

< 기술논문 >

유한요소법을 이용한 폴리머 압출 공정해석에 관한 연구

예영수^{**} · 김홍범^{***} · 김낙수[†] · 이재욱^{*}
(2004년 8월 12일 접수, 2004년 11월 9일 심사완료)

A Study on Analysis of Polymer Extruder Process Using Finite Element Method

Youngsoo Ye, Hongbum Kim, Naksoo Kim and Jaewook Lee

Key Words : Polymer Extruder Process(폴리머 압출 공정), Navier-Stokes Equation(나비아 스톡스 방정식), 4-Step Fractional Method(4 단계 시간 분할법), Explicit-Implicit FEM(외연-내연적 유한요소법)

Abstract

In this study, a finite element method program code which can be accommodate boundary conditions on the complex surfaces has been developed to simulate polymer extruder processes. The analysis method includes the fractional 4-step method for efficient computation time and compact usage of memory storage to solve the velocities and the pressure values from the Navier-Stokes equation. By using the developed program which was verified with simple Poiseuille flow mixture phenomena in single-and twin-screw extruder are analyzed. It is concluded that the proposed method results Poiseuille Poiseuille d in fair agreement with the exact solution of simple flow and the back flow near the entrance happens in single-screw model. It is identified that the location and values of maximum pressure in the twin screw extruder model. It is expected that the Velocity field found can be used to predict the degree of mixture in the extruder barrel.

1. 서 론

지금까지 폴리머 가공법에 대한 연구는 주로 금형과 스크루에 대한 기하학적인 연구^(1,2)가 이루어졌으며, 수치적 모사는 1 축 스크루⁽³⁻⁵⁾에 한정되어 이루어져 왔다. 그러나 최근 나노(nano) 복합체의 가공법으로 2 축 압출기가 사용되면서, 압출기 내에서의 스크루 형상에 따른 혼련정도 및 압력 등에 관심을 가지며 압출기 설계에 관한 연구가 활발히 이루어지고 있다. H. Potente⁽⁶⁾은 실험을 통하여 압력을 묘사할 수 있는 수학적인 모델을 개발하였고, T. Brouwer⁽⁷⁾는 스크루 종류에

따른 압출기 내의 거동을 시험하였다. 압출기 내의 유동해석을 위한 수치적 모사는 스크루의 복잡한 형상과 움직이는 경계면으로 인하여 매우 복잡하고 난해하다. 이러한 이유로 대부분의 유동해석은 STAR-CD, FLUENT 등과 같은 상용 프로그램이 이용된다. 이들 상용프로그램은 유한체적법을 이용하고 있다. 임의의 형상에 대한 유동해석에는 유한요소법을 이용한 수치해석방법이 유한체적법을 이용한 수치해석 방법보다 용이하다. 왜냐하면 유한체적법을 이용할 경우, 좌표변환에 의한 형상변환법이 적용되며 지배방정식의 경계조건식이 복잡하게 변환되기 때문이다.⁽⁸⁾ 반면, 유한요소법은 국소좌표계를 이용한 좌표변환이 기본 알고리즘이기 때문에 복잡한 형상이나 여러 개의 연결된 영역에 대하여 적용하기가 용이하며 특히, 경계조건을 적용하기 편리하다.⁽⁹⁾ 유한요소법으로는 최근 Bertand⁽¹⁰⁾에 의하여 2 축 압출기에 적합한 매쉬 재구성 방법인 가상영역법(fictitious domain methods)를 사용하여 2 차원 비정상 해석을 수행하였다. 현재 2 축 스크루 압출기

† 책임저자, 회원, 서강대학교 기계공학과
E-mail: nskim@ccs.sogang.ac.kr
TEL : (02)705-8635 FAX : (02)712-0799
* 서강대학교 화공학과
** 현대 파워텍
*** 서강대학교 기계공학과

는 많은 응용분야에서 1 축 스크루 압출기와 대체되고 있다. 특히 나노 신소재 개발 등의 붐에 의하여 압출기의 크기가 더 작아지고, 정밀도를 요구하는 대량 생산 및 경제성을 필요로 하는 기술이 점차 부각되고 있다. 그러나 압출공정의 공정 설계는 복잡한 공정변수로 인하여 경험에 의존하여 설계되어 왔고 중요한 몇 가지 공정변수의 결정은 실험에 의존하고 있는 실정이다. 본 연구에서는 이러한 예측의 어려움이 있는 공정을 시뮬레이션을 통하여 해석하고 일련의 변수들을 제한할 수 있는 기초를 마련하여, 공정설계에 적용할 수 있는 토대를 마련하고자 한다.

국내 설계진들은 아직은 보수적인 관점에서 기존의 1 축 스크루 압출 공정에 의하여 2 축 스크루 압출 시스템을 설계하고 있지만, 선도적인 해외 선진국의 설계진들은 실험과 수치모사를 통하여 기술을 높이고 있다. 본 논문에서는 압출기 시스템의 계량부에 대한 수치시뮬레이션을 통하여 공정상의 문제점을 예측하고, 압출기 시스템 설계의 최적화 데이터를 제시하고자 한다.

2. 이론적 배경

2.1 유한요소 모델링

유한요소법을 이용한 비압축성 Navier-Stokes 방정식의 해를 구하는 방법은 크게 속도-압력 통합법(velocity-pressure integrated method), 벌칙 함수법(penalty method), 속도-압력 분리법(segregated velocity-pressure method)으로 나누어진다. 속도-압력 통합법⁽¹¹⁾은 속도와 압력에 대하여 동시에 해를 구하기 때문에 계산 시간과 컴퓨터 저장공간을 많이 필요로 한다. 이러한 단점을 보완한 벌칙함수법⁽¹²⁾은 속도에 대하여 해를 구한 후 압력에 대해서 연속방정식을 이용한 벌칙함수 공식을 적용한다. 계산시간과 컴퓨터 저장공간은 속도-압력 통합법 보다는 적게 소요되지만 연속방정식을 대략적으로 만족하는 단점을 가지고 있다. 이에 대해 속도-압력 분리법⁽¹³⁾은 속도와 압력에 대하여 순차적으로 해를 구하기 때문에 계산시간과 컴퓨터 저장공간이 앞에서 기술한 2 가지 방법에 비하여 적게 소요되는 장점을 가지고 있다. 한편, 이 방법은 단순(simple) 알고리즘에 의한 방법과 비정상(unsteady) 알고리즘에 의한 방법으로 나누어지는데, 비정상 알고리즘에 의한 4 단계 시간분할법은 연속방정식을 정확히 만족하는 장점을 가지고 있다.⁽¹⁴⁾ 본 연구에서는 4 단계 시간분할법을 이용하고 각 단계에서 외연적 혹은 내연적 유한요소법을 적용하였다.

2.2 지배방정식

3 차원 점성, 비압축성, 비정상 유동에 대한 지배 방정식은 연속방정식과 운동량 방정식으로부터 식 (1)과 식 (2)와 같이 정의된다.

$$\frac{\partial u_j}{\partial x_j} = 0 \tag{1}$$

$$\frac{\partial u_i}{\partial t} + u_j \frac{\partial u_i}{\partial x_j} = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial x_i} + \frac{1}{\text{Re}} \frac{\partial^2 u_i}{\partial x_k^2} \tag{2}$$

여기서 ρ 는 밀도, p 는 압력, Re 는 레이놀즈 수이며 u_i 는 유체의 속도를 나타낸다. 각 단계별로 유한요소법을 적용할 때는 각 전단계의 속도값을 이용하여 대류항에서의 속도를 구하고(1 단계), 이 속도를 이용하여 확산항에서의 속도를 구한다(2 단계). 그리고, 확산항에서 구한 속도를 이용하여 연속방정식을 만족하는 압력을 구하고(3 단계), 이 압력을 이용하여 연속방정식을 만족하는 보정된 속도값을 구한다(4 단계). 이때 대류항과 확산항에 대해서는 대각화 질량 행렬을(diagonalized mass matrix) 이용하여 외연적 방법에 의해 해를 구하며, 압력항에 대해서는 내연적 방법에 의해 해를 구한다.

2.2.1 대류항

운동량 방정식인 식 (2)에서 대류항만 고려하면 식 (3)과 같다.

$$\frac{\partial u_i}{\partial t} = -u_j \frac{\partial u_i}{\partial x_j} \tag{3}$$

여기서, 비선형 대류항에 외연적 Lax-Wendroff scheme을 적용하기 위해 2 차 미분항까지 고려한 시간증분에서 Taylor 전개를 적용한다. 여기서 대류항식에 Galerkin 방법을 적용하기 위하여 시험함수를 곱하여 정리하고 적분하면 식 (4)로 표현된 최종약형은 직접적으로 대류항의 근사값을 구할 수 있다

$$\begin{aligned} \int_{\Omega} w_i u_i^0 d\Omega &= \int_{\Omega} w_i u_i^0 d\Omega - \Delta t \int_{\Omega} w_i u_j^0 \frac{\partial u_i^0}{\partial x_j} d\Omega \\ &- \frac{\Delta t^2}{2} \left[\int_{\Omega} w_i u_j^0 \frac{\partial u_k^0}{\partial x_k} \frac{\partial u_i^0}{\partial x_j} d\Omega + \int_{\Omega} \frac{\partial w_i}{\partial x_k} u_j^0 u_k^0 \frac{\partial u_i^0}{\partial x_j} d\Omega \right] \\ &+ \frac{\Delta t^2}{2} \int_{\Gamma} w_i u_j^0 u_i^0 \frac{\partial u_i^0}{\partial x_j} n_k d\Gamma \end{aligned} \tag{4}$$

여기서 Ω 는 지배방정식이 적용되는 영역을 나타내고, Γ 는 그 경계면을 나타낸다.

2.2.2 확산항

$\nu = 1/Re$ 이라 하고 운동량 방정식에서 확산항만 고려하면 식 (5)와 같다.

$$\frac{\partial u_i}{\partial t} = \nu \frac{\partial^2 u_i}{\partial x_k^2} \tag{5}$$

식 (5)에 1 차 외연적 Euler 시간적분기법을 사용하면, 시간증분 Δt 후 새로운 속도장이 시간증분의 이전 값인 u^0 로부터 구해진다. 이에 대한 수식은 식 (6)과 같다.

$$u_i = u_i^0 + \Delta t \nu \frac{\partial^2 u_i}{\partial x_k^2} \tag{6}$$

식 (6)에 Galerkin 방법을 적용하기 위해 시험함수를 곱하여 정리하면 식 (7)과 같다.

$$\int_{\Omega} w_i u_i^v d\Omega = \int_{\Omega} w_i u_i^c d\Omega - \Delta t \nu \int_{\Omega} \frac{\partial w_i}{\partial x_k} \frac{\partial u_i^c}{\partial x_k} d\Omega + \Delta t \nu \int_{\Gamma} w_i \frac{\partial u_i^c}{\partial x_k} n_k d\Gamma \tag{7}$$

식 (7)로 표현된 확산항의 최종 약형에서 u^c 는 대류항에서 구한 속도장이며, u^v 는 확산항의 속도장이다.

2.2.3 압력항

운동량방정식에서 압력항만 고려하면 식 (8)과 같다.

$$\frac{\partial u_i}{\partial t} = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial x_i} \tag{8}$$

식 (8)의 양변에 gradient 를 취한 후 식 (1)의 연속방정식을 적용하면 식 (9)와 같다.

$$\frac{\partial^2 p^n}{\partial x_i^2} = \frac{\rho}{\Delta t} \frac{\partial u_i^v}{\partial x_i} \tag{9}$$

여기서 n 은 시간단계(time step)를 나타낸다. 식 (9)에 Galerkin 방법을 적용하여 부분적분 및 발산정리(divergence theorem)를 사용하면 식 (10)과 같이 표현된다.

$$\int_{\Gamma} w_i \frac{\partial p^n}{\partial x_i} n_i d\Gamma - \int_{\Omega} \frac{\partial w_i}{\partial x_i} \frac{\partial p^n}{\partial x_i} d\Omega = \frac{\rho}{\Delta t} \int_{\Omega} w_i \frac{\partial u_i^v}{\partial x_i} d\Omega \tag{10}$$

2.2.4 속도보정

식 (10)에서 구한 압력값은 연속방정식을 만족하

지만, 확산항에서 구한 u^v 값은 연속방정식을 만족하지 않으므로 이에 대한 속도 보정이 필요하다. 식 (8)을 속도 u^n 에 관하여 나타내면 식 (11)과 같다.

$$u_i^n = u_i^v - \frac{\Delta t}{\rho} \frac{\partial p^n}{\partial x_i} \tag{11}$$

여기서 최종 속도 u^n 는 확산항에서 구해진 u^v 값과 압력항에서 구해진 p^n 값을 이용하여 구한다. 앞에서 이용한 방법과 같이 Galerkin 방법을 적용하여 정리하면 식 (12)와 같이 표현된다.

$$\int_{\Omega} w_i u_i^n d\Omega = \int_{\Omega} w_i u_i^v d\Omega - \frac{\Delta t}{\rho} \int_{\Omega} w_i \frac{\partial p^n}{\partial x_i} d\Omega \tag{12}$$

2.3 유한요소법을 이용한 수치해석

앞 절에서 소개한 적분방정식은 행렬-벡터의 형태로 이산화되어 계산되며, Navier-Stokes 식의 문제에서 구하려고 하는 변수는 속도와 압력이다. 앞 절에서 유도된 각 항의 약형들에서의 시험함수는 보간함수이며, 또한 각 항의 속도 및 압력은 형상함수를 사용하여 다음과 같이 이산화시킬 수 있다.

$$u_i = \sum_{m=1}^M H_m(x) u_i^m(t) = \mathbf{H} \hat{\mathbf{u}} \tag{13}$$

$$p = \sum_{m=1}^M Q_m(x) p^m(t) = \mathbf{Q} \hat{\mathbf{p}} \tag{14}$$

여기서 \mathbf{H} 는 속도에 관한 형상함수 행렬이며, $\hat{\mathbf{u}}$ 는 절점에서의 속도를 모두 포함하는 벡터를 나타낸다. 또한, \mathbf{Q} 는 압력에 관한 형상함수 행렬이며, $\hat{\mathbf{p}}$ 는 각 절점에서의 압력을 나타낸다. 형상함수 \mathbf{H} 와 \mathbf{Q} 는 모두 1 차 선형함수를 사용하고, 삼차원 4 절점 요소에서는 이들을 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$\mathbf{H} = \begin{bmatrix} h_1 & 0 & 0 & h_2 & 0 & 0 & h_3 & 0 & 0 & h_4 & 0 & 0 \\ 0 & h_1 & 0 & 0 & h_2 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & h_4 & 0 \\ 0 & 0 & h_1 & 0 & 0 & h_2 & 0 & h_3 & h_3 & 0 & 0 & h_4 \end{bmatrix} \tag{15}$$

$$\mathbf{Q} = [h_1 \ h_2 \ h_3 \ h_4] \tag{16}$$

위의 형상함수를 이용하여 2.2 절의 각 항들의 약형을 이산화 하였다. 서두에서 언급했듯이 대류항, 압력항 및 속도보정 단계에서는 외연적 방

법으로 해를 구하기 위하여 질량행렬에 대하여 역행렬을 구해야 하는 어려운 점이 있다. 일반적으로 대각선화된 질량행렬을 사용하여 얻은 해는 집중질량행렬을 이용하여 얻은 해보다 정확도가 높은 것으로 알려져 있다.⁽¹⁵⁾ 본 연구에서는 식 (17)을 이용하여 질량행렬을 대각화된 질량행렬로 변환한 후 해를 구한다.

$$M_{D_{ij}}^e = 0 \quad \text{if } i \neq j \quad (17)$$

$$M_{D_{ii}}^e = M_{ii}^e T / d \quad \text{if } i = j$$

여기에서 $T \equiv \sum_i \sum_j M_{ij}^e$, $d \equiv \sum_i M_{ii}^e$ 이다.

3. 스크루 압출 공정의 수치적 모델링

3.1 해석의 가정

스크루 압출기의 공정 해석에서는 스크루가 회전하므로 시간의 변화에 따라 계산영역이 Fig. 1 과 같이 변한다. 해석 수행 시 Fig. 2 와 같이 회전하는 스크루를 제외한 배럴과 스크루 사이유체에 대해서 계산하는데, 시간에 따라 계산영역이 변하기 때문에 유한요소망 즉, 메쉬(mesh) 또한 변한다. 이 경우 각 회전각도를 기준으로 준정적(quasi-steady state)상태로 해석하였다. 예를 들어 2 축 스크루의 경우 180° 회전마다 형상이 같으므로, 스크루의 한바퀴 회전을 10° 마다 준정적 상태로 해석하려면 18 개의 메쉬영역이 필요하다. 최종적으로 각 준정적 상태로 해석된 속도장을 수합하여 연속된 스크루의 움직임을 얻을 수 있다.

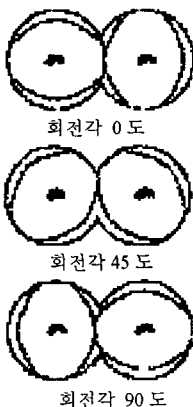


Fig. 1 Cross-section of a co-rotating twin-screw extruder at three different times

3.2 프로그램 구성

본 연구에 의하여 개발된 프로그램은 크게 세 부분으로 구분된다. 즉 입력부분, FEM 해석부분 (solver part), 출력부분이다. 입력부분에서는 사용자의 판단에 의하여 step 수가 정해지고, 여기에 따른 계산영역의 메쉬를 생성하여 경계조건 등이 포함된 각각의 입력과일을 생성한다. FEM 해석 부분에서는 2.2 절에서 설명한 4 단계의 순서에 의하여 각 스텝에 관한 압력 및 최종 속도가 계산되고, 한 스텝내의 일정한 시간증분의 해석을 수행한 후 각 스텝별로 출력부분에서 데이터를 저장하게 된다. 이전 스텝에서 다음 스텝으로 계산할 때는 이전의 속도장 데이터로부터 다음 스텝에 사용될 속도를 보간하여 초기 속도로 지정한다. 자세한 알고리즘을 Fig. 3 에 제시하였다.



Fig. 2 Finite element mesh of computational domain for twin-screw extruder

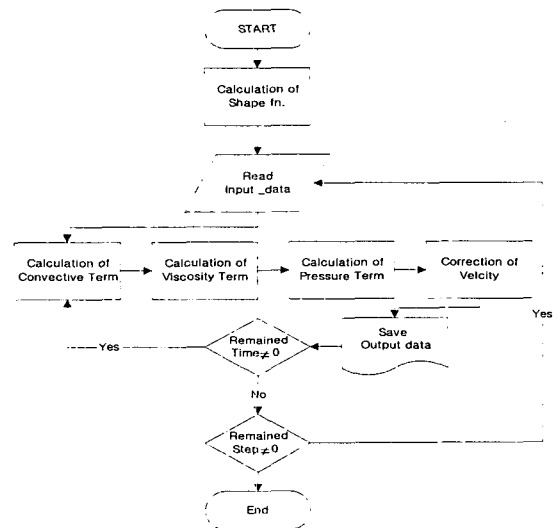


Fig. 3 Flow chart for Extrusion analysis program

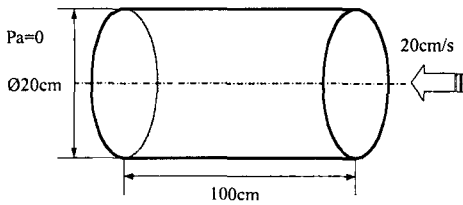


Fig. 4 Dimension and initial value for parallel pipe analysis

Table 1 Element number and analysis time

	Number		Analysis time
	Node	Element	
Case 1	3811	16445	8 min.
Case 2	7640	34516	24 min.
Case 3	20611	98403	140 min.

4. 해석 및 고찰

4.1 수평관 유동 해석

본 연구에서 개발된 3 차원, 비정상상태, 비압축성 유동해석 방법의 검증을 위하여 수평관의 유동현상 해석을 수행하였다. 초기 해석 조건 및 치수를 Fig. 4 에 제시하였듯이, 입구에서의 속도와 출구에서의 압력만을 경계조건으로 지정하였다. 수평관 내를 흐르는 유체는 글리세린(Glycerin)을 사용하였다. 유체의 밀도는 1.28g/cm³이고 동점성 계수는 6.982 cm²/s 이며, 해석 조건으로 Δt 는 0.002 로 주었고 전체시간 t를 0.04 로 해석 하였다. 해석을 위한 입력 자료의 생성은 상용 패키지인 IDEAS 를 사용하여 메쉬를 생성하였으며, 후처리 기 또한 IDEAS 를 사용하였다.

Table 1 에 제시한 것처럼, 요소수에 따라 3 가지의 경우에 관하여 해석하고, 해석시간을 비교하였다. 요소수의 증가에 따라 해석시간 또한 증가하는 것을 알 수 있다. 개발된 프로그램에서는 sparse matrix 기법을 사용하여 일반적으로 사용하는 skyline storage 방법이 적용된 가우스 제거법보다 계산속도를 향상시켰다. 예를 들어, Case 3 의 경우 10 배의 속도향상을 보였으며, 요소수가 많을수록 계산의 효율이 높았다.

각 Case 의 해석 결과를 Fig. 5 ~ Fig. 11 에 제시

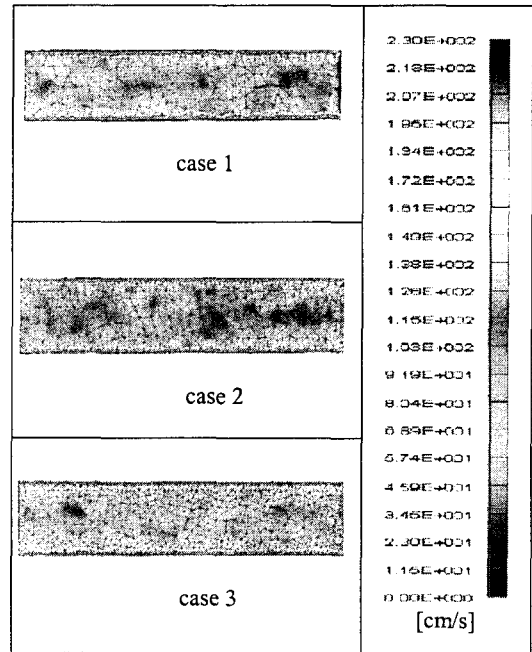


Fig. 5 Velocity distribution of Z-direction section

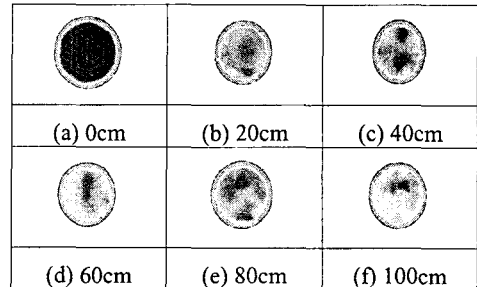


Fig. 6 Velocity distribution of section from inlet in case 1

했다. Fig. 5 는 Z 방향으로의 단면 속도분포를 나타내고 있다. 입구에서 출구까지의 속도가 하겐-포아세이유 방정식(Hagen-Poiseuille equation)의 해와 정확히 같은 분포는 나타내지 않고 있지만, 국부적인 최고의 속도 값은 case 1 의 경우 25.2cm/s, case 2 의 경우 25.8cm/s, 그리고 case 3 의 경우 25.3cm/s 로 엄밀해인 25.9cm/s 와 거의 일치하는 것을 볼 수 있었다. Fig. 6 ~ Fig. 8 에는 입구로부터의 거리에 따른 단면의 속도 분포가 제시되어있다. 요소수를 가장 많이 사용한 Fig. 8 에서 분포가 가장 고르게 나왔으며, 공통적으로 출구부분(100cm)인 압력이 0 이 되는 단면에서의 속도분포는 이전거리의 속도 값 및 분포에 비하여 작은 값을 가지며 좋지 않은 결과를 보았다.

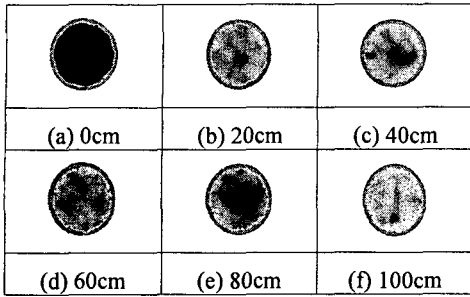


Fig. 7 Velocity distribution of section from inlet in case 2

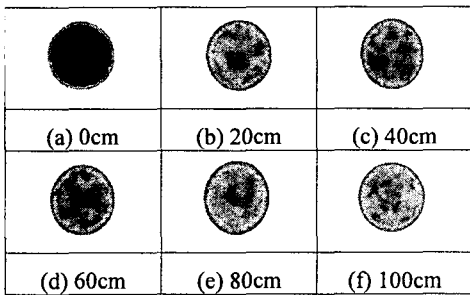


Fig. 8 Velocity distribution of section from inlet in case 3

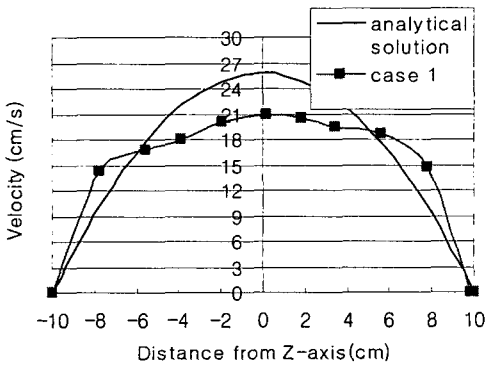


Fig. 9 Comparison of velocity distribution for parallel pipe

Fig. 9 에 보인 그래프는 출구로부터 10cm 부근에서의 Z-축으로부터 벽면까지의 거리에 따른 속도분포를 하겐-포아세이유 방정식의 해와 비교한 것이다. 해석결과, 벽면에 가까울수록 해석적인 방법보다 속도 분포가 크게 나왔으며 수평관의 Z-축 부근에서의 속도분포에 대한 결과도 다소의 수치적 오차를 보이고 있다.

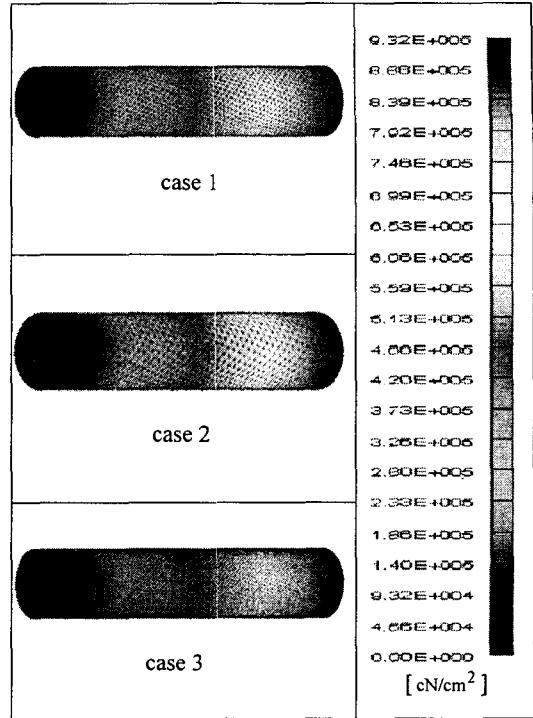


Fig. 10 Pressure distribution

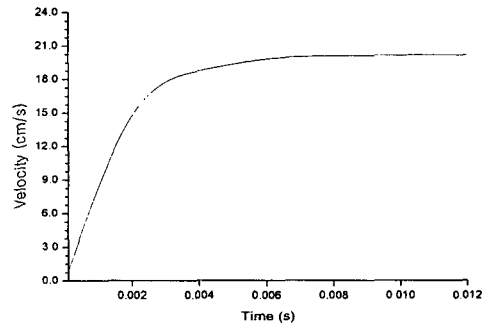


Fig. 11 Velocity response of system considered in case 2

그러나 압력분포 결과인 Fig. 10 은 선형적인 변화를 가져왔으며, 좋은 결과를 보여주고 있다. 또한 시간증분에 따른 속도의 수렴정도를 Fig. 11 에 보였다. 그래프와 같이 0.002 의 시간증분으로 0.006 초 후 비교적 빠른 시간 내에 정상상태로 완전히 수렴한 것을 알 수 있었다.

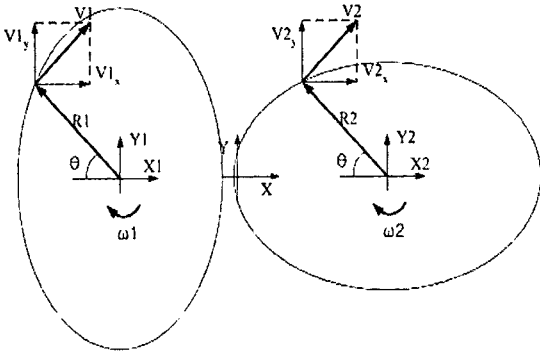


Fig. 12 Kinematical schematic diagram of twin screw

4.2 1축 및 2축 스크루 압출공정 해석
 일반적인 3 차원 유한요소 해석 프로그램에 스크루 압출 공정해석을 적용하기 위하여는 다음과 같은 점이 고려되어야 한다. 우선, 2축 스크루의 경우 Fig. 12 처럼 각 스크루의 회전 중심축이 따로 존재하고, 압출 공정에 따라서 스크루의 각속도 ω_1 , ω_2 의 회전 방향이 결정될 것이다. 따라서 공정 조건에 따른 스크루 위의 질점에 대한 정확한 선속도의 부여가 해석에서 중요한 요인으로 작용할 것이다. 본 연구에서는 개발된 solver 외에 입력과일 생성 프로그램을 개발하여 사용하였다.

두 번째로, 두 스크루 사이의 최소간격에 따른 요소 생성의 문제이다. 실제 공정에서는 Fig. 1에 제시된 것과 같이 두 스크루 사이의 간극과 스크루와 배럴사이의 간극은 아주 작다. 이런 미소 간극에서의 유동을 해석하기 위하여 요소의 크기가 아주 작아야 되는데, 이는 전체 요소의 수가 늘어나게 되어 해석 시간을 늘리게 되는 결과를 가져오게 된다. 복잡한 형상에 적합한 요소 생성 프로그램을 사용하거나, 실제 공정과의 오차를 감안하여 간극을 크게 하여 해석을 수행하여야 할 것이다. 본 연구에서는 오차를 감안하여 후자를 선택하였다.

세 번째로, 스크루의 형상 결정시 스크루 나선(flight)의 각도이다. 이축 스크루의 경우 앞에서 언급했듯이, 두 스크루의 간극이 아주 미소하므로 나선의 각도에 따라서 스크루의 나선이 겹쳐지는 부분이 발생할 수 있다. 이 경우 첫 번째에 언급한 스크루의 속도 경계조건에 문제가 될 수 있다. 마지막으로, 경계조건 문제이다. 서론에서 언급했듯이 압출기내의 스크루의 구조는 세 영역으로 구분된다. 첫 번째 영역인 공급부(feed section)에서는 거의 고체상태의 재료가 호퍼로부터 공급되어 압축부(transition section)로 이송되고, 압축부에서는

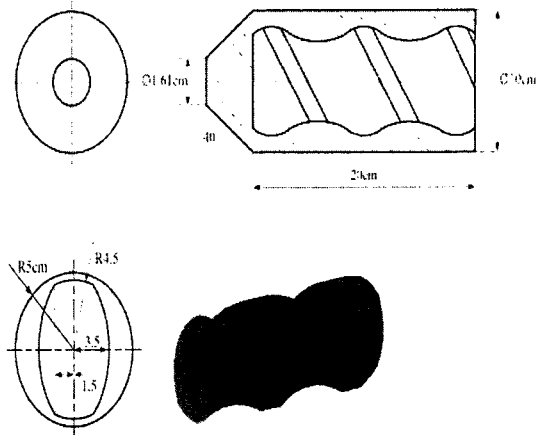


Fig. 13 Dimension of modeling for single screw

고상과 액상이 동시에 존재한다. 이 영역에서는 재료의 상태와 압축부의 위치에 따라 물성치 또한 많은 차이를 보이기 때문에 현실적으로 해석하기 어렵다. 마지막으로, 계량부(metering section)로 이송된 재료는 모두 액상으로 존재하며 가장 끝부분에서 압력이 높게 작용한다. 본 연구에서는 계량부의 일부분만을 해석하였으며, 계량부 시작 지점의 압력을 0으로 설정했다. 실제 공정에서 계량부로 이송된 재료는 어느 정도 압력 상태 하에 있으나, 본 연구에서는 계량부의 끝 지점과의 압력구배를 알아보기 위하여 0로 가정하였다.

4.2.1 1축 스크루 압출공정 해석

일축 압출공정 해석을 위한 모델 및 치수를 Fig. 13에 제시하였다. 압출기 내의 유체는 4.1절에 수평관 해석에 사용되었던 글리세린을 사용하였다. 일축 스크루 압출공정은 비교적 간단한 모델이므로 노즐을 추가해 해석했다. 각 스텝을 매 10° 씩으로하여 총 36 스텝이 수행되었고, 매 스텝은 0.002의 시간증분으로 총 10번 반복되었다. 경계조건으로는 계량부의 입구와 노즐의 출구부분에서 압력을 0으로 주었고, 스크루는 30rpm으로 회전시켰고, 스크루 피치간의 거리는 10cm이다.

스크루의 회전속도에 의한 압출기 내의 속도와 압력변화를 알아보기 위하여 30rpm, 100rpm, 300rpm의 경우를 해석하여 출구속도와 압력을 비교하였다. Fig. 16은 스크루의 회전속도를 달리했을 경우 출구에서의 속도 차이를 나타낸다. 이를 통하여 스크루 회전속도의 증가와 비례하여 출구속도 또한 증가하는 것을 알 수 있다. 압력 또한 속도와 유사하게 Fig. 17에 제시한 것처럼 거의 비례하여 증가하였다.

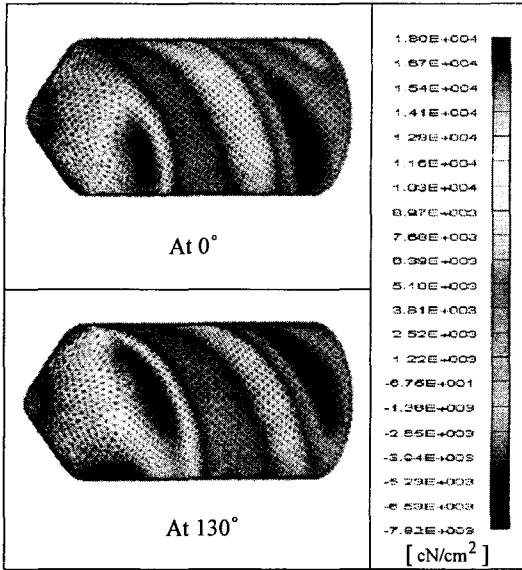


Fig. 14 Pressure distribution

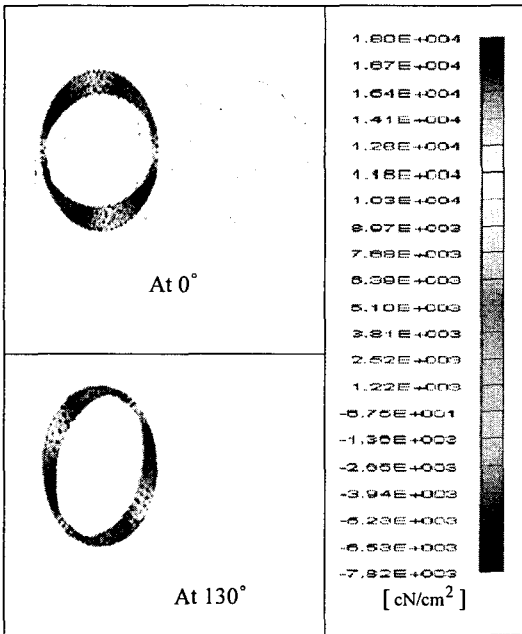


Fig. 15 Pressure section distribution

또한, 스크루의 피치의 길이(나선 각도)의 영향을 살펴보기 위하여 피치의 길이가 8cm, 6.6cm 인 경우를 추가로 해석하였다. Fig. 18은 나선의 길이가 다른 경우 출구에서의 속도 변화를 보여주었다. 피치 길이가 작아질수록 출구에서의 속도 또한 작아지는 것으로 나타났으며, Fig. 19에서 보인 것과 같이 피치의 길이에 따라 압력이 영향을 받는 것을 알 수 있다. 피치의 길이가 가장 짧은 6.6cm

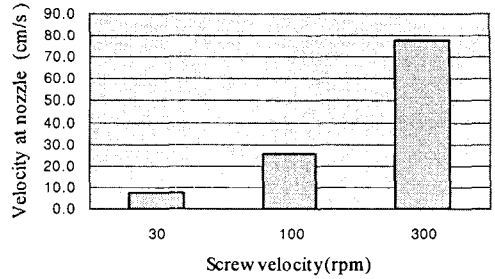


Fig. 16 Comparison of velocity with screw angular velocity at 0°

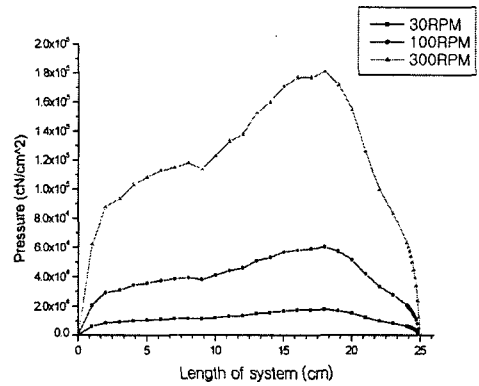


Fig. 17 Comparison of pressure with screw angular velocity at 0°

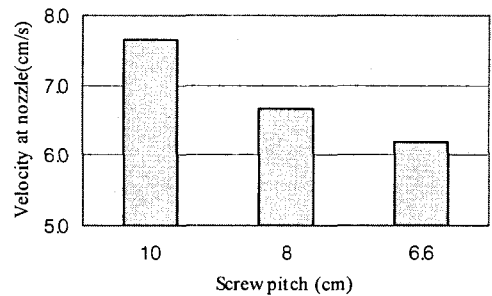


Fig. 18 Comparison of velocity with screw angular velocity at 0°

의 경우 다른 경우에 비하여 스크루 길이에 따른 압력의 변화가 큰 것을 보이고 있다. 이는 압출 또는 사출시 일정한 속도로 금형에 용융 폴리머의 안정된 공급이 중요한데, 압력의 불안정성으로 인하여 출구 속도 또한 불안정성으로 이어져, 최종적으로 제품에 품질에 영향을 줄 것으로 판단된다.

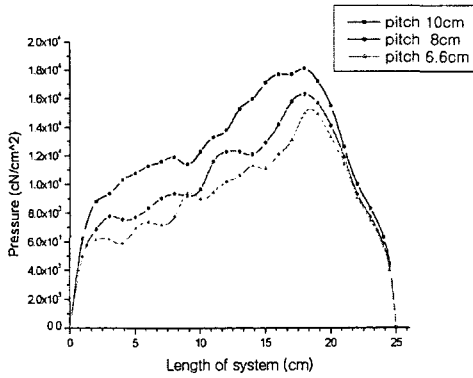
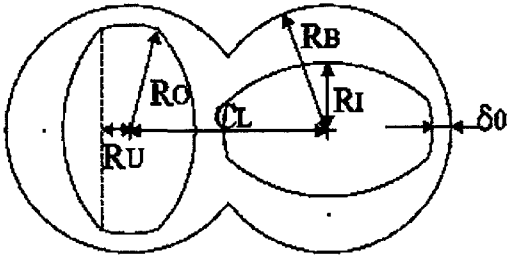


Fig. 19 Comparison of pressure with screw angular velocity at 130 °



Variables	C_L	R_B	R_O	R_I	R_U	δ_0	L
Size (cm)	21	13	11	7	3	2	30

Fig. 20 Dimension of modeling for twin screw

4.2.2 2 축 스크루 압출공정 해석

이축 압출 공정해석을 위한 모델 및 치수가 Fig. 20 에 제시되었고 L 은 해석 모델링의 길이를 말한다. 유체 및 경계조건은 앞 절의 1 축 스크루 압출공정과 유사하며, 단지 출구부분에서 노즐은 제외시켰으며, 스크루 마지막 부분에서 속도를 0 으로 경계 조건을 부여하였다. 해석 결과를 Fig. 21~ Fig. 23 에 제시하였다. 이축 스크루 압출공정의 압력분포는 일축 스크루 압출공정과 유사하게 스크루 끝단부분에서 최고치를 보였으며 입구부분에서는 역압력 구배를 보였다. 스크루의 회전에 따른 배열에 작용하는 압력을 살펴보기 위하여 Fig. 22 와 같이 스크루의 위치에 따른 배열 윗부분에 작용하는 압력값을 비교하였다. 스크루가 50 도 근처를 회전하였을 때 가장 작은

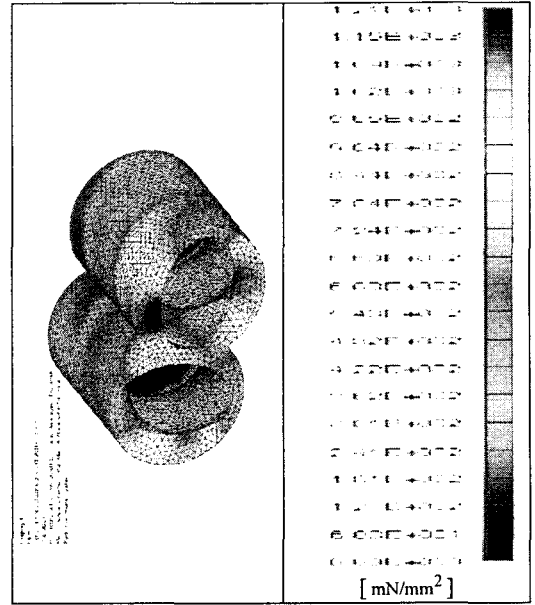


Fig. 21 Pressure distribution of twin screw extruder process at 0 °

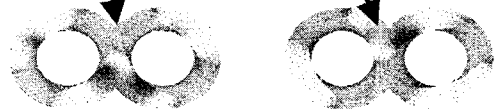
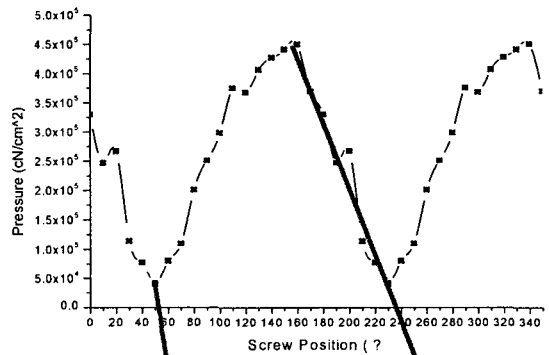


Fig. 22 Pressure variation w.r.t. the screws position

압력을 보였으며 160 도 근처의 위치에서는 가장 높은 값을 보이는 것을 알 수 있었다. Fig. 23 은 각각 입구로부터 9cm 와 27cm 에서 속도벡터를 나타낸다. 입구로부터 27cm 지점에서의 유동이 더 활발한 것을 알 수 있는데, 이는 압력이 높을수록 혼련성이 더 좋음을 제시하고 있다.

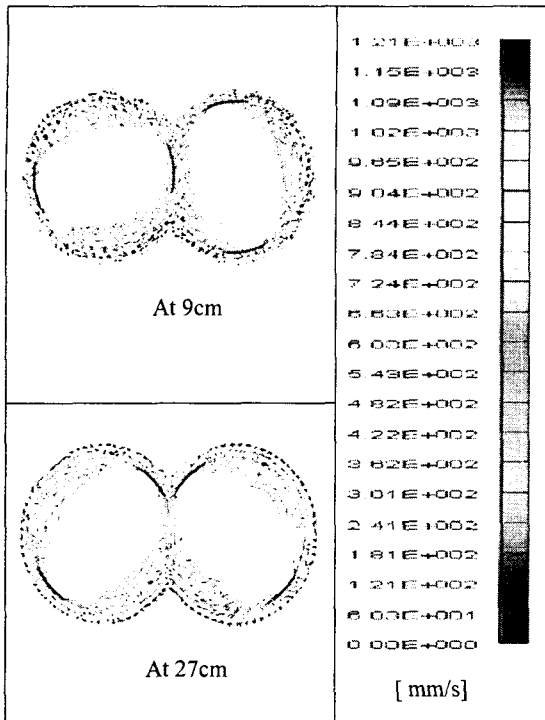


Fig. 23 Velocity vector at 9 cm and 27 cm from inlet

5. 결론

본 연구에서는 유한요소법을 적용하여 2 축 스크루 압출 공정해석이 가능한 프로그램을 개발하였다. 그리고 이를 사용하여 1 축 및 2 축 스크루의 압출 공정을 해석하였다. 이를 통하여 얻은 결론은 다음과 같다.

(1) 4 단계 시간 분할법을 적용하여 복잡한 형상 및 경계조건을 쉽게 적용할 수 있는 유한요소 해석 프로그램을 개발하였다. 검증을 위하여 수평관 유동을 해석하여 엄밀해와 비교한 결과, 약간의 오차는 있었지만 관내의 최고 속도 및 압력 분포 등에서 좋은 결과를 보였다.

(2) 1 축 스크루 압출기의 계량부에 대한 해석을 수행하였다. 비교 대상의 수치는 없었지만 압력분포의 결과가 일반적으로 알려진 것과 같이 스크루의 출구 끝 부분에서 최고치를 보였으며 입구부에서는 역류현상이 일어남을 확인하였다. 또한, 계량부의 속도장의 값을 알 수 있으므로 나노 단위의 입자 크기를 가지는 폴리머 스크루 압출 시스템 설계시 재료의 분산성 측정이 가능하고, 스크루 배럴 내에서 재료에 걸리는 압력이 및 비 등은 Non-Newton fluid 유동 예측을 위

한 전 단계 데이터를 제시할 수 있다.

(3) 스크루 압출기에서의 중요한 공정변수인 스크루의 형상 및 회전 속도에 따른 해석을 수행하였다. 스크루의 회전속도가 빠를수록 압출속도 또한 빨라지지만 이에 비례하여 압출기내의 압력 또한 비례하여 증가하는 것을 보였다. 이는 스크루 및 배럴의 파단 및 형상변화의 가능성을 예측할 수 있다. 또한 스크루의 피치에 따른 압출기내의 속도장 및 압력장의 변화를 알 수 있었고 이를 사용하여 스크루의 최적 형상을 설계하는 기초 자료로 사용할 수 있다.

(4) 2 축 스크루 압출공정의 해석을 수행한 결과, 2 축 스크루의 회전에 따른 최고압력값 및 위치를 알 수 있었고, 압출기내의 속도장에 의하여 스크루의 형상에 따른 폴리머의 혼합정도를 파악할 수 있었다. 이를 통하여, 최근 활발히 연구되는 나노 복합체의 제조 방법 등에 적용하여 결합 없는 제품 생산을 위한 최적 시스템 설계의 기초 자료를 제시할 것이다.

후 기

본 연구는 학술진흥재단의 중점연구소 과제 (과제번호:KRF-2002-005-D00010)의 일환으로 수행되었으며 이에 관계자 여러분들께 감사드립니다.

참고문헌

- (1) Choi, B. H. and Choi, S. H., 2001, "Characteristics Design on Shape of the Extruder Screw," *KSMTE, Fall Annual Meeting*, pp. 292~297.
- (2) Choi, B. H. and Choi, S. H., Chi, C. K., 2002, "Tool Shape Design for the Screw Flinht Cutting in Twin Screw Extruder," *KSPE, Spring Annual Meeting*, pp. 824~828.
- (3) Suh, Y. K., Kim, Y. K. and Moon, J. C., 1997, "A Numerical Study on a Chaotic in a Model for a single Screw Extruder," *Transe. of KSME(B)*, Vol. 21, No. 12, pp. 1615~1623.
- (4) Cho, S. H. and Kim, C. K., 2001, "Optimum Design of the Screw Extruder using thermo-mechanical Analysis," *KSMTE, Spring Annual Meeting*, pp. 28~33.
- (5) Cho, S. H. and Kim, C. K., 2002, "Numerical Study on the Behavior Characteristics of a Screw in Injection Molding Machine," *KSMET*, Vol. 11, No. 5, pp. 30~37.
- (6) Potente, H., Kretschmer, K., Hormann, J., Senge, M., Mours, M., Scheel, G. and Winkelmann, Th. 2001, "Process Behavior of special Mixing Elements in Twin-screw Extruders," *Int. Polymer Processing XVI*, Vol.4, pp. 341~350.
- (7) Brouwer, T., Todd, D.B. and Janssen, L.P.B.M., 2002, "Flow Characteristic of Screws and Special Mixing Enhanceres in a Co-rotating Twin Screw

- Extruder," *Int. Polymer Processing* X VII, Vol.1, pp. 26~32.
- (8) Moon, H. Y., 1994, "A Study on the Computational Analysis of Conduction Heat Transfer in a Three-dimensional Arbitrary Domain by a Geometric Transformation Method," Chonnam Natl. Univ. doctoral dissertation
- (9) Huebner, H.K., Thomson, E.A. and Byrom, T.G., 1995, "The Finite Element Method for Engineers," *Third Edition, John Wiley & Sons, Inc.*
- (10) Bertrand, F., Thibault, F., Delamare, L. and Tanguy, P.A. 2002, "Adaptive finite element simulations of fluid flow in twin-screw extruders," *Computers & Chemical Eng.*, Vol. 27, pp. 491~500.
- (11) Schneider, G. E., "Finite Element Solution Procedures for Solving the Incompressible, Navier- stokes Equations using Equal Order Variable Interpolation," *Numerical heat Transfer*, Vol. 1, pp. 433~451.
- (12) Hughes, T. J. R., 1988, "Finite Element Analysis of Incompressible Viscous Flows by the Penalty Function Formulation," *J. Comput. Phys.*, Vol. 30, No. 1, pp. 1~60.
- (13) Ramaswamy, B., 1988, "Finite Element Solution for Advection and Natural Convection Flow," *Comput. Fluids*, Vol. 16, pp. 349~388.
- (14) Choi, J. W. and Park, C. K. 1999, "Numerical Analysis for Piston-Driven Intake Flows Using the Finite Element Method," *KSCFE*, Vol. 4, No. 2, pp. 39~46.
- (15) Akin, J. E. 1994, "Finite Elements for Analysis and Design," *Academic Press Limited*.