

## 論文

## 섬유 보강재의 면내 투과성 계수 결정 방법에 관한 연구

엄문광\* · 이상관\* · 김태욱\* · 김종훈\*\* · 고성위\*\*

## A Study on the Determination of In-Plane Permeability of Fiber Preforms

Moon-Kwang Um\*, Sang-Kwan Lee\*, Tae-Wook Kim\*, Jong-Hoon Kim\*\*, and Sung-Wi Koh\*\*

## ABSTRACT

As the resin flow is taken place essentially in many manufacturing processes of composites materials, characterization of the reinforcement and the matrix is very important. The reinforcement property related to the resin flow is permeability, which is dependent on the flow direction, the preform pattern and the fiber content. A simple approximate solution describing radial encroachment of a viscous polymer into a homogeneous orthotropic porous medium, is derived and its results are compared with numerical ones using boundary element method. Two results show good agreement. A simple procedure incorporating approximate solution with experimental data is proposed to determine the principal in-plane permeabilities of fiber preforms. Accurate and reliable permeability data can be obtained using this technique.

## 초 록

복합재료 성형시에는 기지재료가 보강재 사이로 침투되는 수지 유동[1]이 필연적으로 형성되므로, 이들 성형 공정을 해석하려면 유동 특성의 정량화는 필수적이다. 수지 유동시 보강재의 유동 전도도에 대한 실제적 척도인 투과성 계수(permeability)는 보강재의 형상, 직조패턴, 섬유 체적율 등에 의존하는 물성이다. 따라서 본 연구에서는 원형 주입구를 통하여 비등방성 매질로 수지가 충전되는 과정을 예측할 수 있는 근사해의 유도, 수치 해와의 검증을 통하여 투과성 계수를 간단하게 결정할 수 있는 모델을 개발하였으며, 다공성 매질의 비등방도가 심할 경우, 이를 보다 정확하게 결정할 수 있는 방법도 제시하였다. 주입구에서의 수지 주입 압력 조건에 따라서 투과성 계수가 영향 받음을 실험으로 확인하였으며, 이를 개선하기 위하여 주입압 조건에 관계없이 투과성 계수를 결정할 수 있도록 근사해를 확장하고 실험으로 검증하였다.

## 1. 서 론

수지 유동시 보강재의 유동 전도 특성인 투과성 계수에 대하여 많은 연구가 진행되었는데, 초기에는 주로

일방향 섬유 다발에 대한 연구가 Autoclave 성형법에서의 보강재 유동 특성을 정량화하기 위한 목적으로 수행되었다. 그러나 점차로 기존 성형법에 비해 보다 생산적인 성형법의 필요성이 대두되어 이에 대한 대안

\*한국기계연구원 복합재료그룹

\*\*부경대학교 제어기계공학과

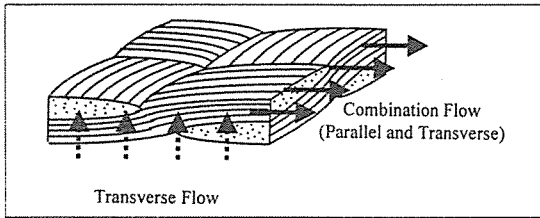


Fig. 1. Some flow patterns encountered in manufacturing processes

으로 RTM(Resin Transfer Molding, 수지충전공정) 성형법에 대한 관심이 고조되었다. RTM공정에서 주로 쓰이는 보강재는 섬유직물이나 Random Mat형태로, 각각의 섬유 가닥들이 경험하는 유동 형태는 수지가 섬유 축에 수직 방향(transverse flow, Fig. 1)과 평행 방향(parallel flow, Fig. 1)으로 반복적으로 충전해가는 형태이다. 반면에 Autoclave성형법에서는 일방향 프리프레그(prepreg)나 직물 프리프레그를 이용하여 복합재를 성형할 경우, 공정 특성상 섬유 축 수직 방향(Fig. 1)의 유동이 주로 수반된다. 그리고 Autoclave성형법에서의 투과성 계수는 실험적 접근, 수치해적 접근 및 엄밀 해를 이용한 방법 등 다양한 연구[2-12]가 진행되었으나 RTM 공정에서는 실험적 방법으로 면내 투과성 계수(in-plane permeability)를 결정하는 방법들[13-15]이 제시되고 있다. 본 연구에서는 면내 투과성 계수를 결정하는 새로운 방법을 제시하고자 한다.

## 2. 근사해를 통한 접근

### 2.1 근사해 유도

보강재의 투과성 계수는 직조 형태가 변화함에 따라

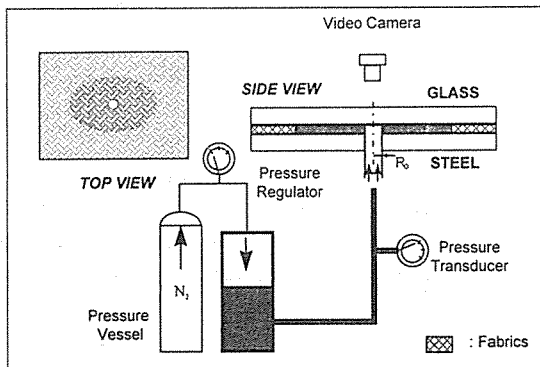


Fig. 2. Experimental setup for permeability measurement

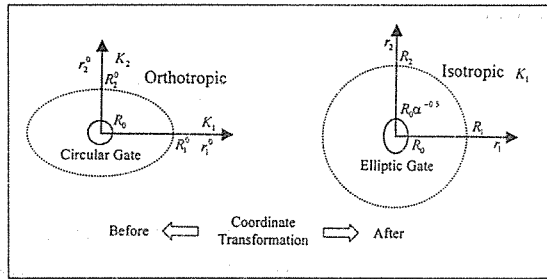


Fig. 3. Definitions used in the derivation of approximate solution

등방성(isotropic) 이나 직교 이방성(orthotropic)을 나타내는데, 이를 효과적으로 정량화하기 위한 방법으로 2차원 반경방향 유동(Fig. 2)을 형성하는 것이다.

선형 주입구(line gate injection)를 이용하여 1차원 유동을 형성하는 경우[16]도 있지만 이 방법은 수지 주입구와 유동 선단을 제외한 끝단 영향(edge effect)을 제거하기가 매우 힘든 단점이 있다.

매질이 직교 이방성일 경우 유동 해석을 보다 쉽게 하기 위하여 아래와 같은 좌표 변환(Fig. 3)을 적용하였다.

$$r_1 = r_1^0 \dots \dots \dots (1)$$

$$r_2 = r_2^0 \cdot \alpha^{-0.5} \dots \dots \dots (2)$$

$$\alpha = K_2/K_1 \quad (K_1 > K_2) \dots \dots \dots (3)$$

여기서  $r$ 은 장단축 반경,  $K$ 는 투과성 계수,  $\alpha$ 는 비등방도(degree of anisotropy), 하첨자 1, 2는 주축(principal axis)을 의미하며 상첨자 '0'는 좌표 변환전의 값을 의미한다. 매질의 비등방성은 투과성 계수의 차이에 의해 생기므로 투과성 계수의 비를 좌표 변환에 적용하였다. 좌표 변환을 함으로써, 원형 주입구를 통하여 직교 이방성 매질( $K_1, K_2$ )로 수지가 주입되는 경우의 수지 유동 문제가 타원형 주입구를 통한 등방성 매질( $K_1$ ) 내로의 수지 유동 문제로 변환된다.

새로운 좌표계에서는 매질이 등방성이고 주입구가 타원형이므로 시간에 따른 수지 전진면들(family of resin front)의 초점은 주입구에서의 초점(C)과 동일한 타원 형태를 유지하면서 전진한다고 근사할 수 있다.

$$r_2^2 - r_1^2 = R_0^2(\alpha^{-1} - 1) = C^2 \dots \dots \dots (4)$$

여기서  $R_0$ 는 주입구 반경이다. 수지가 충분히 충전 되었을 때는 주입구 형상의 영향이 사라지므로 수지 전진면은 원형으로 복원되리라 예상되는데 윗식은 이를 잘 반영하고 있다.

주입구에서 유입되는 수지에 의해 시간에 따라 유동장이 성장하며, 매 순간의 수지 전진면을 형성한다. 따라서 본 연구에서는 먼저 임의 순간(시간 고정)의 유동장에 대하여 압력 적분을 수행하고 이 결과를 충전 시간의 진행을 고려한 시간 적분을 수행함으로써 유동 근사해를 구하였고 이를 투과성 계수 결정에 이용하였다.

장, 단반경이  $r_1, r_2$ 인 타원(Fig.3)의 유량(Q)은

$$Q = \pi(r_1 \frac{dr_1}{dt} + r_2 \frac{dr_2}{dt}) = \pi(r_1 \cdot \bar{u}_{D,r_1} + r_2 \cdot \bar{u}_{D,r_2}) \dots (5)$$

$$\text{여기서, } \bar{u}_{D,r_1} = -\frac{K_1}{\mu} \frac{dP}{dr_1} \dots (6)$$

$$\bar{u}_{D,r_2} = -\frac{K_1}{\mu} \frac{dP}{dr_2} \dots (7)$$

$\bar{u}_{D,r_1}, \bar{u}_{D,r_2}$ 는 장, 단반경에서의 Darcy 속도[1],  $\mu$ 는 수지 점도,  $P$ 는 압력이다.

식(6), (7)을 이용하여 식(5)를 다시 쓰면

$$\frac{Q}{2\pi} \frac{dr_1}{r_2} = -\frac{K_1}{\mu} dP \dots (8)$$

식(8)을 식(4) 및 압력 경계조건( $P=P_0$  at  $r_1=R_0$ ,  $P=0$  at  $r_1=R_1$ )을 적용하여 임의 순간의 유동장에 대하여 적분하면

$$\frac{Q}{2\pi} \ln \left( \frac{R_1 + \sqrt{R_1^2 + C^2}}{R_0 + \sqrt{R_0^2 + C^2}} \right) = \frac{K_1}{\mu} P_0 \dots (9)$$

수지가 보강재 내로 충전할 때 관찰되는 겉보기 속도(기공 속도,  $\bar{u}_p$ )와 Darcy 속도는 아래의 관계를 만족한다[1].

$$\bar{u}_p = \bar{u}_D / \varepsilon \dots (10)$$

여기서  $\varepsilon$ 는 기공도이다.

식(4)의 미분량과 식(10)을 이용하여 식(5)를 정리

하면

$$Q = \pi \varepsilon (r^2 + \frac{r_1^2}{r_2^2}) \frac{dr_1}{dt} \dots (11)$$

유량 관계식(식11)을 이용하여 유동장의 압력에 관한 적분식(식9)을 재정리하면

$$\frac{\varepsilon}{2} \frac{R_1^2 + R_2^2}{R_2} \ln \left( \frac{R_1 + \sqrt{R_1^2 + C^2}}{R_0 + \sqrt{R_0^2 + C^2}} \right) \frac{dR_1}{dt} = \frac{K_1}{\mu} P_0 \dots (12)$$

시간에 따른 장축의 전진량( $R_1$ )은 초기 조건( $R_1=R_0$  at  $t=0$ ,  $R_1=R_1$  at  $t=t$ )을 적용하여 윗식을 적분하여 구할 수 있다.

$$\frac{\varepsilon}{2} \int_{R_0}^{R_1} \frac{R_1^2 + R_2^2}{R_2} \ln \left( \frac{R_1 + \sqrt{R_1^2 + C^2}}{R_0 + \sqrt{R_0^2 + C^2}} \right) \frac{dR_1}{dt} = \frac{K_1}{\mu} \int_{R_0}^{R_1} P_0 dt \dots (13)$$

식(13)을 새로운 변수  $\omega (=R_1+R_2)$ 를 도입하고 초기 조건을 치환( $\omega_0=R_0(1+\alpha^{-0.5})$  at  $R_1=R_0$ ,  $\omega=\omega_f$  at  $R_1=R_1$ )하여 재정리하면

$$\int_{\omega_0}^{\omega_f} (\omega + \frac{C^4}{\omega^3}) \ln \left( \frac{\omega}{\omega_0} \right) d\omega = \frac{4K_1}{\varepsilon \mu} \int_0^t P_0 dt \dots (14)$$

수지 전진면은 주입구 초점과 동일한 초점을 갖는 타원 형태로 성장하므로 장, 단 반경은 독립적으로 진행하지 않는다. 따라서 이를 반영하는 새로운 변수  $\omega$ 가 도입되었다.

식(14)를 무차원 변수  $x(=w/w_0)$ 를 도입하고 초기 조건( $x=1$  at  $\omega=\omega_0$ ,  $x=x_f$  at  $\omega=\omega_f$ )을 대입하여 무차원화 하면

$$\int_0^{x_f} (A^2 x + B^2/x^3) \ln x dx = \frac{4K_1}{\varepsilon \mu R_0^2} \int_0^t P_0 dt \dots (15)$$

$$\text{여기서, } A = 1 + \alpha^{-0.5} \dots (16)$$

$$B = (\alpha^{-1} - 1)/(1 + \alpha^{-0.5}) \dots (17)$$

식(15)를 적분하면

$$\frac{1}{4} [A^2 (2x_f^2 \ln x_f - x_f^2 + 1) - B^2 (\frac{2}{x_f^2} \ln x_f + \frac{1}{x_f^2} - 1)]$$

$$= \frac{4K_1}{\varepsilon\mu R_0^2} \int_0^t P_0 dt \dots\dots\dots (18)$$

식(18)은 투과성 계수가 등방성 매질( $K_1$ )로 변환된 좌표계에서의 유동 근사해이다. 이식은 비등방도  $\alpha$ 를 알고 있다면 실험 data로부터 직접적으로 투과성 계수를 결정할 수 있다. 실험에서 측정된 직교 이방성 매질에서의 장, 단반경 전진량( $t, r_1^0, r_2^0$ )을 등방성 매질에서의 전진량( $t, r_1, r_2$ )으로 변환(식1, 2)하면 이로부터  $\omega_j (=r_1+r_2)$ ,  $x_f$ 를 구할 수 있으므로, 식(18)의 좌변을 결정할 수 있다. 따라서 식(18)은 장축 투과성 계수  $K_1$ 에 대한 일차식으로 가정할 수 있으므로 일차원 근사를 통해 투과성 계수를 결정할 수 있고 비등방도를 이용하여  $K_2$ 를 결정할 수 있다.

식(18)을 다공성 매질내 수치 유동 예측에 활용하고자 할 경우는  $x_f$ 값을 실제 장, 단반경 전진량으로 환산할 필요가 있다. 이 경우는 아래의 식을 이용하면 된다.

$$r_1^0 = \frac{R_0}{2} (Ax_f - \frac{B}{x_f}) \dots\dots\dots (19)$$

$$r_2^0 = \frac{R_0}{2} (Ax_f - \frac{B}{x_f}) \alpha^{0.5} \dots\dots\dots (20)$$

주입구 압력이 일정할 경우 식(18)은 아래와 같이 단순화 된다.

$$\frac{1}{4} [A^2(2x_f^2 \ln x_f - x_f^2 + 1) - B^2(\frac{2}{x_f^2} \ln x_f + \frac{1}{x_f^2} - 1)] = \frac{4K_1 P_0}{\varepsilon\mu R_0^2} t \dots\dots (21)$$

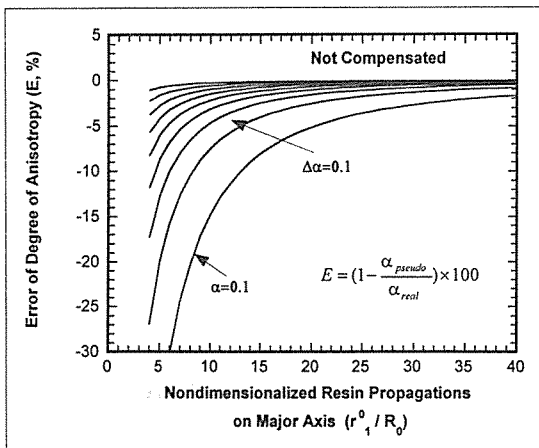


Fig. 4. Error percentages of degree of anisotropy(numerical results)

투과성 계수 결정시 대부분의 경우는 주입압 일정 조건으로 실험을 하게 되므로 식(21)을 이용하면 된다. 그러나 높은 수치 주입압에 의한 주입구 부근 보강재의 변형이 우려될 경우[16]는 주입압을 서서히 증가시켜야 하므로 식(18)을 사용하는 것이 바람직하다.

보강재가 등방성 매질( $\alpha=1$ )일 경우 윗식은 아래와 같이 단순화 할 수 있으며, 다른 연구자의 결과[17]와 잘 일치한다.

$$2(\frac{R_f}{R_0})^2 \ln(\frac{R_f}{R_0}) - (\frac{R_f}{R_0})^2 + 1 = \frac{4K_1 P_0}{\varepsilon\mu R_0^2} t \dots\dots\dots (22)$$

## 2.2 비등방도의 결정

시간에 따른 수치 전진면들의 초점이 주입구에서의 초점과 동일하다는 가정이 완벽하게 성립한다면, 비등방도는 식(4)를 원래의 좌표계로 변환한 식(23)과 실험에서 측정한 시간에 따른 반경 전진량( $r_1^0, r_2^0$ )으로부터 직접적으로 결정할 수 있다.

$$\alpha_{pseudo} = \{(r_2^0)^2 - R_0^2\} / \{(r_1^0)^2 - R_0^2\} \dots\dots\dots (23)$$

여기서  $\alpha_{pseudo}$ 는 가상 비등방도이다. 그러나 위의 가정은 충전 초기에는 약간의 오차가 존재(Fig.4)하므로, 비등방도의 결정에도 영향을 미친다. Fig.4에서 보면 비등방성이 증가( $\alpha \rightarrow 0$ )할수록 가상 비등방도( $\alpha_{pseudo}$ )를 실제 비등방도( $\alpha_{real}$ )로 결정하기에는 부적절하며 적당한 보정이 필요함을 알 수 있다.

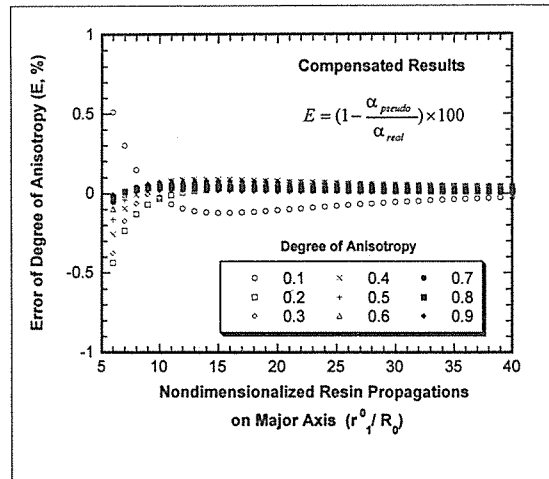


Fig. 5. Compensation of the degree of anisotropy

따라서 임의의 실제 비등방도( $\alpha_{real}$ )를 가정하여, 수치 해석으로 계산한 장단축 전진량으로부터 가상 비등방도를 구한 후, 아래와 같은 보정 함수( $f_c$ )를 정의하여 가상 비등방도를 수정하였다.

$$f_c = \alpha_{real} / \alpha_{pseudo} = 1 - (1 - \alpha_{pseudo}) \cdot f_1(\rho_1) \cdot f_2(\alpha_{pseudo}) \cdots (24)$$

$$\text{여기서 } f_1(\rho_1) = \rho_1^{-1.6903} \cdot \exp(-2.1225/\rho_1) \cdots (25)$$

$$f_2(\alpha_{pseudo}) = 1.5763 \cdot \alpha_{pseudo}^{-1.7936} \cdots (26)$$

보정 함수는 적절한 변수들( $\rho_1 = r_1^0/R_0$ ,  $\alpha_{pseudo}$ )을 이용하여 곡선 근사하여 결정하였다(Fig.5).

### 3. 수치 해석에 의한 검증

앞에서 유도한 근사해를 검증하기 위하여, 등방성 매질내에서 타원형 주입구를 통해 주입되는 수지의 시간에 따른 진행 정도를 수치 해석을 통하여 계산하였다. 본 연구에서는 계산 시간과 격자 생성(node generation)등에 잇점이 있는 경계 요소법[18]을 사용하였다.

다공성 매질내에서의 수치 유동은 Darcy식(식6)을 질량 보존식에 대입하여 얻은 압력에 관한 지배 방정식을 이용하여 해석할 수 있다.

$$\text{질량 보존식 : } \nabla \cdot \bar{u}_D = 0 \cdots (27)$$

$$\text{지배 방정식 : } K_1 \left( -\frac{\partial^2 P}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 P}{\partial y^2} \right) = 0 \cdots (28)$$

격자 수 및 계산 시간 절감을 위하여 전체 충전 영역의 1/4 만을 계산 영역으로 설정하였다. 임의 시간  $t$ 에서의 계산 영역(수지 충전 영역)에 대하여 경계 요소법을 적용하여 위의 지배방정식을 풀면 수치 전진 선단에서의 압력 구배를 구할 수 있다. 지배 방정식을 풀기 위해서는 경계 조건(Fig.6, 식(29)-(31))이 필요하므로, 수치 주입구나 수치 전진면에서는 압력 조건을, 대칭면에서는 질량 전달이 없으므로 속도 성분이 '0'인 조건을 적용하였다. 미 충전 영역에서는 공기의 점도가 수지에 비하여 매우 작으므로 수치 전진면에서의 공기에 의한 압력은 무시하였다.

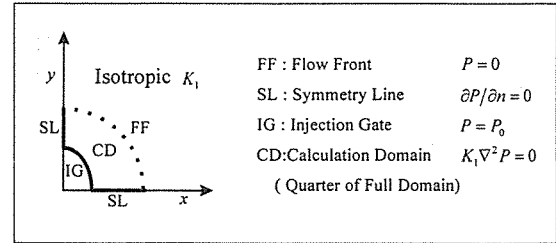


Fig. 6. Boundary conditions used in numerical analysis

$$\text{수지 전진면 : } P=0 \cdots (29)$$

$$\text{수지 주입구 : } P=P_0 \cdots (30)$$

$$\text{대칭면 : } \frac{\partial P}{\partial n} = 0 \cdots (31)$$

여기서  $n$ 은 벽면에 수직인 방향을 의미한다.

계산에는 두 격자사이의 압력 및 압력구배 값이 선형적으로 변하는 1차 경계 요소(linear boundary element)를 사용하였다. 경계 요소는 1차 요소 외에도 두 격자 사이의 값이 일정한 상수 요소(constant element)도 있으나 계산의 정확도를 높이기 위하여 배제하였다.

앞에서 구한 시간  $t$ 에서의 압력 구배를 식(6), (10)에 적용하여 결정된 유동 선단 속도에 시간 증분( $\Delta t$ )을  $t+\Delta t$ 곱하여 시간 후의 수치 선단을 결정할 수 있다.

$$\bar{S}(t+\delta t) = \bar{S}(t) + \bar{u}_p \delta t = \bar{S}(t) + \frac{K_1}{\epsilon \mu} \nabla p \delta t \cdots (32)$$

여기서  $n$ 은 격자의 변위이다. 따라서 앞에서 언급한 과정을 반복적으로 수행하면 시간에 따른 유동 선단을 연속적으로 전진시킬 수 있다. 유동 선단을 전진시키는 과정에 격자(node)가 대칭면 밖으로 나가면, 시간  $t$ 에서의 격자 위치와  $t+\nabla t$ 에서의 격자가 이루는 직선과 대칭면과의 교차점에 새로운 격자를 위치시켰다. 이 경우 질량 손실을 최소화하기 위하여 유동 선단의 전진 시간 간격을 충분히 작게 하여 계산을 수행하였다. 주입구에서 유량 일정 조건을 적용하여 수치 전진에 따른 질량 손실을 검사해 본 결과 질량 손실이 미소함을 확인하였다.

근사해를 검증하기 위해 수치 해석에 사용된 조건

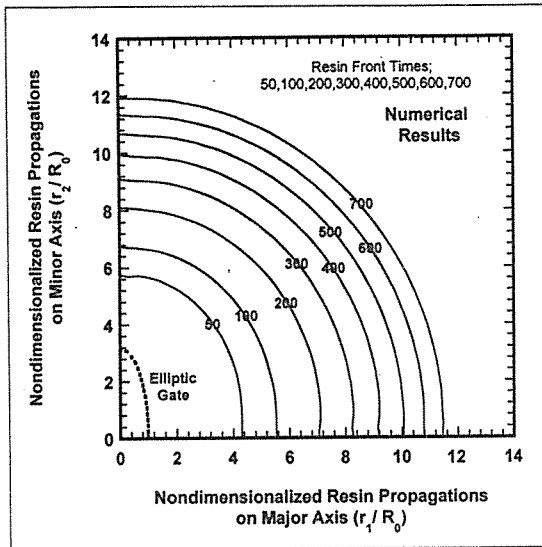


Fig. 7. An example of resin front propagation(numerical results)

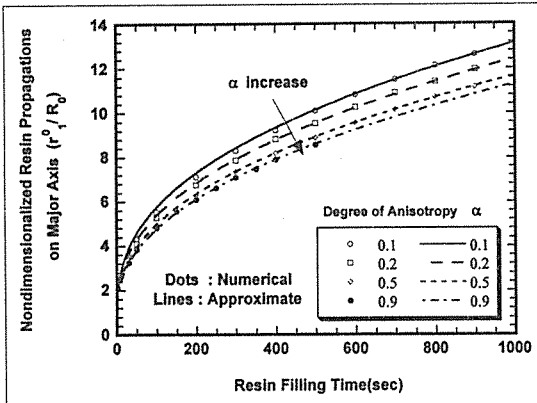


Fig. 8. Comparison of resin propagations on major axis between numerical result and approximate analysis

들로서, 수지 점도는  $34.896 \text{ Pa} \cdot \text{sec}$ , 기공도  $\varepsilon$ 는 0.3, 장축 투과성 계수  $K_l$ 은  $2.18 \times 10^{-10} \text{ m}^2$ , 주입압  $P_0$ 는  $1.46 \times 10^5 \text{ Pa}$ 이며 좌표 변환 전의 주입구 반경  $R_0$ 는  $5 \text{ mm}$ 이다. 주입구 형상은 비등방도에 따라 원형 형상이 적절한 타원 형상으로 변환된다. 위와 동일한 조건하에서 비등방도를 변화 시키며 계산을 수행했으며, 비등방도가 '0.1'인 경우에 대한 수지 충전 계산 결과가 Fig.7에 주어져 있다. 타원형 주입구에서 수지가 주입되지만 시간이 경과함에 따라 주입구의 영향이 사라지고 수지 전면의 형상이 원형으로 복원됨을 볼 수 있다. 매질이 등방성으로 복원될수록( $\alpha \rightarrow 1$ ) 수지 선

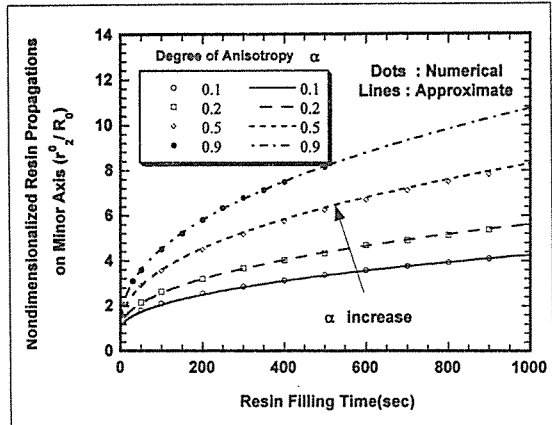


Fig. 9. Comparison of resin propagations on major axis between numerical result and approximate analysis

단이 빠르게 원형으로 복원됨을 확인하였다.

Fig.8, Fig.9에서는 실제 좌표계 상에서 매질의 비등방도를 변화시키면서 근사해 및 수치해석을 통하여 구한 시간에 따른 무차원 장단축 전진량을 비교하였다. 충전 초기에는 약간의 오차가 존재하지만 충전이 진행됨에 따라 두 결과가 잘 일치함을 확인 하였다

#### 4. 실험 및 고찰

일정 수지 주입압 조건 및 가변 주입압인 경우에 대하여 보강재의 투과성계수를 결정하기 위한 실험을 수행하였다. 본 실험에서는 보강재로 유리섬유직물(평직, GF126, 한국화이버)을, 수지로는 점도(식33)가 온도에만 의존하는 실리콘 오일(KF96-350cs, Shinetu Co.)을 사용하였다.

$$\mu = 2.0 \times 10^{-2} \cdot \exp\left(\frac{1.85 \times 10^3}{T[K]}\right) \text{ Pa} \cdot \text{sec} \dots (33)$$

본 실험에 사용한 실험 장치의 개략도가 Fig.2에 주어져 있다. 보강재 내로의 수지 함침 과정을 관찰하기 위해 유리판을 사용하였으며, 비디오 카메라로 수지의 함침 과정을 기록하였다. 질소를 이용하여 수지를 가압하였으며 가압력의 변화는 질소압을 변화시키는 방법을 채택하였다. 금형내 보강재에 가해지는 정확한 압력을 측정하기 위해 수지 주입구 근처에 압력측정기(pressure transducer)를 부착하였다.

Table 1. Determination of permeability under the constant pressure injection

Time(sec)	$r_1'(m)$	$r_2'(m)$	$\alpha_{pseudo}$	x	y
168	0.0480	0.0245	0.209	168	72.2
211	0.0525	0.0260	0.200	211	90.0
280	0.0580	0.0290	0.212	280	122
336	0.0620	0.0310	0.216	336	148
391	0.0660	0.0330	0.219	391	176
529	0.0755	0.0365	0.209	529	243
663	0.0810	0.0405	0.228	663	309
751	0.0860	0.0435	0.236	751	368
833	0.0900	0.0455	0.237	833	415
925	0.0960	0.0475	0.228	925	478
1010	0.0995	0.0490	0.227	1010	521
1210	0.106	0.0505	0.215	1210	585
1330	0.111	0.0545	0.228	1330	690

x=time, y=left-hand side of Eqn (18)

#### 4.1 수지 주입압 일정 조건에서의 투과성 계수 결정

Table 1에 실험에서 측정한 보강재(GF618)의 비등방도 및 투과성 계수를 결정하는 과정을 기술하였다. 실험에 사용된 조건들로, 실험시 온도는 25.2 °C, 수지 점도는 9.46 Pa · sec, 기공도  $\epsilon$ 는 0.504, 주입압  $P_0$ 는  $5.44 \times 10^5$  Pa, 주입구 반경  $R_0$ 는 8 mm 이다. 실제 비등방도( $\alpha_{real}$ )는 가상 비등방도( $\alpha_{pseudo}$ )를 평균한 값을 보정 함수(식24)로 보정하여 결정하였는데 그 값은 0.220 이다. 최종적으로 식(18)을 일차원 근사( $y=a \cdot x$ ,  $a=4K_1P_0/\epsilon\mu R_0^3$ )하여 장축 투과성 계수  $K_1$ 을 결정하였는데 그 값은  $6.98 \times 10^{-11} m^2$ 이며 단축 투과성 계수  $K_2$ 는  $\alpha_{real}$ 와  $K_1$ 으로부터  $1.54 \times 10^{-11} m^2$ 을 얻었다.

#### 4.2 가변 수지 주입압 조건에서의 투과성 계수 결정

Table 2에 수지 주입압이 점진적으로 증가(Fig.10)하는 경우에 대한 비등방도 및 투과성 계수를 결정하는 과정을 기술하였다. 실험에 사용된 조건들로, 실험시 온도는 17.3 °C, 수지 점도는 11.18 Pa · sec이며 기타 조건은 위의 실험과 동일하다. 최종적으로 결정된 비등방도  $\alpha_{real}$ 는 0.229, 장축 투과성 계수  $K_1$ 은  $8.51 \times 10^{-11} m^2$ , 단축 투과성 계수  $K_2$ 는  $1.95 \times 10^{-11} m^2$ 이다.

#### 4.3 주입 압력 조건에 따른 투과성 계수의 영향

수지 주입압이 일정할 경우 수지 충전 초기에는 보

Table 2. Determination of permeability under the variable pressure injection

Time(sec)	$r_1'(m)$	$r_2'(m)$	$\alpha_{pseudo}$	x	y
535	0.0390	0.0240	0.315	$5.77 \times 10^7$	51.2
766	0.0495	0.0270	0.250	$9.27 \times 10^7$	86.3
1110	0.0600	0.0300	0.214	$1.64 \times 10^8$	132.
1330	0.0700	0.0330	0.194	$2.29 \times 10^8$	188
1560	0.0800	0.0380	0.203	$3.10 \times 10^8$	273
1800	0.0875	0.0430	0.222	$4.01 \times 10^8$	364
2010	0.0985	0.0480	0.222	$5.05 \times 10^8$	492
2260	0.108	0.0520	0.220	$6.42 \times 10^8$	611
2550	0.118	0.0570	0.224	$8.02 \times 10^8$	772

$x = \int P_0 dt$ , y=left-hand side of Eqn (18)

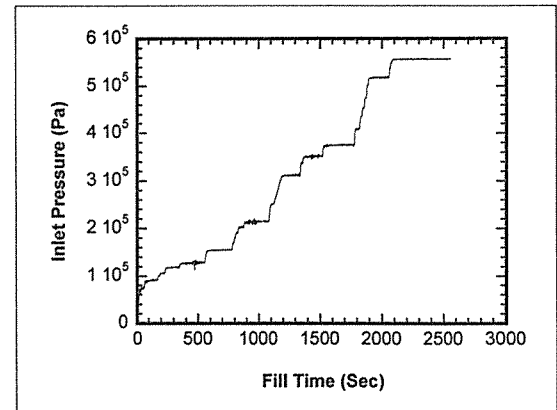


Fig. 10. Inlet pressure applied in the sample experiment

강 섬유 직물에 과도한 압력 구배가 형성되므로 보강재에 작용하는 점성력(Drag Force) 또한 매우 크다. 따라서 섬유 직물이 점성력에 의해 변형될 가능성이 매우 높아서 실험으로 결정되는 투과성 계수 또한 상당한 영향을 받는다. 그러므로 이러한 영향을 최소화하기 위하여 수지 주입 초기에는 주입압을 낮추어 압력 구배를 낮출 필요가 있다. 본 연구에서는 동일 보강재에 대하여 일정 수지 주입압 조건 및 가변 주입압 조건으로 수지 충전시의 투과성 계수 변화를 고찰하였다. 동일 보강재이면 비등방도가 같으므로, 장단축 전진량의 편차를 비교해 봄으로써 수지 주입 조건에 따른 투과성 계수 영향을 관찰할 수 있다.

Fig.11은 수지 주입압이 일정할 경우(실험별로는 주입압이 다름), GF618의 시간에 따른 수지 전진량을 측정한 것이다. 이 경우 수지 전진량에 상당한 편차가

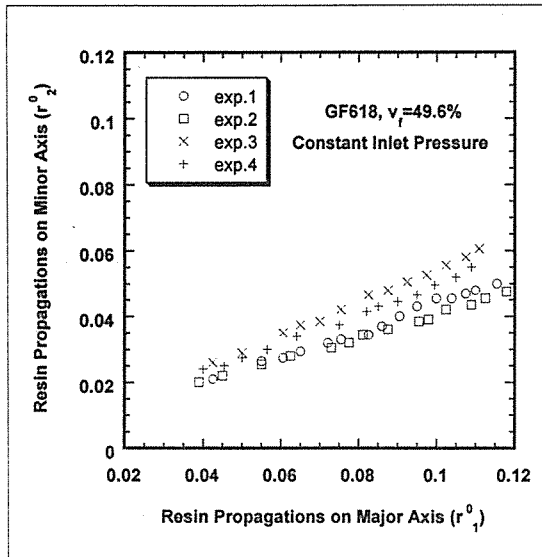


Fig. 11. Resin front propagation variations in case of constant pressure injection

발생함을 볼 수 있는데, 이는 함침 초기 점성력에 의한 보강재의 형상 변형이 원인이다. 각각의 실험에서 보면, 수지 전진 길이 비(비등방도)에 약간의 오차가 발생하는 것은 보강재 적층시 직조 형상이 호트러저 생기는 실험 오차에 의한 것이다.

Fig.12는 가변 주입압(서서히 주입압을 증가 시킴)의 실험 결과로, 수지 전진량의 편차가 상당히 줄어들음을 확인할 수 있다. 따라서 가변 주입압 실험을 통하여 투과성 계수를 보다 정확하게 측정할 수 있음을 알 수 있다.

섬유 채적율이 높아지면 보강재가 금형면에 보다 압착되어 점성력에 의한 섬유 변형이 줄어들게 되므로 비등방도 편차 또한 감소한다. 장단축 전진량 편차는 Fig.12와 거의 동일한 결과가 나타남을 실험에서 확인하였다.

## 5. 결 론

본 연구에서는 원형 주입구를 통하여 비등방성 매질로 수지가 충전되는 과정을 간단하게 예측할 수 있는 근사 해를 유도하였으며, 이를 수치 해석을 통하여 검증하였다. 근사 해를 이용하여 보강재의 투과성 계수를 간단하게 결정할 수 있는 모델을 개발하였으며, 다공성

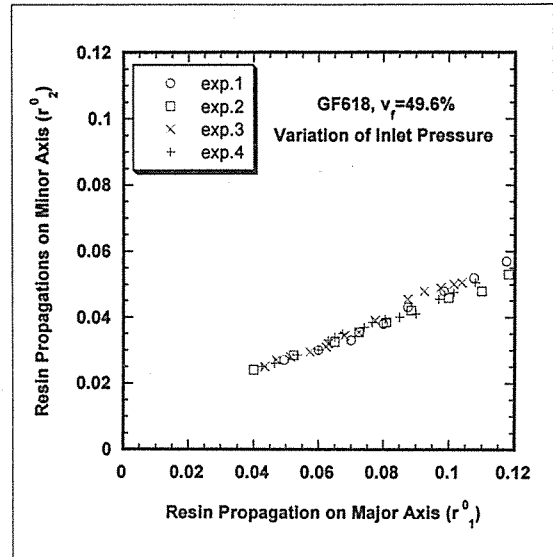


Fig. 12. Resin front propagation variations in case of variable pressure injection

매질의 비등방성이 심할 경우, 비등방도를 보다 정확하게 결정할 수 있는 방법도 제시하였다. 주입구에서의 수지 주입 압력 조건에 따라라도 투과성 계수가 영향 받음을 실험으로 확인하였으며, 이를 개선하기 위하여 주입압 조건에 관계없이 투과성 계수를 결정할 수 있도록 근사 해를 확장하였다.

향후 섬유 직조 패턴 및 형상에 따른 투과성계수 변화를 예측할 수 있는 모델 개발에 대한 연구가 필요하

## 후 기

본 연구는 과학 기술처 특정연구 개발사업의 일환으로 수행되었음을 밝히며, 이에 관계자 여러분께 감사드립니다.

## 참 고 문 헌

1. Kaviany, M., Principles of Heat Transfer in Porous Media, Springer-Verlag, 1991.
2. Hammond, V. H. and Loos, A. C., "The Effect of Fluid Type and Viscosity on the Steady-



State and Advancing Front Permeability Behavior of Textile Preforms", J. of Reinforced Plastics and Composites, Vol.16, No.1, 1997, pp.50-72.

3. Williams, J.G., Morris C.E.M. and Ennis, B.C. "Liquid Flow through Aligned Fiber Beds," Polym. Eng. Sci., vol.14, 1974, pp.413-419.

4. Drummond, J. E. and Tahir, M. I. "Laminar Viscous Flow through Rectangular Arrays of Parallel Solid Cylinders", Int. J. Multiphase Flow, vol.10, 1984, pp.515-540.

5. Gutowski, T.G., Cai, Z., Bauer, S., Boucher, D., Kingery J. and Wineman, S., "Consolidation Experiments for Laminate Composites", J. Comp. Mat., vol.21, 1987, pp.650-669.

6. Keller, J. B., "Viscous Flow through a Grating or Lattice of Cylinders", J. Fluid Mech., vol.18, 1964, pp.94-96.

7. Lam, R. C. and Kardos, J. L., "The Permeability and Compressibility of Aligned and Cross-Plied Carbon Fiber Beds During Processing," Polym. Eng. Sci., vol.31, 1991, pp.1064-1070.

8. Larson, R. E. and Higdon, J. J. L., " Microscopic Flow near the Surface of Two-Dimensional Porous Media. Part1. Axial Flow," J. Fluid Mech., vol.166, 1986, pp.449-472.

9. Larson, R. E. and Higdon, J. J. L., "Microscopic Flow near the Surface of Two- Dimensional Porous Media. Part2. Transverse Flow," J. Fluid Mech., vol.178, 1987 , pp.119-136.

10. Sangani, A.S. and Acrivos, A., " Slow Flow Past Periodic Arrays of Cylinders with Application to Heat Transfer," Int. J. Multiphase Flow,

vol.8, 1982, pp.193-206.

11. Sangani, A.S. and Acrivos, A., "Slow Flow through a Periodic Arrays of Spheres," Int. J. Multiphase Flow, vol.8, 1982, pp.343-360.

12. Skartsis, L., Kardos, J.L. and Khomami, B., "Resin Flow through Fiber During Composite Manufacturing Processes. Part 1 : Review of Newtonian Flow through Fiber Beds," Polym. Eng. Sci., vol.32, 1992, pp.221-230.

13. Adams, K.L., Russel, W.B. and Rebenfeld, L., "Radial Penetration of a Viscous Liquid into a Planar Anisotropic Porous Medium," Int. J. Multiphase Flow, vol.14, 1988, pp.203-215.

14. Chan, A.W. and Hwang, S.T., "Anisotropic In-Plane Permeability of Fabric Media," Polym. Eng. Sci., vol.31, 1991, pp.1233-1239.

15. Chan, A.W., Larive, D.E. and Morgan, R.J., "Anisotropic Permeability of Fiber Preforms : Constant Flow Rate Measurement," J. Com. Mat., Vol.27, No.10, 1993, pp.996-1008.

16. Young, W.B. and Wu, S.F., "Permeability Measurement of Bidirectional Woven Glass Fabers", J. of Reinforced Plastics and Com., Vol.14, 1997, pp.1108-1120.

17. Lee W.I and Seo, J.W., "A Model of the Resin Impregnation in Thermoplastic Composites", J. Comp. Mat., vol.25, 1991, pp. 1127-1142.

18. Brebbia, C.A., The Boundary Element Method for Engineers, Pentech Press, London, 1980.