

論文

Resin Transfer Molding 에 의한
복합재료성형에서 수지의 유동에 관한 연구

유영은 · 이우일

A Study on the Resin Flow During Resin Transfer Molding

Yoo, Yeong Eun and Lee, Woo Il

ABSTRACT

A numerical simulation of mold filling process during resin transfer molding with heated die was performed by boundary element method and perturbation method. As the calculation domain changes due to proceeding resin front, numerical calculation nodes on boundary were rearranged for each time step and integration was performed only to the meshes in calculation domain among fixed meshes over mold. The nodes out of mold after proceeding was relocated to compensate mass loss. The results was compared with the results by other method. Mass conservation for several molds shows the validity of this method.

초 록

가열된 금형을 이용한 Resin Transfer Molding(RTM) 공정에서의 수지 유동을 예측하기 위하여 경계 요소법(Boundary Element Method)과 섭동법을 이용하여 해석하였다. 수지 경계면이 매시간 바뀔때 따라 경계에서의 격자를 등간격으로 재배치 하였으며, 유동 영역에 대해서는 미리 고정된 메쉬중 유동 영역에 포함된 메쉬에 대해서만 적분을 수행하였다. 고체 벽면 밖으로 나간 격자는 손실된 유량을 보충하는 위치에 재배치 하였다.

수치 해석의 결과를 기존의 결과와 비교하였고, 여러 금형 형상에 대해 계산을 수행하여 질량이 잘 보존되어 수치 해석 방법이 타당함을 알 수 있었다.

1. 서 론

RTM은 금형내에 미리 준비된 적당한 형태의 보강 섬유에 일정량의 수지를 압력을 가하여 함침시키는 제조 공법이다(Fig. 1). RTM은 과거에는 자동차 부품 및 소비재 물품의 생산에 주로 이용되었다. 그러나 최근, 제조 방법의 개선에 따라 낮은 생산비와 우수한 기계적성질을 얻을 수 있어, 수적층법(Hand Layup), Autoclave Molding, 그 밖의 다른 노동, 자본 집약적인 공정들을 이용하던 항공 산업등의 분야로 그 적용 폭이 넓어지고 있다. 또한 제품의 크기와 형상에 대한 제한이 적기 때문에, 기타 다른 공정들을 대체할 수 있는 충분한 가능성을 가진다. RTM 공정은 제품의 표면이 우수하고 높은 정밀도를 요구하는 복잡한 형상의 제품 생산이 비교적 용이하며 후 가공 과정이 거의 필요하지 않는 등의 장점을 지닌다. 또한 금형 제작 및 사용 재료에 대한 선택의 폭이 넓고, 설계 및 금형 제작 과정에 대해서 CAD 사용이 가능하며 부품을 일체화하기 편리하고 생산성이 우수하다는 등의 잇점이 있다.

RTM의 공정 과정은 보강 섬유를 금형에 채우는 과정, 금형 충전 과정과 경화 과정으로 구분할 수 있는데, 최근 가열된 금형을 사용하여 생산성을 향상시키고 있다. 이로 인하여 화학 반응이 더욱 활발히 진행되게 되며, 이는 점도를 변화시켜 금형 충전 과정에도 상당한 영향을 미친다. 또한, 금형 충전 과정에서의 유동 특성은 수지의 선택과 금형 형상, 주입구의 유량 및 압력 등에 의해서도 영향을 받는다. 충전

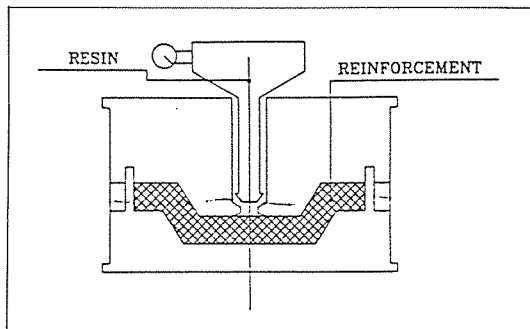


Fig. 1. Schematic of Resin Transfer Molding

과정에서의 유동 특성은 생산된 제품의 기계적 성질과 생산성에 큰 영향을 미치므로, 앞서 언급한 변수들을 고려하여 금형내의 유동 현상을 해석하는 것이 필수적이라 할 수 있다.

RTM 공정에서의 수지 충전에 관한 해석은 Coulter와 Gucer[1]가 경계 부착좌표(Boundary Fitted Coordinate)를 이용한 유한 차분법(Finite Difference Method)으로 수치 해석을 수행한적이 있고, Chan과 Hwang[2]은 유한 요소법(Finite Element Method)을 사용하여 계산을 수행한 바 있다. 또한 Um과 Lee[3]는 경계 요소법을 사용하여 수치 해석을 수행하였다.

본 논문에서는 격자 생성 Node Generation과 계산 시간에 잇점이 있는 경계 요소법을 사용하여 비등방성(Anisotropic) 섬유에 대해서, 경화에 의한 수지의 점도 변화를 고려하여 유동 현상을 해석하였다.

2. 지배방정식

RTM 공정에서의 금형 내의 수지의 2차원 유동 해석을 위하여 금형 내에 채워진 섬유 직물을 비등방성(Anisotropic)의 다공성 매질로 가정하고 수치 해석을 하였다.

금형 내에 수지가 채워지는 과정은 비정상 상태이나 충전 시간이 충분히 길 경우 준 정상 상태로 가정 할 수 있다. 이때 작은 시간 간격에 대해서 다공성 매질의 경우의 운동량 방정식인 Darcy's Law[4]에 의해 유동 현상을 해석할 수 있다.

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

여기서 \bar{u} 는 수지의 속도, μ 는 수지의 점도, $[K]$ 는 투과성(Permeability) Tensor, p 는 압력이다.

수지의 유동이 비압축성이라 가정하면 질량 보존식은

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

이 된다.

식 1)를 식(2)에 대입하여 정리하면

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

여기서

$$s = \frac{[K]}{\bar{u}} \quad (4)$$

로 두면, 식(3)은

$$\nabla \cdot (s \nabla p) = 0 \quad (5)$$

이 된다.

따라서 수치 해석의 대상이 되는 지배 방정식은 식(5)가 된다.

다공질의 기공(Pore)의 크기가 전체 길이 차원에 비해 보통 아주 작으므로 벽면에서는 No-Slip 조건이 적용되지 않으며 벽면에 수직인 속도 성분 $u_n = 0$ 의 조건만이 성립된다고 가정할 수 있고 자유표면에서는 공기와 수지의 점도차가 매우 크므로 급형 밖으로 방출되는 공기에 의한 압력 구배는 무시할 수 있다. 따라서 경계조건[5]은 다음과 같이 된다.

$$\text{고체벽면: } \frac{\partial p}{\partial n} = 0 \quad (6a)$$

$$\text{자유표면: } p = 0 \quad (6b)$$

$$\text{유동입구: } p = p_o \text{ 혹은 } u_n = -\frac{K}{\mu} (\nabla p) = u_o \quad (6c)$$

수지내의 반응종(Reactive species)의 질량 보존식은 다음과 같다[2].

$$\frac{d\alpha}{dt} + u \cdot \nabla \alpha = \beta \quad (7)$$

여기서 α 는 경화도, β 는 화학반응에 의한 경화도를 증가시키는 생성항이다. 이것을 다시 쓰면

$$\frac{d\alpha}{dt} = \beta \quad (8)$$

수지의 점도는 온도와 경화도의 함수로 표시할 수 있다[6].

$$\mu = \mu_\infty \exp\left(\frac{\Delta E_\mu}{RT} + \kappa \alpha\right) \quad (9)$$

여기서 μ_∞ 와 κ 는 상수, ΔE_μ 는 점도에 대한 활성화 에너지(Activation Energy), R 은 일반 기체 상수, T 는 절대 온도이다.

Kamal과 Sourour[7]의 Arrhenius 형태의 식[8]을 도입하면

$$\beta = (\kappa_1 + \kappa_2 \alpha^m)(1 - \alpha)^n \quad (10)$$

여기서

$$\kappa_1 = A_1 \exp\left(\frac{\Delta E_1}{T}\right) \quad (11a)$$

$$\kappa_2 = A_2 \exp\left(\frac{\Delta E_2}{T}\right) \quad (11b)$$

A_1 와 A_2 는 상수, ΔE_1 와 ΔE_2 는 활성화 에너지이다

3. 경계 요소법

3-1. 경계 요소 방정식

식(5)에서 s 가 일정한 경우에는 지배 방정식은 단순한 라플라스 방정식이 되어 경계 요소법을 사용하여 문제를 푸는데 어려움이 없으나, 투과성과 점도가 변하는 경우는 일반적으로 기초해(Fundamental Solution)를 얻을 수 없으므로 직접적으로 경계 요소법을 적용할 수 없다.

따라서 본 논문에서는 다음과 같이 Rangogni[9]가 제안한 경계 요소법과 섭동법(Perturbation Method)을 이용한 방법으로 수치 계산을 하였다. 우선 새로운 변수 g 를 다음과 같이 정의하면

$$g = \sqrt{s p} \quad (12)$$

이를 식 [5]에 대입하면

$$\nabla^2 g + f(x, y)g = 0 \quad (13)$$

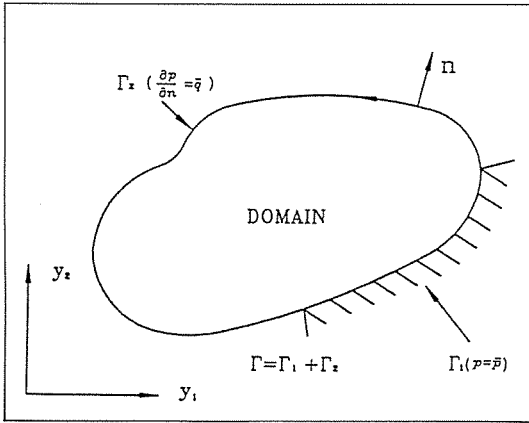


Fig. 2. Definition Skeeth

여기서

$$f(x, y) = \frac{|\nabla s|^2}{4s^2} - \frac{\nabla^2 s}{2s} \quad (14)$$

경계 조건식 (6a-6c)는 다음과 같이 변하게 된다.

$$g = \sqrt{s \bar{p}} \text{ on } \Gamma_1 \quad (15a)$$

$$\frac{\partial g}{\partial n} = \frac{1}{2s} \frac{\partial s}{\partial n} g + \sqrt{s \bar{q}} \text{ on } \Gamma_2 \quad (15b)$$

여기서 Γ_1 은 Essential Boundary Condition이 적용되는 유동 경계면, Γ_2 는 Natural Boundary Condition이 적용되는 유동 경계면이고, $q = \frac{\partial p}{\partial n}$, \bar{p} 와 \bar{q} 는 각각 Γ_1 과 Γ_2 에서 경계조건에 의하여 주어진 p 와 $\frac{\partial p}{\partial n}$ 값이다(Fig.2).

식 (13)은 여전히 경계 요소법을 적용할 수 없으므로, 섭동법(Perturbation Method)을 적용하기 위해 식(13)을 다음과 같이 변형한다.

$$\nabla^2 g + \varepsilon r(x, y)g = 0 \quad 0 \leq \varepsilon \leq 1 \quad (16)$$

여기서,

$$r(x, y) = \frac{1}{\varepsilon} f(x, y) \quad (17)$$

식(16)의 해를 다음과 같은 형태로 가정하고

$$g = \sum_{m=0}^{\infty} g_m \varepsilon^m \quad (18)$$

(18)식 (18)을 식(15)에 대입하면, 다음의 식을 얻는다.

$$\nabla^2 g_0 + \sum_{m=1}^{\infty} \varepsilon^m (\nabla^2 g_m + f g_{m-1}) = 0 \quad (19)$$

그런데, 이 식은 0에서 1 사이의 임의의 ε 에 대하여 성립해야 하므로 다음과 같은 방정식군을 얻는다.

$$\nabla^2 g_m = -\Phi_m \quad m=1, 2, 3, \dots \quad (19)$$

Φ_m 은 $m=0$ 에서 $\Phi_0=0$, $m \geq 1$ 에서 $\Phi_m = -f g_{m-1}$ 이다.

이제 포아송 방정식에 경계 요소법을 적용하기 위하여 가중 함수(Weighting Function)를 양변에 곱하여 계산영역 내에서 적분하여 경계면에서 성립하도록 정리하면[10].

$$\int_{\Omega} \Phi g_m^* d\Omega + \int_{\Gamma} h_m^* d\Gamma = \int_{\Gamma} g_m^* h_m d\Gamma \quad (21)$$

Ω 는 유동영역, $h_m = \frac{\partial g_m}{\partial n}$, \bar{g}_m 와 \bar{h}_m 는 각각 Γ_1 과 Γ_2 에서 경계 조건에 의하여 주어진 g_m 와 $\frac{\partial g_m}{\partial n}$ 값이다. a^i 는 경계면의 형상에 따라 달라지는 계수인데 경계가 매끄러우면 $\frac{1}{2}$ 이다. 이제 전체 유동 경계면을 n 개의 경계 요소로 나누고 식을 적용하면

$$\begin{aligned} \sum_{n \in \Gamma} \int_{\Omega} \Phi g_m^* d\Omega + \sum_{j=1}^n \int_{\Gamma_j} g_m^* h_m d\Gamma \\ = \sum_{j=1}^n \int_{\Gamma_j} g_m^* h_m d\Gamma \end{aligned} \quad (22)$$

여기서 Γ_j 는 n 개로 나누어진 각 경계 요소이다.

3-2. 점도의 계산

수지의 경화반응으로 인하여 유동영역 내에서의 수지의 점도는 위치에 따라 변하게 된다. 즉, 수지가 유입된 후 경과된 시간에 의해 점도의 차이가 생긴다(Fig.3).

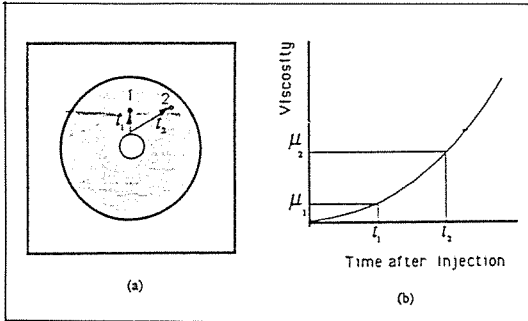


Fig. 3. Difference of Viscosity of Resin in Flow Field with Time

- (a) Resin Location in Flow Field
(b) Viscosity of Resin with Time

따라서 유동 영역내의 각 위치에 대한 점도 값을 구하기 위해서는 각 위치에 존재하는 수지의 유입 후 경과된 시간을 알아야 하므로, 일정 시간 간격으로 주 입구에서 내부 유동선을 형성하여 유동 경로를 추적하게 하였다(Fig. 4).

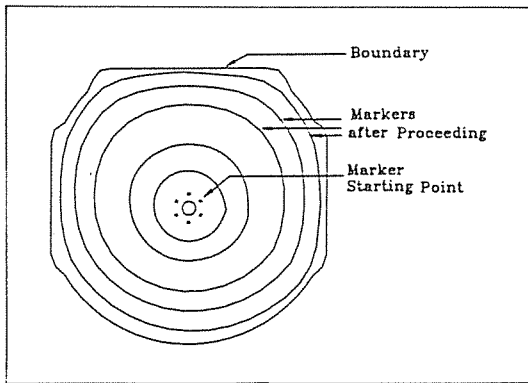


Fig. 4. Markers and Internal Line Connecting Markers Generated at the same time

3-3. 격자 생성 및 진행

본 논문에서 사용한 경계 요소 (Boundary Element) 는 두 격자 사이에서의 p 와 $\frac{\partial p}{\partial n}$ 값이 선형으로 변하는

1차 요소 (Linear Element) 이다.

경계 요소법에 의해 포아송 방정식을 풀기 위해서는 유동 영역 전체에 대한 적분이 수행 되어야만 한다. 따라서 유동 영역에 대해서 메쉬를 형성하여야하나, 유동장이 시간에 따라 변하므로 메쉬도 매시간 변하게 된다. 본 논문에서는 메쉬 생성의 용이성과 계산의 정확도를 위해 미리 고정된 메쉬(Fig. 5a)로부터 유동 영역에 포함된 메쉬를 찾고, 유동 경계면이 지나는 메쉬의 셀 (Cell) 은 유동 경계면과 메쉬에 의한 삼각형 요소(Fig. 5b)를 만들어 이들에 대해서만 적분을 수행하였다[11]. 그리고, 유동 영역에서 Φ 의 값이 급격히변하는부분에서는 고정된 하나의 적분 요소를 더 세밀히 나누어(Fig. 5b) 계산에 정확성을 기하였다 [11].

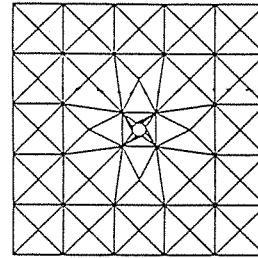


Fig. 5(a). Fixed Grid as a Input

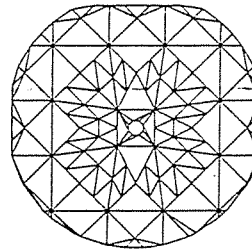


Fig. 5. (B). Refined Grid during Calculation

금형 충전 과정은 경계가 변하는 이동 경계 문제이므로, 경계면의 속도 성분을 구해 전진시켜야 한다. 금형 내에 수지가 충전되어 가는 과정을 준정상상태로 가정 하였으므로, 진행면의 특징점에서의 수지 속도

는 계산된 $\frac{\partial p}{\partial n}$ 으로부터 식(1)를 이용하여 계산할 수 있다. 시간 $t + \delta t$ 에서의 새로운 경계면의 위치는 시간 t 에서의 경계면의 위치로부터 다음 식을 이용하여 결정할 수 있으므로, 시간에 따른 경계면의 위치의 변화를 계산할 수 있다.

$$\vec{S}(t + \delta t) = \vec{S}(t) + \vec{u}\delta t = \vec{S}(t) - \frac{1}{\mu} [K] \nabla p \delta t \quad (23)$$

여기서 \vec{S} 는 변위이다.

위와같이 격자들을 전진 시키면 격자 사이의 간격이 불규칙해지기 때문에 계산의 정확성을 높이기 위해 격자를 등간격으로 재배치하였다. 본 논문에서는 고체 벽면과 자유 표면의 두 그룹으로 구분하여 격자를 재배치하였다[3, 11].

자유표면을 전진시킬때 벽면 밖으로 격자가 나가는 경우가 발생한다. 이러한 격자를 고체 벽면에 재배치시키기위해 함수 형태로 주어진 보상선을 이용하여, 고체 벽면 밖으로 나간 부분의 면적과 같아지도록 고체 벽면과 전진시킨 후의 자유 표면의 교점을 찾아 새로운 자유 표면을 결정하였다(Fig.6).

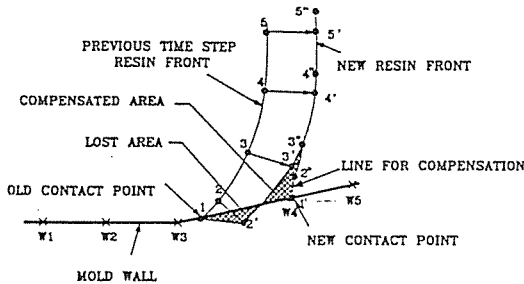


Fig.6. Resin Frong Node Rearrangement Scheme Used in This Work

4. 수치해석

20x20cm 정사각형 금형내에 투과성 $K=5.0 \times 10^{-10} \text{ m}^2$ 의 등방성 섬유를 채우고 계산을 수행하였다. 사용한 수지는 Fiberite 976이며 주입구는 지름 1cm의 구멍이고 입구에서는 속도 0.5 cm/s의 조건을 사용

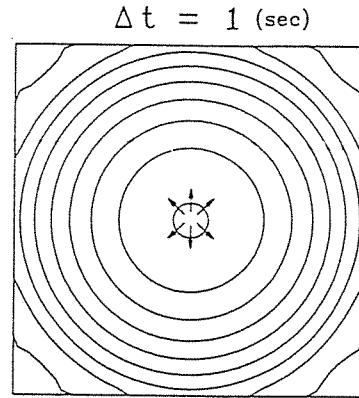


Fig. 7. (a) Locations of Resin Front according to The Time (Constant Flux)

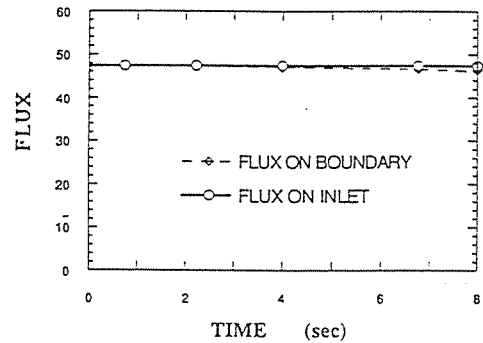


Fig. 7. (b) Comparison of Total Flux on Inlet and Boundary

하였다(Fig. 7a). 그결과 입구에서 속도와 경계면에서의 속도가 잘 일치하여(Fig. 7b) 질량 보존을 잘 만족함을 알 수 있다. Fig. 8에서는 굽은 형태의 금형에 대하여 위와 같은 조건에서 입구 속도 0.75 cm/s의 조건을 사용하여 계산을 수행하였다. 그 결과 만족할 만한 결과를 얻을 수 있어, 본 수치해석 방법이 임의의 형상에 대해서도 적용될 수 있음을 알 수 있다. 이때 계산에 사용한 수지는 Epoxy수지(Fiberite 976)였으며, 이 수지의 경화도는 다음의 식으로 나타낼 수 있다[6].

$$\frac{da}{dt} = (K_1 + K_2 a^m) (1-a)^n$$

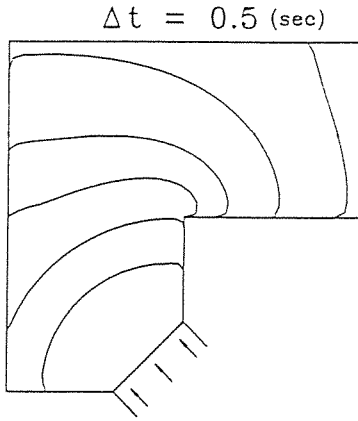


Fig.8. (a) Locations of Resin Front according to The Time (Constant Flux)

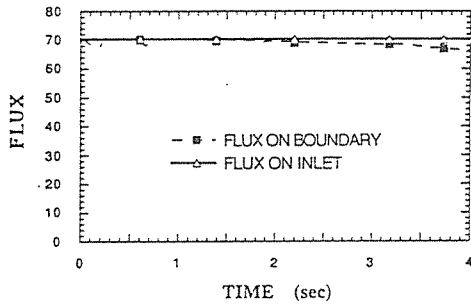


Fig.8. (b) Comparison of Total Flux on Inlet and Boundary

여기서 $m=1.03$, $n=1.22$

$$K_1 = A_1 \exp\left(-\frac{\Delta E_1}{RT}\right)$$

$$K_2 = A_2 \exp\left(-\frac{\Delta E_2}{RT}\right)$$

$$A_1 = 3.15 \times 10^3 \text{sec}^{-1}$$

$$A_2 = 5.06 \times 10^3 \text{sec}^{-1}$$

$$\Delta E_1 = 6.25 \times 10^4 \text{J/mol}$$

$$\Delta E_2 = 5.68 \times 10^4 \text{J/mol}$$

점도는 경화도와 온도에 대한 함수로 표시되며 (Fig.9), 다음의 식으로 표시된다[6].

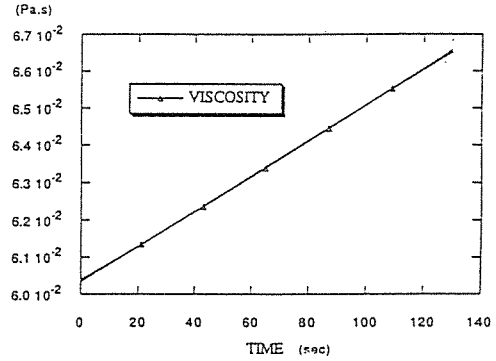


Fig.9. Viscosity vs. Time of Resin Used in Numerical Simulation

$$\mu = \mu_{\infty} \exp\left(\frac{\Delta E_1}{RT} + \kappa \alpha\right)$$

$$\mu_{\infty} = 1.06 \times 10^{-6} \text{Pa}\cdot\text{s}, \Delta E_{\mu} = 3.76 \times 10^4 \text{J/mol},$$

$$\kappa = 18.8$$

5. 결 론

본 연구의 결과 RTM 공정에서 필요한 조건들을 선택하는 경우에 합리적 기준을 얻을 수 있게 되어 RTM공정 설계의 최적화가 가능하게 되었다. 또한 본 연구의 수치해석 방법을 이용하면 지배방정식이 선형인 경우 유한요소법이나 유한차분법처럼 계산영역 내에 격자를 배치시킬 필요가 없어 격자 수가 크게 줄어 계산 시간을 절감할 수가 있으며, 격자 생성이 매우 편리하다는 장점이 있다.

이러한 방법으로 수치해석을 한 결과 그 타당성이 검증되었는데 앞으로 섬유직물의 투과성과 수지의 경화반응시 발생하는 반응열의 열전달 효과에 대한 연구가 필요하다.

후 기

본 연구는 1991년도 교육부의 신소재 분야 연구비 지원에 의해 이루어졌습니다. 관계자들의 노고에 감사드립니다.

참 고 문 헌

1. Coulter J. P. and Guceri S. I, Resin Impregnation During the Manufacturing of Composite Materials, CCM Report No.88-07, University of Dalaware, May, 1988.
2. Albert W. Chan and Sun-Tak Hwang, Modeling of Impregnation Process During Resin Transfer Molding, Polymer Engineering and Science, Vol.31, No.15, 1991
3. Moon-Kwang Um and Woo Il Lee, A Study on the Mold Filling Process in Resin Transfer Molding, Polymer Engineering and Science, Vol. 31, No.11, 1991
4. Dullien F.A.L., Porous Media Fluid Transport and Pore Structure, Academic Press, 1979
5. Soh S.K. and Chang C.J., Boundary Conditions in the Modeling of Injection Molding - Filling of Thin Cavities, Polymer Engineering and Science, Vol.26, pp.893-899, 1986.
6. Mark R. Dusi, Woo I. Lee, Peter R. Ciriscioli and George S. Springer, Cure Kinetics Viscosity of Fiberite 976 Resin, Journal of Composite Materials, Vol.27, 1987.
7. M.R.Kamal, and S. Sourour, Kinetics and Thermal Characterization of Thermoset Cure, Polymer Engineering and Science, Vol.13, 1973
8. Woo Il Lee, Alfred C. Loos, and George S. Springer, Heat of Reaction, Degree of Cure, and Viscosity of Hercules 3501-6 Resin, J. Composite Materials, Vol.16, 1982. Rangogni R., Boundary element IX, Volume I, Springer-Verlag, 1987.
10. Brebbia C.A., The Boundary Element Method for Engineers, Pentech Press, 1980
11. 임성호, "두께가 얇은 금형의 충전에 관한 연구", 서울대학교, 공학석사 학위논문, 1991.