

MLVSS에 따른 Jet Loop Reactor (JLR)에서 동력량과 공기량이 산소전달률에 미치는 영향

Effects of Energy Input and Air Flow Rate on Oxygen Transfer Rate at Different MLVSS in a Jet Loop Reactor (JLR)

윤애화 · 배중훈* · 임현우* · 전항배*,† · 허태영**

Ae-Hwa Yoon · Jong-Hun Bae* · Hyun-Woo Lim* · Hang-Bae Jun*,† · Tae-Young Huh**

케이에스인더스트리(주) · *충북대학교 환경공학과 · **충북대학교 정보통계학과
KS Industry Co., Ltd.

*Department of Environmental Engineering, Chungbuk National University

**Department of Information Statistics, Chungbuk National University

(2010년 10월 27일 접수, 2011년 12월 30일 채택)

Abstract : Oxygen transfer rate generally determines the performance of an aerobic wastewater treatment process that treats high strength wastewater such as food wastewater, animal wastewater and landfill leachate. In this paper, OUR and $K_L \cdot a$ were evaluated by using Jet Loop Reactor (JLR) according to the concentration of a mixed liquor volatile suspended solid (MLVSS), oxygen (air) flow rate and energy input as the variable of the operating conditions. Also, a nonlinear regression model was proposed by the statistical methods with the calculated $K_L \cdot a$. As a results, in case of applying the high strength wastewater which has to maintain high MLVSS, the energy input and the air flow rate are major parameters oxygen transfer rate in JLR. Finally, the final nonlinear regression model had been developed as a function of E/V , Q_g , and μ_c .

Key Words : Jet Loop Reactor (JLR), Oxygen Transfer Rate, Volumetric Mass Transfer Coefficient ($K_L \cdot a$)

요약 : 산소전달률은 음폐수, 축산폐수 그리고 매립지 침출수와 같은 고농도 폐수처리를 호기성 공정으로 처리할 시 그 성과를 결정하는 아주 중요한 요소이다. 본 논문에서는, Jet Loop Reactor (JLR)를 이용하여 공기유량과 동력량을 운전조건의 변수로 두고 미생물의 농도에 따른 산소소비율(Oxygen uptake rate, OUR)과 물질전달계수(Volumetric mass transfer coefficient, $K_L \cdot a$)를 측정하였으며, 산출된 $K_L \cdot a$ 값의 결과를 가지고 통계학적인 분석을 통하여 비선형 회귀 모형을 제안하여 보았다. 연구 결과, 미생물 농도를 높게 유지시켜야 하는 고농도 폐수를 적용할 경우에는, 동력량과 공기량은 산소전달률의 중요한 인자이며, 마지막으로 최종 비선형 회귀모형을 동력량과, 공기량 그리고 점성계수의 함수로 나타내보았다.

주제어 : Jet Loop Reactor (JLR), 산소전달률, 총괄 물질전달계수($K_L \cdot a$)

1. 서론

생물학적 폐수처리 방법 중 활성슬러지공법에 사용되는 폭기 에너지는 전체의 50~90%를 차지하여 산소전달효율을 높이면 공정 운전에 필요한 에너지를 절감할 수 있게 된다. 또한, 생물학적 활성슬러지공법의 효율 향상을 위해서는 오염물의 유입 부하에 따라 미생물에 의해서 소모되는 산소량을 충분하게 공급해 주어야 한다.

이로부터 폭기조 내 산소전달 효율을 증가시켜 처리효율의 극대화를 달성하는 것이 경제적, 기술적인 측면에서 반드시 필요하다.¹⁻³⁾

반응기 설계에 있어서 기-액간의 물질전달은 가장 중요한 설계인자로서, 이에 따라 기-액간의 물질 전달 메커니즘을 설명하기 위한 여러 이론들이 제안되어 왔지만, 그 중 가장 간단하고 많이 쓰이는 것이 Lewis와 Whitman에 의해 발표된 이중막이론이다. 이중막이론은 기체와 액체의 경계면에 두 개의 막이 존재한다는 물리학적 모델에 근거를 두고 있

다. 액체본체(bulk-liquid)와 기체상본체(bulk-gaseous phases) 사이에서 기체분자가 지나갈 때 저항을 유발시킨다. 특히, 산소와 같이 용해도가 작은 기체는 액체막으로부터 저항을 더 크게 받게 된다. 기체와 액체가 접촉하는 지역은 얇은 두께의 기체막과 액체막, 그리고 기-액 정체층으로 구성되는데, 이중막이론에 따르면 각 상에서의 전달 저항은 접촉면에 접한 얇은 막에서 일어나, 접촉면 자체는 물질전달에 아무런 저항을 하지 않는 것으로 가정하기 때문에 접촉면에서의 농도는 평형관계에 의하여 결정된다. 따라서 기체의 확산속도는 막의 두께와 막에서의 농도차에 따라 달라지게 된다.⁴⁻⁶⁾ 확산전달계수는 K_L 이며 산소가 물에 용해되는 경우, $K_L = D/\delta_L$ 로 표현된다. D 는 산소의 확산계수이며 δ_L 은 액체 경계면 막의 두께를 나타내는데, K_L 에 물의 단위부피당 기포의 경계면적을 나타내는 a 를 곱하면 총괄물질전달계수인 $K_L \cdot a$ 가 성립한다.⁷⁾ $K_L \cdot a$ 를 결정하는 운전인자는 온도, 폐수의 점성 및 밀도, 교반강도, 공기량, 반응조의 형태 등 여러 가지가 있는데, 이러한 인자들의 변화에 따라 $K_L \cdot a$ 의 변화

† Corresponding author E-mail: jhbcbe@cbnu.ac.kr Tel: 043-261-2470 Fax: 043-271-7976

Table 1. Various model equations of $K_L a$ reported in literatures

Investigator	Model
Calderbank ¹¹⁾	$K_L = 0.42 \left(\frac{\mu_L}{\rho_L D_L} \right)^{\frac{1}{2}} \left(\frac{\mu_L g}{\rho_L} \right)^{\frac{1}{3}}$
	$a = 1.44 \left(\frac{(P_g/V)^{0.4} \rho_L^{0.2}}{\sigma_L^{0.6}} \right) \left(\frac{\nu_s}{\nu_t} \right)$
Panja ¹²⁾	$K_L a = 0.42 \left(\frac{\mu_L}{\rho_L D_L} \right)^{\frac{1}{2}} \left(\frac{\mu_L g}{\rho_L} \right)^{\frac{1}{3}} \left(\frac{P_g}{V} \right)^{0.15}$
Pederson ¹³⁾	$K_L a = \alpha N^{\beta} U_g^{\gamma}$
Ozabec ¹⁴⁾	$K_L a = \alpha \left(\frac{P_g}{V} \right)^{\beta} U_g^{\gamma}$
Jin ¹⁵⁾	$K_L a = \alpha \left(\frac{P_g}{V} \right)^{\beta} U_g^{\gamma} \mu_{aq}^{\delta}$

특성을 파악하기 위하여 많은 연구가 진행되어 왔다.⁸⁻¹⁰⁾ Table 1은 각 연구자들이 통계분석을 통하여 얻은 $K_L \cdot a$ 모델 방정식들이다.

최근 효율적인 호기성 폐수처리를 위해 Jet Loop Reactor (JLR)가 많이 상용화되고 있다. JLR는 기-액 반응을 포함하는 화학적 그리고 생물학적 공정에 넓게 적용되고 있어, 서등은 이런 반응조를 사용하여 화학비료폐수의 생물학적 질소제거에 관해 연구하였고,¹⁶⁾ Petruccioli는 JLR를 이용한 포도주 양조장폐수를 처리하는 연구를 진행하는 등¹⁷⁾ JLR를 이용한 연구들이 많이 이루어지고 있다. JLR의 원리는 빠른 속도의 액체 분사로 인해 공기가 함께 인입되면서 두 상(phases)에서 미세 확산을 만들기 위한 동력학적 에너지를 이용하는 것이며, 노즐을 통해 만들어지는 액체의 분사는 최적의 물질전달과 미생물학적 전환을 가능하게 하는 높은 교반과 난류를 생성한다. 이런 특성으로 인해 Bloor는 반응조 용량을 감소시킬 수 있어 설치비용 및 유지비용 그리고 에너지 사용량을 줄일 수 있다고 하였고, 또한 고부하 운전(10~70 kgCOD/m³·d)이 가능하다고 보고하였다.¹⁸⁾ 이에 본 논문에서는, JLR를 이용하여 공기유량과 동력량을 운전조건의 변수로 두고 미생물의 농도에 따른 산소소비율(Oxygen uptake rate, OUR)과 물질전달계수(Volumetric mass transfer coefficient, $K_L \cdot a$)를 측정하였으며, 비선형 회귀 모형을 이용하여 산출된 $K_L \cdot a$ 값과의 상관성을 통계학적으로 분석하여 제안하였다.

2. 실험재료 및 방법

2.1. 실험재료

2.1.1. 원수 성상

본 연구에 사용된 원수는 Table 2에 제시된 농도로 합성 폐수를 제조하여 사용하였다. COD는 glucose (C₆H₁₂O₆)로, NH₄⁺-N는 NH₄Cl, PO₄³⁻-P는 KH₂PO₄를 사용하여 농도에 맞게 주입하여 주었다. 실험에 적용한 미생물의 농도는 2,000, 4,000, 6,000 mg/L로 총 3단계로 구성되어 있으며, F/M비를

Table 2. Characteristics of the synthesis wastewater

Parameters	Range (mg/L)	level (mg/L)
pH	7.2 ~ 7.5	7.35
sCODcr	980 ~ 2850	980, 1420, 2850
NH ₄ ⁺ -N	48 ~ 142	48, 89, 142
NO ₃ ⁻ -N	-	-
NO ₂ ⁻ -N	-	-
PO ₄ ³⁻ -P	12 ~ 28	12, 15, 28

0.5로 선정하고 유기물 농도를 기준으로 각각의 조건에 맞게 제조하여 주입하였다. N, P의 농도는 C : N : P의 비가 100 : 5 : 1을 유지하도록 제조하였다.

2.1.2. 반응조 형태

실험에 사용한 JLR은 아크릴재질의 원통형 반응기로 반응조의 내부순환을 원활히 하기 위하여 사각형태의 유도관(draft-tube)을 설치하였다. 반응조 하단에 위치한 배출구는 순환펌프의 흡입구와 연결되어 있으며, 토출구를 통해 순환되어 나온 액체는 최종적으로 노즐을 통해 분사된다. 노즐의 형태는 이상(two-phase)형태로, 공기는 노즐의 중앙부로 공급되며 액체는 노즐의 바깥쪽으로 분사되도록 제작하였다. 순환펌프는 맥동식펌프(Hydra-cell SIMENS, Germany)를 사

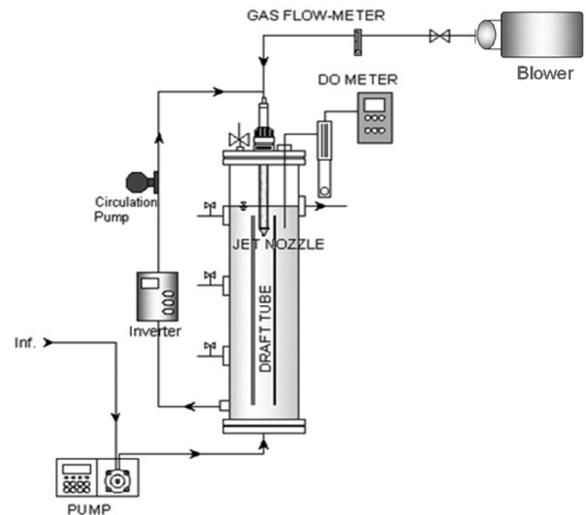


Fig. 1. Schematic diagram of the experimental set-up.

Table 3. Experimental parameters for jet-loop reactor

Description	Notation	Value
Bioreactor height (mm)	H _b	670
Bioreactor diameter (mm)	D _b	180
Draft tube length (mm)	L _d	410
Draft tube diameter (mm)	D _d	70
Distance between the impact plate and lower edge of the bioreactor (mm)	H _p	50
Air hole diameter of nozzle (mm)	D _a	6
Liquid height above draft-tube (mm)	H _L	100
Working volume (L)	V	15

용하였고, 펌프와 노즐사이에 전자식 유량계(M1000 WINTEC, Korea)를 설치하여 순환유량을 조절하였다. 반응조의 유효 용적은 15 L이며 전체 반응조 모식도 및 특징을 Fig. 1과 Table 3에 나타내었다.

2.2. 실험방법

2.2.1. 실험 조건

실험은 회분형태가 아닌 연속식 실험으로 수행하였다. JLR에서의 미생물 농도는 MLVSS 기준 2,000, 4,000, 6,000 mg/L로 미생물 농도에 따른 물질(산소)전달계수를 측정 하였으며, 운전조건의 범위는 순환유량의 경우 6, 7, 8, 9, 10 L/min으로, 공기량의 경우 0.2, 0.5, 1, 3, 5 L/min로 설정하고 실험을 수행하였다.

2.2.2. 산소전달효율 평가

OUR 및 산소전달계수를 측정하는 방법은, 먼저 반응조 내 DO농도가 일정하게 유지되는 시점을 기준으로 폭기를 중단하고 시간에 따른 DO농도 변화를 측정하여 산소소비속도(OUR)를 측정할 수 있으며, DO농도가 0.5 mg/L 이하가 되는 시점에서 다시 폭기를 시작하고 시간에 따른 DO농도 변화를 측정한 다음, 산소전달계수와 용존산소농도차의 곱으로 이루어진 식 (1)을 적분한 식 (2)에 측정된 DO를 대입하여 그린 그래프의 기울기로서 $K_L \cdot a$ 를 구할 수 있다.

$$\frac{dC}{dt} = K_L a (C_s - C) \quad (1)$$

$$-\ln\left(1 - \left(\frac{C}{C_s}\right)\right) = K_L a \cdot t \quad (2)$$

$\frac{dC}{dt}$ = 산소전달속도로 질량/(부피)(시간), mg/L-hr

$K_L \cdot a$ = 총괄물질전달계수 1/(시간), hr⁻¹

C_s = 포화 용존산소농도, 질량/부피, mg/L

C = 액 중 용존산소농도, 질량/부피, mg/L

하지만 활성슬러지가 포함된 폭기조에서 산소전달계수를 측정할 때에는 미생물에 의한 산소섭취율도 고려해야 하기 때문에, 이때의 산소전달효율을 평가하기 위해서는 다음과 같이 식 (3)을 적용한다.

$$\frac{dC}{dt} = K_L a (C_s - C) - OUR \quad (3)$$

유사 정상상태 조건하에서 dC/dt 는 0에 접근하고, $K_L \cdot a$ 는 다음 식 (4)으로 결정된다.

$$OUR = K_L a (C_s - C) \quad (4)$$

Table 4. Transformed parameters on JLR

reactor	L/min	u (m/sec)	E/V (W/m ³)	MLVSS (mg/L)		
				2,000	4,000	6,000
	6	8.98	269	0.01	0.0133	0.0183
	7	10.49	427			
JLR	8	11.98	637	997	999	1002
	9	13.49	908			
	10	14.98	1245			

2.3. 순환유량의 단위환산

실험에 사용된 JLR형태에 따라 결과 값을 토대로 비선형 회귀모형의 완성을 위해 순환유량과 액체의 밀도 및 노즐 출구측에서의 유체속도를 이용하여 식 (5)에 적용하여 순환유량 6~10 L/min을 동력량으로 단위 변환을 하였고, 변환한 값은 Table 4에 나타내었다.

$$E/V = (Q_L \cdot \rho_L \cdot \frac{u^2}{2}) / V \quad (5)$$

여기서, E/V = 동력량, W/m³

Q_L = 액체의 순환유량, m³/sec

ρ_L = 액체의 밀도, kg/m³

u = 노즐출구측에서의 액체분사 속도, m/s

V = 반응조 부피, m³

3. 결과 및 고찰

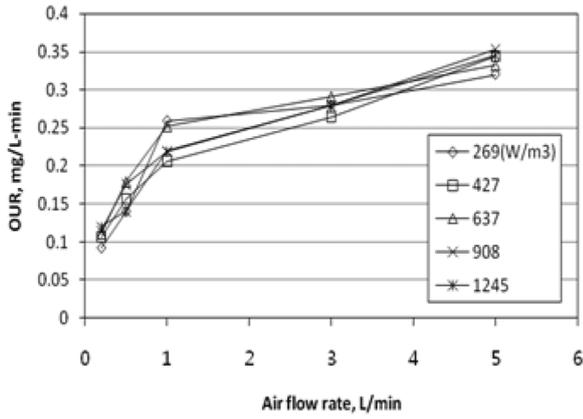
3.1. 운전조건 별 산소소비율(OUR)

각 운전조건별 산소소비율(OUR)을 Fig. 2에 나타내었다. 제시된 그래프에서의 (A)는 미생물농도(MLVSS)가 2,000 mg/L일 때, (B), (C)는 각각 4,000, 6,000 mg/L일 때의 실험 결과이다.

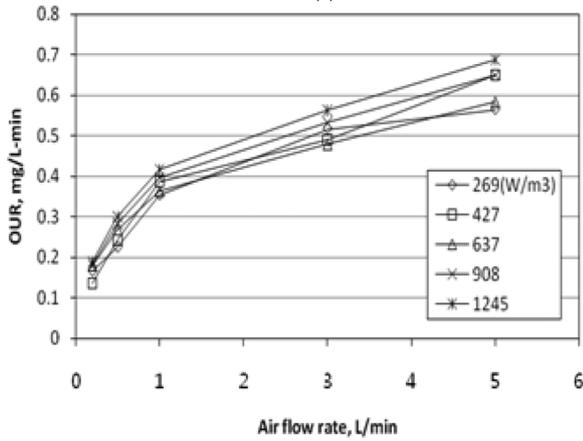
일정한 공기량의 조건에서 동력량의 증가에 따른 OUR의 변화는 거의 관찰되지 않았으며, 반면에 일정한 동력량에서 공기량의 증가가 대부분의 영향을 미치는 것으로 나타났다. 이는 교반형태나 반응조의 기하학적인 구조에서 오는 영향은 미생물의 활성도에 큰 영향을 미치지 않는다는 것을 나타낸다고 할 수 있다. 또한, 공기량뿐만 아니라 미생물의 농도가 증가할수록 같은 운전조건에서 비교해볼 때 OUR이 증가하는 것으로 나타났으며, 이는 생물반응을 하는데 있어 산소를 소비하는 미생물양의 증가에서 오는 결과로 사료된다.

3.2. 운전조건 별 산소전달계수($K_L \cdot a$)

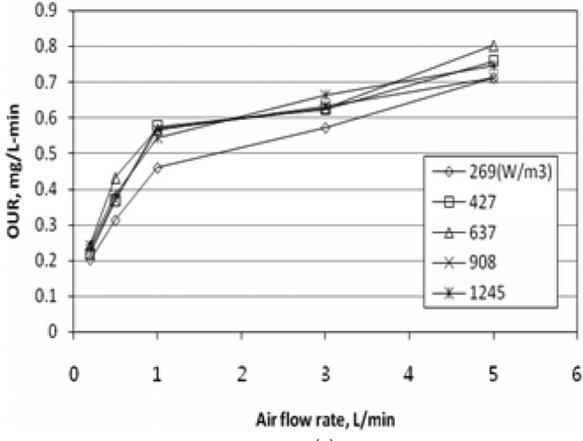
Fig. 3에 제시된 그래프는 실험에서 적용한 각 운전조건에 따른 $K_L \cdot a$ 를 상위 제시된 방법으로 산정한 것으로 (A), (B), (C)는 미생물 농도가 각각 2,000, 4,000, 6,000 mg/L일 때의 실험결과이다.



(a)



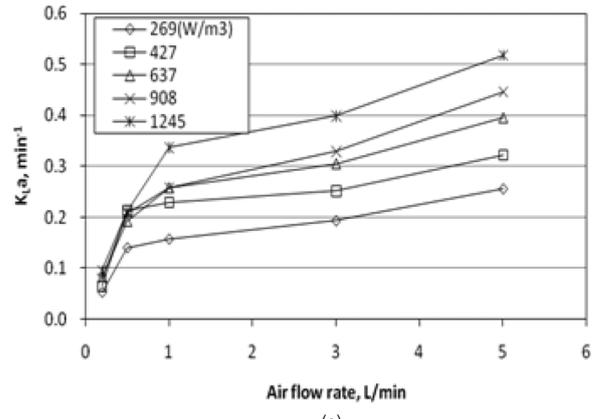
(b)



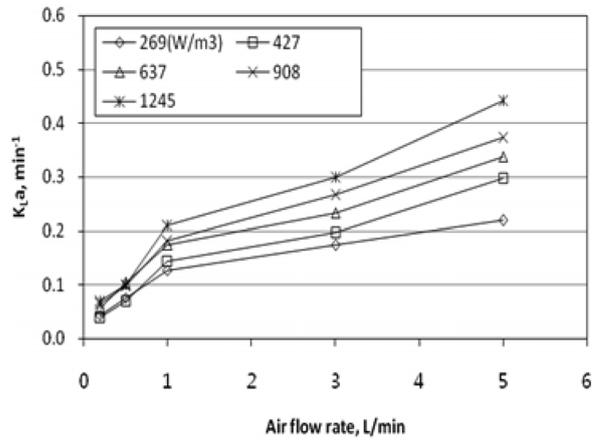
(c)

Fig. 2. Oxygen Uptake Rate at various operating conditions in JLR; (a) MLVSS 2,000 mg/L (b) MLVSS 4,000 mg/L (c) MLVSS 6,000 mg/L.

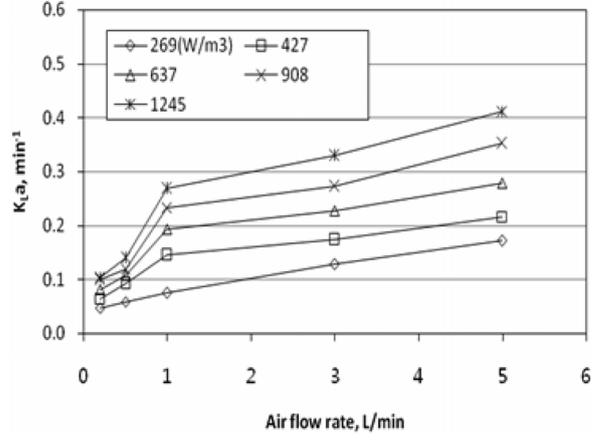
그래프를 살펴보면 미생물 농도에 따라 조금씩의 차이는 있으나, 대체적으로 비슷한 경향을 나타내었다. 단위부피당 공급되는 공기량이 제일 낮은 0.2 L/min 조건에서는 동력량을 269 W/m³에서 1245 W/m³로 증가시켜도 K_L·a의 증가폭이 0.05 min⁻¹ 이하로 낮은 수치를 나타냈지만, 공기량을 점점 올려줌에 따라 그 증가폭이 커지고 공기량이 제일 큰 5 L/min의 조건에서는 K_L·a의 증가폭이 0.2 min⁻¹로 큰 차이를 보여주었다. 이는 생물반응을 하는데 있어 공기량이 작게 유



(a)



(b)



(c)

Fig. 3. K_La at various energy input (E/V) as a function of air flowrate of JLR; (a) MLVSS 2,000 mg/L (b) MLVSS 4,000 mg/L (c) MLVSS 6,000 mg/L.

지되는 상황에서는 동력량의 증가가 영향인자로 크게 작용하지 않는다는 것을 나타내며, 다른 의미로 일정수준 이상의 공기만 공급된다면 동력량을 조절하면서 필요한 가시요구량을 만족시킬 수 있다는 의미로 재해석될 수 있다.

미생물 농도에 따른 결과를 살펴보면 OUR의 결과와는 반대로 미생물 농도가 증가할수록 같은 운전조건에서의 K_L·a는 감소하는 경향을 나타내었는데, 이보다 더 높은 농도의 미생물이 존재할 때는 같은 동력량의 경우 공기량이 늘어나

도 $K_L \cdot a$ 값의 변화는 크지 않을 것으로 판단된다. 그러므로 미생물 농도를 높게 유지시켜야 하는 고농도 폐수 적용시 어느 정도의 산소전달률을 유지하기 위해서는 되도록 동력량을 크게 하고 공기량을 적절히 조절하면서 운전해야 한다고 사료된다.

3.3. 비선형 회귀모형

위의 결과로부터 $K_L \cdot a$ 는 동력량, 공기량 및 MLVSS에 대한 관계식으로 표현할 수 있으며, 식 (6)과 같이 모형식으로 정리할 수 있다.

$$K_L a = \alpha \left(\frac{E}{V}\right)^\beta \cdot Q_g^\gamma \cdot \mu_L^\delta \quad (6)$$

여기서 $\frac{E}{V}$ 는 동력량, μ_L 은 MLVSS에 따라 결정되는 점성계수이다. Q_g 는 공기량을 나타내며, 모형식에서 포함하고 있는 $\alpha, \beta, \gamma, \delta$ 는 추정해야 할 모수를 의미한다. 위 식은 일반적인 선형모형의 형태가 아닌 비선형모형의 형태이기 때문에 모수의 추정값을 찾기 위한 탐색적 방법으로, 가우스-뉴튼 방법을 사용하여 모형을 적합시켰으며, 통계패키지(SAS)를 이용하여 추정하였다(Table 5).

결론적으로 식 (6)은 비선형 모형 식 (7)과 같이 표현된다.

$$K_L a = 0.00284 \left(\frac{E}{V}\right)^{0.4335} Q_g^{0.4029} \mu_L^{-0.5527} \quad (7)$$

동력량의 영향력을 나타내는 β 값과 공기량의 영향력을 나타내는 γ 값을 살펴보면 동력량의 영향이 조금 더 크게 작용하는 것으로 나타났지만, 두 인자의 영향은 거의 비슷하다고 설명할 수 있다. 하지만 액체의 점성에 대한 영향력을 나타내는 δ 값은 음의 값으로 나타나 점성이 클수록 $K_L \cdot a$ 값은 작아지는 것을 알 수 있다.

Table 4에, 점성계수는 MLVSS 2,000 mg/L, 4,000 mg/L, 6,000 mg/L일 때 각각 0.01, 0.0133, 0.0183 kg/m-sec로 측정되었는데, 이는 MLVSS가 작을수록 액체의 점성이 작아 순환이 잘 이루어지고, 이로 인해 기-액간의 접촉률이 높아져 $K_L \cdot a$ 가 커진 것으로 사료된다.

Table 5. Parameter estimate of nonlinear regression model of Eq.⁶⁾

Parameter	Estimate	Standard error	T-value	P-value
α	0.00284	0.001096	2.594	0.0115
β	0.4335	0.034486	12.569	2.00E-16
γ	0.4029	0.01945	20.716	2.00E-16
δ	-0.5527	0.070346	-7.857	3.08E-11

4. 결론

JLR를 이용하여 공기유량과 순환유량을 운전조건의 변수로 두고 미생물의 농도에 따른 산소소비율(Oxygen uptake rate, OUR)과 물질전달계수(Volumetric mass transfer coefficient, $K_L \cdot a$)를 측정하여 비선형 회귀모형을 제안하였다.

1) 일정한 공기량의 조건에서 동력량의 증가에 따른 OUR의 변화는 거의 관찰되지 않았으며, 반면에 일정한 동력량에서 공기량의 증가가 대부분의 영향을 미치는 것으로 나타났다.

2) 각 조건에서 $K_L \cdot a$ 를 측정한 결과, 단위부피당 공급되는 공기량이 낮은 조건에서는 동력량 증가에 따른 $K_L \cdot a$ 증가폭이 0.05 min^{-1} 이하로 낮았지만, 공기량을 점점 올려줌에 따라 그 증가폭이 커져 최대 0.2 min^{-1} 까지 차이를 나타내었다.

3) 미생물 농도가 증가할수록 같은 운전조건에서 $K_L \cdot a$ 는 감소하였다. 그러므로 미생물 농도를 높게 유지시켜야 하는 고농도 폐수를 처리하기 위해서는, 되도록 동력량과 공기량을 증가시켜야 한다.

4) $K_L \cdot a$ 값을 결정하는 인자들은 동력량, 공기량, 점성계수이었으며, 비선형 회귀 분석 결과, 아래와 같은 회귀모형식을 얻을 수 있었다.

$$K_L a = 0.00284 \left(\frac{E}{V}\right)^{0.4335} Q_g^{0.4029} \mu_L^{-0.5527}$$

KSEE

참고문헌

- Calik, P., Yilgör P., Ayhan, P. and Demir, A. S., "Oxygen transfer effects on recombinant benzaldehydelyase production," *Chem. Eng. Sci.*, **59**, 5075~5083(2004).
- Garcia-Ochoa, F., Gomez, E. and Santos, V. E., "Oxygen transfer and uptake during xanthan gum production," *Enzyme Microb. Technol.*, **27**, 680~690(2000).
- Liu, Y. S., Wu, J. Y. and Ho, K. P., "Characterization of oxygen transfer conditions and their effects on Phaffia rhodozyma growth and carotenoid production in shake-flask cultures," *Biochem. Eng. J.*, **27**, 331~335(2006).
- Roberts, P. V. and Dandllker, P. G., "Mass transfer of volatile organic contaminants from aqueous solution to the atmosphere during surface aeration," *Environ. Sci. Technol.* **17**(8), 484~489(1983).
- Zamouche, R. and Bencheikh-Lehocine, M., "Oxygen transfer and energy savings in a pilot-scale batch reactor for domestic wastewater treatment," *Desalination*, **206**, 414~423(2007).
- Hughmark, G. A., "Hold up and mass transfer in bubble columns," *Ind. Eng. Chem. Proc. Des. Dev.*, **6**, 218~220(1967).
- Garcia-Ochoa, F. and Gomez, E., "Bioreactor scale-up and oxygen transfer rate in microbial processes: An overview,"

- Biotechnol. Advances.* **27**. pp. 153~176(2009).
8. Kawase, Y. and Hashiguchi, N., "Gas-liquid mass transfer in external-loop airlift columns with Newtonian and non-Newtonian fluids," *Chem. Eng. J.*, **62**, 35~42(1996).
 9. Chen, J. H., Hsu, Y. C., Chen, Y. F. and Lin, C. C., "Application of gas-inducing reactor to obtain high oxygen dissolution in aeration process," *Water Res.*, **37**, 2919~2928 (2003).
 10. Farizoglu, B. and Keskinler, B., "Influence of draft tube cross-sectional geometry on K_{LA} and ϵ in jet loop bioreactors (JLB)," *Chem. Eng. J.*, **133**, 293~299(2007).
 11. Calderbank, P. H., "Physical rate processes in industrial fermentation part I-the interfacial area in gas-liquid contacting with mechanical agitation," *Trans. Instn. Them. Eng. Sci. J.*, **16**, 443~453(1958).
 12. Panja, N. C. and Phaneswara, Rao, D., "Measurement of gas-liquid parameters in a mechanically agitated contactor," *Chem. Eng. J.*, **52**, 121~129(1993).
 13. Pederson, A. G., Andersen, H., Nielsen, J. and Villadsen, J., "A novel technique based on Kr-85 for quantification of gas-liquid mass transfer in bioreactor," *Chem. Eng. J.*, **6**, 803~810(1994).
 14. Ozabec, B. and Gayik, S., "The studies on the oxygen mass transfer co-efficient in a bioreactor," *Proc. Biochem.*, **36**, 729~741(2001).
 15. Jin, B., Pinghe, Y. and Paul, L., "Hydrodynamics and mass transfer coefficient in three-phase air-lift reactors containing activated sludge," *Chem. Eng. J.*, **45**, 608~617(2006).
 16. 서종환, 이철승, "Jet Loop 반응기를 이용한 화학비료폐수의 생물학적 질소제거 연구," *한국환경과학회지*, **14**(2), 157~165(2005).
 17. Petruccioli, M., Cardoso Duarte, J., Eusebio, A. and Federici, F., "Aerobic treatment of winery wastewater using a jet-loop activated sludge reactor," *Proc. Biochem.*, **37**, 821~829 (2002).
 18. Bloor, J. C., Anderson, G. K. and Willey, A. R., "High rate aerobic treatment of brewery wastewater using the jet loop reactor," *Water Res.*, **29**(5), 1217~1223(1995).