버블 칼럼 광생물반응기의 내부 유동분석을 위한 전산유체역학 시뮬레이션 모델의 이용

Utilization of CFD Simulation Model for a Bubble Column Photobioreactor

유재인* · 이인복*[†] · 황현섭* · 홍세운* · 서일환* · J. P. Bitog* · 권경석* · 김용희*

Yoo, J-I* · Lee, I-B*[†] · Hwang, H-S* · Hong, S-W* · Seo, I-H* · Bitog, J. P.* · Kwon, K-S* · Kim, Y-H*

ABSTRACT

Photobioreactor (PBR) that houses and cultivates microalgae providing a suitable environment for its growth, such as light, nutrients, CO₂, heat, etc. is now getting more popular in the last decade. Among the many types of PBRs, the bubble column type is very attractive because of its simple construction and easy operation. However, despite the availability of these PBRs, only a few of them can be practically used for mass production. Many limitations still holdback their use especially during their scale-up. To enlarge the culture volume and productivity while supplying optimum environmental conditions, various PBR structures and process control are needed to be investigated. In this study, computational fluid dynamics (CFD) was economically used to design a bubble-column type PBR taking the place of field experiments. CFD is a promising technique which can simulate the growth and production of microalgae in the PBR. To study bubble column PBR with CFD, the most important factor is the possibility of realizing bubble. In this study, multi-phase models which are generally used to realize bubbles were compared by theoretical approaches and comparing in a 2D simulation. As a result, the VOF (volume of fluid) model was found to be the most effective model to realize the bubbles shape as well as the flow inside PBR which may be induced by bubble injection. Considering the accuracy and economical efficiency, 0.005 second time step size was chosen for 2.5 mm mesh size. These results will be used as criteria for scale-up in the PBR simulation.

Keywords: Bubble column; CFD; microalgae; multi-phase models; PBR

1. 서 론

지구온난화와 석유자원의 고갈 및 지속적인 유가 상승으로 다양한 대체에너지에 대한 연구가 이루어지고 있다. 그 중 바이오디젤은 생산 공정, 작업 효율, 생산 단가 측면에서 가장 현실적인 대안으로 고려되고 있으며, 그 생산 원료로서 미세조류에 대한 관심이 높아지고 있다. 미세조류는 동일한 재배면적에서 타 작물에 비하여 10배 이상 많은 오일을 생산할 수 있

으며 (Chisti, 2007) 적절한 생육 환경이 조성되었을 경우, 빠른 성장 속도와 짧은 수확주기로 인하여 연중 지속적이고 반복적인 생산이 가능하다. 또한 성장 과정에서 VOC (Volatile Organic Compounds; 휘발성 유기화합물)와 이산화탄소 등을 세포 내에 고정시키고, 생육과정에서 폐수의 정화를 수행할 수 있다는 특징을 가지고 있다 (Oh et al., 2003). 바이오디젤 생산 후 잔여물질은 화장품, 건강식품, 사료 등 고부가 상품으로 2차 가공하여 추가적인 이익을 창출할 수 있다 (Joo et al., 1998; Pulz, 2001; Li et al., 2003). 그러나 미세조류를 이용한 바이오디젤의 대량생산에는 현실적인 제약이 존재한다. 미세조류의 생장률을 극대화하기 위해서는 태양광, 이산화탄소의 농도, 영양분의 공급 등 환경 요인을 적절히 조절해야만 한다는 어려움이 있다.

미세조류의 생산 방법은 외부의 자연환경 조건에서 배양하는

* 서울대학교 농업생명과학대학 지역시스템공학과 & 농업생명과학 연구원

[†] Corresponding author. Tel.: +82-2-880-4586

Fax: +82-2-873-2087

E-mail address: iblee@snu.ac.kr

2009년 6월 26일 투고

2009년 8월 28일 심사완료

2009년 9월 8일 게재확정

폰드 시스템 (Pond system)과 인위적으로 생장 환경을 조절하는 광생물반응기 시스템 (Photobioreactor system)으로 나눌 수 있다. 폰드 시스템은 야외에 연못 형태의 생산 시설을 설치하는 것으로, Oswald (1988)와 Chaumont (1993), Pushparaj et al. (1997) 등에 의하여 연구된 바 있다. 폰드 시스템의 경우 초기 투자비가 적고, 유지 관리가 간편한 장점은 있으나, 외부의 자연환경을 그대로 이용하여야 하기 때문에 최적 생산을 위한 환경조절이 불가능하고, 광 투과 가능 깊이를 고려하였을 때 폰드의 깊이가 제한된다는 문제점이 있어서 단위 면적당 생산량이 광생물반응기 시스템에 비해 현저히 떨어지는 단점이 있다 (Apt and Behre et al., 1999; Chisti, 2007). 폰드 시스템의 경우 적절한 자연조건을 가진 일부 지역에서만 활용할 수 있고, 4계절이 뚜렷한 국내에서는 장마철을 제외한 하절기의 2~3개월 정도만 사용이 가능하다. 또한 폰드 시스템은 우리나라의 좁은 국토 환경과 높은 지가로 인하여 대형화에 한계가 있다. 따라서 미세조류의 효율적인 대량 생산을 위하여 환경조절이 가능한 광생물반응기에 대한 연구가 필요하다.

이러한 광생물반응기에 대한 연구는 주로 균주개발이나 실험실 규모의 소량 생산에 집중하여 왔으며 대량생산 시스템을 설계하기 위한 연구는 아직 미흡한 실정이다. 이는 광생물반응기의 대형화 시에 내부의 광, 이산화탄소 농도, 영양분 농도 등의 생장 환경 조건을 균일하게 유지하는 것이 어렵기 때문이다 (Oh et al., 2003). 이를 극복하기 위해서는 교반을 통한 광생물반응기 내부 환경조건의 균일성 및 적절성의 유지가 필수적이지만, 대형 광생물반응기의 경우 제작 및 시험에 많은 비용과 시간이 소모되며, 점층적의 한계로 인하여 내부 유동의 정성적 및 정량적 분석이 어려워 문제점을 파악하고 해결방안을 제시하는 것이 제한되어 왔다. 이와 같은 현장실험의 어려움을 효과적으로 극복하기 위하여 다양한 분야에서 공학적인 유체 유동 해석에 사용되고 있는 전산유체역학 (CFD; Computational fluid dynamics) 기술이 최근 광생물반응기 개발 분야에 적극적으로 활용되기 시작하였다 (Akhtar et al., 2007; Rampure et al., 2007).

광생물반응기에서 미세조류를 배양하는 것을 모델링하기 위해서는 광생물반응기 내부의 액체 내 기체 버블의 유동을 모사하여야 하기 때문에, 2개의 서로 다른 상 간의 복합적인 유동이므로 다상(Multi-phase) 모델의 사용이 필수적이다. 그러나 현재까지 대부분의 연구에서는 임의적으로 하나의 다상 모델을 선택하여 시뮬레이션을 수행하여 왔으며, 적절한 다상모델의 선정에 대한 연구는 부족하였다.

본 연구에서는 CFD 시뮬레이션을 사용하여 미세조류 대량 생산용 광생물반응기를 개발하기 위한 기초 연구로서, 여러 연구 분야에서 사용되는 다상 모델들의 이론적 비교분석과 2D

시뮬레이션 비교분석을 통하여 적절한 다상 모델을 결정함으로써, 추후 3D 광생물반응기 시뮬레이션 모델에 대한 연구를 수행하기 위한 기본 모델을 제시하고자 하였다.

II. 재료 및 방법

1. 전산유체역학 틀

전산유체역학 틀은 크게 모델을 만들고 격자를 설계하는 전처리 과정과 계산 영역 (Computational domain)을 바탕으로 유체역학적 계산을 수행하는 주 연산 과정, 시뮬레이션 결과를 가시적으로 분석하기 위한 후처리 과정으로 나눌 수 있다. 본 연구에서는 전산유체역학 (CFD)의 전처리 과정 툴인 Gambit (ver. 2.4, Fluent Inc., N.H., USA)을 사용하여 격자망 모델을 설계하였으며, 완성된 모델은 주 연산 과정인 Fluent (ver. 6.3, Fluent Inc., N.H., USA)를 사용하여 계산을 수행하였다.

Fluent는 계산 영역내의 모든 격자들에 대하여 Navier-Stokes 방정식의 Reynolds 이론의 개념을 계산한다. 유체 및 에너지의 이동현상의 해석에 필요한 방정식은 질량, 운동량, 에너지 보존법칙을 미소의 체적에 적용하여 얻어진 비선형 연립 편미분방정식이다. 각각을 정리하면 아래와 같다.

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho \vec{v}) = S_m \quad (1)$$

$$\frac{\partial}{\partial t} (\rho \vec{v}) + \frac{\partial}{\partial x_i} \nabla \cdot (\rho \vec{v} \vec{v}) = -\nabla p + \nabla \tau + \rho \vec{g} + \vec{F} \quad (2)$$

$$\begin{aligned} & \frac{\partial}{\partial t} (\rho E) + \nabla \cdot (\vec{v} (\rho E + p)) \\ & = \nabla \cdot (k_{eff} \nabla T - \sum_j h_j \vec{J}_j + (\tau_{eff} \cdot \vec{v})) + S_h \end{aligned} \quad (3)$$

E: specific enthalpy (J kg⁻¹)

$\vec{F}$: external force vector (N m⁻³)

$\vec{g}$: gravitational acceleration (m s⁻²)

h: specific enthalpy (J kg⁻¹)

$\vec{J}_j$: diffusion flux of species j

k_{eff} : effective conductivity (W m⁻¹ K⁻¹)

p: static pressure (Pa)

S_h : increasement of enthalpy by chemical reaction or radiation (J K⁻¹)

S_m : mass source term by chemical reaction (kg m⁻³)

T: temperature (K)

t: time (s)
 $\vec{v}$: velocity (m s⁻¹)
x: axial coordinate (m)
 ρ : density (kg m⁻³)
 τ : stress tensor (Pa)

2. 다상 모델

본 연구에서는 DPM (Discrete phase model), Eulerian

multi-phase, VOF (Volume of fluid) 모델의 3가지 다상 모델을 사용하였으며, 각각의 지배방정식은 Table 1에 나타나 있다. 그 중 DPM 모델은 입자간 힘의 평형 방정식 식 (4)를 지배방정식으로 가지며, 계산영역 내에 일정한 수의 입자를 주입하여 입자의 유동을 추적하며 계산하는 모델이다. DPM 모델은 Eulerian 기법으로 계산된 유동장 내에서 Lagrangian 기법으로 입자의 경로를 추적하는 방법으로, 주로 유동장 내에서 입자의 경로 및 거동을 추적하는 모델이며, Wang et al. (2009)의 연구에서 기체 버블을 입자로 가정하여 사용된 바 있다.

Table 1 The governing equations for each multi-phase model

Multi-phase Model	Governing Equations*
DPM(Discrete Phase Model)	$\frac{du_i^p}{dt} = F_D(u_i - u_i^p) + \frac{g_i(\rho_p - \rho)}{\rho_p} + \frac{F_i}{\rho_p} \quad (4)$
Eulerian	$\frac{\partial}{\partial t}(\alpha_p \rho_p) + \nabla(\alpha_p \rho_p \vec{v}_p) = \sum_{p=1}^n (\dot{m}_{pq} - \dot{m}_{qp}) + S_q \quad (5)$
	$\frac{\partial}{\partial t}(\alpha_q \rho_q \vec{v}_q) + \nabla(\alpha_q \rho_q \vec{v}_q \vec{v}_q) = -\alpha_q \nabla p + \nabla \tau_q + \alpha_q \rho_q \vec{g} + \sum_{p=1}^n (\vec{R}_{pq} + \dot{m}_{pq} \vec{v}_{pq} - \dot{m}_{qp} \vec{v}_{qp}) + (\vec{F}_q + \vec{F}_{lift,q} + \vec{F}_{vm,q}) \quad (6)$
	$\frac{\partial}{\partial t}(\alpha_s \rho_s \vec{v}_s) + \nabla(\alpha_s \rho_s \vec{v}_s \vec{v}_s) = -\alpha_s \nabla p - \nabla p_s + \nabla \tau_s + \alpha_s \rho_s \vec{g} + K_{qs}(\vec{v}_q - \vec{v}_s) + F \quad (7)$
VOF(Volume Of Fluid)	$\frac{\partial}{\partial t}(\rho \vec{v}) + \nabla(\rho \vec{v} \vec{v}) = -\nabla p + \nabla[\mu(\nabla \vec{v} + \nabla \vec{v}^T)] + \rho \vec{g} + F \quad (8)$
	$\frac{\partial}{\partial t}(\alpha_q \rho_q) + \nabla(\alpha_q \rho_q \vec{v}_q) = S_{\alpha_q} + \sum_{p=1}^n (\dot{m}_{pq} - \dot{m}_{qp}) \quad (9)$

F: summation of external body force, lift force and virtual mass force (N m⁻³)

$F_D(u_i - u_i^p)$: drag force per unit particle mass (m s⁻²)

F_i : additional acceleration term (N m⁻³)

$\vec{F}$: ??

$\vec{F}_{lift,q}$: lift force (N m⁻³)

$\vec{F}_q$: external body force (N m⁻³)

$\vec{F}_{vm,q}$: virtual mass force (N m⁻³)

$\vec{g}$: gravitational acceleration (m s⁻²)

g_i : gravitational acceleration for the i direction (m s⁻²)

K_{qs} : momentum-transfer coefficient between phases

$\dot{m}_{pq}$: characterizes the mass transfer from the pth to qth phase

$\dot{m}_{qp}$: characterizes the mass transfer from the qth to pth phase

p: pressure shared by all phases (Pa)

p_s : pressure of solid (Pa)

R_{pq} : interaction force between phases

S_{α_q} & S_q : source term

u_i^p : velocity of particle (m s⁻¹)

$\vec{v}$: velocity of mixture (m s⁻¹)

$\vec{v}_n$: velocity of nth phase (m s⁻¹)

$\vec{v}_{pq}$: interphase velocity (m s⁻¹)

α_q : volume fraction of nth phase

μ : coefficient of viscosity (kg m⁻¹ s⁻¹)

ρ_n : density of nth phase (kg m⁻³)

τ_n : stress-strain tensor of nth phase

Eulerian 다상 모델은 연속방정식 (식 (5))과 운동량방정식 (식 (6))의 연립방정식 형태인 보존방정식 식 (7)을 지배방정식으로 가지며, 각각의 상에 대해 운동량방정식과 연속방정식을 연산하여 다상 유동을 형성하는 모델이다. 이 모델은 다양한 화학 반응식의 연산을 수행할 수 있기 때문에 화학공학 분야에서 많이 사용되고 있다. Eulerian 모델은 액체, 기체 간의 2상 유동 시뮬레이션 및 고체, 액체, 기체의 3상 유동 시뮬레이션 (Troshko and Zdravistch, 2009; Lopes and Quintanferreira, 2009), 기체를 고속으로 주입하는 버블 칼럼 내부의 수리학적 특성 분석 연구 (Rampure et al., 2007), 등은 상태의 버블 유동에서 상 간의 물질 전달 및 버블 수의 조밀도 연구 (San et al., 2009) 등에 사용된 바 있다.

VOF 모델은 운동량방정식 (식 (8))과 부분 체적량 방정식 (식 (9))을 지배방정식으로 가지며, 각 상 간의 표면을 추적하여 계산하는 모델이다. 이 모델은 버블 칼럼에서 단일 버블의 상승을 분석하는 연구 (Li et al., 2000)와 버블 칼럼에서 초기 버블의 상승에 따른 추행 버블들의 유동에 관한 연구 (Akhtar et al., 2007) 등에 사용된 바 있다.

3. 다상 모델 선정

본 연구의 대상인 버블 칼럼 광생물반응기의 경우에는 Fig. 1과 같이 상부에 공기가 존재하고, 미세조류 성장부에는 배양액에 미세조류 세포들이 성장하고 있으며, 이산화탄소의 공급과 내부의 교환을 위하여 공기 버블이 배양액으로 주입된다. 적절한 다상모델을 선정하기 위하여, 관련 분야에서 일반적으로 사용되는 3가지의 다상 모델을 대상으로 각 모델의 이론적

특징을 비교 분석하였다. 또한 각 모델의 특성이 시뮬레이션 상에서 어떻게 반영되는 지를 확인하기 위하여 물과 공기의 두 가지 물질을 대상으로 하여 3가지 다상 모델에 대하여 2차원 시뮬레이션을 수행하고 그 결과를 비교하였다. 시뮬레이션에 사용한 대상 구조는 다음 Fig. 1과 같이 2ℓ 급 광생물반응기를 직사각형 형태로 단순화 한 2차원 모델을 바탕으로 시뮬레이션을 수행하였다.

시뮬레이션 모델은 2ℓ 급 광생물반응기의 재원을 사용하였으며, 5 mm의 직경을 갖는 버블 주입구로부터의 경사구간은 직선 구간으로 단순화하였다. 반응기 내부에 주입되는 버블 직경은 5 mm로서, 이의 절반에 해당하는 2.5 mm 크기를 가진 사각 격자를 기준으로, 구조 내부에 약 8,600여개의 격자를 사용하였다. 버블의 주입 유량은 실제 주입 유량인 0.05~0.2 VVM (Vessel volume per minute)을 고려하여 0.1 VVM에 해당하는 유량을 주입하였다. 시뮬레이션은 비정상 상태 (unsteady state)로 연산하여 0.01 초의 연산시간 간격으로 총 10초간 연산을 수행하였으며, 이는 일반적으로 2ℓ 급 광생물반응기에서 버블이 수면에 도달하는데 까지 소요되는 시간이 약 1초이기 때문에 초기 버블이 상승한 후 어느 정도 유동이 안정화되는 시간을 고려한 것이다. 버블 주입 후 10초에서 각 모델 별 버블의 형상 및 버블 주입으로 인한 유동 형상을 얼마나 모사할 수 있는지를 분석하였다.

4. 연산시간 간격 선정

시뮬레이션을 수행하는데 있어서 연산 시간 간격은 결과에 큰 영향을 미치는 요소 중 하나이다. 연산 시간 간격이 작을수록 일반적으로 정확도가 높은 것으로 평가되고 있으며, 일정 수준 이상의 연산 시간 간격은 부정확한 결과를 초래할 수 있다. 그러나 연산 시간 간격을 작게 할 경우 총 연산 시간의 증가를 가져오게 된다. 따라서 시뮬레이션의 정확도와 연산시간의 경제성을 동시에 확보하기 위하여 적절한 수준의 연산 시간 간격을 결정하는 것이 매우 중요하다. 본 연구에서는 선정된 다상 모델의 적절한 연산 시간 간격을 결정하기 위하여 2차원 시뮬레이션을 수행하여 각 연산 시간 간격별로 초기 버블이 수면에

Fig. 1 Schematic of the 2D CFD model for testing the application of each multi-phase models modified the actual 2ℓ PBR

Table 2 Time step sizes for each simulation case

Cases	Time step sizes (s)
1	0.0025
2	0.005
3	0.0075
4	0.01
5	0.015

도달하는 데까지 소요되는 시간을 비교 분석하였다. 시도한 시뮬레이션 케이스는 Table 2와 같다.

III. 결과 및 고찰

1. 다상 모델 선정

세 가지 다상 모델의 지배방정식과 그에 따른 특성을 비교 분석한 결과는 다음과 같다. DPM 모델은 Euler-Lagrangian 접근 기법을 사용한다. 이는 Eulerian 방법에 의하여 연산되는 CFD 시뮬레이션 과정에서 Lagrangian 방법에 바탕을 둔 DPM 모델이 개별적으로 연산되어 그 결과 값을 연동시킴으로써 내부 유동장에 의하여 입자의 유동이 결정되는 것을 의미한다 (Fluent manual, 2009). 이는 입자에 의한 유동장의 변화가 고려될 수 없다는 것을 의미하며, 따라서 DPM 모델을 사용하여 버블의 유동을 가시적으로 표현하는 것은 제한되었다.

DPM 모델에서 버블 입자의 가시화를 위해서는 입자의 추적을 통하여 버블의 형상을 표현해야만 한다. 버블의 가시화 정도를 비교하기 위하여 Fig. 2와 같이 광생물반응기에서 입자의 등밀도장을 나타내었으며 계산 영역 내의 검은색 영역이 버블을 의미한다. DPM 모델에서의 버블 입자는 Fig. 2(b)에서와 같이 그 형상을 확연히 구분할 수 있으나, 시뮬레이션 시 입력한 버블의 초기 직경이 계속 유지되며 버블 간의 융합이나 분리, 버블 직경의 확장 등은 지원되지 않는다는 단점이 있었다.

DPM 모델은 Euler-Lagrangian 접근 기법을 사용하는 과정에서 Eulerian 프레임인 연속 상 (continuous phase)으로부터 매 시간 간격마다 운동량, 열, 질량의 정보를 받아 지배방정식인 식 (4)의 연산을 수행하게 되는데, 그 중 운동량은 식 (10)과 같다 (Fluent manual, 2005).

$$F_i = \frac{1}{2} \frac{\rho}{\rho_p} \frac{d}{dt} (u - u_p) \quad (10)$$

F_i : additional forces

ρ : density of fluid (kgm^{-3})

ρ_p : density of particle (kgm^{-3})

u : velocity of the fluid (ms^{-1})

u_p : velocity of the particle (ms^{-1})

식 (10)을 보면 입자와 내부 유체의 유속차이에 의하여 계산된 좌변의 운동량 변화량(F_i)이 입자의 유동을 계산하는 지배방정식 식 (4)에는 포함되어 연산을 수행하는 것을 알 수 있으나, 운동량 변화량 항이 지배방정식 식 (2)에는 포함되어 있지

Fig. 2 Bubble particles density contour: (a) in PBR, (b) at a surface of water, and (c) at the injection area

않기 때문에 입자가 내부 유동에 미치는 영향을 고려할 수 없다고 판단되었다. 그러나 다른 다상 모델에 의하여 형성된 내부 유동장에 입자추적기법을 사용하여 보다 세밀한 분석을 시도하는 데에는 DPM 모델이 유용할 것으로 판단되었다.

Eulerian 모델은 각 상 별 유속과 압력 등을 계산할 수 있다는 장점이 있으나, 각 상이 서로 간에 미치는 영향을 연속방정식 식 (5)와 운동량방정식 식 (6)에서 상간 질량전달과 상간의 유속차이에 의한 상호작용 힘을 연산하는 항에서만 계산하도록 되어 있다. 버블 유동의 경우 상간의 압력차이나 밀도차이에 의하여 유동이 형성되므로 이를 효과적으로 구현하는 데 무리가 있다고 판단되었다. 시뮬레이션 결과를 광생물반응기 내부에서 공기의 등체적비율 선으로 나타내보면, Fig. 3(a)와 같이 상승하는 버블 부근에서 물과 공기의 경계가 불확실하게 나타나는 것을 알 수 있다. Fig. 3(b)를 보면 수면에서는 물과 공기의 경계가 적절하게 묘사되는 것으로 판단되나, Fig. 3(c)를 보면 버블 주입구로부터 수면까지의 구간에서는 독립적인 버블의 형상을 확인할 수 없었으며 주입된 공기가 연속적으로 분사되는 형상으로 묘사되었다. 이는 Eulerian 모델 지배방정식의 질량 전달 항에 의하여 상 간의 상호 침투가 발생하였기 때문으로 판단되었다.

서로 다른 상간의 상호침투를 방지하기 위해서는 기체 버블을 고체로 간주하여 강제적으로 직경을 고정시킨 후 기체의 물성치를 입력하여야 한다. 그러나 이 방법은 Eulerian 모델의 지배방정식인 식 (7)을 연산할 시에 식 (11)과 같이 나타나는 고체의 압력 항(∇p_s)을 추가적으로 계산하여야 하는 문제점을 초

Fig. 3 Volume fraction contour of air phase for Eulerian multi-phase model: (a) at the total area, (b) at a surface of water, and (c) at the injection area

래하며, 이는 단순히 버블의 직경만을 고정하는 것이 아니라, 기체인 버블이 시뮬레이션 상에서 고체로써의 특징을 갖는다는 것을 의미한다. 따라서 Eulerian 모델은 버블의 형상을 묘사하는데 적절하지 않다고 판단되었다.

$$p_s = \alpha_s \rho_s \Theta_s + 2\rho_s (1 + e_{ss}) \alpha_s^2 g_{0,ss} \Theta_s \quad (11)$$

α_s : volume fraction of solid

e_{ss} : coefficient of restitution for particle collisions

$g_{0,ss}$: radial distribution function

Θ_s : granular temperature (K)

p_s : pressure of solid (Pa)

ρ_s : density of solid (kg m^{-3})

VOF 모델은 Eulerian 격자망 내에서 각 상 간의 경계면을 추적하여 연산을 수행하는 다상 모델로 여러 상에 대하여 하나의 운동량방정식 (식 (5))을 계산하게 되며, 따라서 여러 상들이 하나의 유동장을 공유하여 여러 상의 혼합물 (mixture)에 대한 유동만을 나타내게 된다. VOF 모델은 각 상 간의 표면장력을 고려하여 연산을 수행하며, 시뮬레이션 수행 시 표면장력 항을 식 (12)와 같이 상수 혹은 UDF (User defined function)를 사용한 함수로 고려할 수 있다. 표면장력은 하나의 상이 다른 상 내부에서 형성하는 각도에 따른 식으로 나타나게 되며, 이는 식 (13)의 형태로 변환되어 체적량 증감 기울기와 표면이

Fig. 4 Volume fraction contour of air phase for VOF model: (a) at the total area, (b) at a surface of water, and (c) at the injection area

갖는 수직방향 표준벡터, 대상 격자 내부 물질의 밀도의 곱을 두 상의 평균 밀도로 나누어 준 값이 VOF 모델의 지배방정식인 운동량방정식 (식 (5))에 외력 항목에 포함되어 연산을 수행하도록 한다. 따라서 정확한 표면장력 상수의 부여는 보다 정밀한 버블의 형상 및 버블로 인한 유동의 묘사를 가능케 할 것이라 판단된다.

또한 시뮬레이션 결과를 공기의 등체적비율 선으로 나타낸 Fig. 4를 보면, 공기와 물의 구분이 확연한 것을 확인할 수 있었다. 이는 VOF 모델이 각 상 간의 경계면을 추적하여 다상 유동을 연산하고, 액체 내에서 기체가 액체와 일정한 경계면을 형성함으로써 버블의 형상을 묘사하고 있기 때문이라 판단되었다. 따라서 추후 버블 칼럼형 광생물반응기 연구 중 버블에 의한 내부 유동을 분석하기 위해서는 VOF 다상 모델을 사용해야 한다고 판단되었다.

$$p_2 - p_1 = \sigma \left(\frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} \right) \quad (12)$$

$$F_{vol} = \sum_{pairs\ i,j, i < j} \sigma_{ij} \frac{\alpha_i \rho_i k_j \nabla \alpha_j + \alpha_j \rho_j k_i \nabla \alpha_i}{\frac{1}{2}(\rho_i + \rho_j)} \quad (13)$$

k_i : divergence of the unit normal of i th phase

p_1, p_2 : pressures in the two fluids on either side of the interface (Pa)

R_1, R_2 : surface curvature as measured by two radii in orthogonal direction

α_i : volume fraction of i th phase

ρ_i : density of i th phase (kg m^{-3})

σ : surface tension coefficient (N m^{-1})

2. 연산 시간 간격 결정

연산 시간 간격을 결정하기 위한 시뮬레이션 결과는 Fig. 5와 같이 나타났다. 연산 시간 간격이 0.005초인 경우에는 초행 버블이 422 mm 수면까지 도달하는데 소요되는 시간이 약 1.88초로 0.0025초의 연산 시간 간격의 결과와 거의 동일하였으나, 그 이상의 연산 시간 간격에서는 2.2초 이상이 소요되어 확연한 차이를 나타내었다.

각 케이스 별로 측정된, 버블을 주입한 후 10초가 되었을 때의 버블의 순간 최대 유속 및 각 연산시간에 따른 이동거리는 다음 Table 3과 같이 나타났다. 시뮬레이션 대상 구조의 격자 크기가 2.5 mm이기 때문에 0.0075초 이상의 연산 시간 간격에서는 버블이 한 연산 시간 당 2개 이상의 격자를 통과하게

Fig. 5 Rising time of the first bubble for each case

Table 3 Moving distance of bubble per each time step

Time step sizes (s)	Maximum velocity measured at 10 s (m/s)	Moving distance of bubble per each time step (mm)
0.0025	0.72	1.8
0.005	0.64	3.2
0.0075	0.72	5.4
0.01	0.75	7.5
0.015	0.54	8.1

되므로 보다 큰 오차가 발생하는 것으로 판단되었다. 따라서 버블 직경의 절반 크기인 2.5 mm 크기의 사각 격자로 설계한 광생물반응기 시뮬레이션에서는 0.005초의 연산 시간 간격으로 시뮬레이션을 수행하는 것이 가장 적절하다고 판단되었다. 또한 본 연구 결과를 바탕으로 하여 추후 3차원 광생물반응기 시뮬레이션 수행 및 광생물반응기 대형화에 있어서 격자의 크기와 연산 시간 간격을 결정하는 데 한 번의 연산 시간에서 2개 이상의 격자를 통과하지 않도록 적절한 수준의 격자 설계 및 연산 시간 간격 설정이 가능하리라 판단되었다.

IV. 결 론

본 연구에서는 서로 다른 상들 간의 유동을 모사하는데 널리 사용되는 세 가지 다상 모델에 대하여 이론적 비교 및 2D 시뮬레이션 결과 비교 분석을 수행하였다. 그 결과 액체 내 기체 버블의 주입으로 인하여 발생하는 유동을 모사하는 데는 VOF 모델이 가장 적절한 것으로 판단되었으며, 이는 추후 버블 칼럼형 광생물반응기의 내부 유동 분석 및 혼합성능 평가를 위한 3차원 전산유체역학 시뮬레이션에 적용될 것이다. DPM 모델은 버블의 유동을 모사하는 데는 적합하지 않은 것으로 판단되었으나 입자추적 기법을 이용하여 내부 유동 특성의 다양한 분석이 가능하므로 VOF 모델을 적용하여 유동이 형성된 이후의 특성 분석에 이용하는 것이 적절하다고 판단되었다. Eulerian 다상 모델은 상 간의 상호침투작용으로 인하여 버블 유동의 모사에는 적합하지 않은 것으로 판단되었으며, 추후 반응기 내부의 유동분석이 아닌 미세조류 배양 적정 환경을 분석하기 위한 이산화탄소나 영양분의 농도 변화 등을 주목적으로 하는 시뮬레이션을 수행할 경우 적용할 수 있을 것으로 판단되었다. 또한 적절한 연산 시간 간격을 결정하기 위하여 VOF 모델을 사용하여 수행한 2차원 시뮬레이션 결과 0.005초의 연산 시간 간격이 그 정확도와 시간적 경제성 측면에서 가장 적절한 것으로 판단되었으며, 추후 광생물반응기의 대형화나 주입 버블 직경의 증가에 따라서 격자의 크기가 확대되는 경우 한 번의 시간 간격을 연산할 시에 버블이 2개 이상의 격자를 통과하지 않도록 유의해야 한다고 판단되었다.

본 연구는 농촌진흥청 2008년 ‘미세조류 대량생산을 이용한 에너지 자급형 농업생산시설 개발’의 연구비 지원으로 수행되었습니다.

REFERENCES

1. Akhtar, A., V. Pareek and M. Tadé, 2007. CFD

- Simulations for Continuous Flow of Bubbles through Gas-Liquid Columns: Application of VOF Method. *Chemical Product and Process Modeling* 2(1): 9.
2. Apt, K. E. and P. W. Behrens, 1999. Commercial developments in microalgal biotechnology. *J. Phycol.* 35: 215-226.
3. Chaumont, D., 1993. Biotechnology of algal biomass production: a review of systems for outdoor mass culture. *J. Appl. Phycol.* 5: 593-604.
4. Chisti, Y., 2007. Biodiesel from microalgae. *Biotechnology Advanced* 25: 294-306
5. Fluent manual, 2009. The manual of computational fluid dynamics (CFD), Ver 6.1, New Hampshire, USA: Lebanon.
6. Joo, D. S., M. G. Cho, R. Buchholz and E. H. Lee, 1998. Growth and fatty acid composition with growth conditions for *Spirulina platensis*. *J. Kor. Fish Soc.* 31(3): 409-416 (in Korean).
7. Li, J., N. S. Xu and W. W. Su, 2003. Online estimation of stirred-tank microalgal photobioreactor cultures based on dissolved oxygen measurement, *Biochemical Engineering Journal* 14: 51-65.
8. Li, Y., J. Zhang and L. S. Fan, 2000. Discrete-phase simulation of single bubble rise behavior at elevated pressures in a bubble column. *Chemical Engineering Science* 55(20): 4597-4609.
9. Lopes, R. J. G. and R. M. Quinta-ferreira. 2009. CFD modeling of multiphase flow distribution in trickle beds. *Chemical Engineering Journal* 147: 342-355.
10. Oh, H. M., A. Choi and T. I. Mheen, 2003. High-Value Materials from Microalgae. *J. Microbiol. Biotechnol.* 31(2): 95-102 (in Korean).
11. Oswald, W. J., 1988. Microalgal Biotechnology, *Large scale algal culture systems(engineering aspects)*, ed. M. A. Borowitzka and L. J. Borowitzka, 357-410. Cambridge: Cambridge University Press.
12. Pulz, O., 2001. Photobioreactors: production systems for phototrophic microorganisms. *Appl. Microbiol. Biotechnol.* 57: 287-293.
13. Pushparaj, B., E. Pelosi, M. Tredici, E. Pinzani and R. Materassi, 1997. An integrated system for outdoor production of microalgae and cyanobacteria. *J. Appl. Phycol.* 6: 1-165.
14. Rampure, M. R., A. A. Kulkarni and V. V. Ranade, 2007. Hydrodynamics of bubble column reactors at high gas velocity: experiments and computational fluid dynamics (CFD) simulations. *Industrial Engineering Chemical Research* 46: 8431-8447.
15. San, S., Ş. Ergün, M. Bank, C. Kocar and C. N. Sökmen, 2009. Modeling of isothermal bubbly flow with interfacial area transport equation and bubble number density approach. *Annals of Nuclear Energy* 36(2): 222-232.
15. Troshko, A. A. and F. Zdravistch, 2009. CFD modeling of slurry bubble column reactors for Fisher-Tropsch synthesis. *Chemical Engineering Science* 64: 892-903.
16. Wang, S., H. Lu, X. Li, J. Wang, Y. Zhao and Y. Ding. 2009. Discrete particle simulations for flow of binary particle mixture in a bubbling fluidized bed with a transport energy weighted averaging scheme. *Chemical Engineering Science* (in printing).