

Magnetic Contactor Upper Frame 사출성형시 유리섬유 배향에 따른 뒤틀림 변형에 관한 연구

박진영* · 조해용** · 김길수*** · 황한성****

A study of warpage caused by glass fiber orientation in Injection Molding to Upper Frame of Magnetic Contactor in 85 AF

Jin Young-Park, Hae Yong-Cho, Kil Su-Kim

Key Words : Magnetic Contactor(전자개폐기), GF(Glass Fiber)

Abstract

As using of insulating material of plastic to industrial electric field, thermoset has been gradually substituted for thermoplastic. But changing the material with crystalline has some problem, which is strength or warpage, Especially getting a strength to endure inner pressure is necessary when arc is occurred. So we use the material that is composed of glass fiber to compensate strength. By the way as the reinforced glass-fiber material is used in injection molding, unstableness of dimension is appeared frequently and it is difficult to know warpage pattern. So this paper will be contributed to know warpage pattern of mold product that is upper frame of magnetic contactor caused by glass-fiber orientation with fixed gate-system, when glass-fiber reinforced material with classification of poly-amide is used in injection molding.

기호설명

a_{ij} : Orientaton tensor, C_1 : Interaction tensor, c_p : Specific heat, f_i : Body force, k : Thermal Conductivity, p : Pressure, u : Velocity component, T : Temperature, v : Specific volume, γ : Shear rate, $\dot{\gamma}_{ij}$: Deformation tensor, ω_{ij} : Vorticity tensor, δ_{ij} : Unit tensor, η : Viscosity, ρ : Density, σ_{ij} : Stress tensor, ∇ : Gradient operator, D/Dt : Material derivative

1. 서론

사출 성형이란 용융된 플라스틱 재료를, 닫혀진 금형의 공동부에 가압 주입하여, 금형내에서 고화 시킴으로써, 금형 공동부에 상당하는 성형품을 만

드는 것으로, 플라스틱 산업의 발달로 여러가지 성형법등과 더불어 사용이 증가 하고 있다.[1] 사출 성형제품은 크게 캐비티(Cavity) 안으로 수지를 채우는 충전과정, 수지를 채우고 난후 제품의 수축을 보완하기 위한 보압과정, 그리고 캐비티내에서 수지의 고화를 증가 시키는 냉각과정을 거쳐, 냉각이 끝나면 금형이 개폐하면서 제품이 취출되어 만들어 진다. 취출후 제품의 양부를 판단하는 여러가지 요소들중, 변형은 중요한 인자로 변형을 해결하기 위해 많은 방법이 사용 되고 있다. 특히 수지의 선택은, 제품 치수에 영향을 끼치는 중요한 원인으로 작용을 한다. 사출 성형에 사용되는 수지로는 열경화성 수지 (Thermoset plastic) 및 열가소성 수지 (Thermo Plastic)로 나눌 수 있고, 열 가소성 수지 중 결정성 수지를 사용하는데 있어, 특히 변형 문제로 인한 제품치수의 불안정이 대두 되고 있다. 치수 불안정에 영향을 주는 원인 중 하나인 배향에는 분자배향 및 섬유배향이 있다. 사출 성형 공정[2] 충전단계 과정에서, 용융된 수지가 흐르는 동안 폴리머(Polymer) 분자들은 흐르는

* LG 산전

** 충북대학

*** LG 산전

**** LG 산전

방향으로 정렬이 되려는 성질이 있다. 이를 분자 배향이라 하고, 분자배향의 정도는 용융 수지온도, 성형조건, 쉬어레이트(Shear rate), 형상(Geometry)의 특성등에 영향을 받는다. 프로즌 레이어(Frozen layer) 내에서는 배향 정도가 높고, 중앙부 위로 갈수록 낮게 나타남을 볼 수 있다.[3] 그리고 수지의 흐름이 멈출 때, 분자배향은 수지의 이완(relaxation)시간과 온도에 의존한다. 만약 이완(relaxation)이 완결 되기전에 수지가 완전히 고화된다면, 수지는 프로즌인(Frozen In) 상태에 놓여 있게 된다. 프로즌 인 오리엔테이션(Frozen in orientation)은 수지의 기계적 물성치와 수축에 영향을 미치므로, 수축에 있어 수지의 평행성분 수축과 수직 성분 수축량이 다르게 나타남을 볼 수 있다.[4] Frozen in Orientation은 복굴절을 이용하여 광범위하게 측정 되어 왔는데, 최초로 Spencer와 Gilmore[5]에 의해 시도 되기도 하였고, 결정성 고분자에 대해서는 투 페이즈 모델(Two-Phase Model)을 사용하여, 전체 복굴절에 대하여 비결정 부분의 복굴절 분포가 연구되기도 하였고[6,7,8], Katti [9], Kantz [10]는 사출성형시 결정성 고분자의 미세 구조의 특성을 흐름방향과 연계하여 연구를 하였다. 그러나 사출성형에서의 결정의 분포와 형태는, 흐름상태의 많은 변수에 등에 의해 아직도 파악하기가 어려운 상태이다. 섬유배향 이라함은 수지에 섬유가 첨가된 경우, 섬유들도 수지의 흐름방향[11]에 따라 일정 배열을 하려고 하는 성질을 가지는데 이를 섬유배향이라 하고, 섬유배향 상태에 관한 연구는 X-선 회절 강도 분포[12] 등으로부터 구한 간접적 평가법이나, 혹은 직접 측정하는 방법이 행하여 지고 있고, 수치해석 이론은 단일 타원체의 회전운동에 대한 이론적 연구인 Jeffery 모델[13]과 1980년대에 Jeffery 모델의 해를 수치 해석적으로 구한 Givler[14]는 단섬유가 전단운동 상태에서는 유동방향으로, 인장운동에서는 인장방향으로 섬유가 배열되는 특성을 설명하였고, Jeffery 모델에 상호 작용계수를 추가한 Folgar와 Tucker[15]는 단섬유간 상호작용을 고려한 모델을 제시 하였다. 1990년대에 들어서 배향 텐서를 이용한 Advani-Tucker[16]의 모델에서는, 4차의 배열 텐서를 2차테서로 근사화 하기 위해 Closure Approximation(중결근사)[17]을 사용하였고, Altan[18]은 3차원적 섬유배열 계산을 통하여 두께에 따른 섬유배열 형태를 연구 하였다. 그리고 간단한 형상의 경우에 있어, Matsuoka[19]는 정사각형 형상에서 열팽창계수와 배열인자와의 관계를 규명 하였고, 원반 및 직사각형의 경우에

Bay와 Tucker[20,21]는 2차배열 텐서를 이용하여 섬유의 배열을 연구 하였다. 이들은 중결근사가 배열을 예측하는데 미치는 영향 및, 사출시간에 따른 섬유배열에 대하여 규명을 하였다. 한편 복잡한 분수 유동장내에서 섬유배열을 예측한 F. J. Ko와 J. R. Youn[22]은 금형의 두께방향에 따른 섬유배열정도를 파악 하였고, 초기 배열상태가 최종 배열에 미치는 영향을 규명 하였다. 상기에서 연구된 사항들은 분자배향 자체 및 간단한 형상의 경우 섬유 배향에 관해서 연구 되었다. 그러나 복잡한 형상을 가진 제품을 사출시, 섬유배향에 의한 변형양상 규명에 대하여는 연구가 미진하다. 기존에 유리섬유 함량에 따른 뒤틀림에 관한 연구[23]가 진행되기도 하였으나, 본 논문은 섬유강화 수지를 사용하여 제품을 생산할 때, 섬유배향의 배열에 의한 뒤틀림변형 양상을 파악 함으로써 복잡한 사각형상을 가진 Magnetic Contactor Upper Frame 개발시 변형이 허용치수 범위내에 만족하는 최적의 설계조건을 찾는 데 목적이 있다.

2. 수치해석 및 실험방법

2.1 이론고찰

사출성형 해석시 필요한 충전과정에 관한 지배 방정식은, 일반 유체에 적용되는 연속방정식(Continuity Equation), 운동방정식(Momentum equation), 에너지 방정식(Energy Equation)으로 다음과 같다[24]

$$\frac{D\rho}{Dt} + \rho \frac{\partial u_k}{\partial x_k} = 0 \quad (1)$$

$$\rho \frac{\partial u_j}{\partial t} + \rho u_k \frac{\partial u_j}{\partial x_k} = \frac{\partial \sigma_{ij}}{\partial x_i} + \rho f_j \quad (2)$$

$$\rho c_p \frac{DT}{Dt} - \beta T \frac{Dp}{Dt} - p \nabla \cdot \vec{u} = \sigma_{ij} \frac{\partial u_j}{\partial x_i} + \nabla \cdot (k \nabla T) \quad (3)$$

$$\beta = \frac{1}{v} \left(\frac{\partial v}{\partial T} \right)_p$$

일반적인 유체운동 방정식에 대하여, 얇은 두께의 사출성형 제품의 경우, 두께방향 유동을 무시하고 다음과 같이 가정을 한다.

1. 충전단계 동안 수지는 비압축성으로 가정한다.

2. 수지는 일반화된 뉴턴 유체(Newtonian Fluid)로 가정한다. 즉, 점탄성 효과는 무시한다.

3. 비열과 열전도율은 각상에서 일정하다고 가정한다.

점성모델은 Low Shear Rate 영역에서 점성 거동을 잘 나타내는, Moldflow Second Order Model 을 사용하였다. 여기서 A_1 는 상수를 의미한다.

$$\ln \eta = A_1 + A_2 \ln \dot{\gamma} + A_3 T + A_4 (\ln \dot{\gamma})^2 + A_5 T \ln \dot{\gamma} + A_6 T^2 \quad (4)$$

수치해석에 사용된 각 Element 에 대한 3D Orientation 은, 2 차 텐서에 의해 기술된다. 배향 타원체(Orientation Ellipsoid)의 생성에 쓰인 Eigenvector 는, Fiber Alignment 의 주방향을 나타내고 Eigenvalue 는 파이버 배향에 대한 0 에서 1 사이의 Statistical Portion 을 나타낸다. (Fig.1)

$$a_{ij} = \begin{bmatrix} a_{11} & a_{12} & a_{13} \\ a_{21} & a_{22} & a_{23} \\ a_{31} & a_{32} & a_{33} \end{bmatrix} \Rightarrow \begin{bmatrix} \lambda_1 & 0 & 0 \\ 0 & \lambda_2 & 0 \\ 0 & 0 & \lambda_3 \end{bmatrix} ; [e_1 \ e_2 \ e_3]$$

Second order orientation tensor Eigenvalues Eigenvectors

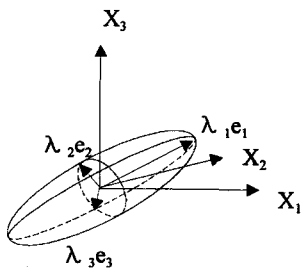


Fig.1 Orientation Ellipsoid Defined by General 2nd Order Orientation Tensor

파이버 모델은 Advani 와 Tucker 방정식에 근간을 두며, Second Order tensor 의 경우 배향 방정식은 다음과 같이 표현된다.

$$\begin{aligned} \frac{Da_{ij}}{Dt} = & -\frac{1}{2}(\omega_k a_{ij} - a_{ij} \omega_k) \\ & + \frac{1}{2}\lambda(\dot{\gamma}_k a_{ij} + a_{ij} \dot{\gamma}_k - 2\dot{\gamma}_k a_{ik}) \\ & + 2c_1 \dot{\gamma}(\delta_{ij} - \alpha a_{ij}) \end{aligned}$$

α 는 planar orientation 으로 2 차원일 경우 2, 3 차원의 경우 3을 의미한다. 그리고 λ 는 입자의 형상에 의해 결정되는 Aspect ratio 로써 다음과 같다.

$$\lambda = \left(\frac{r_c^2 - 1}{r_c^2 + 1} \right) \quad , \quad r_c = \frac{L}{D}$$

여기서 L 은 섬유 길이, D 는 섬유의 직경을 의미한다.

2.1.1 해석 및 실험 방법

해석모델은 대칭성 및 해석 시간을 고려하여, 반쪽 형상만을 고려하여 모델링을 하였다. 게이트 시스템(Gate System)은 고정을 하고, 허용치수 범위 내에 드는 결과 값을 얻기 위해, 수치해석 및 시사출을 시험을 반복 하였다. (Fig.2) 수치해석은 상용프로그램인 Moldflow 를 사용하였다

제품에 사용된 수지는 PA6로 유리섬유가 33% 첨가된, Allied 사의 Capron 8233GHS 를 사용하였고, 시험 사출에 사용된 사출기는 220 톤급 이상을 사용하였다. 금형은 핫런너(Hot Runner)구조로 설계하였다.(Fig.3) 시험사출결과 변형량 측정은 3 차원 좌표측정기를 사용 하였다.

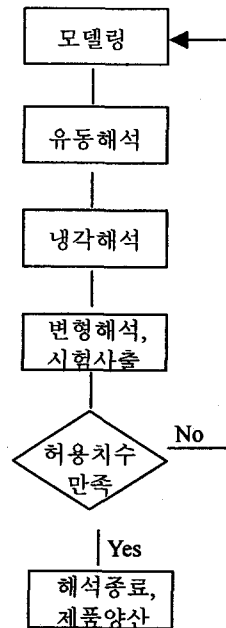


Fig.2 Flow Chart of Analysis

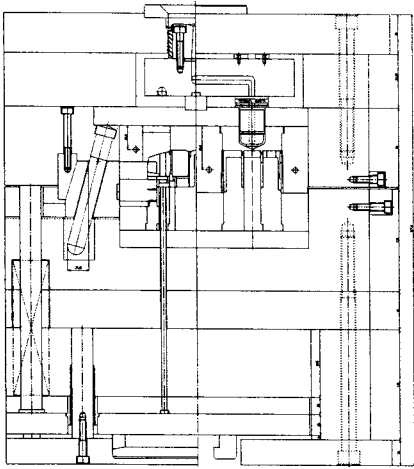


Fig.3 Drawing of Total Assembly

2.1.2 수치해석 및 실험 결과

파일럿 샘플에서 가장 문제가 되는 a 부분의 변형 거동 및 변형량을 파악하기 위해, 기존의 도면을 근거로 모델링을 하여 해석결과와 시험사출결과를 비교 하였다. 변형해석 결과 및 시험사출 결과 변형량은 Table1 과 같다 (Fig.4)

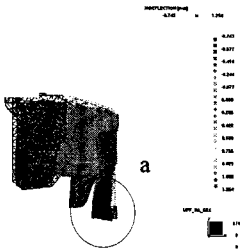


Fig.4 Warpage Analysis of Original Model

Table1 Deflection 단위: mm

구분	X-deflection
해석결과	0.44
실측결과	0.47

변형해석 결과 및 시험 사출결과에서 가장 문제가 되는 것은, a 부분의 끝단이 -X 축으로 말리는 현상이다. Table1 에서 해석 및 실측결과, -X 축으로 변형량이 허용공차(± 0.2)를 만족하지 못하는 것으로 나타났다. 일반적인 경우 변형의 원인은 냉각차이, 수축편차, 배향 효과를 들 수 있다.[4] 만약 GF 가 10%이상 첨가 될경우, 변형

의 원인은 GF 배향에 의해 지배적일 수 있다. 따라서 본 논문에서는, 변형을 최소화 하는 방법으로 GF 배향변화에 가중치를 두기로 한다. 기존모델의 경우 섬유배향은 Fig.5 과 같고, -X 축으로 말리는 현상을 감소 시키기 위해서는 제품형상 및 유동 상태를 고려하여, 섬유 배향을 수직(Y 방향)으로 위치시켜야 할 것으로 사료된다.

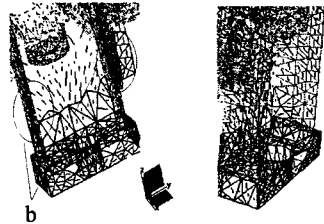


Fig.5 Fiber Direction of Original Model

기존모델 결과를 토대로 냉각효과 와 섬유배향을 동시에 고려하고, 제품의 형상수정을 최소화 하는 범위에서, 하위부(b)를 -X 축 방향으로 살빼기를 실시한 후, 해석 결과와 시험사출 결과를 비교 하였다. 해석결과 섬유배향은 Fig.6 과 같고, 변형해석 및 실측결과에 의한 변형량은 Table2 와 같다.

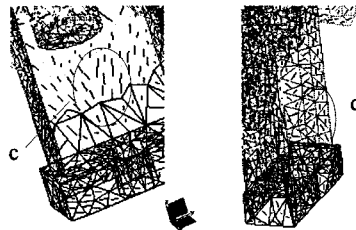


Fig.6 Fiber Direction of Enhanced Model

Table2 Deflection 단위: mm

구분	X-deflection
해석결과	0.26
실측결과	0.3

해석결과 및 실측결과(Table2) 변형량은, 제품의 허용공차를 만족시키지 못하는 것으로 나타났고, 기존모델과 비교해 보면 해석결과는 약 0.18, 실측결과는 약 0.17 로 약 38% 변형이 감소 한 것으로 나타났다. 변형량 감소의 원인으로 추정되는 섬유 배향 상태를 고찰 하면, c 부위 섬유 배향상

데는 기존모델과 유사하나 미소하게 유동방향으로 평행(Y 방향)하게 배열하는 것을 볼 수 있다. 그리고 d 부위는 유동방향과 수직(X 방향)으로 배향하는 것으로 나타났다. 그러므로 본 결과에서는 섬유배향 보다는, 살두께의 감소에 의한 냉각효과의 영향이 지배적으로 작용하여, 변형이 감소한 것으로 사료된다. 그러므로 개선 모델을 근거로 하여, c 부위는 Y 방향으로 d 부위는 X 방향으로 섬유배향을 일치 시키면, 변형이 감소할 것으로 판단된다. 따라서 냉각 과 섬유배향을 동시에 고려한 모델로, 해석과 실험을 수행 하였다.

3. 최종모델 해석 및 실험 결과

3.1 해석 및 실험 결과

위의 결과들을 토대로 하여, 측면의 냉각 및 수축편차를 균일하게 하기 위해 b 부위(fig.5)의 살땀기틀 -X 와 Y 방향으로 증가 시키고, 측면 처짐 방지 및 유동방향의 변화에 의한 GF의 배향을 바꾸기 위해 리브를 추가하였다, 그리고 냉각편차를 고려하여 제품의 하단부 전체에 걸쳐 살땀기틀 실시 하였다. 최종모델 해석결과(Fig.7) 변형량은 Table3 과 같고, 섬유배향은 Fig.8 과 같다.

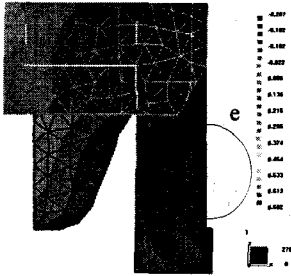


그림 7 Warpage Analysis of Final Model

Table3 Deflection		단위: mm
구분		X-deflection
해석결과		0.05
실측결과		0.1

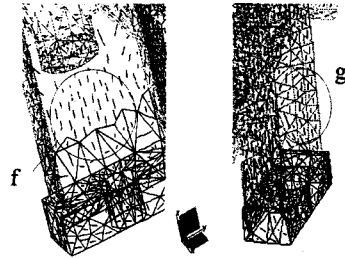


그림 8 Fiber Direction of Final Model

해석 결과 (Fig.8) f부위 섬유배향은, 유동방향 즉 Y축 방향과 평행 함을 볼 수 있다. 이는 제품이 수직으로(Y 축) 수축하는 것을, 섬유배향에 의해 수축이 감소 되는 것으로 사료된다. g 부위의 바깥부분(+X 방향)은 Y축 방향으로 섬유가 배열하며, 안쪽부분(-X 방향)으로 갈수록 배향이 수직으로 변하는 것을 볼 수 있다. 이는 섬유배향에 의해 제품이 수평으로(-X 축) 수축되는 것을 방지하는 효과를 가져온다. Fig.7의 e 부위의 변형량은 약 0.1을 나타내고 있다. 이는 GF 배향이 안쪽으로 갈수록 수직으로 배향하는 것에서 기인한 것으로 사료된다. 전체 X축 변형량은 최종 모델 변형 해석 결과 변형량은 0.05를 나타내고 실측 결과 0.1로 초기의 기존모델 변형 실측과 비교할 때 약 4.7배나 감소하였고, 치수 허용공차 ± 0.2 를 만족시킴을 볼 수 있다.(Table3)

4. 결론

본 연구에서는 게이트 시스템을 바꾸지 않고 GF 배향을 바꿈으로써 배향이 제품의 변형에 미치는 영향을 고찰한 결과 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다. 제품에 GF가 첨가 되었을 때 변형은 일반 수지와 달리 GF 배향의 효과가 지배적이다. 이유는 분자배향 뿐만아니라 섬유배향의 방향에 따라서도 수축의 편차가 발생하기 때문이다. 본 제품에서도 변형의 주 원인은 배향에서 기인한것으로 판단된다. 본 제품에서는 게이트 위치를 그대로 유지하면서 섬유배향을 바꿔야 하는 제약 조건이 있었다. 개선모델의 경우 제품의 특정 부분 살땀기는 배향의 변화에 크게 영향을 끼치지 않았다. 섬유배향을 바꾸는 데는 사출속도 또는 게이트 위치 변경등 여러가지 방법이 있다. 그러나 사출조건등 크리티컬(Critical)한 조건을 사용할 경우, 현장에서의 다양한 변수들로 기인해서 양산에 적용하기는 어려운 점이 있다. 따라서 본 제품

에서는 밑단에 리브를 추가하여 유동방향을 바꾸어 줌으로써 배향을 바꿀수 있었다. 그러나 제품 형상이 복잡한 경우엔 섬유배향 뿐만 아니라 냉각 차이에 의한 것을 고려 하지 않으면 안된다. 특히 냉각이 어려운 부분의 형상을 모델링시 이러한 점들을 고려해야 할 것으로 사료된다. 향후 섬유배향 및 분자배향 두가지를 비교 분석하여, 두인자중 어떤 것이 변형에 미치는 영향이 큰지를 파악하고, 개이트 위치 변경에 따른 뒤틀림 변형 양상을 규명 하여야 겠다.

참고문헌

1. 홍명용, 류계구, 1985, "사출성형"
2. Peter Kenndey. 1993, "Flow Analysis Reference Manual"
3. H. W. Cox and C. C. Mentzer, 1986, "Injection Molding : The Effect of Fill Time on Properties", Polymer Engineering and Science, Vol. 26, No. 7, pp488-497
4. Moldflow Theory Manual, "Theoretical Basis for Shrinkage Calculations", Ch 9
5. R. S. Spencer and G. D. Gilmore, 1950, " Some Flow Phenomena in the Injection Molding of Polystyrene", J. Colloid Sci., Vo.6, pp118~132
6. F. H. Moy and M. R. Kamal, 1980, "Crystalline and Amorphous orientations in Injection Molded Polyethylene", Polymer Engineering and science, Vol.20, No. 14, pp957~964
7. A. R. Wedgewood and J. C. Seferies, 1984, " A Quantitative Description for the Optical Properties of Crystalline Polymers Applied to Polyethylene", Polymer Engineering and science, Vol.24, No.5 pp328-342,
8. M. R. Kamal and F. H. Moy, 1983, "Micro structural Characterization of Injection - Molded Artcles", Journal of Applied Polymer Science, Vol.28, pp1787~1804
9. S. S. Katti and J. M. Schultz, 1982, "The Microstructure of Injection-Molded Semicrystalline Polymers : A Review", Polymer Engineering and science, Vol.22, No.16, p1001
10. M. R. Kantz, H.D. Newman, JR, and F. H. Stigale, 1972, " The Skin-Core Morphology and Structure-Property Relationships in Injection-Molded Polypropylene", Journal of Applied Polymer Science , Vol.16, pp1249~1260
11. Z. Tadmor, E. Broyor and C Gutfinger, 1974, " Flow Analysis Network(FAN): A Method for Solving Flow Problems in Polymer Processing ", Polymer Engineering and Science., Vol.14., No.9., pp.660~665
12. H. Menendez, J. L. White, 1984, " A Wide-angle X-ray Diffraction Method of Determining Chopped Fiber orientation in Composites with Application to Extrusion Through Dies", Polymer Engineering and science., Vol. 24, No. 13, pp 1051~1055
13. Jeffery, G. B., 1922, "The Motion of Ellipsoidal Particles Immersed in Viscous Fluid", Proc. Roy. Soc, A,102, pp. 161
14. R. C. Givler, M. J. Crochet, R. B. Pipes, 1983 , "Numerical Prediction of Fiber Orientation in Dilute Suspension", Journal of Composite Materials, Vol. 17, pp330~343
15. F. Folgar, C. L. Tucker III, 1984, "Orientation Behavior of Fibers in Concentrated Suspensions", J, Reinf. Plast. and Compos., Vo3, pp98~117
16. Advani, S.G, and Tucker, C. L., 1987, "The Use of Tensors to Describe and Predict Fiber Orientation in Short Fiber Composites", Journal of Rheology, vol.31, pp751~784
17. S.G. Advani, C. L. Tucker III, 1990, "Closure approximation for Three Dimensional Structure Tensors", J. Rheol, 34, pp367~386
18. M. C. Altan, S. Subbiah, S. I. Guceri, R. B. Pipes, 1990, "Numerical Prediction of Three-Dimensional Fiber Orientation in Hele-shaw Flows", Polymer Engineering and science., Vol. 30, No14, pp 848-858
19. T. Matsuoka, J. Takabatake, Y. Inoue, H. Takahashi, 1990, "Prediction of Fiber Orientation in Injecton Molded Parts of Short-Fiber-Reinforced Thermoplastics", Polymer Engineering and science, Vol. 30, No16, pp 957~966
20. R. S. Bay , C. L. Tucker III, 1992, "Fiber Orientation in Simple Injection Moldings. Part I : Theory and Numerical Method", Polymer Composite, Vol.13, No.4, pp317~331
21. R. S. Bay , C. L. Tucker III, 1992, "Fiber Orientation in Simple Injection Moldings. Part II : Experimental Results", Polymer Composite, Vol.13, No.4, pp332~341
22. J. Ko and J. R. Youn, 1995, "Prediction of fiber orientation in the Thickness Plane During Flow Molding of Short Fiber Composites", Polymer Composite, Vol.16, No.2, pp114~124
23. 제충모, 1998, "사출성형된 섬유강화 플라스틱 복합재료의 뒤틀림에 관한 연구"
24. I. G. Currie, 1993, "Fundamental Mechanics of Fluids"