

<연구논문>

수지이동 성형공정의 유동특성에 관한 실험 및 수치모사 연구

이건용 · 이미혜 · 김성우* · 이기준

서울대학교 화학공학과
(1995년 4월 25일 접수)

Experimental and Numerical Studies on the Flow Characteristics in Resin Transfer Molding Process

Geon Woong Lee, Mi Hye Lee, Seong Woo Kim* and Ki-Jun Lee

Dept. of Chemical Engineering, Seoul National University, Seoul 151-742, Korea

*Samsung Chemical Technology Center, Taejon 2-6, Korea

(Received April 25, 1995)

요 약

실제 복합재료 제조공정에 널리 이용되는 등방성 탄소섬유직조와 에폭시수지에 대해서, 수지의 유동을 일방향으로 근사하여 비정상상태 투과계수와 모세관압을 측정하는 실험을 수행하였고, 적층된 섬유직조의 기공율, 금형 주입압력 그리고 섬유직조의 적층수에 따른 수지유동특성을 분석하였다. 또한 금형 충전과정에 대한 유동가시화 실험을 수행하여 유동선단과 충전시간을 측정하였다. 전체 조업압력에 미치는 모세관압의 영향을 규명하기위해 일정 유입압력에 따른 금형충전과정에 대하여 유한요소/관할부피 방법을 이용한 수치모사를 수행하였다. 함침공정의 수지유동에서 비정상상태 투과계수는 섬유직조의 기공율에 따라 급격히 증가하였고, 에폭시수지의 표면장력에 기인한 모세관압은 기공율 감소에 따라 급격히 증가하였다. 동일한 기공율에서 섬유직조의 적층수가 증가함에 따라 투과계수와 모세관압은 모두 증가하는 경향을 보였다. 또한 실험에서 측정된 모세관압을 고려하여 유동선단과 금형충전시간을 수치모사 방법으로 예측한 결과는 유동가시화 실험에 의한 결과와 잘 일치함을 보였다. 이결과로부터 낮은 압력에서 조업하는 RTM공정에서 모세관압효과는 유동선단과 금형충전시간을 예측하는데 기여함을 알 수 있다.

Abstract—A simple apparatus was designed and constructed so that flow would be one-directional and capable of measuring the unsteady-state permeability and the capillary pressure of carbon fiber-epoxy resin system. And the resin flow characteristics were analyzed as a function of the number of woven fabric plies. The experiments was performed for the flow visualization and measurements of flow front and mold filling time. The numerical simulation of the mold filling process was carried out based on the finite element/control volume method. The permeability of a fibrous preform increased rapidly with the porosity, and changed by resin flow direction and alignment of woven fabric. The capillary pressure induced by the surface tension of epoxy resin increased rapidly with the decrease of the porosity. The capillary pressure and permeability of fibrous preform increased with the number of woven fabric plies at the same porosity. The flow front and filling time predicted by numerical simulation taking into account of the capillary pressure were in good agreement with those observed experimentally during impregnation process. The present study carried out by both experiments and numerical analysis has verified the fact that the capillary pressure is required to obtain more accurate predictions of the flow front and filling time in resin flow modeling.

Keywords : Resin transfer molding, impregnation process, permeability, capillary pressure, flow visualization, numerical simulation

1. 서 론

첨단 산업 재료로서 고분자 복합재료는 제품의 고급화, 경량화, 소형화 및 에너지 절감 등에 기여하는 부가가치가 높은 소재이며, 성형과정 중 그 조성을 자유롭게 변화시킬 수 있는 장점을 가지고 있다. 특히 장섬유 강화 고분자 복합재료는 열경화성 수지로 부분 함침된 프리프레그를 사용하여 vacuum bag lay-up과 오토클레이브 경화 과정을 통한 제조 방법이 주종을 이루고 있다. 일반적인 오토클레이브 공정의 경우 복잡한 구조의 성형이 어렵고 높은 조업 압력이나 긴 공정 순환시간에 기인한 많은 제조비용 등의 단점을 갖고 있다. 최근 들어 기존의 방법들이 갖고 있는 단점을 보완하기 위한 제조 방법들이 연구되어져 왔는데, 특히 수지이동성형(RTM)공정이 많은 관심의 대상이 되고 있다. RTM공정은 오토클레이브 공정에 비해 낮은 압력에서 조업하며 짧은 공정 순환시간을 갖으므로 작업 비용이 적고, 프리프레그를 사용하지 않으므로 섬유직조의 보관이 용이하며, 복잡한 3차원 구조의 성형이 가능하다는 장점을 가지고 있다.

고분자 복합재료는 탄성 거동을 갖는 연속상의 섬유직조와 점성 거동을 갖는 열경화성 수지로 구성되는 불균일한 물질이며, 이러한 물질들이 온도와 압력에 의해 결합되어 독특한 특성을 갖는 성형품이 형성된다. 특히 RTM공정에서는 섬유직조와 수지가 함침과정을 통하여 1차적인 결합을 하게 되며, 이때의 결합 상태가 경화공정을 거쳐 최종물성에 영향을 미치게 되므로 함침공정에서 수지유동특성의 파악이 요구된다. 함침공정은 수지의 chemorheological 특성과 섬유직조의 배향 또는 구조, 그리고 섬유직조와 수지의 표면 특성에 영향을 받는다. 특히 섬유직조의 투과성과 수지의 표면장력이 함침공정에 가장 큰 영향을 미치는 변수로 고려될 수 있다. 복합재료 제조공정에서 수지유동에 대한 연구는 주로 적층된 프리프레그 내를 수지가 흘러 합체(consolidation)되는 정상상태의 투과계수를 측정하여 실제 오토클레이브 공정에 적용하는데 초점을 맞추어 왔다. 그러나 RTM공정은 수지가 공기와 자유표면을 형성하면서 건조된 섬유직조내를 흐르는 비정상상태 투과계수를 측정하기 위한 실험적 방법이 요구되었다. RTM공정에서 수지가 섬유직조 내에 충전될 때의 수지유동에 관한 연구는 다공성 매질에서 유체의 유동에 대한 Darcy의 법칙을 적용함으로써

정량적으로 연구되었다. Williams 등[1]은 정렬된 섬유층 내를 흐르는 유체의 유동에 미치는 표면 특성의 영향에 대한 연구를 수행하여 관찰된 수지의 유속이 사용된 유체의 표면 특성에 영향을 받는다는 것을 입증하였다.

섬유직조의 투과계수를 측정하기 위한 방법으로는 Darcy의 법칙에 근거한 두가지 모델이 사용되고 있다. 첫째는 균일한 두께를 갖는 beam 금형을 이용하여 일방향(unidirectional) 유동에 대한 투과계수를 측정하는 방법으로, 주로 일방향 섬유직조와 등방성 섬유직조에 사용된다. 둘째는 plate 금형을 이용하여 반경방향으로의 유동을 해석하며, 장축 및 단축으로 구성된 두개의 주방향 투과계수를 측정하는 방법이다. Kim 등[2]은 하나의 층으로 이루어진 섬유직조의 투과계수와 압축비에 대한 실험적 연구결과로부터 다층으로 구성된 섬유직조의 투과계수를 측정할 수 있는 실험적인 모델식을 제안하였다. Adams 등[3, 4]은 반경방향의 평면유동을 관측할 수 있는 plate 금형을 이용하여 시간에 대한 수지 유동선단의 위치와 모양으로부터 비등방성 구조의 섬유직조에 대해 두방향 비정상상태 투과계수를 측정할 수 있는 방법을 제시하였다.

수지의 표면장력은 복합재료 가공에서 수지에 대한 섬유직조의 젖음성을 결정하는 중요한 역할을 하는 것으로 알려져 있다. 좋은 젖음성은 양질의 복합재료 제조와 최종성형품의 기계적 물성의 향상을 위한 필수적 요소이다. 또한 표면장력은 모세관압에 따른 구동력을 유발시켜 건조된 섬유직조를 따라 흐르는 함침공정의 가공성을 개선할 수 있다. 일반적으로 모세관압효과는 수지의 표면장력, 섬유와 수지간의 접촉각, 그리고 섬유직조의 구조, 기공율, 섬유직경, 모세관 기공의 배열형태 등의 영향을 받는다. RTM의 함침공정은 섬유직조의 배열이탈(misalignment)과 파괴(breakage)등의 문제점 때문에 높은 압력을 부과하지 못하게 되며 결국 낮은 주입 압력에서 수지의 표면장력에 기인한 모세관압은 공정의 진행 과정에 중요한 변수가 된다. Ahn 등[5]은 섬유직조의 비정상상태 투과계수와 모세관압을 동시에 측정할 수 있는 실험방법을 제안하였고 그 결과로서 기공율이 낮은 경우에 저압공정에서의 주입 압력에 비해 무시할 수 없는 모세관압을 얻었다. 이동하 등[6]은 임의 배향 유리섬유직조에 대해 동적 접촉각 측정을 통하여 섬유 배향

및 기공의 분포를 나타내는 형상인자의 값을 구함으로써 실제 RTM공정에서 발생하는 모세관압을 예측할 수 있는 기초자료를 제시하였다.

금형충전 과정에서 유동선단의 모양과 충전시간의 정확한 예측은 가공시간의 단축 및 금형설계의 중요한 요인이 된다. 이를 위해서는 수지유동 변수의 정확한 측정과 함께 수치모사를 위한 알고리즘의 개발이 필요하다. 금형충전 과정의 수치모사는 가공변수들, 물질상수 그리고 유동변수들 간의 관계에 대한 유용한 정보를 제공할 수 있다. 특히 금형충전 과정동안 유동선단 위치의 예측은 공극 생성 및 섬유 유실(washout)과 같은 문제를 예상하는데 유용하며 섬유직조 내의 충전과정에 대한 여러형태의 모델링 연구가 수행되었다[7, 8]. 지금까지 수치함침 과정을 모사하기 위한 대부분의 연구에서 모세관압은 무시되어져 왔으며, 실제 가하는 기계적 압력만을 구동력으로 사용하였다. 그러나 낮은 조업 압력의 RTM공정에서는 모세관압이 전체 가공압력에 기여할 것으로 기대된다.

본 연구에서는 복합재료 제조공정에 널리 사용되고 있는 탄소 섬유직조와 에폭시수지를 사용하여 RTM 함침공정의 유동특성을 실험과 수치모사를 통해 해석하고자 한다. Beam 금형을 이용하여 함침공정의 주요 유동 변수인 비정상상태 투과계수와 모세관압을 수지 주입 압력, 기공율 그리고 섬유직조의 적층수에 따라 실험적방법으로 측정하고자 한다. 또한 plate 금형 충전 과정에 대한 유동가시화 실험을 수행하고, 측정된 유동변수를 사용한 수치모사를 병행하여 그 결과를 비교함으로써 전체 조업 압력에 미치는 모세관압의 영향을 살펴보고자 한다.

2. 이 론

2.1 모세관압

효과모세관압은 섬유직조내의 섬유 정렬에 대한 자료로부터 수식적으로 계산할 수 있으며, 하나의 원통형 기공에 대해 Young-Laplace식을 이용하여 표현하면 다음과 같다.

$$\Delta P_c = \frac{4\sigma \cos\theta}{D_c} \quad (1)$$

여기서, σ 는 수지의 표면장력, θ 는 수지와 섬유 계면간의 접촉각, D_c 는 섬유직조 내 기공의 대응(equi-

valent)지름이다. 이론적으로 모세관 기공의 대응지름은 기공율과 섬유의 직경에 의해 표현될 수 있으며 이를 적용하면 다음과 같은 식을 얻을 수 있다.

$$\Delta P_c = \frac{F}{D_f} \frac{1-\phi}{\phi} \sigma \cos\theta \quad (2)$$

여기서, F 는 섬유정렬과 수지유동 방향에 의존하는 형상인자, D_f 는 단섬유 filament의 직경, ϕ 는 섬유직조의 기공율이다. 형상인자 F 는 섬유직조 내에서 모세관 형상의 기공 배열을 나타내는 값으로서 일방향성 섬유직조에서, 섬유직조내의 모세관의 방향과 같은 경우에는 4, 수직인 경우에는 2의 값을 갖는다[1, 5]. 그러나 직조 형태의 예비성형품과 같은 복잡한 섬유의 정렬을 갖는 경우에는 투과계수 측정에 의한 간접적인 방법으로 F 를 결정해야 한다. 또한 섬유와 수지간의 동적 접촉각과 수지의 표면장력을 측정하면 식(2)을 이용하여 기공율과 모세관압의 관계로부터 배열 형상인자를 계산할 수 있다[6].

2.2 수지유동의 투과계수

섬유직조의 형상에 의존하는 투과계수는 다음의 Kozeny-Carman식으로 표현된다.

$$K = \frac{\phi}{(1-\phi)} \frac{R_f^2}{4k} \quad (3)$$

여기서, K 는 투과계수, R_f 는 섬유 filament의 반경, k 는 Kozeny 상수이다. 수치함침 공정에서 섬유직조의 적층에 의한 예비성형품의 형성은 공정의 기공율 조절을 용이하게 하는 장점이 있으며, 이때 적층된 섬유직조의 기공율은 다음 식으로 표현된다.

$$\phi = 1 - \frac{n\xi}{\rho h} \quad (4)$$

여기서, n 는 적층된 섬유직조의 수, ξ 는 섬유직조의 면적당 무게, ρ 는 섬유의 밀도, h 는 금형의 두께이다. 뉴턴성 유체가 다공성 매질 내를 흐를 때의 압력구배와 유속과의 관계는 Darcy의 법칙으로부터 다음과 같은 선형 방정식으로 나타낼 수 있다.

$$\underline{v} = - \frac{K}{\mu} \nabla P \quad (5)$$

여기서, \underline{v} 는 superficial velocity, μ 는 수지의 점도,

K 는 투과계수를 나타내는 텐서 ∇P 는 압력구배이다. 섬유직조내의 압력구배가 선형이라고 가정하고, 전체 압력은 금형입구에서의 압력과 섬유직조에 수지가 함침되면서 유동전면에서 수지의 표면장력에 의해서 발생하는 모세관압의 합으로 간주하여, 이를 비정상 상태 1차원 유동에 적용하면 다음과 같은 유동 선단에 대한 식을 얻을 수 있다.

$$\frac{dX_f}{dt} = \frac{K_d}{\mu\phi} \frac{(\Delta P_m + \Delta P_c)}{X_f} \quad (6)$$

여기서, X_f 는 수지 침투길이, K_d 는 비정상상태 투과 계수, ΔP_m 는 금형입구의 기계적 압력, ΔP_c 는 모세관 압이다. 식(6)을 적분하면 다음과 같은 식을 얻을 수 있다.

$$X_f^2 = \frac{2K_d t}{\phi\mu} (\Delta P_m + \Delta P_c) \quad (7)$$

수지의 점도와 섬유직조의 기공율이 정해지고, 금형입구에서의 압력을 변화시키면서 수지침투길이를 일정한 시간 간격으로 측정하면 식(7)로부터 비정상 상태의 투과계수와 모세관압을 동시에 얻을 수 있다.

3. 실험

3.1 실험 물질

실험에는 탄소섬유직조와 에폭시(EPON 826)수지가 사용되었다. EPON 826은 상온에서 비교적 점도가 낮은 희석되지 않은 에폭시수지이며, 섬유직조는 평직(plain weave)으로써 등방성구조를 갖으며 Toray Co.의 T-300과 같은 계열의 직조를 사용하였다. 실험 물질에 대한 물성들은 Table 1과 Table 2에 나타내었으며, 문헌값을 사용하였다. 에폭시수지의 전단속도와 온도에 따른 점도 변화는 Rheometrics Mechanical Spectrometer(RMS 800)로 측정하여 실험온도에서 4.2poise의 점도를 얻었으며 넓은 전단속도의 범위에서 뉴턴성 유체의 거동을 보임을 확인하였다. 또한, 에폭시수지의 경우 실험온도 범위에서 화학반응에 의한 점도변화는 무시할 수 있을 정도로 작음을 확인하였다.

3.2 함침공정의 수지유동 특성

함침공정의 주요한 수지유동 변수인 투과계수와 모

Table 1. Material properties of fiber network.

material	weaving type	fiber density (g/cm ³)	surface density (g/cm ²)	fiber diameter (μm)
carbon ⁽¹⁾	plain	1.76	0.0198	7.0

(1) Toho BASF HTA-7-3000

Table 2. Material properties of epoxy resin.

trade name	typical FEW ⁽²⁾ range	typical viscosity P at 25°C	approx. average Mol. Wt.
EPON 826 ⁽¹⁾	178~186	65~96	350

(1) Shell Chemical Co.

(2) EEW : epoxide equivalent weight

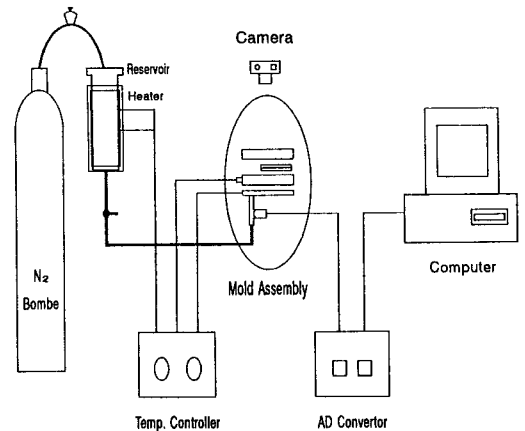


Fig. 1. Schematic diagram of experimental set-up.

세관압 측정을 위해 일방향 유동으로 근사한 16×8 cm의 beam 금형을 제작하였다. 금형의 위판은 유동 형태를 명확하게 관찰하기 위해 투명한 아크릴로 제작하였으며 함침공정 중 외부로부터 가해지는 압력에 의해서 변형되는 것을 막기 위해 2.0cm의 두께로 제작되었다. 아랫단은 같은 두께의 알루미늄으로 제작하였다. 실험에 사용된 장치도는 Fig. 1에서 보여주고 있다. 금형과 수지저장용기는 전열기를 사용하여 동일한 온도로 유지하였고, 실험이 진행되는 동안 주입되는 수지의 온도가 일정하게 유지되도록 설계하였다. 수지는 N₂ 압에 의해 금형에 주입되며, 이때 금형 입구에서의 압력은 주입부에 수직으로 연결된 압력센서(Valcom VPRF)에 의해 시간에 따라서 측정되어 아날로그/디지털 변환기를 통해 컴퓨터에 기록된다.

적층된 섬유직조의 기공율 조절을 위해 여러 가지 종류의 강제관을 이용하여 두 평판사이의 두께가 균일하도록 조절하였다. 또한 금형 내부로 수지가 함침될 때 새는 것을 막고 섬유직조의 고정을 위해서 접착성 및 변형성이 좋은 sealant tape(3M 틈막이폴크)를 사용하였다. 섬유직조는 10 cm×3 cm 크기로 절단하여 식(4)에 의해 기공율을 조절한 후 수지를 주입시키며, 이때 시간에 따른 수지침투길이를 측정하여 비정상 상태 투과계수와 모세관압을 구하였다(식(7)). 여러 입구압력에 대해 동일한 실험을 반복 수행하였다. 또한 기공율에 따른 유동특성을 분석하기 위해 3종류의 기공율에 대해 실험을 수행하였으며, 같은 기공율을 갖는 경우 적층된 섬유직조의 수에 따른 영향을 알아보기 위해 기공율 0.5에 대해 섬유직조의 적층수를 달리하면서 동일한 실험을 수행하였다. 모든 유동특성 실험은 에폭시 수지의 용이한 주입을 위해 48°C (±0.5)에서 수행되었으며, 2회 이상 반복 실험하여 평균값을 취하였다.

3.3 금형충전 과정의 유동가시화

유동가시화 실험은 두종류의 금형에 대해 수행하였다. 첫째는, Beam 금형을 이용하여 수지유동특성 실험에서 사용된 섬유직조와 동일한 크기를 갖는, 기공율 0.5인 섬유직조에 대하여 카메라를 이용한 유동가시화 실험을 통해 수지 유동선단을 관찰하였다. 둘째로, 금형 내 수지충전 과정의 유동가시화 실험을 위해 30 cm×30 cm 의 plate 금형을 제작하였다. Plate 금형을 이용한 실험장치도는 Fig. 1와 동일하며, 금형을 교체하여 유동특성 실험과 동일한 방법으로 수행하였다.

수지유동특성 실험에서 측정된 투과계수 및 모세관압 결과를 이용하기 위해 기공율 0.5, 6장의 적층수에 대한 유동가시화 실험을 수행하였다. 섬유직조의 크기는 10 cm×10 cm, 15 cm×10 cm이고 섬유직조의 정렬방향과 주입방향을 다르게 하였다. 금형에 수지가 주입된 후 섬유직조 경계면에 닿는 순간부터 일정한 시간 간격에 따라 유동 선단면을 카메라로 촬영하여 관찰하였으며, 금형의 전 영역이 모두 충전되는 시간을 기록하였다. 관측된 유동 선단의 모양과 금형 충전시간을 수치모사 결과와 비교하였다.

4. 금형충전 과정의 수치모사

유동특성 실험에서 측정된 유동변수들을 이용하여 금형 충전 과정에 대한 수치모사를 수행하였다. 본 수치모사에 사용된 가정은 다음과 같다.

- (1) 수지는 뉴턴성, 비압축성 유체이다.
- (2) 금형 입구 압력은 일정하다.
- (3) Hele-shaw 유동이 성립한다.
- (4) 전 영역에서 등온 조건이다.

일반적으로 RTM공정에서 금형 두께는 평면 방향의 길이에 비해 매우 작으므로 수치모사를 위해 금형 형태를 2차원으로 간주하여 사용한다. 본 수치모사에서 금형 충전 과정이 얇은 공동에서 수행되므로 2차원 유동으로 가정하여 해석하였다.

수치모사는 유한요소/관할부피(finite element/control volume) 방법을 사용하여 수행하였다[9]. 모든 계산 영역은 정삼각형에 가까운 삼각형 요소로 이루어지며 각 요소는 3개의 절점을 포함한다. 이와같이 삼각형 요소를 사용하면, 매우 불규칙한 공동의 경우나 금형이 휘어진 경계면을 포함하는 경우에 사각형 요소보다 적용이 용이하고, 동일한 절점수를 갖는 경우 계산 영역 내의 절점 분포에 있어 사각형 요소보다 더 안정된 해를 제공하는 장점을 가지고 있다[10]. 유한요소/관할부피 방법에서는 하나의 절점 N에 대해 주변에 존재하는 삼각형 요소들의 무게중심점들을 연결하여 관할부피를 형성한다. 유동은 비압축성이므로 관할부피의 경계를 지나는 총질량에 대한 보존식이 성립된다. 질량보존법칙에 따라 절점 N을 둘러싼 관할부피에서의 순유입량의 합은 '0'이 되며 이것으로부터 절점 N이 채워지는 시간을 계산한다.

금형충전 과정에 대한 지배 방정식은 Darcy의 법칙과 연속 방정식을 결합하여 얻을수 있으며 다음과 같다.

$$\nabla \cdot \left[\frac{1}{\mu} \mathbf{K} \cdot \nabla P \right] = 0 \quad (8)$$

본 수치모사에 사용된 경계 조건은 다음과 같다.

$$\frac{\partial P}{\partial n} = 0 \quad \text{at solid boundary wall} \quad (9.a)$$

$$P=0 \quad \text{at flow front} \quad (9.b)$$

$$P=P_0 \quad \text{at inlet gate} \quad (9.c)$$

식(8)과 식(9)를 이용하여 금형 충전 과정을 해석

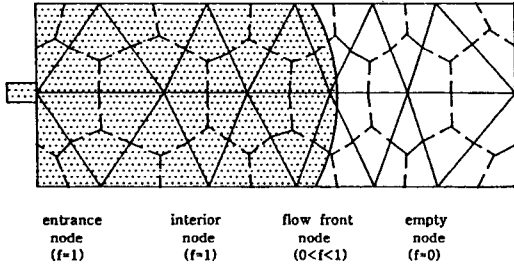


Fig. 2. Node definition for flow front advancement in the calculation domain.

하기 위해서는 압력장의 해가 필요하며, 하나의 요소에서 압력은 다음과 같은 3개의 절점압력으로 근사할 수 있다.

$$P = \sum_{i=1}^3 \Psi_i P_i \tag{10}$$

이때 형상 함수(shape function)은 다음과 같이 주어진다.

$$\Psi_i(x, y) = a_{i0} + a_{i1}x + a_{i2}y \tag{11}$$

여기서 a_{i0} 는 절점*i*에서 형상 함수와 같은 값을 갖고 나머지 두개의 절점에서 '0'의 값을 갖는 계수이다.

지배 방정식을 유한요소법으로 풀기 위한 Galerkin 수식화하면 다음과 같다.

$$\int_{\Omega} \phi_j \nabla \cdot (\mathbf{K} \cdot \nabla P) d\Omega = 0 \tag{12}$$

Divergence theorem에 의해 식(12)는 다음과 같이 주어지며

$$\int_{\Omega} \phi_j \nabla \cdot (\mathbf{K} \cdot \nabla P) d\Omega = \int_{\Gamma} \phi_j \cdot (\mathbf{K} \cdot \nabla P) \cdot \mathbf{n} d\Gamma \tag{13}$$

여기서 \mathbf{n} 는 경계표면에 직각인 단위 벡터이다.

위와 같은 압력장 식은 successive underrelaxation의 반복계산방법에 의해 해를 구한다. 유동을 전진시키기 위해 FAN방법[11, 12]에서 제안된 스칼라 변수, 'f'를 도입하였는데 이는 관할부피의 전체 체적 중 유체가 차지하고 있는 비율을 나타낸다. 각 절점은 Fig. 2에서와 같이 네가지 종류로 나누어진다.

- (1) 입구절점(entrance node) : 수지가 주입되는 금형의 입구 절점($f=1$).

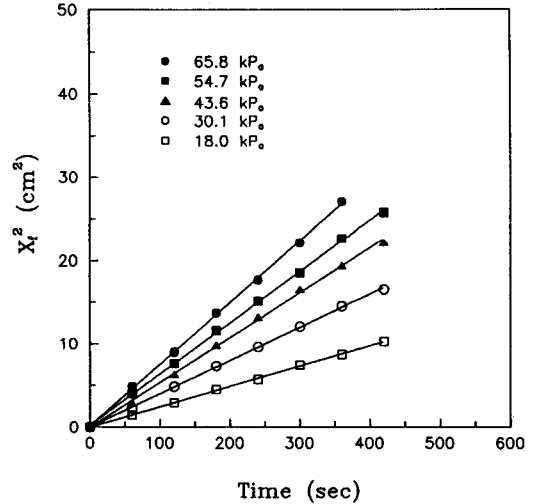


Fig. 3. Square of resin penetration length as a function of time at various pressures ($\phi=0.4$, 4 plies).

- (2) 내부절점(interior node) : 수지에 의해 완전히 채워진 관할부피를 형성하는 절점($f=1$).
- (3) 선단절점(flow front node) : 수지에 의해 부분적으로 채워진 관할부피를 갖는 절점($0 < f < 1$).
- (4) 빈 절점(empty node) : 관할부피에 수지가 도달하지 않은 절점($f=0$).

압력분포로부터 부분적으로 차 있는 관할부피로 유입되는 총유량을 계산하고 그에 따른 새로운 f 값을 형성한다. 시간 간격, Δt 는 한단계에서 한개의 선단절점이 채워지도록 선택하며 이때 그 주위의 빈 절점이 새로운 선단절점이 된다. 이런 방법으로 금형이 완전히 채워질때까지 각 단계에서 압력분포를 계산하면서 전진시킨다. 3가지 유형의 금형 형태에 대해 수치모사를 수행하였으며 각 수치변수의 계산은 실험측정치를 이용하였다.

5. 결과 및 토론

5.1 유동특성 실험

등방성 탄소 섬유직조내를 흐르는 에폭시수지의 유동특성 실험을 beam 금형을 사용하여 수지가 함침될 때 일정한 시간간격에 따른 수지침투 길이를 측정함으로써 수행하였다. 시간에 따른 수지유동 선단의 위치와 모양은 진행방향과 수직인 flat 형태이며, 이로

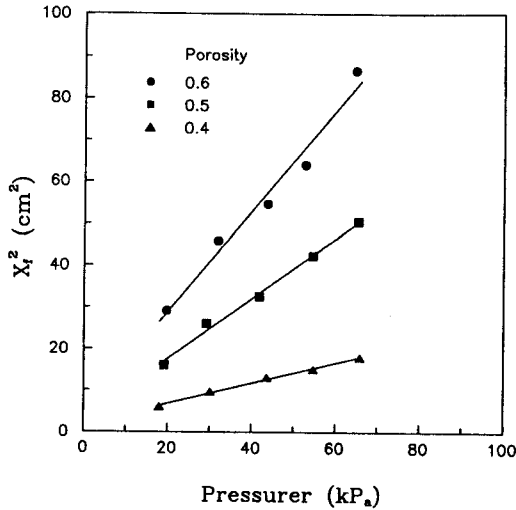


Fig. 4. Square of resin penetration length as a function of applied pressure (time = 240sec($\phi=0.4$, 0.5), 90sec($\phi=0.6$)).

부터 실험에 사용된 beam 금형에서의 일방향 유동은 1차원 거동으로 근사될 수 있음을 알 수 있다.

Fig. 3는 섬유직조의 기공율이 0.4 (± 0.01) 인 경우, 여러 주입압력에 대한 수지침투 길이의 제곱을 시간에 따라서 나타낸 것으로 식(7)에서와 같이 선형관계를 보여주고 있다. 이로부터 Darcy의 법칙이 거시적 측면의 수지유동을 잘 묘사해주고 있음을 알 수 있다. 금형에서 유동전단의 위치를 시간에 따라 측정하여 수지침투길이의 제곱을 식(7)에 도입하면 Fig. 3의 각 압력에 대한 선형관계의 기울기로부터 비정상상태 투과계수를 구할 수 있다. Fig. 4은 수지침투 길이의 제곱을 압력에 따라서 나타낸 것이다. 기공율 0.4와 0.5는 240초의 값을 사용하였고, 기공율 0.6은 90초의 값을 사용하여 각 압력에 따른 수지침투길이의 제곱을 나타내었다. Fig. 4의 절편으로부터 유동전진면에서 수지의 표면장력에 의해 발생하는 모세관압을 구할 수 있다[식(7)]. 비정상상태 투과계수를 기공율에 따라 나타내면 Fig. 5와 같으며, 기공율 증가에 따라 급격한 증가현상을 보여주고 있다. 기공율이 낮은 경우에는 섬유직조들이 밀착되어 있어 층사이 기공의 영향은 무시할 수 있으나 기공율이 높은 경우는 약한 압축력으로 인해 섬유직조들이 접해있는 계면의 기공이 투과성에 중요한 영향을 미치는 것으로 해석할 수 있다. 또한, 계산된 비정상상태 투과계수는 가해진 압력에

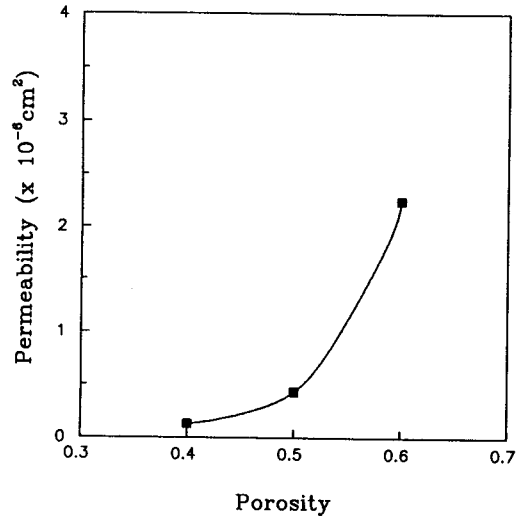


Fig. 5. Permeability as a function of porosity.

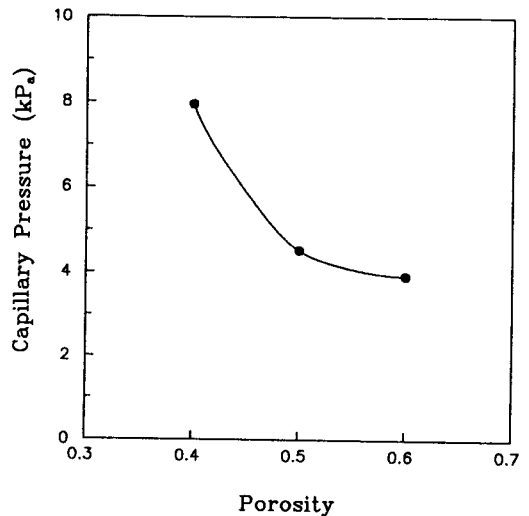


Fig. 6. Capillary pressure as a function of porosity.

관계없이 일정한 값을 갖음을 실험결과로부터 확인하였다. 이것으로부터 비정상상태 투과계수는 적용된 압력에는 무관함을 알 수 있다.

Fig. 6은 섬유직조 기공율에 따른 모세관압의 변화를 나타낸 것이다. 모세관압은 기공율이 증가하는 경우 감소하였으며, 기공율이 감소함에 따라 급격히 증가하였다. 실험으로부터 기공율이 가장 낮은 0.4의 경우에 약 8.0 KPa에 해당하는 최대 모세관압을 얻었으며, 이는 금형입구 최소주입압력의 45%에 해당하는

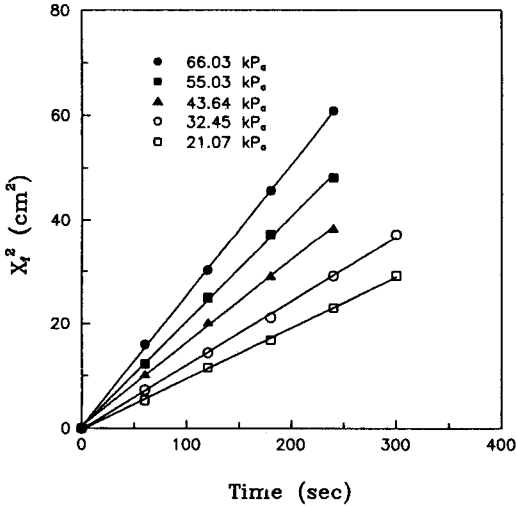


Fig. 7. Square of resin penetration length as a function of time at various pressures($\phi=0.5$, 6 plies).

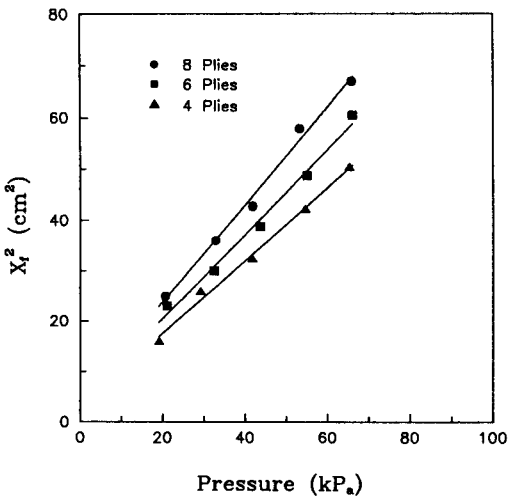


Fig. 8. Square of resin penetration length as a function of applied pressure at various numbers of laminated fiber mat (time=240sec).

것으로 나타났다. 모세관압이 차지하는 비율을 볼 때 낮은 조업압력의 RTM공정에서는 모세관압이 고려되어야 함을 알 수 있었다. 특히 복합재료의 기계적 물성을 증가시키기 위해 섬유 부피분율을 증가시키는 경우 모세관압의 효과는 더 커질 것으로 생각된다.

이상의 실험결과는 4장의 섬유직조를 사용하여 조

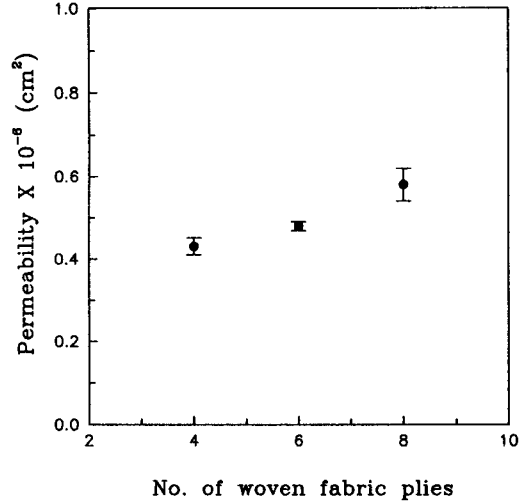


Fig. 9. Permeability as a function of the number of laminated fiber mat.

절된 각각의 기공율에 대하여 투과계수와 모세관압의 변화를 살펴본 것이다. 그러나 기공율만으로는 투과계수나 모세관압의 설명이 부족하며, 기공율이 같은 경우 섬유직조의 적층수에 따른 영향도 무시할 수 없을 것으로 사료된다. Fig. 7은 기공율 0.5이며 섬유직조 적층수가 6 장일 때 수지침투 길이의 제곱을 시간에 따라 나타낸 것이다. 이 결과로부터 각각의 적층수에 따라 수지침투 길이의 제곱을 금형입구 압력에 대해 나타내면 Fig. 8과 같은 선형관계를 얻을 수 있는데, 이것으로부터 각 적층수에 따른 투과계수와 모세관압을 계산할 수 있다. Fig. 9는 비정상상태 투과계수를 섬유직조의 적층수에 대해 나타낸 것으로 오차범위를 고려하더라도, 적층수 증가에 따라 증가하는 경향이 있음을 보여주고 있다. 이로부터 같은 기공율을 갖는 경우라도 섬유직조와 직조사이의 공간이 많아지게 되면 수지침투가 더 용이하게 진행됨을 알 수 있다. Fig. 10은 모세관압을 섬유직조의 적층수에 따라 나타낸 것으로, 모세관압 역시 적층수의 증가에 따라 증가함을 알 수 있다. 이는 같은 기공율을 갖더라도 적층수가 많아짐에 따라 더 많은 기공구조를 갖기 때문인 것으로 생각된다. 섬유직조의 적층수에 따른 영향을 알아보기 위해 실험한 결과는 3가지 경우의 적층수에 대해서만 적용한 것이므로 매우 많은 적층수에 대해서까지 예측할 수는 없지만 적층수 증가에 따른 경향을 정성적으로 분석할 수 있었다.

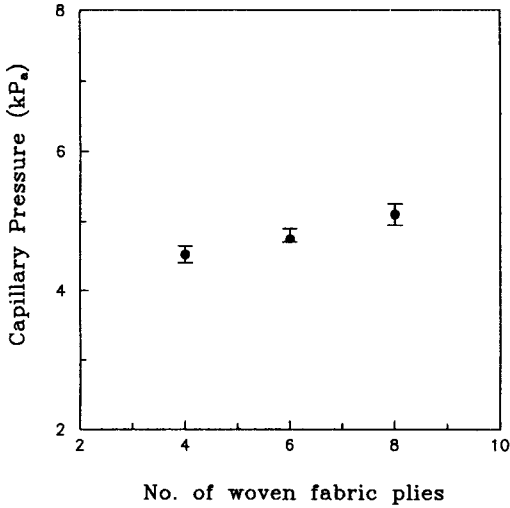


Fig. 10. Capillary pressure as a function of the number of laminated fiber mat.

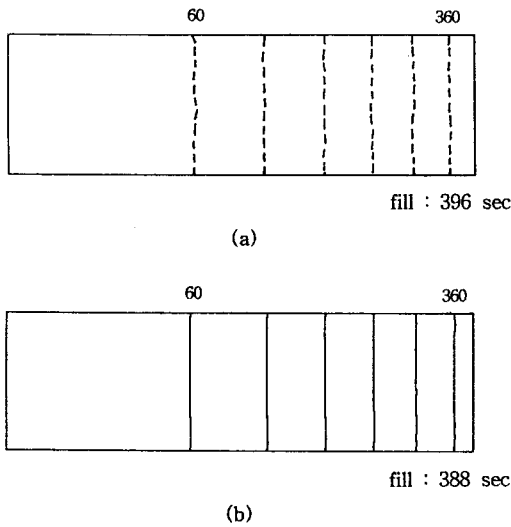


Fig. 11. Comparison of the progression of the predicted and observed flow front and filling time for the mold geometry with film gate under constant inlet pressure of 9.6Psi. (a) experiment (b) simulation

5.2 수치모사 및 유동가시화

금형 충전과정에 대해 유동가시화 실험을 수행하였으며, 유동특성 실험으로부터 구한 투과계수와 모세관압을 써서 수치모사를 병행함으로써 비교분석하였다. Fig. 11은 기공율 0.5, 금형입구압력 66.03 kPa 일

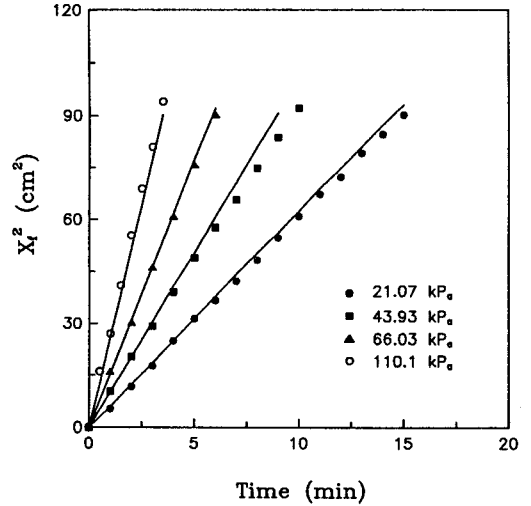


Fig. 12. Square of resin penetration length as a function of time at various applied pressures($\phi = 0.5$, 6plies) symbols : experiment solid line : simulation

때 실험과 수치모사로부터 얻은 유동선단면을 보여주고 있다. 수치모사에는 모세관압이 고려되었고, 실험에 사용된 섬유직조는 유동특성 실험과 동일한 크기를 갖고 있다. 각 유동선단의 시간간격은 60sec 이며, 시간에 따른 유동선단이 서로 잘 일치함을 보여주고 있다. 또한 금형 전체의 충전시간도 2% 이내의 오차로서 일치함을 알 수 있다.

Fig. 12는 동일한 섬유직조에 대해 금형 입구압력을 달리하면서, 시간에 따른 수치침투 길이 제곱의 실험과 수치모사 결과를 나타낸 것이다. 수치모사와 실험은 모두 적층수 6 장, 기공율 0.5에 대해 수행되었으며, 여러 압력범위에서 유동선단의 위치가 잘 일치함을 보여주고 있다. 이로부터 금형충전 과정에 대한 유동선단과 충전시간의 예측을 위해서는 모세관압이 고려되어야 함을 알 수 있다.

Fig. 13은 10 cm×10 cm 크기의 섬유직조를 사용하여 섬유배향각과 45°의 각을 이루도록 수지를 주입하면서 수행한 실험과 수치모사 결과이다. 섬유직조의 정렬방향과 45°의 각을 이루는 수지진행방향에서는 유동선단의 위치가 잘 일치함을 보였으나 경계면쪽으로는 약간의 편차를 보였다. 이는 섬유직조내에서 수지유동이 섬유직조의 배향을 따라 전진하려는

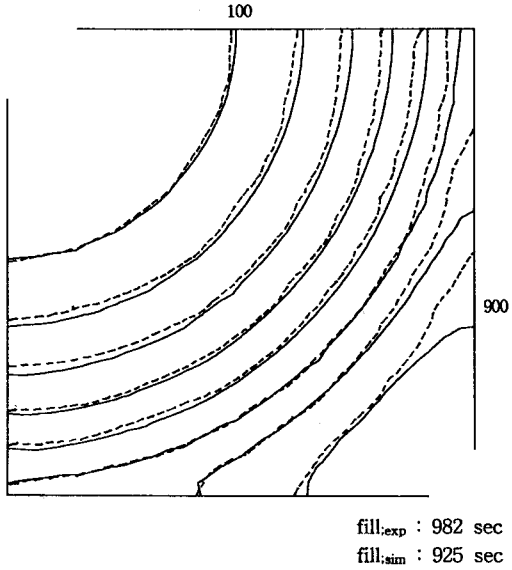


Fig. 13. Comparison of the progression of the predicted and observed flow front and filling time for the diverging and converging mold geometry under constant inlet pressure of 10Psi.

----- experiment ——— simulation

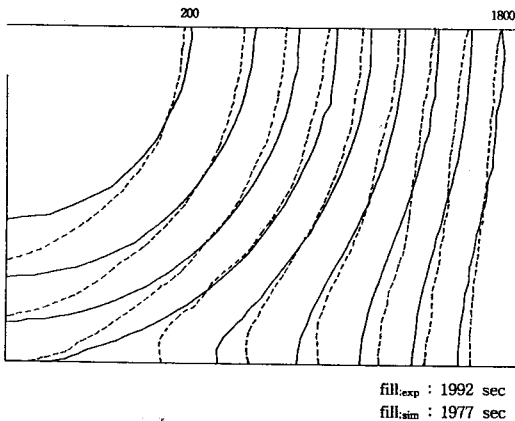


Fig. 14. Comparison of the progression of the predicted and observed flow front and filling time for the mold geometry with corner gate under constant inlet pressure of 10Psi.

----- experiment ——— simulation

특성에 기인한 것으로 생각된다.

Fig. 14는 15 cm×10 cm 크기의 섬유직조에 대해

구석(corner)주입에 따른 실험 및 수치모사 결과이다. 금형충전 시간에 대해서는 잘 일치함을 보여주고 있으나 유동선단의 경우 그림의 상단과 하단에서 반대 경향이 나타나고 있으며 시간이 지남에 따라 섬유직조의 배향과 일치해 감을 알 수 있다. 이것은 수치 유동방향과 섬유직조 정렬 방향에 따라 결정되는 국부 투과계수가 전 영역에서 동일하지 않기 때문으로 볼 수 있다. 따라서 유동선단의 정확한 예측을 위해서는 섬유직조의 정렬에 따른 배향성도 고려되어야 함을 알 수 있다.

6. 결론 및 제언

복합재료 제조공정의 하나인 수치이동성형(RTM) 공정에 대해 섬유직조내의 수치유동에 관한 실험 및 수치모사를 수행하였다. 실험에서는 수지의 유동을 1 차원으로 근사하여 비정상상태 투과계수와 모세관압을 측정하였고 금형 주입압력, 기공율 그리고 섬유직조의 적층수에 따른 유동특성을 해석하였다. 또한 금형충전과정에 대한 유동가시화 실험을 수행하여 유동선단의 위치와 모양을 관찰하였다. 수치모사는 유한요소/관찰부피 방법을 이용하여 금형충전과정에 대한 유동선단과 충전시간을 예측하였고 이 결과를 유동가시화 실험과 비교하였다. 모세관압을 고려하여 수치모사 방법으로 예측된 유동선단과 금형 충전시간은 유동가시화 실험에 의한 결과와 잘 일치하였다. 등방성 탄소 섬유직조와 에폭시수지의 비정상상태 투과계수는 함침공정 중 기공율 증가에 따라 급격히 증가하였으며, 수지의 진행방향과 섬유직조의 정렬방향에 따라 변화하였다. 에폭시 수지의 표면장력에 기인한 모세관압은 기공율의 감소에 따라 급격히 증가하였으며, 기공율 0.4인 경우 8 KPa의 모세관압이 측정되었다. 이는 금형 최소주입압력의 45%, 최대주입압력의 15%에 해당하는 값이다. 동일한 기공율을 갖는 경우 섬유직조의 적층수가 증가함에 따라 비정상상태 투과계수 그리고 모세관압은 증가하는 경향을 보였다.

이상과 같은 연구결과로부터 조업압력이 낮은 RTM 공정의 유동해석에서는 유동선단과 충전시간을 예측하는데 모세관압은 반드시 고려되어야 하며, 보다 정확한 유동선단의 예측을 위해서는 섬유직조의 배열이 유동에 미치는 영향에 대한 연구의 수행이 필요하다고 할 수 있다.

감 사

본 연구는 대한항공과 한국과학재단의 지원에 의한 것으로 관계기관에 감사 드립니다.

사용 부호

- a_{ij} : coefficient in shape function
 D_e : equivalent diameter of the capillary pore
 D_f : fiber diameter
 f : fill factor to represent the status of each control volume
 F : form factor defined in equation(3).
 h : thickness of laminated fiber mat
 k : Kozeny constant
 \underline{K} : permeability tensor
 K_d : unsteady state permeability
 n : number of the layer
 P_m : applied mechanical pressure
 P_c : capillary pressure
 R_f : radius of fiber filament
 t : time
 \underline{v} : superficial velocity tensor
 X_f : resin penetration length

Greek Letters

- μ : resin viscosity
 θ : contact angle
 ξ : surface density of the fibrous preform

- ρ_f : mass density of the fiber
 σ : surface tension of the resin
 ϕ : porosity
 ψ_i : shape function in triangular element

참고문헌

1. J. G. Williams, C. E. M. Morris, and B. C. Ennis, *Polym. Eng. Sci.*, **14**, 413(1974).
2. Y. R. Kim, S. P. McCarthy, J. P. Fanucci, S. C. Nolet, and C. Koppernaes, *22nd SAMPE technical conference*, 16(1991).
3. K. L. Adams, W. B. Russel, and L. Rebenfeld, *Int. J. Multiphase flow*, **14**, 203(1988).
4. K. L. Adams, B. Miller, and L. Rebenfeld, *Polym. Eng. Sci.*, **26**, 1434(1986).
5. K. J. Ahn, J. C. Seferis, and J. C. Berg, *Polym. Eng. Sci.*, **12**, 146(1991).
6. 이동하, 김성우, 이기준, *유변학*, **5**, 85(1993).
7. J. P. Coulter, and S. I. Guceri, *J. Reinforced Plastics and Composites*, **7**, 200(1988).
8. M. V. Brusckke and S. G. Advani, *Polymer Composites*, **11**, 398(1990).
9. V. W. Wang, Ph. D. Dissertation, Cornell University, (1985).
10. B. R. Baligar and S. V. Patankar, *Numerical Heat Transfer*, **3**, 393(1980).
11. Z. Tadmor, E. Broyer and C. Gutfinger, *Polym. Eng. Sci.*, **14**, 660(1974).
12. E. Broyer, C. Gutfinger and Z. Tadmor, *Trans. Soc. Rheol.*, **19**, 423(1975).
13. Seong Woo Kim, Ph. D. Dissertation, Seoul Nat. Univ., Seoul, Korea(1993).