

고무 압출성형 공정에 대한 유한요소 해석

하연식[†] · 조진래* · 김태호** · 김준형**

Finite Element Analysis of Rubber Extrusion Forming Process

Yeon-Sik Ha, Jin-Rae Cho, Tae-Ho Kim, Jun-Hyoung Kim

Key Words: Non-newtonian Fluid(비뉴턴 유체), Extrusion Die(압출 다이), Shear Thinning Fluid(의사소성 유체), Finite Element Analysis(유한요소 해석)

Abstract

As a macromolecule material, melted rubber flow shows characteristics of shear thinning fluid. The dynamic viscosity of this rubber fluid is influenced by temperature and shear strain rate. In this study, the numerical simulation of rubber extrusion forming process has been performed using commercial CFD code, Polyflow. Power-law model considering the effect of shear rate is used for the computer simulation of this non-Newyonian flow. Also Non-isothermal behavior is considered as Arrhenius-law model. Distributions of velocity and temperature are predicted through the simulation.

1. 서 론

압출은 연속 공정에서 균일한 가공품질을 얻기 위해 열적 기계적 방법으로 원재료를 가열 가압하여 제품을 생산하는 방식으로 고무제품, 식품, 약품 등의 제조에 많이 이용되고 있다. 압출공정에서 원하는 형상의 제품을 연속적으로 생산하면서 생산속도를 극대화하기 위해서는, 압출기와 다이내에서의 원료의 유동해석이 필수적이다. 특히 압출다이 내의 유동은 최종적으로 생산된 제품의 품질 및 공정의 생산성과 직접적인 관련이 있으므로 다이 최적형상설계의 위해서 많은 연구가 시도되고 있다.

본 연구에서는 상용해석 프로그램인 Polyflow를

† 학생회원, 부산대학교 기계설계공학과 대학원

E-mail : silver-2470@hanmail.net

TEL : (051)510-3206 FAX : (051)510-7640

* 부산대학교 기계설계공학과, 대학원

** 부산대학교 기계공학부, 정교수

*** 화승R&A 기술연구소

사용하여 고무 압출공정에서 사용되는 다이 내에서의 유동해석을 수행하였다. 유체연속체의 구성방정식에 나타나는 점도는 전단율, 온도, 압력 등의 함수로 알려져 있으며 이들을 고려하는 방법에 따라 많은 모델이 있다. 고무와 같은 비뉴턴 유체(non-Newtonian fluid)는 동점성의 크기가 전단속도의 함수로 표현되며 의사소성 유체(shear thinning fluid)의 성질을 가지고 있어서 온도의 변화에 따라 동점성 값이 변화를 보인다. 따라서 본 연구에서는 전단율의 영향을 고려한 점도모델인 Power-law model을 적용하여 전단율에 의한 점성을 고려하였으며 또한 온도영향을 고려하기 위해서 Arrhenius-law model을 적용하여 시뮬레이션을 수행하였다. 물성치는 실험을 통하여 실제 압출공정에 사용되는 고무를 위한 점성 데이터를 도출하여 사용하였다.

시뮬레이션을 통해서 다이내부와 압출물의 속도장, 온도장을 도출하였으며 실제 압출공정에서 생산되는 압출물과 유사한 압출물 형상을 도출할 수 있었다.

2. 이론적 배경

2.1 고무 용융체 모델

본 연구에서 고려하는 고무 용융체는 비뉴턴유체로써 고체와 유체의 성질을 동시에 나타내는 점탄성(viscoelasticity)을 보인다. 그러나 압출다이내의 유동과 같이 제한된 기하학적 형상 내부 유동의 경우, 다이 길이가 충분히 길고, 다이 단면적이 너무 작지 않으며 자유표면이 없는 정상유동이라면 탄성을 거의 무시할수 있다.

2.2 점도모델

유체연속체의 구성방정식에 나타나는 점도는 전단율, 온도, 압력 등의 함수로 이루어져 있으며 이들을 고려하는 방법에 따라 여러 가지 모델이 존재한다. 고무와 같은 비뉴턴유체(non-Newtonian fluid)는 동점성의 크기가 전단속도의 함수로 표현되며 의사소성 유체(shear thinning fluid)의 성질을 가지고 있어서 온도의 변화에 따라 동점성 값이 변화를 보인다. 따라서 본 연구에서는 전단율과 온도의 영향을 고려한 점도 모델을 사용하였다.

2.2.1 Power-law model

Power-law model은 전단율을 고려한 점도모델이며 다음과 같이 나타낸다.

$$\eta = K (\lambda \dot{\gamma})^{n-1} \quad (1)$$

여기서 $\dot{\gamma}$ 는 shear strain rate(1/s)를 나타내며 K는 consistency factor, n은 Power-law index, λ 는 natural time을 나타내며 이들은 재료의 고유 물성치이다.

2.2.2 Arrhenius-law model

고무와 같은 고분자 용융체는 전단율과 함께 열적효과도 압출공정에서 고려해야 하는 중요한 요소 중 하나이다. 온도가 증가함에 따라 점도는 대체적으로 증가하는 경향을 보이는데, 이러한 효과는 전단율만의 함수로 포함된 점도 모델에 온도이전인자를 추가시켜 표현할 수 있다. 본 연구에서는 Arrhenius-law 모델에 기반한 온도이전인자를 Power-law 모델에 추가시켜서 전단율과

온도가 고무의 점도변화에 미치는 영향을 고려하였으며 다음과 같이 표현된다.

$$\eta = H(T) \eta_0 (\dot{\gamma}) \quad (2)$$

$$H(T) = \exp[-\alpha(T - T_\alpha)] \quad (3)$$

여기서 α 는 energy of activation, T_α 는 reference temperature(absolute temperature)이다.

2.3 실험 데이터 및 물성치

다음의 그래프는 W6043 고무원료의 동점성계수를 20°C 간격으로 실측한 것을 나타낸다. 실험을 통하여 각 온도별 shear rate에 따른 viscosity 값을 나타내었다.

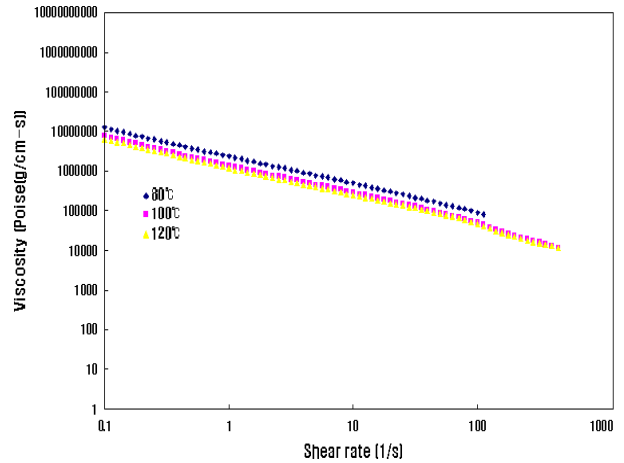


Fig.1 Viscosity function of shear rate and temperature (W6043)

Polymat을 사용하여 실험에서 구한 3개의 온도별 동점성계수 그래프를 Curve fitting 하였다. 그 결과 Power-law model의 Parameters를 도출하여 Table 1에 나타내었다.

Table 1. Parameters after curve fitting (w6043)

Power-law model	Natural time(λ)	$\lambda = 0.9$
	Parameter (k)	k=0.9881207e6
	Parameter (n)	n=0.2226
Arrhenius-law model	Energy of activation (α)	0.8916754e-2
	Reference temperature (T_α)	363

3. 유한요소 해석

3.1 지배방정식

본 연구에서 고려하고 있는 유동은 3차원, 정상상태, 층류, 비압축성, 비뉴턴유체 유동이며, 스크류를 통해 다이 내부로 들어가는 고무재료는 유체로 가정한다. 또한 다이 내부의 열전달을 고려하기 위해 에너지 방정식을 도입하였으며 점성 소산에 의한 열발생도 고려하였다.

따라서 다음과 같은 3개의 지배방정식으로 다이 내부의 유동을 정의할 수 있다.

- Continuity equation :

$$v_{i,i} = 0 \quad (4)$$

- Momentum equation :

$$\rho \left(\frac{\partial v_i}{\partial t} + v_{i,j} v_j \right) = \tau_{ij,j} + f_i^B \quad (5)$$

- Energy equation :

$$\rho C_v \left[\frac{\partial T}{\partial t} + T_{,i} v_i \right] = (k T_{,i})_i + q^B \quad (6)$$

[q^B term include the rate of heat dissipated ($= 2\mu e_{ij} e_{ij}$)]

식(6)에서 점성을 가진 비압축성유체에서의 τ_{ij} 는

$$\tau_{ij} = -P\delta_{ij} + 2\mu e_{ij} \quad (7)$$

식(8)에서 P 는 압력, μ 는 viscosity이며 e_{ij} 는 변형률속도텐서(velocity strain tensor)로 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$e_{ij} = \frac{1}{2} (v_{i,j} + v_{j,i}) \quad (8)$$

다음과 같이 정의된 지배방정식의 해를 구하기 위하여 가중잔여법(weighted residual method)을 적용하여 약형식을 유도한다. 각각의 연속방정식에 시험함수($\bar{p}, \bar{v}, \bar{T}$)를 곱하여 변분정식화를 하

면 다음과 같은 식을 얻을 수 있다.

- Continuity equation

$$\int_V \bar{p} v_{i,i} dV = 0 \quad (9)$$

- Momentum equation

$$\begin{aligned} & \int_V \bar{v}_i \rho (\dot{v}_i + v_{i,j} v_j) dV + \int_V \bar{e}_{ij} \tau_{ij} dV \\ & = \int_V \bar{v}_i f_i^B dV + \int_{S_f} \bar{v}_i^S f_i^S dS \end{aligned} \quad (10)$$

- Energy equation

$$\begin{aligned} & \int_V \bar{T} \rho c_p (\dot{T} + T_{,i} v_i) dV + \int_V k \bar{T}_{,i} T_{,i} dV \\ & = \int_V \bar{T} q^B dV + \int_{S_q} \bar{T}^S q^S dS \end{aligned} \quad (11)$$

위에서 정의된 열유동 방정식의 시도함수와 시험함수를 유한요소 기저함수를 이용하여 근사화하고 근사화한 식을 식(10), (11), (12)에 대입하면 유한요소 근사방정식을 구할 수 있다.

이 식을 행렬방정식으로 표현하면 다음과 같다.

$$K_{vp}^T \hat{V} = 0 \quad (12)$$

$$M_v \hat{V} + (K_{\mu v} + K_w) \hat{V} + K_{vp} \hat{p} = R_B + R_S \quad (13)$$

$$C \hat{T} + (K_{vT} + K_{TT}) \hat{T} = Q_B + Q_S \quad (14)$$

3.2 형상 모델링

압출공정의 모든 과정을 시뮬레이션으로 구현하는 것은 컴퓨터 사양, 해석시간 및 비용 등의 한계로 구현하기 판단하였다. 따라서 압출성형공정의 특성을 반영할 수 있는 최소한의 해석영역인 브레이크 플레이트 통과지점부터 다이영역 및 생산된 압출물의 일부를 수치해석 영역으로 정하였다. 모델링은 카티아를 이용하였으며 Fig. 2에 나타내었다.

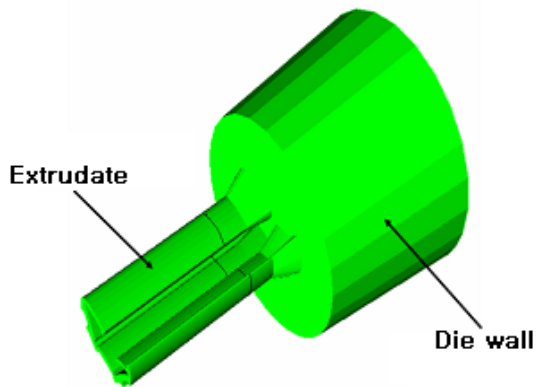


Fig. 2 Model of die and extrudate

3.3 FEM modeling 및 경계조건

FEM모델의 격자 생성은 Gambit에서 제공하는 Hexahedron(8node)를 사용하여 mesh 작업을 하였다. 전체 요소격자망에 사용된 node수는 51103개이며 element수는 14820개이며 격자 생성 결과는 Fig. 3에 나타내었다.

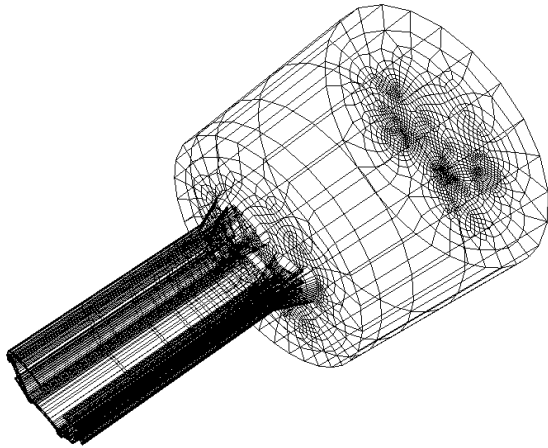


Fig. 3 FEM model of the die and extrudate

해석영역의 경계는 입구(inlet), 벽면(wall), 압출물(extrudate) 조건으로 구분되어진다. 입구영역에는 크게 두가지로 나눌 수 있다. 하나는 투입되는 원료의 온도와 또 하나는 투입되는 속도이다.

브레이크 플레이트를 통하여 들어오는 와류유동을 구현하기 하였으며 온도는 100℃를 주었다. 속도조건은 브레이크 플레이트를 통과한 회전속도를 기준으로 실제공정속도와 유사하다고 생각되는 1.5rpm에서 증감하여 0.1rpm, 3.0rpm 총 3가지로 나누어서 해석을 수행하였다. 벽면의 경계영역에서의 조건은 no slip조건으로 벽면에서의 normal velocity를 구속하였으며 다이내부 마찰을

고려하였다. 또한 단열조건을 설정하여 점성소산에 의한 발열만을 고려하였다.

압출물의 경계영역에는 optimesh technique를 이용한 free surface 조건을 적용하여 압출후 변화된 압출물의 형상을 가시화 시켰으며, 자유대류조건으로 20℃를 적용하였다. 또한 압출물 끝에 tangent velocity=25cm/s를 부여하여 인취기 조건을 적용하였다. Fig. 4는 경계조건을 나타낸다..

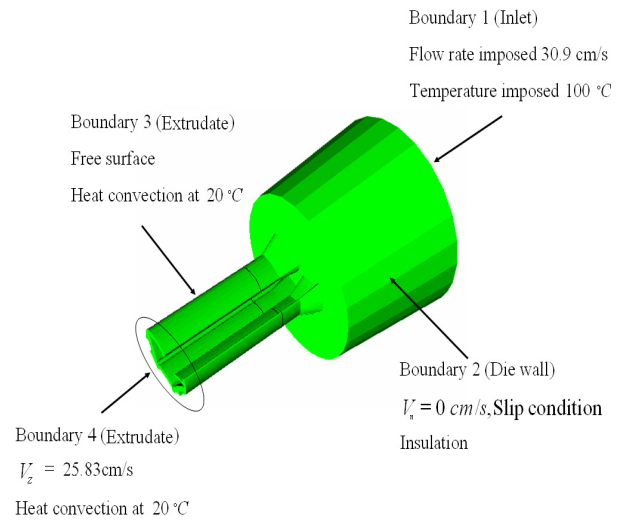


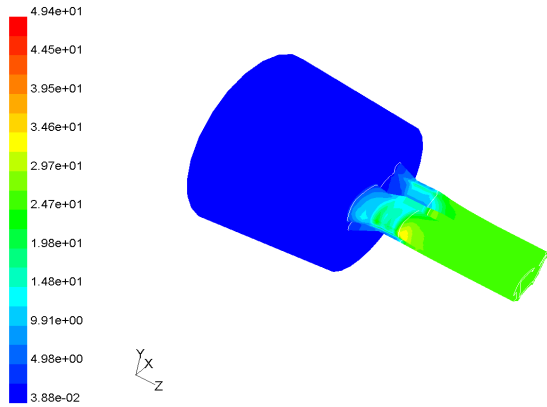
Fig. 4 Boundary conditions

4. 해석 결과

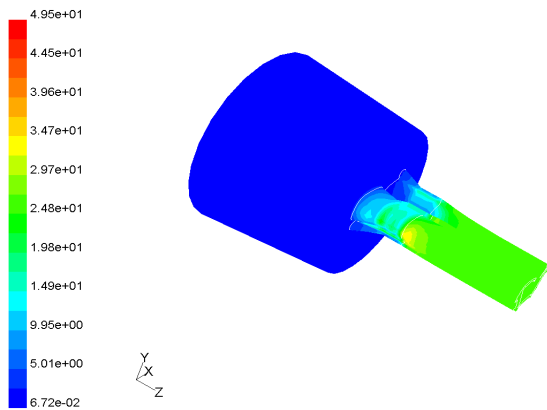
압출성형 공정의 FEM해석은 상용 CFD code인 Polyflow를 이용하여 수행하였다.

Fig. 5는 브레이크 플레이트를 통과한 다이 내부 유동속도에 따른 속도분포를 나타내고 있다. 전체적으로 다이 내부의 유동속도는 매우 낮으나 다이 출구를 지나면서 속도가 증가하였으며 다이출구 끝부분에서 최고속도가 발생한다. 이는 다이 출구의 폭이 다이내부의 폭보다 매우 작기 때문이라고 추측되어 진다. 그리고 다이 내부의 유동 속도가 증가함에 따라 초기 유동의 속도 차이는 크나 다이출구로 갈수록 차이가 감소한다. 이는 원료와 다이내부의 높은 마찰력과 동일한 다이출구 형상 때문이라고 추측되어 진다. 또한 다이출구를 통과한 압출물의 속도는 인취기로 인하여 비슷한 양상을 나타내고 있으나 다이 출구를 통과하면서 속도 분포가 최대의 불균일성을 띄고 있었다. 이는 다이의 폭이 갑자기 좁아지면

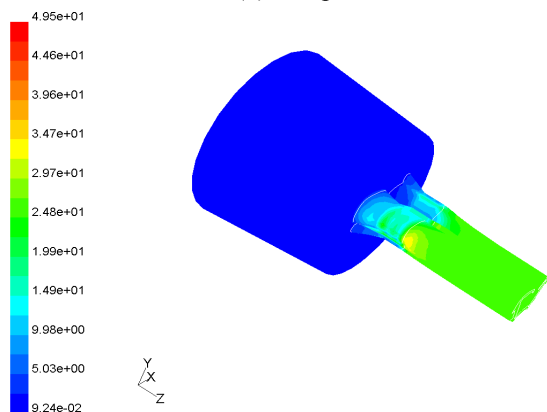
서 유동이 복잡해지고 압출물이 다이출구를 통과하면서 발생하는 팽창으로 인한 마찰력 증가 때문이라고 추측되어 진다.



(a) 0.1rpm



(b) 1.5rpm

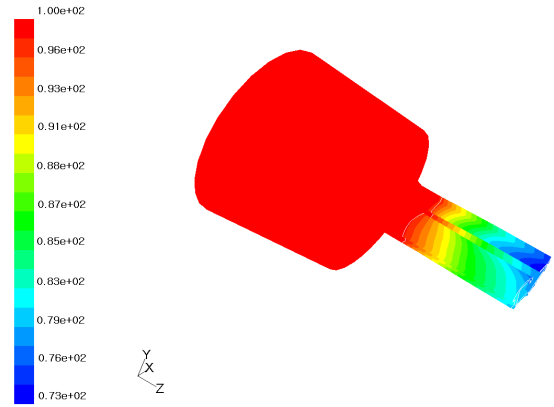


(c) 3.0rpm

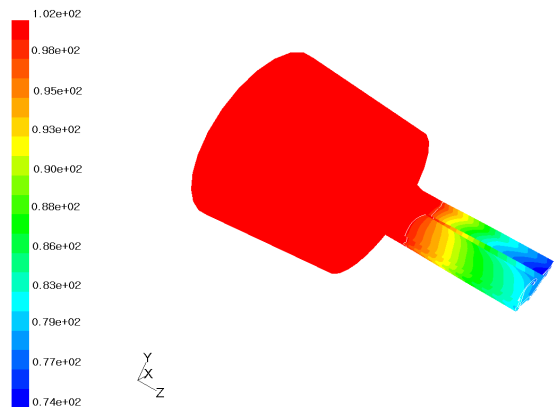
Fig. 5 Velocity distribution (cm/s)

Fig. 6은 브레이커 플레이트를 통과한 다이 내부 유동속도에 따른 속도분포를 나타내고 있다.. 다이 내부의 점성소산에 의해 온도가 증가함을 보여준다. 점성소산에 의한 온도상승은 다이내부

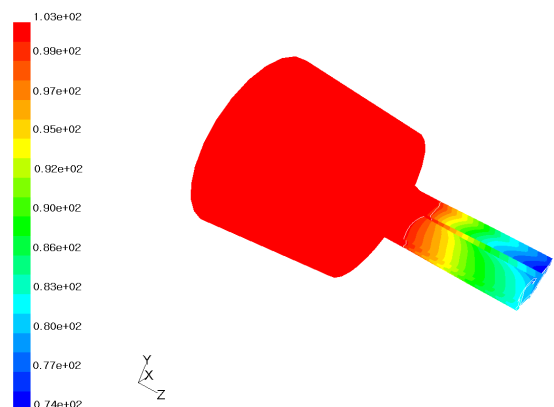
유동 속도가 빠를수록 증가하며 다이 출구에서 최고 온도가 발생하였다. 또한 대기에 노출된 압출물은 온도가 감소하였다. 이는 원료가 다이출구를 빠져나가면서 팽창하면서 다이와 토출되는 압출물의 마찰에 의한 발열 때문인 것으로 추측되어 진다.



(a) 0.1rpm



(b) 1.5rpm



(c) 3.0rpm

Fig. 6 Temperature distribution (°C)

Fig. 7은 실제 압출기에서 압출물이 토출되고 있는 모습을 촬영한 사진이며 Fig. 8은 실제 압출 공정과 가장 유사하다고 추측되는 다이 내부의

유동이 rpm1.5일 때의 압출물의 변화형상을 나타내고 있다. 압출물이 출구를 통과하여 팽창 등에 의하여 변화하였으나 생산하고자 하는 압출물과 유사한 형상을 나타내고 있음을 보여준다.



Fig. 7 Actual Extrusion Forming Process

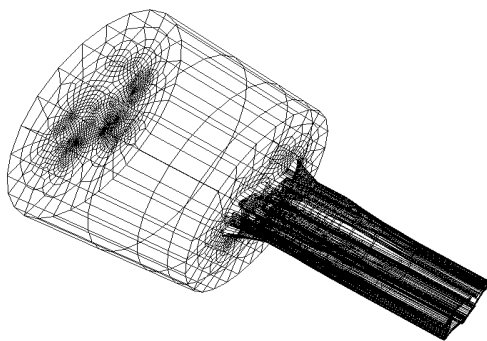


Fig. 8 Simulation for Extrusion Forming Process (1.5rpm)

5. 결 론

본 연구에서는 실험으로 얻어진 점성데이터를 기반으로 Polyflow 내부 점성모델인 Power-law model과 Arrhenious-law model 적용하여 시뮬레이션을 수행하였다. 브레이커 플레이트를 통과한 내부 유동의 속도 변화에 따른 결과를 분석하기 위하여 Parametric 해석을 수행하였으며 실제 고무 압출 공정과 유사한 결과를 도출할 수 있었

다. 본 연구를 바탕으로 압출다이 출구에서의 속도 균일도를 향상시키기 위하여 압출다이 형상 최적설계를 수행할 예정이다.

후 기

본 연구는 미래핵심 기계부품소재 산학공동사업단 기술개발과제(2006.7 ~ 2007.6)의 지원으로 수행되었으며, 이에 관계자 여러분들께 감사드립니다.

참고문헌

- (1) Lee, H.W., Choi, J.H., Cho, J.R., 2005, "Thermal Flow Analysis for Extrusion Forming Process of Weather Strip", KSME spring meeting, p959-964
- (2) NA, S., 1998, "Modeling and Optimum shape Designe of polymer Extrusion die", Ph.d Thesis, KAIST, Korea
- (3) Gerhart, P.M., Gross, R.J. and Hochstein, J.I., 1992, Fundamentals of Fluid Mechanics, Addison-Wesley Publishing Company.
- (4) Incropera, F.P. and DeWitt, D.P., 1996, Fundamentals of Heat and Mass Transfer, John Wiley & Sons, Inc.
- (5) Bathe, K.J., 1996, Finite Element Procedures, Prentice-Hall International, Inc., New Jersey
- (6) Park, W.G., 1998, The Computational Fluid Dynamics Vol.2, Pusan Uni. Pusan
- (7) Fluent, 2003, Polyflow 3.10Manual , Fluent Inc.
- (8) Fluent, 2003, Polymat 3.10Manual , Fluent Inc.
- (9) Fluent, 2003, Gambit Manual , Fluent Inc.