

<학술논문>

DOI <http://dx.doi.org/10.3795/KSME-B.2015.39.8.633>

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

원뿔형 산기관 설계와 생물반응조에서 수력학적 운전특성에 관한 실험 및 해석

이승진* · 고경한* · 고명한* · 양재경** · 김용국***†
* (주)ANT21, ** 충남도립대학교 환경보건과, *** 유성구청

Conical Diffuser Design and Hydraulic Performance Characteristics in Bioreactor Using Empirical and Numerical Methods

Seung-Jin Lee*, Kyeong-Han Ko*, Myeong-Han Ko*, Jae-Kyeong Yang** and Yong-Guk Kim***†

* Technical Research Center, ANT21

** Dept. of Environmental Engineering & Health Science, Chungnam State Univ.

*** Yuseong District Office

(Received December 23, 2014 ; Revised June 17, 2015 ; Accepted June 17, 2015)

Key Words: Bioreactor(생물반응기), Bubble Behavior(기포거동), Conical Air Diffuser(원뿔형 산기관), Fine Bubble(미세기포), 2-phase Fluid Flow(2상유체유동)

초록: 본 연구의 목적은 고효율 미세기포 공급장치인 산기관을 개발하기 위하여, 미세기포를 이용하여 하폐수에 용존산소를 효율적으로 공급하고 슬러지에 의한 기공의 막힘을 최소화함으로써 호기성 미생물에 의한 유기물 분해공정의 효율성과 내구성을 개선하고자 하였다. 종래의 미세기포 산기관을 개선하기 위하여, 실험과 전산해석 방법을 이용하여 미세기포를 발생시키면서 슬러지에 의한 막힘현상이 없는 원뿔형 산기관을 개발하였다. 전산해석을 통하여 단위 산기관 내부의 공기유동패턴을 확인하여 산기관 설계를 보완하고, 모의 생물반응기에 단위 산기관을 적용하여 발생 기포 거동 실험과 2상유체유동에 대한 전산해석을 수행하였다. 실험 결과로서 모의 생물반응기 내에서 발생기포 수직 길이 및 상승속도 등 기포거동에 대한 통계치를 도출하였으며, 전산해석 결과로서 기포군의 거동을 포함한 유동특성에 대한 메커니즘을 규명하였다. 이를 통하여 고효율 산기관 설계를 체계화하였고 모의 생물반응기 내에서 기포거동과 내부유동 현상을 규명함으로써, 실증 수처리장 규모 생물반응기에 산기관군체를 적용하여 산소전달특성 및 내부유동특성을 파악하고 시스템을 설계하는데 중요한 근거를 제시하였다.

Abstract: In this study, we develop a highly efficient conical-air diffuser that generates fine bubble. By inserting a sufficient number of aerotropic microorganisms with dissolved oxygen from an air diffuser and minimizing the air-channel blockages within the air diffuser, we expect to improve the efficiency and durability of the decomposition process for organic waste. To upgrade the conventional air diffuser, we perform experiments and numerical analysis to develop a conical-type that generates fine bubble, and which is free from nozzle blockage. We complement the air-diffuser design by numerically analyzing the internal air-flow pattern within the diffuser. Then, by applying the diffuser to a mockup bioreactor, we experimentally and numerically study the bubble behavior observed in the diffuser and the 2-phase fluid flow in the bioreactor. The results obtained include statistics of the cord length and increased velocity, and we investigate the mechanisms of the fluid-flow characteristics including bubble clouds. Throughout the study, we systemize the design procedures for the design of efficient air diffusers, and we visualize the fluid-flow patterns caused by bubble generation within the mockup bioreactor. These results will provide a meaningful basis for further study as well as the detection of oxygen transfer and fluid-flow characteristics in real-scale bio-reactors using sets of air diffusers.

- 기호설명 -

A : 계산영역 내 제한면적 (m^2)

D_B : 기포 직경 (m)

F_B : 기포발생 평균 빈도 (Hz)

i : 제한 면적내 기포 인덱스

L_B : 기포 길이 (m)

† Corresponding author, rndcenter@ant21.net

- l : 상, 하단 탐침 프로브 간격
 n : 기포 샘플링 개수
 n_{L_B} : 기포길이 L_B 인 기포 개수
 P_B : 기포발생확률 수밀도
 Re_{exp}, Re_{vm} : 실험 및 전산해석 레이놀드수
 T_{sa} : 기포 샘플링 시간 (sec)
 U_B : 기포평균 상승속도 (m/s)
 V : 계산영역 제한체적 (m³)
 t_1, t_2, t_3 : 기포의 하단, 상단 탐침프로브 통과시
 간 및 다음 기포 발생 시작 시간
 v_{air} : 생물반응기 내의 공기속도 ($\times 10m/s$)
 ϵ_g : 공기 체적분율 (%)
 ρ_{air} : 표준상태 공기밀도 (kg/m³)
 ϕ : 유체역학적 변수
 $\bar{\phi}$: ϕ 의 체적가중평균
 $\hat{\phi}$: ϕ 의 면적가중평균
 K_{La} : 산소전달계수

1. 서 론

1989년 노드워 선언으로 공식적 협약이 등장한 이후 환경문제가 국내 뿐 아니라 국제사회에서도 지속적인 이슈로 대두되고 있다. 특히, 수질환경 분야에서는 국가적 차원에서 2002년도부터 하폐수를 배출시키는 일반적인 지역까지도 방류수의 수질기준을 BOD/SS 20ppm으로 강화·규제하고 있다. 환경·경제적 측면에서 기존 수자원의 의존도를 줄이고 양질의 용수를 안정적으로 공급하기 위해서 하폐수를 효과적으로 처리하고 재이용하는 것이 반드시 필요하다. 기술·산업적 측면에서는 물시장의 개방압력이 강화되고 있고, 최근 EU와 FTA 체결로 인하여 기술개발을 통한 산업경쟁력 강화가 절실하다.

현재 수질환경 분야의 생물학적 수처리로 운용되는 선회류식 산소공급방식은 산소전달효율이 낮아 높은 수처리 효율을 기대하기 어렵다. 하수처리장 운영에 있어 생물반응기 설비의 전력소비는 처리공정과 처리용량 그리고 유입성상 및 산기관의 특징에 따라 다양하게 나타나며 전체 처리장의 60~80%정도 차지한다고 알려져 있다.⁽¹⁾ 수처리 시스템은 기체-액체-고체상이 혼재한 다상유동이며, 종래부터 산기식 포기기(산기관; Air diffuser)중 미세기포식(fine bubble type)은 거

대기포식(coarse bubble type)에 비하여 산소전달에 있어서 효율이 우수한 것으로 알려져 있다.^(2,3) 산소전달측면에서 동일량의 공기를 공급할 경우 미세기포를 포기시켜 기체-액체 접촉면적 및 기체상 내 액체상의 체류시간을 증가시킴으로써 산소전달량을 최대화 할 수 있다. 경제적 측면에서 압력부하를 감소시켜 송기 소요동력을 최소화하고, 설비 운용측면에서 포기기의 노즐 막힘을 억제하여 내구성능을 증대시킴이 산기관 설계에서 매우 중요한 사항이라 할 수 있다.

일정수심에서 형성된 기포는 기체와 액체의 2상(2-phase) 유체로서 상간 물질전달을 하며 상승작용을 하게 되는데, Ykita, Yoshida⁽⁴⁾는 발생 기포의 크기는 기체와 액체의 물성에 관계없이 기포발생 노즐이나 오리피스스의 직경과 기체의 속도에 의해 결정되며, 발생 기포의 합체와 분리의 평형에 의해 상승 기포의 크기가 주로 결정된다고 하였다. 호기성 미생물에 의해 유기물을 분해하기 위해서 송기량을 충분히 하는 것은 산기관의 소요동력이 증가할 수밖에 없으므로 미세기포를 공급하여 일정 공기 공급량에 대한 산소전달률(K_{La})과 산소전달효율(SOTE)를 증가시키는 것이 필수적이다. 그러나, 미세기포식 산기관은 기공의 막힘현상이 발생할 수 있으며 사용기간이 오래될수록 막힘현상은 심해지게 되며 결국 기능을 상실하여 수처리장의 가동 중단으로 인한 환경적 손실비용을 초래하게 된다.

본 연구에서는 산기관의 산소전달 능력을 극대화 시킬 수 있는 미세기포 발생방식을 채택하면서도 기공의 막힘현상을 방지할 수 있는 원뿔형 산기관을 개발하고자 하였다. 또한 개발된 산기관에 대하여 모의 생물반응기 내에서 발생 기포 거동 실험 및 유체 유동해석을 통하여 고효율 산기관의 체계적인 설계기술을 확립하고자 하였다. 향후 연구로서, 본 연구에 의해 설계된 산기관을 실증 규모 생물반응기에 적용함으로써 처리장에서 산소전달 성능을 극대화할 수 있도록 산기관의 설치 및 운전조건을 도출할 예정이다.

2. 실험 및 전산모사

2.1 원뿔형 단위 산기관 설계

단위 산기관의 설계시 미세기포 발생 방식을 위한 다공 설계와 침강성 부유물에 의한 다공의

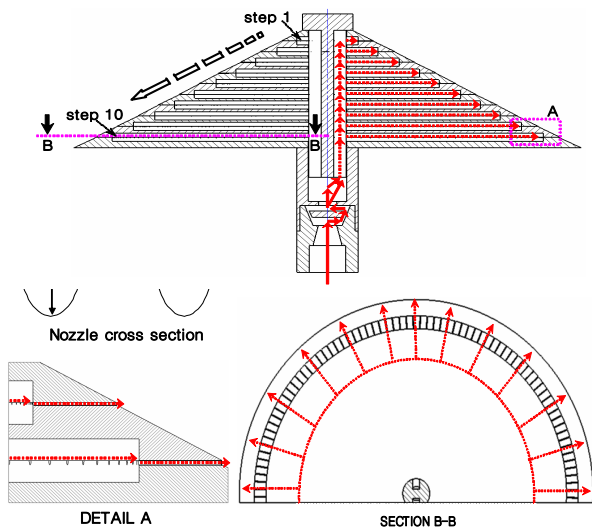


Fig. 1 Air flow directions in cross sectional view of air diffuser

막힘현상을 배제하는데 초점을 맞추었다. 다공이 중력방향에 직접 노출되지 않게 함과 동시에 슬러지가 노즐 주위에 누적되지 않고 미끄러지도록 구배를 형성하는 구조로 설계함으로써 노즐부의 막힘을 사전에 방지하고자 하였다. 이러한 특성을 가진 독립된 다층 원뿔형 산기관 11개를 개별로 설계하여 이를 완성품으로 조립하여 미세 노즐을 가진 적층형의 산기관을 구성함으로써 생산공정의 용이성을 향상시키고자 하였다.

산기관의 운전조건과 더불어 산기관의 성능에 결정적인 영향을 미치는 노즐의 설계변수로서 물과 인접하는 출구 측 노즐의 형상, 배열 및 노즐간의 거리가 기포의 발생크기와 발생량 및 생성기포의 합체 특성을 좌우한다. 따라서, 노즐의 설계를 위한 사전단계로서 단일 노즐의 크기와 두 노즐간 거리를 변화시켜 가면서 발생 기포간의 합체 발생여부를 육안으로 확인하였다. 이 결과를 토대로 발생 기포의 밀도가 최대이면서 기포간의 합체가 발생되지 않는 조건으로 단위 산기관의 구성품인 산기관을 설계하였다. 또한, 삼각 피치법을 이용하여 노즐을 배치함으로써 노즐의 원주방향 배치밀도를 최대로 하였고, 반경방향으로 각 산기관의 노즐 출구의 위치가 다르게 함으로써 반경방향 기포 합체를 방지하였다. 부력에 의한 단일 기포의 유동이 다소의 지그재그 거동을 하기는 하나 거의 수직이라고 한다면, 원주방향 및 반경 방향에 대하여 기포의 유선을 상호 회피할 수 있는 노즐 배치구조가 된다.

Fig. 1에 산기관의 단면도를 나타내었으며 전체적 형상은 원뿔 형상이며 각 산기관들의 조합에 의하여 노즐 및 공기실 등의 공기 유로가 생성되었다. 미세 기포 발생량의 최대화를 위하여 최소 노즐 직경을 방사상으로 배치하였다.

최외곽인 11번째 산기관의 노즐 설계시에는 발생 기포의 합체 확률이 적다는 점을 착안하여 미세기포 발생 범위 내에서 큰 노즐 직경을 적용하여 배압상승을 억제하였다. 산기관의 노즐의 수는 각 단(step)에 따라 일정한 비율로 증가하며, 1단에서 9단까지 반타원 단면직경 0.3mm인 노즐 1,466개와 10단에서 0.6mm인 반타원 단면직경 0.6mm인 노즐 144개로 총1,610개의 노즐로 구성되었다.

2.2 유동특성 전산모사

산기관 내부 및 모의 생물반응기에 대한 유동특성을 파악하는 것은 단위 산기관의 설계뿐만 아니라 처리장 규모의 생물반응기를 설계시 매우 중요하다. 본 연구에서는 전산해석을 통하여 산기관 내부유로에 대한 공기 유동특성과 모의 생물반응기 내의 물-공기 2상유체 유동특성을 파악하고자 하였다. 전산해석을 위한 계산격자는 유체 유동의 수렴성 및 정확성을 높이기 위하여 육면체형 격자(Hexa grid)로서 유선을 예측하여 되도록 유선에 수직하도록 생성하였다. 2상유동의 모델로는 생물반응기의 상황을 가장 잘 나타낼 수 있는 2상혼합모델(2-phase mixture model)을 사용하였다. 실제 생물반응기에 있어서 기포(군)의 거동은 정수압의 영향성이 크고 산기관에 의해 발생된 기포가 자유표면을 통해 대기로 방출되는 것은 상간 물질전달에 중요한 사항이다. 따라서 본 모델은 기본적으로 2상유동은 물론이고 정수압에 의한 압력효과를 구현할 수 있고 자유표면(free surface) 해석도 가능하며 기포군에 대한 유체역학적 변수를 용이하게 구현할 수 있기 때문에 실제를 모사하기에 적합하다. 공기와 물은 표준상태(20℃, 1atm)의 물성치를 사용하였고 난류 모델은 일반적인 표준 $k-\epsilon$ 모델을 사용하여 각 상에 대하여 계산하도록 하였으며 기포 상승방향과 반대방향으로 중력가속도를 작용시켰다. 본 연구는 발생 기포에 의하여 유체 유동이 완전발달된 상태를 모사하기 위하여 정상상태로 설정하였다. Solver로는 KISTI 슈퍼컴퓨팅센터 슈퍼컴 4호

기의 IBM 시스템의 Fluent 6.3.26을 사용하여, Job command file을 생성하여 원격으로 처리하였다.

2.2.1 산기관 내부 모사

단위 산기관의 내부 유로에 대한 설계 타당성 및 생물반응기에 적용하기 위해서는 유체역학적 변수에 대한 사전 검증이 필요하다. 상기에서 언급한 바와 같이 산기관은 수많은 미세노즐로 구성되어 있으므로 실험을 통하여 유체역학적 변수에 대한 분포를 파악하는 것은 사실상 불가능하다. 따라서, 단위 산기관을 가상으로 구현하여 유체역학적 변수들에 대한 산기관 내부 분포를 확인하고자 하였으며, Fig. 2에 공기 유로에 대한 계산격자의 생성과 경계조건을 나타내었다.

산기관은 중심면을 기준으로 대칭이므로 절반 영역만 격자생성 및 해석하였다. 1,600여개의 노즐에 대한 공기유동 모사를 위하여 계산 격자의 수는 4,860,000개 정도로 미세하게 생성하였으며, 기포 발생 노즐부와 인접하고 있는 체적에 대한 계산 격자가 급속하게 커지지 않도록 격자를 구성하여 해의 발산을 방지하였다. 해의 수렴성을 높이기 위하여 산기관은 가상의 육면체 용기에 담긴 상태로, 용기는 상압의 공기로 채워져 있다고 가정하였다. 경계조건은 하단부를 통하여 산기관에 공기를 유입시켰으며 산기관의 출구는 용기의 상단부 1개소를 유출 조건으로 설정하였으며 벽면들은 no-slip wall로 설정하였다. 공기공급유량은 산기관의 일반 운전범위인 고려하여 6.0m³/hr이었다.

2.2.2 모의 생물반응기 내부 유동해석

전산 유체 해석 결과에 대한 변수값들을 효과적으로 비교·분석하기 위하여 유체역학적 변수(ϕ)에 대하여 제어체적 내에서 체적(V) 가중 평균($\bar{\phi}$) 및 면적(A) 가중 평균($\hat{\phi}$)을 식 (1), 식 (2)로 정의하여 수치적으로 해석결과를 분석하였다.

$$\bar{\phi} = \frac{1}{V} \int \phi dV = \frac{1}{V} \sum_{i=1}^n \phi_i |V_i| \quad (1)$$

$$\hat{\phi} = \frac{1}{A} \int \phi dA = \frac{1}{A} \sum_{i=1}^n \phi_i |A_i| \quad (2)$$

생물반응기내 유동에 대한 전산해석 결과로 많은 유체역학적 기본 및 파생 변수들에 대한 결과

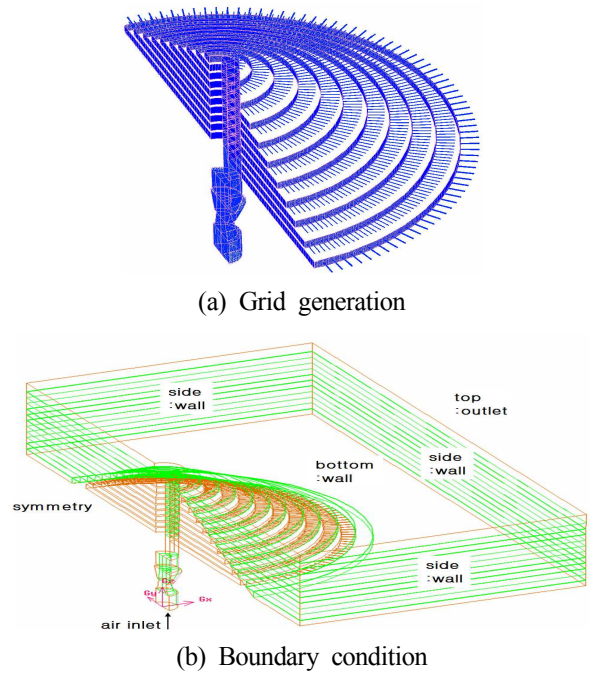


Fig. 2 Grid generation and boundary condition settings for calculating air diffuser

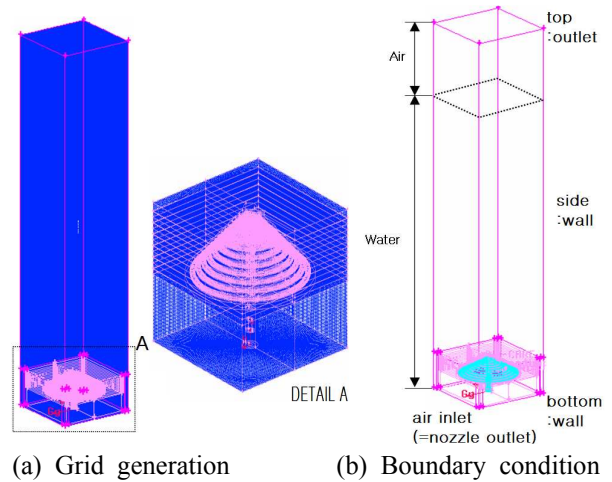


Fig. 3 Grid generation and boundary condition settings for calculating mockup bioreactor

값 획득이 가능하나, 본 연구에서는 공기 체적분률(ϵ_g), 공기 속도(v_{air})만을 결과처리용 변수값으로 사용하였다. 이러한 이유는 산기관의 궁극 목적으로서 공기로부터 물로의 산소전달 성능을 향상시키기 위해서는 물과 공기의 접촉면적의 최대화가 중요하기 때문이다. 또한, 물 속에서의 공기 체적분률 증가는 기포 부력류에 의한 운동량 전달을 증가시키므로 시스템의 물리적 현상 변동양상 파악에 중요하다. 산기관에 의하여 일정 패턴

으로 지속 공급되는 기포군에 의해 유발되는 선회류는 산기관 배열 및 유량에 대하여 고유의 양상을 띠며 공기와 물을 혼합시킨다. 이 공기와 물은 생물반응기 내에서 병류의 형태로서 선회류를 형성하며 산소전달이 불량하여 수처리 효율을 저하시키는 “Dead zone”을 최소화한다.

그러나, 과도한 선회류의 형성은 기포상승 속도를 빠르게 하여 물과 기포의 접촉시간을 단축시킴으로써 산소전달 성능을 감소시킬 수 있으므로 물과 공기의 속도 분포 측면에서의 고찰이 중요하다. 모의 생물반응기에 대해서는 공기와 물에 대한 2상유동을 해석하였으며, 전체적인 방법은 단위 산기관의 해석과 유사하다. Fig. 3에 유동해석을 격자생성 및 경계조건을 나타내었으며, 바닥면에 설치한 산기관까지 Full modeling한 상태로 해석하고자 하였으나 계산 격자수가 방대해진다. 단위 산기관에 대한 해석은 2.2.1절에서 수행하였으므로, 본 연구에서는 모의 생물반응기에 대해서는 변형된 산기관 모델을 사용하였다. 즉, 산기관 내부유로는 삭제하였고 노즐 출구를 공기 입력부로 설정하였다. 산기관의 유량 변화의 영향성을 파악하기 위하여 산기관 유량 및 생물반응기의 수위조건은 기포거동 실험조건과 동일하게 설정하였다. 해석격자의 수는 약 2,800,000개 정도로 하였고 상단부는 대기조건을 적용하고 공기와 물의 경계면은 자유표면이며 측면 및 바닥면은 no slip wall로 처리하였다. 본 연구의 관심 영역은 바닥면으로부터 자유표면까지 구간이므로 윗부분의 공기 영역은 결과고찰시 배제하였다.

2.3 기포 거동실험

실증 규모의 생물반응기에서 산기관 적용을 위한 사전 연구로서 모의 생물반응기 내에서 단위 산기관에 의해 발생된 기포 거동의 파악이 필요하다. 발생기포 거동실험 장치 개략도를 Fig. 4에 나타내었으며, 크게 산기관이 포함된 모의 생물반응기부와 공기압축기 등의 공기 공급장치부 및 탐침 프로브 등의 데이터 장치부로 구성하였다. 모의 생물반응기는 아크릴로 제작하였으며 바닥면에 산기관을 장착하였고 산기관 하단에서 공기 공급이 이루어졌다. 공기 공급장치부로부터 공급된 공기는 기포의 형태로서 수면까지 상승한 후 대기로 배출되는데, 이 때 상승 기포들 중 유선이 탐침 프로브를 지나는 기포에 대한 거동 데이터를 얻어서 데이터를 처리하였다. Table 1에 주

Table 1 Equipment specification and test parameter

Item	Details	Specification
Bioreactor	W×B×H	0.5×0.5×2[m]
Aerator	Air diffuser	1[ea]
Sensor type	Optical fiber probe	Spectrapro-275
Sensor location	Distance from bioreactor bottom	0.6[m]
Parameter	Air flow rate [m ³ /hr]	3.6, 4.8, 6.0, 7.2
Data acquisition	Sampling rate/duration	333[Hz]/ 90[s]

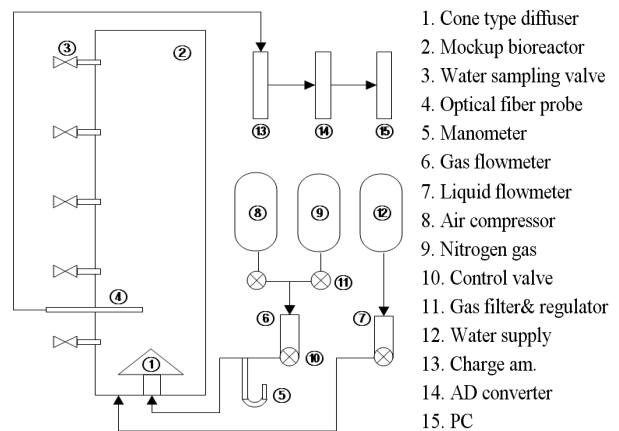


Fig. 4 Schematics for bubble behavior experiment

요 실험장치 및 설정사항을 나타내었고, 공기 공급유량 범위는 일반적 운전 범위인 3.6, 4.8, 6.0, 7.2m³/hr이며 표준상태량으로 환산된 공기량으로 조절, 공급되도록 하였다. 시험수는 상수도이며, 정지수 상태로 1.8m의 수위로 채워진 상태에서 실험하였다. 본 실험에 사용된 탐침 프로브는 프루브 말단에 위치한 2개의 팁에 광원이 입력되며 유체에 의해 회절된 빛을 포토트랜지스터에서 출력된 전기신호로 변환하는 방식이며, 팁 인접유체의 상(phase)의 종류에 따라서 각각 다른 전기 신호가 얻어지게 된다. 전기신호의 출력범위는 액상에서 1.65V이상, 기상에서 1.65V이하의 신호가 각각 얻어진다. 본 탐침 프로브의 설치 위치는 바닥으로부터 0.6m 지점에 설치하였는데 산기관 상단면 기준으로 0.4m 지점으로서 팁의 선단을 생물반응기의 중앙부에 위치시켰다. 이 위치에 탐침 프로브를 설치한 이유는 수직방향으로 이 위치보다 낮은 위치에서는 국부적인 선회류에 의해 기포의 재순환이 발생하므로 동일 기포의 중복측정 오류가 발생할 수 있다. 반대로, 본 지점보다 높은 위치에서는 발생 기포류의 상승작용

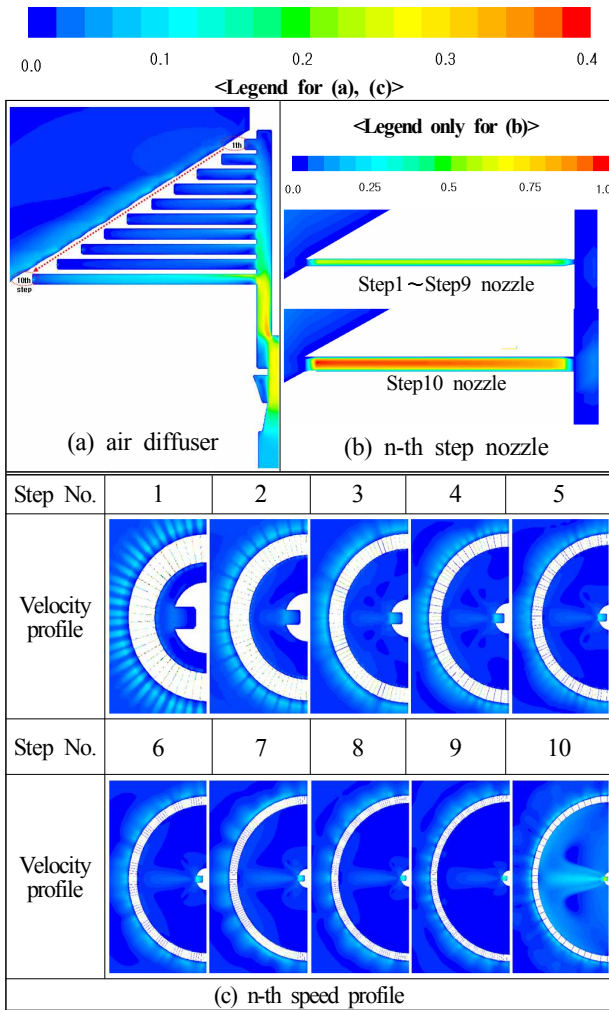


Fig. 5 Dimensionless speed profiles of unit air diffuser (Q=6.0m³/hr)

에 의한 기포의 합체 현상으로 인하여 합체된 기포의 자료를 다량 포함할 가능성이 높다. 따라서, 하단부에서 상존하는 선회류에 편승한 기포의 영향을 최대한 방지할 수 있으며 발생 기포가 정상류로 상승하는 시발점으로 확인되는 본 지점을 기포 거동실험을 위한 프로브의 위치로 선정하였다.

각 유량에 대하여 3ms 간격으로 90초간 샘플링하여 30,000개의 데이터를 획득하였으며, A/D 변환기에 의해 신호변환 후 PC에서 데이터 처리하였다. 기포의 평균 상승속도는 식 (3), 수직길이는 식 (4)는 상하 팁 간의 상대적 시간 차에 의해 구한 단일 기포상승속도를 기포수로 평균하여 구하였다.

$$U_B = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n U_{Bi} \tag{3}$$

where, $U_{Bi} = \frac{l}{\Delta t_{12}}$, $\Delta t_{12} = t_2 - t_1$

$$L_B = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n L_{Bi} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \frac{\Delta t_{13}}{\Delta t_{12}} \tag{4}$$

where, $L_{Bi} = U_{Bi} \Delta t_{13} = l \frac{\Delta t_{13}}{\Delta t_{12}}$, $\Delta t_{13} = t_3 - t_1$

$$F_B = \frac{n}{T_{sa}} \tag{5}$$

$$P_B = \frac{n L_B}{\sum_{i=1}^n n L_{Bi}} \tag{6}$$

기포 평균빈도수는 실험시간 동안 획득된 자료를 이용하여 식 (5)에서, 단일기포 수직길이에 대한 확률수밀도는 식 (6)에서 각각 계산하였다.

3. 결과 및 고찰

3.1 원뿔형 산기관의 내부유동 특성

Fig. 5에 산기관의 내부유동 전산해석 결과를 나타낸 것으로서 해석 결과 중 유속의 분포를 최대 유속에 대하여 무차원화 하였다. 산기관은 중심면을 기준으로 대칭구조임을 고려하여 해석 결과의 절반만을 나타내었다.

Fig. 5(a)는 유로 단면적이 상대적으로 좁은 목 부분에 유속이 크게 나타나는 일반적인 경향을 보였다. 모서리 부분에서는 유동이 불리하게 나타나는데 돌출된 부분에서는 유동의 저항을 발생시키고 반대로 함몰된 부분에서는 불필요한 선회류가 생겨서 유동손실을 초래하므로 설계보완에 적용하였다.

Fig. 5(b)에 노즐부의 유속분포를 나타낸 바와 같이, 최대유속은 Step10의 노즐 쪽의 관로 중앙부에서 나타났다. 노즐 안쪽에 위치한 공기실에 비해 노즐부는 훨씬 작기 때문에 속도분포 그래프를 별도로 범례 표시하였다. Step10에 속한 노즐의 속도는 Step1~9에 속한 노즐에 비해 유속이 빠르고 나타났는데, Step10에 속한 노즐 직경이 Step1~9의 노즐 직경차이 때문이며, 벽면 no slip에 의한 벽면 전단력의 영향을 확인할 수 있었다.

Fig. 5(c)에는 각 step에 대하여 노즐 중심을 지나는 평면의 무차원 속도분포를 나타낸 것이다. 각 step은 크기 차이가 많이 나기 때문에 이미지 처리과정을 거쳐서 동등 스케일로 비교하였다.

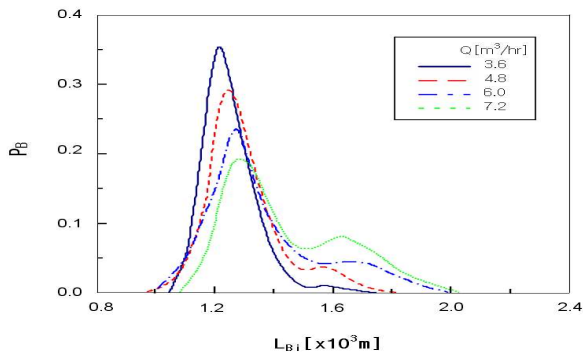


Fig. 6 Probability number density of bubble chord length

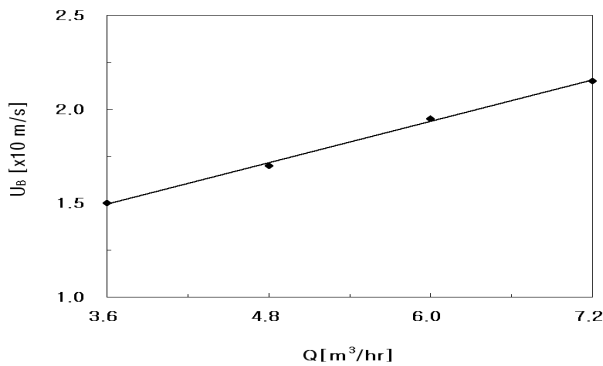


Fig. 7 Effects of air flow rate on bubble rising velocity

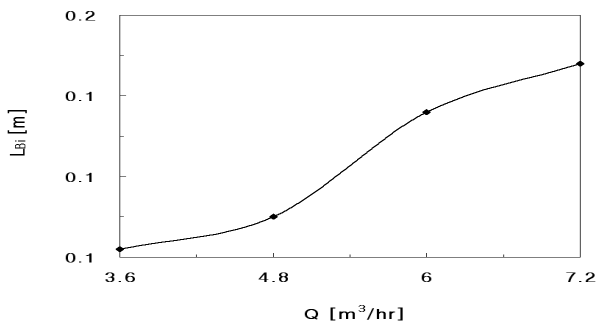


Fig. 8 Effects of air flow rate on bubble chord length

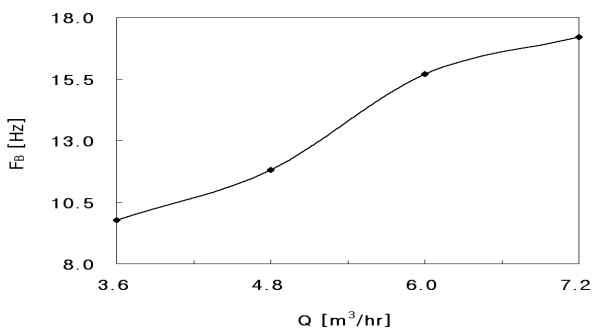


Fig. 9 Effects of air flow rate on bubble generation frequency

Step1의 그래프에서는 각 노즐을 통해서 유출된 공기가 방사형으로 균일한 속도분포를 가지고 유

출됨을 확인할 수 있다. 특히, Step10에는 공기가 노즐을 통하여 유출되기 전에 중심부 제트를 기준으로 하여 상하 양방향으로 대칭인 선회류를 형성하며 유출되는 유동양상이 뚜렷이 나타났다.

3.2 단위 산기관에 의한 발생 기포 거동

산기관 운전을 통하여 노즐 전반에 걸쳐 미세 기포가 비교적 고르게 발생함을 육안으로 확인할 수 있었다. 전체적 기포 거동은 기포 발생과 동시에 수면 방향으로 상승하며, 벽면에서는 기포 상승방향과 반대방향으로 선회류가 생성됨을 확인할 수 있었다. Fig. 6~Fig. 9는 산기관 바닥으로부터 수직 길이 0.6m인 중앙지점에서 유량변화가 3.6, 4.8, 6.0, 7.2m³/hr일 때의 발생 기포 거동 분석결과를 나타낸 그래프이다. Fig. 6은 발생 기포 수직길이에 대한 확률 수밀도를 나타낸 것으로 유량이 3.6m³/hr인 경우의 그래프는 분포의 폭이 좁고 높게 나타나지만, 유량이 7.2m³/hr으로 점차 증가함에 따라 그래프 분포 폭이 넓어지고 낮아지는 경향을 보였다. 또한, 공기 공급유량이 증가함에 따라 수직길이의 최빈치는 1.2~1.3mm로 8%로 점차적으로 증가하나 빈도값은 점차 감소하였고, 유량이 증가할수록 2차 최빈치 구간이 새로 형성되는 경향을 보였다. 이러한 이유는 공기 유량이 증가함에 따라 큰 기포의 발생비율이 증가하였고, 유량 증가에 따른 기포체류량의 증가로 인하여 기포의 합체확률이 높아졌기 때문이다.

Fig. 7은 공기 공급유량이 증가함에 따라 기포의 상승속도를 나타낸 것으로서, 공기 공급유량의 증가에 대해 기포의 상승속도는 거의 선형으로 상승하는 경향을 나타내었다. 이것으로 보아 발생된 기포에 의해 선회류가 생성되며 중앙부에서의 상향 선회류는 물과 기포의 병류를 형성하여 기포의 상승속도를 결정하므로, 생성 기포의 크기가 기포 상승속도의 주요 결정요인으로 판단된다. Fig. 8은 공기 공급유량 변화에 따른 기포의 평균 수직길이의 변화를 나타낸 것으로 1.21~1.43mm로 18%로 점차 증가하였다. Fig. 9는 공기 공급유량에 대하여 기포 발생 빈도를 나타낸 것으로 공기 공급유량이 증가함에 따라 기포 발생 빈도는 증가하고, 공기 공급유량이 6.0m³/hr 이상인 경우에는 증가율이 감소하는 경향을 나타낸다. 이는 공기 공급유량이 증가함에 따라 생물

반응기 내에 기포 체류량이 증가하여 기포들 간의 접촉확률이 높아져 합체현상이 활발히 일어나기 때문이라 사료된다. Fig. 6~Fig. 9를 종합해서 고찰하면, 공기 공급유량의 증가에 의해 발생 기포의 수직길이 및 발생빈도가 증가하고, 기포 체류량 증가에 따른 기포간의 합체가 나타남을 확인할 수 있다.

3.3 모의 생물반응기에서 유동 특성

본 유동해석의 결과를 보면, 전체적으로 모의 생물반응기 내의 가장 큰 유체의 흐름 현상은 중심부에서 수직 상향류가 발생하며, 벽면에서는 수직 하향류가 발생하여 선회류를 형성하는 것이다. 전체적으로, 상향류의 경우에는 물과 기포가 병류의 형태로서 동반 상승하며 하향류의 경우 기포는 대부분 병류로부터 이탈되면서 대기로 계속 방출된다. 수면 부근에서는 기포 산재와 난동으로 인하여 선회류의 유동이 저항을 받게 되고, 중앙부에서 벽면부로의 유동과정에서 지속적으로 탈기됨으로써 공기 유속이 자연적으로 감소한 것으로 확인되었다. 벽면을 따라서 바닥까지 하향한 물은 탈기된 상태로 재선회하고 산기관으로부터 공급된 기포 부력류에 의한 상승작용으로 다시 운동량을 받으며 물과 기포의 병류를 형성하여 상승하게 됨으로서 상기의 과정을 반복하며 전체적으로 선회류를 형성하였다. 2.2.2절에서 “Dead zone”에 대해 언급한 바와 같이, 산소전달 효율을 높이기 위해서는 기포량이 어느 정도 충분한 상태에서 과도한 선회류가 발생하지 않는 공기량 범위에서의 운전이 필요하다.

Fig. 10은 모의 생물반응기 수위가 1.8m일 때, 공기 공급유량 변화에 따른 공기 체적분률에 대한 체적 가중 평균($\overline{\epsilon_g}$)과 공기 속도에 대한 체적 가중 평균($\overline{v_{air}}$)에 대한 관계를 나타낸 그래프로서 양자 모두 공기 공급유량이 증가함에 따라 증가하는 경향을 보인다. $\overline{\epsilon_g}$ 는 공기 공급유량이 증가함에 따라 공기과 물의 접촉면적이 증가하기 때문에 나타나는 일반적인 결과이며, $\overline{v_{air}}$ 은 공기 공급유량의 증가로 인하여 기포의 상승작용을 발생시키는 기포량의 증가에 따른 운동량 증가로 인해 선회류의 강도가 커졌기 때문으로 사료된다. 기포군은 부력에 의해 물에 운동량을 전달하고 물은 중력과 관성력에 의하여 기포 유동에 영향을 미치므로, 양자는 병류의 형태로서 상호 연

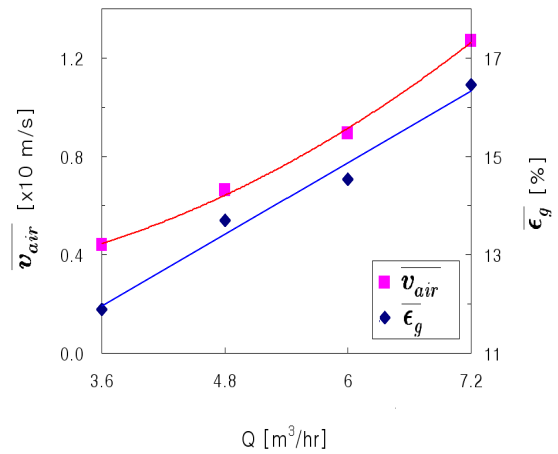


Fig. 10 Volume-weighted air volume fraction and air velocity in mockup bioreactor

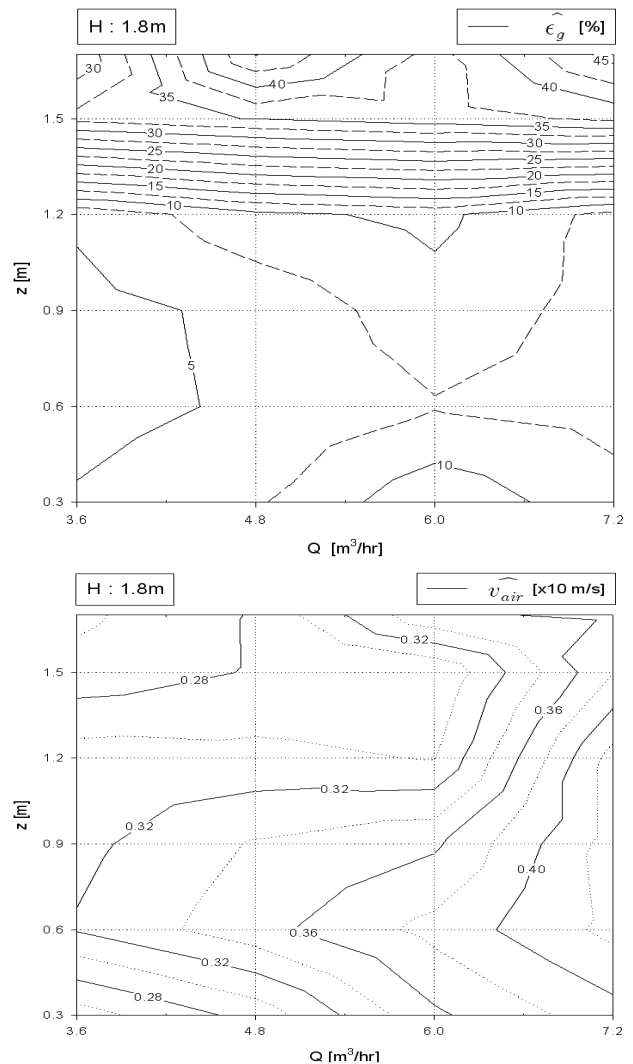


Fig. 11 Area-weighted air volume fraction and air speed in mockup bioreactor

관구조임을 추정할 수 있다.

Fig. 11은 공기 공급유량이 3.6~7.2m³/hr으로

변함에 따라 바닥으로부터 거리(z)에 따른 공기 체적분률에 대한 면적 가중 평균($\widehat{\epsilon}_g$) 및 공기속도에 대한 면적 가중 평균(\widehat{v}_{air})에 대하여 나타낸 그래프이다.

전체적으로 유량이 증가함에 따라 양자 모두 증가하는 경향을 나타내었다. 공기 공급유량이 6.0m³/hr인 경우가 바닥면으로부터 거리(z)가 작은 경우 $\widehat{\epsilon}_g$ 가 비교적 크게 나타났다. 공기 공급유량 3.6m³/hr과 4.8m³/hr인 경우에는 공기 공급유량 자체가 적기 때문에 $\widehat{\epsilon}_g$ 가 낮게 나왔다. 반면에 공기 공급유량이 7.2m³/hr의 큰 유량에서는 Fig. 12의 결과와 같이 선회류가 과도하게 강해져서 발생 기포를 중앙부로 수축시키며 빠르게 상승시켰기 때문이다.

물이 산소공급기회를 얻기 위해서는 기포와 물의 접촉면적이 클수록 산소전달 성능이 유리하기 때문에 생물반응기 내부에 기포가 잘 분포되어 있어야 하고 선회류의 유속이 낮아서 기포의 상승속도가 적어야 기포체류시간을 길게 할 수 있다. 이러한 관점에서 보면 상대적으로 기포가 비교적 잘 분포되어 있고 기포유속이 낮은 경우가 더 바람직하다고 사료된다. 바닥면으로부터의 높이가 1.5m 이하에 비하여 1.5m이상인 영역에서는 전체적으로 $\widehat{\epsilon}_g$ 가 높게 나타났다. 이는 수표면에 가까워질수록 선회류의 속도가 낮아지고 선회류가 벽면방향으로 흘러나가면서 느린 상승속도로 이탈되는 기포체류량이 증가하였기 때문이다. $\widehat{\epsilon}_g$ 는 유량이 증가함에 따라 조금씩 증가하는 경향을 보이고 있으며, 바닥에서 0.6m인 지점까지는 유속이 증가하다가 0.6m에서부터 1.5m 지점까지는 다시 감소한다. 이는 바닥면으로부터 거리가 0.6m인 구간에서는 노즐을 통해 발생된 기포 운동량이 선회류에 지속적으로 더해져서 병류 유속이 증가하여 0.6m인 곳에서 최대가 되었으며, 0.6m 이상에서는 병류 유속이 낮아졌기 때문이다.

Fig. 12는 생물반응기의 수직방향 중심면에서의 공기 체적분률(ϵ_g) 및 속도 체적분률(v_{air})에 대한 그래프를 나타낸 것으로서 산기관에 의해 발생한 기포(군)는 거의 수직 상승하며, 산기관의 중심선에서 공기 속도 및 공기 체적분률이 최대이고 반경방향으로 갈수록 점차 감소함을 확인할 수 있다. 공기 체적분률은 산기관에 인접한 노즐

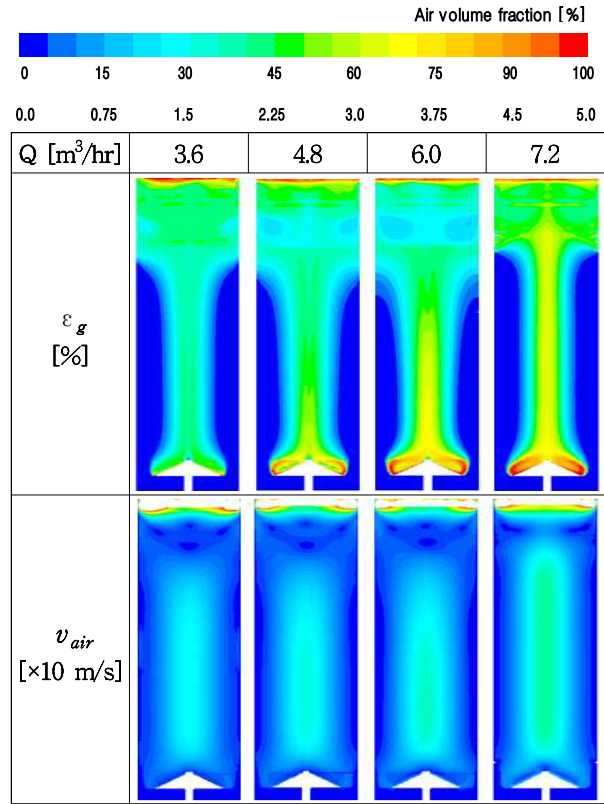


Fig. 12 Volume fraction and air speed contour of center plane in mockup bioreactor

부에서 가장 높게 나타나며, 공기 공급유량이 증가함에 따라 공기의 체적분률이 증가함을 확인할 수 있다. 또한, ϵ_g 는 z가 증가함에 따라 공기 체적분률이 높은 부분이 점차 줄어들다가 점차 없어지는 것을 확인할 수 있다. 이는 바닥면으로부터의 거리가 증가함에 따라 기포가 축방향으로 상승함과 동시에 반경방향으로 확산되기 때문이다. 상기에서 언급한 바와 같이 축방향 기포의 속도는 기포의 상승운동으로 인하여 일정 거리까지 점차 증가하다가 수면에 가까울수록 난동기포의 산재와 선회류의 감소로 공기 유속이 감소함을 확인할 수 있다. 또한, 공기 공급유량이 최대인 7.2m³/hr일 때 ϵ_g 의 폭이 가늘어졌음을 확인할 수 있는데, 이는 다량의 기포군에 의해 발생한 강한 선회류가 기포군을 수축시키며 병류의 상승력이 반경방향으로의 확산력보다 훨씬 크기 때문이다. 단일 산기관에 의하여 실험과 전산해석 결과로 물 속에서의 기포 거동현상을 확인할 수 있었으며, 공기와 물의 유동조합에 의한 선회류가 전체적인 유동현상에 있어서 매우 중요한

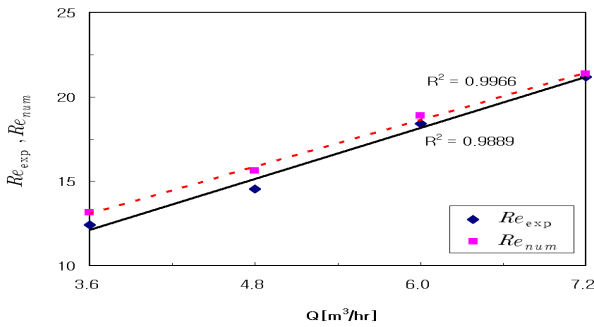


Fig. 13 Comparison Reynolds number between experimental and numerical results ($z=0.6m$)

요소임을 확인하였다. 공기 공급유량이 증가함에 따라 선회류 유동은 증가하며 공기과 물의 접촉 가능성을 커지는 반면, 과도한 선회류는 산소전달효율에 악영향을 미칠 것으로 예상된다. 기포 체류량과 체류시간을 동시에 향상시키기 위해서는 생물반응기 규모와 형상에 알맞은 공기 유량과 산기관의 배치가 필요할 것으로 사료된다.

3.4 산기관 전산 모델의 타당성 검증

연속상의 유체 유동과는 달리, 생물반응기 내에서의 유체유동은 연속상인 물 속에 분산상인 기포가 산재되어 있는 형태이다. 미세기포는 주위의 물과 부력 등의 역학적인 상호작용을 하면서 후류(wake) 등에 의한 지그재그나 나선형 궤적을 그리며 수면으로 상승하게 된다.⁽⁵⁾ 또한, 기포가 상승하는 유선상에 존재하는 다른 기포와 조우하여 기포간의 합체가 발생함에 따라 주위 물과의 역학관계가 계속해서 변한다. 단위 산기관이나 산기관군으로 운용되는 실증 규모의 생물반응기 내에서는 산기관 간의 상호작용 및 국부적인 선회류의 혼재 등으로 인하여 유동양상이 훨씬 더 복잡할 것으로 사료된다.

실증 규모의 생물반응기에서 산기관 전산해석 모델의 타당성 검증은 불가능하다고 판단하여, 모의 생물반응기에서 전산해석 모델에 대한 타당성을 검증하였다. 기포 거동 실험에서 언급한 바와 같이, 기포의 거동특성 실험은 바닥으로부터 수직길이가 0.6m이고 생물반응기 중앙부에서 측정된 결과이므로 이 지점에서 유량별 실험 및 전산해석 결과를 비교하여 타당성을 검증하였다.

Fig. 13은 모의 생물반응기에서 공기 공급 유량에 대한 기포 거동 실험과 전산해석 결과를 이용하여 식 (7)과 식 (8)에 의해 실험과 전산해석의 레이놀즈 수를 각각 구하였다. 본 연구범위인 공

기공급 유량구간에 대해서 전반적으로 양자의 추세선은 유사한 패턴으로 나타났다. 실험의 경우 공기 유량이 증가함에 따라 레이놀즈수의 변화 기울기가 조금 크게 나타나는데 이는 기포의 수직길이(d_b)의 실험 측정값은 계속 증가한다. 그러나, 전산해석의 경우 기포의 수직길이의 대푯값을 설정해야 하므로 실험결과인 1.2mm로 설정하였기 때문이다.

$$Re_{exp} = \frac{\rho_{air} v_b d_{b,exp}}{\mu_{air}} \quad (7)$$

$$Re_{num} = \frac{\rho_{air} v_b d_{b,num}}{\mu_{air}} \quad (8)$$

4. 결론

본 연구는 수처리 분야에서 용존산소 전달성을 높이기 위한 고효율 원뿔형 산기관을 체계적으로 설계하였고 모의 생물반응기에 적용하여 발생 기포 거동 실험과 전산 해석을 통한 유체역학적 분석을 통하여 다음 결론을 얻었다.

첫째, 산기관의 노즐 및 기타 내부유로에 대한 전산해석 결과, 공기 유동은 전반적으로 원활함을 확인하였고 돌출·함몰된 형상 등의 유동손실 발생부는 형상 보안을 함으로써 원뿔형 산기관 설계를 체계화하였다.

둘째, 모의 생물반응기 내에서 단위 산기관에 대한 발생 기포 거동 실험 결과, 공기 공급유량이 3.6~7.2m³/hr으로 증가함에 따라 기포체류량이 많아져서 기포의 합체 확률은 상승하므로 기포 수직길이의 최빈치는 8%증가하였다. 또한, 평균 수직길이는 18%증가하였으며, 수직길이의 분포는 폭이 좁고 높은 형태로부터 폭이 넓고 낮은 형태로 변화하였으며 기포 합체에 의한 2차 최빈치값이 증가함을 확인하였다.

셋째, 모의 생물반응기 내에서의 유동 특성 해석결과로서 선회류의 생성 및 기포 상승 속도변화에 대한 메커니즘을 확인하였다. 발생기포의 부력에 의하여 기포류가 형성되고 기포와 물은 병류의 형태로 생물반응기 내부에 선회류를 형성하였다. 또한, 선회류의 유동양상은 기포류의 확산과 상승속도를 결정하는 주요 인자로서 선회류의 속도가 과도하게 큰 경우에는 기포 상승속도를 증가로 인한 체류 시간의 감소로 인하여 산소 전달 성능 저하를 예측할 수 있다.

후 기

본 논문은 환경부 환경기술원 국제공동과제에 의해 수행되었음.

참고문헌
(References)

- (1) Boon, A. G. and Houck, D. H., 1981, "Survey and Evaluation of Fine Bubble Dome Diffuser Aeration Equipment," EPA-600/S2-81-222, U. S. EPA.
- (2) Rooney, T. C. and Huibregtse, G. L., 1980, "Increased Oxygen Transfer Efficiency with Coarse Bubble Diffusers," *J. Water Pollut. Control Fed.*, 52, 2315.
- (3) Stenstrom, M. K., Brown, L. C. and Hwang, H. J., 1983, "Oxygen Transfer Parameter Estimation," *J. Environ. Eng. Div., Proc. Am. Soc. Civ. Engrs.*, Vol. 107, EE2, p. 379.
- (4) Akita, K. and F. Yoshida, 1974, "Bubble Size, Interfacial Area, and Liquid Phase Mass Transfer Coefficient in Bubble Columns," *Ind. Enc. Chem., Process Des. Devel.*, Vol. 13, No. 1, pp. 84-91.
- (5) Garner, F. H. and Hammerton, D., 1954, "Circulation inside Gas Bubbles," *Chem. Eng. Sci.*, Vol. 3, No. 1, pp. 1~11.
- (6) Metcalf and Eddy Inc., 1979, "Wastewater Engineering: Treatment, Disposal, Reuse," 2nd edition, McGraw-Hill Book Co., New York, p. 203.
- (7) Song, S., 1986, "The Effect of Mass Transport Limitation on Nitrification in the Activated Sludge Process," Dr. Dissertation, California. univ..