

# 단축 스크류 압출기 내의 비뉴턴유체에 대한 3차원 열 및 유동해석

곽동성\* · 김우승\*\* · 류민영\*\*\*

## Three-Dimensional Heat and Fluid Flow Simulations for Non-Newtonian Fluid in a Single Screw Extruder

Dong-Seong Kwag, Woo-Seung Kim and Min-Young Lyu

**Key Words :** Full 3-D model(완전 3 차원 모델), Marching-type 3-D model, Single Screw Extruder(단축 스크류 압출기), Reverse Flow(역류)

### Abstract

A numerical study of three-dimensional fluid flow and heat transfer in the metering section of a single screw extruder has been performed. The mathematical model for the screw channel is simplified by unwound channel and fixing the coordinate system to the screw. The pressure boundary and the prescribed mass flow rate conditions are imposed on the inlet and outlet, respectively. The commercial code STAR-CD based on the finite volume method is used to obtain the results of the present work. The computation of the reverse flow, which cannot be computed by the marching-type 3-D model, is performed in the present study.

	기호설명
$b$	temperature-sensitivity coefficient
$B$	screw pitch
$D$	inside diameter of the barrel
$e$	screw flight width
$h$	enthalpy
$H$	screw channel height
$k$	thermal conductivity
$K_{ref}$	consistency factor
$L$	screw axial length
$\dot{m}$	mass flow rate
$n$	power law index
$N$	rotation speed of the screw
$p$	pressure
$q_j$	diffusional energy flux
$s_{ij}$	rate of strain tensor
$S$	screw channel length

$T$	temperature
$T_b$	barrel temperature
$T_{ref}$	reference temperature
$T_o$	inlet melt temperature
$u_j$	velocity component
$V_b$	barrel velocity
$V_{bx}, V_{bz}$	velocity components of the barrel velocity
$x_i$	Cartesian coordinate
$\dot{\gamma}$	local shear rate
$\eta$	fluid viscosity
$\tau_{ij}$	stress tensor components

### 1. 서론

압출공정은 고체 또는 고점성의 유체상태 재료가 마찰열과 외부로부터의 가열에 의해 용융 및 혼합과정을 거치며 연속적으로 제품 생산을 할 수 있는 제조 공정으로써 플라스틱, 식품 및 의약품 등에 널리 적용되고 있다. 단축 스크류 압출기는 일반적으로 원료공급부(feeding section), 압축부(compression section) 그리고 계량화부(metering section)으로 이루어져 있다. 이 중에서 계량화부에

\* 회원, 한양대학교 대학원 기계공학과

\*\* 회원, 한양대학교 기계산업공학부

E-mail: [wskim@hanyang.ac.kr](mailto:wskim@hanyang.ac.kr)

TEL: 031-400-5248 FAX: 031-418-0153

\*\*\* 삼양사 중앙연구소 화성소재그룹

서는 재료의 가열, 가압 그리고 균질화<sup>(1)</sup> 등이 이루어지게 되어 압출공정을 통한 제품의 품질을 결정하게 되는 가장 중요한 부분이므로 제량화부에 대한 수치적인 열 및 유동해석에 관한 연구가 필요하다.

단축 스크류 압출기는 많은 연구자들에 의해 실험 및 수치해석에 의한 연구가 수행되어 왔다. Griffith<sup>(2)</sup>는 단축 스크류 압출기 내에서 열 및 수력학적으로 완전히 발달된 비압축성 유체에 대한 해석을 수행하고 실험과 비교하였다. Fenner<sup>(3)</sup>는 스크류 채널 방향에 따라 온도분포의 발달을 해석하였다. Karwe 와 Yaluria<sup>(4)</sup>는 스크류 채널 내의 비뉴턴 유체의 열적 거동을 배럴(barrel)에는 주어진 온도분포를 부여하고, 스크류에는 단열조건을 부여하여 해석하였다. Lawal 과 Kalyon<sup>(5)</sup>은 upwind/Petrov-Galerkin 방법을 이용하여 뉴턴유체에 대해 횡방향 대류항을 고려한 에너지방정식을 해석하였다. Sastrohartono 등<sup>(6)</sup>은 스크류 채널내의 열 및 유동을 marching-type 으로 3 차원 해석하였다. Chiruvella 등<sup>(7)</sup>은 압출공정 하에 있는 단축 스크류 압출기에서의 유동 현상에 관한 2 차원 해석을 수행하였는데 역류를 고려하기 위해 채널 방향 정식화(down-channel formulation)와 축 방향 정식화(axial formulation)를 사용하여 비교하였다. Kim 과 Kwon<sup>(8),(9)</sup>은 혼합효과를 증대시키는 새로운 스크

류 형상을 개발하고 속도분포를 유한요소법을 이용하여 계산하였다.

Lin 과 Yaluria<sup>(10)</sup>는 스크류에서의 전도열전달과 스크류 채널 내의 대류열전달을 각각 따로 풀 후 반복법으로 결합하여 스크류 채널과 스크류를 동시에 고려한 해석을 수행하였다. Syrjäla<sup>(11)</sup>는 스크류 채널내의 3 차원 열 및 유동해석을 수행하였다. 채널 진행 방향으로는 marching-type 으로 해석하였고, 채널 단면은 Galerkin 법을 이용한 유한요소법을 적용하였다.

본 연구에서는 스크류 채널 내의 비뉴턴유체에 대해 완전 3 차원 열 및 유동해석을 수행하고자 한다. 기존 3 차원 해석의 경우 채널 진행 방향으로의 marching-type 을 적용하여 수학적으로 많은 가정이 도입되었다. 지배방정식에서 속도의 채널 진행 방향으로의 미분항이 무시되었고, 관성항이 무시되었으며, 채널 진행 방향으로의 전도도 무시되었다. 이러한 가정들은 유동의 속도 및 온도분포에 영향을 주게 되며 비뉴턴유체의 경우 점성계수에도 영향을 주게 되어 정확한 해석이 어렵게 된다. 한편 marching-type 3 차원 해석의 경우 역류를 계산할 수 없는 한계가 있다. 그러므로 본 연구에서는 이러한 한계를 극복하기 위해 완전 3 차원으로 스크류 채널 내의 비뉴턴 유체에 대한 열 및 유동 해석을 수행하고자 한다.

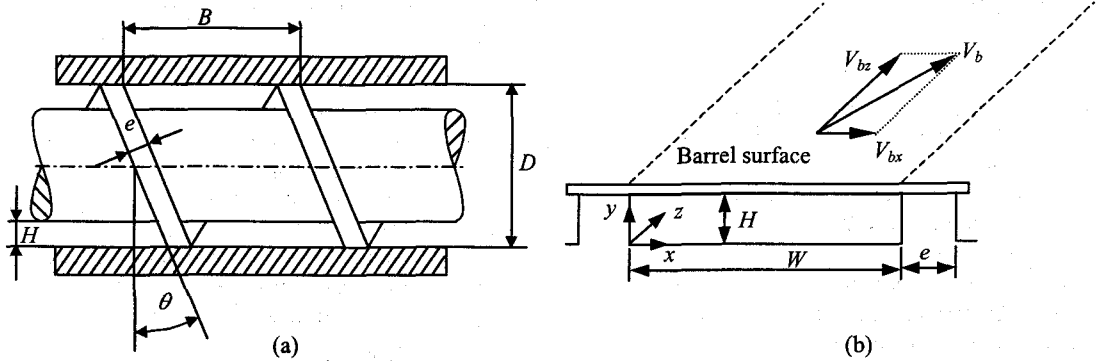


Fig. 1 (a) Geometry parameters of a single screw extruder, (b) Schematic diagram of the unwound screw channel



Fig. 2 Finite volume mesh of cross-sectional plane for the present study (256 elements)

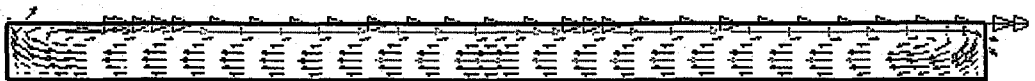


Fig. 3 Cross-sectional u-v velocity field at z/S=0.5

**Table 1** Details of the extruder geometry and properties of polystyrene melt

	Value
<b>Extruder geometry</b>	
Barrel diameter, $D$	0.12 m
Axial screw length, $L$	0.96 m
Screw pitch, $B$	0.12 m
Screw channel height, $H$	0.006 m
Flight width, $e$	0.012 m
Screw channel width, $W$	0.102 m
Screw channel length, $S$	3.164 m
Helix angle, $\theta$	17.66°
<b>Properties of polystyrene melt</b>	
Power law index, $n$	0.36
Consistency factor at $T_{ref}$ , $K_{ref}$	10,800 Pa s <sup><math>n</math></sup>
Reference temperature, $T_{ref}$	200 °C
Temperature sensitivity of $\eta$ , $b$	0.022 °C <sup>-1</sup>
Thermal conductivity, $k$	0.21 W/m°C
Density, $\rho$	990 kg/m <sup>3</sup>
Specific heat, $C_p$	2000 J/kg°C

## 2. 이론

### 2.1 스크류 형상

단축 스크류 압출기의 계량화부의 형상은 Fig. 1에 나타내었다. Fig. 1(a)는 단축 스크류 압출기의 형상에 관련된 변수를 나타내고 있다.  $B$ 는 스크류의 피치,  $H$ 는 스크류 채널의 높이,  $D$ 는 배럴의 내부 지름,  $e$ 는 스크류 날개의 폭, 그리고  $\theta$ 는 스크류 날개의 helix 각이다. 본 연구에서는 나선형으로 형성되어 있는 스크류 채널을 직선으로 펼쳐서 해석하고 있다. Fig. 1(b)는 펼쳐놓은 스크류 채널을 나타내었다. 여기서  $W$ 는 스크류 채널의 폭이다. 그러므로 스크류 채널의 길이  $S$ 는  $S=L/\sin\theta$ 의 관계로부터 구할 수 있다. 여기서  $L$ 은 계량화부의 축방향 길이이다.

본 연구에서는 스크류는 고정되어 있고 배럴이 움직인다고 가정하였기 때문에 스크류의 회전수  $N$ 에 대해 배럴이 가지게 되는 속도는 다음의 관계식으로부터 구할 수 있다.

$$V_b = \pi ND \quad (1)$$

그리고 Fig. 1(b)에 나타나 있는 배럴의 속도성분은 다음과 같다.

$$V_{bx} = V_b \sin \theta, \quad V_{bz} = V_b \cos \theta \quad (2)$$

### 2.2 지배방정식

본 연구에서 스크류 채널 내의 유체는 정상상태, 비압축성, 비뉴턴유체로 가정하였다. 완전 3차

원 연속방정식과 운동량방정식은 다음과 같이 텐서기호로 각각 표현될 수 있다.

$$\rho \frac{\partial u_j}{\partial x_j} = 0 \quad (3)$$

$$\frac{\partial}{\partial x_j} (\rho u_j u_i - \tau_{ij}) = -\frac{\partial p}{\partial x_i} \quad (4)$$

여기서  $x_i$ 는 Cartesian 좌표( $i=1,2,3$ )이고,  $u_i$ 는  $x_i$ 방향으로의 속도성분을 나타낸다.  $p$ 는 압력을 나타내고 있으며,  $\rho$ 는 밀도, 그리고  $\tau_{ij}$ 는 응력텐서를 나타내고 있다. 응력텐서는 다음과 같다.

$$\tau_{ij} = 2\eta s_{ij} \quad (5)$$

여기서  $\eta$ 는 유체의 점성계수이고,  $s_{ij}$ 는 변형률텐서이며 다음과 같이 표현된다.

$$s_{ij} = \frac{1}{2} \left( \frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right) \quad (6)$$

에너지방정식은 다음과 같이 엔탈피보존방정식으로 표현된다.

$$\frac{\partial}{\partial x_j} (\rho u_j h + q_j) = \tau_{ij} \frac{\partial u_i}{\partial x_j} \quad (7)$$

여기서  $h$ 는 엔탈피이고,  $q_j$ 는  $x_j$ 방향으로의 에너지 확산을 나타내고 있으며 다음과 같이 표현된다.

$$q_j = -k \frac{\partial T}{\partial x_j} \quad (8)$$

### 2.3 경계조건

본 연구에서는 각 경계에서 no-slip 조건을 적용하였다. 배럴에는 일정온도조건을 적용하였고, 스크류 표면에는 단열조건을 적용하였다. 입구에서는 압력조건을 적용하였는데 이 압력은 계산과정을 통해 채널 내부로부터 계산되어지게 된다. 그러므로 입구 유동에서의 속도 및 압력에 대한 초기 조건이 필요하지 않다. 스크류 채널의 입구에서는 일정 온도  $T_0$ 의 유체가 유입되는 것으로 가정하였다. 스크류 채널의 출구에는 일정질량유량 조건을 적용하였다. 즉 출구에는 주어진 질량유량  $\dot{m}_{out}$ 이 설정되었다. 위에서 설명한 경계조건들을 요약하면 다음과 같다.

배럴에서는  $u=V_{bx}$ ,  $v=0$ ,  $w=V_{bz}$ ,  $T=T_b$  이고, 스크류 표면과 날개에서는 각각  $\partial T/\partial y, \partial T/\partial x$  이며,  $u=v=w=0$  이다. 그리고 입구에서는  $T=T_0$ , 출구에서는  $\dot{m}=\dot{m}_{out}$  이다.

## 2.4 점성모델

본 연구에서는 작동유체로 폴리스틸렌을 사용하였다. 점성계수는 변형률에 대해 power law 법칙을 따르고, 온도에 대해 지수 법칙을 따른다고 가정하였다. 본 연구에서 사용된 점성모델은 다음과 같다.

$$\eta = K_{ref} \cdot e^{-b(T-T_{ref})} \cdot \dot{\gamma}^{n-1} \quad (9)$$

여기서  $K_{ref}$ 는 기준온도  $T_{ref}$ 에서의 점성계수이고,  $n$ 은 power law 에 사용되는 지수이다. 그리고  $b$ 는 온도민감도계수이다. 점성계수 계산에 사용되는 변형률은 다음과 같이 주어진다.

$$\dot{\gamma} = \left[ 2 \left\{ \left( \frac{\partial u}{\partial x} \right)^2 + \left( \frac{\partial v}{\partial y} \right)^2 + \left( \frac{\partial w}{\partial z} \right)^2 \right\} \right]^{1/2}$$

$$\left. + \left\{ \left( \frac{\partial u}{\partial y} + \frac{\partial v}{\partial x} \right)^2 + \left( \frac{\partial v}{\partial z} + \frac{\partial w}{\partial y} \right)^2 + \left( \frac{\partial w}{\partial x} + \frac{\partial u}{\partial z} \right)^2 \right\} \right]^{1/2} \quad (10)$$

본 연구에서는 변형률 계산에서 Sastohartono 등<sup>(6)</sup>과 Syrjala<sup>(11)</sup>이 고려하지 않은 채널 진행 방향( $z$  방향)의 속도의 미분항을 고려하였다.

## 3. 해석 결과 및 고찰

수치해석에 사용된 스크류의 형상에 대한 치수 및 비뉴턴 유체의 물성치는 Table 1 에 나타내었다<sup>(11)</sup>. 본 연구에서는 상용 열유체 해석 프로그램인 STAR-CD Ver.3.0c 를 사용하여 3 차원 해석을 수행하였다. 지배방정식의 이산화에는 유한체적법이 사용되었으며, 유동의 계산에는 SIMPLE 알고리즘이 사용되었다. 계산에 사용된 채널 단면의 격자를 Fig. 2 에 나타내었다. 단면은 256 개의 셀로 구성되어 있으며, 채널 방향으로는 150 개로 나누어져 38400 개의 셀로 전체 채널이 구성되어 있다.

완전 3 차원 모델과 marching-type 3 차원 모델을

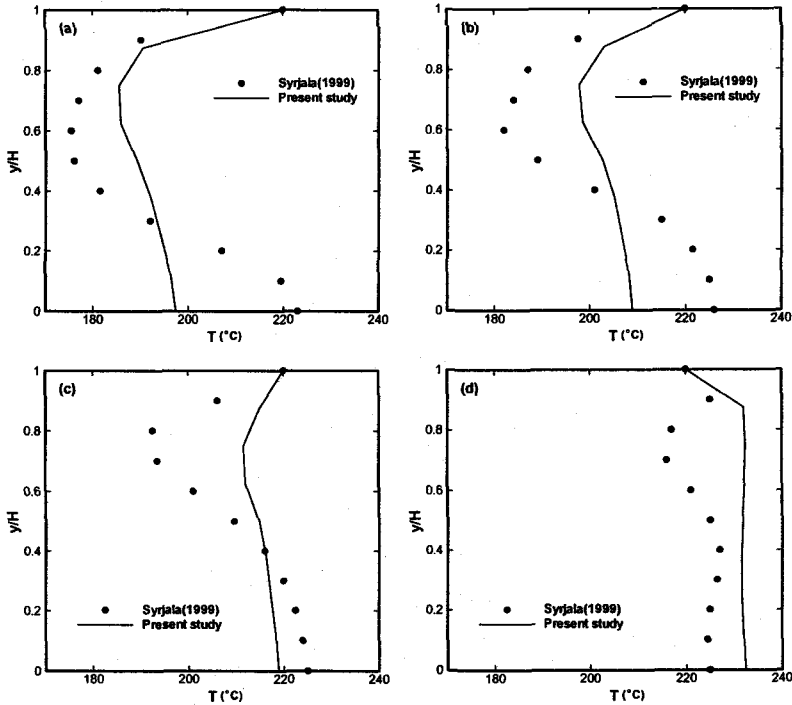


Fig. 4 Temperature profiles computed with the marching-type 3-D model and the present study at (a)  $z/S=0.15$ , (b)  $z/S=0.3$ , (c)  $z/S=0.5$ , and (d)  $z/S=1.0$ .

비교하기 위해 채널 단면의 중심  $x=W/2$  에서 채널의 높이 방향으로의 온도와 점성계수, 그리고 속도를 비교하였다. 본 연구와의 비교를 위한 marching-type 3 차원 모델의 결과는 참고문헌<sup>(11)</sup>으로부터 얻었다. 수치해석은 질량유량  $\dot{m}=0.1089\text{kg/s}$ , 입구온도  $T_0=170^\circ\text{C}$ , 배럴온도  $T_b=220^\circ\text{C}$ , 그리고 스크류 속도  $N=100\text{rpm}$  의 운전 조건에서 수행되었다. 스크류 속도에 따른 배럴의 속도성분은  $z$  방향으로  $V_{bz}=0.599\text{m/s}$ , 그리고  $x$  방향으로  $V_{bx}=0.191\text{m/s}$  이다. Fig. 3 은 채널 단면에서의  $u-v$  속도장을 나타내고 있다. 속도벡터를 살펴보면 채널 내에서 회전하는 유동장을 잘 나타내고 있음을 알 수 있다.

채널 진행 방향으로  $z/S=0.15, 0.3, 0.5$ , 그리고  $1.0$  에서의 온도분포를 Fig. 4 에 나타내고 marching-type 3 차원 모델과 비교하였다. Fig. 4(a), (b), (c)의 경우 유동의  $u$  속도성분이 0 이 되는 회전유동의 중심부보다 배럴과 스크류 쪽이 온도가 높음을 알 수 있다. 이러한 현상은 배럴쪽에서 가열된 유체가 스크류쪽으로 회전하면서 스크류 쪽의 유체를 가열하기 때문이다. Fig. 4(d)에서는 점성소산에 의한 가열과 혼합효과에 의해 전체적으로 균일한 온도분포를 보이고 있음을 볼 수 있다. 그러나

marching-type 3 차원의 결과와 본 연구의 결과는 많은 차이를 나타내고 있다. 이러한 이유는 marching-type 3 차원 모델의 경우 수학적으로 많은 가정이 포함되어 속도성분의  $z$  방향 미분항과  $z$  방향의 전도가 무시되었기 때문이다.

Fig. 5 에는 Fig. 4 의 경우와 같은 위치에서의 점성계수 분포를 나타내었다. Fig. 5(a)와 (b)의 경우에는 marching-type 3 차원 모델과 완전 3 차원 모델의 결과가 큰 차이를 보이고 있다. 이는 점성계수가 온도에 크게 영향을 받고 있어 Fig. 4 에 나타난 두 모델 사이의 온도분포 차이에 따르고 있음을 알 수 있다. 그러므로 온도분포가 marching-type 3 차원 모델보다 높게 계산된 부분에서는 점성계수가 상대적으로 낮게 계산되고 있고, 온도가 낮게 계산된 부분에서는 점성계수가 높게 계산되고 있음을 보여준다.

Fig. 6 에는 채널 입출구의 압력차이와 유량과의 관계를 나타내었다. 유량이 감소함에 따라 압력차이는 점점 증가하는 경향을 보이고 있다. 그러나 질량유량이  $0.04\text{kg/s}$  보다 작은 경우에는 다시 압력차이가 감소하는 현상을 볼 수 있다. 이러한 현상은 역류에 의해 발생하게 되며 본 연구에서는 이러한 역류 현상을 해석할 수 있음을 볼 수 있다.

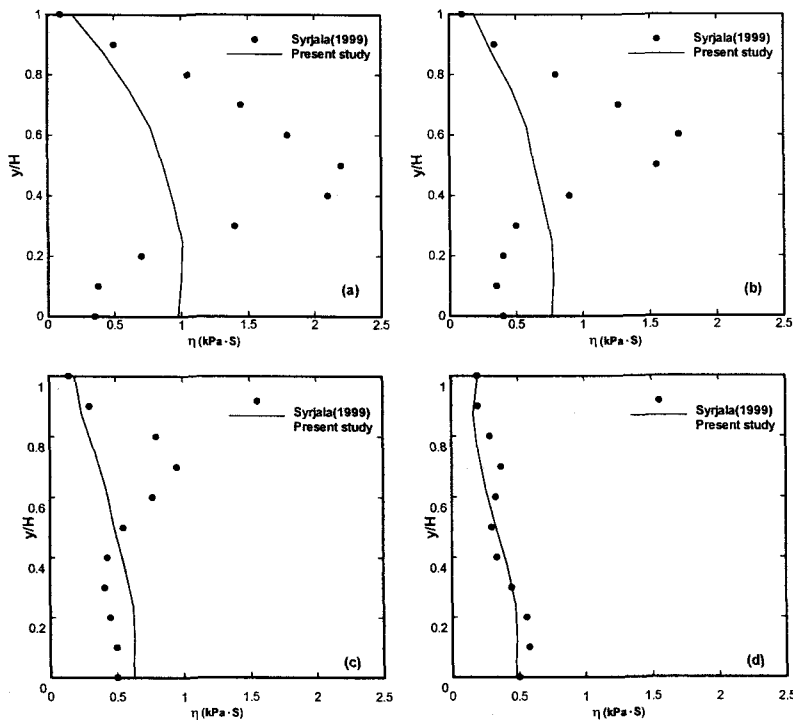


Fig. 5 Viscosity profiles computed with the marching-type 3-D model and the present study at (a)  $z/S=0.15$ , (b)  $z/S=0.3$ , (c)  $z/S=0.5$ , and (d)  $z/S=1.0$ .

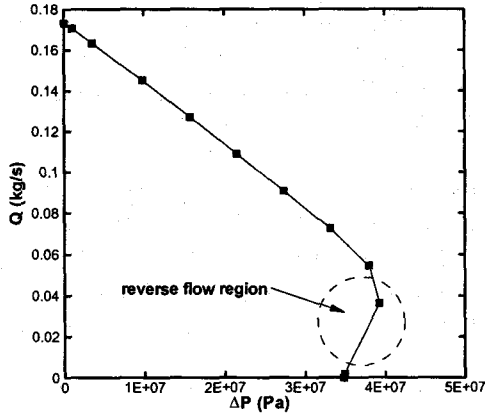


Fig. 6 Mass flow rates vs. pressure differences computed by the present study

그러나 marching-type 3 차원 모델의 경우 역류가 발생하게 되는 유량에서는 계산이 불가능하다. Fig. 7 에는 채널 출구에서의  $w$  속도 성분을 나타내고 있다. 질량유량이 0.04kg/s 보다 작은 경우에 속도가 음의 값을 나타내서 역류가 발생되고 있음을 알 수 있다.

#### 4. 결론

본 연구에서는 단축 스크류의 계량화부에서 열 및 유동에 대한 완전 3 차원 해석을 수행하였다. 수치해석에는 상용 열유체 해석 프로그램인 STAR-CD 가 사용되었다. 본 연구의 결과는 배럴 부에서 스크류쪽으로 회전유동에 의해 대류열전달이 활발하게 이루어지고 있음을 볼 수 있다. 계산된 온도분포와 점성계수 분포는 marching-type 3 차원 모델과 차이를 보이고 있음을 알 수 있다. 이는 marching-type 3 차원 모델에서 도입된 가정으로 인해 속도성분의  $z$  방향 미분항과  $z$  방향으로의 전도가 무시되어 온도분포의 차이가 생기게 되며, 온도분포의 차이는 점성계수 분포에 영향을 미치게 되기 때문이다. 완전 3 차원 모델로부터 계산된 채널 단면의 평균 압력과 체적평균 온도는 marching-type 의 경우보다 높게 나타났다. 본 연구에서 사용한 스크류 형상 및 운전조건에서는 질량유량이 약 0.04kg/s 이하인 경우에는 역류가 나타났으며 본 해석은 역류현상을 해석할 수 있음을 알 수 있었다.

#### 참고문헌

(1) Tadmor, T. and Gogos, C. G., 1979, *Principles of Polymer Processing*, John Wiley & Sons, New York.

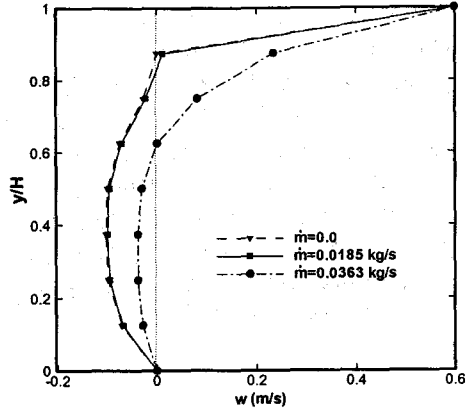


Fig. 7 Velocity profiles for  $z$ -direction with small mass flow rates at the outlet of screw channel

(2) Griffice, R. M., 1962, "Fully Developed Flow in Screw Extruders," *Ind. Eng. Chem. Fundamentals*, Vol.1, pp.180-187.  
 (3) Fenner, R. T., 1977, "Development in the Analysis of Steady Screw Extrusion of Polymers," *Polymer*, Vol.18, pp.617-635.  
 (4) Karwe, M. V. and Jaluria, Y., 1990, "Numerical Simulation of Fluid Flow and Heat Transfer in a Single-Screw Extruder for Non-Newtonian Fluids," *Numerical Heat Transfer, Part A*, Vol.17, pp.167-190.  
 (5) Lawal, A. and Kalyon, D. M., 1994, "Nonisothermal Model of Single Screw Extrusion of Generalized Newtonian Fluids," *Numerical Heat Transfer, Part A* Vol.26, pp.103-121.  
 (6) Sastrohartono, T., Jaluria, Y., Essegir, M., and Sernas, V., 1995, "A Numerical and Experimental Study of Three Dimensional Transport in the Channel of an Extruder for Polymeric Materials," *Int. J. Heat Mass Transfer*, Vol.38, pp.1957-1973.  
 (7) Chiruvella, R. V., Jaluria, Y., Sernas, V., Essegir, M., 1996, "Extrusion of Non-Newtonian Fluid in a Single-Screw Extruder with Pressure Back Flow," *Polymer Eng. Sci.*, Vol.36, pp.358-367.  
 (8) Kim, S. J. and Kwon, T. H., 1996, "Enhancement of Mixing Performance of Single-Screw Extrusion Processes via Chaotic Flows: Part I. Basic Concepts and Experimental Study," *Advances in Polymer Tech.*, Vol.15, pp.41-54.  
 (9) Kim, S. J. and Kwon, T. H., 1996, "Enhancement of Mixing Performance of Single-Screw Extrusion Processes via Chaotic Flows: Part II. Numerical Study," *Advances in Polymer Tech.*, Vol.15, pp.55-69.  
 (10) Lin, P. and Jaluria, Y., 1998, "Conjugate Thermal Transport in the Channel of an Extruder for Non-Newtonian Fluids," *Int. J. Heat Mass Transfer*, Vol.41, pp.3239-3253.  
 (11) Syrjälä, S., 1999, "On the Analysis of Fluid Flow and Heat Transfer in the Melt Conveying Section of a Single-Screw Extruder," *Numerical Heat Transfer, Part A*, Vol.35, pp.25-47.