

이상 제트 노즐을 사용한 순산소 폭기시스템의 이상유동 특성

정찬희 · 이계복*

충북대학교 기계공학부

(2009년 11월 11일 접수, 2010년 1월 3일 수정, 2010년 1월 10일 채택)

Two-Phase Jet Flow Characteristics in the Pure Oxygen Aeration System Using Two-phase Jet Nozzle

Chan Hee Jung · Kye Bock Lee*

School of Mechanical Engineering, Chungbuk National University

(Received 11 November 2009, Revised 3 January 2010, Accepted 10 January 2010)

요 약

고농도의 폐수처리를 위한 분사식 환형회로 반응조(Jet Loop Reactor)는 폭기조 내에 분사 노즐을 장착하여 기질과 주위 박테리아 사이의 산소전달을 촉진시키는 최신 설계기법이다. 본 연구에서는 분사식 환형회로 반응조의 최적 설계를 위해 이상제트 유동을 해석하였다. 반응조 내에서 폐수의 원활한 순환을 위해 요구되는 노즐 출구에서의 최소 속도가 존재하고 또한 유도관의 최적 위치와 직경의 크기에 따른 순환정도를 분석하였다. 공기입자의 크기가 작을수록 반응조 내의 혼합효과가 증가하는 것을 알았고 이상 유동내의 난류유동과 혼합특성의 관계를 확인하였다.

주요어 : 분사식 환형회로 반응조, 유도관, 이상 노즐, 최적 설계, 순환

Abstract — Jet Loop Reactor(JLR), in which a two-phase nozzle is installed, is the new design technique for the treatment of high concentration wastewater by accelerating of oxygen contacting between substrate and surrounding bacteria. This numerical study of the two phase jet flow was conducted to find the optimum design of JLR. It was shown that there was a minimum velocity in the nozzle for continuous circulation of wastewater. The optimum location and the size of the draft tube for continuous circulation were examined. It was certain that the smaller the air size is, the more the effect of the mixing increases. The relation between the mixing effect and the turbulence was confirmed.

Key words : Jet Loop Reactor, Draft tube, Two-phase nozzle, Optimum design, Circulation

1. 서 론

현재 국내에서 널리 사용하고 있는 폭기조 등 기존 폐수처리 장치는 소요용적이 매우 크고, 고농도의 독성이 함유된 폐수가 유입될 경우 미생물이 생존할 수 없기 때

문에 이들에 대한 처리가 매우 어렵다. 또한 온도 등 외부 조건 변화에 영향을 받아 악취가 발생하는 등 유지관리가 어려운 단점이 있다. 따라서 반응조 내 폐수 속에서 산소와 미생물 혼합물의 전달을 향상시키기 위한 폐수처리 시스템이 개발되고 있다. 즉, 반응조 내에 교반기를 설치하여 폐수와 공기의 반응을 증가시키는 장치가 개발되었으나 효율과 비용 면에서 많은 문제점을 노출하고 있는 실정이다. 이러한 단점 들을 보완하기 위하여 개발된 고농도 폐수처리 장치인 순산소 폭기시스템은 폐수 유입 시 이상제트 노즐에서 폐수와 산소를 동시

†To whom correspondence should be addressed.
410 Sungbongro, Heungdukgu, Cheongju, Chungbuk,
South Korea, 361-763
Tel: 043-261-3232 E-mail: kblee@chungbuk.ac.kr

에 분사시켜 가능한 한 미립화 시킴으로써 기질과 주위 박테리아 사이의 산소 전달 및 물질 전달을 촉진시켜 고농도나 난분해성, 유독성 폐수처리가 가능하며, 환경장치 설치에서 문제가 되고 있는 처리 장치의 단순화, 건설비, 소요부지 및 운영비의 최소화를 해결할 수 있는 최신 설계기법으로 순산소를 이용한 고효율 폭기 공정을 최적화하여 높은 부하율에서도 산소 전달율을 극대화함으로써, 반응조 부피를 감소하고 동력 소비가 큰 교반기를 사용하지 않아 에너지를 절감할 수 있는 반영구적인 환경기술로 주목받고 있다⁽¹⁾.

이상제트노즐을 사용한 순산소 폭기시스템에 대한 국내 연구는 매우 미약하고 단순하게 외국의 장치를 그대로 도입하여 사용함으로써 국내 환경기준에 부합되지 않고 장치가 제대로 작동되지 못하는 경우도 발생하고 있다. 정진도 등⁽²⁾은 이상노즐제트 장치의 성능에 가장 큰 영향을 미치는 요소인 노즐의 최적설계를 위해 디지털 고속 비디오 카메라로 노즐에 따른 액적의 크기 및 변화를 측정하였고 PIV를 사용하여 노즐 팁의 위치변화에 따른 이상제트유동의 특성을 실험을 통해 연구하였다. 강성환⁽³⁾은 이상제트 유동에서 실험을 통해 노즐 유속과 공기유속의 관계, 반응조 내 온도에 의한 처리효율 변화를 확인하였다. 황정훈 등⁽⁴⁾은 드래프트관이 장착된 교반기 내의 유동 및 혼합 특성을 연구하였다. 서민식 등⁽⁵⁾은 PIV를 사용하여 Re수 변화에 따른 순간 및 평균 속도 벡터, 난류강도 등을 구하여 이중원관 제트의 전단 혼합 유동 특성을 고찰하였다.

순산소 폭기시스템은 상부가 폐쇄된 실린더형의 반응조 상부에 이상 제트노즐이 반응조 중앙 수직으로 일정한 지점에 설치되고 제트노즐로 폐수 및 미생물 혼합액을 반응조 내로 순환시키기 위한 펌프 및 배관을 설치하게 된다. 또한 반응조 내부에 순환 흐름을 유도하기 위해 유도관(draft tube)을 사용하게 된다. 반응조 내의 유동은 기체 입자들의 존재로 인하여 이상 유동(two-phase flow)이 되어 복잡한 유동현상을 나타내고 기체 입자크기, 유도관의 위치 및 크기와 같은 다양한 변수들의 영향을 받기 때문에 최적설계를 위한 연구의 필요성이 요구되고 있다.

본 연구에서는 순산소 폭기시스템의 최적설계를 위해 제트의 기하조건(노즐형상, 유도관 위치 및 크기), 공기 입자의 크기, 제트의 유동조건에 따른 이상제트유동의 거동 특성을 수치해석을 통해 해석하여 주요 인자들의 민감도 분석을 수행하여 최적조건을 도출하고 설계자료를 구축하려고 한다.

2. 유동해석

(1) 시스템 구조 및 유동조건

Fig. 1은 고농도 폐수 처리장치인 Jet Loop Reactor의 개략도이다. 미생물 혼합액과 폐수를 순환펌프로 이상제트 노즐로 보내면 노즐 끝에서 액체제트를 형성하여 주입된 공기의 미세기포를 형성하고 형성된 액체제트와 기포는 반응조 하부로 내려가 바닥에 부딪쳐 상승된 기포의 일부는 액체제트를 따라 다시 아래로 순환하면서 산소가 용해되는 구조이다⁽⁶⁾. 반응조는 상부가 폐쇄된 원통형 구조로 반응조 내의 모든 영역에 산소가 순환할 수 있도록 노즐 출구에서의 속도 등의 유동조건과 반응조 내에 설치하는 유도관(draft tube)의 위치와 크기의 최적 조건을 구하려고 한다.

(2) 수치해석과 지배방정식

본 연구에서는 수치해석을 위하여 상용 유동해석 코드인 FLUENT를 이용하였고 각 상의 방정식을 고려하는 Eulerian model을 적용하였다. FLUENT 코드는 이

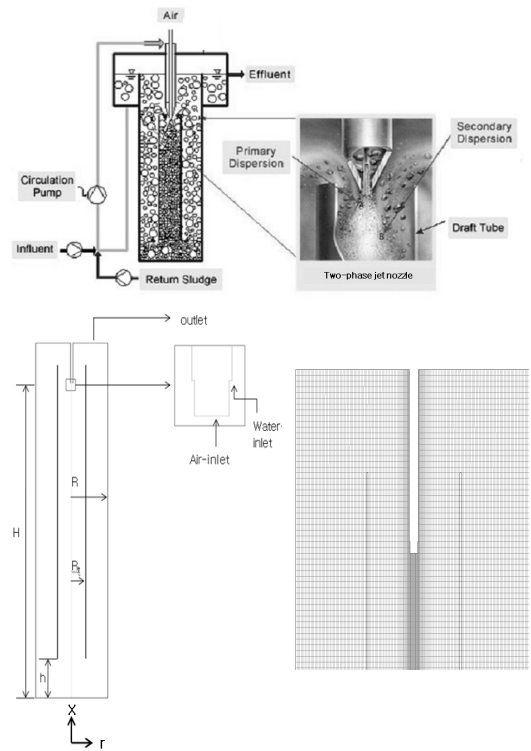


Fig. 1. Schematic diagram of jet loop reactor and computational mesh for jet loop reactor.

상 난류제트(two phase turbulent jet)가 적용되는 금속 (또는 합금)분말 제조 공정, 분말 건조공정(spray drying process) 화력발전소의 미분탄 연소공정 등의 고체-기체 유동, 디젤기관 및 제트엔진, 산업용 보일러 등의 연소를 위한 혼합기체형성, 그리고 산업용 분무기 등의 액체-기체 이상유동 해석에 사용되고 있고 실험치와 비교해서 만족할 만한 결과를 보여주어 설계자료 생산이나 실험 대체방법으로 응용되고 있다^(7,8). Eulerian model은 넓게 분산 되거나, 분산된 상의 체적비(volume fraction)가 높을 때 효율적인 방법으로 두 유체가 상호 물질과 운동량 전달을 주고받는 특성을 이용해서 해석 대상유체를 상(phase) 1과 상 2로 나누어 해석하는 방법이다. 상 1은 연속되는 상, 상 2는 분산되는 상으로 정의된다. Eulerian model은 유동 특성을 해석하기 위해 각 상의 연속 방정식과 운동량 방정식을 풀게 된다. 난류 유동을 해석하기 위하여 이방정식 모델(two equation model)인 $k - \epsilon$ 모델을 사용하였다. 사용된 지배방정식은 다음과 같다⁽⁹⁾.

체적분율(volume fraction)

$$V_q = \int_V \alpha_q dV, \quad \sum_{q=1}^n \alpha_q = 1 \quad (1)$$

연속방정식 (continuity equation)

$$\frac{\partial}{\partial t}(\alpha_q \rho_q) + \nabla \cdot (\alpha_q \rho_q \vec{v}_q) = 0 \quad (2)$$

운동량보존방정식 (momentum equation)

$$\begin{aligned} \frac{\partial}{\partial t}(\alpha_q \rho_q \vec{v}_q) + \nabla \cdot (\alpha_q \rho_q \vec{v}_q \vec{v}_q) &= -\alpha_q \nabla \phi \\ &+ \nabla \cdot \vec{\tau}_q + \alpha_q \rho_q \vec{g} + \sum_{p=1}^n \left(\sum_{p=1}^n K_{pq} (\vec{v}_p - \vec{v}_q) \right) \\ &+ \vec{F}_q \end{aligned} \quad (3)$$

여기서, $V_q, \alpha_q, \rho_q, \vec{v}_q$ 는 각 상(phase)의 부피, 체적분율, 밀도 및 속도이다. 식 (3)에서 \vec{g} 는 중력가속도이며 $\vec{\tau}_q$ 는 상(q)의 응력-변형률 텐서로 다음과 같다.

$$\vec{\tau}_q = \alpha_q \mu_q (\Delta \vec{v}_q + \nabla \vec{v}_q^T) \quad (4)$$

여기서 μ_q 와 λ_q 는 각각 상(q)의 shear and bulk viscosity를 나타낸다. 또한 식(3)에서 K_{pq} 는 두 상에 대한 exchange coefficient 값이며, \vec{F}_q 는 external body force를 뜻한다.

$$K_{pq} = \frac{\alpha_q \alpha_p \rho_p f}{\tau_p} \quad (5)$$

식(5)에서 $f = \frac{C_D Re}{24}$, $\tau_p = \frac{\rho_p d_p^2}{18\mu_q}$ 로 표현된다.

(3) 난류운동에너지와 소멸률 방정식

$$\begin{aligned} \frac{\partial}{\partial t}(\alpha_q \rho_q k_q) + \nabla \cdot (\alpha_q \rho_q \vec{v}_q k_q) &= \\ \Delta \cdot (\alpha_q \frac{\mu_{t,q}}{\sigma_q} \Delta k_q) + (\alpha_q G_{k,q} - \alpha_q \rho_q \epsilon_q) &+ \\ + \sum_{p=1}^n K_{pq} (C_{pq} k_p - C_{qp} k_q) &- \\ - \sum_{p=1}^n K_{pq} (\vec{v}_p - \vec{v}_q) \frac{\mu_{t,p}}{\alpha_p \sigma_p} \Delta \alpha_p &+ \\ + \sum_{p=1}^n K_{pq} (\vec{v}_p - \vec{v}_q) \frac{\mu_{t,q}}{\alpha_q \sigma_q} \Delta \alpha_q \end{aligned} \quad (6)$$

$$\begin{aligned} \frac{\partial}{\partial t}(\alpha_q \rho_q \epsilon_q) + \nabla \cdot (\alpha_q \rho_q \vec{v}_q \epsilon_q) &= \\ \nabla \cdot (\alpha_q \frac{\mu_{t,q}}{\sigma_k} \nabla \epsilon_q) + \frac{\epsilon_q}{k_q} [C_{1\epsilon} \alpha_q G_{k,q} &- \\ - C_{2\epsilon} \alpha_q \rho_q \epsilon_q + C_{3\epsilon} (\sum_{p=1}^n K_{pq} (C_{pq} k_p - C_{qp} k_q) &- \\ - \sum_{p=1}^n K_{pq} (\vec{v}_p - \vec{v}_q) \frac{\mu_{t,p}}{\alpha_p \sigma_p} \Delta \alpha_p &+ \\ + \sum_{p=1}^n K_{pq} (\vec{v}_p - \vec{v}_q) \frac{\mu_{t,q}}{\alpha_q \sigma_q} \Delta \alpha_q)] \end{aligned} \quad (7)$$

$$\mu_{t,q} = \rho_q C_\mu \frac{k_q^2}{\epsilon_q} \quad (8)$$

여기서 각 상의 체적비 상태를 나타내는 함수는 α 로 정의되며 각 상의 밀도 항에 곱하여 밀도 변화에 대한 각 상이 차지하고 있는 체적비를 묘사할 수 있다. 또한 체적비의 전체 합은 1을 만족 시켜야 한다. $G_{k,q}$ 는 상 q 의 운동에너지 생성량을 나타낸다.

(4) 격자 모델링

반응조 내의 이상제트 유동을 수치해석 하기 위해 GAMBIT6.3.26을 이용하여 격자를 형성하였다. 해석 모델이 원통형 모델이기 때문에 계산시간을 단축하기 위해 축대칭 원통좌표계(cylindrical coordinate system)를 사용하여 Fig. 1과 같이 단순화하여 모델링 하였다. 노즐에서 유체가 분사되는 방향으로 격자를 조밀하게

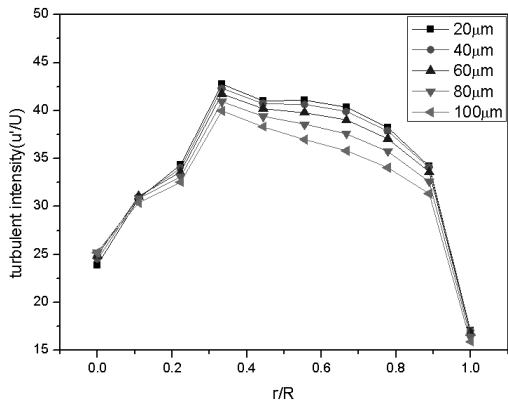


Fig. 4. Distribution of turbulent intensity along the radial distance.

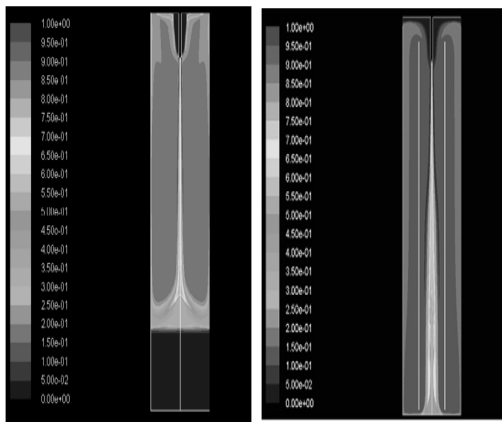


Fig. 5. Volume fraction of air in the jet loop reactor with/without the draft tube.

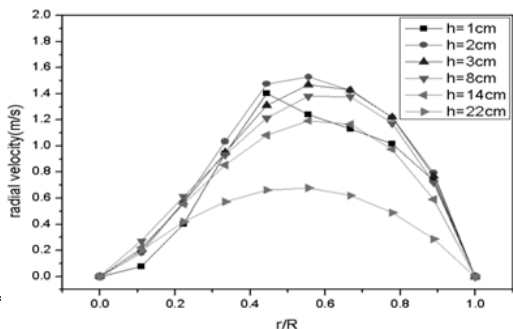


Fig. 6. Effect of height of draft tube location on radial velocity distribution along the radial distance.

draft tube diameter	70mm	air inlet diameter	6mm
draft tube height	665mm	water inlet hydraulic diameter	1mm

구성하였고, 주위의 다른 격자들 간의 급격한 크기 차이가 발생하는 것을 막기 위해서 1.05배씩 크기를 증가시키며 전체 격자수를 조정하였다. 격자수의 민감도 분석을 위해 격자수를 조정하며 해석을 수행하여 최적의 격자수를 분석한 결과 격자의 개수는 24,000개 정도로 결정하였고 Fig. 1에 격자 구조를 나타내었다. 물과 공기가 분사되는 노즐 출구와 벽 근처에서 좀 더 정확한 계산을 위하여 격자를 조밀하게 구성하였다. 내부 구조물의 자세한 규격은 표 1에 나타냈다.

(5) 입력조건 및 경계조건

순산소 폭기시스템의 내부 유동해석을 위해 작동유체는 상온의 공기와 물을 사용하였다. 실제 작동 유체는 폐수와 산소이지만 사용되는 폐수에 따라 점성계수의 값이 다르기 때문에 본 해석에서는 작동유체로 물과 공

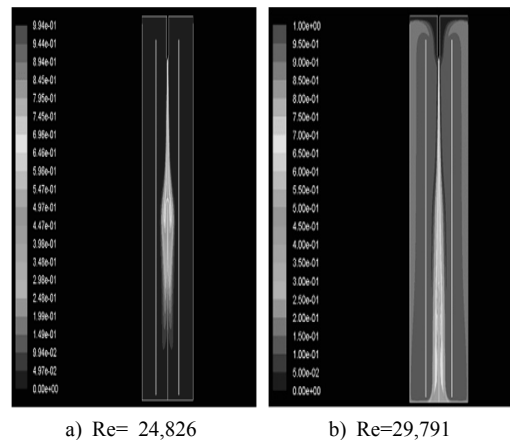


Fig. 2. Volume fraction of air in the jet loop reactor with different nozzle velocity.

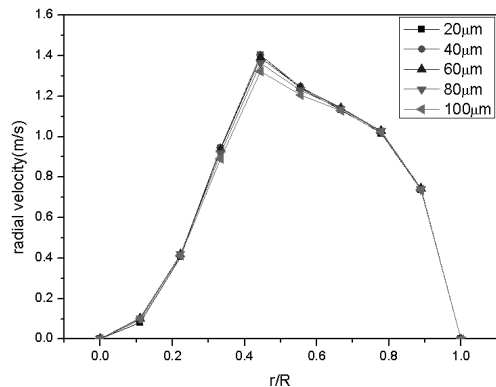


Fig. 3. Radial velocity profiles along the radial distance.

기를 사용하였다. 노즐 출구에서 공기의 속도와 물의 속도를 입력값으로 주었다. 출구 부분에는 대기압의 압력 경계조건을 사용하였고, 유도관 벽면과 폭기조 벽면은 비활조건을 사용하였다.

본 계산에서는 폭기조 내부에 공기와 물이 충분히 혼합된 상태를 보기 위해서 내부의 한 지점을 정해 공기 체적비의 변화가 더 이상 일어나지 않을 때 까지 계산을 수행하였다.

3. 해석결과

폭기조 내의 호기성 세균에 충분한 양의 산소를 공급하기 위해서는 노즐에서 분사된 공기가 같이 분사된 폐수와 잘 섞이면서 폭기조 내에서 원활하게 순환되어야 한다. 본 연구에서는 원활한 순환을 위해 필요한 노즐 출구에서의 속도 조건을 변화시키며 순환여부를 확인하였다. Fig. 2는 반응조 내에서의 공기의 체적분율을 나타내며 출구에서의 Re 수가 29,000이 넘는 경우에 원활한 순환이 이루어지는 것을 알 수 있었다. Re 수가 작은 (a)의 경우 순환이 제대로 이루어지지 못하는 것을 알 수 있다.

공기 입자 크기에 따른 영향을 평가하기 위해 5가지 입자크기(20 μ m, 40 μ m, 60 μ m, 80 μ m, 100 μ m)에 대해 동일한 유동조건에 대해 수치해석을 수행하였다. Fig. 3은 아래 벽면에서 0.005m 떨어진 축대칭 지점부터 반경방향에 따른 반경방향 속도(radial velocity)를 나타낸다. 반경방향 속도는 모든 입자 크기에서 중심부에서 점점 커지기 시작하여 유도관이 위치한 $r/R=0.4$ 지점까지 급격히 증가하고 유도관을 빠져나가면 완만하게 감소한다. 또한 유도관 출구와 바닥 면 사이의 공간에서 외부로 빠져나가는 반경방향 속도는 입자가 작을수록 미세하게 증가하는 것으로 나타난다. 난류강도는 Fig. 4와 같이 입자 크기가 작을수록 증가하기 때문에 혼합(mixing)이 커지므로 공기의 전달률은 증가하게 된다.

폭기조 내부 유도관은 순환을 향상시키기 위해 설치된 장치로 유도관의 위치와 직경크기에 따른 영향을 평가하였다. Fig. 5는 출구속도 30m/s 에서 유도관이 없는 경우 반응조 내에서 순환이 이루어지지 못하지만 유도관을 설치한 경우 순환이 원활하게 이루어지는 결과를 보여준다.

Fig. 6 과 7은 바닥 면으로부터 유도관 출구까지의 거리 h 를 변화시키며 바닥으로부터 0.5 cm 떨어진 위치에서 중심부에서부터 반경방향을 따라 반경방향 속도와 평균속도에 대한 난류 유동속도의 백분율인 난류강도를 나타낸 것이다. 바닥 면으로부터 유도관까지의 거리가

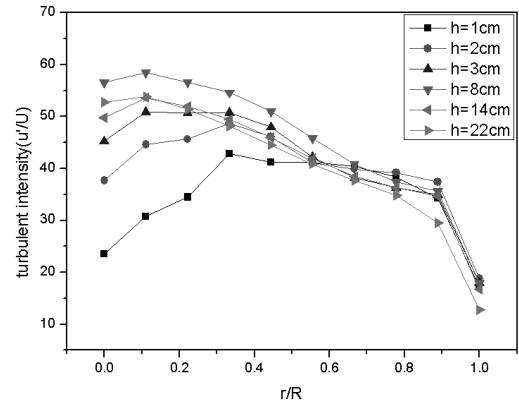


Fig. 7. Effect of draft tube location on turbulent intensity distribution along the radial distance.

2, 3, 8cm인 경우가 반경방향 속도가 상대적으로 크므로 폭기조 벽면까지 순환흐름을 잘 유도하는 것을 알 수 있다. 또한 혼합효과를 나타내는 난류 강도는 8cm인 경우가 가장 큰 것으로 나타난다.

폭기조 내부의 유도관은 직경을 줄임으로써 유속을 키워 공기가 폭기조 하단 부분까지 순환을 원활하게 할 수 있게 해 준다. 그러나 유도관 직경이 너무 작아지면 바닥 면과 충돌로 인해 손실되는 운동량이 커진다. Fig. 8 과 9는 유도관 직경변화에 따른 반경방향 속도와 난류 강도를 나타낸다. 유도관의 위치는 바닥 면에서 8 cm에 떨어진 상태로 반경방향 속도는 유도관의 반경이 2.5 cm일 때 최대를 나타낸다. 또한 난류강도는 유도관의 반경이 3.5 cm일 때 가장 큰 것을 보여준다. 따라서 반응조 내의 순환과 혼합을 위해서는 유도관의 직경이 2.5 - 3.5 cm 정도가 최적인 것을 알 수 있다.

4. 결론

이상제트 노즐을 사용한 순산소 폭기 시스템은 높은 부하율에서도 산소 전달율을 극대화함으로써, 반응조 부피를 감소하고 에너지 소비(사용 동력)를 절감할 수 있는 환경기술로 주목받고 있다. 본 연구에서는 이상제트 노즐을 설치한 순산소 폭기 시스템의 최적설계를 위해 제트의 유동조건, 공기 입자의 크기, 유도관 위치 및 크기에 따른 반응조 내의 이상제트 유동 특성을 수치해석을 통해 고찰하여 다음과 같은 결과를 얻었다.

반응조 내에서 폐수와 공기의 원활한 순환을 위해 필요한 노즐 출구에서 최소 속도와 레이놀즈 수가 존재하는 것을 확인하였다.

공기입자의 크기에 따른 영향을 평가한 결과 입자의

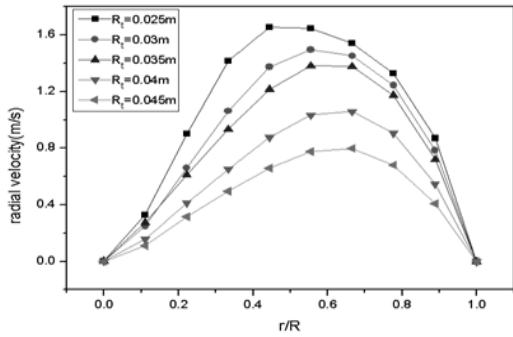


Fig. 8. Effect of draft tube size on radial velocity along the radial distance.

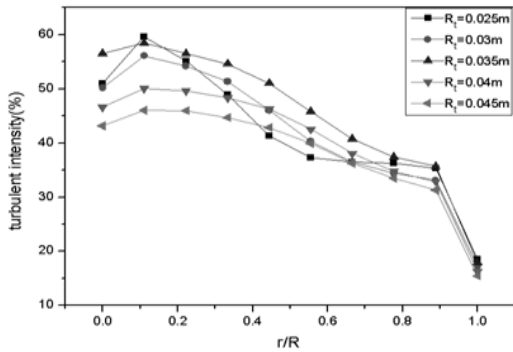


Fig. 9. Effect of draft tube size on turbulent intensity distribution along the radial distance.

크기가 작을수록 순환과 난류강도가 커지므로 공기 입자의 크기를 작게 하는 것이 중요하다.

반응조 내의 순환흐름을 유도하는 유도관의 위치와 직경크기의 영향을 평가하여 순환과 혼합을 최대화할 수 있는 바닥 면으로부터의 유도관 위치와 유도관의 직경 크기를 구하였다.

후 기

이 논문은 2008학년도 충북대학교 학술연구지원사업의 연구비 지원에 의하여 연구되었음.

참고문헌

1. Wachsmann, U. and Vogelpohl, A., "Hydrdynamics of jet-driven loop reactor", Chem. Igen. technic., 59, 510-511, (1987)
2. 장진도, 황승민 "환경오염 저감을 위한 HCR의 내부 유동 특성에 관한 연구", 한국에너지공학회 춘계학술발표회 논문집, 153-157, (2000)
3. 강성환 "jet loop reactor의 거동 특성", 대한토목학회논문집, 제21권, 제6-B호, 667-673, (2001)
4. 황성훈 김윤제 "드래프트관이 장착된 교반기 내의 유동 및 혼합특성 연구", 유체기계저널, 제10권, 제1호, 56-53, (2007)
5. 서민식, 김춘식, 이영호 "PIV에 의한 이중원관 제트의 유동 특성에 관한 연구", 대한기계학회 춘계학술 대회논문집 B, 405-411, (1998)
6. James, C. B., Anderson, G. K., Willey, A. R., "High rate aerobic treatment of brewery wastewater using the jet loop reactor". Water Research, 57, 1217-1223, (1995)
7. Wasewar, K. L. and Sarathi, J. V., " CFD Modeling and simulation of jet mixed tanks", Engineering Applications of Computational Fluid Mechanics, 2, 155-171, (2008)
8. Patwardhan, S. V., "CFD modeling of jet mixed tanks", Chemical Engineering Science, 57, 1307-1318, (2002)
9. FLUENT, Fluent 6.3 User Guide [http://www.fluentusers.com/fluent/training/intermediate/tutorials/index.htm\(1\)](http://www.fluentusers.com/fluent/training/intermediate/tutorials/index.htm(1)), (2006)