

論文

RTM 공정의 실시간 제어에 관한 연구

전영재*, 이우일**, 엄문광***, 변준형***

A Study on Real Time Control of Resin Transfer Molding

Young Jae Jeon*, Woo Il Lee**, Moon Kwang Um***, and Joon Hyung Byun***

ABSTRACT

In resin transfer molding(RTM), race-track effects and non-uniform fiber volume fraction may cause undesirable resin flow patterns and thus result in dry spots, which affect the mechanical properties of the finished parts. In this study, a real time RTM control strategy to reduce these unfavorable effects is proposed. This control rule is accomplished by means of the permeability mapping and pressure regulation. Through numerical simulations, the validity of the proposed scheme is demonstrated.

초 록

여러 복합재료 성형공정 중에서, Resin Transfer Molding(RTM)은 부피가 크고 일체형의 고성능 제품을 생산하기에 적합한 공정으로 주목받고 있다. 금형충전 중, 섬유 예비성형품과 금형벽면간의 밀착이 제대로 되지 않아 발생하는 Race-track 현상과 금형재의 섬유예비성형품의 압착, 접합, 뭉침 등에 의한 섬유부피분율의 불균일성과 같은 예기치 못한 현상이 나타나기도 한다. 이로 인해 유동선단이 불안정해지고, Dry spot 생성에 따른 제품의 기계적 성질이 저하되기도 한다. 본 연구에서는 최적의 조건을 적용한 이상적인 성형공정과 Race-track 현상 및 불균일한 섬유부피분율 등의 조건을 적용한 실제적인 성형 공정 간의 실시간비교를 통한 공장변수 조절과 유동선단 제어를 수행함으로써 이러한 결함을 줄이려고 하였다. 이를 위해, 수치해석을 통해 투과율 Map구성과 압력조절 등을 이용한 제어기법의 타당성을 검토하였으며, 실제공정에서 가능한 여러 가지의 결함이 있는 경우에 대하여 제어를 시도하여 만족한 만한 수지의 충전율을 얻을 수 있었다.

Key Words: Resin Transfer Molding(RTM), 실시간 제어(real time control), 제어기법(control scheme), 투과성 계수 (permeability), Dry Spot, race track

1. 서 론

Resin Transfer Molding(RTM)은 부피가 크고 일체형의 고성능 제품을 저비용으로 생산하기에 적합하여, 복합재료산업에서 주목받고 있는 공정이다. Fig. 1에서 볼 수 있듯이, RTM 공정에서는 강화재료인 섬유예비성형품(fiber preform)을 금형 내에 위치시키고 열경화성수지를 주입하여 섬유예비성형품을

함침시킨다. 그 후, 금형의 가열에 의한 경화단계를 거쳐 제품이 생산된다[1]. RTM 공정은 기존의 Autoclave성형과 달리 공정이 비교적 간단하여 결함의 가능성이 적기는 하지만, 공정의 특성상 금형충전과 관련된 문제점이 있을 수 있다.

Dry spot은 금형충전이 완료되었음에도 불구하고, 섬유예비성형품이 함침되지 않은 부분을 말한다. 이러한 dry spot은 race-track현상과 불균일한 섬유부피분율 등의 예기치 못한

* 서울대학교 기계항공공학부 대학원

**+ 서울대학교 기계항공공학부, 교신저자(E-mail: wilee@snu.ac.kr)

*** 한국기계연구원 재료기술연구소 복합재료그룹

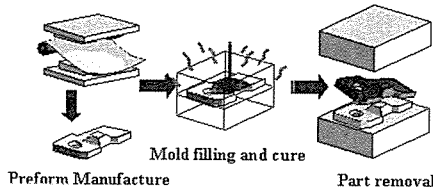


Fig. 1 RTM process.

영향으로 생기며, 이에 의해 제품의 기계적 성질이 저하되기도 한다. Race-track은 섬유예비성형품과 금형벽면간의 밀착이 제대로 되지 않아 발생하는 현상으로, 금형 내의 다른 부분보다 섬유부피분율이 낮아져 국부적으로 빠른 유동이 나타나는 것이다.

만약 이러한 현상이 발생된다면, 수지가 공기배출구로 미리 도달하게 되어 재료의 낭비를 낳을 수 있으며 공기가 중간에 갇혀 dry spot의 원인이 된다. 또한, 금형 내의 섬유예비성형품의 압착, 접합, 뭉침 등에 의한 섬유부피분율의 불균일성은 낮은 섬유부피분율 부분으로의 유동집중현상을 초래한다. 반면, 높은 섬유부피분율 부분에서는 dry spot의 발생가능성이 높아진다.

이러한 문제들을 해결하기 위한 RTM 공정의 제어기법에 대해서는 몇 가지가 제안되었다. Sozer[2]는 금형충전 중 유동선단패턴에 영향을 미치는 센서 데이터를 이용한 온라인 제어기법을 제안하였으며, 만족할 만한 수지의 충전을 얻을 수 있었다. Nielsen과 Pitchmani[3]는 수치유동의 실시간 피드백 제어를 수치적·실험적으로 수행하였다. 여기서, 수치결과는 neural network을 이용한 유한차분법(FDM)으로 얻었다. Lawrence[4]는 예상된 유동진전에서의 교란을 확인하고자 센서를 사용하여 유동을 감시하였다. 그리고, 제어용 보조주입구를 이용하여 공기배출구 쪽으로 교란된 유동선단의 방향을 변경함으로써 이상적인 금형충전과 dry spot이 없는 제품을 얻었다. Johnson과 Pitchmani[5]는 섬유예비성형품 내 낮은 투과율 영역의 영향을 중화하기 위해 수지의 점도를 낮추고자 유도가열의 기법을 행하였다.

본 연구에서는 주입구와 배출구의 최적위치를 비롯한 균일한 섬유부피분율 및 race-track 미발생 등의 최적조건을 적용한 이상적인 성형공정과 race-track현상 및 불균일한 섬유부피분율 등의 조건을 적용한 실제적인 성형공정간의 실시간 비교를 통해, 공정변수 조절과 유동선단 제어를 수행함으로써 이러한 결함을 줄이고자 하였다.

2. 수치해석

2.1 수학적 모델링

2.1.1 지배방정식

섬유예비성형품(fiber preform)과 같은 다공성 매질을 통과하는 금형 내의 수치유동은 Darcy의 법칙을 따른다고 가정할 수 있다.

$$\vec{V} = -\frac{[K]}{\mu} \nabla p \quad (1)$$

여기서 \vec{V} 는 수지의 속도, p 는 압력, μ 는 수지의 점도를 나타내며, $[K]$ 는 비등방성의 다공성 매질에 대한 투과율(permeability) 텐서이다. 그리고, 비압축성유체로 가정한 수지의 금형 내 유동에 필요한 질량보존법칙은 다음과 같다.

$$\nabla \cdot \vec{V} = 0 \quad (2)$$

식 (2)을 식 (1)에 대입하면 다음과 같이 주어진다.

$$\nabla \cdot \left(\frac{[K]}{\mu} \nabla p \right) = 0 \quad (3)$$

임의의 부피분율을 지닌 섬유의 투과율은 Carman-Kozeny 식에 의해 나타낼 수 있다[6].

$$K = \frac{d_f^2}{16k} \cdot \frac{(1 - \nu_f)^3}{\nu_f^2} \quad (4)$$

여기서 k 는 kozeny 상수, d_f 는 섬유의 직경, ν_f 는 섬유부피분율을 나타낸다.

2.1.2 경계조건

경계조건은 다음과 같이 주어진다.

$$\text{유동 주입구: } p = p_o(t)$$

$$\text{금형 벽면: } \frac{dp}{dn} = 0 \quad (5)$$

$$\text{유동 전진면: } p = 0$$

3. 제어 규칙

RTM 공정에서 섬유예비성형품(fiber preform)을 통과하는 유체의 금형충전패턴은 많은 매개변수에 의존한다. 특히, race-track현상과 불균일한 섬유부피분율은 제품의 결함을

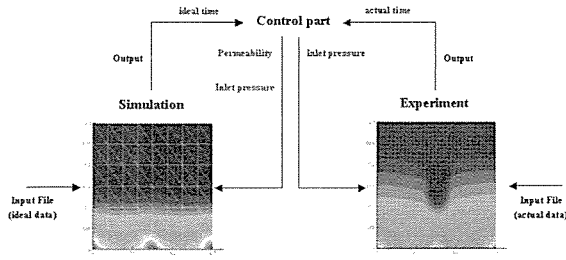


Fig. 2 Schematic view of control system.

초래하므로, 이에 대한 고려는 불가결하다. 통상적인 RTM 공정은 주입구와 공기배출구의 위치 및 작동순서를 결정한 후 이루어지기 때문에, race-track과 불균일한 섬유부피분율과 같은 미리 예측하기 어려운 요소에 적극적으로 대응할 수 없다는 단점을 가지고 있다. 본 연구에서는 앞서 말한 문제점이 발생하기 전에 감지해결하기 위한 제어방법을 개발하였다. 우선, 수치해석으로 예측된 유동선단과 실제로 측정된 유동선단을 비교한다. 이러한 과정에서 얻어지는 데이터를 이용하여 투과율(permeability) map을 구성하고 주입 압력을 조절함으로써 이러한 문제를 해결하였다. Fig. 2는 이 시스템의 개략도이다.

3.1 제어 규칙

제어를 위해 금형충전과정 중의 유동선단의 위치를 수치해석에 의해 예측한 경우와 실제로 측정된 결과를 실시간 비교하였다. 이 때, 수치해석의 결과는 투과율이 알려지고 race-track 등의 결함이 없는 이상적인 경우에 대하여 얻어진다. 금형의 설계(형상, 주입구 위치) 및 공정조건은 이러한 이상적인 경우에 대하여 얻어진 것이다. 그러나, 실제로는 앞서 설명한 여러가지 결함들에 의해 수치해석의 결과와 다르게 된다. 따라서, 수치해석 결과와 실제공정에서 얻을 수 있는 데이터를 실시간 비교하여 유동선단 제어를 행함으로써 이러한 결함을 줄일 수 있을 것이다.

본 연구에서 시도한 제어는 이상적인 경우와 실제공정에서 얻어지는 센서도달시간을 비교함으로써 이루어진다. 센서도달시간이라 함은 유동선단이 센서에 도달하는 시간을 의미한다.

이를 위해 센서의 위치를 결정하고, 센서로 측정된 센서도달시간에 근거하여 제어공정변수의 계산에 필요한 투과율 map을 구성한다. 여기서 투과율은 식 (4)에서 나타나는 섬유부피분율의 함수이므로 ϕ 로 대체한다.

이러한 방법을 통해, 주요공정변수인 주입압력을 조절함으로써 유동선단을 제어하고 궁극적으로 dry spot생성을 방지한다.

이를 구체화한 흐름도는 Fig. 3과 같다.

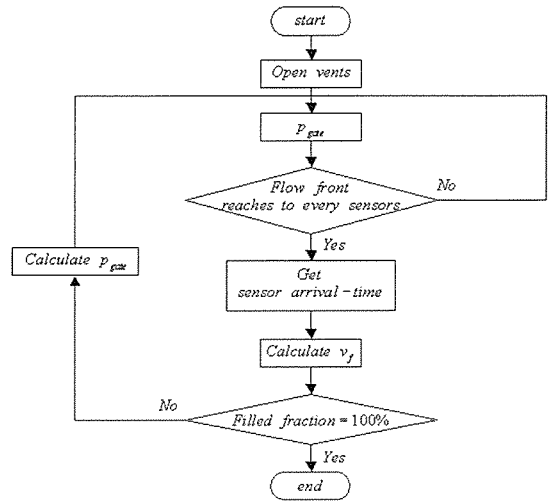
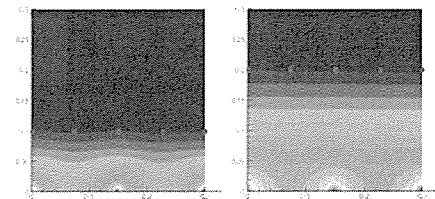
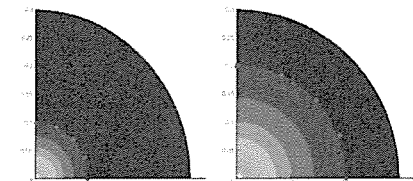


Fig. 3 Flow chart of control rule.



(a) Strip flow : Line arrangement



(b) Radial flow : Radial arrangement

Fig. 4 Sensor arrangement for mold shapes (: sensor).

각 센서에서의 유동선단 도달여부 확인 후, 그 때의 도달시간을 측정하고, 이를 이용하여 섬유부피분율을 계산하여 투과율 map을 구성한다. 이 때의 상태가 금형충전이 완료되지 않은 경우이면, 필요한 제어압력을 계산적용하여 금형충전을 계속 실행한다. 이러한 과정을 금형충전이 완료될 때까지 반복함으로써 실시간 제어가 가능하게 된다.

3.1.1 센서의 위치

효과적인 제어를 하기 위해서는 센서의 위치가 매우 중요하다. 본 연구에서는, 센서는 이상적인 공정에서의 특정

시간에 대한 유동선단의 위치시켰다[7]. Fig. 4는 간단한 금형형태에서의 센서위치를 표현한 것이다. 즉, strip flow에서는 직선배열, radial flow에서는 반경배열을 따른다.

3.1.2 투과율 Map 구성

일반적으로 유동선단패턴은 예측된 경우와 실제경우가 다르다. 이는 섬유예비성형품의 불균일한 섬유부피분율에 의해 야기된다. 또한, 이러한 경우에서 투과율은 실제결과를 예측된 결과에 가깝게 하기 위해 계산된다. 따라서, 투과율 map 구성이 필요하다.

투과율 map 구성은 예상되는 유동선단과 실제적인 유동선단에서의 센서도달시간의 차이에 의해 이루어진다. 여기서 전 영역에서의 투과율(permeability)을 정확히 예상하는 것은 불가능하므로, 유동진행의 일방향성과 금형의 영역화를 가정한 map 구성기법이 적용된다(Fig. 5).

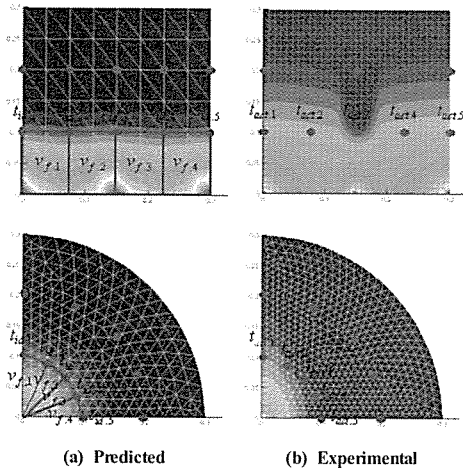


Fig. 5 Method of permeability mapping.

이를 수식화하기 위해, 우선 센서도달시간의 차이를 다음과 같이 정의한다.

$$\Delta t_i = t_{act,i} - t_{id,i} \quad (6)$$

여기서 Δt 는 센서도달시간의 차이, t_{act} 와 t_{id} 는 각각 실제적인 유동선단과 예측되는 유동선단에서의 센서도달시간을 나타낸다. 그리고, 하첨자 i 는 센서의 개수를 의미한다. ($i=1, \dots, 5$).

센서도달시간의 차이는 모든 영역에 영향을 미치기 때문에, 인접한 1개 또는 2개 센서의 시간차이가 그 영역의 투과율(permeability)에 영향을 준다고 가정하여 계산을 단순화하였다.

$$\Delta t_{off,j} = (\Delta t_j + \Delta t_{j+1})/2 \quad (7)$$

여기서 Δt_{off} 는 영향력을 지닌 센서도달시간의 차이이며, 하첨자 j 는 영역의 개수이다. ($j=i-1$)

식 (4)를 식 (1)에 대입하면 다음과 같다.

$$\bar{v} = -\frac{d_f^2 \cdot (1-v_f)^3}{16k \cdot \mu \cdot v_f^2} \nabla p \quad (8)$$

이를 속도는 섬유부피분율을 고려한 시간에 대한 거리의 미분

$$\left(\bar{v} = v_f \frac{dx}{dt} \right), \text{ 압력 구배는 거리에 대한 압력의 } \left(\nabla p = \frac{\Delta p}{x} \right)$$

변화량이라고 가정하여 v_f 에 대해 정리하면 다음과 같이 주어진다.

$$v_{f,j} = 1 / \left[L / \sqrt{\frac{1}{\mu} \cdot \frac{d_f^2}{8k} \cdot p \cdot \Delta t_{off,j}} + 1 \right] \quad (9)$$

여기서 L 은 주입구와 센서간의 거리이다.

식 (9)을 경험법칙으로 표현하면 아래와 같다.

$$\begin{cases} \Delta t_{off,j} > 0 : v_{f,j} \uparrow \\ \Delta t_{off,j} \approx 0 : v_{f,j} = \text{const.} \\ \Delta t_{off,j} < 0 : v_{f,j} \downarrow \end{cases} \quad (10)$$

즉, 실제적인 경우가 예상되는 경우의 센서도달시간보다 크면, 높은 섬유부피분율에 의한 느린 유동을, 반대의 경우는 낮은 섬유부피분율에 의한 빠른 유동을 나타낸다. 그리고, 시간이 비슷한 경우는 실제공정에서의 투과율이 이상적인 공정과 동일하다는 것을 의미한다.

3.1.3 압력 조절

공정이 시작되면, 작업자는 공정 중에 어떠한 조작도 할 수 없다. 즉, 유동패턴을 제어하기 위해 추가적인 주입구 또는 배출구를 설치할 수 없다는 것이다. 따라서, 실시간 제어는 미리 고정된 주입구와 배출구에서 이루어져야 한다. 이러한 제약조건 하에서, 유동을 제어하기 위해서는 단지 주입압력만을 조절할 수 밖에 없다.

압력계산은 실제공정에서의 센서도달시간의 편차를 최소화함으로써 이루어진다. 이상적인 경우, 예상되는 유동선단의 센서도달시간의 편차는 이다. 따라서, 이 경우에는 센서도달시간의 평균값을 사용하였다.

$$t_{dev,i} = t_{act,i} - t_{id,avg} \quad (11)$$

여기서 t_{dev} 는 예상되는 유동선단과 실제적인 유동선단 간 센서도달시간의 편차, t_{act} 는 실제적인 경우의 센서도달시간, $t_{id,avg}$ 는 예상되는 경우에서의 센서도달시간의 평균이다. 그리고, 하첨자 i 는 센서의 개수를 나타낸다. ($i=1, \dots, 5$).

반면, 실제적인 경우는 0이 아닌 시간편차를 가진다. 이런 경우에서 식 (12)와 같이 시간편차를 0으로 하는 센서도달시간 t 을 가정한 후, 이와 실제적인 센서도달시간과의 차이를 목적변수로 사용한다(식 (13)).

$$t_{dev,min} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^{no. of sensor} t_{dev,i}^2}{no. of sensor}} \quad (12)$$

$$t_{obj,i} = t_{act,i} - t_{dev,min} \quad (13)$$

여기서 $t_{dev,min}$ 은 센서도달시간의 최소편차, t_{obj} 는 주입압력 계산을 위한 목적변수로 사용되는 시간이다.

압력조절방법은 Fig. 6에서 보여주고 있다. 여기서 섬유부피분율은 Fig. 6(a)에서와 같이 주입압력을 계산하기 위해 각 센서위치에서 필요하다. 따라서, 적용 가능한 섬유부피분율은 인접한 1개 또는 2개의 투과율 영역에 의해 계산된다.

$$v_{f,aff,i} = (v_{f,i} + v_{f,i+1})/2 \quad (14)$$

여기서 $v_{f,aff}$ 는 영향력을 지닌 섬유부피분율이며, 하첨자 i 와 j 는 각각 센서와 영역의 개수를 의미한다.

식 (8)을 압력에 대해 정리 후, 시간을 목적변수로 치환하면 다음과 같이 주어진다.

$$p_k = L^2 \cdot \mu \cdot \frac{8k}{d_f^2} \cdot \frac{v_{f,aff,i}^2}{(1 - v_{f,aff,i})^2} \cdot \frac{1}{t_{obj,i}} \quad (15)$$

여기서 p 는 제어압력이며, 하첨자 k 는 주입구의 번호를 의미한다.

식 (15)를 경험법칙으로 표현하면 아래와 같다.

$$\begin{cases} |t_{obj,i}| \uparrow : p_i \downarrow \\ |t_{obj,i}| \downarrow : p_i \uparrow \end{cases} \quad (16)$$

즉, 목적변수의 절대값과 주입압력은 반비례적 성격을 지니며, 이는 섬유부피분율과의 비례관계와 같은 의미이다.

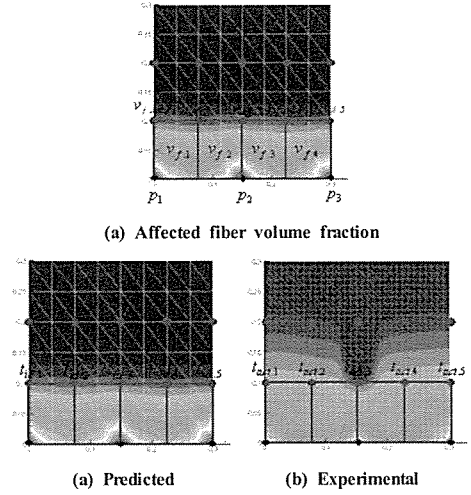


Fig. 6 Method of pressure regulation.

4. 결 과

4.1 Case I

이 경우는 섬유예비성형품의 겹침에 의한 불균일한 섬유부피분율 조건에서의 strip flow에 대한 결과이다. 주입구, 배출구, 센서의 위치와 중앙부의 높은 섬유부피분율의 분포는 Fig. 7과 같다.

Fig. 8에서와 같이, 제어를 한 유동이 그렇지 않은 경우보다 예측된 유동선단에 가까워짐을 볼 수 있다. 즉, 중앙 주입구에서의 압력상승에 따라 유동전진이 활발해지고, 좌우측 주입구에서의 압력배제를 통해 유동이 늦춰지고 있다. 이러한 유동선단패턴의 향상을 정량비교하기 위해 ‘예측된 경우와 제어하지 않은 경우’ 그리고 ‘예측된 경우와 제어한 경우’간 유동선단모양의 차이를 평균화된 시간편차로 나타내면 Fig. 9와 같다. 즉, 이 값이 감소하면 예측된 경우에 가까워지는 것을 의미한다.

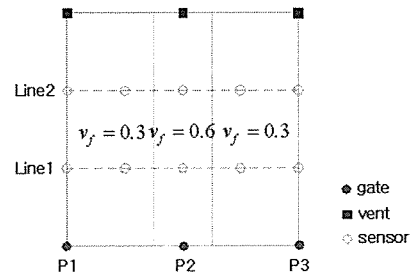


Fig. 7 Condition and sensor location for Case I.

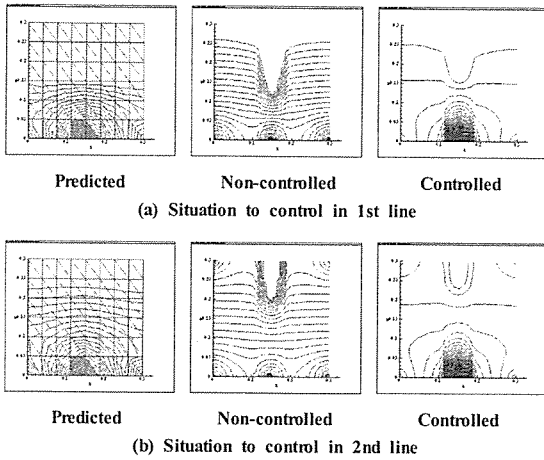


Fig. 8 Flow front for Case I.

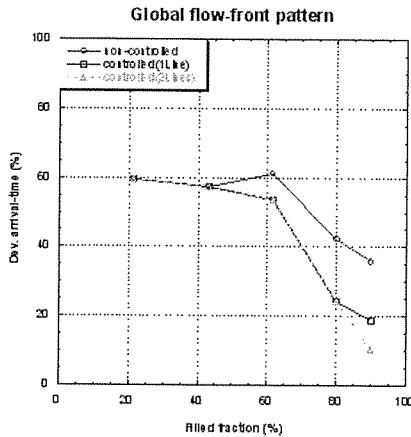


Fig. 9 Global flow front pattern for Case I.

금형충전이 완료될 무렵, 제어하지 않은 경우는 전체적인 감소율에 비해 급격한 감소를 보이고 있다. 이는 충전 완료시 유동패턴의 심한 변화를 의미하고 이에 따라 dry spot 생성 가능성이 높아진다. 반면, 충전 중 제어를 한 경우는 제어하지 않은 경우보다 최대의 차이를 보이며 차츰 예측된 유동에 가까워짐으로써, 충전완료시 감소율이 낮아져 dry spot 생성이 억제된다.

Table 1은 주어진 섬유부피분율과 투과율 map 구성단계에서 직접 계산된 섬유부피분율을 나타내며, 각각 와 로 비교적 높은 정확성을 가진다.

정확한 투과율 map을 바탕으로 계산된 압력은 Table 2와 같다. 이는 앞서 말한 것처럼 높은 섬유부피분율에 의해 중앙 주입구의 압력만 증가함을 보여준다.

Table 1 Comparison of v_f in permeability mapping : Case I

Original v_f	Calculated v_f	Accuracy (%)
0.3	0.454929	65.94
0.6	0.623643	96.21

Table 2 Calculated pressure in pressure regulation : Case I

	P1 (Pa)	P2 (Pa)	P3 (Pa)
Start~Line1	1.01325e5	1.01325e5	1.01325e5
Line1~Line2	0	5.90955e5	0
Line2~End	0	4.52804e5	0

4.2 Case II

이 경우는 제안한 기법이 다른 형태의 결합에서도 사용될 수 있는지 확인하기 위해 수행되었다. 이를 위해 동일한 유동형태에서의 race-track 조건을 적용하였으며, Fig. 10에서와 같이 주입구, 배출구, 센서와 race-track을 가정한다.

이 경우 역시, 우측 주입구에서의 압력배제를 통한 race-track영향의 감소로 유동선단패턴이 향상됨을 알 수 있다(Fig. 11). 충전율이 에 가까워질 때, 제어한 경우의 감소율이 제어하지 않은 경우보다 낮아지며, 제어한 유동이 그렇지 않은 경우보다 예측된 유동에 약 정도 가까워진다(Fig. 12).

이와 같이 race-track현상 하에서도 높은 정확성의 투과율(permeability) map 구성 후(Table 3), 필요압력이 계산되고 있다(Table 4).

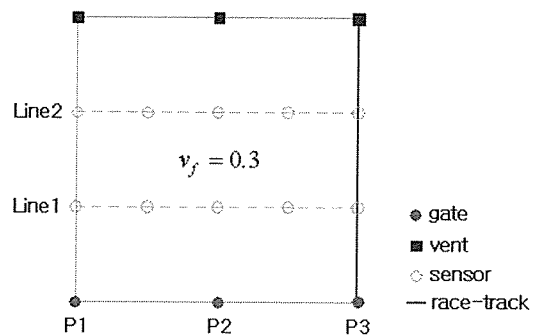


Fig. 10 Condition and sensor location for Case II.

4.3 Case III

Case III은 strip flow가 아닌 다른 유동형태에서 이 제어 기법의 유효성을 확인하고자 수행된 결과이다. 이를 위해 radial flow에서의 race-track 조건을 택했으며, 주입구, 배출구, 센서, race-track의 위치는 Fig. 13과 같다.

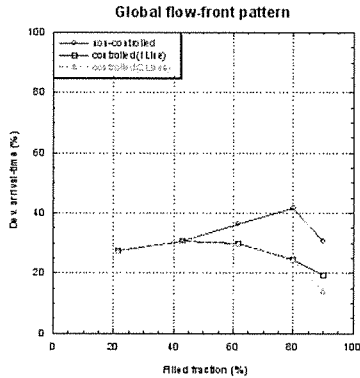
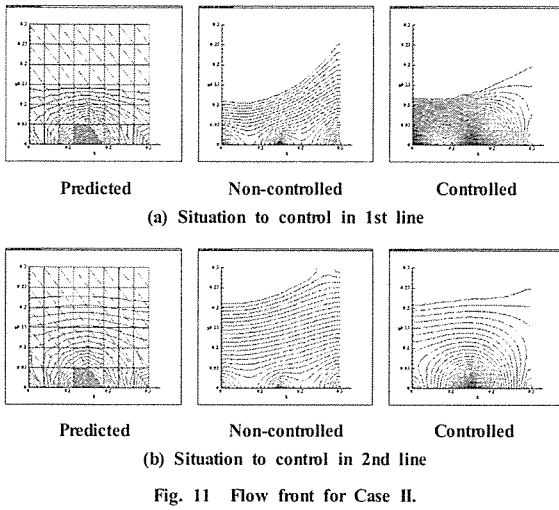


Table 3 Comparison of v_f in permeability mapping : Case II

Original v_f	Calculated v_f	Accuracy (%)
0.3	0.327410	91.63

Table 4 Calculated pressure in pressure regulation : Case II

	P1 (Pa)	P2 (Pa)	P3 (Pa)
Start~Line1	1.01325e5	1.01325e5	1.01325e5
Line1~Line2	0	1.56119e5	0
Line2~End	0	1.43192e5	0

Fig. 14와 시간편차비교 그래프(Fig. 15)에서 알 수 있듯이, radial flow에서도 유동선단패턴의 향상을 가져온다. 또한, Table 5와 6을 통해 계산된 2개의 수치가 높은 정확성과 적절한 값을 가진다고 할 수 있다. 따라서, 제안한 제어기법은 유동형태에 상관없이 사용 가능하다고 결론지을 수 있다.

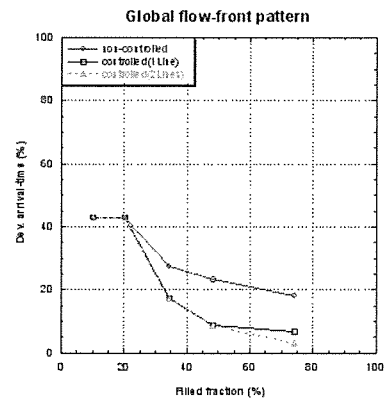
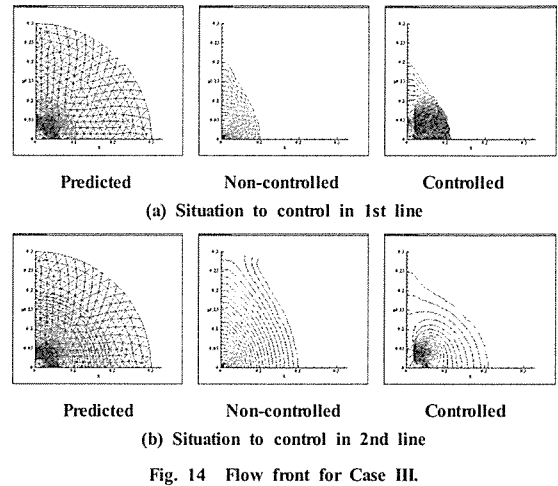
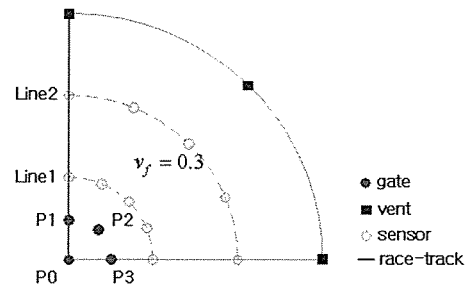


Table 5 Comparison of v_f in permeability mapping : Case III

Original v_f	Calculated v_f	Accuracy (%)
0.3	0.327410	91.63

Table 6 Calculated pressure in pressure regulation : Case III

	P0 (Pa)	P1 (Pa)	P2 (Pa)	P3 (Pa)
Start~Line1	1.01325e5	0	0	0
Line1~Line2	0	0	2.68205e5	1.09241e5
Line2~End	0	0	1.55120e5	0

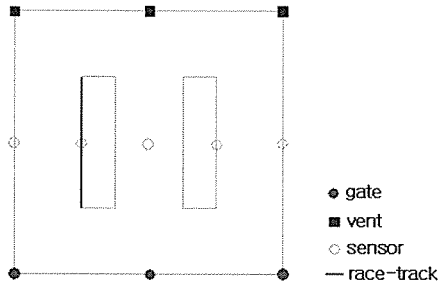


Fig. 16 Condition and sensor location for Application problem.

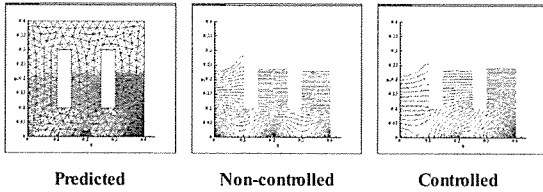


Fig. 17 Flow front for Application problem.

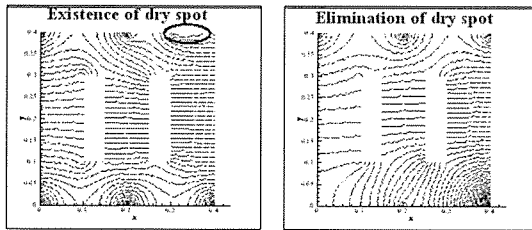


Fig. 18 State of dry spot in Application problem.

4.4 응용

마지막으로, 이 제어기법이 dry spot 제거측면에서 정말 효과가 있는지를 확인하였다. 조건은 Fig. 16과 같이 solid insert가 있는 strip flow에서의 race-track현상이다.

제어하지 않은 경우는 race-track영향에 의해 금형좌측의 유동이 빨라지며(Fig. 17), 금형충전완료시 dry spot이 존재하게 된다(Fig. 18). 이와는 달리, 제어한 경우는 좌측유동을 늦추고 우측유동을 빠르게 함으로써(Fig. 17) dry spot이 제거되었음을 볼 수 있다(Fig. 18). 또한, 이 경우도 높은 정확성의 투과율

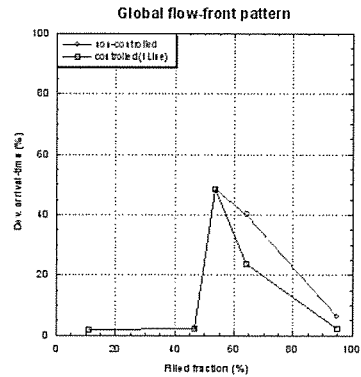


Fig. 19 Global flow front pattern for Application problem.

Table 7 Comparison of v_f in permeability mapping : Application

Original v_f	Calculated v_f	Accuracy (%)
0.3	0.250942	83.65

Table 8 Calculated pressure in pressure regulation : Application

	P1 (Pa)	P2 (Pa)	P3 (Pa)
Start~Line1	1.01325e5	1.01325e5	1.01325e5
Line1~End	0	1.22800e5	1.57970e5

map(Table 7)과 적절한 주입압력(Table 8)을 가진다.

따라서, 제안한 제어기법이 dry spot 제거측면에서 확실한 이점을 가진다고 할 수 있다(Fig. 19).

5. 결론

실제공정이 예측하기 어려운 여러 요인에 의해 변하기 때문에, 실시간 제어는 능동적으로 상황에 대처하기 위해 실행되어야 한다. 그러나, 이는 다음과 같은 몇 가지 제약조건을 가진다.

- 사전정보의 부재
- 센서 개수의 최소화
- 고정된 주입구와 배출구

이번 연구를 통해 위와 같은 제약조건 하에서 센서도달 시간만을 이용한 RTM 공정의 제어기법을 제시하고, 이를 이용한 공정변수 조절과 유동선단 제어로서 dry spot과 같은 결함을 해결할 수 있었으며, 이는 실제 현장에서도 적용 가능하다고 판단된다.

후 기

본 연구는 과학기술부 21세기 프론티어 연구개발사업의 지원으로 수행되었습니다.

참고문헌

- 1) Advani. S. G., Flow and Rheology in Polymer Composites Manufacturing, 1st ed, Vol. 10, *Elsevier Publishers*, Amsterdam, 1994, pp. 466-468.
- 2) Sozer. E. M., Bickerton. S., and Advani. S. G., "On-line Strategic Control of Liquid Composite Mould Filling Process," *Composites: Part A*, Vol. 31, 2000, pp. 1383-1394.
- 3) Niesen. D. R., and Pitchumani. R., "Closed-loop Flow Control in Resin Transfer Molding using Real-Time Numerical Process Simulations," *Composites Science and Technology*, Vol. 62, 2002, pp. 283-298.
- 4) Lawrence. J. M., Hsiao. K. T., Don. R. C., Simacek. P., Estrada. G., Sozer. E. M., Stadtfeld. H. C., and Advani. S. G., "An Approach to Couple Mold Design and On-line Control to Manufacture Complex Parts by Resin Transfer Molding," *Composites: Part A*, Vol. 33, 2002, pp. 981-990.
- 5) Johnson. R. J., and Pitchumani. R., "Enhancement of Flow in VARTM using Localized Induction Heating," *Composites Science and Technology*, Vol. 63, 2003, pp. 2201-2215.
- 6) Dullien. F. A. L., Porous Media - Fluid Transport and Pore Structure, *Academic Press*, New York, 1979.
- 7) Jiang. S., Zhang. C., and Wang. B., "Optimum Arrangement of Gate and Vent Locations for RTM Process Design using a Mesh Distance-Based Approach," *Composites: Part A*, Vol. 33, 2002, pp. 471-481.