속도의 차에 의해 기공이 형성되는 것으로 예측할 수 있다. 수지이동 성형공정의 수지 충전단계에서 발생하는 기공은 크게 거대기공과 미세기공으로 구별할 수 있다. 거대기공은 섬유의 직조와 직조 사이의 골에 형성되는 기공이며, 미세기공은 섬유직조 내부에 형성되는 기공을 의미한다. 수지이동 성형공정의 최종 성형품은 많은 기공을 포함하고 있는데, 이는 최종 성형품의 물성을 저하시키는 중요한 요인 중의 하나이다. 따라서, 최종 성형품의 기공 형성을 억제하기 위해서는 수지유동 중 발생하는 거대기공과 미세기공의 형성 원인을 규명하는 것이 중요하다. 기공형성을 결정하는 주요 변수들은 주입압력, 금형 온도, 수지의 점도 및 표면장력 그리고 수지와 섬유간의 접촉각 등을 들 수 있다. 복합재료 내에 포함된 기공은 구조물의 강도, 수분저항성, 유전강도 등과 같은 복합재료의 물성에 영향을 미치므로 기공함량을 낮게 조절하는 문제가 중요한 관건이 된다.

기공의 형성과 관련된 최초의 연구는 필라멘트 감기(filament wind) 공정에서 개개의 섬유사이에 포획된 미세기공에 관한 것으로서, 이들 결과로부터 접촉각을 감소시

키면 기공의 함량을 현저히 줄일 수 있음이 알려졌다[7]. 기공의 형성이 복합재료의 기계적 물성에 미치는 영향에 관한 연구도 수행되었는데, 기공이 1% 증가하면 기계적 강도가 약 7% 감소한다는 결과를 얻었다[8]. 최근 들어서는 섬유직조 내의 미시유동과 기공형성에 관한 정량적인 연구들이 많이 수행되고 있다. Patel 등[9]은 일방향 유리 섬유를 대상으로 유동가시화 실험을 수행하여 기공의 형성을 모세관수와 연관지어 해석하였으며, Chen 등[10]은 일방향 유리섬유와 비방향성(random) 유리섬유를 대상으로 기공의 형성에 대하여 실험적, 이론적 연구를 수행하여 기공형성의 메카니즘에 대한 체계적인 연구를 수행하였다.

본 연구에서는 평직형태의 유리섬유와 실리콘 오일을 사용하여 함침공정의 유동특성과 기공형성에 관해 미시적 유동가시화 실험을 수행하였다. 먼저 함침공정의 주요 유동변수인 비정상상태의 투과계수와 모세관압을 수지의 점도, 수지 주입압력, 기공률을 달리하여 조사하였다. 또한 섬유직조 내의 수지의 침투속도에 따라 유동전단면의 이동과 모양의 변화를 근접 확대 촬영하여 화상자료를 분석함으로써 기공형성의 과정과 수지의 유동특성을 해석하였으며 기공형성에 미치는 모세관압의 영향에 대해 고찰하였다. 수지의 침투속도와 관련된 무차원 변수인 모세관수에 따른 기공의 함량을 수지의 점도, 섬유직조의 기공률의 변화에 따라 측정하여 기공의 함량에 대한 정량적인 연구를 수행하였다.

## 2. 이 론

수지이동 성형공정에서 가장 중요한 인자로는 수지가 섬유직조 강화재 내로 함침될 때의 투과계수 그리고 조업 압력 및 온도이다. 일반적으로 압력은 중력에 의한 압력, 진공압력, 모세관압력을 포함하며, 따라서 전체 조업압력은 다음과 같이 표현된다[11].

$$\Delta P_t = \Delta P_m + \Delta P_g + \Delta P_v + \Delta P_c \quad (1)$$

여기서,  $\Delta P_t$ 는 전체 압력,  $\Delta P_m$ 은 수지의 주입압력,  $\Delta P_g$ 는 중력에 의한 압력,  $\Delta P_v$ 는 진공압력,  $\Delta P_c$ 는 모세관압력이다.

복합재료 제조공정에서 수지의 주입압력은 중력에 비해 매우 높으므로 중력에 의한 압력은 무시할 수 있으며, 진공압력이 사용되지 않는 공정이라면 전체 압력은 수지의 주입압력과 모세관압으로 구성되게 된다.

모세관압은 섬유직조 내의 섬유정렬에 대한 자료로부터 수식적으로 계산할 수 있으며, Young-Laplace 식을 이용하여 다음과 같이 표현할 수 있다[12].

$$\Delta P_c = \frac{4 \sigma \cos \theta}{D_c} \quad (2)$$

여기서,  $\sigma$ 는 수지의 표면장력,  $\theta$ 는 수지와 섬유 사이의 접

촉각,  $D_c$ 는 섬유직조 내 기공의 대응지름이다.

섬유직조의 형상에 의존하는 투과계수는 다음의 Kozeny-Carman 식으로 표현 된다.

$$K = \frac{\phi^3}{(1-\phi)^2} \frac{R_f^2}{4k} \quad (3)$$

여기서,  $K$ 는 투과계수,  $R_f$ 는 섬유 filament의 반경,  $k$ 는 Kozeny 상수이다.

수지 함침공정에서 섬유직조의 적층에 의한 예비성형품의 형성은 공정의 기공률 조절을 용이하게 하는 장점이 있으며, 이 때 적층된 섬유직조의 기공률은 다음의 식으로 표현된다.

$$\phi = 1 - \frac{n\xi}{\rho h} \quad (4)$$

여기서,  $\phi$ 는 섬유직조의 기공률,  $n$ 은 섬유직조의 수,  $\xi$ 는 섬유직조의 표면밀도,  $\rho$ 는 섬유직조의 밀도,  $h$ 는 금형의 두께이다.

뉴턴성 유체가 다공성 매질 내를 흐를 때의 압력구배와 유속과의 관계는 Darcy의 법칙으로부터 다음과 같은 선형방정식으로 나타낼 수 있다. 이식으로부터 건조한 섬유직조 내를 흐르는 비정상상태의 투과계수를 구할 수 있다.

$$\vec{v} = -\frac{\tilde{K}}{\mu} \cdot \nabla P \quad (5)$$

여기서,  $\vec{v}$ 는 수지의 침투속도,  $\tilde{K}$ 는 투과계수를 나타내는 텐서,  $\mu$ 는 수지의 점도,  $\nabla P$ 는 섬유직조 내에서의 수지의 압력구배이다. 섬유직조 내의 압력구배가 선형이고, 전체 압력은 섬유직조에 수지가 함침되면서 유동전단면에서 수지의 표면장력에 의해 발생하는 모세관압과 금형 입구에서의 압력의 합으로 간주하여 이를 비정상상태의 1차원 유동에 적용하면 다음과 같은 유동전단면에 대한 식을 얻을 수 있다.

$$\frac{dX_f}{dt} = \frac{K_d}{\mu\phi} \frac{(\Delta P_m + \Delta P_c)}{X_f} \quad (6)$$

여기서,  $X_f$ 는 수지의 침투길이,  $K_d$ 는 비정상상태의 투과계수,  $\phi$ 는 섬유직조의 기공률,  $\Delta P_m$ 은 수지를 주입하는 기계적 압력,  $\Delta P_c$ 는 모세관압이다.

식 (6)을 적분하면 다음과 같은 식을 얻을 수 있다.

$$X_f^2 = \frac{2K_d t}{\phi\mu} (\Delta P_m + \Delta P_c) \quad (7)$$

수지의 점도와 섬유직조의 기공률이 정해지고, 금형 입구에서의 압력을 변화시키면서 수지의 침투길이를 일정한 시간간격으로 측정하면 식(7)의 기울기와 절편으로부터 비정상상태의 투과계수와 모세관압을 동시에 계산할 수 있다.

한편, 건조한 섬유직조 내를 수지가 흘러갈 때 수지의 유동전단의 모양은 속도에 크게 의존하는 데, 이는 동적 접촉각의 영향으로 예상된다. 이러한 관계를 설명하는 중요한 무차원 값으로 모세관수가 있으며 이는 수지의 점도와 표면장력의 관계식으로 다음과 같이 표현된다.

$$C_a = \frac{\mu v}{\sigma} \tag{8}$$

여기서,  $C_a$ 는 모세관수,  $\mu$ 는 수지의 점도,  $v$ 는 수지의 침투속도,  $\sigma$ 는 수지의 표면장력이다.

### 3. 실험

#### 3.1. 물질 및 금형

본 연구에서는 강화재로 직조 형태의 유리섬유(WR 580A, 한국화이버)를 사용하였는데, 섬유직조는 Fig. 1에서 보는 바와 같이 평직형태이고 등방성 구조를 가지고 있다. Fig. 1에서 (a)는 섬유직조에서 두겹이 겹쳐져 있는 부분이고, (b)는 한겹만 있는 부분이며, (c)는 섬유가 없는 빈 공간이다. 사이징 처리가 되어 있기 때문에 이를 제거하기 위해 오븐에서 300°C로 3시간 동안 가열하여 사용하였으며, 수분을 완전히 제거하기 위해 진공건조기에서 보관하였다. 섬유직조의 물성은 Table 1에 나타나 있다.

수지로는 100cs, 500cs, 1000cs의 동점도를 가진 실리콘 오일(KF96H, Shin-Etus Chem. Co. Ltd.)을 사용하였다. 실

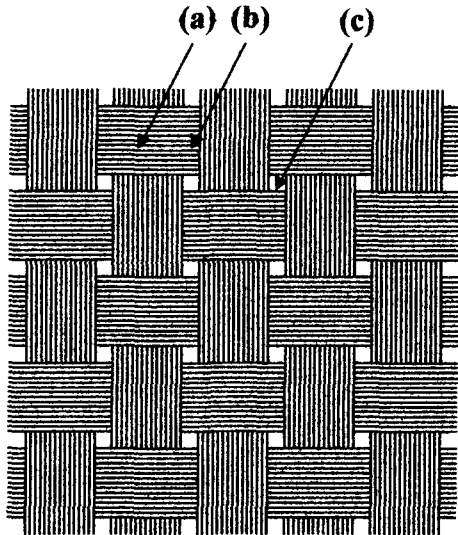


Fig. 1. Schematic diagram of the structure of the plain weaving glass fiber mat.

Table 1. Material properties of the fiber mat<sup>(1)</sup>

Material	Weaving type	Fiber density (g/cm <sup>3</sup> )	Surface density (g/cm <sup>2</sup> )	Fiber diameter (μm)
Glass	Plain	2.54	0.058	22

(1) WR580A, Han-Kook Fiber

Table 2. Material properties of the silicone oil<sup>(1)</sup>

Sample name	Viscosity (cp)	Density (g/cm <sup>3</sup> )	Surface tension (dyne/cm)
s102 <sup>(2)</sup>	119.2	0.933	22.41
s502 <sup>(2)</sup>	492.9	0.938	22.69
s103 <sup>(3)</sup>	969.1	0.944	24.11

(1) KF96H, Shin-Etus Chem. Co. Ltd.

(2) 100cs, (2) 500cs, (3) 1000cs silicone oil

리콘 오일의 물성은 Table 2에 나타내었다. 점도는 Mechanical Spectrometer(RMS 800E)로 측정하였으며 뉴턴성 유체의 거동을 보인다. 표면장력은 Contact Angle Analyzer(DCA 322)를 사용하여 상온에서 측정하였다.

#### 3.2. 실험 방법

금형은 빔(beam) 형태로서 유동전단면과 기공형성을 명확하게 관찰하기 위해서 투명한 아크릴로 제작하였으며 함침과정 중 외부로부터 가해지는 압력에 의해서 변형되는 것을 막기 위해서 3.0 cm의 두께로 제작하였다. 금형의 밑판에는 구멍을 뚫어 수지를 주입할 수 있게 하였다.

섬유직조를 5 cm×9 cm의 크기로 재단하여 금형 밑판에 놓고 양면테이프를 실링하여 수지가 새지 않도록 하였다. 이때 섬유직조 내로 주입되는 수지의 흐름을 균일하게 하기 위해 섬유직조를 수지 주입구로부터 충분한 거리를 두고 일정한 위치에 놓았다. 함침과정에서 기공의 촬영을 용이하게 하기 위해 한장의 섬유직조를 사용하였으며, 섬유직조의 기공률은 식(4)에 의해 금형의 두 평행판 사이의 두께를 변화시켜 조절하였다.

실험에 사용된 장치도는 Fig. 2와 같다. 수지는 고압가스를 이용하여 금형에 주입되는데, 이때 금형 입구에서의 압력은 주입구에 수직으로 연결된 압력센서(Valcom

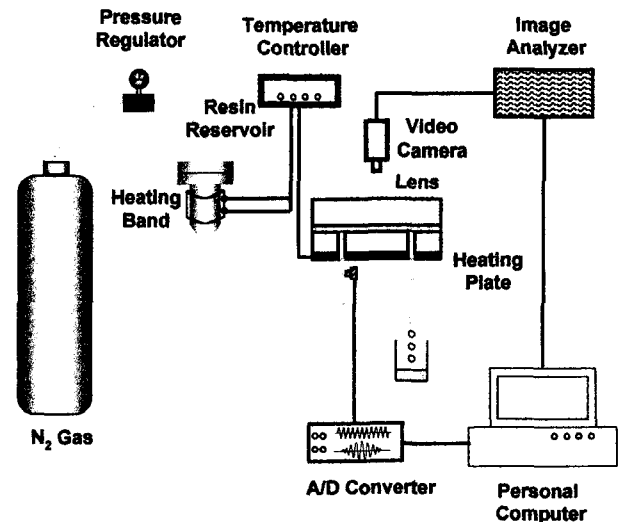


Fig. 2. Schematic diagram of the experimental set-up for the flow visualization.

VPRF)에 의해 시간에 따라 측정되어 아날로그/디지털 변환기를 통해 컴퓨터에 기록된다.

수지의 점도와 섬유조직의 기공률을 달리하여 여러 압력에 대해 일정한 시간 간격으로 수지의 유동전단면의 위치를 촬영하여 시간과 압력에 따른 수지의 침투길이를 측정하였다. 유동전단면의 위치로부터 수지의 침투길이의 제곱을 계산하여 시간과 압력에 따라 도시하여 기공률과 점도로부터 투과계수와 모세관압을 계산하였다.

금형의 일정한 위치에서 유동전단면의 이동과 기공의 형성과정을 비디오 카메라로 근접 확대 촬영하였다. 이때 수지가 일정한 거리를 이동하는 시간을 측정하여 평균 이동속도를 계산하였으며, 수지의 점도와 주입압력, 섬유조직의 기공률을 변화시켜 반복실험을 수행하였다. 촬영한 비디오 테이프를 재생하면서 필요한 화상자료를 얻고, 그것을 분석하여 유동전단면의 이동과 기공형성의 과정을 해석하여, 기공형성에 미치는 모세관압의 영향을 고찰하였다. 또한 수지의 침투속도를 달리하여 촬영함으로써 모세관수에 따른 기공의 함량을 측정하였는데, 기공의 함량은 화상 해석 기법(image analysis technique)을 이용하여 섬유조직의 전체면적에 대한 기공의 상대적인 면적의 비로써 계산하였다.

### 4. 결과 및 고찰

#### 4.1. 투과계수와 모세관압

평직형태의 섬유조직과 실리콘 오일을 사용하여 빔 금형에서 유동특성 실험을 수행함으로써 수지가 섬유조직 내로 함침될 때 일정한 시간 간격에 따른 수지침투 길이를 측정하였다. 유동전단면의 위치로부터 수지의 침투길

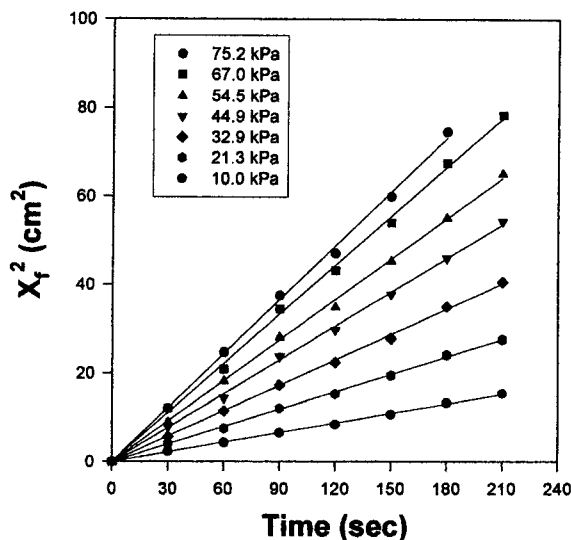


Fig. 3. Square of the resin penetration length as a function of time with various pressures. Here the viscosity of the silicone oil is 1000cs and the porosity fiber mat is 0.54.

이의 제곱을 계산하여 시간과 압력 각각에 대해서 도시하여 기공률과 점도로부터 투과계수와 모세관압을 각각 구하였다.

Fig. 3은 실리콘 오일 1000cs, 기공률 0.54일 때 여러 주입압력에 대해 시간에 따른 수지의 침투길이의 제곱을 나타낸 것이다. 그림에서 보는 바와 같이 원점을 통과하는 직선이며 압력이 증가할수록 수지의 침투길이의 제곱을 알 수 있다. 식(7)에 의해 이 직선의 기울기로부터 비정상상태의 투과계수를 계산할 수 있다. 이렇게 하여 여러 기공률에 대해 투과계수를 구하였다.

Fig. 4는 여러 기공률에 대해 압력에 따른 투과계수를

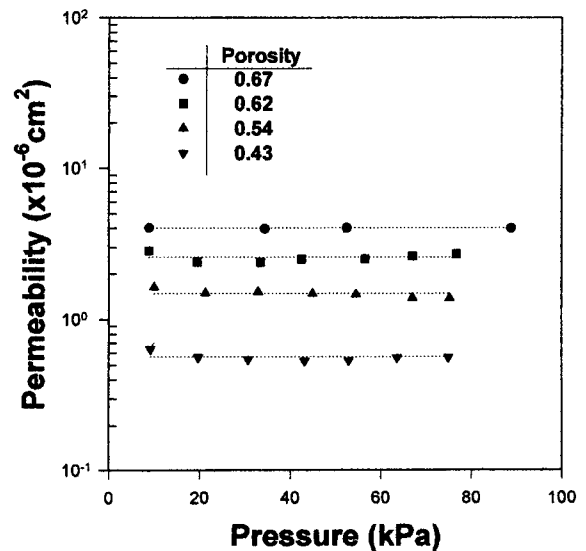


Fig. 4. Permeability as a function of applied pressure with various porosities. The viscosity of the silicone oil is 1000cs.

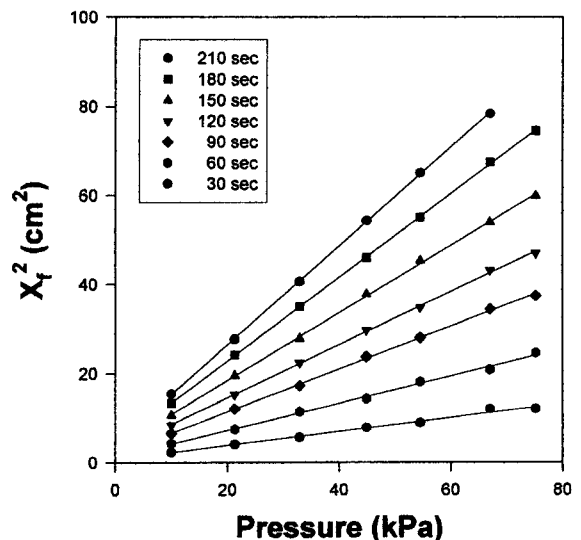


Fig. 5. Square of the resin penetration length as a function of applied pressure with various time. The viscosity of the silicone oil is 1000cs and the porosity of the fiber mat is 0.54.

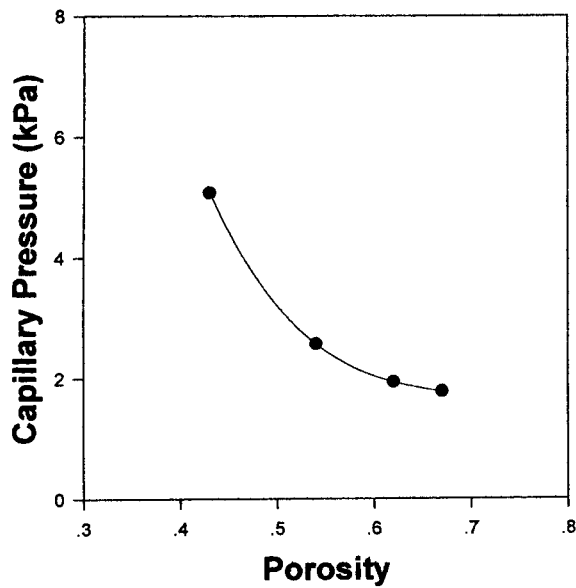


Fig. 6. Change of the capillary pressure with the porosity of the fiber mat where the viscosity of the silicone oil is 1000cs.

나타낸 것이다. 압력이 증가하면 점성항력에 의해 투과계수가 감소할 것으로 예측되나, 실험에 사용된 압력 범위 내에서 비정상상태의 투과계수는 압력에 무관함을 보여 주고 있다. 그러나 기공률이 증가함에 따라 비정상상태의 투과계수는 급격히 증가하였는데, 이는 섬유조직 내의 공극의 증가에 기인한 것으로 볼 수 있다.

Fig. 5는 실리콘 오일 1000cs, 기공률 0.54일 때 시간에 대해서 주입압력에 따른 수지의 침투길이의 제곱을 나타낸 것이다. 이 직선의 절편으로부터 모세관압을 계산할 수 있다. 이렇게 하여 여러 기공률에 대해 모세관압을 구하였다.

Fig. 6은 섬유조직의 기공률에 따른 모세관압의 변화를 나타낸 것이다. 모세관압은 기공률이 감소함에 따라 급격히 증가하였는데, 이는 섬유조직 내의 모세관 지름의 감소에 기인한 것으로 해석할 수 있다[11]. 기공률이 0.43일 때 모세관압은 5.1 kPa로 이는 주입압력의 20-50%에 해당하는 값이다. 따라서 기공률이 낮고 저압공정일 때 모세관압은 함침공정에서 중요한 역할을 함을 알 수 있다.

4.2. 유동전단면의 이동과 모세관압의 영향

유동전단면의 이동과 그 모양의 변화는 주입압력에 따라 매우 달라짐을 실험을 통하여 알 수 있었다. 이러한 현상은 모세관압에 기인한다고 할 수 있는 바 여러 가지 주입압력에 따른 유동전단면에 대한 정성적인 해석을 통해 기공형성에 대한 모세관압의 영향을 고찰하였다.

만일 모세관압이 존재하지 않는다면 섬유조직은 단지 수지의 흐름을 방해하는 저항 역할만을 할뿐이므로 수지는 섬유가 두점이 겹쳐져 있는 부분(Fig. 1의 (a))에서 가장 느리게, 섬유가 한점만 있는 부분(Fig. 1의 (b))에서 가장 빠르게 흘러갈 것이므로 유동전단면의 모양은 주입압

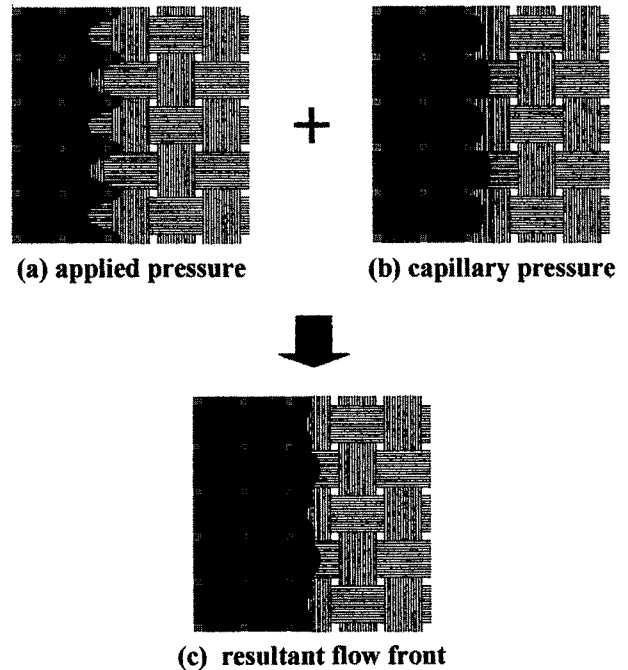


Fig. 7. Schematic diagram of the flow front of the resin at low applied pressure.

력이 낮을 때는 Fig. 7의 (a), 주입압력이 높을 때는 Fig. 8의 (a)와 같을 것이다.

한편, 모세관압은 섬유조직과 수지가 정해지면 거시적인 측면에서는 일정한 값을 갖지만 부분적으로는 차이가 생기게 된다. 섬유조직이 많이 겹쳐져 있어 섬유사이의 간

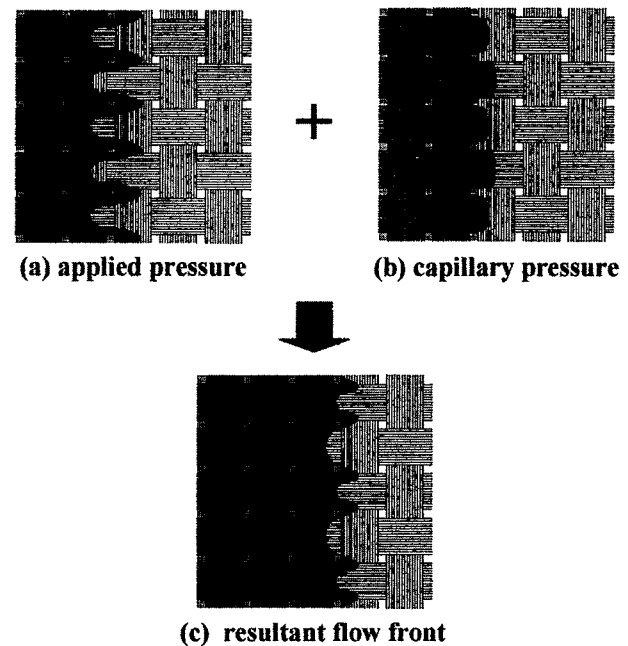


Fig. 8. Schematic diagram of the flow front of the resin at high applied pressure.

극이 작은 부분(Fig. 1의 (a))일수록 크게 나타나며 수지의 흐름방향과 수직일 때보다 평행일 때가 더욱 크게 나타나게 되어 Fig. 7의 (b) (또는 Fig. 8의 (b))와 같이 된다. 따라서 모세관압은 수지의 주입압력과 무관하지만 그 상대적인 영향은 다르게 나타나게 되는데 주입압력이 작을수록 그 상대적인 값은 커지게 된다.

주입압력이 낮으면 모세관압의 상대적인 영향은 커지게 되고, 모세관압은 주입압력과 거의 같은 값을 가지므로 유동전단면의 모양은 모세관압이 없을 때에 비해 많은 변화를 하게되며, 유동전단면의 모양은 Fig.7의 (c)와 같이 된다. 이 때 섬유조직 내에는 국부적인 유속의 차이가 발생하게 되고 이러한 차이에 의해 기공이 형성된다고 생각할 수 있다.

주입압력이 높으면 모세관압의 상대적인 영향은 작아지게 되고, 모세관압은 주입압력에 비해 작은 값을 가지므로 유동전단면의 모양의 변화에 영향을 미치지 못하게 되

며, 유동전단면의 모양은 Fig.8의 (c)와 같다. 이 때 기공은 형성되지 않는다.

4.3. 유동전단면의 이동과 기공형성

금형의 일정한 위치에서 수지의 이동을 근접 확대 촬영하여 수지의 주입압력에 따른 유동전단면의 이동과 모양의 변화를 관찰함으로써 공기의 포획에 의한 기공의 형성 과정을 해석할 수 있었다.

실리콘 오일 1000cs, 기공률 0.43으로 고정하고, 수지의 주입압력을 변화시켜 수지의 침투속도를 조절하여, 식 (8)로부터 모세관수를 계산하였다.

Fig. 9는 수지의 주입압력이 낮을 때, 섬유조직 내를 흐르는 실리콘 오일의 유동전단면을 촬영한 것이다. 수지의 흐름을 보다 명확하게 이해하기 위해 Fig. 10에 도식적으로 나타내었다. 앞서서도 설명했듯이 수지의 주입압력이 낮을 때에는 모세관압의 상대적인 영향은 커지게 되므로, 유동전단면의 이동과 모양의 변화에 미치는 모세관압의 영향은 커지게 된다. 수지는 그림과 같은 다섯 단계의 흐름을 반복하면서 섬유조직 내를 흐르고 있음을 관찰할 수 있다. 그림의 (a)에서 시작하여 (b)와 같이 새로운 섬유다발을 만났을 때, 수지의 흐름과 평행한 부분에서는 모세관

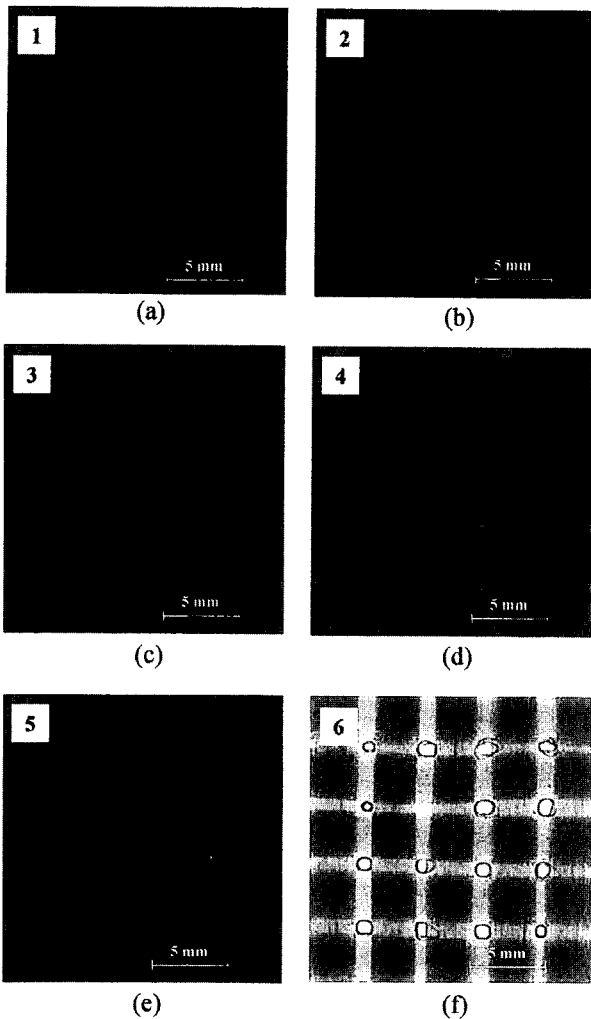


Fig. 9. Photographs of the advancing flow front at low pressure and capillary number of  $9.74 \times 10^{-4}$ . The viscosity of the silicone oil is 1000cs and the porosity of the fiber mat is 0.43.

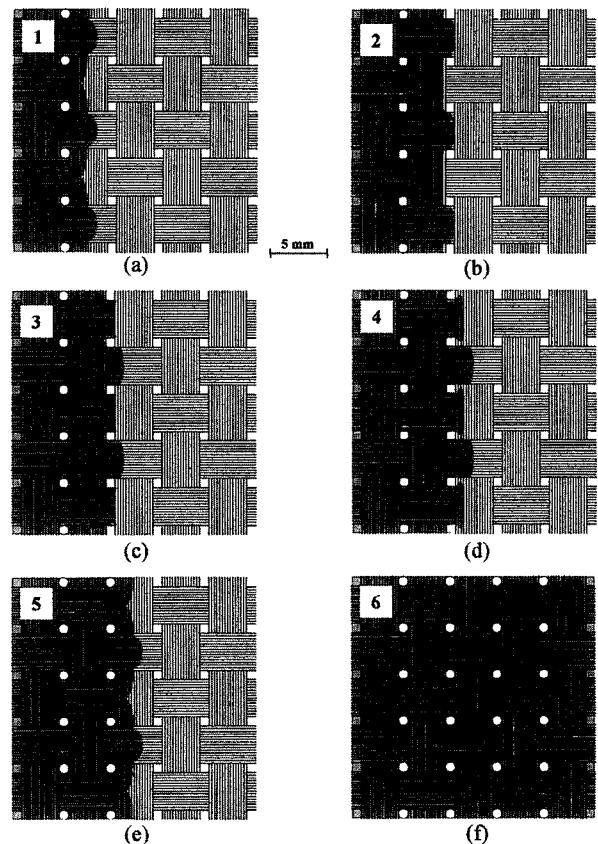


Fig. 10. Schematic diagram of the advancing flow front at low pressure and capillary number of  $9.74 \times 10^{-4}$ . The viscosity of the silicone oil is 1000cs and the porosity of the fiber mat is 0.43

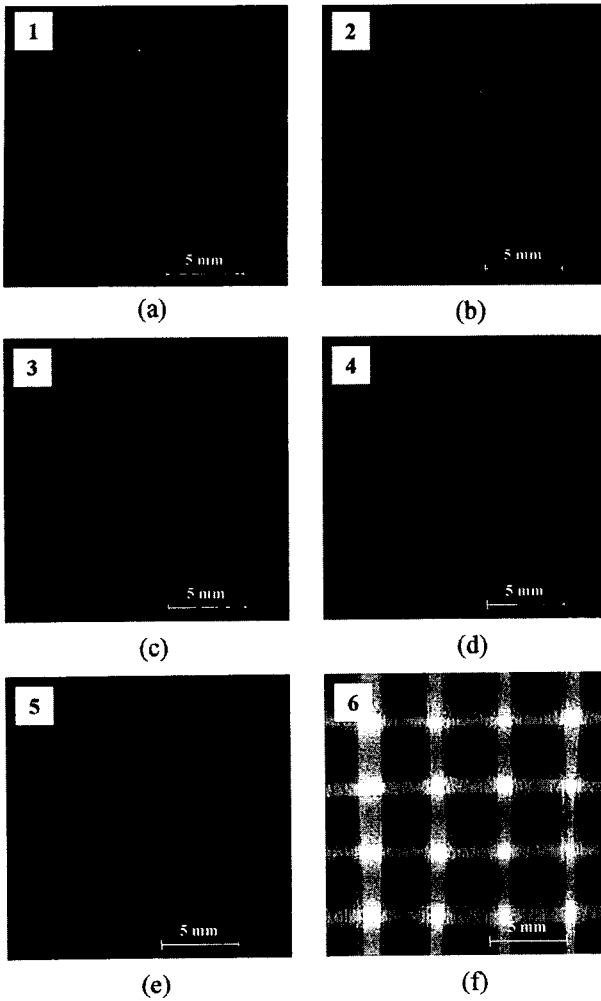


Fig. 11. Photographs of the advancing flow front at high pressure and capillary number of  $4.02 \times 10^{-3}$ . The viscosity of the silicone oil is 1000cs and the porosity of the fiber mat is 0.43.

압이 상대적으로 크므로 수지가 빨리 흐르게 되고, 수지의 흐름과 수직인 부분에서는 모세관압이 상대적으로 작으므로 수지는 느리게 흐르게 된다. 이러한 모세관압의 국부적인 차이로 인해 (c)와 (d)를 거치면서 섬유조직 내의 공기가 빠져나가지 못하고 포획되어 기공이 형성되고, 이러한 과정이 반복되는 것이다. 그림의 (f)는 수지가 섬유조직 내로 완전히 차들어 갔을 때 기공을 촬영한 것이다.

Fig. 11은 수지의 주입압력이 높을 때, 섬유조직 내를 흐르는 실리콘 오일의 유동전단면을 촬영한 것이고, Fig. 12에 도식적으로 나타내었다. 앞서서도 설명했듯이 수지의 주입압력이 높을 때에는 모세관압의 상대적인 영향은 작아지게 되므로, 유동전단면의 이동과 모양의 변화에 미치는 모세관압의 영향은 거의 무시할 만하다. 수지는 모세관압의 영향이 거의 없으므로 그림의 (a)와 같이 흐름에 대한 저항이 가장 작은 곳에서 가장 빠르게 흐르게 된다. 수지는 (b)와 같이 새로운 섬유다발을 만났을 때에도 유동전단면의 모양은 큰 변화 없이 (c)와 (d)를 거쳐 (e)에 이르

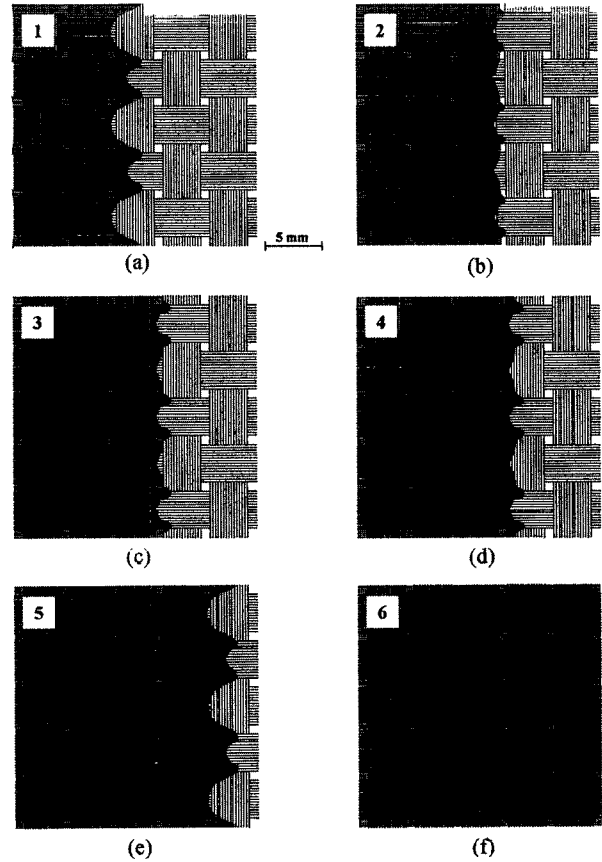


Fig. 12. Schematic diagram of the advancing flow front at high pressure and capillary number of  $4.02 \times 10^{-3}$ . The viscosity of the silicone oil is 1000cs and the porosity of the fiber mat is 0.43.

기까지 저항이 가장 작은 곳에서 가장 빨리 흐르게 되어, 섬유조직 내의 공기는 모두 빠져나가고, 따라서 기공은 형성되지 않는다. 그림의 (f)는 수지가 섬유조직 내로 완전히 차들어 갔을 때의 것으로 기공은 전혀 보이지 않는다.

이러한 현상은 수지의 침투속도가 증가하면 기공의 수가 증가한다는 기존의 연구결과[10]와 상반되는 것처럼 보인다. 그러나 그들의 연구는 섬유다발 내부의 미세기공에 관한 것으로 본 연구의 거대기공과는 다른 측면의 결과이다. 또한 기공의 모양도 거대기공은 원형인데 반해 미세기공은 막대형임을 관찰할 수 있었는데 이에 대한 자세한 설명은 후후의 연구결과 발표에서 다루고자 한다.

#### 4.4. 기공의 함량에 대한 정량적 해석

섬유조직 내로 수지가 함침될 때 형성되는 기공의 함량은 모세관압의 상대적인 영향의 크기에 의해 결정된다. 이러한 모세관압의 상대적인 차이는 수지의 주입압력과 관련되어 있고, 수지의 주입압력은 수지의 침투속도를 결정한다. 따라서 모세관압의 상대적인 차이에 의해 형성된 기공의 함량을 수지의 침투속도와 관련된 무차원수인 모세관수의 변화와 관련지어 정량적인 해석을 수행하였다.



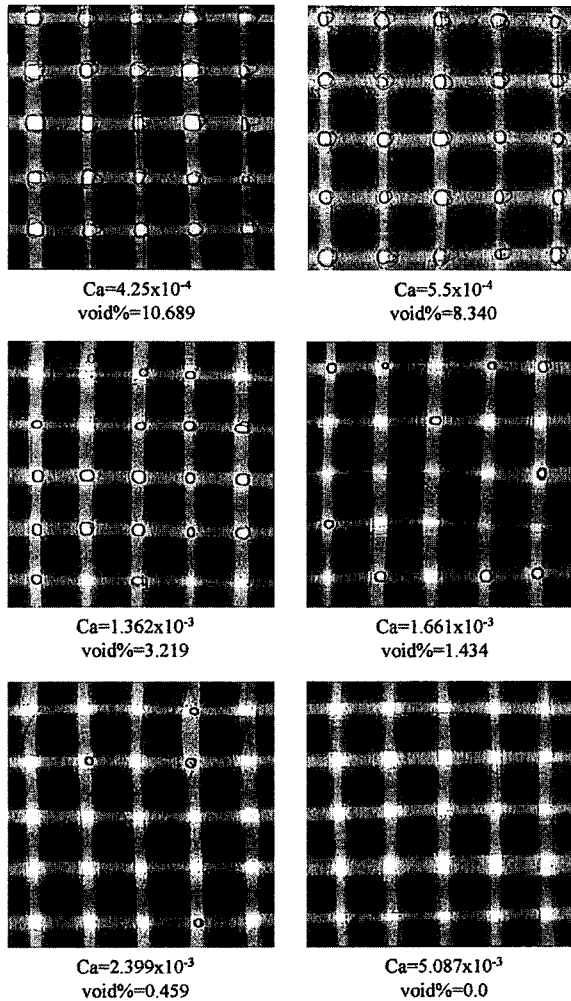


Fig. 13. Photographs of the macro void with various capillary number. The viscosity of the silicone oil is 1000cs and the porosity of the fiber mat is 0.43.

수지의 주입압력을 변화시켜 수지의 침투속도를 조절함으로써 모세관수를 결정하였다. 모세관수를 점차 증가시키면서 형성된 기공을 촬영하였으며, 수지의 점도와 섬유조직의 기공률을 달리하여 반복실험을 수행하였다.

Fig. 13은 모세관수에 따라 기공을 촬영한 사진이다. 모세관수가 증가함에 따라 기공의 함량이 감소하고 있으며, 어느 이상의 모세관수에서는 기공이 형성되지 않음을 관찰할 수 있다. 이 사진들을 화상 해석 기법에 의해 처리하여 섬유조직 전체 면적에 대한 기공의 면적의 비로써 기공의 함량을 계산하였다.

Fig. 14는 여러 점도에 대해 모세관수에 따른 기공의 함량을 나타낸 것이다. 점도에 관계없이 유사한 경향을 보이고 있다. 임계모세관수(Ca=2.75×10<sup>-3</sup>) 이상에서는 기공이 형성되지 않으며, 임계모세관수 이하에서는 모세관수가 감소함에 따라 기공의 함량이 지수적으로 증가함을 알 수 있다. 이는 일방향 유리섬유에 대한 결과[16]와 유사한데, 섬유조직의 형태가 기공형성에 미치는 영향에 대해서

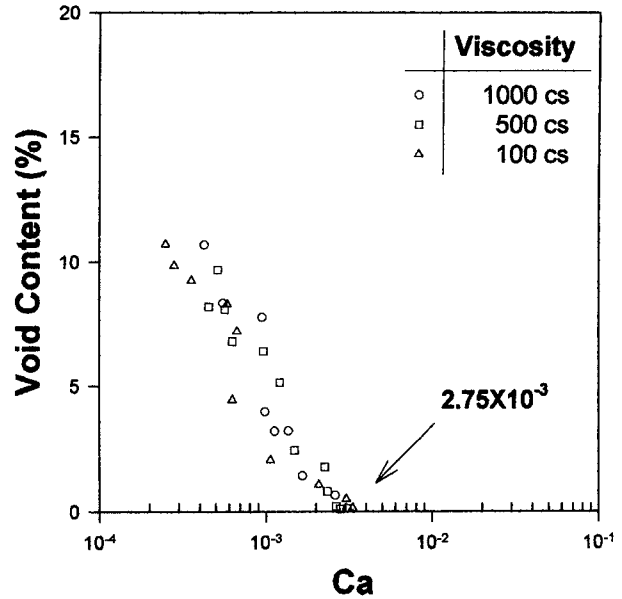


Fig. 14. Void content as a function of capillary number(Ca) with various viscosities of the silicone oils when the porosity of the fiber mat is 0.43.

는 더 많은 연구가 이루어져야 할 것이다. 모세관수가 감소한다는 것은 식 (8)에서 수지의 점도와 표면장력이 일정하므로, 수지의 주입속도가 감소한다는 것이고, 수지의 주입속도가 감소한다는 것은 수지의 주입압력이 작아진다는 것을 의미한다. 수지의 주입압력이 작아지면 모세관압의 상대적인 영향은 커지게 되며, 이로 인해 포획된 기공의 함량도 증가하게 되는 것으로 해석할 수 있다. 본 연구에서는 표면장력의 영향은 다루지 않았는데, 수지의 표면

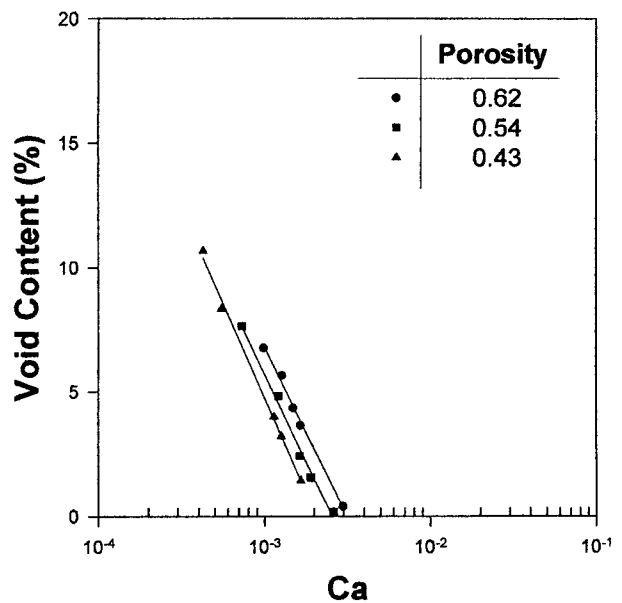


Fig. 15. Void content as a function of capillary number(Ca) with various porosities of the fiber mat when the viscosity of the silicone oil is 1000cs.

장력이 증가하면 섬유직조 내에서 기공이 빠져나오기 힘들므로 기공이 많이 생성된다고 알려져 있다[10].

Fig. 15는 여러 기공률에 대해 모세관수에 따른 기공의 함량을 나타낸 것이다. 모세관수에 대한 기공의 함량은 앞의 결과와 유사한 경향을 보이고 있으며, 같은 모세관수에서 기공률이 감소함에 따라 기공의 함량이 약간 감소함을 알 수 있다. 모세관수가 같다는 것은 수지의 침투속도가 같다는 것을 의미한다. 수지의 침투속도를 같게 하기 위해서는 기공률이 낮을수록 주입압력을 더 높게 해주어야 하므로, 이로 인해 모세관압의 상대적인 영향이 감소하게 되어 기공의 함량도 감소하는 것으로 해석할 수 있다.

## 5. 결 론

본 연구에서는 빔 형태의 금형을 대상으로 평직형태의 유리섬유와 실리콘 오일을 사용하여 수지가 섬유직조 내로 함침되는 과정에 대해 유동가시화 실험을 수행하였다. 여러 압력에 대해 일정한 시간간격으로 수지의 유동전단면의 위치를 촬영하여 시간과 압력에 따른 수지의 침투깊이를 측정함으로써 섬유직조의 투과계수와 모세관압을 구하였다. 금형의 일정한 위치에서 유동전단면의 이동과 기공의 형성과정을 비디오 카메라를 이용하여 근접 확대 촬영함으로써 기공의 형성과정에 미치는 모세관압의 영향을 해석하였다. 또한 화상자료를 화상 해석 기법을 사용하여 분석함으로써 모세관수에 따른 기공의 함량을 전체 면적에 대한 기공의 면적의 비로 측정하였다. 이상의 실험적 연구의 결과로부터 다음과 같은 결론을 얻었다.

(1) 섬유직조의 투과계수는 실험에 사용된 압력범위 내에서 압력에 무관하였으며, 기공률이 증가함에 따라 섬유직조 내의 공극의 증가에 기인하여 급격히 증가하였다. 모세관압은 기공률이 감소함에 따라 급격히 증가하였으며, 기공률이 낮고 저압공정일 때 모세관압은 함침공정에서 무시할 수 없음을 알 수 있었다.

(2) 수지의 주입압력에 대한 모세관압의 상대적인 차이에 의해 기공이 형성되고 있음을 관찰할 수 있었다. 즉, 수지의 주입압력이 낮을 때, 모세관압의 상대적인 영향은 커지게 되고, 모세관압이 수지의 유동전단면의 이동과 모양의 변화에 큰 영향을 미치고, 그 결과 섬유직조 내의 공기가 빠져나가지 못하고 포획되어 기공이 형성되었다.

(3) 수지가 섬유직조 내로 함침될 때, 임계모세관수( $Ca \sim 2.75 \times 10^{-3}$ ) 이상에서는 기공이 형성되지 않았으며, 그 이하에서는 모세관수가 감소함에 따라 기공의 함량이 지속적으로 증가하였다. 또한, 기공의 함량은 점도에 관계없이 유사한 경향을 보였으며, 같은 모세관수에서 기공률이 감소함에 따라 기공의 함량이 감소하였다.

## 감사의 글

본 연구는 학술진흥재단의 지원을 받았으며, 이에 깊은 감사를 드립니다.(과제번호 1997-001-E00454)

## 참고문헌

1. Geon-Woong Lee, Mi Hye Lee, Seong Woo Kim and Ki-Jun Lee, *Korean J. Rheology*, **7**(2), 139 (1995).
2. Jae-Do Nam, Seung Jong Lee, Ki-Jun Lee, *Rheology[Korea]*, **7**(1), 1, (1995).
3. K. L. Adams, B. Miller, and L. Rebenfeld, *Polym. Eng. Sci.*, **26**, 1434 (1986).
4. K. L. Admas, W. B. Russel, and L. Rebenfeld, *Int. J. Multiphase Flow*, **14**, 203 (1988).
5. Y. R. Kim, S. P. McCathy, J. P. Fanucci, S. C. Nolet, and C. Koppernaes, 22nd SAMPE Technical Conference, 16 (1991).
6. J. P. Coulter and S. C. Guceri, *J. Reinforced Plastics and Composites*, **7**, 200 (1988).
7. W. D. Bascom and J. B. Romans, *Ind. Eng. Chem. Prod. Res. Dev.*, **7**, 172 (1968).
8. M. R. Judd and W. W. Wright, *SAMPE J.*, **14**, 10 (1978).
9. N. Patel, V. Rohatgi, and L. James Lee, *Polym. Eng. Sci.*, **35**(10), 837 (1995).
10. Yung-Tin Chen, H. Ted Davis, and C. W. Macosko, *AIChE J.*, **41**(10), 2261 (1995).
11. K. J. Ahn and J.C. Sefferis, and J. C. Berg, *Polym. Compo.*, **12**(3), 146 (1991).
12. J. G. Williams, C. E. M. Morris, and B. C. Ennis, *Polym. Eng. Sci.*, **14**, 413 (1973).
13. L. Skartsis, B. Khomami, and J. L. Kardos, *SAMPE J.*, **28**(5), 19 (1992).
14. T. S. Lundstrom and B. R. Gerbart, *Polym. Compo.* **15**(1), 25 (1994).
15. Yung-Tin Chen, C. W. Macosko, and H. Ted Davis, *AIChE J.*, **41**(10), 2274 (1995).
16. V. Rohatgi, N. Patel, and L. James Lee, *Polym. Compo.*, **17**(2), 161 (1996).