

## VARTM 공정에서 수지 함침에 따른 섬유체적율 변화의 측정 및 현상학적 모델링 연구

김신오\* · 성동기\*<sup>†</sup> · 엄문광\* · 최진호\*\*

### Experimental and Phenomenological Modeling Studies on Variation of Fiber Volume Fraction during Resin Impregnation in VARTM

Shin O Kim\*, Dong Gi Seong\*<sup>†</sup>, Moon Kwang Um\*, Jin Ho Choi\*\*

**ABSTRACT:** As resin impregnates through the fiber preform in vacuum assisted resin transfer molding process, the volume of fibers is changed by expansion of fiber mat according to filling time. It causes not only the change in dimension but also the decrease of mechanical properties of the composite product. Moreover, it results in the economic loss by increase of the used amount of resin especially in the large product such as wind turbine blade. In this study, the ways to control fiber volume fraction were investigated by both the experimental and theoretical analyses on the expansion of fiber preform as the preform was impregnated by resin in the VARTM process. Two kinds of swelling stage were observed as flow front progressed, which was analyzed by comparing the experimental and simulation results. The process parameters are expected to be optimized by investigating the swelling behavior of fiber preform in the manufacturing process of the composite product.

**초 록:** VARTM 공정에서 고분자 수지가 함침 될 때 시간에 따라 섬유보강재가 팽창하여 섬유체적율이 감소하는 현상이 발생한다. 풍력 블레이드와 같은 대형 복합재료 구조물의 경우 섬유체적율의 변동 폭이 커져 제품의 치수가 변하고 기계적 물성이 저하될 뿐 아니라 예측하지 못한 고분자 수지의 사용량이 증가하는 등의 문제점과 경제적인 손실이 발생할 여지가 증가할 수 있다. 본 연구에서는 VARTM 공정에서 수지 함침에 따른 섬유 보강재의 팽창 현상에 관한 분석을 통하여 복합재료 액상 성형 공정에서의 섬유 체적율을 조절하는 방안을 모색하였다. 그 결과 유동 선단의 진행에 따라 섬유의 팽창 현상이 크게 두 단계로 구분되어 나타나는 것을 확인하였고 각각의 단계에서 작용하는 힘을 분석함으로써 섬유의 체적율 변화에 관한 현상학적 모델을 제시하였고 1차원 편미분 수치 해석과 연계하여 VARTM공정에서 수지 함침에 따른 섬유 체적율의 변화를 예측하였다.

**Key Words:** 복합재료(Composite), VARTM, 섬유 팽창(Swelling), 섬유체적율(Fiber volume fraction)

#### 1. 서 론

1900년대 중반부터 등장한 섬유강화 복합재료는 성질이 서로 다른 두 가지 이상의 물질이 거시적으로 혼합되어 보

다 유용한 기능을 발현하는 첨단재료로서 기존의 등방성 재료에 비해 우수한 기계적 특성, 열적 특성, 경량성, 부식성 등을 가지고 있기 때문에 자동차, 항공·우주 등 첨단 산업에 사용이 증가하고 있으며 그 활용도가 높아지고 있다.

Received 7 October 2015, received in revised form 18 December 2015, accepted 28 December 2015

\*Composites Research Division, Korea Institute of Materials Science

\*<sup>†</sup>Composites Research Division, Korea Institute of Materials Science, Corresponding author (E-mail: dgseong@kims.re.kr)

\*\* Mechanical Engineering, Gyeongsang National Univ.

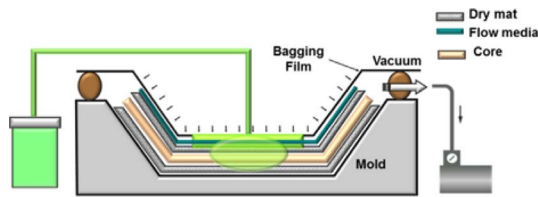


Fig. 1. Schematic design of VARTM

복합재료 성형공정 중 Autoclave 공정은 생산된 제품의 품질이 가장 뛰어나지만 생산성과 경제성이 떨어져 방위산업이나 항공·우주 같은 특수한 경우에 주로 쓰인다. 반면 RTM (Resin Transfer Molding) 공정은 다른 공정에 비해 상대적으로 낮은 압력과 진공으로 다양한 형상의 제품구현이 가능하여 대량생산에 적합한 공정으로 평가받고 있다. 이 공정에서 상부 금형 대신 Bagging film을 이용함으로써 생산 단가를 낮추고 생산성을 증대시킨 것이 Fig. 1과 같은 VARTM (Vacuum Assisted Resin Transfer Molding) 공정이다[1-6].

VARTM 공정에서 고분자 수지가 함침될 때 시간에 따라 섬유보강재가 팽창하여 섬유체적율이 감소하는 현상이 발생한다. 기존의 소형 복합재료 제품은 섬유체적율 감소량이 상대적으로 작기 때문에 문제되지 않았지만, 신재생 에너지 산업으로 풍력발전산업이 증대되고 풍력 블레이드와 같은 대형 구조물이 VARTM 공정으로 제작되면서 문제가 되기 시작하였다. 풍력 블레이드와 같은 대형 복합재료 구조물의 경우 섬유체적율의 변동 폭이 커져 제품의 치수가 변하고 기계적 물성이 저하될 뿐 아니라 예측하지 못한 고분자 수지의 사용량이 증가하는 등의 문제점과 경제적인 손실이 발생할 여지가 증가할 수 있다[7].

따라서 본 연구에서는 수지가 두께방향으로 단일 유동하고 섬유보강재도 두께방향으로 단일 압착·팽창 거동을 한다는 가정 하에서 실험 장비를 구축하고, 실험을 통해 진공압력에 따른 섬유보강재의 압착 거동과 수지 함침에 따른 섬유보강재의 팽창 거동을 분석할 것이다. 이에 따라 섬유보강재의 투과성 계수와 압력 구배를 가정하고 수지의 유동 모델을 유도하여 섬유체적율의 변화를 예측하고 조절할 것이다. 따라서 VARTM 공정에서 발생하는 문제점을 보완하는 등 공정의 최적화를 목표로 한다.

## 2. 실험

### 2.1 VARTM 공정 셋업

본 연구에서는 VARTM 공정을 구현하기 위해 Fig. 2와 같이 실험 장비를 구축하였다.

사용된 섬유보강재는 Saertex사에서 직조된 일방향 유리 섬유매트이며, 수지는 Shinetsu사의 KF-96-350CS 실리콘 오일을 사용하였다. 진공압력을 가하기 위해 사용된 진공압력 펌프는 ULVAC사의 GVD-050A이며 HISCO사의 진공

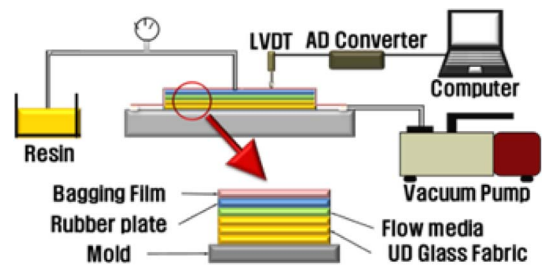


Fig. 2. Schematic design for swelling test in VARTM

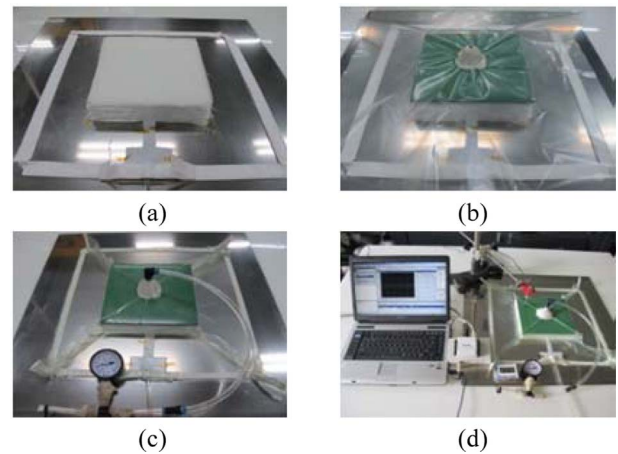


Fig. 3. Photograph of VARTM process

압력 게이지를 사용하여 진공압력을 측정하였다. 섬유보강재의 두께변화를 측정하기 위해 Solartron사의 LVDT, AD converter, 노트북을 사용하였다.

Fig. 3에서 준비된 몰드 위에 섬유보강재를 200 × 200 mm 크기로 잘라 40장을 적층한 후 유로망(flow media) 6장과 고무매트 1장을 차례로 적층하였다(a). 유로망은 수지가 주입구에서 평면방향으로 먼저 흐르게 한 후 두께방향 단일 유동을 유도하며, 고무매트는 섬유보강재가 압착·팽창 거동할 때 두께방향으로 일정한 변형을 유도한다.

Bagging film으로 진공 포장한 뒤 Bagging film과 우레탄 호스의 각 연결부의 sealing상태를 확인하였다 (b),(c). sealing 상태가 확인된 후 LVDT, AD converter, 노트북, 진공게이지 등을 추가로 설치하였다(d).

### 2.2 섬유 보강재의 압착·팽창 거동 실험

#### 2.2.1 섬유 보강재의 압착 거동 실험

섬유보강재의 압착 거동은 섬유의 종류, 구조, 적층 밀도 등에 따라 영향을 받는 인자이므로 이 실험을 통해 섬유보강재가 갖는 고유의 압착 거동을 측정하였다. 실험은 Fig. 4와 같이 진공펌프와 진공게이지를 이용하여 진공압력을 조절하고 LVDT를 이용하여 섬유보강재의 두께변화를 측정하였다. 섬유보강재의 두께변화를 측정할 때 진공압력은 0.005 MPa씩 간격을 두었고, 진공압력이 안정화 될 때까지



Fig. 4. Photograph of fiber dry mat compressive test

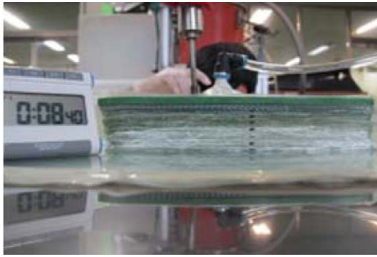


Fig. 5. Photograph of fiber mat swelling test

충분한 시간이 지난 뒤 다음 측정을 진행하였다. 또한 LVDT가 섬유보강재의 윗면에 지정된 곳에서 수직으로 맞닿아 세워져 있는지 여부를 확인한 후 실험을 진행하였다.

2.2.2 섬유 보강재의 팽창 거동 실험

섬유보강재의 압착 거동 실험을 마친 후 실리콘 오일을 주입하기 전 유동선단의 진행을 관찰하기 위해 Fig. 5와 같이 섬유보강재의 양쪽 옆면에 일정간격으로 표시하고 타이머와 비디오카메라를 설치하였다. 섬유보강재의 두께변화는 LVDT를 이용하여 측정하였고 두께변화가 멈추었을 때 시험을 종료하였다.

양쪽 옆면에서 시간에 대한 유동선단의 위치는 평균값을 사용하였고 오차를 줄이기 위해 실리콘 오일을 주입시킨 후 두 개의 타이머와 LVDT 측정을 동시에 진행하였다. 실리콘 오일이 주입된 후 유로망에 함침이 완료되어 섬유보강재에 함침이 시작될 때 시간을 측정하여 실리콘 오일의 유동 시작시점으로 기록하였고, 유동선단이 섬유보강재의 끝 단에 도달했을 때 시간을 측정하여 유동 종료시점을 기록하였다.

2.3 실험 결과

2.3.1 섬유 보강재의 압착 거동 실험 결과

섬유보강재의 압착 거동 실험을 통하여 구해진 진공압력에 따른 높이 변화와 섬유체적율 그래프는 Fig. 6에 나타내었다. 그래프에서 진공압력이 증가할수록 섬유보강재의 압축량이 증가하여 섬유체적율이 증가하는 거동을 보이고 있으며, 3번의 실험결과가 거의 일치한 것으로 보아 섬유보강재의 고유한 특성임을 잘 나타내고 있다. 측정결과를

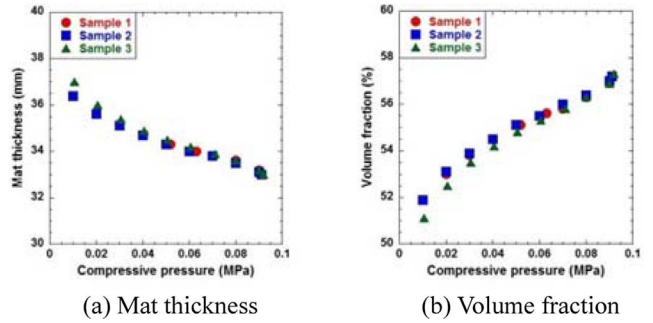


Fig. 6. Compression behavior of fiber preform

바탕으로 섬유체적율  $v_f$ 와 진공압력  $p$ 의 실험적 관계식 (1)을 유도하였고, 이를 통해 섬유 체적율  $v_f$ 가 진공압력  $p$ 의 함수임을 알 수 있었다.

$$v_f = 0.5533 + 1.291 \times 10^{-6} p - 6.250 \times 10^{-12} p^2 \quad (1)$$

2.3.2 섬유 보강재의 팽창 거동 실험 결과

섬유보강재에 실리콘 오일이 함침되는 과정에서 시간에 따른 유동선단의 진행과 섬유보강재의 두께 변화를 보여주는 그래프는 Fig. 7과 같다. (b)에서 보는 바와 같이 섬유보강재의 팽창거동은 크게 두 영역으로 구분됨을 알 수 있는데, 이는 유동선단의 진행 (a)와 연계되어 있다.

즉, Fig. 8과 같이 stage I에서 유동선단이 진행되는 동안 주입구로부터 인가되는 압력은 크게 유동선단의 진행과 함침된 영역의 팽창으로 두 가지 변형을 발생시키기 때문에 섬유보강재의 팽창속도가 상대적으로 느리다. 반면, stage II에서는 유동선단의 진행이 완료되었기 때문에 섬유보강재의 팽창으로 힘이 집중되어 팽창속도가 급격하게 증가

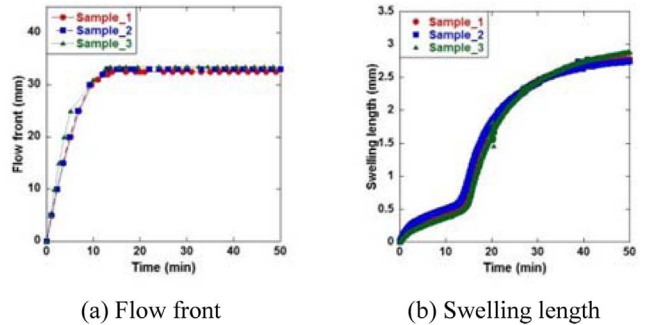


Fig. 7. Results of fiber swelling test in VARTM

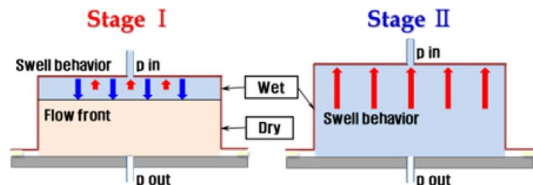


Fig. 8. Schematic design on two stage motion of fiber swelling



하게 된다. 즉, stage I에서는 초기조건과 경계조건에 압력 구배가 고정되어 유동선단이 진행되고 섬유보강재가 팽창되지만, stage II에서는 초기조건과 경계조건에서의 압력 구배가 시간에 따라 줄어들고 점차 0으로 가까워질수록 섬유보강재의 팽창이 수렴되는 조건이 성립되게 된다.

### 3. 현상학적 모델링

#### 3.1 수지 유동 모델

다공성 매질을 통과하는 유체의 유동속도는 식 (2)와 같이 Darcy's law로 나타낼 수 있다. 이 식에서 유체의 유동 속도  $u$ 는 투과성 계수  $K$ 와 압력  $p$ 에 따라 결정되며 점도  $\eta$ 는 상수이다[7].

$$u = -\frac{K}{\eta} \nabla p \quad (2)$$

$$\nabla \cdot u = -\frac{\dot{v}_f}{v_f} \quad (3)$$

$$\nabla \cdot \left( -\frac{K}{\eta} \nabla p \right) = -\frac{\dot{v}_f}{v_f} \quad (4)$$

고정된 경계조건에서 흐르는 유체는 비압축성 유동 조건을 이용한 연속방정식으로 표현될 수 있지만, 본 연구에서는 경계조건이 시간에 따라 변하므로 식 (3)과 같이 우변을 시간에 따른 섬유체적률  $v_f$ 의 변화량으로 수정하여 나타낼 수 있다. 따라서, 식 (2), (3)을 조합하여 아래의 식 (4)와 같은 지배방정식으로 나타낼 수 있다[8-11].

#### 3.2 섬유 보강재의 물성

투과성 계수  $K$ 는 섬유보강재의 고유한 특성으로 실험을 통해 값을 측정해야 하지만 본 연구에서는 보편적인 결과를 유도하기 위해 식 (5)와 같이 일반적으로 사용되는 Kozeny-carman equation을 사용하였다.

$$K = k_0 \frac{(1-v_f)^3}{v_f^2} \quad (5)$$

위 식에서 투과성계수  $K$ 는 섬유체적률  $v_f$ 의 함수이며,  $k_0$ 는 시간에 따른 유동선단의 위치 측정 실험으로 유도하였다. 또한, 다공체 내에서 유체가  $u_{darcy}$ 의 속도로 흐를 때 유체는 기공에 영향을 받기 때문에 실제 유동 속도는 식 (6)에서와 같이 기공률  $\varepsilon$ 을 고려한  $u_{pore}$ 의 속도로 흐르게 된다.

$$u_{pore} = \frac{u_{darcy}}{\varepsilon} \quad (6)$$

$$t_{flow\ front} = \frac{\varepsilon \times \eta}{2 \times K \times (p_f - p_0)} z_{flow\ front}^2 \quad (7)$$

따라서 시간에 따른 유동선단의 위치는 식 (6)을 고려하

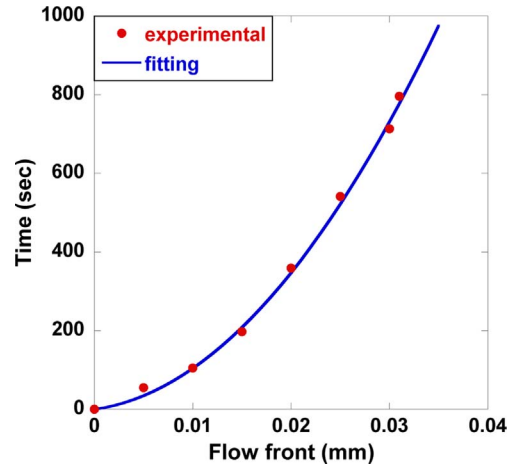


Fig. 9. Experimental result of flow front advancement

여 식 (2)의 양변을 시간에 대해 적분하면 식 (7)과 같이 유도된다.  $z_{flow\ front}$ 는 유동선단의 수직방향 위치이며,  $t_{flow\ front}$ 는 소요시간이다. 단, 투과성계수  $K$ 는 시간에 따라 변하지 않는 조건하에 성립된다.

Fig. 9는 실험을 통해 시간에 따른 유동선단 위치의 관계를 나타낸 것으로 2차 함수 관계임을 확인할 수 있었고 식 (7)에 대입하여 투과성계수  $K$ 를 구하고, 식 (5)에 대입하여  $k_0$ 를 구하였다.

#### 3.3 힘의 평형

임의의 함침된 구간에서 힘의 평형관계에 의해 유동선단이 진행되고 섬유보강재는 팽창된다. 이 관계를 Fig. 10과 같이 수지의 유동압력  $p_f$ 와 섬유보강재의 압착압력  $p_r$ 로 표현할 수 있다. 예를 들어 섬유보강재가 1기압의 일정한 압력으로 압착되고 있을 때 유동선단에서 수지의 유동압력은 0기압인 반면 섬유보강재의 압착압력은 1기압이므로 유동선단은 전진하게 된다. 반면, 주입구에서 수지의 유동압력이 1기압이고 섬유보강재의 압착압력이 0기압이므로 섬유보강재는 팽창하게 된다.

한편, 점성을 가진 유체의 유동은 마찰을 동반하기 때문에 수지의 유동을 방해하여 섬유보강재의 압착압력을 증가시키는 마찰압력이 발생시킨다. 이 힘의 평형관계를 정리하면 식 (8)과 같으며, 여기서 마찰압력  $p_d$ 는 식 (9)로 구할 수 있으며  $\rho$ 는 수지의 밀도,  $u$ 는 수지의 속도,  $c_d$ 는 마찰

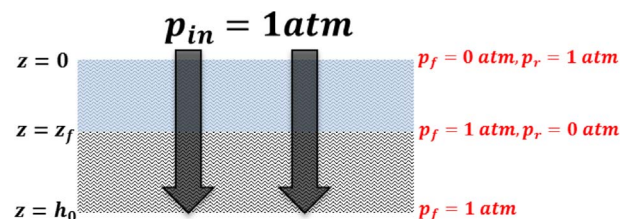


Fig. 10. Schematic design of exemplary force equilibrium

압력계수이다.

$$p_{in} - p_d = p_f + p_r \quad (8)$$

$$p_d = \frac{1}{2} c_d \rho u^2 \quad (9)$$

투과성 계수  $K$ 는 섬유보강재의 고유한 특성이므로  $p_f$ 를 대입해야 하며 Darcy's law에서 압력 구배  $\nabla p$ 는 수지의 유동과 관련되므로  $p_r$ 을 대입해야 한다[12,13]. 따라서 지배 방정식에서  $p_r$ 과  $p_f$ 를 구분하여 나타내면 아래의 식(10)과 같다.

$$\nabla \cdot \left( -\frac{K(v_f(p_f))}{\eta} \cdot \nabla p_r \right) = -\frac{1}{v_f(p_r)} \frac{dv_f(p_f)}{dt} \quad (10)$$

## 4. 수치 해석

### 4.1 해석조건

#### 4.1.1 stage I

stage I은 수지가 섬유보강재에 함침되기 시작하여 유동 선단이 섬유보강재의 끝 단에 도달하기까지 단계이다. 이 단계에서 경계조건은 아래의 식 (11)에서 보는 것과 같이  $z=0$ 에서 수지의 유동압력  $p_r$ 은 주입압력  $p_{in}$ 과 동일하다. 반면  $z=z_f$ 에서 수지의 유동압력  $p_r$ 은 0이다[14-16].

$$\begin{aligned} p_{r(z=0)} &= p_{in} - p_d \\ p_{r(z=z_f)} &= 0 \end{aligned} \quad (11)$$

주어진 경계조건에 따라 수지의 유동압력  $p_r$ 의 초기조건을 아래의 식 (12)과 같이 1차 함수로 가정할 수 있고, 섬유보강재의 압착압력  $p_f$ 의 초기조건은 식 (13)과 같이 주입압력에서 마찰압력이 고려된 식 (12)의 유동압력을 감하여 구할 수 있다.

$$p_{r(t=0)} = (p_{in} - p_d) \left( \frac{z_f - z}{z_f} \right) \quad (12)$$

$$p_f = p_{in} - p_r \quad (13)$$

유동선단의 진행은 Fig. 11에서와 같이 수치해석을 통해 구해진 위치에 따른 압력 그래프에서 유동선단의 압력 구배  $\nabla p_r$ 을 구하고 그 때의 유동 속도를 구하여 전진거리를 예측하였다. 끝 단에서 유동 속도는 식 (6)에서와 같이 Darcy's law에서 기공율  $\epsilon$ 을 고려한 pore velocity를 사용하였다.

임의의 함침된 구간은 Fig. 12와 같이 유동선단이 진행된 길이와 수지의 함침에 의해 팽창된 길이의 합이다. 따라서 수치 해석을 통해 계산된 위치 별 압력  $p_r$ 을 사용하여 식 (14)를 통해 함침된 구간에서 섬유보강재가 팽창된 길이를 계산하였다.

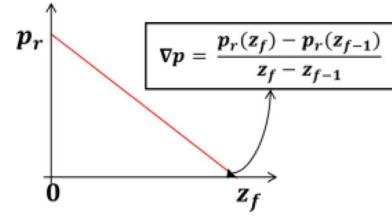


Fig. 11. Pressure gradient in pore velocity

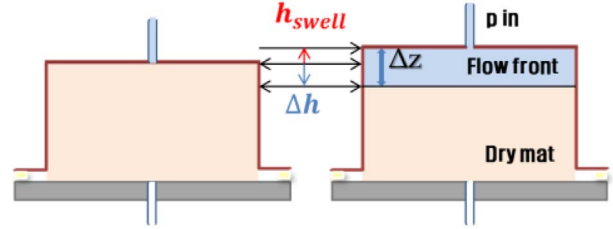


Fig. 12. Schematic design of stage I

$$\begin{aligned} v_{f,\Delta z} \times \Delta z &= v_{f,\Delta h} \times \Delta h \\ h_{swell} &= \Delta z - \Delta h \end{aligned} \quad (14)$$

위 식에서  $\Delta z$ 는 수지가 함침된 임의의 구간에서 섬유보강재의 두께이고,  $\Delta h$ 는 수지가 함침되지 않은 섬유보강재의 두께이다. 또한,  $h_{swell}$ 는 수치 함침에 의해 섬유보강재가 팽창된 두께이다.  $\Delta z$ 는 수치해석을 위해 초기값이 주어지며 위의 식을 통해  $\Delta h$ 와  $h_{swell}$ 를 차례로 계산하였다.

#### 4.1.2 stage II

stage II는 Fig. 13과 같이 유동선단이 섬유보강재의 끝 단에 도달한 이후부터 섬유보강재 내부의 압력 구배 차이가 0이 되어 팽창을 멈출 때까지이며, 압력 구배가 섬유보강재의 팽창에 집중되는 단계이다.

경계조건은  $z=0$ 에서 stage I과 동일하지만  $z=z_f$ 에서 수지의 유동압력  $p_r$ 은 시간에 따라 주입압력  $p_{in}$ 에 가까워지는 함수이다. 여기서  $p_s$ 는 적층된 섬유보강재의 진공압력에 따른 팽창을 실험적으로 측정된 값으로 사용하였다. 따라서  $p_s$ 를 포함한 경계조건은 아래식 (15)와 같다.

$$\begin{aligned} p_{r(z=0)} &= p_{in} - p_d \\ p_{r(z=z_f)} &= p_{in} - p_s \end{aligned} \quad (15)$$

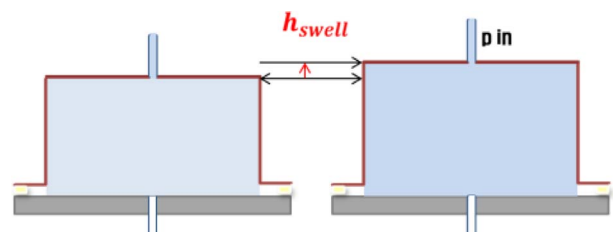


Fig. 13. Schematic design of stage II

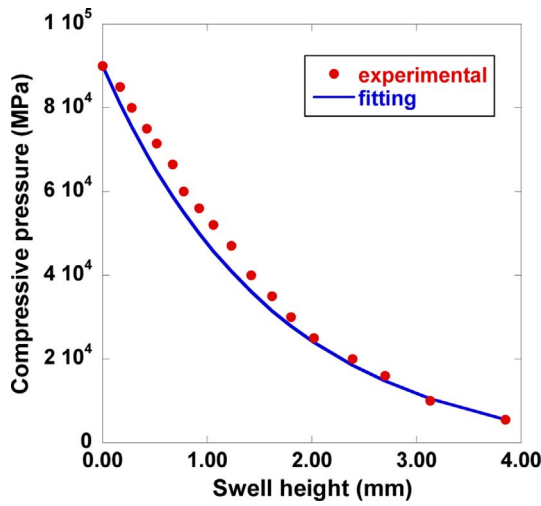


Fig. 14. Compression behavior of a fiber preform

주어진 경계조건에 따라 압력  $p_r$ 의 초기조건을 아래의 식 (16)과 같이 1차함수로 가정할 수 있고, 압력  $p_f$ 는 힘의 평형 방정식에 의해 식 (13)과 같이 나타낼 수 있다.

$$p_{r(t=0)} = (p_{in} - p_d) \left( \frac{z_f - z}{z_f} \right) - \left( p_s \times \frac{z}{z_f} \right) \quad (16)$$

#### 4.2 해석 결과

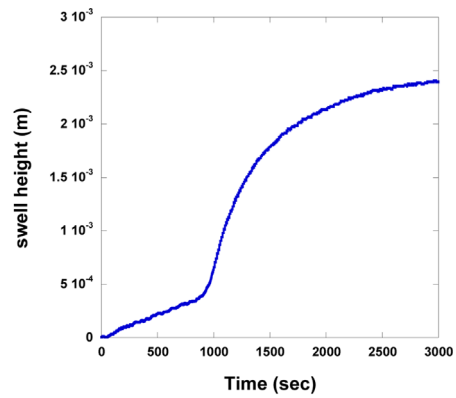
아래의 Table 1과 Table 2는 실험결과와 해석결과를 비교해 높은 것으로 Kozeny-carman equation의 계수인  $k_0$ 와 항력 압력 계수  $c_d$ 에 따라 시간에 따른 팽창높이를 기록하였다. 또한, Fig. 15는 시간에 따른 섬유체적율의 변화로 (a)는

Table 1. The comparison of stage I motion results

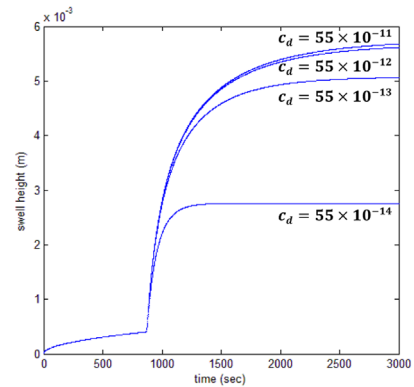
	$k_0$	$c_d$	Swell height (mm)	Time (sec)
Experimental	-	-	0.4	796
Simulation	$12 \times 10^{-12}$	$55 \times 10^{-11}$	0.4	873

Table 2. The comparison of stage II motion results

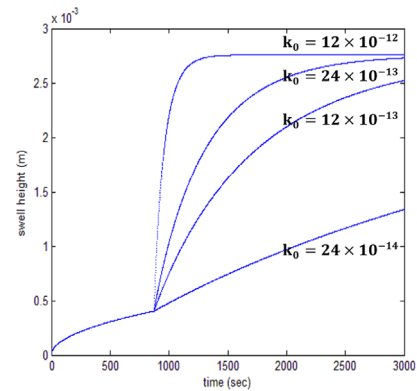
	$k_0$	$c_d$	Swell height (mm)	Time (sec)
Experimental	-	-	2.4	3000
Simulation	$12 \times 10^{-12}$	$55 \times 10^{-11}$	5.7	3000
	$12 \times 10^{-12}$	$55 \times 10^{-12}$	5.6	3000
	$12 \times 10^{-12}$	$55 \times 10^{-13}$	5.1	3000
	$12 \times 10^{-12}$	$55 \times 10^{-14}$	2.8	3000
	$12 \times 10^{-12}$	$55 \times 10^{-14}$	2.8	3000
	$24 \times 10^{-13}$	$55 \times 10^{-14}$	2.7	3000
	$12 \times 10^{-13}$	$55 \times 10^{-14}$	2.5	3000
	$24 \times 10^{-14}$	$55 \times 10^{-14}$	1.3	3000



(a) Experimental result of swell



(b) Simulation result of swell height with various  $c_d$ 's



(c) Simulation result of swell height with various  $k_0$ 's

Fig. 15. The comparison of experimental and simulation results

실험결과, (b)는 항력 압력 계수  $c_d$ 에 따른 해석결과이며, (c)는 Kozeny-carman equation의 계수인  $k_0$ 에 따른 해석결과를 나타낸 그래프이다.

##### 4.2.1 stage I

stage I에서는 Table 1과 같이  $k_0$ 와  $c_d$ 가 각각  $12 \times 10^{-12}$ 와  $55 \times 10^{-11}$ 일 때 거의 유사한 결과치를 나타내었고, Fig. 15와 같이 그래프의 형상도 유사하므로 현상학적 모델이 실제 현상을 잘 예측한 것으로 판단된다.

#### 4.2.2 stage II

반면 stage II 에서는 Table 2 와 같이 stage I 과 동일한  $k_0$ 와  $c_d$ 을 사용하여 해석한 결과 그래프의 형상은 유사하지만 팽창 높이가 다른 것을 확인할 수 있었고, stage II에서 다양한  $k_0$ 와  $c_d$ 을 사용하여 실제 현상과 비교하였다.

우선  $k_0$ 를 stage I에서 사용한  $12 \times 10^{-12}$ 으로 고정한 후  $c_d$ 를 변화시키면서 수치해석을 진행한 결과  $c_d$ 가 증가할 수록 일정시간 동안 팽창되는 높이가 감소되는 것을 확인하였다. 즉, 유체의 유동 압력 구배가 stage I과 달리 점점 줄어들기 때문에 stage II에서  $c_d$ 는 다르게 적용되어야 하며, stage II에서는  $c_d = 55 \times 10^{-14}$ 일 때 실제 팽창높이와 거의 일치하는 것을 확인하였다.

또한,  $c_d = 55 \times 10^{-14}$ 을 고정한 후  $k_0$ 를 변화시키면서 수치해석을 진행한 결과  $k_0$ 가 감소될수록 그래프의 기울기가 감소되는 것을 확인하였다. stage II에서는 이미 함침되어 있는 섬유보강재에 유체가 주입되어 팽창하는 과정이므로 stage I과 다른 값이 적용되어야 한다. 따라서,  $k_0 = 12 \times 10^{-13}$ 일 때 실제 현상과 가장 일치하는 것을 확인하였다.

따라서, stage I에서  $c_d = 55 \times 10^{-11}$ ,  $k_0 = 12 \times 10^{-12}$ 이고, stage II에서  $c_d = 55 \times 10^{-14}$ ,  $k_0 = 12 \times 10^{-13}$  일 때 실제 현상과 가장 일치하는 결과를 얻을 수 있었다.

## 5. 결 론

본 연구에서는 VARTM 공정에서 수지가 함침됨에 따라 섬유보강재의 두께가 팽창하여 섬유체적율이 감소하는 현상을 분석하기 위해 수지가 두께방향으로 일방향 유동하고 섬유보강재도 두께방향으로 일방향 압착·팽창 거동을 한다는 가정 하에서 실험 장비를 셋업하여 실험을 진행하였고, 유동선단에 따라 섬유보강재의 거동이 두 단계로 나누어지는 것을 확인하여 유동선단이 포화상태에 도달하기 전과 후를 각각 stage I과 stage II로 표기하였다.

유체의 유동은 Darcy's law와 섬유보강재의 팽창에 따른 부피변화를 고려한 연속방정식으로 표현하여 지배방정식을 유도하였고, 주요 인자인 투과성계수와 압력 구배를 각각 Kozeny-carman equation과 힘의 평형방정식으로 가정하였다. 각 stage에서 섬유보강재는 서로 다른 거동을 보이므로 초기·경계 조건을 각 거동에 맞게 가정하여 해석한 결과 stage I과 stage II에서 나타나는 시간에 따른 섬유보강재의 팽창 거동이 수치적 결과와 거의 일치하였고 거동형태도 유사하여 잘 예측된 모델임이 증명되었다. 따라서 섬유보강재의 압축 거동 과 VARTM 공정 셋업을 이용한 유동 실험결과를 이용하면 앞서 언급했던 문제점들(치수 변동, 물성 저하, 수지 사용량 증가, 경제적 손실 발생 등)을 예방하여 VARTM 공정을 최적화시킬 수 있을 것으로 기대된다.

## 후 기

본 연구는 지식경제부 탄소밸리 구축사업과 한국기계연구원 부설 재료연구소의 주요사업의 지원을 받아 수행된 것이며, 지원에 대해 진심으로 감사드립니다.

## REFERENCES

- Li, W., Krehl, J., Gillespie Jr., J.W., Heider, D., Endrulat, M., Hochrein, K., Dunham, M.G., and Dubois, C.J., "Process and Performance Evaluation of the Vacuum-Assisted Process," *Journal of Composite Materials*, Vol. 38, No. 20, 2004, pp. 1803-1814.
- Kuentzer, N., Simacek, P., Advani, S.G., and Walsh, S.M., "Correlation of Void Distribution to VARTM Manufacturing Techniques," *Composites Part A*, Vol. 38, No. 3, 2007, pp. 802-813.
- Markicevic, B., Litchfield, D., Heider, D., and Advani, S.G., "Role of Flow Enhancement Network during Filling of Fibrous Porous Media," *Journal of Porous Media*, Vol. 8, No. 3, 2005, pp. 281-297.
- Heider, D. and Gillespie Jr., J.W., "Automated VARTM Processing Of Large-Scale Composite Structures," *Journal of Advanced Materials*, Vol. 36, No. 4, 2004, pp. 11-17.
- Mathur, R., Advani, S.G., Heider, D., Hoffmann, C., Gillespie Jr., J.W., and Fink, B.K., "Flow Front Measurements and Model Validation in the Vacuum Assisted Resin Transfer Molding Process," *Polymer Composites*, Vol. 22, No. 4, 2001, pp. 477-490.
- Yoon, M.K., Chen, H., Simacek, P., Heider, D., and Gillespie Jr., J.W., "Modeling VARTM Processes with Hybrid Media Incorporating Gravity Effects," *Journal of Composite Materials*, Vol. 43, No. 24, 2009, pp. 2903-2920.
- Simacek, P., Heider, D., Gillespie Jr., J.W., and Advani, S.G., "Post-filling Flow in Vacuum Assisted Resin Transfer Molding Processes: Theoretical Analysis," *Composite. Part A*, Vol. 40, No. 6-7, 2009, pp. 913-924.
- Michaud, V. and Månson, J.-A.E., "Impregnation of Compressible Fiber Mats with a Thermoplastic Resin. Part I: Theory," *Journal of Composite Materials*, Vol. 35, No. 13, 2001, pp. 1150-1173.
- Ambrosi, D. and Preziosi, L., "Modelling Matrix Injection Through Elastic Porous Preforms," *Composites Part A*, Vol. 29, No. 1-2, 1998, pp. 5-18.
- Antonelli, D. and Farina, A., "Resin Transfer Moulding: Mathematical Modelling and Numerical Simulations," *Composites Part A*, Vol. 30, No. 12, 1999, pp. 1367-1385.
- Wolfrath, J., Michaud, V., and Månson, J.-A.E., "Deconsolidation in Glass Mat Thermoplastic Composites: Analysis of the Mechanisms," *Composites part A*, Vol. 36, No. 12, 2005, pp. 1608-1616.
- Kang, M.K., Lee, W.I., and Hahn, H.T., "Analysis of Vacuum Bag Resin Transfer Molding Process," *Composites: Part A*, Vol. 32, No. 11, 2001, pp. 1553-1560.
- Terzaghi, K. and Peck, R.B., *Soil Mechanics in Engineering Practice 2nd ed*, John Wiley & Sons. Co., New York, USA, 1967.

14. Lopatnikov, S., Simacek, P., Gillespie Jr, J.W., and Advani, S.G., "A Closed form Solution to Describe Infusion of Resin Under Vacuum in Deformable Fibrous Porous Media", *IOPSCIENCE: Model Simul. Mater. Sci. Eng.*, Vol. 12, No. 3, 2004, pp. 191-204.
15. Bruschke, M.V. and Advani, S.G., "Finite Element/control Volume Approach to Mold Filling in Anisotropic Porous Media," *Polym Composite*, Vol. 11, No. 6, 1990, pp. 398-405.
16. Acheson, J.A., Simacek, P., and Advani, S.G., "The Implications of Fiber Compaction and Saturation on Fully Coupled VARTM Simulation," *Composites: Part A*, Vol. 35, No. 2, 2004, pp. 159-169.