

< 논문 >

이축 스크루 압출기내 유동의 수치 해석과 혼합 성능 분석

김낙수[†] · 김홍범* · 이재욱^{**}

(2005년 7월 7일 접수, 2005년 11월 26일 심사완료)

Numerical Study of Internal Flow in Twin Screw Extruder and Its Mixing Performance Analysis

Naksoo Kim, Hongbum Kim and Jaewook Lee

Key Words : Co-Rotating Twin Screw Extruder(동 방향 회전 이축 스크루 압출기), Counter-Rotating Twin Screw Extruder(역 방향 회전 이축 스크루 압출기), Mixing Performance(혼합성능), Particle Tracking(입자 추적), Residence Time Distribution(잔류시간분포)

Abstract

We analyzed the non-Newtonian and non-isothermal flow in the melt conveying zone in co-rotating and counter-rotating screw extruder system with the commercial code, STAR-CD, and compared the mixing performance with respect to screw speed and rotating direction. The viscosity of fluid was described by power-law model. The dynamics of mixing was studied numerically by tracking the motion of particles in a twin screw extruder system. The extent of mixing was characterized in terms of the residence time distribution and average strain. The results showed that high screw speed decreases the residence time but increases the shear rate. Therefore higher screw speed increases the strain and has better mixing performance. Counter-rotating screw extruder system and co-rotating screw extruder has the similar shear rate with the same screw speed in spite of different rotating direction. However, the counter-rotating screw has good mixing performance, which is resulted from longer residence time than that of co-rotating screw extruder.

1. 서 론

1.1 연구 배경 및 목표

이축 스크루 압출기를 이용한 생산은 고분자 소재를 이용하거나 고무 산업에서 사용되는 매우 중요한 기법 중의 하나로써 높은 점도를 가지는 유체를 이용하는 연속 제조 공정에 널리 이용된다. 이러한 이축 스크루 압출기의 종류는 두 스크루 축 사이 거리에 따라서 intermeshing 스크루 압출기와 non-intermeshing 스크루 압출기로 구분되고 또한 스크루 구성 및 스크루 회전 방향에 따라서

같은 방향으로 회전하는 동 방향 회전 이축 스크루 압출기와 두 스크루가 반대 방향으로 회전 하는 역 방향 회전 스크루 압출기로 구분된다. 산업적으로 널리 쓰이는 것은 intermeshing 스크루 압출기로서 각각의 용도에 따라서 동 방향 회전 스크루 압출기 및 역 방향 회전 스크루 압출기를 이용하게 된다. 따라서 스크루 압출기에 대한 우수한 설계 및 공정의 최적화가 이루어지면 원료 소재 및 에너지의 사용에 있어서 효율을 증대시킬 수 있게 된다. 하지만 실질적으로 스크루 압출기에 대한 연구가 대단히 미진한 실정이어서 대부분의 산업체에서는 체계적인 지식보다는 현장에서 쌓여진 경험을 바탕으로 스크루 압출기를 운용하고 있다. 따라서 이에 대한 적절한 수치 해석을 통한 스크루 압출기 내의 유동 특성을 파악하여 이를 실무에 이용 가능한 자료 형태로서 만드는 작업이 필요하지만, 수치적인 압출공정의 해석은 복잡한 스크루 압출기 형상으로 인한 모델링의 어

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

* 회원, 서강대학교 기계공학과

** 서강대학교 화학공학과

려움으로 인해, 많은 단순화 가정을 수반하여 이루어지고 있다. 형상에 대한 왜곡을 포함하는 모델링은 기본적인 경향성 파악에는 유익하지만 스크루 압출기 내에 유동을 정확히 파악하는 것에 있어서는 한계가 있다. 따라서 본 연구에서는 산업적으로 널리 사용되는 intermeshing 동 방향 회전 스크루 압출기 및 역 방향 회전 스크루 압출기를 형상의 왜곡 없이 모델링하여 압출기 내에서의 정확한 유동 특성 모사하고 공정 변수에 대한 영향을 파악하며 이를 토대로 스크루 회전 속도 및 회전 방향에 따른 혼합 성능을 분석을 하고자 한다.

1.2 연구 동향

Kajiwara⁽²⁾ 등은 개방형 C-자 채널 형태의 얇은 날개로 이뤄진 동 방향 회전 및 역방향 회전 스크루 압출기에 대한 유동 해석 결과를 발표하였다. 그는 회전 방향에 따른 유동의 차이를 분석하였고 해석된 유동장을 토대로 무게가 없는 입자들의 스크루 압출기내 유동에서의 궤적을 계산하여 잔류 시간 분포를 획득함으로써 스크루 압출기의 혼합 성능을 분석하였다. Juluria⁽³⁾ 등은 복잡한 이축 스크루 압출기의 형상을 간략화한 모델을 이용한 수치 해석을 수행하였고, Cheng⁽⁴⁾ 등은 유한 요소법을 이용한 유동 해석 프로그램인 FIDAP 를 이용하여 동 방향 회전 스크루 압출기에 대해서 3 차원 등온 유동 해석을 하였다. Bravo⁽⁵⁾와 Ishikawa⁽⁶⁾는 각각 kneading element 를 가지는 동 방향 회전 스크루 압출기에 대한 수치 해석 논문을 발표 하였으며, Yoshinag⁽⁷⁾ 등도 유한 요소법을 이용하여 kneading element 를 갖는 동 방향 회전 스크루 압출기에 대한 수치해석을 수행하고 marker tracking 기법을 통해서 이축 스크루 압출기의 혼합 성능을 분석하였다. 또한 Shearer⁽⁸⁾ 등은 초소형의 탐침기를 이용한 실험을 통하여 이축 스크루 압출기에서 고분자 용융체 사이의 계면반응에 대한 분석을 통하여 혼합 성능을 분석하였다. Ishikawa⁽⁹⁾는 다양한 스크루 형상들에 혼합 성능을 비교한 논문을 발표하였고 같은 해에 Bakalis⁽¹⁰⁾ 등은 Nip 영역과 translation 영역에서 속도 분포와 질량 유속 차이를 실험적으로 규명한 논문을 발표하였다. 그리고 Bravo⁽¹¹⁾는 자신의 논문의 유동 해석을 바탕으로 이축 스크루 압출기의 혼합 성능을 분석한 논문을 발표 하였다. 그리고 Ye⁽¹²⁾ 등은 4 단계 시간 분할법을 이용한 유한 요소 프로그램을 작성하여 폴리머 압출 공정에 대한 연구를 수행 하였고, Linjie⁽¹³⁾는 상업용 계산 프로그램인 Fluent 를 사용하여 공정

변수에 따른 중합 반응 정도를 분석하는 논문을 발표 하였다.

지금까지의 연구들은 동적 경계를 갖는 이축 스크루 압출기의 해석 공간을 모사하는 것이 힘들었기 때문에 2 차원 해석에서는 정상 상태 가정을, 3 차원 해석에서는 준정적 상태의 연속이라고 가정하여 해석하였다. 하지만 스크루 압출기 온도장 계산에 있어 전도의 영향은 작고 점성소산과 대류의 영향이 크기 때문에 준정적 상태에 대한 가정은 오차를 내게하게 된다. 특히 스크루 회전 속도가 빨라서 대류에 영향이 커질수록 준정적 상태 가정으로 인한 오차는 커진다. 따라서 본 해석에서는 동적 경계문제인 스크루 압출기 속도장 해석에 있어서 비정상 상태 해석을 함으로써 정확도를 높였다.

2. 형상 및 작동 조건

2.1 스크루 압출기의 형상

Fig. 1 은 이축 스크루 압출기 시스템 전체 해석 공간을 나타내고 Fig. 2 는 해석 공간 및 스크루 단면을 나타낸다. 그리고 Table 1 에 단면 치수를 기술하였다. 또한 Fig. 3 은 본 연구의 스크루의 형상 및 스크루의 구성을 나타낸 그림이다.

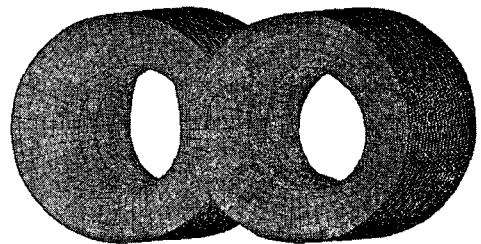


Fig. 1 Twin screw extruder shape

Table 1 Screw extruder dimension

C_L	R_B	R_O	R_I	R_U	δ_0	Pitch
21cm	13 cm	11cm	7cm	3cm	2cm	30cm

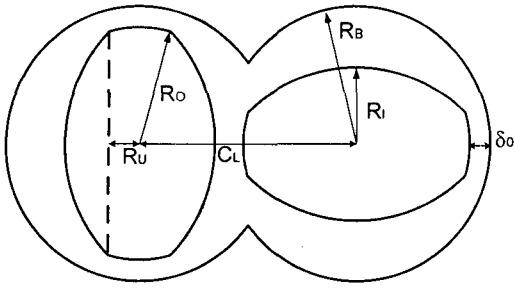


Fig. 2 Cross section of screw extruder

Table 2 Properties of polypropylene melt

Power-law model	
Power-law index, n	0.5
Power-law constant, k_{ref} [Pa · s ⁿ]	6010
Reference temperature, T_{ref} [°C]	200
Temperature sensitivity, b [°C ⁻¹]	0.0067
Physical properties	
Thermal conductivity [W/m°C ⁻¹]	0.1873
Density, ρ [kg/m ³]	749.6
Heat capacity, C [J/kg°C]	2428

한편 Table 2 는 고분자 용융체의 물성 및 Power-law 모델의 지수 값들을 나타낸 것이다.

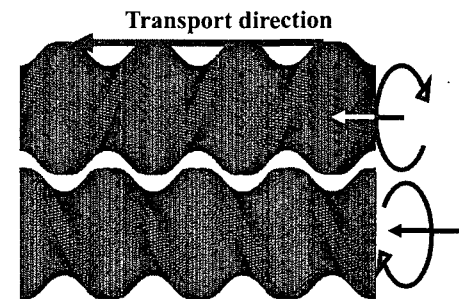
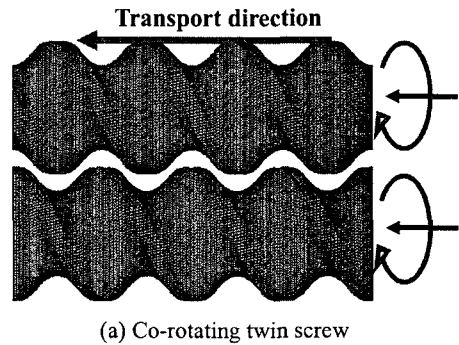
2.2 시스템 모델링을 위한 가정

동 방향 회전 및 역 방향 회전 스크루 압출기의 유동 해석을 위하여 다음과 같은 몇 가지 가정을 하였다.

- 유동은 층류이다.
- 점도는 온도와 전단 변형 속도의 함수이다.
- 폴리머 용융체는 비압축성 유체이다.

- 점성 소산에 의한 열 발생이 고려되었다.
- 스크루와 고분자 용융체 사이는 단열이다.
- 고분자 용융체와 고체 경계 사이는 고착 경계조건이 적용된다.
- 비열 및 밀도는 상수이다.
- 배럴 안은 고분자 용융체로 충만하다.
- 스크루 압출기 시스템 중 계량부에 대한 해석이다.

본 연구의 해석 대상인 스크루 압출기 내의 고분자 용융체는 높은 점성으로 인하여 레이놀즈 수가 낮기 때문에 층류 유동에 대한 가정이 가능하다. 또한 공급부, 압축부 및 계량부로 구성되는 스크루 압출기는 액상으로 변화된 고분자 원료를 일정한 온도와 압력으로 충분히 혼합시켜 다이로 이송 시키는 역할을 하는 계량부에서 제품의 품질이 결정되므로 계량부에서 해석이 중요하다. 그러므로 본 연구에서 스크루 압출기의 계량부를 해석 대상으로 하였다. 또한 배럴 안은 고분자로 충만하다는 가정은 산업 현장에 있어서 다소 실제적이지 못한 가정이지만 이축 스크루 압출기 시스템의 유동 특성과 상대적인 혼합 성능의 경향성을 파악하는 것에는 적절한 가정이다.



(a) Co-rotating twin screw
(b) Counter-rotating twin screw

Fig. 3 Illustration of screw configuration in this study

2.3 경계조건 설정

이축 스크루 압출기를 해석하기 위해서 다음과 같은 경계 조건을 부가하였다.

- 스크루와 배럴에는 점착(no-slip) 경계조건이 부가되었다. 즉 해석을 위한 가정에서 기술했던 바와 같이 유체가 고체와 접하는 부분에서 각 방향 속도 성분은 0 이다.
- 배럴 외벽의 온도는 200 °C 로써 전체적으로 균일하다.
- 초기 유체의 온도 및 입구 온도는 195 °C 고 출구 온도 경계 조건은 $dT/dz=0$ 이다.
- 입구와 출구 양단에는 압력 경계 조건으로 0 을 주었고 압력 분포 값은 계산 영역 내부로부터 외삽된다.

2.4 해석 공간 모델링

본 연구에서는 해석 공간을 모델링하는 방법은 아래와 같다.

- Fig. 4(a)와 같이 스크루 형상을 I-DEAS 로 모델링하고 모델링된 스크루 형상의 표면을 셀 요소망으로 변환하였다.
- STAR-CD 내에서 Fig. 4(b)와 같은 유체를 모델링하였다.
- Fig. 4(c)와 같이 스크루 셀 요소망과 유체 요소망을 겹쳐 놓는다.
- 스크루 셀 요소망을 스크루 회전 속도에 따라 회전시키고 유체 요소망을 스크루 셀 요소망에 투영하면 Fig. 4(d)과 같은 스크루 회전에 의한 계산 영역의 변화를 고려한 계산이 가능하다.

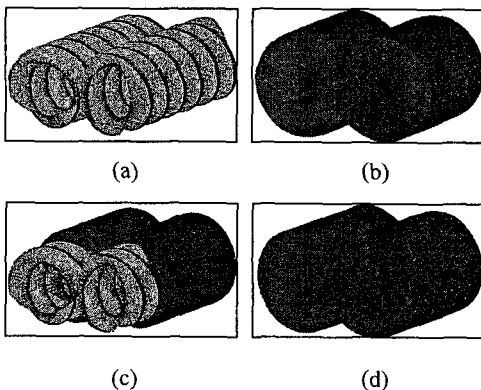


Fig. 4 Modeling of analysis domain

3. 지배 방정식

이 연구에서 고려하고 있는 유동은 3 차원, 비정상 상태, 층류, 비압축성, 비 뉴턴 유체의 유동이다. 이러한 성질을 가지는 유동을 표현하기 위해서 연속 방정식과 운동량 방정식(Navier-Stokes Equation)을 사용하며 이를 직교 좌표계에서 텐서로 나타내면 다음과 같다.

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x_i}(\rho u_i) = s_m \tag{1}$$

$$\frac{\partial \rho u_i}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x_i}(\rho u_i u_i + \tau_{ij}) = -\frac{\partial p}{\partial t} + S_i \tag{2}$$

$$\frac{\partial \rho h_i}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x_i}(\rho h_i u_i + F_{h,j}) = \frac{\partial p}{\partial t} + u_j \frac{\partial p}{\partial x_j} + \tau_{ij} \frac{\partial u_i}{\partial x_j} + s_h - \sum_m H_m s_{c,m} \tag{3}$$

식 (1)-(2)에서 t 는 시간, x_i 는 직교 좌표계 ($i=1,2,3$), u_i 는 유체의 x_i 방향으로의 절대 속도, p 는 압력, τ_{ij} 응력 텐서 성분, s_i 는 모멘트 소스의 구성 성분, s_m 은 질량 소스, ρ 는 밀도이다. 식 (3)에서 $s_{c,m}$ 은 화학 반응으로 인한 물질 m 의 생성 및 소멸 속도, s_h 는 에너지 소스, $F_{h,j}$ 는 x_j 방향으로의 확산 열에너지 플럭스, h_i 는 온도의 함수인 엔탈피이다. 한편 식 (1)-(3)의 소스항은 STAR-CD 내에서 피소(piso) 알고리즘 및 소스텀 선형화를 통해 이산화 처리되고, 플럭스 항은 상류도식(upwind scheme)으로 처리된다. 식 (4)에 는 전단응력 τ_{ij} 을 정의하는 구성식을 표현했다.

$$\tau_{ij} = 2\mu s_{ij} - \frac{2}{3}\mu \frac{\partial u_k}{\partial x_k} \delta_{ij}$$

$$\text{단 } s_{ij} = \frac{1}{2} \left(\frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right) \tag{4}$$

위 식에서 μ 는 점도, δ_{ij} 은 크로넬카 델타이다. 한편 계산에 사용되는 유체 점도 모델은 Power law 모델로, 전단 변형 속도와 온도의 함수로이며 아래 식 (5) 같이 표현된다. 이를 STAR-CD 에서 사용하기 위해 작성자 서브루틴으로 구성하였다.

$$\mu = k_{ref} \cdot e^{-b(T-T_{ref})} \cdot \dot{\gamma}^{n-1}$$

$$\text{단 } \dot{\gamma} = \frac{1}{2}(s_{ij}s_{ij} - s_{ii}s_{jj}) \quad (5)$$

여기서 k_{ref} 는 기준온도 T_{ref} 의 점도 지수, b 는 μ 의 온도 민감성 지수, n 은 power law 지수이다.

한편 점도 모델에 있어서 여러 지수 값들은 실험으로 결정된다. 그러므로 이 값들은 생산한 회사나 사용 환경에 따라 다르다. 따라서 실제적인 생산 공정에 대한 해석에 있어서 이 값을 구하기 위해서는 실험을 하거나, 생산 회사에 정확한 값을 문의해야 한다. 그러나 본 연구는 폴리머 압출 공정에 있어서 공정 변수에 의한 압출 공정의 혼련 효율을 구하여 압출 공정에서 최적의 변수 값을 산출하는 일반적인 방법론 확립의 일환으로 수행되었기 때문에 점도 모델의 지수 값에 대한 검토 과정의 배제가 이 연구의 목적이나 결론의 타당성에 주는 영향은 작다고 생각한다. 따라서 참고 문헌 1 에서 획득한 폴리프로필렌의 점도 모델의 지수 값들을 실험이나 검증 없이 그대로 사용하고 그 값은 Table 2 에 제시 하였다.

4. 해석 및 고찰

4.1 동 방향 회전 스크루 압출기의 유동 특성

속도 성분을 살펴 보면 x 방향 속도 성분 u 는 Fig. 5 와 같이 스크루와 근접한 부분에서 속도가 빠르게 나타난다. 이러한 특성은 y 방향 속도 성분 v 에서도 같은 양상을 보인다. 한편 z 방향 속도 성분 w 는 속도 성분 u, v 와는 다르다. 즉 Fig. 6 에 나타난 것과 같이 두 스크루가 교차하는 지점인 intermeshing 영역(nip 영역)에서 스크루가 교차하지 않는 translation 영역보다 큰 속도 성분이 나타난다. 이것은 nip 영역에서 두 스크루 위상차에 의한 펌핑 효과 때문이다.

단면에서의 압력 분포는 Fig. 7 에 나타난 것과 같다. 여기서 특이한 점은 압력이 스크루와 배럴 사이 틈에서 주변에 비해 높게 나타난 점이다. 이것은 고분자 용융체가 유동할 수 있는 공간이 작아지는 것에서 비롯된다. 따라서 이러한 틈이 작아질수록 압력은 높아질 것이라는 것을 예측할 수 있다. 또한 압력 이력의 영향으로 입자들의 분쇄되는 정도를 나타내는 혼련 지수는 틈의 크기가 줄어들수록 커질 것이라는 것도 예측 가능하다.

Fig. 8 은 단면에서의 점도 분포로써 전단 변형 속도가 큰 스크루 주변부와 nip 영역 에서 점도는 주변부에 비해서 상대적으로 낮게 나타나고 있다. 이것은 고분자 용융체의 전형적인 특성인 전단박하(Shear thinning) 때문이다. 한편 이론에서 기술한 것과 같이 점도는 온도와 전단 변형속도의 함수로서 전단 변형 속도 및 온도와 반비례 한다. 하지만 본 해석에서는 온도가 높은 배럴 주변에서 오히려 점도가 높게 나타났다. 이것은 배럴 온도가 200 °C 로써 점도 계산시 기준 온도(T_{ref})와 동일 하여 점도의 계산에 영향을 미치지 못했기 때문이다. 더욱이 배럴 근처에서는 전단 변형을 속도가 낮기 때문에 오히려 점도는 높게 계산된다.

Fig. 9 는 단면에서의 온도 분포로써 전체적으로 온도 차는 작지만 특징적인 것은 스크루와 배럴 근처에서 온도가 높게 나타나고, 스크루와 배럴 사이 중간영역은 상대적으로 낮다는 것이다. 그것은 스크루 근처에서는 높은 전단 변형 속도로 인하여 점성 소산의 영향이 주변부보다 크기 때문에 온도가 주변부 보다 높게 나타나며 배럴 근처에서는 배럴 벽에서 가해지는 온도가 고분자 용융체의 온도를 상승시키기 때문이다. 따라서 두 요소의 영향이 적은 중간 층에서 온도가 상대적으로 낮게 분포하게 된다.

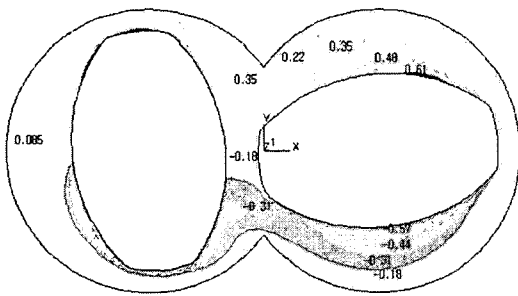


Fig. 5 Velocity component u distribution on a cross section ; rpm =90, unit[m/s]

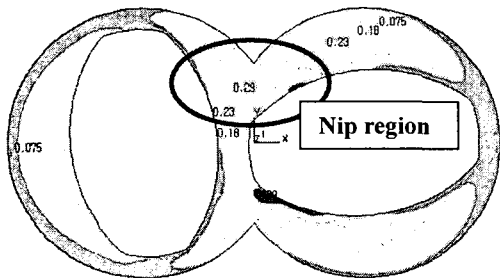


Fig. 6 Velocity component w distribution on a cross section ; rpm =90, unit[m/s]

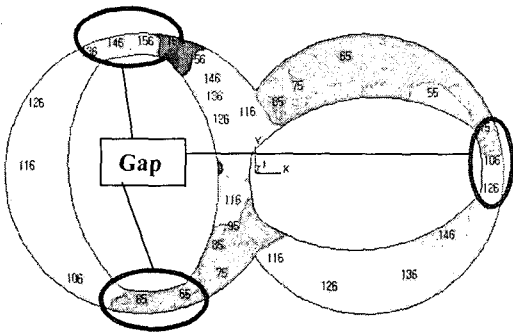


Fig. 7 Pressure distribution on a cross section ; rpm =90, unit[kpa]

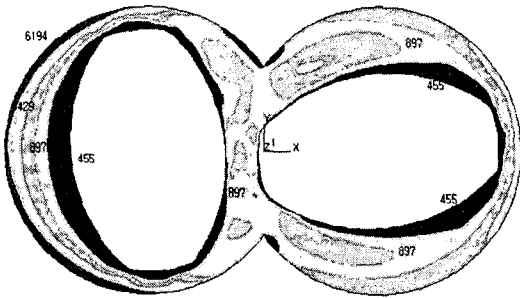


Fig. 8 Viscosity distribution on a cross section ; rpm =90, unit[Pa -s]

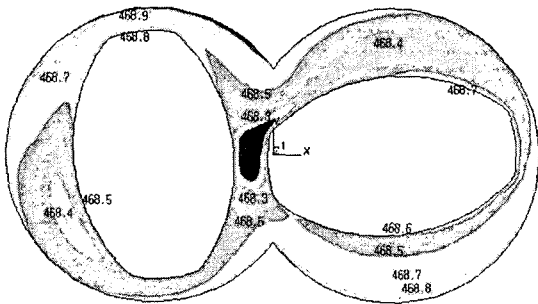


Fig. 9 Temperature distribution on a cross section ; rpm =90, unit[K]

4.2 공정변수 따른 유동 특성

스크루 압출기에서 공정 변수는 스크루의 회전 속도, 질량 플럭스 및 배럴에서의 가열 온도 이다. 세 가지 공정 변수 중에서 가열 온도는 점도에 영향을 주어 속도장을 변화하게 하지만 영향력이 미미하여 스크루 압출기의 혼합 성능 결정에는 중요한 요소가 되지 못한다. 질량 플럭스는 스크루 압출기의 혼합 성능에 중요한 변수지만 그 경향성은 모든 스크루 압출기에서 자명하다. 즉 질량 플럭스를 높이면 생산성은 증가하지만 그만큼 혼합 성능은 감소하고 반대로 질량 플럭스를 감소시키면 혼합이 잘된 고분자 용융체를 얻을 수 있지만 생산성은 감소한다.

반면에 스크루 회전 속도는 스크루 압출기의 혼합 성능에 중요한 변수지만 질량 플럭스처럼 특정한 경향성을 갖는 것이 아니라 각각의 스크루 압출기 시스템에 따라 혼합 성능은 달라지게 된다. 그것은 스크루의 회전 속도는 혼합 성능에 비례하는 잔류 시간과 전단 변형률 속도와는 각각 반비례와 비례 관계에 있기 때문에 스크루 특성에 따라서 잔류 시간 및 전단 변형 속도가 달라지기 때문이다. 그러므로 스크루 압출기의 혼합성능을 극대화하기 위해서는 시스템에 따라 적절한 회전 속도를 찾아 내는 것이 필요하다. 따라서 이 절에서는 스크루 회전 속도에 따른 유동 특성을 기술하고 각 회전 속도에서 유체 입자들의 잔류 시간 및 전단 변형률 속도를 계산하여 스크루 회전 속도에 따르는 혼합 성능을 분석한다.

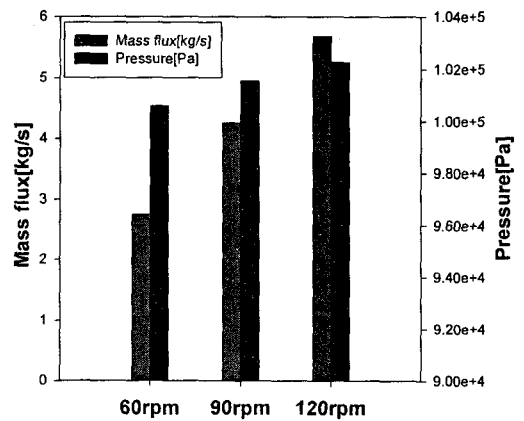


Fig. 10 Comparison of the outlet mass flux and pressure with respect to screw speed

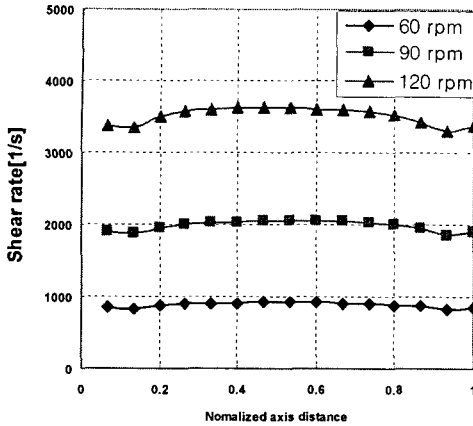


Fig. 11 Comparison of the shear rate with respect to axis distance

Fig. 10 에 나타난 것처럼 회전속도가 증가하면 질량 플럭스의 양은 선형적 증가한다. 그것은 회전 속도의 증가로 인해 속도 성분 w 가 증가 했기 때문이다. 또한 압력은 회전 속도의 차이가 작기 때문에 압력 차가 크지 않지만 스크루 회전 속도와 출구에서의 압력은 비례하는 경향성을 가진다는 것을 파악할 수 있다.

Fig. 11 은 축 방향의 전단 변형 속도 분포를 나타낸 것이다. 축 방향으로 전단 변형 속도 분포는 거의 균일하며 다만, 입출구 주변부보다 축의 중간 부분에서 다소 전단 변형 속도가 높게 분포하는 경향성을 보인다. 그리고 스크루 회전 속도가 증가할수록 전단 변형률 속도가 증가 하고 있다. 스크루 회전 속도에 따르는 평균 전단 변형 속도는 Fig. 13 에 나타내었다.

4.2.1 추적 질점들의 공간 분포

이축 스크루 압출기의 혼합 성능을 분석하기 위해서 속도장에 따른 추적 질점의 공간 분포를 수치 적으로 계산하는 것은 유용한 방법이다. 따라서 본 연구에서는 2 차 Runge-Kutta 수치 적분 기법을 사용하여, 계산된 속도장에 무게가 없는 추적 질점을 띄었을 때 추적 질점들이 어떻게 이동하는지를 수치적으로 계산하여 고분자 용융체의 스크루 압출기 안에서 잔류 시간을 분석하였다. 계산에 사용된 추적 질점의 총 수는 150 개이며 공정 변수를 달리한 각각의 경우에 있어서 잔류 시간 분포의 경향성을 잘 나타내 주었다.

Fig. 12 는 시간에 따라 출구에 도착하는 전체 추적 질점에 대한 비율을 누적하여 표시한 잔류 시간 분포도이다. 스크루 회전속도가 증가 할수록

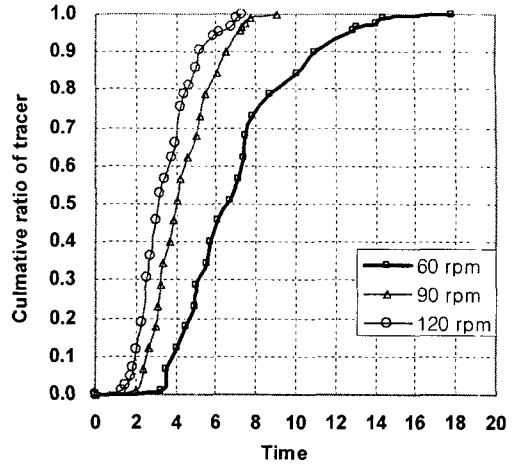


Fig. 12 Residence time distribution obtained from the numerical tracer experiment

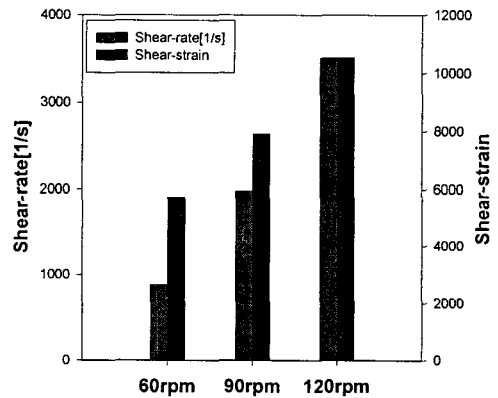


Fig. 13 Comparison of the shear rate and shear strain with respect to screw speed

추적 질점이 스크루 압출기안에 잔류하는 시간이 작아지고 반대로 스크루 회전 속도가 낮아질수록 추적 질점의 스크루 압출기 안에서의 잔류 시간이 증가한다. 이러한 잔류 시간 분포도는 스크루 압출기의 혼합 성능을 분석하는데 중요한 지표로서, 잔류 시간과 혼합 성능은 비례한다. 그러나 변수가 스크루 회전속도일 때는 잔류 시간 분포와 함께 전단 변형 속도가 함께 고려된 전단 변형률이 혼합 성능의 지표가 되며, 일반적으로 전단 변형률과 혼합 성능은 비례한다.

Fig. 13 은 회전 속도에 따른 전단 변형률의 변화를 나타내고 있으며 회전 속도가 높아짐에 따라

전단 변형률도 커지고 있다. 따라서 본 연구에 사용된 스크루 압출 시스템은 고속의 회전속도에 혼합 성능이 높아진다.

4.3 역 방향 회전 스크루 압출기의 유동 특성

이 절에서는 앞에서 기술되지 않았던 역 방향 회전 스크루 압출기의 유동 특성을 동 방향 회전 스크루 압출기의 유동 특성과 비교 제시한다.

Fig. 14 는 스크루 회전 방향에 따른 단면에서의 속도 벡터를 표시한 것이다. 그림에서 나타난 속도 벡터를 분석하면 Fig. 14(a)의 역 방향 회전 스크루 압출기 경우 양쪽의 translation 영역에 있던 고분자 용융체가 nip 영역에서 서로 만나서 섞인다. 반면 Fig. 14(b)의 동 방향 회전 스크루 압출기의 경우에는 양쪽의 translation 영역에 있던 고분자 용융체들은 nip 영역에서 만나지 않고 한쪽 방향으로 회전하는 유동 특성을 보인다. 이러한 유동 특성은 역 방향 회전 스크루 압출기가 동 방향 회전 스크루 압출기에 비하여 혼합 성능이 우수할 것이라는 것을 예측하게 한다.

Fig. 15 는 단면에서의 속도 성분 w 를 나타낸 것으로 동 방향 회전 스크루 압출기의 유동이 빠르기 때문에 Fig. 16 에 나타난 것과 같이 출구에서

에서 토출되는 질량플럭스 양도 많다. 하지만 스크루의 회전 속도는 같기 때문에 Fig. 16 에 나타난 것과 같이 전단 변형 속도는 큰 차이를 보이지 않는다. 따라서 회전 방향에 따른 혼합 성능 비교에는 잔류 시간 분포만으로 가능하다.

한편 Fig. 17 은 회전 방향에 따른 잔류 시간 분포를 나타내었다. Fig. 17 에 나타난 것과 같이 추적질점의 약 90%가 출구에 도달하기까지 동 방향 회전 스크루 압출기는 약 6.5 초가 걸렸고, 역 방향 회전 스크루 압출기의 경우에는 약 8 초가 걸렸다. 그 이유는 축 방향으로 back-flow 의 양이 역 방향 회전 스크루 압출기가 동 방향 회전 스크루 압출기에 비해 많기 때문이다. 이것은 역 방향 회전 스크루 압출기가 동 방향 회전 스크루 압출기에 비해 혼련성이 우수함을 말해 준다.

Fig. 14 에 나타난 정성적인 유동 특성과 Fig. 17 에 나타난 잔류 시간 분포와 같은 정량적인 자료를 바탕으로 역 방향 회전 스크루 압출기의 혼련성이 우수함을 알 수 있다. 하지만 혼련성이 우수한 만큼 이송할 수 있는 질량 유속의 양이 적다는 것도 고려되어야 한다.

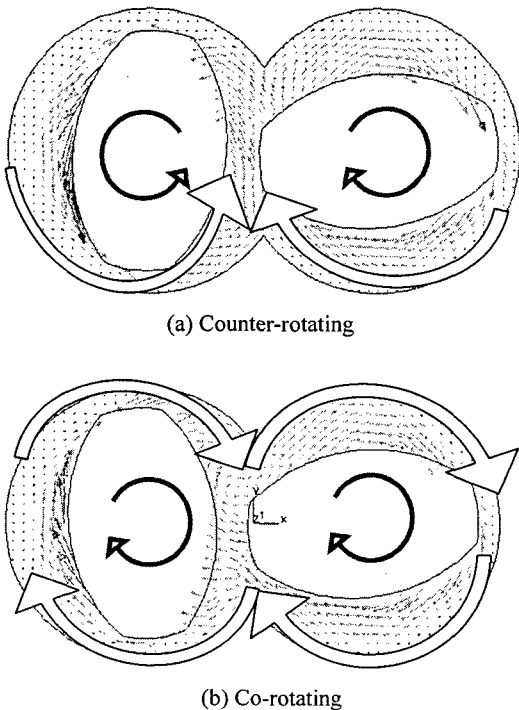


Fig. 14 Velocity vector on the cross section

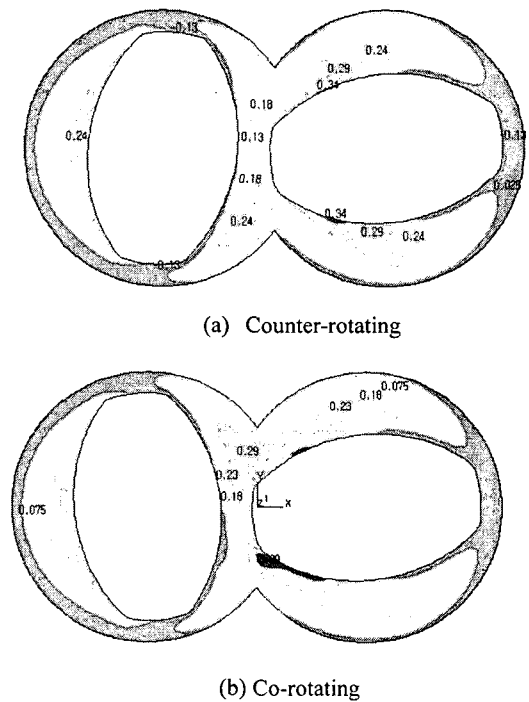


Fig. 15 Velocity component w distribution on a cross section ; rpm =90, unit[m/s]

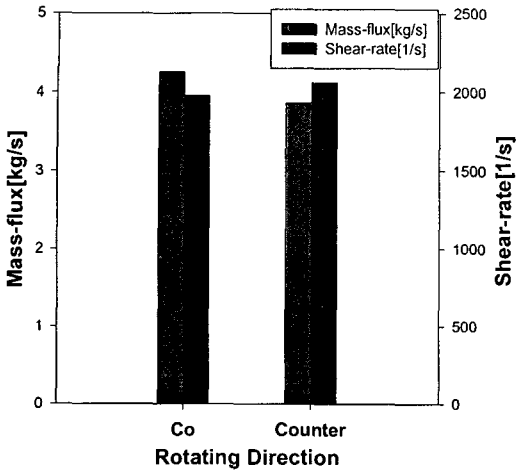


Fig. 16 Comparison of mass flux and shear rate with respect to rotating direction

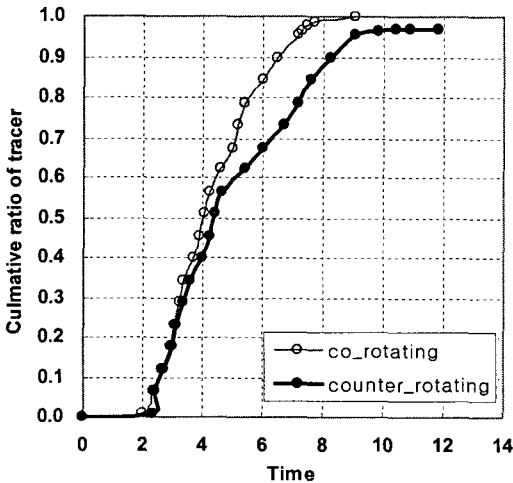


Fig. 17 Residence time distribution obtained from the numerical tracer experiment

5. 결론

본 논문에서는 상용 유한 체적 프로그램인 STAR-CD 를 사용하여 동 방향 회전 스크루 압출기의 속도장을 공정 변수인 스크루 회전 속도에 따라 구하고 각 회전 속도에서 혼합 성능을 비교했다. 또한 회전 속도 90 rpm 에서의 역 방향 회전 스크루 압출기내 유동을 계산하여 동 방향 회전 스크루 압출기의 유동 특성과 비교하고 스크루

구성 및 회전 방향 에 따른 혼합 성능을 비교 분석하였다. 이를 종합하여 아래와 같은 결론을 얻었다.

(1) 이축 스크루 압출기에서 속도 성분 u, v 는 스크루 주변에서 높게 나타나고 속도 성분 w 는 두 스크루가 교차하는 nip 영역에서 크게 나타나는데 이 것은 nip 영역에서 두 스크루 위상 차에 의한 펌핑 효과 때문이다.

(2) 이축 스크루 압출기에 압력은 유동 공간이 작은 스크루와 배럴 사이 틈에서 높게 나타나고 온도는 점성 소산으로 인해 스크루 근처에서 높다.

(3) 회전 속도가 높아 질수록 출구에서 토출되는 질량 유속, 출구에서의 압력, 전단 변형 속도 등은 높아지고 고분자 용융체가 스크루 압출기 안에 머무르는 잔류 시간은 감소한다.

(4) 혼합 성능의 지표인 변형률은 높은 회전 속도에서 높게 나타난다. 즉 고 rpm 에서 우수한 혼합 성능을 나타낸다.

(5) 동 방향 회전 스크루 압출기와 역 방향 회전 스크루 압출기는 같은 회전 속도에서는 비슷한 전단 변형 속도를 나타내고, 고분자 용융체가 스크루 압출기안에 머무르는 잔류 시간은 역 방향 회전 스크루 압출기가 동 방향 회전 스크루 압출기에 비해 더 크기 때문에 혼합 성능은 역 방향 회전 스크루 압출기가 더 우수하다.

(6) 역 방향 스크루 압출기의 혼합 성능이 동 방향 스크루 압출기에 비해 우수하지만 출구에서 토출되는 양은 동 방향 스크루 압출기가 더 많았다. 따라서 고분자 용융체의 이송을 목적으로 할 시에는 동 방향 스크루 압출기를 사용하고 고분자 용융체의 혼합이 더 중요한 공정에는 역 방향 스크루 압출기를 사용하는 것이 적절하다.

후 기

본 연구는 학술진흥재단의 중점연구소 과제 (과제번호: KRF-2002-005-D00010)의 일환으로 수행되었으며 이에 관계자 여러분께 감사 드립니다

참고문헌

(1) Ghoreishy, M. H. R. and Razavi Nouri, M., 1999, "Finite Element Analysis of Thermoplastic Melt Flow through the Metering and Die Region of Single Screw Extruders," *Journal of Applied Polymer Science*, Vol 74, pp 676~689
 (2) Kajiwara, T., Nagashima, Y., Nakano, Y. and

- Funatsu, K., 1996, "Numerical Study of Twin-Screw Extruder by Three-Dimensional Flow Analysis-Development of Analysis Technique and Evaluation of Mixing Performance for Full flight Screws," *Polymer Engineering and Science*, Vol. 36, No. 16, pp 2142~2152
- (3) Jaluria, Y., Karwe, M. V. and Sernas, V., 1996, "Transport in a Twin-Screw Extruder for the processing of Polymers," *Polymer Engineering and Science*, Vol.36, No. 11, pp 1531~1540
- (4) Cheng, H. and zloczower, I. M., 1998, "Distributive Mixing in Conveying Elements of z ZSK-53 Co-rotating Twin Screw Extruder," *Polymer Engineering and Science*, Vol.38, No. 6, pp 926~935
- (5) Bravo, V. L. and Hrymak, A. N., 2000, "Numerical Simulation of Pressure and Velocity Profiles in Kneading Elements of a Co-Rotating Twin Screw Extruder," *Polymer Engineering and Science*, Vol.40, No. 2, pp 525~541
- (6) Ishikawa, T., Kihara, S. I. and Funatsu, K., 2000, "3-D Numerical Simulations of Nonisothermal Flow in Co-Rotating Twin Screw Extruders," *Polymer Engineering and Science*, Vol. 40, No. 2, 357~364
- (7) Yoshinaga, M., Katsuki, S., Miyazaki, M., Liu, L., Kihara, S. I. and Funatsu, K., 2000, "Mixing Mechanism of Three-Tip Kneading Block in Twin Screw Extruders," *Polymer Engineering and Science*, Vol.40, No. 1, pp 168~178
- (8) Shearer, G. and Tzoganakis, C., 2000, "The Effects of Kneading Block Design and Operating Conditions of Distributive Mixing in Twin Screw Extruders," *Polymer Engineering and Science*, Vol.40, No. 5, pp 1095~1106
- (9) Ishikawa, T. and Amano, T., 2002, "Flow Pattern and Mixing Mechanisms in the Screw Mixing Element of a Co-Rotating Twin-Screw Extruder," *Ploymer Engineering and Science*, Vol. 42, No. 5, pp 925-939
- (10) Bakalis, S. and Karwe, M. V., 2002, "Velocity Distributions and Volume Flow Rates in the Nip and Translational Regions of a Co-Rotating, Self-Wiping, Twin-Screw Extruder," *Journal Of Food Engineering*, Vol. 51, pp 273~282
- (11) Bravo, V. L., Hrymak, A. N. and Wricht, J. D., 2004, "Study of Particel Trajectories, Residence Times and Flow Behavior in Kneading Discs of Intermeching Co-Rotating Twin-Screw Extruders," *Polymer Engineering and Science*, Vol. 44, No. 4, pp 779~793
- (12) YE, Y. S., Kim, H.B., Kim, N. S. and Lee, J. W., 2005, "A Study on Analysis of Polymer Extruder Process using Finite Element Method," *KSMTE*, Vol. 29, No. 1, pp 145~155
- (13) Linjie, Z., Kwabena, A. N. and Kun, S. H., 2005, "Investigation of Mixing Mechanisms and Energy Balance in Reactive Extrusion Using Three-Dimensional Numerical Simulation Method," *International Journal of Heat and Mass Transfer*, Vol. 48, pp 3411~3422