

## 論文

## ARTM 공정 중의 수지 유동 해석에 관한 연구

강문구\* · 이우일\* · 이재원\*\* · 이종석\*\*

## A Study on the Mold Filling Process during ARTM Process

Moon Koo Kang\*, Woo Il Lee\*, Jae-Won Lee\*\* and Jong-Suk Lee\*\*

## ABSTRACT

Mold filling process during Advanced Resin Transfer Molding(ARTM) process was analyzed numerically. ARTM is a combination of Resin Transfer Molding(RTM) and compression molding process. While the maximum fiber volume fraction attainable using RTM process is limited to a low value, for ARTM process maximum possible fiber volume fraction is much higher. In ARTM process, resin is injected with the mold slightly open. Once the resin is filled to a specified amount, mold is closed inducing additional resin flow and compaction. In this study, Control Volume/Finite Element Method(CVFEM) was used to analyze the resin flow inside the mold. In order to verify the validity of the numerical solution, comparison was made between the exact and numerical results for molds with simple geometry. Close agreements were observed. Additional numerical calculations were performed to demonstrate the usefulness of the numerical scheme developed in this study.

## 초 록

Resin Transfer Molding(RTM)의 단점을 개선한 공정인 Advanced Resin Transfer Molding(ARTM) 공정에 대하여 금형 충전 과정을 수치해석 하였다. RTM 공정에서는 섬유 분율을 어느 수준 이상으로 높이기 어려운 단점이 있는데, 이를 개선하기 위하여 금형을 약간 연 상태에서 수지를 주입한 후 압축을 해 섬유 함유율을 높이는 공정이 ARTM 공정이다. ARTM 공정에서 수지의 유동을 해석하기 위하여 Control Volume/Finite Element Method를 사용하여 수치해석을 행하였다. 수치해의 정당성을 입증하기 위하여 엄밀해가 알려져 있는 경우에 대하여 수치해와 엄밀해를 비교하여 보았는데 잘 일치함을 볼 수 있었다. 본 연구에서는 수치해석의 유용함을 보이기 위하여 실제 복합재료 부품에 대하여 수치해석을 행하였다.

## 1. 서 론

Resin Transfer Molding(RTM)은 복합재료의 여러 가지 제조 공정 중 독특한 위치를 차지하고 있

으며, 그 여러 가지 장점으로 인하여 응용이 확대되고 있다.

Autoclave를 이용한 성형 방법은 제품의 질이 우수하다는 장점이 있으나, 설비 투자가 많이 필

\* 서울대학교 기계공학과

\*\* 삼성중공업 주식회사

요하며 생산성이 떨어져 대량생산에 적합하지 않은 단점이 있다. 또 수 적층법(Hand Layup)은 설비 투자는 거의 필요없는 대신 인건비가 많이 들며, 제품의 질이 일정치 않다는 단점이 있다. RTM 공정은 이 두 가지 방법의 단점을 보완한 방법으로 생산성도 높으며, 품질도 우수하다는 장점을 지니고 있다. RTM 공정에서의 가장 핵심이 되는 부분은 금형의 설계이다. 수지를 일정한 갯수의 정해진 위치에서의 주입구를 통하여 주입하므로, 수지 주입구의 위치와 갯힌 공기의 배출구의 위치 선정이 매우 중요하다. 잘못된 수지 주입구 및 공기 배출구의 선정은 기포의 형성으로 인한 제품의 기계적 성질의 저하를 초래한다. 따라서 금형의 형상에 따른 적절한 수지 주입구의 선정을 위하여 여러 가지 연구가 이루어져 왔는데, 특히 전산기를 이용한 수지의 금형 내에서의 유동에 대한 수치해석이 그 주류를 이루어 왔다. 수치해석에는 유한차분법(Finite Difference Method)[1~2], 유한요소법(Finite Element Method)[3~6] 및 경계요소법(Boundary Element Method)[7]등, 여러가지의 다른 방법들이 사용되고 있으며, 적절한 계산 격자의 선정과, preform 및 수지의 성질이 제대로 주어지면 실제 공정에서와 아주 근사한 결과를 얻을 수 있다.

RTM 공정의 최대의 문제점은 얻을 수 있는 섬유 함유율이 비교적 낮다는데에 있다. 기존의 RTM 공정에서 얻을 수 있는 최대 섬유 함유율은 50%내의 정동이며, 보통은 30~40%가 그 한계이다. 이는 일정한 위치에서 주입되는 수지가 금형을 가득 채우려면 그 유동 경로가 길어지며, 유동에 대한 저항은 섬유 함유율이 높을 수록 기하급수적으로 증가하기 때문이다. 최근에는 이러한 문제점을 개선하기 위한 새로운 성형법(ARTM, Advanced RTM)이 제시되고 있다[8]. ARTM 공정은 수지의 주입과 금형의 압축의 두 단계로 이루어진다. 수지를 금형에 주입할 때는 금형을 제품의 최종 두께보다 약간 더 열어서 금형 내의 보강섬유 함유율을 떨어뜨려 Permeability를 증대시킴으로서 수지의 주입을 원활하게 한다. 일정량의 수지가 주입되면, 그 때부터 금형을 닫기 시작하여 압축에 의해 수지의 유동이

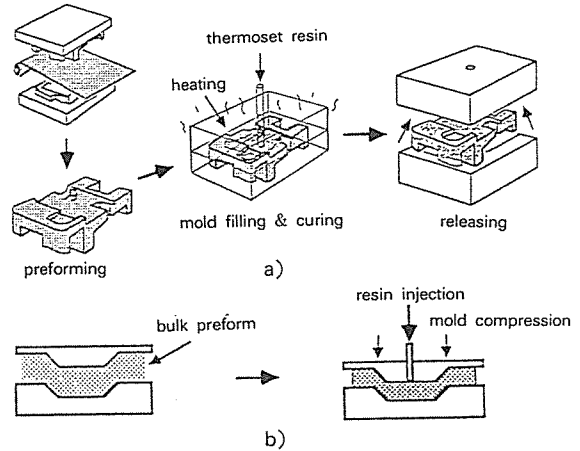


그림 1. Resin Transfer Molding(RTM)과 Advanced Resin Transfer Molding(ARTM)  
 a) Resin transfer molding(RTM)  
 b) Advanced resin transfer molding(ARTM)

일어나도록 한다(그림 1). 이와 같은 방법을 사용하면 상당히 높은 섬유 함유율(약 60%)의 제품도 성형할 수 있다.

본 연구에서는 ARTM 공정에서 Preform으로의 수지의 함침을 예측하기 위하여 전산 프로그램에 의한 수치해석적인 방법을 사용하였다. 이렇게 개발된 유동해석용 전산 프로그램은 ARTM 금형의 설계와 공정의 최적화에 유용하게 쓰이리라 생각 된다.

## 2. 지배방정식

Resin Transfer Molding(RTM) 공정에서 Preform을 통과하는 수지의 유동은 Darcy's Law에 따른다[7].

$$\vec{u} = -\frac{K}{\mu} \nabla P \quad \dots\dots\dots (1)$$

여기서  $K$ 는 Permeability,  $\mu$ 는 수지의 점도이다. 등방성 재료의 경우에는  $K$ 가 Scalar이나 이방성 재료에서는  $K$ 가 행렬로 주어지게 된다.  $K$ 는 섬유이 배열, 섬유 부피분율 등의 함수이나 주로 섬유부피분율  $v_f$ 의 함수이며,  $v_f$ 는 섬유가닥 사이의 간격등에 의해 결정되므로 가압력의 함수로써 주어진다. 또 유동은 다음과 같은 질량 보존식을 만족하여야 한다.

$$\nabla \cdot \bar{u} = 0 \quad \dots\dots\dots (2)$$

두께 방향으로의 압력 변화가 매우 작으므로 식 (1)에서 이를 무시하고 다음과 같이 두 개의 성분으로 나누어 쓸 수 있다.

$$u = -\frac{K_{xx}}{\mu} \frac{\partial P}{\partial x}, \quad v = -\frac{K_{yy}}{\mu} \frac{\partial P}{\partial y} \quad \dots\dots\dots (3)$$

또한, 두께 방향으로의 속도 성분이 선형적으로 변화함을 가정하면, 식 (2)의 질량보존식은 다음과 같이 표현된다[9].

$$\frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} = -\frac{\dot{h}}{h} \quad \dots\dots\dots (4)$$

여기서  $h$ 는 cavity의 두께이며,  $\dot{h}$ 는 cavity 두께의 시간에 따른 변화율, 즉 금형을 닫는 속도이다. 식 (3)을 질량 보존식인 식 (4)에 대입하면 수지의 압력 분포에 관한 방정식을 얻을 수 있다.

$$\frac{\partial}{\partial x} \left\{ \frac{K_{xx}}{\mu} \frac{\partial P}{\partial x} \right\} + \frac{\partial}{\partial y} \left\{ \frac{K_{yy}}{\mu} \frac{\partial P}{\partial y} \right\} = \frac{\dot{h}}{h} \quad \dots\dots (5)$$

수지의 유동은 금형을 닫음에 따라 cavity의 두께가 변하는 경우에도 생기며, 수지 함침 영역 전체에 걸쳐 금형 강하 속도가 식 (5)에 필요하다.

$$\dot{h} = \dot{h}_0(t) \cos\theta \quad \dots\dots\dots (6)$$

여기서,  $\theta$ 는 각 위치에서 cavity의 면과 금형강하 축이 이루는 각도이다. 수지는 상온에서 주입되어 가열된 금형으로부터 열전달을 받아 가열되며, 이에 따라 수지내부에 온도 분포가 생긴다. 또한 가열된 수지 내부에서는 시간이 경과함에 따라 경화 반응이 진행된다. 경화 반응은 발열 반응으로서, 경화의 진행은 온도의 상승을 초래하며, 온도의 상승은 경화 반응을 촉진시킨다. 수지의 점도  $\mu$ 는 수지의 경화의 진행과 온도에 따라 달라지므로 이에 대한 고려가 필요하다. 수지와 섬유 사이에는 열전달이 존재하므로 에너지 방정식은 수지와 섬유에 대해 각각 서술되어야 한다. 그러나, 섬유의 직경이 매우 작으므로 수지와 섬유 사이의 단위체적당 열전달 면적은 매우 크며, 따라서 수지와 섬유의 온도는 유동 선단을 제외하고는 서로 거의 같음을 가정할 수 있다. 유동 선단에서의 수지-섬유간의 열전달은 적절한 경계조건을 정의하여 처리할 수 있으며,

따라서 수지-섬유 복합물에 대해 다음과 같은 단일한 에너지 방정식을 기술할 수 있다.

$$\begin{aligned} \rho c_p \frac{\partial T}{\partial t} + \rho_r c_{pr} \left( u \frac{\partial T}{\partial x} + v \frac{\partial T}{\partial y} \right) \\ = k \left( \frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial z^2} \right) + \phi \dot{G} \quad \dots\dots (7) \end{aligned}$$

여기서,  $\rho$ 와  $c_p$ 는 각각 수지-보강섬유 복합재료의 평균 밀도와 비열이며,  $\rho_r$ ,  $c_{pr}$ 은 수지의 밀도와 비열을 뜻한다. 금형 충전 과정에 있어 유동은 수지에만 존재하므로, 대류항에서 사용된 밀도와 비열은 수지만에 대한 것이다.  $\dot{G}$ 은 경화 반응에 따른 발열항으로서, 다음과 같이 표현된다.

$$\dot{G} = \Delta H \dot{m} \quad \dots\dots\dots (8)$$

여기서  $\Delta H$ 는 경화반응열이며,  $\dot{m}$ 은 경화에 따른 질량생성항이다.

주입구에서 들어오는 수지는 경화가 진행되지 않은 상태이고 온도 상승에 따라 금형 내부에서 경화가 진행되므로, 금형 내부의 수지 전체에 걸쳐 경화도의 분포가 생기게 된다. 경화도에 대한 방정식은 비정상항과 대류항, 그리고 생성항으로 구성되며, 확산항은 일반적으로 무시된다[6].

$$\frac{\partial \alpha}{\partial t} + \frac{u}{\phi} \frac{\partial \alpha}{\partial x} + \frac{v}{\phi} \frac{\partial \alpha}{\partial y} = \dot{m} \quad \dots\dots\dots (9)$$

윗 식에서,  $\dot{m}$ 은 경화 반응에 따른 생성항으로서, 다음과 같이 표현된다[10].

$$\dot{m} = (k_1 + k_2 \alpha^{m_1}) (1 - \alpha)^{m_2} \quad \dots\dots\dots (10)$$

$m_1, m_2$ 는 상수이며,  $k_1, k_2$ 는 온도에 따른 함수로서 다음과 같이 나타내어진다.

$$k_1 = A_1 \exp\left(-\frac{E_1}{RT}\right), \quad k_2 = A_2 \exp\left(-\frac{E_2}{RT}\right) \quad \dots (11)$$

$A_1, A_2, E_1, E_2$ 는 상수이며, DSC 실험등에 의해 결정된다. 수지의 점도는 다음과 같이 온도와 경화도의 함수로 주어진다.

$$\mu = \mu_\infty \exp\left(\frac{\Delta E_\mu}{RT} + \kappa \alpha\right) \quad \dots\dots\dots (12)$$

여기서,  $\mu_\infty, \Delta E_\mu, \kappa$ 는 실험으로 결정되어야 할 값들이다.

위의 지배방정식에 대한 경계 조건들은 다음과

같다. 수지 주입구에서의 시간에 따른 압력 혹은 유량의 변화를 식 (5)에 대한 경계조건으로 주어야 한다.

at the injection gate,

$$P|_{gate} = P_o(t), \text{ or } u|_{gate} = u_o(t) \dots\dots\dots (13)$$

금형 벽면과 수직인 방향으로의 속도 성분이 존재하지 않으므로,

$$\frac{\partial P}{\partial n}|_{wall} = 0 \dots\dots\dots (14)$$

공기 배출구에는 대기압 조건을 적용할 수 있다.

$$P = P_{atm} \dots\dots\dots (15)$$

에너지 방정식 (식 7)을 풀기 위하여, 수지 주입구에서의 온도를 주어야 한다.

$$T|_{gate} = T_o \dots\dots\dots (16)$$

금형은 등온으로 가정할 수 있다.

$$T_{mold} = T_m \dots\dots\dots (17)$$

수지 유동 선단에서는 수지 전진면 이동에 위치한 보강섬유가 가지고 있던 열량이 수지 함침 영역 내부로 유입되므로 유동 선단의 경계조건을 다음과 같이 서술할 수 있다[6].

$$k \frac{\partial T}{\partial n}|_{front} = (1-\phi) \rho_f c_{pf} u_n (T_{f0} - T) \dots\dots (18)$$

화학반응식 (식 9)에서, 수지 주입구에서는 초기 경화도가 0이므로,

$$\alpha|_{gate} = 0 \dots\dots\dots (19)$$

수지 유동 선단에서는 선단과 수직인 방향으로의 경화도의 구배가 존재하지 않는다고 가정하면,

$$\frac{\partial \alpha}{\partial n}|_{front} = 0 \dots\dots\dots (20)$$

위에서 서술한 지배방정식들을 이상의 경계조건에 대하여 풀면 수지의 유동 선단의 위치와 온도, 압력 및 경화도 분포를 시간에 따라 구할 수 있다.

### 3. 수치 해석

일반적으로 RTM 공정으로 제조되는 부품은 그

형상이 복잡하므로, 지배방정식을 주어진 경계조건에 대하여 풀기 위하여는 수치해석적인 방법을 채택하여야 한다. 본 연구에서는 Control Volume Finite Element Method(CVFEM)을 이용하였다 [11]. CVFEM은 고정 격자계를 사용하므로, 특히 계산 영역이 변화하는 문제에 대하여 계산 시간을 크게 단축시킬 수 있는 장점이 있다. CVFEM을 이용하여 지배방정식에 대한 유한요소식을 만들면 다음과 같다.

압력에 관한 방정식인 식 (5)는 다음과 같이 쓸 수 있다.

$$\int_{\Gamma} h \begin{bmatrix} s_{xx} & s_{xy} \\ s_{yx} & s_{yy} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \frac{\partial P(x, y)}{\partial x} \\ \frac{\partial P(x, y)}{\partial y} \end{bmatrix} \cdot [n_x \ n_y] d\Gamma = \int_{C.V.} \frac{h}{h} dV \dots\dots\dots (21)$$

$$\text{여기서, } \begin{bmatrix} s_{xx} & s_{xy} \\ s_{yx} & s_{yy} \end{bmatrix} = \frac{1}{h} \int_{-\frac{h}{2}}^{\frac{h}{2}} \frac{1}{\mu} \begin{bmatrix} K_{xx} & K_{xy} \\ K_{yx} & K_{yy} \end{bmatrix} dz$$

에너지 방정식 (7)은 아래와 같이 되며,

$$\begin{aligned} & \frac{\partial}{\partial t} \int_{C.V.} \rho c_p T dV + \int_{C.V.} \left[ \rho_r c_{pr} \left( u \frac{\partial T}{\partial x} + v \frac{\partial T}{\partial y} \right) \right] dV \\ & = \int_{C.S.} \left[ k \frac{\partial T}{\partial x} + k \frac{\partial T}{\partial y} + k \frac{\partial T}{\partial z} \right] d\Gamma \dots\dots\dots (22) \\ & + \int_{C.V.} \phi \Delta H (k_1 + k_2 \alpha^{m_1}) (1-\alpha)^{m_2} dV \end{aligned}$$

화학반응식 (9)는 다음과 같이 기술된다.

$$\begin{aligned} & \frac{\partial}{\partial t} \int_{C.V.} \alpha dV + \int_{C.V.} \left[ \frac{u}{\phi} \frac{\partial \alpha}{\partial x} + \frac{v}{\phi} \frac{\partial \alpha}{\partial y} \right] dV \\ & + \int_{C.V.} (k_1 + k_2 \alpha^{m_1}) (1-\alpha)^{m_2} dV \dots\dots\dots (23) \end{aligned}$$

위의 유한요소 대수 방정식을 풀면 각 절점에서의 원하는 변수들인 압력, 온도, 경화도의 값을 얻을 수 있다.

CVFEM에서는 유한요소와 더불어 control volume들이 정의되며, 각 control volume의 수지 함침율에 따라 충전 부피 분율을 다음과 같이 정의할 수 있다[12].

$$\text{Filled Fraction, } f = \frac{\text{filled volume}}{\text{total volume}}$$

이와 같이 정의된  $f$ 에 따라 각 절점을 중심으로 한 모든 미소 control volume들을 다음과 같이 3가지 부류로 구분할 수 있다.

$f=1$  ; 내부 유동 영역(main flow region)

$0 < f < 1$  ; 유동 전진 영역(flow front region)

$f=0$  ; 유동 미도달 영역(empty region)

이 중 내부 유동 영역은 전진이 진행되는 동안에도 격자를 재생성하지 않고 처음 생성한 격자를 계속 해서 사용한다. 유동 전진 영역에 위치한 control volume들은 계산 영역에서 일단 제외되며,  $f$  값이 1이 되면 그 control volume은 내부 유동 영역에 포함된다. 이와 같은 전진법을 사용할 경우 질량 보존칙에 매우 충실한 유동 전진이 가능하다.

에너지방정식을 풀 때, 수지와 섬유의 온도는 동일한 것으로 간주한다. 이러한 가정은 수지 주입 초기에 전진면 부근에서는 다소 부적합할 수도 있으나, 그 이외의 대부분의 영역에서 합당한 가정으로 받아들일 수 있다. 수지전진면 부근에서의 온도는 수지와 섬유의 질량비에 따른 가중평균온도를 택한다.

$$T = \frac{(1-\phi) \rho_f c_f T_f + \phi \rho_r c_r T_r}{(1-\phi) \rho_f c_f + \phi \rho_r c_r} \quad \dots\dots\dots (24)$$

실제로 에너지방정식에서 계산되는 온도는 이러한 평균온도의 분포이며, 수지만의 온도  $T_r$ 은 평균온도  $T$ 와 섬유온도  $T_f$ 로부터 역으로 계산된다. 이와 같이 구해진  $T_r$ 은 경화도방정식에서의 두 계수,  $k_1, k_2$ 와 다음 단계의 압력분포 계산에 필요한 점도  $\mu$ 를 구하는데 사용된다.

금형 압축에 따른 preform의 투과도(permeability)의 변화는 다음과 같은 Carman-Kozeny equation을 이용하여 표현할 수 있다[13].

$$K_{ii} = \frac{r_f^2}{4k_{ii}} \frac{(1-V_f)^3}{V_f^2} \quad \dots\dots\dots (25)$$

여기서,  $K_{ii}$ 는  $i$ 방향으로의 투과도,  $r_f$ 는 섬유가닥의 평균반경,  $V_f$ 는 섬유의 부피분율,  $k_{ii}$ 는  $i$ 방향으로의 Cozeny constant이다.

### 4. 검 증

개발된 해석프로그램을 검증하기 위해 직관적으로 예측가능한 몇가지 예를 해석하였다. 첫번째 예는 그림 2와 같은 일차원적인 선형 preform의 한쪽 끝면 전체에서 일정 압력으로 수지를 주입하여 수지전진면이 특정한 위치에 도달하면 주입을 중단하고 금형압축을 시작하여 예정된 섬유부피분율에 이를때까지 등속압축을 계속하는 경우이다. 수지의 점도는  $16.1 \text{ Pa}\cdot\text{s}$ , 섬유의 초기부피분율은  $0.2$ , 초기 투과도는  $1.25 \times 10^{-9} \text{ m}^2$ 로 하였으며, 주입압력은  $1.0 \times 10^5 \text{ Pa}$ , preform 두께는  $1 \text{ cm}$ , 금형압축은 수지전진면이  $7.5 \text{ cm}$  전진한 순간부터  $0.01 \text{ mm/s}$ 의 속도로 수행하였다. 수지는 등온으로 유지되고 경화반응은 일어나지 않으며, 따라서 수지의 점도는 일정하게 유지되는 것으로 가정하였다. 수지가 주입되는 단계에서는 식 (26)과 같이 수지전진면의 이동거리가 시간의 제곱근에 비례하는 것으로 알려져 있다[14].

$$L = \sqrt{2 \frac{K}{\mu} P_{inj} \cdot t} \quad \dots\dots\dots (26)$$

여기서  $L$ 은 주입구와 수지전진면 사이의 거리,  $P_0$ 는 주입압력,  $K$ 는 섬유의 투과도,  $\mu$ 는 수지의 점도,  $t$ 는 경과시간이다. 다음 단계에서는 수지 주입이 중단되고 등속금형압축이 수행된다. 이 단계에서는 금형내의 공간에 존재하는 수지의 질량이 일정하게 보존된다고 제한조건이 만족되어야 하며, 따라서 다음과 같은 관계를 얻을 수 있다.

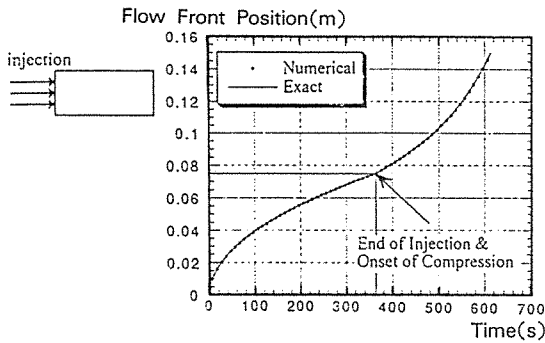
$$\phi = 1 - \frac{h_0(1-\phi_0)}{h_0 - V(t-t_0)} \quad \dots\dots\dots (27)$$

$$L = \frac{h_0 \phi_0 L_0}{(h_0 - V(t-t_0)) \phi}$$

여기서,  $\phi$ 는 공극률,  $h$ 는 preform의 두께,  $L$ 은 주입구와 수지전진면 사이의 거리,  $V$ 는 금형강하 속도,  $t$ 는 경과시간, 첨자 0은 금형압축을 시작한 시점을 나타낸다. 수지전진면 위치에 대한 엄밀해와 수치해석의 결과가 그림 2-a에 비교되어 있다. 그림에서 볼 수 있는 바와 같이 두 해는 매우 잘 일치한다.

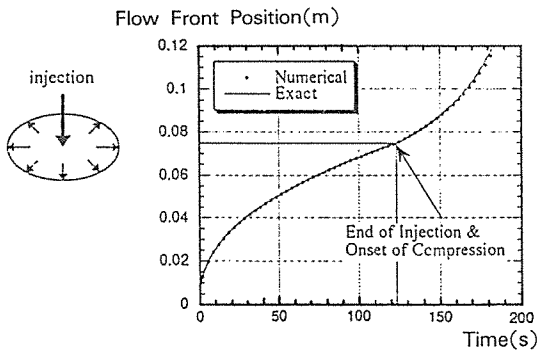
두번째 예는 평면 preform의 가운데의 한 점에서

수지를 주입하여 동심원형태로 전진하도록 한 뒤 특정한 반지름에 도달하였을 때 주입을 중지하고 금형압축을 시작하여 예정된 부피분율에 이를 때까지 등속으로 압축을 계속하는 경우이다. 수지의 점도는 16.1 Pa·s, 섬유의 초기부피분율은 0.2,



Injection Pressure(Pa)	1. e5
Resin Viscosity(Pa s)	16.1
Preform Permeability(m <sup>2</sup> )	1.25e-9
Preform Thickness(m)	0.01
Initial V <sub>f</sub>	0.2
Mold Closing Speed(m/s)	1. e-5

a) 직교좌표계상에서의 1차원 유동



Injection Pressure(Pa)	1. e6
Inlet Gate Radius(m)	7.5e-3
Resin Viscosity(Pa s)	16.1
Preform Permeability(m <sup>2</sup> )	1.25e-9
Preform Thickness(m)	0.01
Initial V <sub>f</sub>	0.2
Mold Closing Speed(m/s)	1. e-4

b) 원통좌표계상에서의 1차원 유동

그림 2. 수지전진면 위치에 대한 엄밀해와 수치결과와의 비교

초기 투과도는  $1.25 \times 10^{-9} \text{ m}^2$ 로 하였으며, preform 두께는 1cm, 주입압력은 선형의 경우 보다 10배 높은  $1.0 \times 10^6 \text{ Pa}$ , 금형압축은 수지전진면의 반경이 7.5cm에 이르는 순간부터 0.1mm/s의 속도로 수행하였다. 이 경우 수지주입 단계에 대한 엄밀해는 식 (28)과 같이 주어진다[14].

$$\left[ \frac{1}{2} \left( \frac{r}{r_0} \right)^2 \ln \left( \frac{r}{r_0} \right) + \frac{1}{4} \left[ 1 - \left( \frac{r}{r_0} \right)^2 \right] \right] = \frac{t}{(r_0^2 \mu) / (P_0 S)} \quad \dots\dots\dots (28)$$

금형압축단계에는 선형의 경우 마찬가지로 금형 내의 공간에 존재하는 수지의 질량이 일정하게 보존된다는 제한 조건에 따라 다음과 같은 관계를 얻을 수 있다.

$$\phi = 1 - \frac{h_0(1-\phi_0)}{h_0 - V(t-t_0)} \quad \dots\dots\dots (29)$$

$$R = \sqrt{\frac{h_0 \phi_0}{(h_0 - V(t-t_0)) \phi}} R_0$$

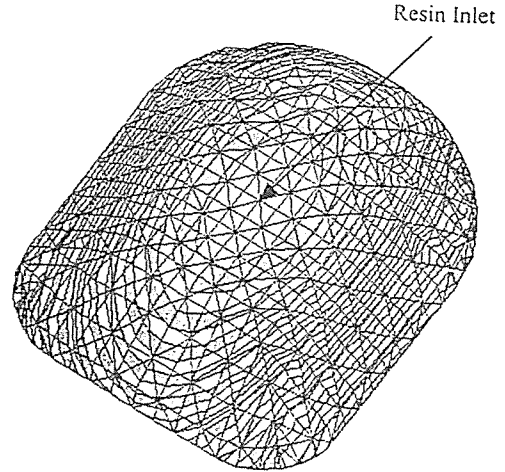
식 (28) 및 (29)에 의한 엄밀해와 수치해석에 따른 수지전진면의 위치는 그림 2-b에서 볼 수 있는 것과 같이 매우 잘 일치한다.

### 5. 응용예

개발된 코드의 효용성을 예시하기 위해 몇가지 실제적인 응용예를 제시하였다. 첫번째는 preform의 비등방성에 따른 금형충전형태의 변화를 관찰할 수 있는 예이다. 적용된 부품은 산업용 로봇트팔의 덮개부분으로서, 변형된 반구의 형태이다. 이 부품은 부피분율을 높이기 위해 금형압축을 수행하는 이외에도 보다 높은 강도를 얻기 위해 다각도 경편 재료(multi-axial knitted mat)를 사용하며, 이에 따라 투과도의 방향성이 존재한다. 이러한 비등방성에 따라 금형충전시의 수지전진형태가 달라지며, 일반적으로 평면형상의 균일한 비등방 preform을 함침시키는 경우에는 투과도가 가장 높은 방향과 가장 낮은 방향을 두 축으로 하는 타원 형태로 수지전진면이 이동한다. 이 때 타원의 장축과 단축의 길이 비는 투과도의 비와 같다. 그림 3에는 이 경

우에 대한 수치해석 결과가 나타나 있다. 그림 3-a는 등방성 preform을 사용한 경우이고, 그림 3-b는 비등방성 preform을 사용한 경우이다. 투과도의 비는  $\frac{K_{max}}{K_{min}} = \frac{1}{2}$  이며, 기타 물성치와 주입 조건은 그림 3-a, b에 각각 주어져 있다.

두번째 예는 중심선을 경계로 양쪽의 두께가 다른 정사각 평판형 구조물의 경우이다. 초기의 두께는 얇은 쪽이 1mm, 두꺼운 쪽은 2mm로 하였다. 양쪽은 같은 보강섬유로 채워져 있고 섬유부피분율은 양쪽이 0.3으로 동일하며, 따라서 초기 투과도 역시 동일하다. 수지는 평판의 중점에서 주입되며, 주입단계에서는 수지전진면은 두께가 일정한 경우와 마찬가지로 동심원 형태로 전진한다(그림 4-a). 주입이 중단되고 압축이 시작되면 압력 분포는 갑자기 크게 달라지며(그림 4-b). 이에 따라 수지전진면의 형태가 점차 비대칭적으로 변화한다. 금형의

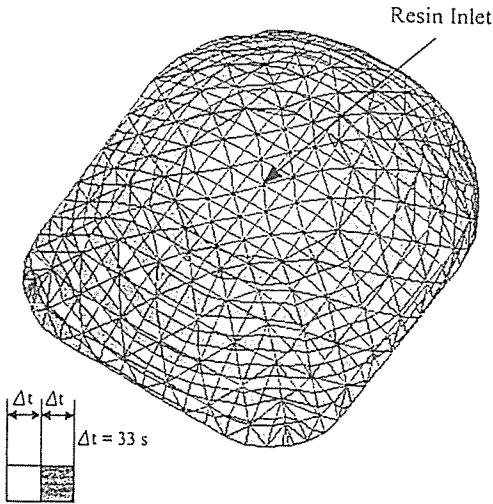


Injection Pressure(Pa)	5. e5
$K_1(m^2)$	4. 4e-10
$K_2(m^2)$	2. 2e-10
Preform Thickness(m)	3. e-3
Resin Viscosity(Pa s)	1. 51

Fill Time : 392s

b) 비등방성 보강재

그림 3. 계 속



Injection Pressure(Pa)	5. e5
$K_1(m^2)$	4. 4e-10
$K_2(m^2)$	4. 4e-10
Preform Thickness(m)	3. e-3
Resin Viscosity(Pa s)	1. 51

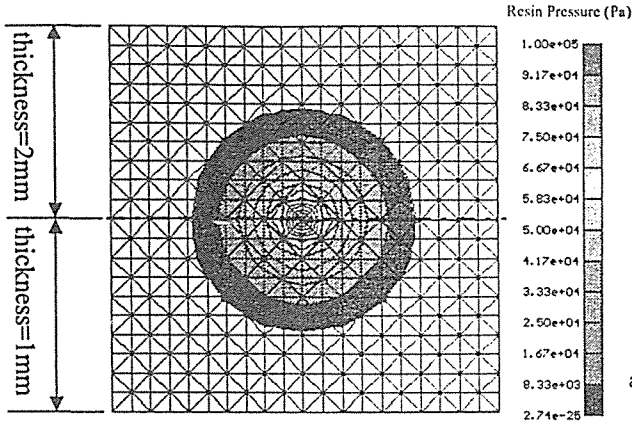
Fill Time : 392s

a) 등방성 보강재

그림 3. 산업용 로봇트압 덩개의 금형충전 패턴(금형 압축 적용안함)

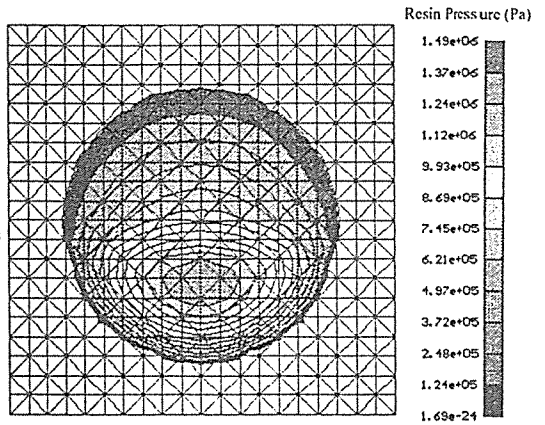
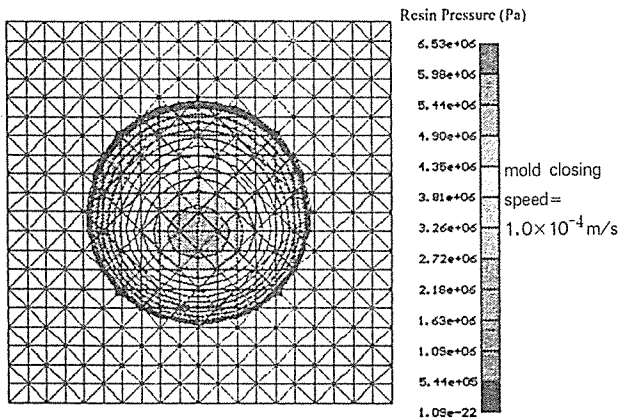
압축속도가 양쪽에 대해 일정하므로 수지는 두께가 얇은 쪽으로 더 빠르게 전진한다(그림 4-c). 사용된 물성치와 주입조건은 그림 4-a에 같이 주어져 있다.

마지막 예는 비교적 복잡한 형태의 shell 구조물에 대한 것이다. 이 부품은 경승용차의 지붕 패널로서, 양쪽에 C-pillar(기둥)가 존재한다. filled fraction이 60%에 이르면 수지 주입을 중단하고 금형 압축을 시작하여 지붕판의 나머지와 기둥을 채우게 된다. 기둥 부분은 금형 압축의 방향과 거의 수직하여 압축의 효과가 거의 없으며, 지붕판에서 밀려나온 수지에 의해 채워진다. 이 경우 비등은 효과와 수지의 경화반응이 모두 고려되었다. 그림 5-a에는 시간이 따른 수지전진면의 모습 및 사용된 물성치와 주입조건, 그림 5-b에는 금형충전 완료시의 온도 분포, 그림 5-c에는 같은 시기의 경화도 분포가 나타나 있다. 그림 5-d에는 시간에 따른 충전비율을, 그림 5-e에는 금형에 가해지는 clamping/compression force의 시간 경과에 따른 변화를 나타내었다.



Injection Pressure(Pa)	1. e5
Resin Viscosity(Pa s)	16.1
Preform Permeability(m <sup>2</sup> )	9.5e-9
Preform Thickness(thick)(m)	2. e-3
Preform Thickness(thin)(m)	1. e-3
Initial V <sub>f</sub>	0.3

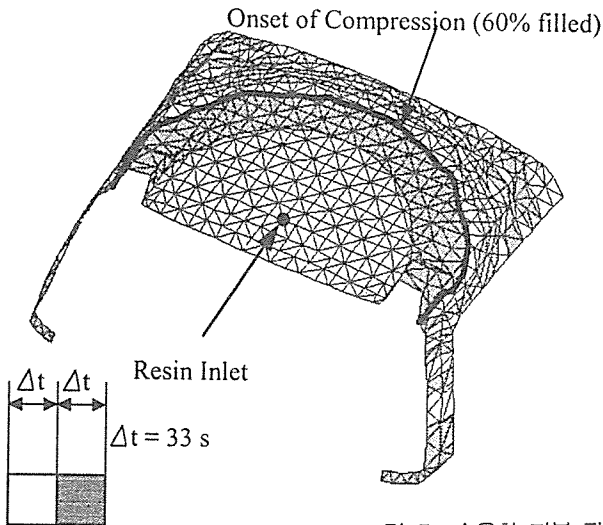
a) 수지주입



b) 수지주입 중단 및 금형압축 개시

c) 금형 압축

그림 4. 부분적으로 두께가 다른 평판의 수지주입/금형압축 충전

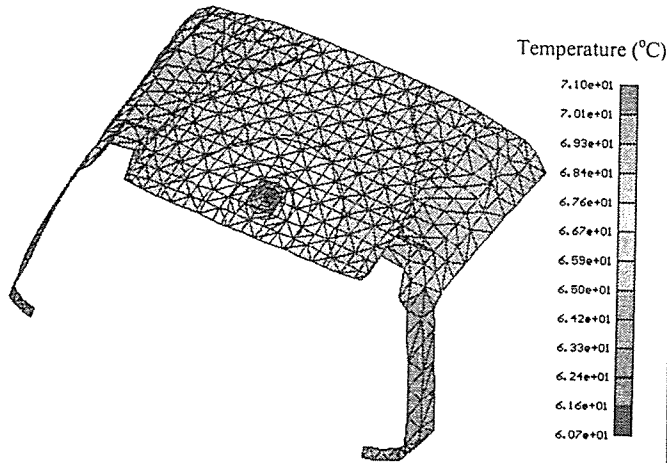


Injection Pressure(Pa)	1. e6
Onser of Compressions(%) (End of Injection)	60
Mold Closing Speed(m/s)	5. e-6
Initial V <sub>f</sub>	0.3
Final V <sub>f</sub>	0.58
Preform Permeability(m <sup>2</sup> )	9.5e-9
Fill Time(s)	394.9

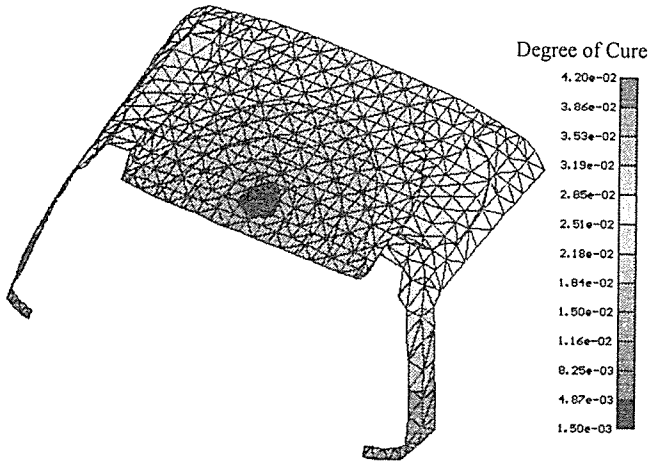
a) 금형 충전 패턴

그림 5. 승용차 지붕 패널의 금형 충전



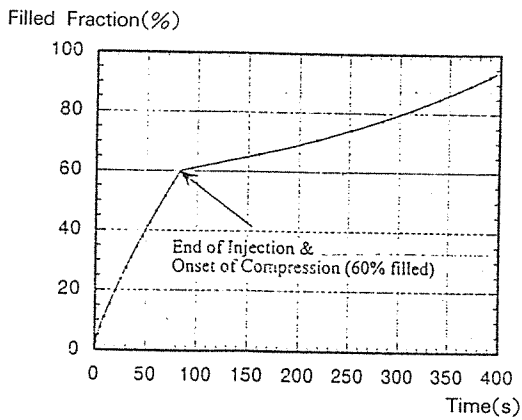


b) 금형 충전 완료시 온도 분포

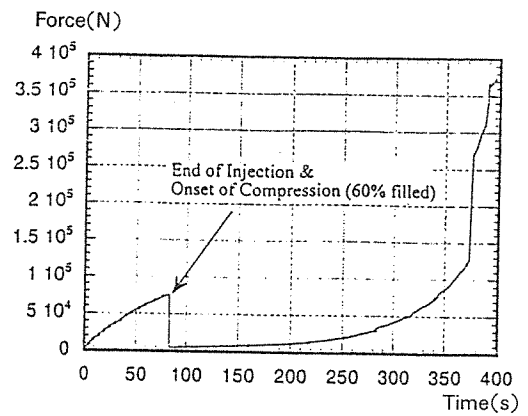


c) 금형 충전 완료시 경화도 분포

Injection Temperature(°C)	25.0
Mold Temperature(°C)	70.0
$m_1$ (식 10)	0.693
$m_2$ (식 10)	0.327
$k_1$ (식 11)	0.02639
$k_2$ (식 11)	-8.8466
$E_1/R$ (식 11)	10048.4
$E_2/R$ (식 11)	9505.58
$\mu_{\infty}$ (Pas) (식 12)	$5.419 \times 10^{-5}$
$\kappa$ (식 12)	26.89
$\Delta E_{\mu}/R$ (식 12)	3636.45



d) 시간에 따른 금형 충전 비율



e) 시간에 따른 금형결합/압축력

그림 5. 계 속

## 6. 결 론

ARTM공정의 수치해석을 위한 수치해석 전산프로그램을 개발하였다. 수지 주입 및 금형 압축에 따른 압력의 분포 및 수지 유동을 해석하였으며, 보강섬유의 비등방성, 압축에 따른 투과도의 변화, 수지의 비등온 효과 및 경화반응에 따른 점도변화 등을 고려하였다. 개발된 프로그램은 검증을 거쳐 실제적인 문제에 효율적으로 적용될 수 있음을 확인하였다.

## 후 기

본 연구는 교육부 학술진흥재단 지원 과제 “자유표면이 존재하는 고분자 성형공정의 해석(과제번호 ME94-A-03)”의 일부 지원에 의하여 행하여졌습니다. 관계자 여러분께 감사드립니다.

## 참 고 문 헌

1. Coulter J.P. and Güceri, S.I., “Resin Impregnation During the Manufacturing of Composite Materials,” CCM Report No.88-07, University of Delaware(1988)
2. Shipeng Li, Raymond Gauvin, “Numerical Analysis of the Resin Flow In Resin Transfer Molding,” *Jouranal of Reinforced Plastics and Composites*, 10, 314(1991)
3. Albert W. Chan and Sun-Tak Hwang, “Modeling of the Impregnation Process During Resin Transfer Molding,” *Polymer Engineering and Science*, 31, 1149(1991)
4. M.V. Brusckhe, S.G. Advani, “A Finite Element/Control Volume Approach to Mold Filling in Anisotropic Porous Media,” *Polymer Composites*, II, 398(1990)
5. W.B. Young, K.Han, L.H. Fong, L.James Lee, Ming J. Liou, “Flow Simulation in Molds with Preplaced Fiber Mats,” *Polymer Composites*, 12, 391(1991)
6. R.Lin, L.J. Lee and M.Liou, “Non-Isothermal Mold Filling and Curing Simulation in Thin Cavities with Preplaced Fiber Mats,” *Intern. Polymer Processing*, VI(4) : 356-369(1991)
7. M.K.Um and W.I.Lee, “A Study on the Mold Filling Process in Resin Transfer Molding,” *Polymer Engineering and Science*, 31(11) : 765-771(1991)
8. H.K.Whang, Y.R.Kim, J.W.Lee, M.J. Jung, Y.Rew, “Effect of Processing Conditions on the Formation of Void During Advanced RTM Process”, 49th Annual Conference, Composite Institute, The Society of the Plastics Industry, Inc.(1994)
9. Tucker, C.L., *Fundamentals of Computer Modeling for Polymer Processing*, Hanser, Publishers, Oxford University Press, New York, 385-398(1988)
10. Mark R. Dusi, Woo I. Lee, Peter R. Ciriscioli and George S. Springer, “Cure Kinetics Viscosity of Fiberite 976 Resin,” *Journal of Composite Materials*, 27, 243(1987)
11. B.R. Baliga and S.V. Patankar, “Elliptic Systems : Finite Element Method II,” *Handboof of Numerical Heat Transfer*, John Wiley and Sons, Inc(1988)
12. Z. Tadmor, E. Broyer and C. Gutfinger, “Flow Analysis Network(FAN)-A Method for Solving Flow Problems in Polymer Processing,” *Polymer Engineering and Science*, 14, 660(1974)
13. F.A.L.Dullien, *Porous Media-Fluid Transport and Pore Structure*, 170-172, Academic Press(1979)
14. Z. Cai, “Analysis of Mold Filling in RTM Process” *Journal of Composite Materials*, Vol.26, No.9(1992)