Appl. Chem. Eng., Vol. 28, No. 4, August 2017, 448-453
https://doi.org/10.14478/ace.2017.1042

Article

CFD를 이용한 테일러 반응기의 3차원 유동해석

권승예 · 이승호* · 전동협,†**

동국대학교 원자력 · 에너지시스템공학과, *연세대학교 화공생명공학과, **동국대학교 기계시스템공학과
(2017년 5월 10일 접수, 2017년 6월 4일 심사, 2017년 6월 6일 채택)

Three-dimensional Fluid Flow Analysis in Taylor Reactor Using Computational Fluid Dynamics

Seong Ye Kwon, Seung-Ho Lee*, and Dong Hyup Jeon,†**

Dept. of Nuclear·Energy System Engineering, Dongguk Univ., Gyeongju 38066, Republic of Korea
**Dept. of Chemical and Biomolecular Engineering, Yonsei Univ., Seoul 03722, Republic of Korea*
***Dept. of Mechanical System Engineering, Dongguk Univ., Gyeongju 38066, Republic of Korea*
(Received May 10, 2017; Revised June 4, 2017; Accepted June 6, 2017)

초 록

테일러 반응기에서 일어나는 유동의 변화를 전산유체역학을 이용하여 3차원 유동해석을 수행하였다. 테일러 유동은 레이놀즈 수의 증가에 따라 5개의 영역(순환 쿠에트 유동(CCF), 테일러 와류 유동(TVF), 물결 와류 유동(WVF), 변조 물결 와류 유동(MWVF), 난류 테일러 와류 유동(TTVF))으로 나뉘어지며, 각각의 영역에서의 유동 특성을 알아보았다. 각각의 영역에서 와류의 형상, 개수, 길이 등에 차이를 나타나며 바이패스 흐름에도 영향을 줌을 확인하였다. 그 결과 TVF, WVF, MWVF, TTVF 영역에서 테일러 와류가 발생하였다. 테일러 와류의 개수는 TVF 영역에서 가장 많으며 TTVF 영역에서 가장 적게 관찰되었다. 수치해석모델의 검증을 위하여 실험결과와 비교하였고, 실험결과 대비 해석결과가 잘 일치함을 나타내었다.

Abstract

We conducted the three-dimensional fluid flow analysis in a Taylor reactor using computational fluid dynamics (CFD). The Taylor flow can be categorized into five regions according to Reynolds number, i.e., circular Couette flow (CCF), Taylor vortex flow (TVF), wavy vortex flow (WVF), modulated wavy vortex flow (MWVF), and turbulent Taylor vortex flow (TTVF), and we investigated the flow characteristics at each region. For each region, the shape, number and length of vortices were different and they influenced on the bypass flow. As a result, the Taylor vortex was found at TVF, WVF, MWVF and TTVF regions. The highest number of Taylor vortex was observed at TVF region, while the lowest at TTVF region. The numerical model was validated by comparing with the experimental data and the simulation results were in good agreement with the experimental data.

Keywords: *computational fluid dynamics, Taylor reactor, model validation, Taylor vortex, bypass flow*

1. 서 론

테일러 반응기는 유체의 유동을 이용하여 연속적인 형태로 생산이 가능한 연속식 반응기로 저속 전단 혼합기(low shear mixing), 화학 반응기(chemical reactor), 여과장치(filtration) 등 다양한 분야에서 사용되고 있다. 테일러 반응기는 1923년 Taylor[1]에 의해 처음 발견되었으며, 테일러-쿠에트 유동(Taylor-Couette Flow) 현상을 이용하여 반응물을 혼합, 생산하는 역할을 수행하는 실린더를 의미한다. Figure 1과 같이 중심이 같고 반지름이 서로 다른 두 개의 실린더의 내부 사이로 유체가 흐르며 외부 실린더는 고정된 상태에서 내부 실린더의 회전에 의해 반응기 내에서 테일러 유동(Taylor flow)을 발생시킨다. 영역은 내부에 위치하는 실린더의 회전 각속도에 따라 구별되며 각속도가 작을 때 반응기에서 쿠에트 유동(Coutte flow)이 형성된다[1,2]. 회전 각속도를 증가시키면 원심력에 의해서 유체는 회전하는 실린더의 반경 방향으로 밀려나게 되고, 불안정한 유체는 축 방향으로 일정한 무늬가 나타난다. 이때 이전의 층류유동에서는 나타나지 않았던 한 쌍의 대칭형으로 생긴 테일러 와류(Taylor vortex)가 나타나며 테일러 유동을 이용해서 반응물의 혼합을 용이하게 도와준다. 또한 입구로 유입된 물질이 출구까지 나가는 경로가 연속적이므로 경로 내에서 연속적인 반응이 진행된다[3]. 테일러 유동은 레이놀즈 수(Reynolds number, Re) 또는 테일러 수(Taylor number, Ta)의 크기에 따라 영역별로 다른

† Corresponding Author: Dongguk Univ.,
Dept. of Mechanical System Engineering, Gyeongju 38066, Republic of Korea
Tel: +82-54-770-2209 e-mail: jeondh@dongguk.ac.kr

pISSN: 1225-0112 eISSN: 2288-4505 @ 2017 The Korean Society of Industrial and Engineering Chemistry. All rights reserved.

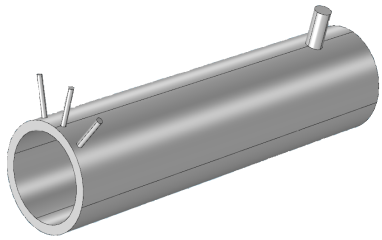

Figure 1. Schematic of Taylor reactor.

유동의 형태가 나타난다[4]. 테일러 유동은 내부 실린더의 회전 각속도를 주요 변수로 하므로, 주로 회전 각속도를 이용하여 무차원의 레이놀즈 수가 정해진다. 보통 테일러 유동은 내부 실린더의 회전속도가 클 때, 그리고 유입 속도가 느릴 때 잘 나타난다. 이는 유입 속도가 테일러 수에 영향을 주는 변수임을 알려준다[5].

테일러 반응기 내 유동을 레이놀즈 수에 따라서 영역을 구분하면, circular Couette flow (CCF), taylor vortex flow (TVF), wavy vortex flow (WVF), modulated wavy vortex flow (MWVF), turbulent Taylor vortex flow (TTVF)으로 구분할 수 있다. 유동 영역은 반경방향 레이놀즈 수와 임계 레이놀즈 수(critical Reynolds number, Re_{cr})의 비인 R ($R = Re/Re_{cr}$)에 의해 결정된다. 임계 레이놀즈 수는 테일러 반응기의 내부 반경과 두 실린더 사이의 간격(annular gap)의 비율에 의존하는 값으로 본 연구에서는 Nemri 등[6]의 연구결과를 참고하였다. R이 1보다 작으면 CCF 영역이 나타나며, 이 영역에서는 흐름이 안정적인 쿠에트 유동이 형성된다. R이 증가함에 따라, 유동은 CCF 영역에서 TVF 영역으로 바뀐다. TVF 영역에서는 두 개의 vortex가 서로 반대방향으로 회전하는 한 쌍의 와류가 형성되고, 반응기의 z 방향(축 방향)으로 연속적으로 나타난다. 내부 실린더의 회전하는 각속도를 이보다 증가시키면 유동은 TVF 영역에서 WVF 영역으로 바뀐다. WVF 영역은 TVF 영역보다 불안정하여 일정하게 보이던 테일러 와류들이 대칭적이지 않은 모습을 보인다. 내부 실린더의 회전 각속도를 더 증가시키면 MWVF 영역이 나타나며 유동은 더 불안정해진다. R이 18 이상의 값을 보이면, 유동은 난류영역으로 전이(transition)되고 유동은 TTVF 영역으로 바뀐다. 회전 각속도를 계속 증가시키면 테일러 유동은 더 이상 나타나지 않는다[4,6-8]. 테일러 반응기의 각 영역별 유동특성에 관한 연구가 진행된 바 있으나 테일러 와류의 개수 및 길이를 제시한 연구결과는 보고된 바가 없다.

테일러 유동은 전산 모사로도 많이 연구되고 있으며, 최근에는 전산유체역학(computational fluid dynamics, CFD)을 이용하여 테일러 반응기의 유동 특성 및 현상에 관한 연구가 활발히 진행되고 있다. Zhang 등[9]는 수치해석기법을 이용하여 테일러 반응기의 끝단효과(end plate effect)를 연구하였다. 그들은 테일러 와류가 끝단으로부터 형성되며, 레이놀즈 수가 증가함에 따라 와류의 개수가 증가하고, Re = 700에서 안정적인 테일러 와류분포가 형성됨을 알아내었다. Li et al.[10]은 CFD를 이용하여 테일러 반응기의 내부 실린더 형상변화에 따른 가변적인 흐름과 난류 영역에서의 초미세 입자 생성을 위한 실린더의비대칭성 조건을 연구하였다. 테일러 반응기는 내부 유동의 특성변화 뿐만 아니라, 반응물의 혼합과 화학 반응에 관한 연구도 진행되었다. Gao 등[11]은 CFD를 이용하여 테일러 반응기 내부에서 액상-기상의 혼합과정과 전달특성을 연구하였다. 최근에는 기포영향(bubble effects)을 고려하여 weakly turbulent vortex에서 테일러-쿠에트 유동의 패턴을 분석하는 연구가 이루어졌다[12]. 테일러 반응기는 전반적인 공학 분야에서 이미 연구, 개발되고 있으며 잠재적인 가능성이 큰 연구대상임을 알 수 있다. 최근 Lee et al.[13]은 CFD를 이용하여 테일러 반응기의 유동 특성에 관한 연구를 수행하여 테일러 반응기 내 각속도와 유입속도 변화에 따른 테일러 유동의 변화와 입자의 체류시간 변화를 알아보았다. 하지만 2차원 해석의 한계로 인하여 반응기 전체에서 유동특성의 파악은 이루어지지 못하였다.

본 연구는 테일러 반응기의 각 영역별 유동특성을 파악하기 위하여 CFD 기법을 이용하여 전산 모사하였다. 이전 연구[13]에서 실시한 2차원 수치해석을 3차원으로 확장하여 테일러 반응기 내의 유동 해석이 이루어졌다. 본 연구는 테일러 반응기 내 각 영역별 유동특성과 유동의 파악이 목적이므로 비교적 간단한 구조인 1 L급 lab-scale의 테일러 반응기를 대상으로 3차원 모델링을 실시하였다. 각 영역별로 테일러 유동의 분석과 테일러 와류에의 영향에 관한 고찰을 하였다.

2. 수치해석

2.1. 지배방정식

테일러 반응기 내 유동해석을 위하여 Comsol Multiphysics를 이용하여 CFD 해석을 수행하였다. 레이놀즈 수의 변화에 따라 유동은 층류와 난류로 구분되어 형성되므로 각각에 대하여 다른 지배방정식이 사용되었다. 층류에서는 laminar 모델을 이용하여 다음과 같은 연속방정식(continuity equation)과 운동량 방정식(momentum equation)이 계산에 사용되었다.

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \rho \nabla \cdot \boldsymbol{u} = 0 \tag{1}$$

$$\rho \frac{\partial \boldsymbol{u}}{\partial t} + \rho(\boldsymbol{u} \cdot \nabla)\boldsymbol{u} = \nabla \cdot [-p\boldsymbol{I} + \mu(\nabla \boldsymbol{u} + (\nabla \boldsymbol{u})^T)] \tag{2}$$

여기서 $\boldsymbol{u}$는 속도벡터, ρ는 밀도, 그리고 μ는 점성계수를 나타낸다. 또한 반응기 내부 실린더의 회전 속도의 증가로 레이놀즈 수가 증가하게 되면 반응기 내 유동은 난류 유동의 영역으로 바뀌게 된다. 이때, 난류영역에서는 turbulent κ-ε 모델을 이용하여 연속 방정식과 운동량 방정식을 계산하였다. 난류 운동에너지 κ와 소산율 ε의 계산을 위하여 다음과 같은 식이 사용되었다.

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \rho \nabla \cdot \boldsymbol{u} = 0 \tag{3}$$

$$\rho \frac{\partial \mathbf{u}}{\partial t} + \rho(\mathbf{u} \cdot \nabla)\mathbf{u} = \nabla \cdot [-p\mathbf{I} + (\mu + \mu_T)(\nabla \mathbf{u} + (\nabla \mathbf{u})^T) - \frac{2}{3}\rho k\mathbf{I}] \tag{4}$$

$$\rho \frac{\partial k}{\partial t} + \rho(\mathbf{u} \cdot \nabla)k = \nabla \cdot \left[\left(\mu + \frac{\mu_T}{\sigma_k}\right)\nabla k\right] + P_k - \rho\varepsilon \tag{5}$$

$$\rho \frac{\partial \varepsilon}{\partial t} + \rho(\mathbf{u} \cdot \nabla)\varepsilon = \nabla \cdot \left[\left(\mu + \frac{\mu_T}{\sigma_k}\right)\nabla \varepsilon\right] + C_{\varepsilon 1}\frac{\varepsilon}{k}P_k - C_{\varepsilon 2}\rho\frac{\varepsilon^2}{k}f_\varepsilon(\rho, \mu, k, \varepsilon, I_w) \tag{6}$$

$$\nabla G \cdot \nabla G + \sigma_w G(\nabla \cdot \nabla G) = (1 + 2\sigma_w)G^4, \; I_w = \frac{1}{G} - \frac{I_{ref}}{2} \tag{7}$$

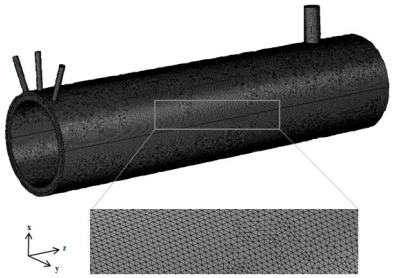

Figure 2. Three-dimensional model of Taylor reactor and meshes.

$$\mu_T = \rho C_\mu \frac{k^2}{\varepsilon} f_\mu(\rho, \mu, k, \varepsilon, I_w) \tag{8}$$

$$P_k = \mu_T [\nabla \mathbf{u} : (\nabla \mathbf{u} + (\nabla \mathbf{u})^T)] \tag{9}$$

여기서 G는 평균속도 구배에 의하여 발생하는 난류 운동에너지, μ_T는 난류 점성계수를 나타내며, P_k는 난류운동에너지 생성항, f_ε와 f_μ는 각각의 damping function이다. σ_κ과 σ_ε는 κ와 ε에 대한 프란틀 수(Prandtl number, Pr)를 의미하며 각각 1.4와 1.5를 사용하였다. $C_{\varepsilon 1}$, $C_{\varepsilon 2}$, C_μ는 상수이며 각각 1.5, 1.9, 0.09가 사용되었다. 실린더 내부의 유체의 특성을 나타내는 무차원수인 레이놀즈 수는 다음과 같이 정의한다.

$$Re = \frac{r_i \omega d}{\upsilon} \tag{10}$$

여기서 r_i는 내부 실린더의 반지름, ω는 내부 실린더의 회전속도, d는 외부와 내부 실린더 사이 간격, υ는 유체의 동점성계수를 나타낸다.

2.2. 모델 및 경계조건

본 연구에 사용된 테일러 반응기의 3차원 모델과 격자는 Figure 2에서 보는 바와 같다. 유체는 좌측 상단에 위치한 3개의 입구를 통하여 유입된다. 유입된 유체는 테일러 반응기 내에서 유동을 형성하며, 우측 상단에 위치한 출구를 통하여 빠져나간다. Lab-scale의 반응기를 모델링 하였으며 반응기의 상세한 치수는 Table 1에 표시하였다. CFD 해석을 위하여 약 330만 개의 격자가 사용되었으며, 사용된 격자는 tetrahedral mesh이다.

그림에서 보는 바와 같이, x축 방향으로 유체의 입출이 있고, y축 방향(반경 r방향)으로 실린더가 회전하며, z축 방향으로 유체가 흐른다. 입구의 경계조건으로는 속도경계(velocity boundary)를 설정하였고, 입구속도는 1×10^{-4}m/s를 적용하였다. 출구는 압력경계(pressure boundary)를 설정하였고, 대기압(101,325 Pa)을 적용하였다. 내부 실린더는 moving wall boundary을 적용하여, 각속도 ω만큼 회전하도록 설정하였다. 외부 실린더의 외벽에는 벽조건(wall boundary)을 설정하였고, no slip 조건을 적용하였다. 각 영역별 유동 현상을 관찰하기 위하여, 5가지의 회전 각속도(0.266, 0.556, 1.06, 2.12, 5.291 rad/s)를 적용하였다. 이는 각각 Re = 100, 140, 400, 800, 2000에 해당하는 값이다. 반응기 내부에 흐르는 유체는 상온의 물(H_2O)을 적용하였고, 따라서 밀도는 998 kg/m^3, 동점성 계수는 1.006×10^{-6}m^2/s을 적용하여 수치해석을 수행하였다. 계산이 시작된 후 초기에 유동의 변화가 급격히 일어나며 일정시간이 지나면 유동의 변화가 없어진다. 유동의 변화가 더 이상 발생하지 않는 시점을 기준으로 유동분포를 고찰하였다.

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	0.009
Cylinder length	L	0.417

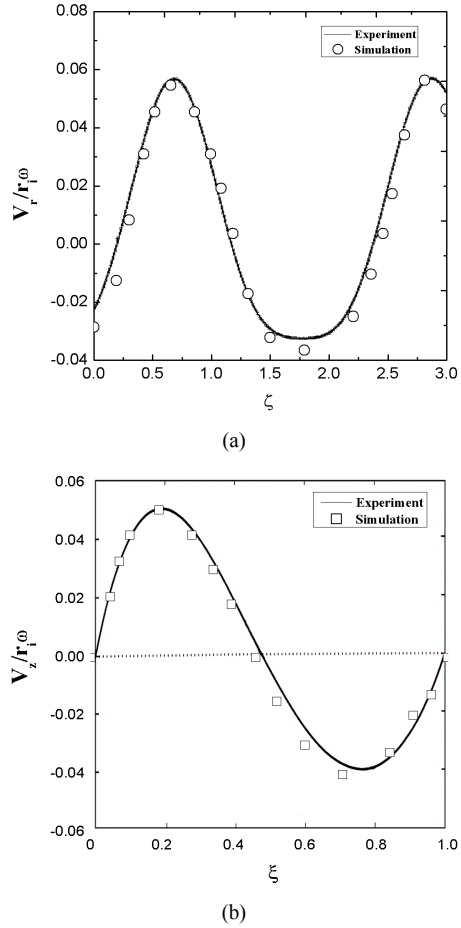

Figure 3. Validation of Taylor flow. (a) Normalized radial velocity, (b) Normalized axial velocity.

3. 결과 및 고찰

3.1. 모델의 검증

수치해석 모델의 타당성을 알아보기 위하여 Wereley and Lueptow [14]의 실험결과와 CFD 해석결과를 비교하였으며, 결과는 Figure 3에서 보는 바와 같다. Wereley and Lueptow의 실험과 유사한 조건에서의 비교를 위하여 유체의 유입과 유출이 없는 조건을 설정했으며 내부에 흐르는 유체는 실험과 동일하게 H_2O을 이용하여 계산하였다. 수치해석에 사용된 모델의 반경비(η)와 장비(Γ)는 각각 0.823와 46.3으로 실험에서의 반경비(0.83), 장비(47.7)와 매우 유사하고 그 이외의 조건들은 모두 동일하게 설정하였다. 또한 실험 조건과 동일한 Re =

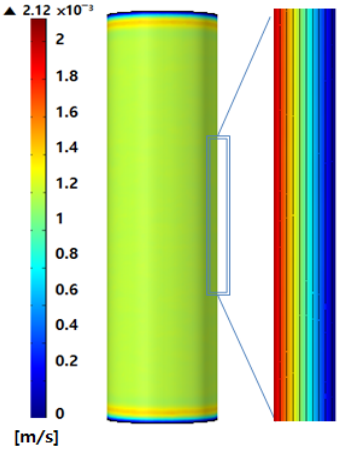

Figure 4. Velocity contour with velocity vector at Re = 100.

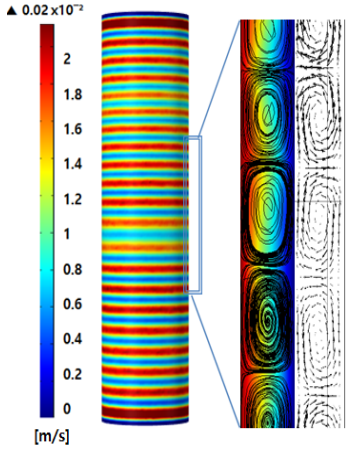

Figure 5. Velocity contour with streamline and velocity vector at Re = 140.

124 (ω = 0.329 rad/s)인 상태에서 계산을 수행하였다. Figure 3(a)는 축 방향의 좌표를 따라 해당 좌표에서의 반경 방향 속도 성분을 비교한 것이다. x축의 ζ는 축 방향 좌표를 실린더 사이 간격 d로 나누어 무차원화 한 것이며 $\zeta=\frac{z}{d}$와 같이 정의한다. y축은 반응기의 반경방향 속도 V_r를 내부 실린더의 회전속도로 나누어 무차원화 시켰다. Figure 3(b)는 반경 방향의 좌표를 따라 해당 좌표에서의 축 방향 속도 성분을 비교한 것이다. x축의 ξ는 반경 방향의 좌표에서 내부 실린더의 반지름 r_i의 길이를 빼고 실린더 사이 간격 d로 나누어 무차원화 한 것이며 $\xi=\frac{(r-r_i)}{d}$와 같이 정의한다. y축은 반응기의 축방향 속도 V_z를 내부 실린더의 회전속도로 나누어 무차원화 시켰다. Figure 3(a)의 속도 그래프에서 축 방향을 따라 파동형상을 보이는데 이는 테일러 반응기 작동 시 와류가 생성되기 때문이다. 즉, 속도가 0이 되는 지점은 와류의 중심을 나타낸다. 또한 최고값과 최저값의 절대값이 차이를 보이는데 이는 반경방향으로 outflow가 inflow에 비해 강하게 작용함을 나타내며 이로 인하여 outflow 영역에서의 그래프가 inflow 영역에서의 그래프에 비해 더 급격한 곡선을 보인다[14]. Figure 3(b)의 속도 그래프도 파동형상을 보이며 비대칭적이다. 이는 축 방향의 outflow가 inflow에 비해 강하게 작용함을 의미한다. 또한 와류의 중심, 내벽, 그리고 외벽에서 속도가 0이 됨이 확인되었다. 그림에서 보는 바와 같이, 수치해석 결과와 실험결과는 매우 유사한 경향을 보인다. 따라서 본 연구에서 사용된 수치해석 모델이 실험결과와 대비 비교적 타당한 결과를 보이는 것을 확인하였다. 또한 해석결과가 타당성을 보여 추가적인 격자 의존성 테스트는 생략하기로 한다.

3.2. 레이놀즈 수에 따른 테일러 유동특성

테일러 반응기 내부의 유동 형태는 레이놀즈 수의 크기에 따라서 다른 형태의 유동을 나타낸다. 앞서 설명한 바와 같이, 반응기 내의 유동은 레이놀즈 수에 따라 CCF, TVF, WVF, MWVF, TTVF으로 구분된다. 각 유동 영역에서 나타나는 유동특성을 비교하기 위하여, 내부 실린더의 회전 속도만 변화시켜 레이놀즈 수를 조절하였다. 총 5가지 레이놀즈 수(Re = 100, 140, 400, 800, 2000)의 경우에 발생하는 유동의 변화를 살펴보았다. 이는 각각 CCF, TVF, WVF, MWVF, TTVF 영역에 해당한다.

Figure 4는 Re = 100에서 테일러 반응기 내 유동의 속도분포와 부분 확대한 유선을 나타낸다. 유동의 형태는 CCF 영역에 해당한다. 그림에서 보는 바와 같이, 내부 실린더 근처에서 높은 속도가 분포되고 내부 실린더에서 반경방향으로 멀어질수록 속도가 줄어듦이 관찰되었다. 반응기 끝단에 테일러 와류가 약하게 형성되었으나 반응기 전반에 걸쳐 일정한 흐름의 쿠에트 유동이 형성되어 안정적인 흐름을 보여준다. 이는 끝단효과에 의하여 반응기 양 끝 단에 테일러 와류가 생성되었으나 낮은 회전속도의 영향으로 반응기 전반으로 확장되지 못하고 있음을 나타낸다. 와류의 두께는 0.59 mm로 측정되며 얇게 형성되어 있음을 알 수 있다.

Figure 5는 Re = 140에서 테일러 반응기 내 유동의 속도분포이며, 부분 확대한 유선과 속도벡터를 나타낸다. 유동의 형태는 TVF 영역에 해당한다. 반응기 전반에 걸쳐 테일러 와류가 형성됨이 관찰된다. 테일러 와류는 반응기의 내벽과 외벽을 둘러싸며 고리모양의 와류를 형성하고 있으며, 반응기 길이방향을 따라 일정한 간격으로 평행하게 나타나는 형태를 보이고 있다. 반응기의 회전속도가 낮아 원형의 와류가 관찰되며 와류와 와류 사이에 bypass flow가 형성됨이 확인된다. 반응기 양 끝단에서의 속도가 중심에서의 속도보다 높게 나타나며, 테일러 와류의 두께도 차이가 나는데(끝단 : 2.248 mm, 중심 : 1.223 mm), 이는 끝단효과 때문인 것으로 알려져 있다[15]. 반응기 내에서 테일러 와류는 21개가 관찰된다. Zhang et al.[15]에 의하며 TVF 영역 내에서도 레이놀즈 수에 따라 테일러 와류의 개수 및 길이의 차이가 난다고 알려져 있다.

Figure 6는 Re = 400에서 테일러 반응기 내 유동의 속도분포이며, 부분 확대한 유선과 속도벡터를 나타낸다. 유동의 형태는 WVF 영역에 해당한다. 이 영역에서는 유동의 불안정성이 증가하여 TVF 영역에서 균일하게 생성되던 테일러 와류가 실린더의 축을 기준으로 비대칭적인 물결모양의 유동형태를 나타낸다. 특히 중심부분에서 불안정한 유동의 형태가 잘 관찰되며 끝단으로 갈수록 비대칭성이 약해진다. 와류의 두께는 중심에서 2.538 mm, 그리고 끝단에서 2.441 mm로 측정되어 와류 간 크기의 차이는 적지만 TVF 영역에 비해 와류의 두께가 증가하고 와류의 개수가 감소하였다. 또한 유선의 관찰결과, 테일러 와류가 비대칭적인 형태를 보이고 bypass의 영역이 넓어진 것을 확인할 수 있다.

Figure 7은 Re = 800에서 테일러 반응기 내 유동의 속도분포이며, 부분 확대한 유선과 속도벡터를 나타낸다. 유동의 형태는 MWVF 영역에 해당한다. 그림에서 보는 바와 같이, 유동의 불안정성이 커져 WVF 영역에 비해 와류의 비대칭성이 더 심해졌다. 일정한 패턴의 물

Table 2. Number and Length of Vortices at Various Reynolds Numbers

Re		140	400	800	2000
Number of vortices		21	18	19	12
Length (mm)	Edge	2.248	2.538	3.113	6.544
	Center	1.223	2.441	1.232	1.286

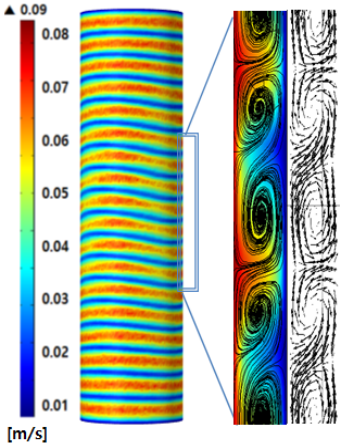

Figure 6. Velocity contour with streamline and velocity vector at Re = 400.

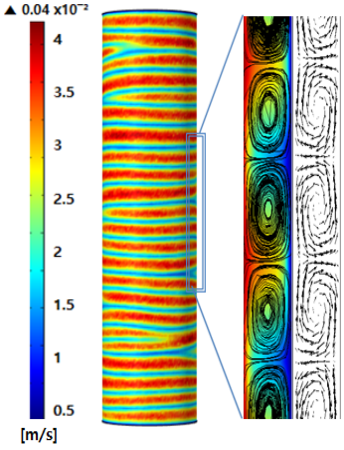

Figure 7. Velocity contour with streamline and velocity vector at Re = 800.

결모양의 유동형태가 사라지며 불규칙적인 물결모양의 테일러 와류가 관찰된다. 이는 회전속도의 증가에 따른 영향으로 판단된다. 와류의 두께는 중심에서 1.232 m, 그리고 끝단에서 3.113 mm로 측정되어 와류 간 크기에 차이를 보인다. WVF 영역과 비교하면 중심에서의 와류 두께는 감소한 반면 끝단에서의 와류 두께는 증가하였다. 반면 와류의 개수는 19개로 관찰되어 WVF 영역에 비해 큰 차이는 없었다.

Figure 8은 Re = 2000에서 테일러 반응기 내 유동의 속도분포이며, 부분 확대한 유선과 속도벡터를 나타낸다. 유동의 형태는 TTVF 영역에 해당한다. 유동이 난류영역으로 바뀌면서, WVF 영역과 MWVF 영역에서 관찰되던 와류의 비대칭성은 사라지고 반응기 길이방향을 따라 평행한 형태의 테일러 와류가 나타난다. 회전속도가 증가함에 따라 와류의 크기가 증가하였고 타원형의 형태를 보이며 bypass 영역은 상당히 줄어듦을 알 수 있다. 하지만 테일러 와류의 간격 차이가 다른

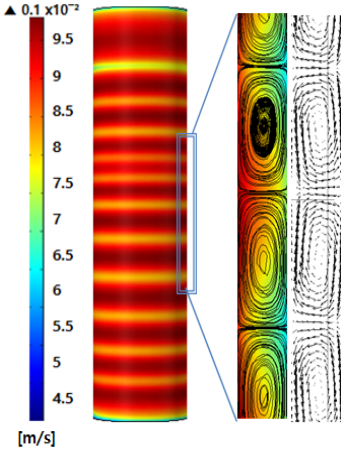

Figure 8. Velocity contour with streamline and velocity vector at Re = 2,000.

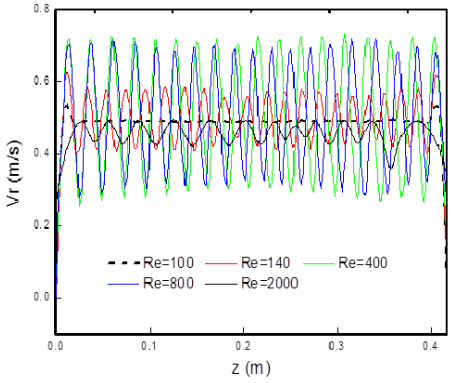

Figure 9. Comparison of radial velocity along an axial line through the center of the annular gap.

영역에 비해 크게 나타나는 것을 확인할 수 있다. 양 끝단에서의 와류의 길이는 6.544 mm로 측정되는 반면, 중심에서는 1.286 mm로 측정된다. 와류의 개수는 12개로 관찰되어 다른 영역에 비해 와류의 개수가 상당히 줄어들었다.

3.3. 영역별 유동 특성 비교

레이놀즈 수 변화에 따른 각 영역별 유동특성을 파악하기 위하여 테일러 와류의 속도분포와 형성된 와류의 개수 및 길이를 비교하였다. Figure 9는 테일러 반응기의 유동영역 중앙부에서 축 방향을 따라 반경방향 속도분포를 나타낸 그래프이다. 그림에서 보는 바와 같이, CCF 영역에서는 테일러 와류가 형성되지 않았고 TVF, WVF, MWVF, TTVF 영역에서 테일러 와류가 형성됨을 알 수 있다. 반경방향의 속도 차이는 WVF, MWVF 영역에서 크게 나타나나 bypass 영역도 동시에 증가하여, 본 영역에서 물질의 혼합이 잘 이루어진다고 유추하기는 어렵다. 물질혼합의 영향을 파악하기 위해서는 입자추적을

통한 체류시간의 연구가 필요하다. Table 2와 보는 바와 같이 테일러 와류의 개수는 TVF 영역에서 가장 많으며 TTVF 영역에서 가장 적게 관찰되었고, 끝단과 중심간 테일러 와류 길이의 차이는 TTVF 영역에서 가장 크며 WVF 영역에서 가장 적었다. WVF 영역 대비 MWVF 영역에서 와류의 개수가 약간량 증가하는 것을 제외하고는 전반적으로 Re 수 증가에 따라 와류의 수는 감소하는 경향을 보였다. 이는 MWVF 영역에서 비대칭성이 크게 증가하기 때문으로 판단되며 내부 실린더의 회전수 증가가 와류의 성장에 영향을 미침을 알 수 있다. 따라서 각 영역 내에서도 Re 수의 증가에 따라 와류의 개수 및 길이의 차이가 있을 것으로 사료된다.

4. 결 론

CFD 기법을 이용하여 테일러 반응기에 대하여 3차원 유동해석을 수행하였다. 모델의 검증을 위하여 해석 결과와 실험 데이터를 비교하였고 비교적 잘 일치하는 결과를 얻었다. 유동특성이 다른 5개 영역(CCF, TVF, WVF, MWVF, TTVF)에서 레이놀즈 수를 변화시켜 각각의 유동특성을 알아보았다. 그 결과 TVF, WVF, MWVF, TTVF 영역에서 테일러 와류가 발생함을 확인하였다. TVF 영역에서 테일러 와류가 원형을 보이나 회전속도가 증가함에 따라 와류의 크기가 증가하며 TTVF 영역에서는 타원형의 와류형상을 보인다. 이는 bypass 영역의 감소를 의미한다. TVF 영역에서는 테일러 와류의 개수가 가장 많이 형성되었고, TTVF 영역에서는 테일러 와류가 가장 적게 형성되었으며 끝단과 중심간 와류의 길이차가 많이 발생됨을 확인하였다. WVF 영역과 MWVF 영역에서는 물결모양의 테일러 와류가 관찰되며 bypass 영역이 증가함을 보였다. 따라서 물질의 혼합은 bypass 영역이 상대적으로 적은 TTVF 영역에서 잘 이루어질 것으로 판단되나, 정량적인 평가를 위해서는 입자추적 모델을 적용한 체류시간의 연구가 필요하다. 또한 동일 영역 내에서도 레이놀즈 수의 변화에 따라 테일러 와류의 개수와 길이에 차이를 보이는 것으로 판단되어 이는 차후 연구에서 다룰 과제로 남는다.

감 사

본 연구는 2016년 교육부의 재원으로 한국연구재단의 지원(2016R1D1A1A09916637) 및 2016년 동국대학교 DG선진연구강화사업 지원으로 이루어졌음.

기호설명

d : 내부 회전축과 반응기 사이의 간격[m]
L : 반응기의 길이[m]
r_i : 반응기 내부 회전축의 반지름[m]
r_o : 반응기의 반지름[m]
Re : 반경방향 레이놀즈 수
Re_{cr} : 임계 레이놀즈 수
Ta : 테일러 수

그리스 문자

η : 반응기 회전축의 반지름과 반응기 반지름의 비
μ : 점성계수[kg/m・s]
ν : 동점성계수[Pa・s]
ρ : 밀도[kg/m^3]
ω : 반응기 회전축의 회전속도[rad/s]

References

1. G. Taylor, Stability of a viscous liquid contained between two rotating cylinders, *Philos. Trans. R. Soc. Lond. A*, **223**, 289-343 (1923).
2. R. J. Donnelly, Taylor-Couette flow: The early days, *Phys. Today*, **44**, 32-39 (1991).
3. E. L. Koschmieder, *Benard Cells and Taylor Vortices,* 219-225, Cambridge University Press, UK (1993).
4. D. Coles, Transition in circular Couette flow, *J. Fluid Mech.*, **21**, 385-425 (1965).
5. S. Chandrasekhar, The stability of spiral flow between rotating cylinders, *Proc. R. Soc. Lond. A*, **265**, 188-197 (1962).
6. M. Nemri, E. Climent, S. Charton, J. Y. Lanoe, and D. Ode, Experimental and numerical investigation on mixing and axial dispersion in Taylor-Couette flow patterns, *Chem. Eng. Res. Des.*, **91**, 2346-2354 (2012).
7. P. S. Marcus, Simulation of Taylor-Couette flow. Part 2. Numerical results for wavy-vortex flow with one travelling wave, *J. Fluid Mech.*, **146**, 65-13 (1984).
8. H. S. Dou, B. C. Khoo, and K. S. Yeo, Instability of Taylor-Couette flow between concentric rotating cylinders, *Int. J. Therm. Sci.*, **47**, 1422-1435 (2008).
9. Y. Zhang, L. Xu, and D. Li, Numerical computation of end plate effect on Taylor vortices between rotating conical cylinders, *Commun. Nonlinear Sci. Numer. Simul.*, **17**, 235-241 (2011).
10. G. Li, X. Yang, and H. Ye, CFD simulation of shear flow and mixing in a Taylor-Couette reactor with variable cross-section inner cylinders, *Powder Technol.*, **280**, 53-66 (2015).
11. X. Gao, B. Kong, M. Ramezani, M. Olsen, and R. D. Vigil, An adaptive model for gas-liquid mass transfer in a Taylor vortex reactor, *Int. J. Heat Mass Transf.*, **91**, 433-445 (2015).
12. X. Gao, B. Kong, and R. D. Vigil, CFD investigation of bubble effects on Taylor-Couette flow patterns in the weakly turbulent vortex regime, *Chem. Eng. J.*, **270**, 508-518 (2015).
13. S. H. Lee, G. H. Sim, and D. H. Jeon, Numerical study on fluid flow characteristics in Taylor reactor using computational fluid dynamics, *Trans. Korean Soc. Mech. Eng. B*, **40**, 9-19 (2016).
14. S. T. Wereley and R. M. Lueptow, Spatio-temporal character of non-wavy and wavy Taylor-Couette flow, *J. Fluid Mech.*, **364**, 59-80 (1998).
15. Y. Zhang, L. Xu, and D. Li, Numerical computation of end plate effect on Taylor vortices between rotating conical cylinders, *Commun. Nonlinear Sci. Numer. Simul.*, **17**, 235-241 (2011).