

사출성형공정에서의 단섬유배향에 관한 수치 및 실험 연구

이미혜 · 이기준

서울대학교 화학공학과
(1993년 6월 14일 접수, 1993년 11월 23일 채택)

Numerical and Experimental Study on the Short Fiber Orientation in Injection Molding Process

Mi Hye Lee and Ki Jun Lee

Department of Chemical Engineering, Seoul National University, Seoul 151-742, Korea
(Received 14 June 1993; accepted 23 November 1993)

요 약

복잡한 금형구조를 가진 사출성형공정중 충전단계에 대해 유동이 야기하는 섬유배향을 예측하는 수치모사 프로그램을 개발하였다. 이를 검증하기 위해 여러 가지 유동 형태에 대하여 실험을 수행하였다. 유한요소/관할부피 방법에 의해 유동을 해석하였고 섬유배향을 예측하기 위해 새로이 입자추적법을 도입하였다. 수치모사와 실험 관찰결과에서 단섬유들은 확장유동에서는 흐름방향에 수직으로 배향하나 수렴유동과 웰드라인, 옆벽면 근처에서는 흐름방향으로 정렬되려는 경향을 나타내었다. 또한, 두께방향으로 서로 다른 구조층을 보여주는 skin-core 구조가 확인되었다. 수치모사로 예측된 skin의 두께가 실험으로 관찰된 것보다 더 크게 나타난 것은 주로 벽면에 의한 섬유 운동의 제약에서 기인한 섬유 농도의 불균일분포, 분수유동 효과, 벽면에서 속도의 미끄럼 현상, 섬유 상호작용계수 등의 영향이 수치해법에서 충분히 고려되지 못한 때문으로 해석되었다. 여러 가지 유동형태에서 수치모사 예측은 실험결과와 대체로 잘 일치함을 보여주었으며 3차원의 얇은 금형 유동에서도 잘 일치함을 보였다.

Abstract—A numerical scheme has been developed to predict the flow induced fiber orientation for the filling stage of injection molding process with complex mold geometry. Experiments were performed to validate the numerical scheme for various geometries. The flow analysis was performed by employing finite element/control volume method and particle tracing method was newly adopted to predict the fiber orientation. Both numerical simulations and experimental observations demonstrated that the fibers in diverging flow are oriented perpendicular to the flow while the fibers in converging flow, near the weldlines and side walls, tend to orient parallel to the flow. It was confirmed that there exists the skin-core structure which indicates two different layers through the gap width. The reason why the numerically predicted skin layer was thicker than experimentally observed one is probably due mainly to the nonuniformity of fiber concentration caused by the restriction of fiber motion at the walls, the fountain flow effect, the effect of slip velocity at the wall boundaries, and the interaction coefficient, which could not be fully accounted for in the numerical simulation. There were consistent agreements between the experimental observations and the numerically predicted results for various flows including the case of three dimensional thin mold.

1. 서 론

고분자 복합재료는 일반적으로 고분자 매트릭스에 강화섬유를 보강시켜 강도, 인성, 내열성, 수치안정성 등을 향상시킨 소재로 모든 산업 분야에 걸쳐 폭넓게 사용되고 있다. 제품의 형태가 복잡하거나 대량생산이 필요한 경우 단섬유 복합재료가 많이 사용되는데 이를 가공하는 공정의 하나로 사출성형공정을 들 수 있다. 제품의 구조와 가공공정과 기계적 성질 사이에는 깊은 연관을 가지고 있는데 가공공정중 겪게 되는 유동은 단섬유의 배향에 변화를 일으키며 이는 또 최종제품의 품질에 큰 영향을 미치게 된다. 따라서 유동의 형태가 배향에 미치는 영향은 제품설계에서 중요한 위치에 있다고 하겠다. 사출성형공정중 충전공정유동중의 단섬유배향에 관한 최근의 수치모사 연구들을 살펴보면 다음과 같다. Altan[1] 등은 numerical grid generation 방법을 이용한 유한차분법으로 뉴튼유체의 유동을 해석하고 입자추적법을 도입하여 섬유배향을 예측하였으나 섬유의 상호작용이 고려되지 않은 아주 묶은 영역을 대상으로 비교적 단순한 금형형태에 제한되었다. Advani와 Tucker[2]는 Flow Analysis Network(FAN) 방법의 관찰부피(control volume) 개념을 도입한 유한요소/관찰부피(finite element/control volume)방법을 이용하여 비교적 단순한 금형내의 각 절점에서 Sheet Molding Compound(SMC) 가공공정중 섬유배향을 예측하였다. Frahan[3] 등은 유한요소법을 이용하여 초기에 전체영역을 요소들로 나누고 흐름이 진행된다면 유동선단 부근의 요소를 보정하면서 진행시키는 방법을 써서 유동을 해석하고 각 절점에서 섬유배향을 구하였으나, 유동이 내부방해체와 같은 경계를 침범한 경우 수정시키는데 계산의 어려움이 따른다. 한편 최근까지 연구된 섬유배향에 관한 거동식[4, 5]을 보면 뉴튼유체에 존재하는 섬유입자에 제한되어 열가소성, 열경화성 고분자 수지를 매트릭스로 하는 고분자 복합재료에 대한 섬유배향의 거동에 적용시키는데 문제가 있으나 실험적으로는 많은 연구들이 수행되어 왔다. 그 중 몇 가지를 살펴보면, Darlington과 McGinley[6]는 Contact Micro-Radiography(CMR)을 이용하여 섬유가 보강된 원판에 대하여 배향상태를 살펴보고 Bright 등[7]은 유리섬유가 보강된 polypropylene의 섬유배향에 대한 사출속도 등의 영향을 분석하였다. Goettler[8]은 유리섬유로 보강된 에폭시에 대해 수렴평판유동(converging channel flow), 전단율영향(shear rate effect), 기계적 성질의 향상 등을 연구하였다. Sanou 등[9]은 금형두께의 영향을 연구하였고, Vincent와 Agassant[10]은 optical microscopy를 이용하였고, McGee와 McCullough[11]

는 Fraunhofer diffractometer를 이용하여 섬유배향을 측정하였다. 이상의 실험들로부터 섬유배향상태가 고분자복합재료에 있어 중요한 변수이고 섬유배향은 유동특징에 의해 결정되어진다는 것으로 요약될 수 있다.

본 연구의 목적은 사출성형공정중 최종제품의 섬유배향분포를 결정짓는 충전공정단계에 대해 여러 가지 복잡한 금형내의 유동형태가 섬유배향에 미치는 영향을 예측하기 위한 수치모사 프로그램을 개발하고, 이를 이용하여 예측한 결과와 실험으로 관찰된 결과를 비교하여 수치모사의 타당성을 검증하는데 있다.

2. 이 론

2-1. 섬유배향 해석

뉴튼유체에 잠겨있는 한 개의 단섬유 입자에 대한 거동식이 Jeffery[4]에 의해 제안된 이래, Folgar와 Tucker[5]에 의해 Jeffery식을 보정하여 질은 현탁액에서의 섬유와 섬유간의 상호작용을 고려한 다음과 같은 식이 제안되었다.

$$\dot{p} = -\frac{1}{2}\omega p + \frac{1}{2}\lambda[\dot{\gamma}p - \dot{\gamma} : ppp] - \frac{C_f \dot{\gamma}}{\Psi} \frac{\partial \Psi}{\partial p} \quad (1)$$

이를 배향텐서 a_{ij} 로 나타내면 식 (2)와 같은데 고차항 a_{ijkl} 을 포함하고 있으므로 계산을 간편하게 하기 위해 근사방법을 이용한다. 본 연구에서는 hybrid closure approximation을 이용하였다.

$$\begin{aligned} \frac{Da_{ij}}{Dt} = & -\frac{1}{2}(\omega_{ik}a_{kj} - a_{ik}\omega_{kj}) \\ & + \frac{1}{2}\lambda(\dot{\gamma}_{ik}a_{kj} + a_{ik}\dot{\gamma}_{kj} - 2\dot{\gamma}_{kl}a_{ijkl}) \\ & + 2C_f\dot{\gamma}(\delta_{ij} - \beta a_{ij}) \end{aligned} \quad (2)$$

식 (2)에서 구한 a_{ij} 로 섬유의 배향상태를 묘사하는데는 여러 방법이 있으나 본 연구에서는 tensor ellipsoid로 간주하여 보고자 하는 평면으로 투영하는 방법을 이용하였다[1].

2-2. 유동 해석

두께가 비교적 얇은 평판 금형내를 흐르는 유동은 Hele-Shaw flow로 근사될 수 있으며 본 연구에서는 비압축성, 등온 뉴튼유체라고 가정하였다. Fig. 1에 Hele-Shaw flow 흐름과 좌표, 속도 및 속도구배 등을 나타내었다. 유동의 지배식으로 다음과 같은 elliptic 형태의 압력식을 얻는다.

$$\frac{\partial}{\partial x} \cdot \left(S \frac{\partial P}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \cdot \left(S \frac{\partial P}{\partial y} \right) = 0 \quad (3)$$

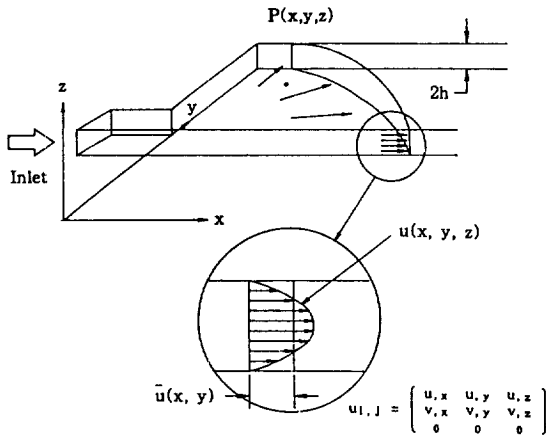


Fig. 1. A Hele-Shaw type flow in a planar cavity.

한 요소안의 압력은 식 (4)와 같이 세 절점의 압력 $p_k^{(i)}$ (t)과 일차 interpolation 함수 $L_k^{(i)}(x, y)$ 로 표현된다.

$$P^{(i)}(x, y, t) = \sum L_k^{(i)}(x, y) \cdot p_k^{(i)}(t) \quad (4)$$

모든 영역은 삼각형 요소로 이루어져 있으며, 절점 N을 중심으로 관찰부피(control volume)를 형성하는데 이를 둘러싼 질량보존법칙에 의하여 압력장에 대한 식을 얻는다. Successive underrelaxation의 반복계산법(iteration method)을 이용하여 해를 구하고 구해진 압력장으로부터 속도장을 계산한다. 유동은 한 개의 선단절점이 한 time-step 동안 차도록 선택하여 진전시킨다. 본 연구에서는 이상과 같이 현재 널리 상용적으로 쓰이고 있는 유한요소/관찰부피(finite element/control volume) 방법을 이용하여 유동을 해석하였고, 유동내의 섬유입자의 배향상태를 묘사하기 위하여 입자추적법(particle tracing method)을 새로이 적용시켰다. 임의의 배향상태에 있는 일정량의 질량이 없는 추적입자들(tracing particles)을 금형입구에 유입시켜 유동과 같은 속도로 진행시키면서 식 (2)로부터 섬유의 배향텐서를 계산하여 각 입자들의 배향상태를 알아내는 방법이다[12, 13].

3. 실험

섬유현탁액은 가시화실험을 위해 투명한 실리콘 오일(KF-96-3000 cs, Shin-Etsu Chem. Co.)과 검은 색 폴리프로필렌(polypropylene) 단섬유들로 이루어졌으며 물성은 Table 1과 같다. 섬유현탁액의 파괴비는 0.00033으로 중간농도영역(semi-concentrated region: 0.00025-0.015)에서도 낮은 영역에 속하는데 실제 산업용에 쓰

Table 1. Material properties of the suspension(Exp. temp.: 23°C)

Properties	Conditions
점도(η)	33(poise)
밀도(ρ)	0.97(g/cm ³)
섬유 길이(l)	3(mm)
섬유 직경(d)	45(μ m)
섬유부피비(ϕ_v)	0.00033

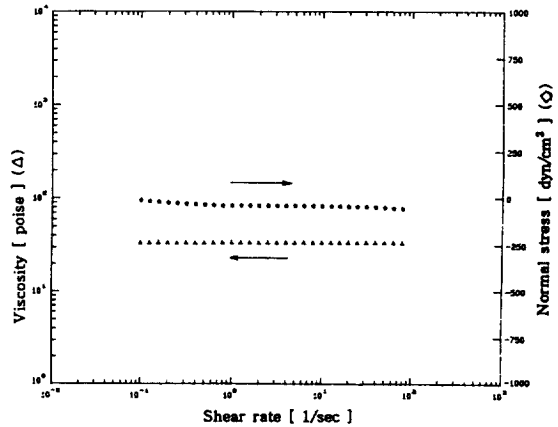


Fig. 2. Viscosity(Δ) and normal stress(\diamond) vs. shear rate of fiber suspension.

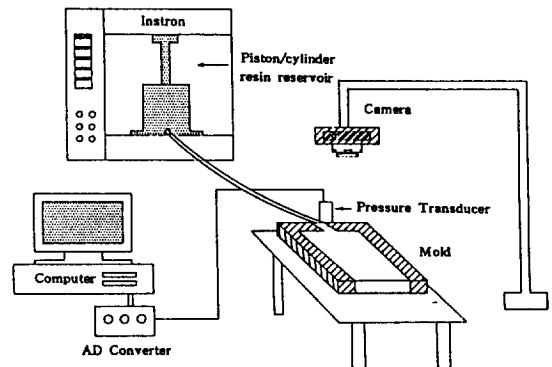


Fig. 3. Experimental apparatus.

이는 섬유부피비가 20-60 wt% 감안할 때 매우 적은 양이라고 볼 수 있으나 이는 실험상 섬유현탁액내의 섬유배향상태를 잘 나타낼 수 있도록 사진촬영문제를 고려한 값이다. 단섬유의 길이는 금형(두께: 4 mm)내에서 자유회전이 가능하도록 3 mm로 준비되었다. 섬유현탁액은 RMS(Rheometric Mechanical Spectrometer 800E) 실험결과 Fig. 2에서와 같이 점도 33 poise를 가지는 뉴튼유체 거동을 보였다. 본 연구의 섬유배향

가시화 실험장치는 Fig. 3에 나타내었다. 공기방울이 완전히 제거되고 잘 혼합된 섬유현탁액을 Instron 장치에 연결된 피스톤-실린더 형태의 용기에 넣어 일정한 유량으로 금형에 주입시켰다. 금형의 게이트압력은 금형 입구 가까이 장치된 압력센서(VPRF, Valcom)를 통해 아날로그 디지털 변환기를 거쳐 컴퓨터에 입력된다. 유동선단의 진행과 유동내의 섬유배향상태를 관찰하기 위해 투명 아크릴(PMMA)로 제작된 금형 위에 이동 카메라를 장치하여 촬영하였다.

4. 결 과

4-1. 내부방해체가 있는 사각 금형

길이가 22 cm, 폭이 10 cm, 두께가 0.4 cm인 사각형 판금형으로 금형 중앙에 지름이 5 cm인 원형 내부방해체가 존재하며 금형 좌측 중간에 지름이 0.4 cm인 point gate가 위치하며 섬유현탁액이 일정한 유량($3.4 \text{ cm}^3/\text{sec}$)으로 금형에 주입된다. 1900개의 절점과 3576개의 삼각형 요소로 이루어진 메쉬를 이용하여 수치모사를 수행한 결과와 실험을 통하여 관찰한 유동선단의 진행을 Fig. 4에 비교하여 나타내었다. 충전시간은 수치모사 결과 23.50 sec, 실험결과 24.83 sec이었는데 충전시간이 실제공정에 비해서 긴 점을 감안하면 비교적 잘 맞는다고 할 수 있다. 충전하는 동안 게이트압력에 대해 수치모사와 실험과 비교한 결과는 Fig. 5에 나타내었다. 시간이 경과함에 따라 점차 증가하는 경향을 보여주며 작은 압력에도 불구하고 잘 맞음을 보였다. 유동이 진행되는 동안 실험으로 관찰한 금형내의 섬유배향분포는 Fig. 6에 나타내었고 수치모사 결과는 Fig. 7에 나타내었다. Fig. 6과 7로부터 point gate 형태의 금형 입구 부근에서 diverging flow 형태인 방사형유동을 볼 수 있으며 이 경우 단섬유들이 흐름에 수직으로 배열됨을 알 수 있다. 또한 내부방해체의 존재로 인한 웰드라인 생성을 관찰할 수 있는데 단섬유들이 원형 내부방해체 주위를 따라서 shear 영향을 받아 정렬되며 웰드라인

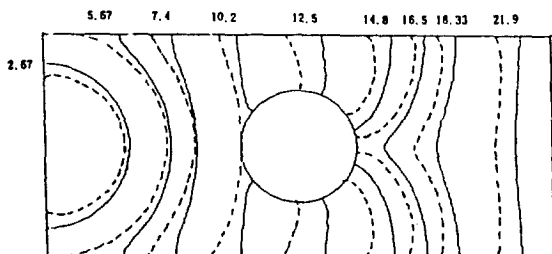


Fig. 4. Comparison between predicted(solid lines) and experimental(dashed lines) flow fronts advancement.

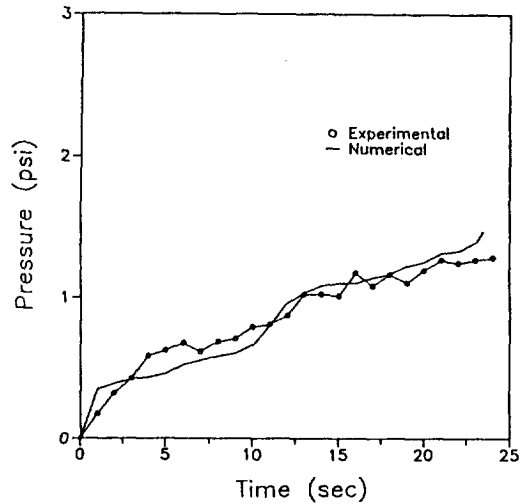


Fig. 5. Comparison between predicted and experimental gate pressure.

부근의 섬유들은 웰드라인 방향으로 정렬되려는 경향을 볼 수 있다. 내부방해체의 위치에 의한 단섬유배향의 영향을 알아보기 위해 Fig. 8과 같이 실험과 수치모사를 수행하였는데 내부방해체가 금형입구에 가까이 위치할수록 단섬유가 웰드라인을 따라 길게 정렬되는 것을 알 수 있다. 게이트의 위치에 따른 웰드라인의 생성과 단섬유배향을 살펴보기 위하여 Fig. 9에서와 같이 양쪽면 중앙에 있는 point gate에서 유입되는 유동을 관찰하였다. 금형 가운데 웰드라인이 형성되며 단섬유들은 이 웰드라인을 따라서 정렬됨을 보여주고 있다.

4-2. 수렴 및 확장 유동

수렴유동에서의 섬유배향분포는 실험과 수치모사 결과 Fig. 10에 나타내었다. 단섬유들은 금형입구 부근에서 diverging flow에 의해 유동방향에 수직으로 배열되다가 수축되는 옆벽면을 따라서 shear 영향으로 정렬되는 것을 보여주고 있다. 수축된 부분에서는 elongational flow의 영향으로 단섬유들이 벽면을 따라 정렬됨을 보여주고 있다. 확장유동의 경우에는 Fig. 11에서 볼 수 있듯이 확장영역의 diverging flow에 의해 흐름에 수직인 방향으로 배열하는 경향을 보인다. 실험결과는 수치모사결과보다 흐름이 진행될수록 다소 정렬이 흩어지는 경향을 보인다.

4-3. 내부방해체를 가진 3차원 금형

바닥면에 4 개의 원형 내부방해체들과 중앙에 한 개의 point gate를 가진 뚜껑없는 정사각형 상자모양의 금형에서의 단섬유분포를 Fig. 12와 13에 나타내었다. 금형

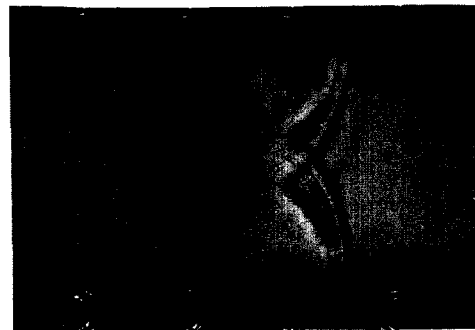
(a) $t = 5.67 \text{ sec}$



(b) $t = 10.20 \text{ sec}$



(c) $t = 17.11 \text{ sec}$



(d) $t = 24.83 \text{ sec}$

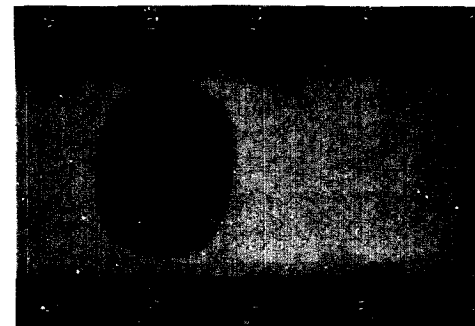
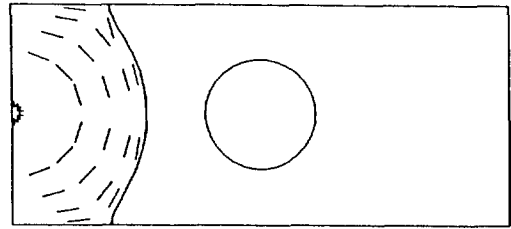
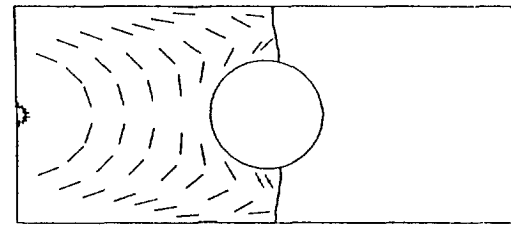


Fig. 6. Experimental fiber orientation during mold filling in the cavity with an insert.

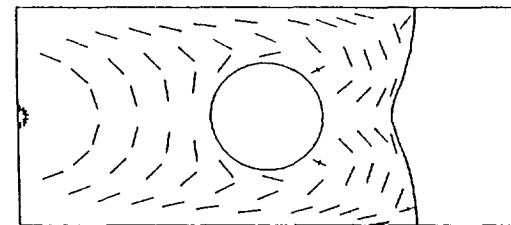
(a) $t = 6.38 \text{ sec}$



(b) $t = 12.10 \text{ sec}$



(c) $t = 17.99 \text{ sec}$



(d) $t = 23.50 \text{ sec}$

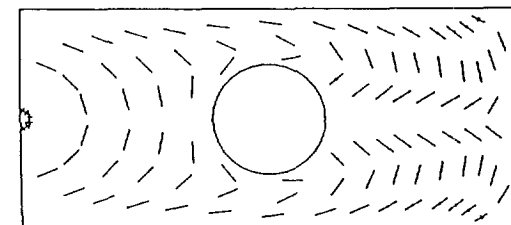


Fig. 7. Predicted fiber orientation during mold filling in the cavity with an insert.

입구에서 유입된 유동은 방사형유동형태를 보이다가 4개의 원형방해체를 지나 위로 차오르는데, 단섬유들은 gate 부근에서 흐름에 수직으로 정렬되고 원형 내부방해체 주위와 웰드라인을 따라 정렬되며 상자 옆면에서는 흐름에 수직방향을 유지한 채 차오르는 것을 볼 수 있다.

4-4. 두께에 따른 섬유배향

이제까지는 2차원 평면에서의 섬유배향에 대하여 수치모사와 실험을 비교하였으나 두께방향에 따라 위아

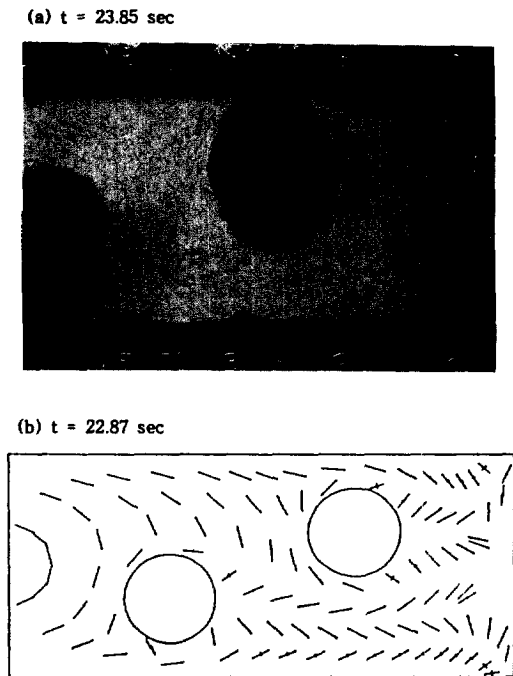


Fig. 8. (a) Experimental and (b) predicted fiber orientation during mold filling in the cavity with two inserts.

래벽에 의한 shear 영향을 고려한 상태의 섬유배향분포를 수치적으로 살펴볼 수 있다. 즉, 2차원 평면상태에서는 두께방향의 속도가 평균속도 \bar{u} , \bar{v} 로 평편하다고 간주하고 계산하였던 반면, 두께방향에 따른 섬유배향분포를 고찰하기 위해서는 이를 뉴튼유체에서는 포물선 형태의 두께방향 속도 u , v 를 가진다고 보정하였다. 금형두께방향으로 각각 중심선, $z=1/3h$, $z=2/3h$ (금형두께: $2h$)인 지점에서의 섬유배향분포를 Fig. 14에 나타내었다. 수치모사결과 두께의 중간부근과 벽쪽에 가까운 부분의 배향상태가 아주 현격한 차이를 보이는데 이는 속도구배가 두께중심에서는 '0'인 반면, 위아래 벽에서는 가장 큰 값을 가지므로 벽쪽으로 갈수록 흐름방향으로 정렬됨을 알 수 있다. 즉, 서로 다른 배향구조를 가지는 skin 구조와 core 구조를 보여주고 있다. 이 구조에 관해서는 많은 실험연구 결과들이 있고[6-10] 열가소성 수지인 경우 3, 5, 7 layer 이론이 있다. 이 layer들의 구조나 두께에 영향을 주는 요인으로 주로 유입속도, 금형 및 수지의 온도차이, 섬유의 부피분율과 외형비 등을 들 수 있다. 일반적으로 유입속도가 빠를수록 shear가 커져 skin 층이 두꺼워지고, 유입속도가 작은 경우에는 skin 층이 얇으나 더 복잡한 구조를 보

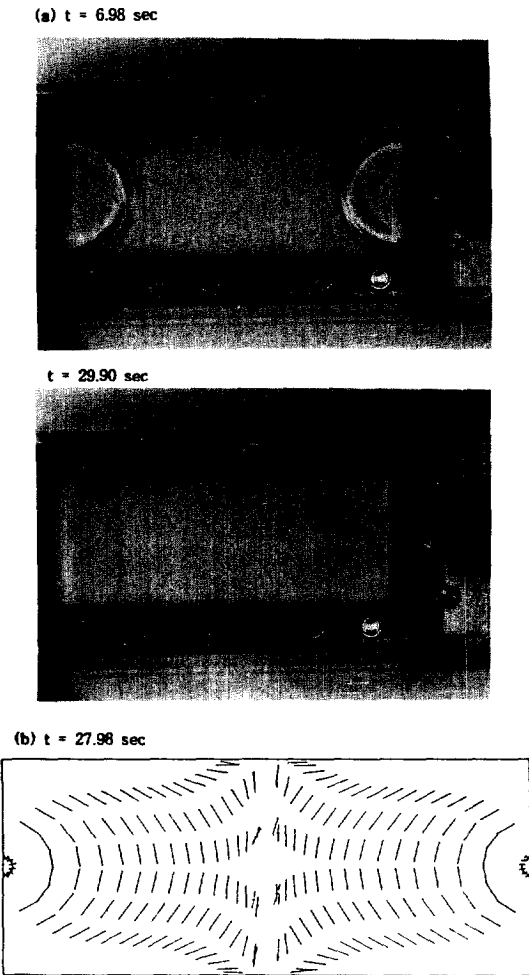
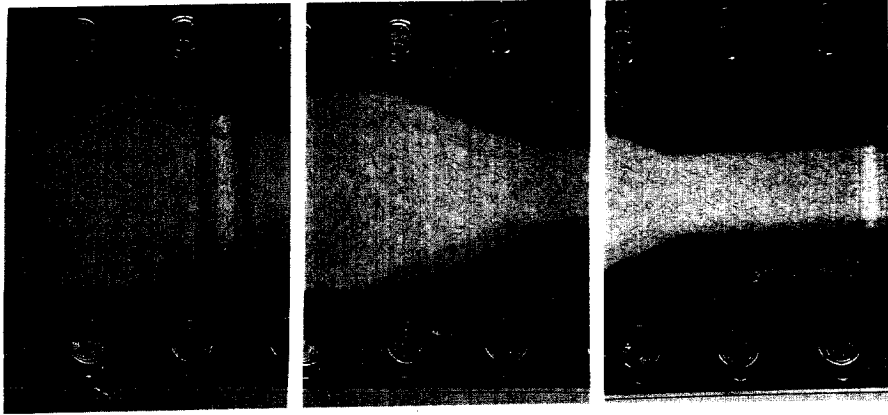


Fig. 9. (a) Experimental and (b) predicted fiber orientation during mold filling in the cavity with two point gates.

여주는 것으로 알려져 있다. 또한 금형의 벽면의 온도가 낮은 경우 skin 층이 작아진다고 알려졌다. 본 연구에는 뉴튼유체를 대상으로 하였기 때문에 열가소성수지에 비해 그다지 복잡한 구조를 가지지 않을 것이라고 가정하고 간단한 3 layer 구조로 보았다. 실험으로 촬영한 사진결과(Fig. 6)와 수치모사결과(Fig. 14)를 살펴보면 실험에서 특히, 금형 입구 부근에서는 core 구조가 거의 압도적으로 나타나고 전영역에 걸쳐 수치모사결과와 비교할 때 core 층의 두께가 더 큰 것을 알 수 있다. 따라서, 위 아래 벽면의 shear 영향에도 불구하고 수치모사의 예상만큼 skin 층이 두껍지 않은 현상에 대하여 알아보고자 한다. 먼저, 본 실험에서는 단섬유의

(a) $t = 14.21 \text{ sec}$

$t = 23.20 \text{ sec}$



(b) $t = 21.11 \text{ sec}$

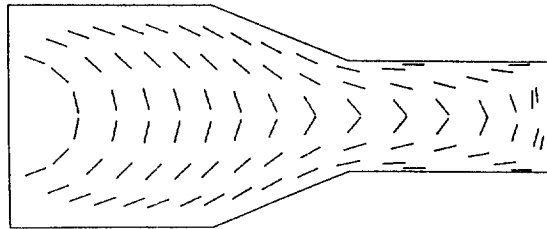
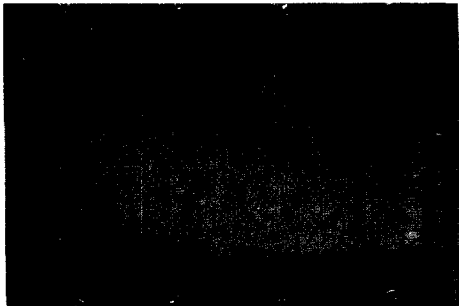


Fig. 10. (a) Experimental and (b) predicted fiber orientation in smooth converging flow.

(a) $t = 22.90 \text{ sec}$



(b) $t = 21.07 \text{ sec}$

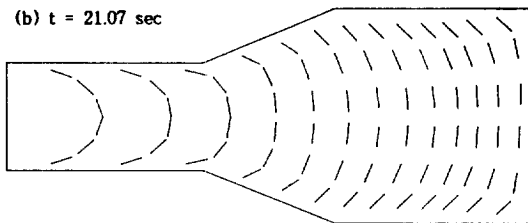


Fig. 11. (a) Experimental and (b) predicted fiber orientation in smooth diverging flow.

길이가 3 mm이고 금형 두께가 4 mm로 3차원 회전운동이 자유롭게 되도록 설계되었으나 섬유 자체 길이에 의한 벽면과 방해받는 공간이 존재함에 따라 두께면으로 단섬유들이 고루 퍼져 있지 않은 결과를 준다. 따라서, 두께방향으로 단섬유 농도 분포가 심한 불균형을 이루며 위 아래 벽면 보다는 중심부근에서 섬유가 존재할 확률이 커지므로 이로 인한 core 구조층이 더 크게 나타난다고 할 수 있다. 두번째로 Hele-Shaw 유동은 유동의 선단에서 관찰되는 분수유동효과를 고려하지 않고 두께방향의 속도를 무시하였다. 따라서 모든 추적입자들이 같은 값을 가지고 이동한다는 가정이 다소 비현실적이다. 분수효과를 고려할 때 중심부근의 속도를 가진 입자들은 위아래 벽쪽으로 향하여 이동하므로 core 구조층이 더 두껍게 나타난다고 볼 수 있다. 세번째로 본 실험에서는 뉴턴유체의 거동을 보이므로 포물선 형태의 속도 분포로 가정하였으나 이는 벽면의 slip 현상으로 인하여 포물선 형태에서 약간 plug 형태를 띤 속도 분포로 간주할 수 있다. 실제로 가공공정에서는 단섬유의 부피 분율이 커짐에 따라 속도 분포가 plug 형태로 가는 것이 알려져 있다[16]. 그러나 본 실험에서는 아주 미

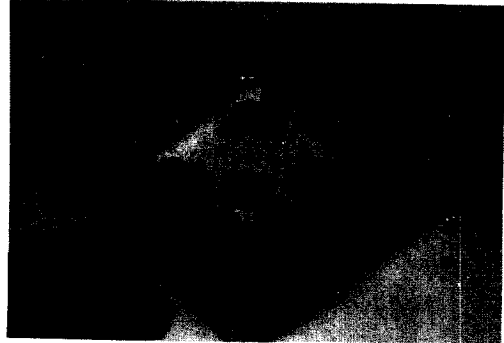
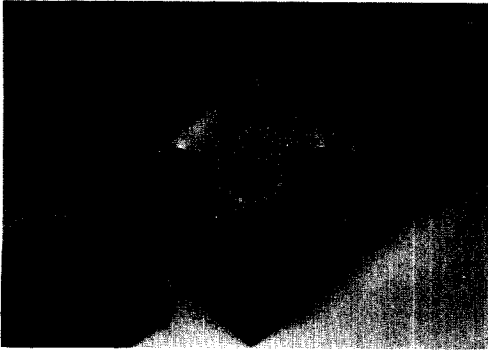
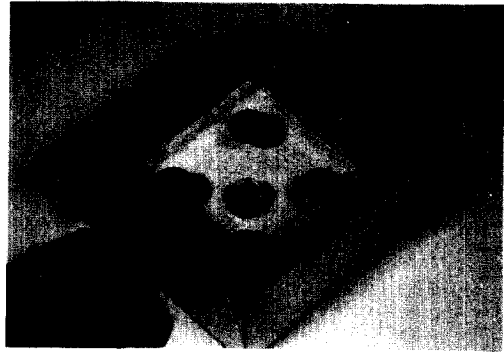
(a) $t = 2.8 \text{ sec}$ (c) $t = 8.2 \text{ sec}$ (b) $t = 4.8 \text{ sec}$ (d) $t = 13.2 \text{ sec}$ 

Fig. 12. Experimental fiber orientation during mold filling in the three dimensional thin cavity with inserts.

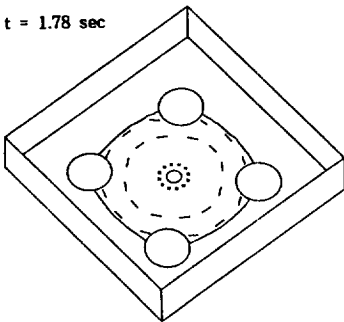
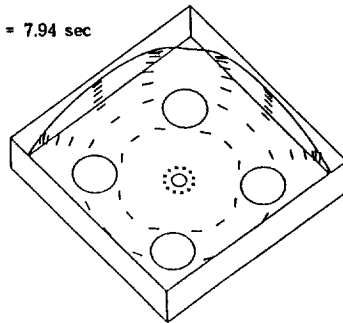
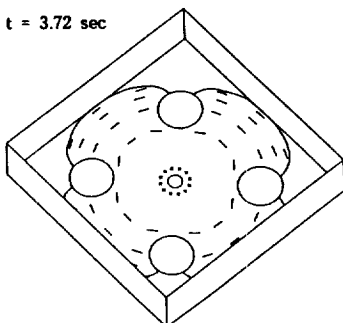
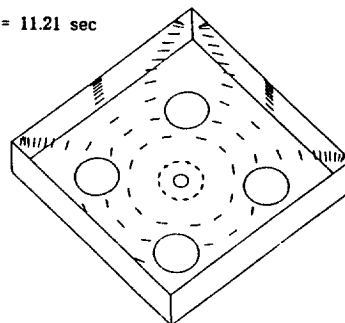
(a) $t = 1.78 \text{ sec}$ (c) $t = 7.94 \text{ sec}$ (b) $t = 3.72 \text{ sec}$ (d) $t = 11.21 \text{ sec}$ 

Fig. 13. Predicted fiber orientation during mold filling in the three dimensional thin cavity with inserts.

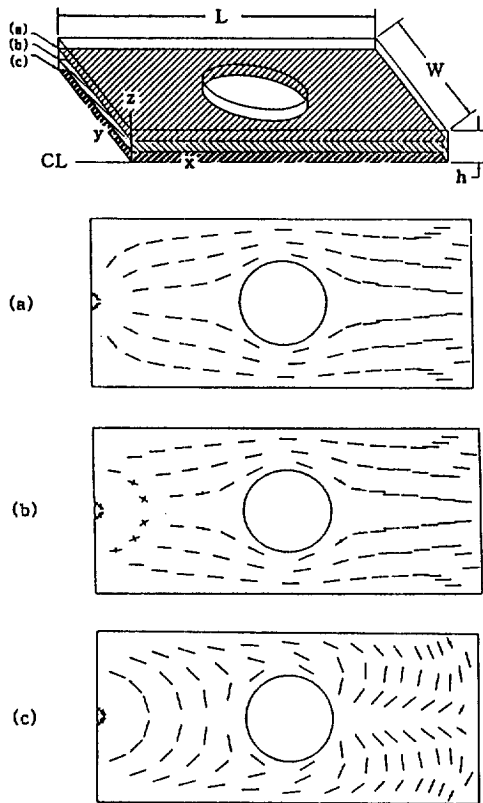


Fig. 14. The planar fiber orientations by the projection of the orientation ellipsoids are shown at: (a) $z = 2/3h$, (b) $z = 1/3h$, (c) $z = 0$ ($L = 22$ cm, $W = 10$ cm, $h = 0.2$ cm).

미한 섬유부피비를 가지므로 이 효과는 그다지 크지 않을 것으로 여겨진다. 마지막으로 섬유상호계수 C_I 값을 들 수 있는데 본 연구에서는 C_I 를 0.005로 다른 연구들 [5, 14, 15]로부터 적당히 가정하였다. C_I 값이 증가하면 섬유와 섬유간의 상호작용이 커져 임의배향화하는 결과를 얻은 바 있다 [12, 13]. Jackson [15] 등은 SMC에서의 섬유배향 실험결과 $C_I (= 0.035)$ 를 Folgar 등 [5]에 의해 측정된 $C_I (= 0.0081)$ 와 비교하였다. 여기서 2차원으로 제한된 평면에서의 섬유거동은 3차원 공간 경우보다 더 큰 C_I 값이 필요하다는 것을 밝혔다. 본 실험에서 섬유입자의 자유회전이 가능하도록 금형 두께를 설계하였을지라도 섬유의 운동은 위아래벽에 의해 제한되어진다. Jackson 등의 결과($C_I = 0.035$)를 볼 때 본 실험에 쓰인 값($C_I = 0.005$)이 작을지 모르지만 그들 실험에 쓰인 섬유부피비(0.063)가 본 연구의 섬유비(0.00033)보다 훨씬 더 큰 것을 감안하면 제약효과로 인한 C_I 의 증가치는 결정할 수 없다. 따라서 실험을 통한

좀더 정확한 C_I 값을 필요로 한다고 하겠다.

5. 결 론

사출성형공정중 충전단계에서 유동형태가 섬유배향에 미치는 영향에 대하여 알아보자 수치모사를 통하여 섬유배향을 예측하고 실험을 수행하여 이를 검증해 보았다. 수치모사는 유한요소/관할부피 방법에 의해 여러 가지 금형형태에 대하여 유동을 해석하고, 새로이 입자추적법을 도입시켜 섬유와 섬유간의 상호작용을 고려한 섬유배향텐서 변화식으로부터 섬유배향분포를 구하였다. 수치모사와 실험관찰 결과에서 확장유동에서는 단섬유들이 흐름에 수직으로 배열되고 수렴유동에서는 흐름방향으로 정렬하며, 옆벽면과 내부방해체 주위에서는 그들 주위를 따라서 정렬하려는 경향을 확인하였다. 두께방향의 속도구배를 고려한 수치모사를 통하여 skin-core 구조를 예측하였는 바, 예상된 skin의 두께가 실험으로 관찰된 것보다 더 크게 나왔다. 이는 주로 벽면에 의한 섬유운동의 제약에서 기인한 섬유농도의 불균일 분포, 분수유동효과, 벽면에서 속도의 미끄럼 현상, 섬유상호작용계수 등의 영향이 수치기법에서 충분히 고려되지 못한 이유로 해석될 수 있었다. 이를 더 발전시켜 산업적으로 응용하기 위해서는 고분자 복합재료 경우에 일어나는 복잡한 배향기구와 구조를 밝히고, 여러 가지 영향들을 수치모사에 충분히 반영시켜 실제 제품생산에 적용시키는 연구가 절실히 요구된다고 하겠다.

감 사

본 연구는 1992-93년도 산학협동재단의 연구비와 (주) 유공의 장학금 지원에 의하여 이루어졌음을 밝히고 이에 감사의 뜻을 표합니다.

사용기호

- a_{ij} : ij component of second order orientation tensor
- C_I : interaction coefficient
- d : diameter of fiber
- h : half gap width of a cavity
- l : length of fiber
- L_* : linear shape function
- P, p : isotropic pressure
- p : unit vector along the axis of fiber
- S : parameter defined as a measure of fluidity

- \bar{u} : average x-directional velocity component through the gap width
 \bar{v} : average y-directional velocity component through the gap width
 β : constant(β equals 3 for three dimensional orientation and β equals 2 for planar orientation)
 $\dot{\gamma}$: rate of deformation tensor
 δ_{ij} : Kronecker delta
 η : viscosity of fluid [poise]
 λ : shape parameter of particle
 ρ : density of fluid [g/cm³]
 ϕ_v : fiber volume fraction
 Ψ : orientation distribution function
 ω : vorticity tensor

참고문헌

- Altan, M. C., Subbiah, S., Guceri, S. I. and Pipes, R. B.: *Poly. Eng. Sci.*, **30**(14), 848(1990).
- Advani, S. G. and Tucker, C. L.: *ANTEC*, 687(1988).
- Frahan, H. H. D., Verleye, V., Dupret, F. and Crochet, M. J.: *Poly. Eng. Sci.*, **32**(4), 254(1992).
- Jeffery, G. B.: *Proc. Roy. Soc.*, **A102**, 161(1922).
- Folgar, F. and Tucker, C. L.: *J. Reinf. Plast. Comp.*, **3**, 98(1986).
- Darlington, M. W. and McGinley, P. L.: *J. Mat. Sci.*, **10**, 906(1975).
- Bright, P. F., Crowson, R. J. and Folkes, M. J.: *J. Mat. Sci.*, **13**, 2497(1978).
- Goettler, L. A.: *Poly. Comp.*, **1**, 60(1984).
- Sanou, M., Chung, B. and Cohen, C.: *Poly. Eng. Sci.*, **25**(16), 1008(1985).
- Vincent, M. and Agassant, J. F.: *Poly. Comp.*, **7**(2), 76(1986).
- McGee, S. H. and McCullough, R. L.: *J. Appl. Phys.*, **55**(5), 1394(1984).
- Lee, M. H. and Lee, K. J.: *The Korean J. Rheology*, **4**(2), 138(1992).
- Lee, M. H.: Ph.D. Dissertation, Seoul National University, Dept. of Chemical Eng., Seoul, Korea (1993).
- Matsuoka, T., Takabatake, J., Inoue, Y. and Takahashi, H.: *Poly. Eng. Sci.*, **30**(16), 957(1990).
- Jackson, W. C., Advani, S. G. and Tucker, C. L.: *J. Compos. Mat.*, **20**, 539(1986).
- Mallick, P. K.: "Fiber-Reinforced Composites", Marcel Dekker, New York(1988).
- Advani, S. G. and Tucker, C. L.: *J. Rheol.*, **31**, 751(1987).
- Tucker, C. L. and Fogar, F.: *Poly. Eng. Sci.*, **23**(2), 69(1983).