

<학술논문>

DOI <http://dx.doi.org/10.3795/KSME-B.2016.40.1.009>

ISSN 1226-4881(Print)
2288-5324(Online)

CFD를 이용한 테일러 반응기의 유동 특성에 관한 수치적 연구

이승호* · 심규환** · 전동협***†

* 연세대학교 화공생명공학과, ** 서울대학교 기계항공공학부, *** 동국대학교 기계부품시스템공학과

Numerical Study on Fluid Flow Characteristics in Taylor Reactor using Computational Fluid Dynamics

Seung-Ho Lee*, Kyu Hwan Shim** and Dong Hyup Jeon***†

* Dept. of Chemical and Biomolecular Engineering, Yonsei Univ.

** School of Mechanical and Aerospace Engineering, Seoul Nat'l Univ.

*** Dept. of Mechanical System Engineering, Dongguk Univ.

(Received June 1, 2015 ; Revised November 7, 2015 ; Accepted November 17, 2015)

Key Words: Computational Fluid Dynamics(전산유체역학), Taylor Reactor(테일러 반응기), Taylor Flow(테일러 유동), Particle Residence Time(입자체류시간), Particle Tracing(입자추적)

초록: 본 연구는 테일러 반응기내 각속도와 유입속도 변화에 따른 테일러 유동의 변화와 입자의 체류시간 변화를 전산수치해석 기법을 이용하여 알아보았다. 반응기내 유동은 각속도가 증가함에 따라 점점 불안정해지는 경향을 보였다. 유동은 레이놀즈 수의 증가에 따라 CCF, TVF, WVF, MWVF 영역으로 이동하게 되고 각 영역에서 상이한 유동특성을 보였다. 유입속도의 변화가 테일러 유동에 영향을 주는 것을 확인하였다. 각속도가 빠를수록, 그리고 유입속도가 느릴수록 입자의 체류시간과 표준편차는 증가하였다.

Abstract: This study investigated the variations of Taylor flow and particle residence time in a Taylor reactor according to the changes of angular velocity and inlet velocity using computational fluid dynamics technique. The results showed that the fluid in a reactor became unstable with an increase of angular velocity. The flow moved to the regions of CCF, TVF, WVF and MWVF resulting in an increase of Reynolds number. Accordingly, the flow characteristics were different for each regions. We confirmed that the inlet velocity influences the Taylor flow. The particle residence time and standard deviation increased with an increase of angular velocity and a decrease of inlet velocity.

1. 서론

테일러 반응기(Taylor flow)는 Fig. 1과 같이 중심이 같고 반지름이 다른 두 실린더 내부사이로 유체가 흐르고 내부 실린더가 회전할 경우, 반응기 내에는 테일러 유동(Taylor flow)이 발생하며 이러한 테일러 유동을 이용하여 반응물을 혼합, 생산하는 장치이다. 유동이 임계값 보다 작은 경우에는 쿠에트 유동(Coutte flow)이 형성되고, 임

계값 이상으로 실린더를 회전시키면 원심력에 의하여 유체는 회전하는 실린더의 반경 방향으로 밀려나는 경향이 생기며 유체는 불안정하게 되어 축 방향을 따라 일정한 패턴이 생기게 된다. 이때 이전의 층류유동에서는 볼 수 없었던 한 쌍으로 이루어진 대칭형의 테일러 와류(Taylor vortex)가 형성된다.⁽¹⁻³⁾ 테일러 유동은 무차원 수인 테일러 수(Taylor number, Ta)나 레이놀즈 수(Reynolds number, Re)의 변화에 따라 각각 다른 유동형태를 보인다. 반응기의 모델이 결정되면 변수 중 내부 실린더의 반지름과 두 실린더 사이

† Corresponding Author, jeondh@dongguk.ac.kr

© 2016 The Korean Society of Mechanical Engineers

의 폭이 결정이 되고 내부 유체가 결정되면 동점성 계수가 결정이 되므로 테일러 유동은 내부 실린더의 회전 속도를 주요 변수로 두고 무차원 수를 결정할 수 있다. 쿠에트 유동에서 테일러 유동으로 흐름이 바뀌는 지점을 임계 테일러 수(Critical Taylor number, Ta_c) 혹은 임계 레이놀즈 수(Critical Reynolds number, Re_c)로 정의한다. 일반적으로 테일러 유동은 내부 실린더의 회전속도가 클 때, 그리고 유입 속도가 느릴 때 잘 형성된다. 이는 유입속도 또한 임계 테일러 수에 영향을 미치는 것을 의미하며, 이와 같은 관계는 $Ta_c = Ta_0 + 26.5Re_z^2$ 로 표현된다.^(4,5) 여기서 Ta_0 는 축 방향의 유동이 없을 때의 임계 테일러 수, Re_z 는 유체의 축 방향 레이놀즈 수이며 $Re_z = \frac{v_z d}{\nu}$ 로 표시된다. v_z 는 축 방향 속도를 나타내며 유체의 흐름이 있을 때의 임계 테일러 수를 정의한 것이다. 반응기가 축 방향으로 무한히 길어 축 방향의 속도가 없을 때 임계 테일러 수(Ta_0)는 1708로 정의된다.

테일러 수가 임계 테일러 수보다 작을 때 반응기 내부에서는 Circular Couette Flow(CCF)가 형성되며, 이보다 클 때는 Taylor Vortex Flow(TVF)가 형성된다. TVF에서는 두 개의 와류가 한 쌍을 이루며 역방향으로 회전하는 와류들이 반응기의 축 방향으로 연속적으로 생성된다. 내부 실린더의 회전속도를 증가시키면 TVF는 새로운 형태인 Wavy Vortex Flow(WVf)로 천이된다. WVf는 TVF보다 불안정성이 증가하여 균일하게 생성되던 테일러 와류가 실린더의 축을 기준으로 대칭성이 떨어진 형태로 나타나고 계속해서 각속도를 증가시켜주게 되면 변형이 커진 Modulated Wavy Vortex Flow(MWVf)로 천이된다. 테일러 수(Ta)가 임계 테일러 수의 1000배 이상 증가하는 경우 Turbulent Taylor Vortex Flow(TTVF)로 불리는 유동으로 변하고 되며 부분적으로 불규칙한 와류가 형성된다. 테일러 유동이 형성되는 영역에서는 내부 실린더의 회전속도가 빠를수록 테일러 와류의 영역은 증가하고, bypass 영역은 감소한다고 알려져 있다. 각 속도의 증가와 함께 불안정성이 증가하면, 유체 유동은 Turbulent flow로 발달하게 되고 더 이상 테일러 유동은 관찰되지 않는다.⁽⁶⁻⁹⁾

테일러 반응기는 1923년 G. I. Taylor⁽¹⁾에 의하

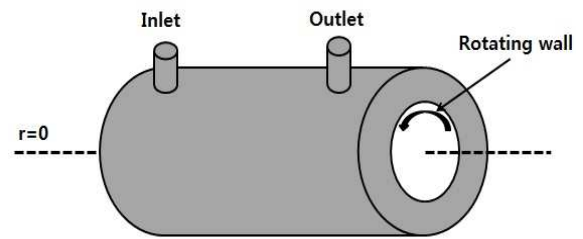


Fig. 1 Schematic of Taylor reactor

여 처음으로 발견된 이후 많은 영역에 응용되어 사용되고 있으며, 전산유체역학(Computational fluid dynamics, CFD) 기법의 발달로 인하여 테일러 유동은 전산모사로도 많이 연구되고 있다. 최근에는 CFD 기법을 이용하여 단순한 테일러 반응기가 아닌 실린더 내부에 Helical baffle를 설치하여 내부 유동의 특성변화와 화학작용에 대한 연구도 진행되었다.⁽¹⁰⁾ Kim 등⁽¹¹⁾은 테일러 반응기를 이용하여 리튬이온전지(Lithium-ion battery, LIB)의 양극재를 생산하기 위한 연구를 하였다. 테일러 반응기의 작동조건과 입자들의 화학 반응을 알아보았으며, 과포화 상태에서 RPM을 증가시킬수록 테일러 와류의 불안정성은 증가하고 입자들의 크기가 작아짐을 확인하였다. Choi 등⁽¹²⁾은 테일러 반응기를 이용하여 $0.34Li_2MnO_3$ 와 $0.66LiMn_{0.63}Ni_{0.24}Co_{0.13}O_2$ 를 공침(co-precipitation)하는 연구를 진행하였다. 테일러 반응기는 LIB의 양극재 뿐만 아니라 다양한 물질의 결정화기(crystallizer)로서 화학공정에 많이 연구되고 있다. Aljishi 등⁽¹³⁾은 테일러 반응기의 유동 특성을 이용하여 젯산 칼슘이 응집되는 것을 억제하여 약 $40 \mu m$ 크기의 결정체 제조에 성공하였으며, Ahmad 등⁽¹⁴⁾은 테일러 반응기의 유량을 증가시켜 입자들의 체류시간을 감소시키므로써 $40\sim 50 \text{ nm}$ 의 바륨 입자를 석출하는 연구를 하였다. Lee 등⁽¹⁵⁾은 Turbulent 영역에서 카드뮴 석출의 효율을 높이는 연구를 진행하였다. 테일러 반응기는 생물학분야에서도 응용되는데, Masuda 등⁽¹⁶⁾은 녹말 가수분해 실험을 통하여 가수분해를 위한 적정 작동 조건들을 제시하였고, Qiao 등⁽¹⁷⁾은 다공성지지체를 가진 세포를 배양하여 PEX 단백질을 제조하는 방법을 연구하였다. 더 나아가서 광영양생물들의 광합성작용을 하는 바이오 필름을 테일러 반응기에 응용하여 새로운 개념의 Lab-scale의 Bio-reactor를 개발하려는 연구도 진행되고 있

다.⁽¹⁸⁾ 또한 Lee 등⁽¹⁹⁾과 Wardle and Lee⁽²⁰⁾는 각각 CFD와 격자볼츠만법(Lattice Boltzmann Method, LBM)을 이용하여 테일러 반응기의 유동특성을 연구하였다. RPM증가에 따른 유동현상을 보여주었으나 각 영역별 유동특성을 분석하지는 않았다.

본 연구는 LIB의 양극재 제조의 기초연구를 위하여 테일러 반응기 내부에서의 각 영역별 유동특성과 Li(Mn_xNi_yCo_z)O₂ (NMC) 입자 거동을 CFD 기법을 이용하여 전산모사 하였다. 테일러 반응기를 2차원 모델링하였고, 유입속도와 내부 실린더의 회전속도에 따른 반응기 내부의 테일러 유동 변화를 관찰하였다. 3차원 모델링의 경우 복잡한 형상을 구현할 수 있고 높은 정확도를 얻을 수 있다는 장점이 있지만 높은 해석비용을 요구하고 있다. 테일러 반응기의 형상이 축대칭이며 본 연구는 테일러 반응기내 각 영역별 유동특성의 파악이 목적이므로, 비교적 간단한 구조인 Lab-scale의 테일러 반응기를 대상으로 2차원 모델링을 실시하였다. 또한 반응기 내 유체의 유동과 NMC 입자의 체류시간과의 관계를 수치적 방법을 이용하여 측정하였다. NMC는 반응기 내에서 반응물질들의 화학, 침전반응을 통하여 생성되나, 유체유동과 입자와의 관계만 알아보기 위하여 복잡한 공침반응과정은 고려하지 않았다. 이를 통하여 각 영역별 NMC 입자의 평균 체류시간과 적정 작동조건을 고찰하였다.

2. 수치해석

2.1 지배방정식

유동장 내 속도와 압력을 계산하기 위하여 Comsol Multiphysics를 이용하여 CFD 해석을 수행하였다. 테일러 수가 임계 테일러 수의 1000배 이상 증가하는 경우 난류유동이 형성되므로, 테일러 수를 기준으로 층류영역과 난류영역으로 나누어 각각 다른 지배방정식이 사용되었다. 층류영역에서는 다음과 같은 연속 방정식(Continuity equation)과 운동량 방정식(Momentum equation)이 계산에 사용되었다.

$$\rho \frac{\partial \mathbf{u}}{\partial t} + \rho(\mathbf{u} \cdot \nabla) \mathbf{u} = \nabla[-p\mathbf{I} + \mu(\nabla \mathbf{u} + (\nabla \mathbf{u})^T)] + F \quad (1)$$

$$\rho \nabla \cdot \mathbf{u} = 0 \quad (2)$$

여기서 \mathbf{u} 는 속도벡터, ρ 는 밀도, t 는 시간, μ

는 점성계수, F 는 유체에 작용하는 외력을 나타낸다. 실린더 내부의 유체의 특성을 나타내는 무차원수인 레이놀즈 수와 테일러 수는 다음과 같이 정의한다.

$$Re = \frac{r_i \omega d}{\nu} \quad (3)$$

$$Ta = \frac{r_i w^2 d^3}{\nu^2} \quad (4)$$

여기서 r_i 는 내부 실린더의 반지름, w 는 내부 실린더의 회전속도, d 는 외부와 내부 실린더 사이 간격, ν 는 내부 유체의 동점성계수를 나타낸다. 레이놀즈 수와 테일러 수는 같은 변수를 공유하기 때문에 다음과 같은 관계를 가진다.

$$Ta = Re^2 \frac{d}{r_i} \quad (5)$$

반응기 내부 실린더의 회전 속도의 증가로 $Ta \geq 1000Ta_c$ 가 되면 반응기 내 유동은 난류유동으로 천이된다. 난류영역에서는 κ - ϵ 모델을 이용하여 연속방정식과 운동량방정식을 계산하였다. 난류 운동에너지 κ 와 소산률 ϵ 의 계산을 위하여 다음과 같은 식이 사용되었다.

$$\rho \frac{\partial \mathbf{u}}{\partial t} + \rho(\mathbf{u} \cdot \nabla) \mathbf{u} = \nabla \cdot [-p\mathbf{I} + (\mu + \mu_T)(\nabla \mathbf{u} + (\nabla \mathbf{u})^T) - \frac{2}{3} \rho \kappa \mathbf{I}] + F \quad (6)$$

$$\rho \nabla \cdot \mathbf{u} = 0 \quad (7)$$

$$\rho \frac{\partial \kappa}{\partial t} + \rho(\mathbf{u} \cdot \nabla) \kappa = \nabla \cdot \left[\left(\mu + \frac{\mu_T}{\sigma_k} \right) \nabla \kappa \right] + P_k - \rho \epsilon \quad (8)$$

$$\rho \frac{\partial \epsilon}{\partial t} + \rho(\mathbf{u} \cdot \nabla) \epsilon = \nabla \cdot \left[\left(\mu + \frac{\mu_T}{\sigma_k} \right) \nabla \epsilon \right] + C_{\epsilon 1} \frac{\epsilon}{k} P_k - C_{\epsilon 2} \rho \frac{\epsilon^2}{k} f_{\epsilon}(\rho, \mu, k, \epsilon, \mathbf{I}_w) \quad (9)$$

$$\nabla G \cdot \nabla G + \sigma_w G(\nabla \cdot \nabla G) = (1 + 2\sigma_w) G^4, I_w = \frac{1}{G} - \frac{I_{ref}}{2} \quad (10)$$

$$\mu_T = \rho C_{\mu} \frac{k^2}{\epsilon} f_{\mu}(\rho, \mu, k, \epsilon, I_w) \quad (11)$$

$$P_k = \mu_T [\nabla \mathbf{u} : (\nabla \mathbf{u} + (\nabla \mathbf{u})^T)] \quad (12)$$

여기서 G 는 평균속도 구배에 의하여 발생하는 난류 운동 에너지, μ_T 는 난류점성계수를 나타내며, P_k 는 난류운동에너지 생성항, f_{ϵ} 와 f_{μ} 는 각각의 Damping function이다. σ_k 과 σ_{ϵ} 는 κ 와 ϵ 에

Table 1 Geometric parameters of Taylor reactor

	Symbol	Length(m)
Inner radius	r_i	0.042
Outer radius	r_o	0.051
Cylinder distance	d	0.09
Cylinder length	L	0.417

대한 프란틀 수(Prandtl number, Pr)를 의미하며, 각각 1.4와 1.5를 사용하였다. C_{e1}, C_{e2}, C_μ 는 상수이며 각각 1.5, 1.9, 0.09가 사용되었다.

2.2 입자추적

반응기 내 유체유동 속에서 NMC 입자들의 체류시간을 알아보기 위하여 입자추적 모델을 이용하여 입자들의 체류시간을 측정하였다. 유체 내에서 이동하는 입자와 입자간의 충돌은 무시할 수 있다고 가정하면, 입자들은 뉴턴의 제 2법칙으로 정의할 수 있으며 다음과 같이 정의된다.

$$\frac{dm_p \mathbf{v}}{dt} = \mathbf{F}_t \quad (13)$$

여기서 m_p 는 입자의 질량, \mathbf{v} 는 벡터성분의 속도, \mathbf{F}_t 는 입자에 작용하는 모든 힘을 의미한다. 입자에 작용하는 힘으로는 유체의 항력, 부력, 중력과 같은 힘이 있으나 본 연구에서는 유체의 이동과 입자간의 관계만을 알아보기 위하여 유체의 항력만을 고려하였다. 항력 \mathbf{F}_d 는 Stocke's law에 따라 다음과 같이 정의된다.

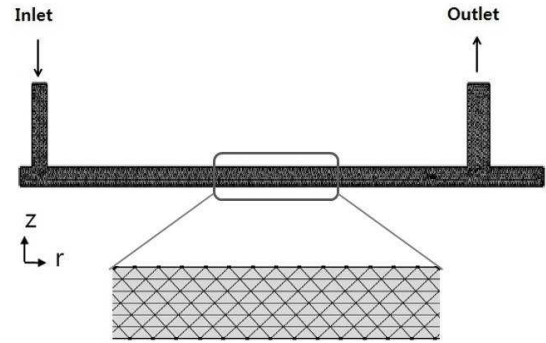
$$\mathbf{F}_d = \frac{1}{\tau_p} m_p (\mathbf{u} - \mathbf{v}) \quad (14)$$

$$\tau_p = \frac{\rho_p d_p^2}{18\mu} \quad (15)$$

여기서 τ_p 는 입자의 특성 시간을 의미하며, ρ_p 와 d_p 는 각각 입자의 밀도와 직경을 나타낸다.

2.3 모델 및 경계조건

본 연구에 사용된 테일러 반응기의 모델과 격자를 Fig. 2에 나타내었다. 유체는 좌측 상단에 위치한 주입구로부터 주입되며, 반응기 내에서 테일러 흐름을 형성하고, 우측 상단에 위치한 출구를 통해 빠져나간다. 동심의 원형실린더이므로 축대칭의 r-z 좌표계를 이용하여 Lab-scale의 반응

**Fig. 2** Two dimensional model of Taylor reactor and meshes

기를 모델링 하였으며 반응기의 상세한 치수는 Table 1에 표시하였다. CFD 해석을 위하여약 3300개의 격자가 사용되었으며, 사용된 격자의 형상은 triangular mesh이다.

입구경계조건으로는 속도경계(Velocity Boundary)를 적용하였고, 입구속도 변화에 따른 유동의 특성을 고찰하기 위하여 4가지 속도조건(15×10^{-5} , 10×10^{-5} , 5×10^{-5} , 1×10^{-5} m/s)을 고려하였다. 출구는 압력경계(Pressure Boundary)를 설정하였고 대기압을 적용하였다. 내부 실린더는 축방향으로 각속도 w 만큼 회전하는 Moving wall condition을 적용하였고, 각속도는 각각 0.266, 0.359, 0.709, 3.054, 9.285 rad/s로 회전하게 하였다. 이는 각각 $Re = 100, 135, 267, 1150, 3500$ 에 해당한다. 외부 실린더 및 실린더 외벽에는 벽조건(Wall Boundary)을 설정하였고 No slip 조건을 적용하였다.

입자추적을 통한 체류시간을 측정하기 위하여 입구에 100개의 입자(particle)를 주입하였고, 출구에는 Disappear 조건을 적용하여 입자가 출구를 지나게 되면 입자가 모델에서 사라지게 하였다. 외부와 내부 실린더의 벽 조건으로는 Bounce 조건을 설정하여 입자가 실린더의 벽과 충돌하게 되면 입자는 입사각과 동일한 반사각과 힘을 가지고 튕겨나가게 설정하였다. 반응기 내부의 작동 유체는 상온에서의 H_2O 을 적용하여, 밀도와 동점성 계수는 각각 998 kg/m^3 와 $1.006 \times 10^{-6} \text{ m}^2/\text{s}$ 을 적용하였고, 입자는 지름이 $8 \mu\text{m}$ 인 미세한 크기의 NMC 입자가 고려되었다.

3. 결 과

3.1 격자 의존성 (Grid Independency)

격자에 따라 수치해에 영향을 미치지 않은 최

적격자수를 찾기 위하여 동일한 조건에서 격자수를 변화시키며 유동을 비교하였다. Fig. 3은 격자수가 각각 2800, 3300, 4000개 일 때 반응기 내 유선(streamline)을 나타내며, 레이놀즈 수가 135인 TVF 영역에서 해석을 수행하였다. 해석결과 모두 와류와 bypass flow가 확인되었다. 격자수가 2800개인 Fig. 3(a)에서는 와류와 bypass flow의 크기가 크게 나타난 반면, 격자수가 3300개인 Fig. 3(b)에서는 와류와 bypass flow의 크기가 작게 나타났으며, 이에 따른 와류의 개수도 늘어났다. 격자수가 4000개인 Fig. 3(c)에서는 Fig. 3(b)와 유사한 결과를 보였다. 또한 격자별 해석 시간은 1 step당 각각 430 s, 650 s, 960 s 이었다. Fig. 3의 결과로부터 격자수에 따라 와류와 bypass flow가 다르게 관찰되나 불필요하게 많은 격자수는 해석 비용을 높이므로, 본 모델의 경우 격자의 수는 3300개가 적절한 것으로 판단되어 이를 적용하였다.

3.2 모델의 검증

본 연구에 사용된 수치해석 모델의 타당성을 검증하기 위하여 Wereley and Lueptow⁽⁵⁾의 실험결과와 수치해석 결과를 Fig. 3와 같이 비교, 분석하였다. 수치해석 조건은 실험조건과 동일하게 레이놀즈 수를 124로 설정하였고 반응기 내부로 유체의 유입과 유출은 없으며 내부 작동유체는 실험과 동일하게 상온에서의 H₂O을 이용하여 계산하였다. 수치해석에 사용된 모델의 반경비(η)와 장비(I)는 각각 0.823와 46.3으로 실험에서의 반

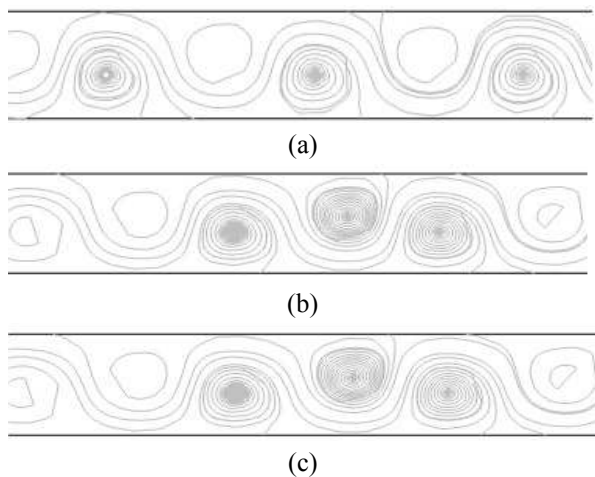


Fig. 3 Streamline at various number of mesh. (a) 2800, (b) 3300, (c) 4000

경비와 장비(0.83과 47.7)와 유사하며, 그 이외의 조건들은 모두 동일하게 설정하였다.

Fig. 4는 반경방향의 좌표에 따라 해당 좌표에서의 축 방향 속도 성분을 비교한 것이다. 가로축 ζ 는 반경방향 좌표에서 내부 실린더의 반지름 r_i 의 길이를 빼고 실린더 사이 간격 d 로 나누어 무차원화 한 것이며 $\zeta = \frac{(r - r_i)}{d}$ 와 같이 정의한다. 세로축은 반응기의 축방향 속도 V_z 를 내부 실린더의 회전속도로 나누어 무차원화 시켰다. 그림에서 보는 바와 같이 수치해석 결과와 실험결과는 매우 유사한 경향을 보이는데, 이는 Wereley and Lueptow의 실험과 수치해석 모델의 반경비가 큰 차이가 없기 때문으로 판단된다. 그래프가 물결모양을 이루는 것은 반경방향으로는 와류가 하나만 발생하기 때문이다. 따라서 와류의 중심에서의 속도가 0이며, 반응기의 내벽과 외벽에서는 점착 조건(No slip)으로 인하여 축방향 속도는 0임을 알 수 있다. 이와 같은 결과를 바탕으로 본 연구에서 사용된 수치해석 모델이 실험결과와 비교하여 비교적 타당한 결과를 보이는 것을 확인하였고, 이를 이용해 테일러 수의 증가에 따른 작동유체의 유동 특성과 입자의 체류시간에 대한 관계를 수치적으로 알아보았다.

3.3 내벽의 회전속도에 따른 테일러 유동

테일러 반응기의 내부유동은 실린더 내벽의 회전 속도에 따라 테일러 수 혹은 레이놀즈 수가 달라지고, 이에 따라 각각 다른 유동형태를 보인다. 앞서 설명한 바와 같이, 반응기 내의 유동형태는 레이놀즈 수 혹은 테일러 수에 따라 CCF,

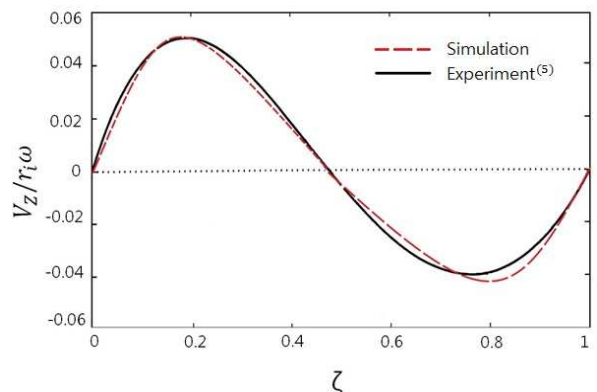


Fig. 4 Validation of Taylor flow

TVF, WVF, MWVF 영역으로 구분되고, 각 영역에서의 유동은 각각 다른 특징을 갖게 된다. 각 유동 영역의 특징을 고찰하기 위하여 유입속도는 10×10^{-5} m/s로 고정한 후, 실린더 내벽의 회전 속도만 변화시키며 반응기 내 유동변화를 관찰하였다. Fig. 5은 레이놀즈 수가 100($Re = 100$) 일 때, 테일러 반응기 내의 속도분포와 부분 확대한 유선(streamline)과 속도벡터(Velocity vector)를 함께 나타낸다. 입구를 통하여 유입된 유체는 반응기의 축 방향을 따라 출구로 이동하게 된다. 이 영역은 레이놀즈 수가 임계 레이놀즈 수 이하임으로 CCF 영역에 해당한다. 앞서 언급한 바와 같이, CCF 영역에서는 테일러 와류와 bypass flow는 형성되지 않고, 두 평판 사이를 유체가 이동하게 된다. 따라서 그림에서 보는 바와 같이 일정한 흐름의 Couette flow가 형성되었고 테일러 와류는 관찰되지 않았다. 하지만 실제 3차원 형

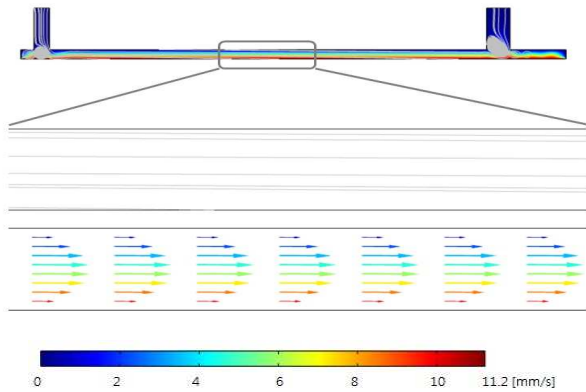


Fig. 5 Velocity magnitude contour with streamline and velocity at $Re = 100$

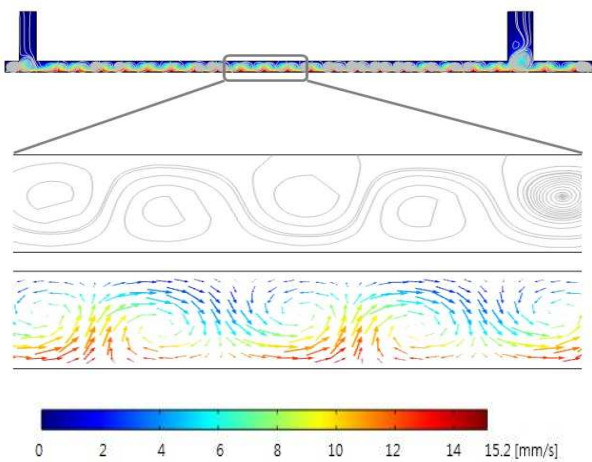


Fig. 6 Velocity magnitude contour with streamline and velocity at $Re = 135$

상의 반응기에서는 유체는 단순히 출구를 향해 직진하는 것이 아니라, 실린더 내벽이 회전하는 방향을 따라 유선을 그리며 출구로 이동하게 될 것으로 예상된다.

Fig. 6는 레이놀즈 수가 135($Re = 135$) 일 때의 테일러 반응기 내의 속도분포이며, 부분 확대한 유선과 속도벡터를 함께 나타내었다. 이 반응기 내부의 유동은 임계 레이놀즈 수 보다 높은 TVF 영역에 해당하며, 테일러 와류가 형성됨을 그림과 같이 확인할 수 있다. 테일러 와류는 반응기의 내벽과 외벽을 둘러싸며 고리모양의 와류를 형성하고 있으며, 반응기 길이방향을 따라 일정한 간격으로 평행하게 적재되어 있는 형태를 보이고 있다. 벽 조건이 no slip이므로, 유체의 속도는 회전하는 내벽으로부터 직접 힘을 전달받고 그

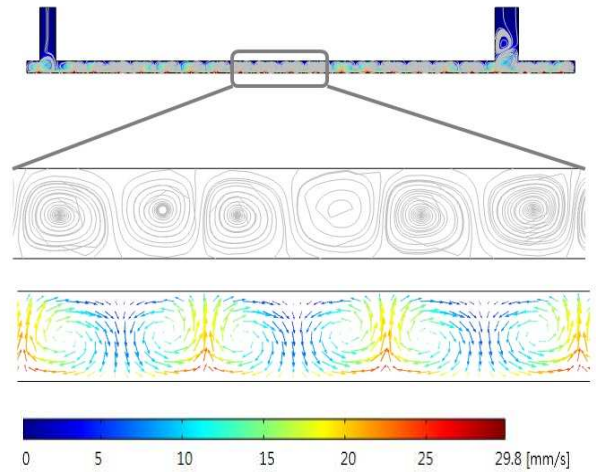


Fig. 7 Velocity magnitude contour with streamline and velocity at $Re = 267$

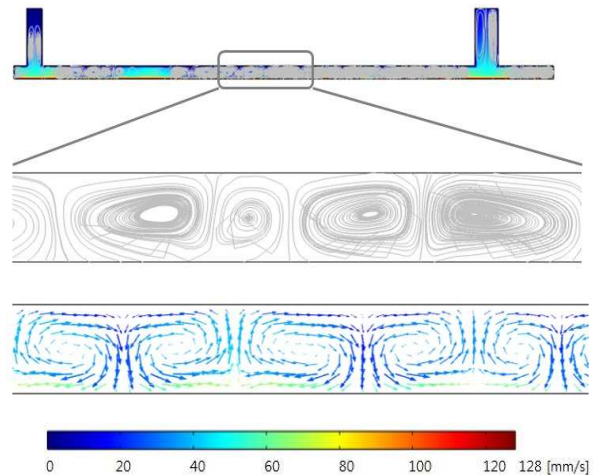


Fig. 8 Velocity magnitude contour with streamline and velocity at $Re = 1150$

에 따른 유체의 점성으로 거리에 따라 점차 감소하므로 내벽에서부터 외벽으로 갈수록 속도는 감소하는 형태를 나타낸다. 또한 테일러 와류는 인접한 와류와 서로 반대방향으로 회전하고 있으며 와류와 와류사이에 bypass flow가 형성되어 있음을 관찰할 수 있다.

Fig. 7는 레이놀즈 수가 267($Re = 267$) 일 때의 테일러 반응기 내의 속도분포이며, 부분 확대한 유선과 속도벡터를 함께 나타내었다. 이 반응기 내부의 유동은 WVF 영역에 해당한다. 이 영역은 TVF 보다 불안정성이 증가하여 균일하게 생성되던 테일러 와류가 실린더의 축을 기준으로 대칭성이 떨어진 형태로 나타나는 특징을 보인다. 하지만 본 연구에서는 2차원 CFD 모델링을 수행하였으므로, 3차원 모델에서 관찰할 수 있는 물결모양의 테일러 와류를 확인할 수가 없었다. TVF 영역인 Fig. 5에서의 테일러 와류와 비교하면, WVF 영역에서는 와류의 크기가 증가하였고 bypass flow는 상대적으로 감소한 것을 확인할 수 있다. 또한 유선을 관찰하여 보면, 와류의 중심원이 고르게 위치하지 않고 와류간 거리가 조금씩 다르며 유선이 불규칙하게 분포한 것을 확인할 수 있다. 이는 WVF 영역에서 관찰되는 유동의 특징으로 테일러 와류가 비대칭적으로 형성됨을 의미한다.

Fig. 8는 레이놀즈 수가 1150($Re = 1150$) 일 때의 테일러 반응기 내의 속도분포이며, 부분 확대

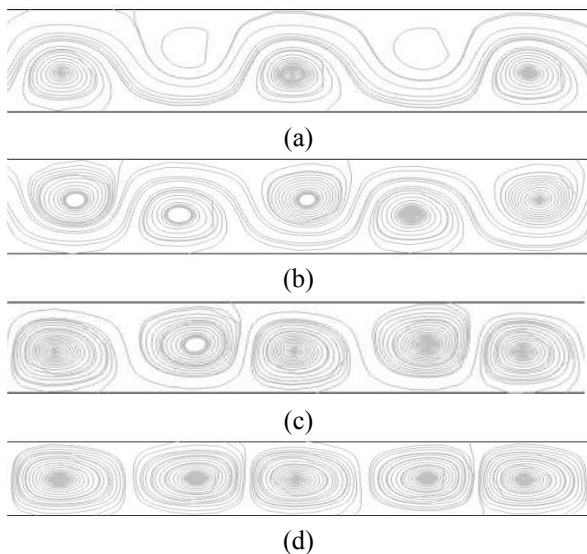


Fig. 9 Streamline at $Re = 135$. $v_{in} =$ (a) 15×10^{-5} m/s, (b) 10×10^{-5} m/s, (c) 5×10^{-5} m/s and (d) 1×10^{-5} m/s

한 유선과 속도벡터를 함께 나타내었다. 이 반응기 내부의 유동은 MWVF 영역에 해당한다. Fig. 7의 WVF영역과 비교하면, 테일러 와류의 변형이 더 커진 특징을 보인다. 즉 실린더 내부 유체의 유동은 더 불안정해진 형상을 가지며 와류의 비대칭성은 더 심해졌다. 따라서 레이놀즈 수가 증가함에 따라 와류의 크기가 커지며 이에 따라 와류의 수도 줄어들음을 확인할 수 있다. 또한 bypass flow도 상대적으로 감소하는 경향을 나타낸다.

3.3 유입속도에 따른 테일러 유동

테일러 유동은 반응기의 회전속도뿐만 아니라 유체의 유입속도에 영향을 받는다. 축 방향의 유동속도와 임계 테일러 수와의 관계는 $Ta_c = 1708 + 26.5Re_z^2$ 와 같다.⁽⁴⁾ 유입속도의 영향을 알아보기 위하여 TVF 영역에서($Re = 135$), 유입속도를 각각 15×10^{-5} , 10×10^{-5} , 5×10^{-5} , 1×10^{-5} m/s로 변화시켜 실린더 내부의 유동변화를 관찰 하였다.

Fig. 9은 유입속도 변화에 따른 유선의 변화를 나타낸 그림이다. 그림에서 보는 바와 같이 유입속도가 감소함에 따라, 와류의 크기는 증가하고 bypass영역은 감소하는 경향을 나타낸다. 또한 Fig. 9(d)와 같이 유입속도가 매우 낮은 경우, 완전 발달한 와류가 형성됨을 확인할 수 있다. 이와 같이 유입속도가 낮을수록, 축 방향 유체의 평균속도는 감소하므로 유체가 반응기 내에 머무르는 체류시간 또한 증가할 것으로 예상된다. 따라서 테일러 유동은 각속도뿐만 아니라 유입속도와도 관련이 있으므로, 적절한 유입속도의 선택으로 테일러 반응기 내의 유동을 조절할 수 있음을 알 수 있다. 하지만 테일러 반응기는 3차원 유동현상을 나타내며 입구속도의 증가에 따라 내부 유동변화는 실제와 차이가 다소 있을 것으로 예상된다.

3.4 입자 추적

3.4.1 유입속도에 따른 입자추적

입구를 통해 유입된 반응물의 주입속도는 테일러 반응기 내 유동의 변화를 일으켜 혼합, 반응 과정을 거쳐 생성된 입자들의 체류시간과 이로 인한 생성물의 형성과정에 영향을 준다. 따라서 유입속도 변화에 따른 입자들의 거동을 알아보기 위하여, TVF 영역($Re = 135$), WVF 영역($Re =$

267), MWVF 영역($Re = 1150$)에서 유입속도가 15×10^{-5} , 10×10^{-5} , 5×10^{-5} , 1×10^{-5} m/s 일 때, 입자추적모델을 이용하여 각각의 영역에서 입자들의 체류시간을 측정하였다. Fig. 10에서 보는 바와 같이, 유입속도가 증가할수록 입자들의 평균체류시

Table 2 Average particle residence time and standard deviation

Re	135	267	1150
Average particle residence time (s)	2335	2669	3800
Standard deviation	811.78	1379.02	2241.87

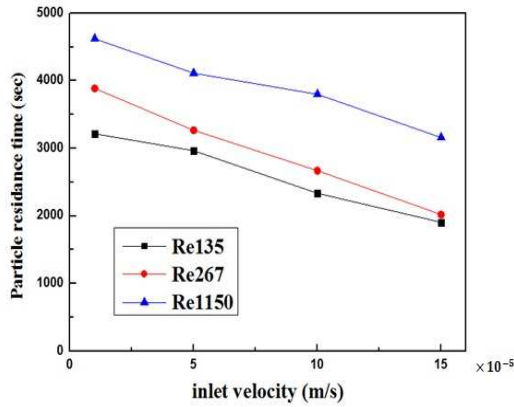


Fig. 10 Particle residence time

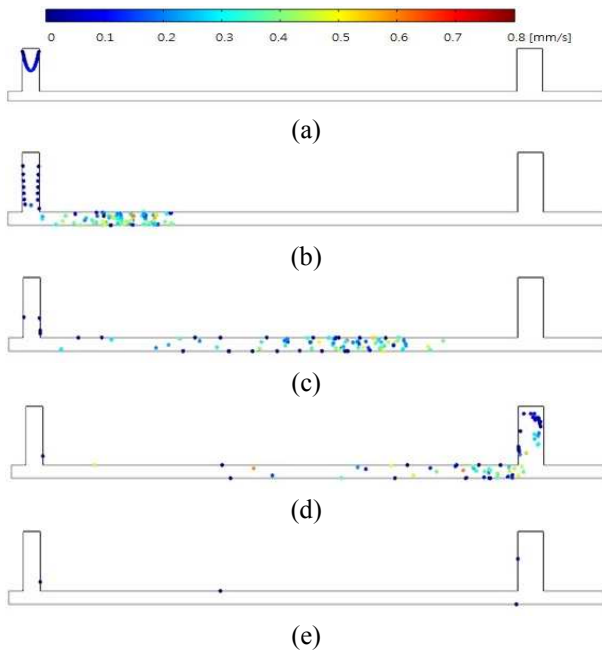


Fig. 11 Particle tracing at $Re = 135$. (a) $t = 150$ s, (b) $t = 500$ s, (c) $t = 1160$ s, (d) $t = 1670$ s, (e) $t = 4190$ s

간은 감소하는 것으로 나타났다. 이는 유입속도가 테일러 와류와 bypass flow에 직접적인 영향을 미치기 때문이다. 유입속도가 증가할수록 테일러 와류의 크기가 감소하고 bypass flow는 증가함으로써, bypass flow를 통하여 이동하는 입자의 비율이 증가하고 입자들의 평균 체류시간이 감소하게 된다. 또한 레이놀즈 수의 증가, 즉 각속도의 증가에 따라 입자들의 평균 체류시간이 증가하는 것으로 나타났다.

3.4.2 각속도에 따른 입자추적

반응기 내부 실린더의 회전속도의 변화에 따라, 반응기 내의 유동 형태는 서로 다른 영역으로 구분되고 각 영역에서의 입자거동도 각각 다른 특징을 갖게 된다. 반응기 내부의 유체에 영향을 미치는 큰 요인 중 하나인 각속도 변화에 따른 입자체류시간의 변화를 알아보기 위하여 $Re = 135, 267, 1150$ 일 때 전산모사를 실시하였다.

Fig. 11은 입구를 통하여 입자를 주입한 후 시간에 따른 입자의 위치변화를 나타낸 것이다. TVF($Re = 135$) 영역에서 유체의 유입속도를 10×10^{-5} m/s 로 고정한 후 입구에 총 100개의 입자를 주입하였다. 주입된 입자수의 증가는 통계분석의 정확도를 높여주나 해석비용이 많이 드는 단점이 있어 100개로 한정하였고, 입자수를 증가시켜 분석한 결과와 큰 차이가 없었다. Fig. 11(a)와 같이 입구를 통하여 최초 입자들이 유입된 후 150 s 가 지난 후, 입자들은 대부분 입구주위에 모여 있는 것을 볼 수 있다. 이 후 시간이 지남에 따라 반응기 내부의 테일러 유동을 통하여 출구로 흘러가는 모습을 보인다. 반응기 내부에는 테일러 와류와 bypass flow 영역으로 나뉘는데 bypass flow를 통하여 이동한 입자들은 테일러 와류보다 빠른 속도로 이동함을 알 수 있다. Fig. 11(e)와 같이 4190 s가 지난 후 대부분의 입자가 출구를 통해 빠져 나간 것을 확인 할 수 있다. 동일한 방법으로 WVF($Re = 267$)와 MWVF($Re = 1150$) 영역에서 입자를 추적하여 전산모사를 시행한 후 각 영역에서의 입자체류시간의 정규분포도와 도수분포를 Fig. 12에, 그리고 평균체류시간과 표준편차를 Table 2에 각각 나타내었다. Fig. 12은 TVF, WVF, MWVF 영역($Re = 135, 267, 1150$)에서의 입자체류시간에 따른 입자의 도수분포를 나타낸 히스토그램이다. Table 2에서

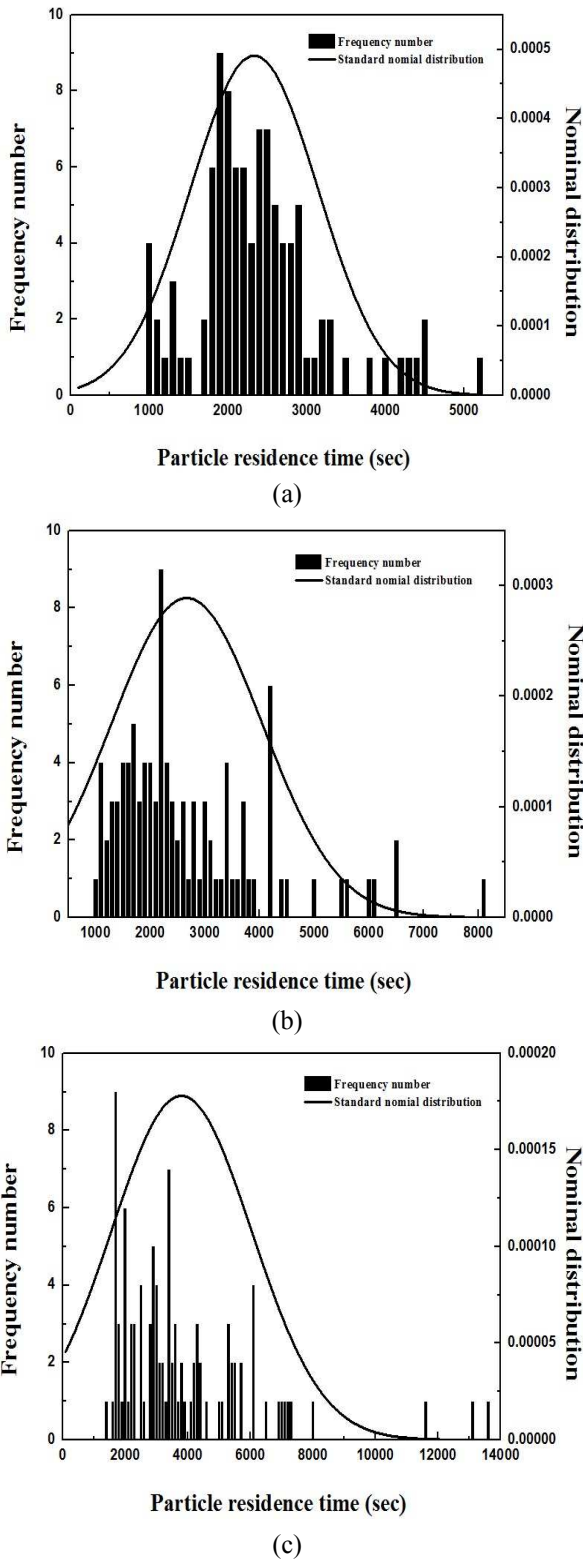


Fig. 12 Histogram and nominal distribution of Particle residence time. (a) $Re = 135$, (b) $Re = 267$, (c) $Re = 1150$

보는 바와 같이, 레이놀즈 수가 커질수록 입자들의 평균 체류시간이 증가하고 표준편차도 증가하

는 것을 알 수 있다. Fig. 12(a)는 레이놀즈 수가 135일 때 입자체류시간의 정규분포도로, 입자 체류시간의 분산이 비교적 작기 때문에 대체로 정규분포를 따르고 있는 것을 알 수 있다. 이는 레이놀즈 수가 135인 TVF영역에서 유체는 축 방향을 따라 일정하고 안정된 테일러 와류와 bypass flow를 가진 유동이 형성이 되고 입자들은 유체의 유선을 따라서 이동하기 때문에 비교적 평균과 근사한 분산도를 가지는 것이다. Fig. 12(b)와 (c)는 레이놀즈 수가 각각 267, 1150일 때의 입자체류시간의 도수분포도로, 각속도가 증가할수록 평균 체류시간이 증가하고, 입자들의 분산 또한 증가하였다. 이는 WVF와 MWVF 영역에서의 bypass flow가 TVF 영역에서 보다 축소되며, 이와 동시에 상대적으로 유동이 불안정해지고 크기가 커진 와류로 인해, bypass 영역으로 일정한 속도를 가지고 출구로 향하던 입자의 수는 감소하고 유체의 유선을 타고 이동하는 입자들의 전체의 속도가 감소하였기 때문이다. 또한 WVF와 MWVF 영역에서는 와류와 유체의 불안정성이 증가해 비대칭적으로 형성된 와류가 입자들의 분산을 증가시켰다. 본 연구에서는 유체의 유동과 입자의 관계만을 알아보기 위하여 입자를 단순화시키고 입자의 화학반응은 무시하였지만, 입자의 응집(agglomeration)과 손실(breakage)을 포함한 입자성장 모델 (particle growth model)이 고려된다면 보다 정확한 입자의 체류시간을 예측할 수 있을 것으로 기대된다.

4. 결론

본 연구에서는 테일러 반응기에 영향을 미치는 요소인 실린더 내벽의 각속도와 유입속도에 따른 유동 변화를 알아보았고, 그에 따라 주입된 입자와의 관계에 관한 연구를 수행하였다. 먼저 모델의 타당성을 검증하기 위해 선행 연구된 Wereley and Lueptow의 실험결과와 전산수치해석 결과를 비교한 결과, 비교적 잘 일치함을 확인하였다. CCF, TVF, WVF, MWVF 영역에서의 테일러 유동의 특성을 2차원 CFD 모델을 통하여 확인하였다. 그 결과 레이놀즈 수가 증가함에 따라 테일러 와류는 불안정해짐을 확인하였으며 반응기의 각속도와 주입속도가 테일러 유동에 크게 영향을 줄 수 있었다. 또한 각 영역별로 유동과 입자거동의 상관관계를 알아보기 위하여 입자체류

시간을 측정하였다. 입자들은 레이놀즈 수가 클수록 그리고 유입속도는 낮을수록, 테일러 와류의 크기는 증가하고 bypass flow 영역은 작아지며 입자의 체류시간은 증가하는 것으로 확인되었다. 테일러 반응기 내의 테일러 와류와 bypass flow는 유입속도와 각속도에 크게 의존하는 것을 알 수 있었으며, 입자체류시간에도 크게 영향을 주는 것을 확인할 수 있었다. 2차원 유동해석의 한계로 인하여 WVF와 MWVF에서 관찰되는 물결모양의 테일러 와류를 확인할 수 없었고, 레이놀즈 수 증가에 따른 3차원성의 증가로 정량적인 수치는 실제값과 차이가 있으리라 예상된다. 따라서 본 연구결과는 각각의 인자 변화에 따른 유동변화의 경향성만을 다룬다. 테일러 반응기 내의 유체와 입자의 관계를 통하여 적정 작동조건들을 알아내기 위하여 3차원 모델로의 확장과 공침반응까지 고려한 입자들의 성장과정을 포함한 모델링은 향후 추진해야 할 과제로 남는다.

후 기

본 연구는 2013년 교육부의 재원으로 한국연구재단의 지원(NRF-2013R1A1A2057761)과 2013년 산업통상자원부의 재원으로 한국에너지기술평가원의 지원(20132020101750) 및 2015년 동국대학교 DG선진연구강화사업 지원으로 이루어졌음.

참고문헌 (References)

- (1) Taylor, G. I., 1923, "Stability of a Viscous Liquid Contained Between Two Rotating Cylinders," *Phil. Trans. R. Soc. Lond. A*, Vol. 223, No. 605~615, pp. 289~343.
- (2) Seun, L., 2012, "Study on Polymorphism of Sulfamerazine induced by Flow Pattern of Taylor Vortex," M.A. Thesis, University of Kyunghee, Seoul.
- (3) Donnelly, R. J., 1991, "Taylor-Couette Flow: The Early Days," *Phys. Today*, Vol. 44, No. 11, pp. 32~39.
- (4) Chandrasekhar, S., 1962, "The Stability of Spiral Flow Between Rotating Cylinders," *Proc. R. Soc. Lond. A*, Vol. 265, No. 1321, 188~197.
- (5) Wereley, S. T. and Lueptow, R. M., 1998, "Spatio-temporal Character of Non-wavy and Wavy Taylor-couette Flow," *J. Fluid Mech.*, Vol. 364, pp. 59~80.
- (6) Nemri, M., Climent, E., Charton, S., Lanoë, J. Y. and Ode, D., 2013, "Experimental and Numerical Investigation on Mixing and Axial Dispersion in Taylor-Couette Flow Patterns," *Chem. Eng. Res. Des.*, Vol. 91, No. 12, pp. 2346~2354.
- (7) Marcus, P. S., 1984, "Simulation of Taylor-Couette flow. Part 2. Numerical Results for Wavy-vortex Flow with One Travelling Wave," *J. Fluid Mech.*, Vol. 146, pp. 65~113.
- (8) Coles, D., 1965, "Transition in Circular Couette Flow," *J. Fluid Mech.*, Vol. 21 No. 3, pp. 385~425.
- (9) Dou, H. S., Khoo, B. C. and Yeo, K. S., 2008, "Instability of Taylor-Couette Flow between Concentric Rotating Cylinders," *Inter. J. of Thermal Science*, Vol. 47, No. 11, pp. 1422~1435.
- (10) Tamhane, T. V., Joshi, J. B. and Patil, R. N., 2014, "Performance of Annular Centrifugal Extractors: CFD Simulation of Flow Pattern, Axial Mixing and Extraction with Chemical Reaction," *Chem. Eng. Sci.*, Vol. 110, pp. 134~143.
- (11) Kim, J. M., Chang, S. M., Chang, J. H. and Kim, W. S., 2011, "Agglomeration of Nickel/Cobalt/Manganese Hydroxide Crystals in Couette-Taylor Crystallizer," *Colloids Surf. A*, Vol. 384, pp. 31~39.
- (12) Choi, M. S., Kim, H. S., Kim, J. S., Park, S. J., Lee, Y. M. and Jin, B. S., 2014, "Synthesis and Electrochemical Performance of High-capacity 0.34Li₂MnO₃·0.66LiMn_{0.63}Ni_{0.24}Co_{0.13}O₂ Cathode Materials using a Couette-Taylor Reactor," *Mater. Res. Bulletin*, Vol. 58, pp. 223~228.
- (13) Aljishi, M. F., Ruo, A. C., Park, J. H., Nasser, B., Kim, W. S. and Joo, Y. L., 2013, "Effect of Flow Structure at the Onset of Instability on Barium Sulfate Precipitation in Taylor-Couette crystallizers," *J. Crystal Growth*, Vol. 373, pp. 20~31.
- (14) Ahmad, A. L., Kusumastuti, A., Shah Buddin, M. M. H., Derek, C. J. C. and Ooi, B. S., 2014, "Emulsion Liquid Membrane based on a New Flow Pattern in a Counter Rotating Taylor-Couette Column for Cadmium Extraction," *Sep. Purif.*

- Technol.*, Vol. 127, 46~52.
- (15) Lee, S. Y., Lee, C. H. and Kim, W. S., 2013, "Taylor Vortex Effect on Flocculation of Hairy Crystals of Calcium Lactate in Anti-solvent Crystallization," *J. Crystal Growth*, Vol. 373, 32~37.
- (16) Masuda, H., Horie, T., Hubacz, R. and Ohmura, N., 2013, "Process Intensification of Continuous Starch Hydrolysis with a Couette-Taylor Flow Reactor," *Chem. Eng. Res. Des.*, Vol. 91, pp. 2259~2264.
- (17) Qiao, J., Lew, C. M. J., Karthikeyan, A. and Wang, C. H., 2014, "Production of PEX Protein from QM7 Cells Cultured in Polymer Scaffolds in a Taylor-Couette Bioreactor," *Biochem. Eng. J.*, Vol. 88, pp. 179~187.
- (18) Paule, A., Lauga, Ten-Hage, B., L., Morchain, J., Duran, R., Paul, E. and Rols, J. L., 2011, "A Photosynthetic Rotating Annular Bioreactor (Taylor-Couette Type Flow) for Phototrophic Biofilm Cultures," *Water Res.*, Vol. 45, pp. 6107~6118.
- (19) Lee, H. K., Lee, S. G. and Jeon, D. H., 2015, "Numerical Studies of Flow Characteristics and Particle Residence Time in a Taylor Reactor," *Appl. Chem. Eng.*, Vol. 26, pp. 67~73.
- (20) Wardle, K. and Lee, T., 2013, "Finite Element Lattice Boltzmann Simulations of Free Surface Flow in a Concentric Cylinder," *Comput. Math. Appl.*, Vol. 65, pp. 230~238.