

# Jet 폭기 시스템의 순환유량에 따른 산소전달 특성 및 순산소 적용성 검토

박노백 · 송용호\* · 박준규\* · 전항배\*†

농촌진흥청 국립농업과학원

\*충북대학교 환경공학과

## Oxygen Transfer Characteristics & Pure Oxygen Application Study on Circulation Flow Rate of the JLB (Jet Loop Bioreactor)

Noh-Back Park · Yong-Hyo Song\* · June-Gue Pack\* · Hang-Bae Jun\*†

National Academy of Agricultural Science, Rural Development Administration

\*Department of Environmental Engineering, Chungbuk National University

(Received 17 July 2009, Revised 6 October 2009, Accepted 7 October 2009)

### Abstract

In this study, in order to apply the air and pure oxygen in the Jet Loop Reactor (JLB) in which the oxygen transfer rate is high, differentiate the operation mode according to each air flowrate and liquid flowrate and investigate the oxygen transfer characteristic, an experiment was carried out. The oxygen concentration with the air flowrate ( $Q_g$ ) and liquid flowrate ( $Q_L$ ) was identical but the oxygen transfer coefficient ( $K_L \cdot a$ ) is linear depending on degree of two factors. The width of an increase is small in  $0.1 \text{ min}^{-1}$  when the air flowrate is  $0.2 \text{ L/min}$  with increasing the liquid flowrate. Whereas, the increment was exposed to be very high for  $1.5 \text{ min}^{-1}$  when the air flowrate was  $5 \text{ L/min}$ . In the experiments using the pure oxygen, it was  $30 \text{ mg/L}$  of oxygen concentration finally and it was 3.5 times than using the air. But the time reached the saturated concentration was similar to using the air, and  $K_L \cdot a$  was similar to using the air too. Analysis between two independent variable and oxygen transfer of the correlation is the same model like  $K_L \cdot a = 0.0161 Q_L^{1.5371} Q_g^{0.5433}$  using with coefficient non linear regression analysis. It was resulted that the liquid flowrate were approximately three times than air flowrate on effect to oxygen transfer rate.

**keywords** : Air flowrate, Jet Loop Reactor, Oxygen transfer coefficient, Recirculation flowrate

## 1. 서론

기본적으로 폐수처리에 있어 생물학적 오염물질 제거 기작은 기질이 미생물 floc 내부로 이동하고, 세포 내로 전달되어 이화반응에 의해 산화되는 것이다. 이 때, 최종 전자 수용체로 산소가 필요하며 폭기조에 주입한 공기로부터 산소가 용해되어 공급된다. 이렇게 공급되는 산소는 호기성 처리공정에서 미생물의 성장, 유지 및 이화작용에 이용되어 처리효율을 결정하는 매우 중요한 인자로 작용하고, 이에 따라 공정 운영에 있어 서로 다른 운전조건하에 산소전달 효율의 정확한 평가는 에너지 절약과 폐수의 처리효율 증대에 큰 도움이 된다(고광백 등, 2003; Calik et al., 2004; Garcia-Ochoa et al., 2000; Liu et al., 2006).

기체혼합물에서 용질의 한 성분이 액상으로 전달되는 현상은 Lewis and Whitman(1924)의 이중경막설(two-film theory)로 설명된다(Metcalf and Eddy, 1991). 기액 경계면에 두 막이 존재하며, 액상막을 통과하는 단계가 확산속도를 결정

하는 율속단계이다. 이 확산전달계수는  $K_L$ 이며, 산소가 물에 용해하는 경우  $K_L = D/\delta_L$ 로 표현하며, 여기서  $D$ 는 확산계수,  $\delta_L$ 는 막의 두께를 나타낸다. 여기에 물의 단위부피당 기포의 계면적을 나타내는  $a$ 를 곱하면 총괄 물질전달계수인  $K_L \cdot a$ 가 된다(Garcia-Ochoa and Gomez, 2009).  $K_L \cdot a$ 를 결정하는 운전인자는 온도, 폐수의 점성 및 밀도, 교반강도, 공기량, 반응조의 형태 등 여러 가지가 있는데, 주로 공기량이  $a(A/V)$ 에 영향을 준다면 그 밖에 물리적인 조건은  $K_L$ 을 결정하는 인자(factor)가 된다. 이러한 인자들의 변화에 따라  $K_L a$ 의 변화특성을 파악하기 위하여 많은 연구가 진행되어 왔다(Chen et al., 2003; Farizoglu and keskinler, 2007; Hughmark, 1967; Kawase and Hashiguchi, 1996; Panja and Phaneswara, 1993; Roberts and Dandllker, 1983; Zamouche et al., 2006).

액 중에 불어넣은 가스에서 액상으로의 산소의 실제 이동용량 계수로는 비정상상태법을 사용하게 된다. 즉 초기 용존산소량이  $0.5 \text{ mg/L}$ 이하인 상태에서 공기를 주입시키면서 시간에 따른 산소농도의 변화를 이용하여 산소전달계수를 산정할 수 있다. 이 때의 조건은 완전혼합상태, 즉 반응조 내의 각 지점에서의 용존산소의 농도가 같아야한다. 여

† To whom correspondence should be addressed.

jhbcb@cbnu.ac.kr

기서 용존상태의 산소포화농도를  $C_s$ 라고 하면 시간에 따른 DO농도변화는 식 (1)과 같이 나타낼 수 있다.

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

여기서 식 (1)을 한계구간  $C = C_0$ ,  $C = C_t$  그리고  $t = 0$ ,  $t = t$ 에 대해서 적분하면, 식 (2)와 같이 나타낼 수 있다.

여기서  $C_t$ 는 임의의 시간  $t$ 에서의 농도이다.

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

초기농도  $C_0 = 0.05$  mg/L에서 운전조건의 적용과 동시에 시간에 따른 DO변화를 측정하여 식 (2)에 적용하여 도시하여 곡선의 기울기를 이용하면  $K_L \cdot a$  ( $\text{min}^{-1}$ )를 평가할 수 있다.

최근 폐수의 효율적인 생물학적 처리를 위해 강한 교반과 공기방울의 비표면적 증가로 높은 산소전달 효율에 효과적인 Jet Loop Bioreactor(JLB)가 많이 상용화되고 있다. JLB는 유기물 부하가 높은 폐수를 처리하는데 있어 생물학적 처리를 발전시키는데 성공적으로 사용되어 왔으며, 발효, 생물공학, 폐수처리에서 높은 효율로 광범위하게 사용되고 있다. 이러한 JLB는 구조가 간단하여 운전이 용이하며, 적은 투자와 낮은 운영비로 경제적이며, 높은 물질전달 효율과 교반이 원활하다는 장점을 갖고 있다.

JLB의 원리는 빠른 속도의 액체 분사로 인해 공기가 함께 인입되면서 두 상(phases)에서 미세 확산을 만들기 위한 동력학적 에너지를 이용하는 것이다. 액체 분사로 인하여 빠른 전단속도는 매우 미세한 버블을 생성하게 되고, 높은 비표면적과 가스 전달율이 발생된다. 계면적의 생성은 gas hold-up에 직접적으로 관련되는 변수로, 액체의 물리적인 특성, 흐름의 형태, 미생물반응 효율에 영향을 받는다. JLB를 다른 종류의 기체-액체 생물반응조와 비교하면, 더 넓은 계면적을 생산한다. Jet loop bioreactor는 다른 유형의 gas-liquid bioreactor와 비교하여 두 상(two phase)의 더 높은 표면적을 제공하며, 적절한 노즐의 설계와 draft tube에서 끝부분의 위치는 liquid 상에서 기체의 확산범위를 고려하였을 때 매우 중요한 인자이다(Jamshidi et al., 2001).

JLB는 전통적인 공정과 비교하여 단순한 건설설계와 운영, 적은 투자비용과 운영비용, 직접적인 순환방식, 미세가스 분산, 높은 교반과 물질전달, 그리고 비교적 낮은 동력 요구 등 많은 장점을 가지며, 노즐을 통해 만들어지는 액체의 분사는 최적의 물질전달과 미생물학적 전환을 가능하게 하는 높은 교반과 난류를 생성한다(Lubbecke et al., 1994; Petruccioli et al., 2002; Yagna Prasad and Ramanujam, 1994).

Jet aeration system에서 산소전달효율은  $\text{VO}_2$ 에서 3 kg- $\text{O}_2/\text{kWh}$ , Vitox pure oxygen system에서 4 kg- $\text{O}_2/\text{kWh}$ , JLR에서 0.5~3 kg- $\text{O}_2/\text{kWh}$ 로서, 전통적인 표면폭기(1~2 kg- $\text{O}_2/\text{kWh}$ )나, fine bubble aerator(1.7~2.2 kg- $\text{O}_2/\text{kWh}$ )보다 더 효율적인 것으로 보고되고 있다(Bloor et al., 1994).

본 연구에서는 산소 전달율이 높은 Jet Loop Bioreactor (JLB)에서 공기와 순산소를 적용하여 각각의 주입량과 순환유량에 따라 운전 조건을 달리하여 산소전달 특성을 규명하고 전달효율을 극대화할 수 있는 시스템의 최적운전 조건을 도출하고자 하였다.

## 2. 연구방법

실험에 사용된 장치의 모식도 및 특징을 각각 Table 1과 Fig. 1에 나타내었다. 실험에 사용된 반응기는 아크릴 재질의 원통형 반응기로 내부순환을 원활히 하기 위하여 사각형태의 draft-tube를 설치하였다. 반응조 하단에 위치한 배출구는 순환펌프의 흡입구와 연결되어 있으며, 토출구를 통해 나온 물은 최종적으로 노즐을 통해 분사된다. 순환펌프(Hydra-cell, Germany)의 경우 분출구의 면적이 줄어드는 노즐의 특성상 압력으로 인한 순환유량의 오차와 온도상승 문제를 고려하여 맥동식 펌프(Hydra-cell SIMENS, Germany)를 사용하였으며, 펌프와 노즐사이에 전자식 유량계(M1000 WINTEC, Korea)를 설치하여 순환유량을 조절하였다. 노즐의 형태는 이상(two phase)형태의 노즐로 공기는 노즐의 중앙부로 공급 되며, 물은 공기가 나오는 관의 바깥쪽으로 분사되도록 제작하였다.

실험에 사용된 공기 주입장치는 30 L/min용량의 블로워(blower)를 사용하였으며, 순산소의 경우 99.9% 순도로 각각의 가스점도(gas viscosity)와 호환되는 유량계를 사용하였다. 실험에 사용된 원수는 수돗물( $20 \pm 0.5^\circ\text{C}$ )을 사용하였으며, 초기 DO농도를 0.05 mg/L 이하로 고정하기 위해 증류수 1 L당  $\text{Na}_2\text{SO}_3$  0.15 g를 주입하였다. 실험에 적용된 산소전달계수( $K_L \cdot a$ )측정법은 dynamic method로 DO meter를 이용하여 시간에 따른 DO변화를 측정하는 방법으로서 측정 장비의 특성상 반응시간(response time)의 차이에 의해서 실제 DO농도와 측정된 DO농도와의 오차가 발생하게 된다. 이 경우 장비의 종류에 따라 약간의 차이는 있으나, 일반적으로 측정기의 반응시간은 보통 5초이며, 평가된  $K_L \cdot a$ 를 근거로  $1/K_L \cdot a > 10\tau_r$  (50sec)의 관계가 성립되면  $\tau_r$ 은 무시할 수 있다(Garcia-Ochoa and Gomez, 2009).

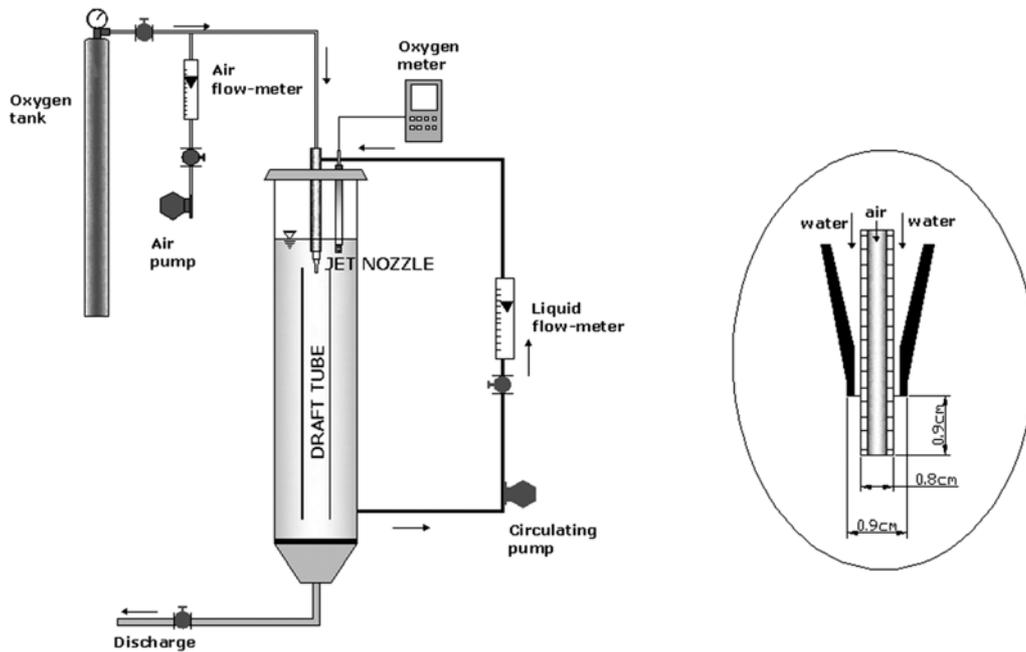
실험조건은 순환유량의 경우 2.5~11.5 L/min(1.5 L/min간격), 공기량의 경우 0.2, 1, 5 L/min의 범위로 설정하여 실험을 수행하였으며, 반응조 내에서의 시간에 따른 DO [YSI-5000, YSI co.;  $\tau_r$  (response time, 3sec)]농도 변화를 측정하여 기록하였다.

## 3. 결과 및 고찰

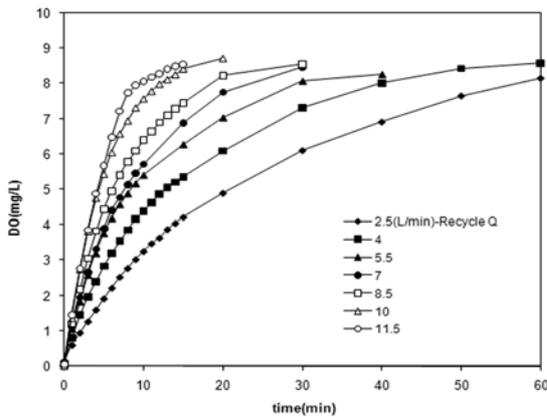
Fig. 2는 유입공기량을 0.2 L/min으로 고정하고, 각각의 순환유량에 따른 폭기조내에서의 시간에 따른 용존산소농도의 변화를 나타낸 것이다. 각각의 실험조건에서 도달하는 최대 산소농도는 비교적 동일한 값을 나타냈지만 순환유량

**Table 1.** Experimental parameters for jet-loop reactor

Description	Notation	Value
Bioreactor height (mm)	$H_b$	700
Bioreactor diameter (mm)	$D_b$	180
Draft tube length (mm)	$L_d$	580
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
Temperature (°C)	$T$	$20 \pm 0.5$
Raw	Tap water	

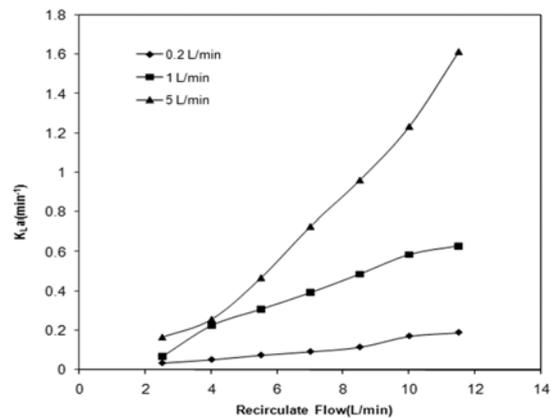


**Fig. 1.** Schematic diagram of the experimental set-up.



**Fig. 2.** DO profiles at air flow rate of 0.2 L/min.

이 점차 증가할수록 포화농도에 이르는 시간은 점차 단축되는 것을 알 수 있다. 순환유량이 2.5 L/min일 경우 용존 산소농도가 8 mg/L이 되기까지 약 60분 정도의 시간이 소요되는 반면 11.5 L/min일 경우 동일한 정도의 산소농도에 이르기까지는 약 10분 정도의 시간이 소요되는 것을 알



**Fig. 3.**  $K_L \cdot a$  ( $\text{min}^{-1}$ ) vs. recirculation flow rate.

수 있다. 이는 순환량이 클수록 기체상태의 산소가 더 쉽게 액체속으로 용해될 수 있다는 것을 나타낸다.

Fig. 3은 Fig. 2와 같은 실험을 유입공기량을 0.2, 1.0, 5.0 L/min으로 증가한 상태에서 순환유량에 따라 DO농도를 측정하고 다음, 식 (2)을 이용하여 산소전달계수,  $K_L \cdot a$ 를

산출한 것이다. 산소전달계수는 순환유량의 증가와 함께 비교적 선형적으로 증가하는 것으로 나타났다. 순환유량이 2.5 L/min일 경우에는 유입되는 공기량에 따라 산소전달계수는 0.2 min<sup>-1</sup>안의 범위에서 큰 차이가 없었지만 순환유량이 11.5 L/min일 경우에는 약 0.2~1.6 min<sup>-1</sup>의 범위로 공기량에 따라서 큰 차이를 보이는 것으로 나타났다.

즉, 같은 양의 공기를 공급하더라도 반응조에서 노즐로 공급되는 순환유량이 커짐에 따라 노즐 출구측에서의 전단력(shear stress)의 세기가 커지면서 기포직경을 좀 더 작게 만들어 줄 뿐만 아니라 조(reactor) 내의 순환량을 증가시켜 산소전달속도는 증가하게 되는 것이다. 따라서 산소전달계수는 공기량과 아울러 순환량에 따라 결정된다는 것을 알 수 있다. 이러한 산소전달계수는 교반없는 일반 활성슬러지 폭기조에서 얻을 수 있는 값(공기량 5 L/min에서 약 0.4 min<sup>-1</sup>)보다 훨씬 큰 값으로 순환량을 적절하게 조절해 줌으로써 큰 산소전달계수를 얻을 수 있다.

Fig. 4는 Fig. 2와 동일한 실험조건에서 공기대신 순산소를 0.2 L/min으로 고정하고, 각각의 순환유량에서 시간에 따른 폭기조내의 산소 농도를 측정하여 나타낸 것이다. 순환유량이 11.5 L/min일 경우 약 15분 후 거의 포화상태에 이르나, 2.5 L/min의 경우 동일한 정도의 산소농도를 얻기 위해서는 약 60분 정도의 시간이 소요되는 것을 알 수 있다. 이 경우에도 앞의 실험과 마찬가지로 최종적으로 도달하는 산소농도는 약 30 mg/L로 일정하였지만 순환유량이 증가할수록 최종포화농도에 도달하는 시간은 상당량 단축되는 것을 알 수 있다. 하지만 이론적으로 순산소를 사용하였을 경우 포화농도는 약 45 mg/L에 도달해야 하나, 반응조의 구조상 개방상태로 실험을 하였기 때문에 이보다 작은 값으로 나타났다.

Fig. 5는 산소유입량을 0.2, 1.0, 5.0 L/min으로 증가한 상태에서 각각의 순환유량조건에서의 시간에 따른 DO농도 변화를 측정 후 식 (2)를 이용하여 산소전달계수(K<sub>L</sub>·a)를 산출한 것이다. 이 경우에도 Fig. 2에서 나타난 결과와 비슷하게 산소전달계수는 순환유량의 증가와 함께 비교적 선형적인 증가추세를 보이는 것으로 나타났다. 공기와 순산소를 사용하였을 때 산소전달계수에 미치는 영향을 관찰하기

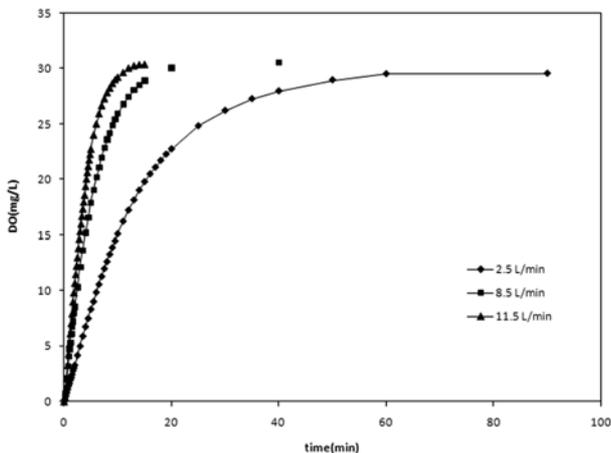


Fig. 4. DO profiles at O<sub>2</sub> flow rate of 0.2 L/min.

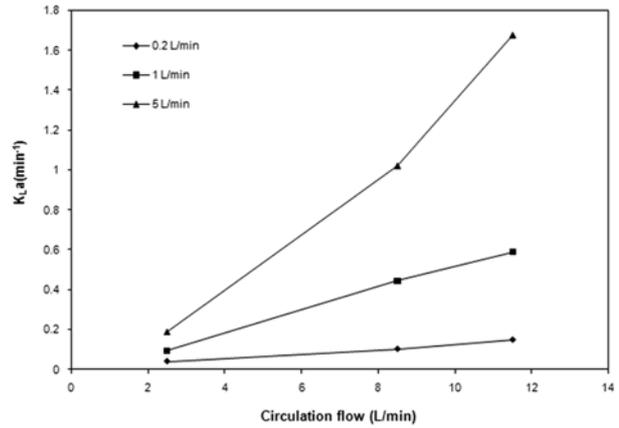


Fig. 5. K<sub>L</sub>·a (min<sup>-1</sup>) on O<sub>2</sub> flow rate.

Table 2. K<sub>L</sub>·a on recirculation and gas flowrate for jet-loop reactor

Q <sub>L</sub> (L/min) \ Q <sub>g</sub> (L/min)		Q <sub>g</sub> (L/min)		
		0.2	1	5
2.5	air	0.036	0.068	0.173
	oxygen	0.041	0.096	0.190
4	air	0.053	0.235	0.268
5.5	air	0.078	0.322	0.490
7	air	0.096	0.410	0.763
8.5	air	0.121	0.510	1.008
	oxygen	0.103	0.445	1.023
10	air	0.179	0.613	1.294
11.5	air	0.198	0.660	1.693
	oxygen	0.149	0.588	1.678

위해 각각의 실험조건의 결과를 비교 검토하였다(Fig. 6).

Fig. 6(a)은 bench scale 폭기조에서 순환유량을 11.5 L/min으로 하고, 산소 및 공기 유입유량을 0.2 L/min으로 할 경우 폭기조내 DO 농도변화를 비교한 그림이다. 반응시작 10분 후에는 거의 일정한 농도에 도달하는데, 순산소를 사용할 경우 약 30 mg/L로 공기를 사용할 경우 약 8.5 mg/L에 비하여 3.5배 정도 큰 것으로 나타났다. 일정한 압력을 가하며 완전한 닫힌계로 운전할 경우 이론값은 4.7배 정도 차이가 나야 하지만, 실험조건이 이상적인 차이에서 오는 결과라고 생각된다. 그러나, 산소전달계수는 Fig. 6(b)과 같이 순산소나 공기를 사용한 경우 거의 유사한 값을 갖는 것으로 나타났다. 이는 순산소나 공기를 사용한 경우에 순환량과 공기 또는 용환량은 영향을 미치나 용환분압의 차이는 영향을 미치지 않으며, 단지 산소분압의 차에서 오는 포화농도의 차이에 따른 농도구배의 크기가 바뀌기 때문에 최종적으로는 산소전달율에 영향을 미치게 되는 것이다.

또한 본 연구에서는 K<sub>L</sub>·a와 순환량 및 공기량에 대한 관계에 대하여 식 (3)과 같은 비선형 회귀모형을 제안하였다.

$$K_L a = \alpha Q_L^\beta Q_g^\gamma \quad (3)$$

여기서 Q<sub>L</sub>는 순환유량, Q<sub>g</sub>는 공기량을 나타내며, 모형에

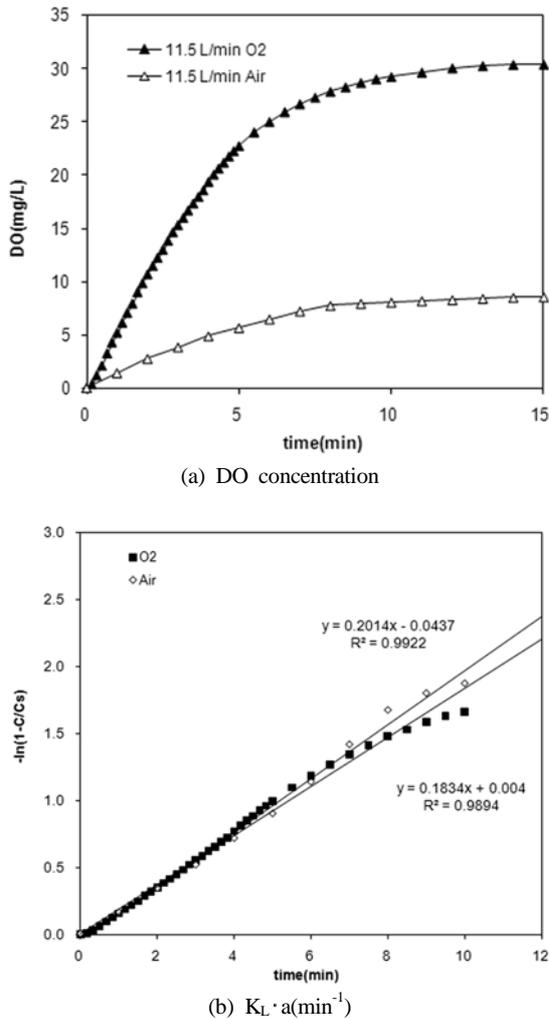


Fig. 6. DO profiles & Estimation of  $K_L \cdot a (\text{min}^{-1})$  on air and  $\text{O}_2$  flow rates of 0.2 L/min at recirculation flow of 11.5 L/min.

서 포함하고 있는  $\alpha, \beta, \gamma$  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. 비선형 회귀모형의 추정식은  $K_L a = 0.0161 \cdot Q_L^{1.5371} \cdot Q_g^{0.5433}$  이며 실험값과 추정식으로부터 얻어진 예측값과의 상관계수가 0.992로 매우 높게 나타났으며, 모형의 모수 추정값들의 근거로 판단할 때 공기량보다는 순환유량이  $K_L \cdot a$  값에 미치는 영향이 더 큰 것으로 나타났다.

#### 4. 결론

1) 산소전달에 있어 영향인자로 작용하는 두 인자[순환유량 ( $Q_L$ ), 공기량( $Q_g$ )]에 대해서 하나의 독립변수에 의해 미치는 영향은 비교적 미미하였고, 두 인자가 복합적으로 작용을 했을 때 전달속도에 미치는 영향이 커지는 것으로 나타났다.

- 2) 순환유량의 세기가 증가할수록 관찰되는 난류의 세기도 증가하고, 기포사이즈는 감소하였다. 이는 노즐을 통해 분사되는 수압에서 기인하는 반응조내의 강한 난류의 형성이  $K_L \cdot a$ 에 미치는 영향을  $K_L$ 과  $a(A/V)$ 값으로 나누어 볼 때,  $K_L$  뿐만 아니라 미세기포 형성에서 기액접촉면의 증가에 따라  $a$ 에도 큰 영향을 미치는 것으로 사료된다.
- 3) 동일 조건에서 폭기매체(공기, 산소)를 달리하였을 경우  $K_L a$ 는 매우 흡사한 결과 나타냈는데, 산소전달효율을 평가하기 위해 산소전달계수( $K_L a$ )×농도구배( $C_s - C$ )를 적용하면, 순산소를 폭기시켜주는 방식은  $K_L \cdot a$ 값이 아닌 농도구배를 높여주는 역할을 함으로써 산소전달효율을 높인다고 해석할 수 있다.
- 4) 비선형 회귀 분석법을 이용해 결과를 분석한 결과  $K_L \cdot a = 0.0161 \cdot Q_L^{1.5371} \cdot Q_g^{0.5433}$ 와 같은 회귀모형을 얻을 수 있었으며, 실험값과 예측값의 상관성이 높은 것으로 나타났다. 모형의 지수값을 근거로 판단할 때 공기량보다는 순환유량이  $K_L \cdot a$  값에 미치는 영향이 큰 것으로 사료된다.
- 5) 폭기시스템의 산소전달효율을 평가하는데 있어 중요한 인자로 작용하는 교반강도(순환유량)와 공기량을 각 조건에서 분석해본 결과 공기량을 증가시키는 것보다는 순환유량을 증가시키는 것이 전달효율을 극대화하는데 효율적이라고 사료된다.

### 사 사

본 연구는 환경부의 “차세대핵심환경기술개발사업(Eco-technopia 21 project)”으로 지원받은 과제입니다.

### 참고문헌

고광백, 박승룡, 임세호, 최상용, 신동록(2003). Off-gas method 를 이용한 하수처리장 포기시스템 산소전달효율 측정 및 분석. *공동추계 학술발표회 논문집*, 대한상하수도학회. 한국물환경학회, pp. 71-74.

Bloor, J. C., Anderson, G. K., and Willey, A. R. (1994). High rate aerobic treatment of brewery wastewater using the jet loop reactor. *Water Research*, **29**(5), pp. 1217-1223.

Calik, P., Yilgör, P., Ayhan, P., and Demir, A. S. (2004). Oxygen transfer effects on recombinant benzaldehydelyase production. *Chem. Eng. Sci.*, **59**, pp. 5075-5083.

Chen, J. H., Hsu, Y. C., Chen, Y. F., and Lin, C. C. (2003). Application of gas-inducing reactor to obtain high oxygen dissolution in aeration process. *Water Research*, **37**, pp. 2919-2928.

Farizoglu, B. and Keskinler, B. (2007). Influence of draft tube cross-sectional geometry on  $K_L a$  and  $\epsilon$  in jet loop bioreactors(JLB). *Chemical Engineering J.*, **133**, pp. 293-299.

Garcia-Ochoa, F. and Gomez, E. (2009). Bioreactor scale-up and oxygen transfer rate in microbial processes: An overview. *Biotechnology Advances*, **27**, pp. 153-176.

Garcia-Ochoa, F., Gomez, E., and Santos, V. E. (2000). Oxygen transfer and uptake rates during xanthan gum production.

- Enzyme. Microb. Technol.*, **27**, pp. 680-690.
- Hughmark, G. A. (1967). Holdup and mass transfer in bubble columns. *Ind Eng Chem Process Des Dev*, **6**, pp. 218-220.
- Jamshidi, A. M., Sohrabi, M., Vahabzadeh, F., and Bonakdar-pour, B. (2001). Hydrodynamic and mass transfer characterization of a down flow jet loop bioreactor. *Biochemical Engineering Journal*, **8**, pp. 241-250.
- Kawase, Y. and Hashiguchi, N. (1996). Gas-liquid mass transfer in external-loop airlift columns with Newtonian and non-Newtonian fluids. *Chemical Engineering J.*, **62**, pp. 35-42.
- Liu, Y. S., Wu, J. Y., and Ho, K. P. (2006). Characterization of oxygen transfer conditions and their effects on *Phaffia rhodozyma* growth and carotenoid production in shake-flask cultures. *Biochemical Engineering Journal*, **27**, pp. 331-335.
- Lubbecke, S., Vogelpohl, A., and Dewjanin, W. (1994). Wastewater treatment in a high-performance system with concentration biological high biomass. *Water Research*, **29**(3), pp. 793-802.
- Metcalf and Eddy (1991). *Wastewater Engineering*, McGraw-Hill, Inc.
- Panja, N. C. and Phaneswara Rao, D. (1993). Measurement of gas-liquid parameters in a mechanically agitated contactor. *Chemical Engineering J.*, **52**, pp. 121-129.
- Petruccioli, M., Cardoso Duarte, J., Eusebio, A., and Federici, F. (2002). Aerobic treatment of winery wastewater using a jet-loop activated sludge reactor. *Process Biochemistry*, **37**, pp. 821-829.
- Roberts, P. V. and Dandllker, P. G. (1983). Mass transfer of volatile organic contaminants from aqueous solution to the atmosphere during surface aeration. *Environ. Sci. Technol.*, **17**(8), pp. 484-489.
- Yagna Prasad, K. and Ramanujam, T. K. (1994). Enhancement of gas-liquid mass transfer in a modified reversed flow jet loop reactor with three-phase system. *Chemical Engineering Science*, **50**(8), pp. 2997-3000.
- Zamouche, R., Bencheikh-Lehocine, M., and Meniai, A. H. (2006). Oxygen transfer and energy savings in a pilot-scale batch reactor for domestic wastewater treatment. *Desalination*, **206**, pp. 414-423.