

## 수질오염물질의 산화처리용 포기조에서 산소의 물질전달특성

백현창 · 이은덕 · 김근범 · 박영성<sup>†</sup>

대전대학교 환경공학과  
(2001년 7월 30일 접수, 2002년 2월 4일 채택)

## Oxygen Transfer Characterization in Aeration Tank for Oxidation Treatment of Water Pollutants

Hyun Chang Baek, Eun Duk Lee, Geun Bum Kim and Yeong Seong Park<sup>†</sup>

Department of Environmental Engineering, Daejeon University, Daejeon 300-716, Korea  
(Received 30 July 2001; accepted 4 February 2002)

### 요 약

산화처리용 포기조에서 산소의 물질전달특성을 고찰하였다. 주요 실험변수로서 공기공급량(0.5-3.0 l/min), 교반속도(0-1,000 rpm), 임펠러수(1-3), 액상온도(20-40 °C) 등이 적용되었다. 공기공급량, 교반속도, 액상온도가 증가할수록 총괄 물질전달계수는 증가하였으며, 특히 공기공급량과 교반속도의 증가는 기체체류량 증가와 기포분쇄에 따른 기-액 접촉면적의 증가를 통해 총괄물질전달계수에 커다란 영향을 주는 것으로 나타났다. 총괄물질전달계수는 임펠러수에 비례하여 증가함을 보였으며, 교반속도가 높을 때 총괄물질전달계수에 대한 임펠러수의 영향이 좀더 뚜렷해지는 것으로 나타났다. 또한 총괄물질전달계수는 임펠러수, 공기공급량, 액상온도, 교반속도 등의 조업변수를 토대로한 상관식으로 나타낼 수 있었다.

**Abstract** – The oxygen transfer characteristics has been investigated in a designed aeration tank for oxidation treatment of pollutants. As operating variables, air flow rate(0.5-3.0 l/min), rotation speed(0-1,000 rpm), number of impeller(1-3), and liquid temperature(20-40 °C) were applied. The experimental results showed that overall mass transfer coefficient was increased with increasing air flow rate, rotation speed, and liquid temperature. Especially, air flow rate and rotation speed exhibited much distinct effect due to an increase of gas holdup and air-liquid contact area by bubble break. It was also found that overall mass transfer coefficient changes in proportion to number of impeller and the intensity of the effect is largely dependent on rotation speed. The correlational equation of overall mass transfer coefficient was obtained in terms of the operating variables such as impeller number, air flow rate, temperature, and rotation speed.

Key words: Oxygen Transfer, Aeration Tank, Mass Transfer Coefficient, Impeller

### 1. 서 론

공기 또는 산소를 이용한 포기기술이 적용되고 있는 분야를 보면, 습식 배연탈황공정에서 발생된 폐슬러리의 산화처리를 비롯한 생물학적 폐수처리공정과 미생물 배양공정, 석유화학공정, 발효공업, 축매를 이용한 삼상공정 등에서 다양하게 응용되고 있다[1-5]. 이러한 공정에서 기-액간의 물질전달속도는 전체 공정의 효율성을 좌우하는 율속단계인 경우가 많으며, 따라서 효율적인 장치설계를 위해서는 물질전달특성에 대한 기본적인 자료 확보가 요구되고 있다. 특히, 습식 배연탈황공정의 경우에 대기오염 배출허용기준이 강화됨에 따라 보급이 확대될 전망이다. 외국기술의 의존도가 높은 관계로 폐슬러리의 산화처리에 대한 운영 자료가 거의 전무한 실정으로 효율적인 운영자료의 확보는 시급하다[6].

포기조에서 기포의 크기, 체류량 및 기-액간의 혼합(교반)과 접촉효과 등이 기-액간의 물질전달속도에 중요한 영향을 미치는 요소로 알려져 있으며[1-3, 7-10], 물질전달속도에 영향을 주는 이러한 인자들에 변화를 주어 총괄물질전달계수를 증가시키기 위한 방안들로 기포분쇄물질첨가[2, 3, 11-14], 액상교반 및 반응기 구조개선 등[4, 5, 15-21] 여러 가지 기술들이 국내·외에서 활발히 연구되고 있다. 특히 액상 교반기술은 기포의 크기를 미세하게 분쇄시켜 기-액 접촉면적을 증가시킬 뿐만 아니라 액상의 유동화로 인하여 기-액 접촉효과도 증가시켜 주는 것으로 알려져 있기 때문에, 다양한 액상 교반기술의 연구를 통하여 효율적으로 적용이 가능한 기술을 모색하는 것은 매우 의미있는 연구가 될 것으로 보인다.

따라서, 본 연구에서는 산화처리용 포기조의 운전과 설계에 관련된 핵심적인 자료를 도출하고자 공기공급량, 교반속도, 임펠러수, 액상온도와 같은 다양한 실험변수에 따른 산소전달특성을 고찰하였고, 또한 이들 실험변수에 따른 총괄물질전달계수의 상관식을 유도하였다.

<sup>†</sup>To whom correspondence should be addressed.  
E-mail: yspark@dju.ac.kr

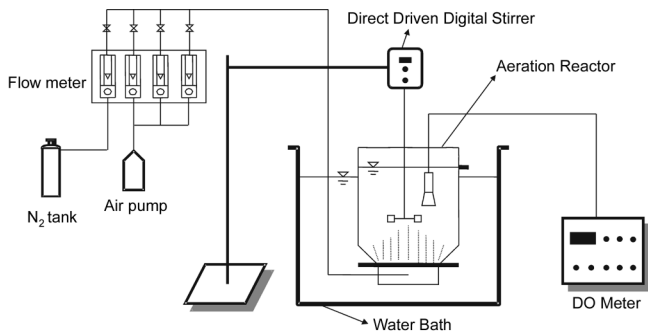


Fig. 1. Schematic diagram of experimental apparatus.

## 2. 실험

본 실험에 사용된 실험장치는 Fig. 1과 같이, 포기조, 공기 및 질소 주입부, 용존산소 측정기(Dissolved Oxygen Meter), 교반기로 구성되었다. 포기조는 직사각형 형태의 아크릴 재질에 유효용량이 3 l이고, 밑부분의 dead space를 없애고 기-액 접촉이 용이하도록 제작되었으며, 포기조의 하부에는 다공성 확산석이 배치되었다. 또한 포기조내의 액상온도를 일정하게 유지하기 위하여 포기조는 항온 수조안에 위치하도록 하였다. 액상으로는 증류수가 사용되었고, 질소가스에 의해 포기조내의 액상산소농도를 0.1 mg/l 이하로 떨어지도록 purge시켰으며, 공기는 air pump에서 공급되어 air flow meter에서 유량이 조절되어 포기조의 하부에 설치된 다공성 확산석을 통해 액상에 불어넣어졌다. 용존산소 측정기는 YSI사의 model 58이 사용되었고, 액상의 수면에서 아래로 2.5 cm 지점에서 설치되어 시간에 따른 용존산소농도를 측정하였다. 교반기는 3개의 blade를 갖는 프로펠러형 임펠러가 부착되었으며, blade길이는 2.1 cm였다. 임펠러를 포기조의 밑바닥에서 위로 5 cm 지점에서부터 4 cm 간격으로 설치하였는데 임펠러의 갭수에 변화를 주었으며, 교반속도는 최대 1,000 rpm 까지 조절하였다. 본 실험에서의 주요 실험인자의 조합조건은 공기공급량(0.5-3.0 l/min), 교반속도(0-1,000 rpm), 임펠러수(1-3), 액상온도(20-40 °C)이다.

액체막의 저항이 산소전달을 제한한다고 가정한 난류 조건하에서 가스상으로부터 액체상으로의 산소의 전달은 다음과 같다.

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

식 (1)을 적분하면 다음과 같다.

$$\ln \frac{C_s - C_t}{C_s - C_o} = -K_L a t \quad (2)$$

여기서

C: 시간 t에서의 용존산소농도(mg/liter)

$K_L a$ : 총괄물질전달계수( $t^{-1}$ )

$C_s$ : 표준 온도, 압력, 염도에서의 포화 용존산소농도(mg/liter)

$C_o$ : 시간 t=0에서의 용존산소농도(mg/liter)

$C_t$ : 시간 t에서의 용존산소농도(mg/liter)

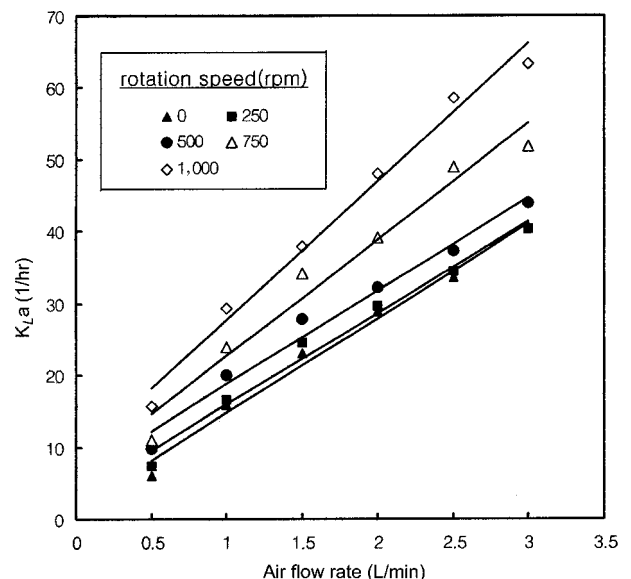
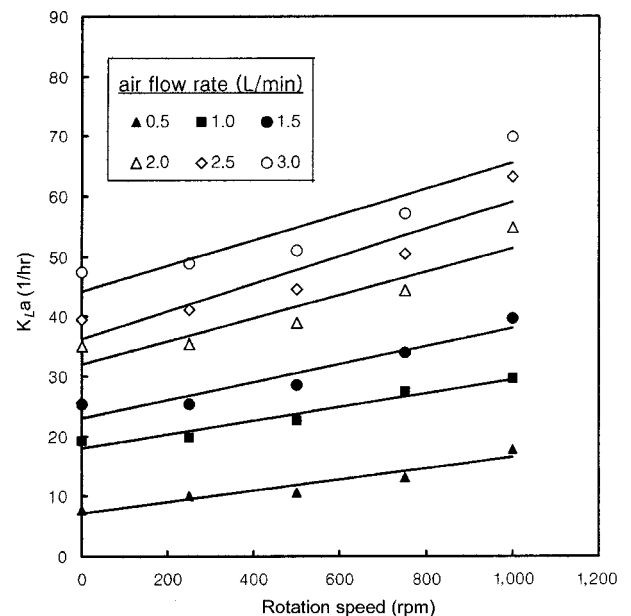
총괄물질전달 계수  $K_L a$ 는 일반적인 시험탱크 또는 실제 포기조내의 탈산소화된 물의 비정상상태 포기방법에 의해서 측정하였다[22]. 먼저 포기조내에 질소가스를 불어넣어 용존산소를 제거한 다음 용존산소의 초기농도( $C_o$ )를 측정 한 후, 다시 공기를 포기조내에 일정시간 불어넣어서 시간에 따른 용존산소농도( $C_t$ )를 측정 한 다음에 식 (2)와 같이 용존산소 농도와 시간과의 관계를 linear regression함으로써 얻을 수 있다.

## 3. 실험결과 및 고찰

### 3-1. 공기공급량, 교반속도 및 액상온도의 영향

Fig. 2는 교반속도와 공기공급량에 따른 총괄물질전달계수( $K_L a$ )의 변화를 나타낸 것이다. 액상온도는 20 °C였으며, 포기조의 밑바닥에서 위로 5 cm 지점에 임펠러 1개가 적용되었다. 그림에서 보듯이, 주어진 교반속도에 있어서 공기공급량이 증가할수록 산소의 물질전달계수는 증가하는 경향을 보이고 있는데, 공기공급량이 증가할수록 총괄물질전달 계수가 증가하는 것은 다른 연구자들에 의해서도 보고된 바 있으며 [1, 3, 11, 19], 공기공급량의 증가에 따른 기포생성량의 증가로 인하여 기체체류량과 기-액간의 접촉면적이 증가하고, 포기조내에서의 난류 증가로 인한 에너지 소멸속도의 증가를 가져와 작은 규모의 eddy들이 많이 형성되면서 기-액간의 접촉빈도와 효율이 향상되었기 때문에 볼 수 있다[19].

특히, 교반속도가 낮은 범위에서는 공기공급량에 따른 총괄물질전달

Fig. 2. Effect of air flow rate on  $K_L a$  in agitated aeration tank.Fig. 3. Effect of rotation speed on  $K_L a$  in agitated aeration tank.

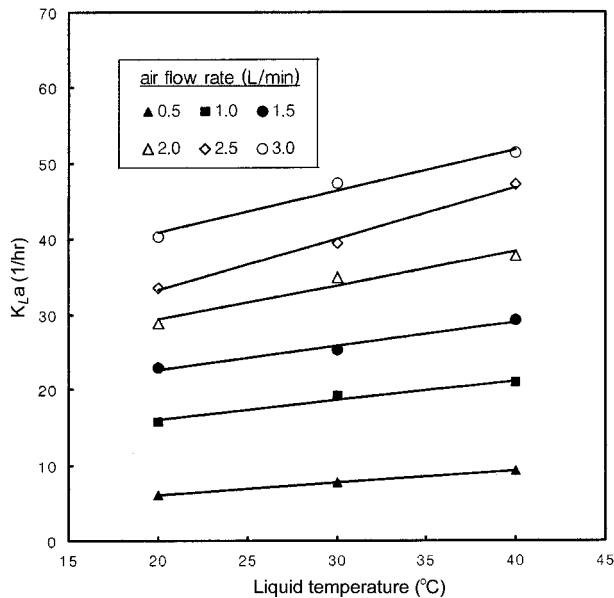


Fig. 4. Effect of liquid temperature on  $K_La$  in non-agitated aeration tank.

계수의 변화양상이 뚜렷한 차이를 보이지 않는 것으로 나타났는데 이러한 현상은 낮은 교반속도에서 기포생성이 활발히 이뤄지지 못하기 때문으로 판단된다.

Fig. 3은 일정한 공기공급량 조건하에서 포기조내의 액상의 교반속도가 총괄물질전달계수에 미치는 영향을 나타낸 것이며, 포기조내의 액상온도는 30 °C이고, 역시 포기조의 밑바닥에서 위로 5 cm지점에 임펠러 한 개가 적용되었다. 그림에서 보듯이 대체로 교반속도가 증가함에 따라 총괄물질전달계수는 증가하는 경향을 보이고 있고, 또한 각 교반속도에 있어서 공기공급량에 따른 총괄물질전달계수의 차이가 거의 일정하게 나타남으로써 공기공급량의 크기에 관계없이 교반에 의한 물질전달증진효과는 거의 동일한 수준으로 작용하는 것을 보여주고 있다. 포기조내의 액상교반에 따른 총괄물질전달계수의 증가효과는 이상이나 삼상포기조에서 유사한 조건을 적용하여 실험한 다른 연구자들에 의해 입증되었는데[15-18], 이러한 액상 교반효과는 액상의 유동화를 유발하여 기포의 분쇄를 촉진시켜 기-액 접촉면적과 접촉효율을 증가시키고, 기포가 dead space 없이 포기조내 전체로 분산되었기 때문에 총괄물질전달계수가 증가한 것으로 보인다.

Fig. 4는 액상교반이 없는 상태에서 포기조내의 액상온도가 총괄물질전달계수에 미치는 영향을 나타낸 것이다. 그림에서 보듯이, 모든 조건에서 액상온도가 증가함에 따라 총괄물질전달계수는 증가하고 있는데, 이는 액상온도가 높아질수록 액상내 용존산소의 확산속도가 증가되면서 총괄물질전달계수의 증가를 가져오는 것으로 볼 수 있다[23].

### 3.2. 임펠러수의 영향

Fig. 5는 교반속도가 250 rpm이고 액상온도가 20 °C인 조건에서 임펠러수를 달리할 때 공기공급량에 따른 총괄물질전달계수의 변화를 나타낸 것이다. 적용된 모든 조건에서 총괄물질전달계수가 증가하고 있으나 임펠러수에는 크게 영향을 받지 않았는데, 이러한 결과는 Fig. 2에서 언급했듯이, 250 rpm과 같은 낮은 교반속도에서는 임펠러에 의한 기포분쇄가 많이 일어나지 않으므로 임펠러수를 증가시켜도 물질전달상의 촉진효과는 매우 작기 때문으로 볼 수 있다.

Fig. 6은 교반속도가 750 rpm이고 액상온도가 20 °C인 조건에서 총괄물질전달계수의 변화를 나타낸 것이다. 그림에서 보듯이, 임펠러수가 한 개인 경우와 비교할 때 임펠러수가 세 개인 경우 물질전달계수의 뚜렷

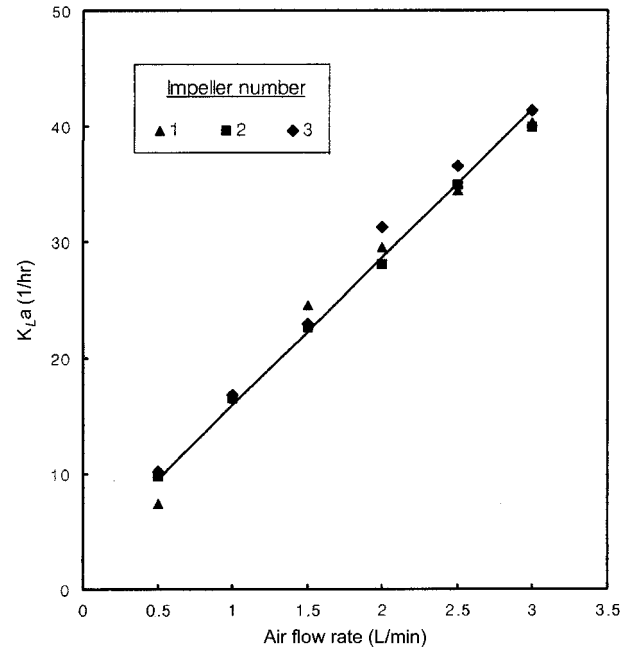


Fig. 5. Effect of impeller number on  $K_La$  in agitated aeration tank (rotation speed: 250 rpm, liquid temp.: 20 °C).

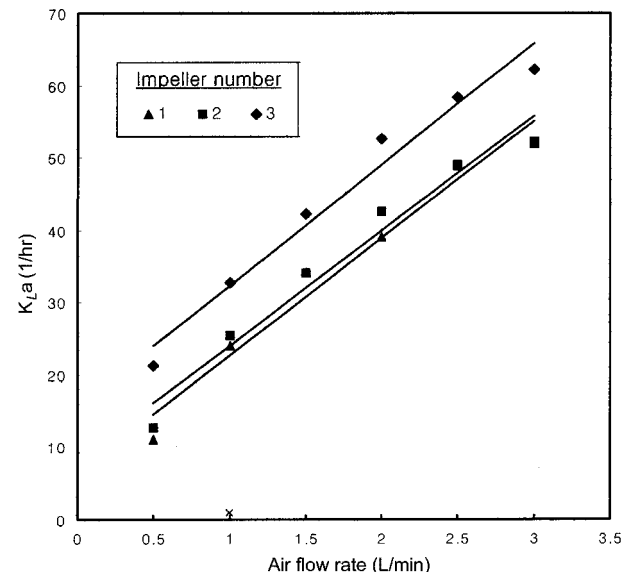


Fig. 6. Effect of impeller number on  $K_La$  in agitated aeration tank (rotation speed: 750 rpm, liquid temp.: 20 °C).

한 증가현상을 보이고 있다. 임펠러가 두 개인 경우, 임펠러수가 한 개인 경우와 비교해 물질전달계수가 조금 증가하는 것은 두 임펠러의 간격이 4 cm로 짧은 편이므로 추가된 임펠러에 의한 기포분쇄효과가 작기 때문으로 간주된다. 그러나 임펠러를 세 개 부착할 경우 전체적인 혼합강도가 늘어나고 상·하부 임펠러 사이의 간격이 8 cm나 떨어져 있어 상승하면서 합쳐진 기포의 분쇄효과가 훨씬 커질 수 있어 기-액 접촉면적의 증가와 더불어 물질전달이 크게 촉진된 것으로 사료된다. 이처럼 공기분산에 의해 생성된 기포의 분쇄작용을 통해 기체의 물질전달을 촉진시키려면 교반속도가 적어도 500 rpm 이상 유지되어야 하고 임펠러 간격이 기존의 4 cm보다는 넓게 적용되는 것이 필요함을 알 수 있다. 특히, 임펠러의 영향에 있어서는 임펠러수와 임펠러간격이 동시에 고려되어야 하며, 임펠러의 간격이 넓게 작용된 상태에서 임펠러수

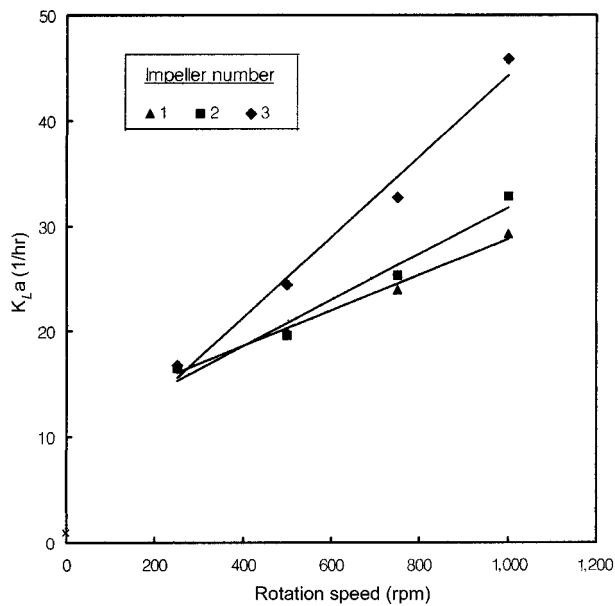


Fig. 7. Effect of rotation speed on  $K_La$  in agitated aeration tank as a function of impeller number.

가 증가될 경우 총괄물질전달계수의 극대화가 가능할 것으로 판단된다.

Fig. 7은 공기공급량이 1.0 L/min이고, 액상온도가 20 °C인 경우 임펠러수와 교반속도에 따른 총괄물질전달계수의 변화를 나타낸 것이다. 교반속도가 증가할수록 총괄물질전달계수가 증가하지만 임펠러수가 3개인 경우에 교반속도에 따른 총괄물질전달계수의 증가율은 훨씬 컸다. 임펠러수가 1개인 경우와 비교할 때 임펠러수가 3개인 경우 교반속도가 500 rpm이면 총괄물질전달계수는 20%정도 증가되나 교반속도가 1,000 rpm이면 총괄물질전달계수는 70%정도 증가되었다. 이러한 결과로부터 일정한 공기공급량 하에서도 교반속도와 임펠러수를 동시에 변화시키면 매우 커다란 물질전달 상승효과를 얻을 수 있음을 알 수 있다.

Fig. 8과 9는 일정한 공기공급량(1.0 L/min)의 조건하에서 액상온도에

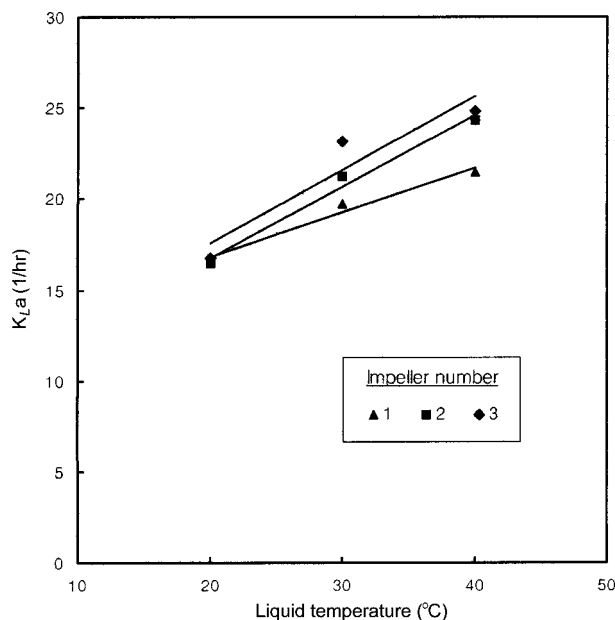


Fig. 8. Effect of liquid temperature on  $K_La$  in agitated aeration tank as a function of impeller number (rotation speed: 250 rpm).

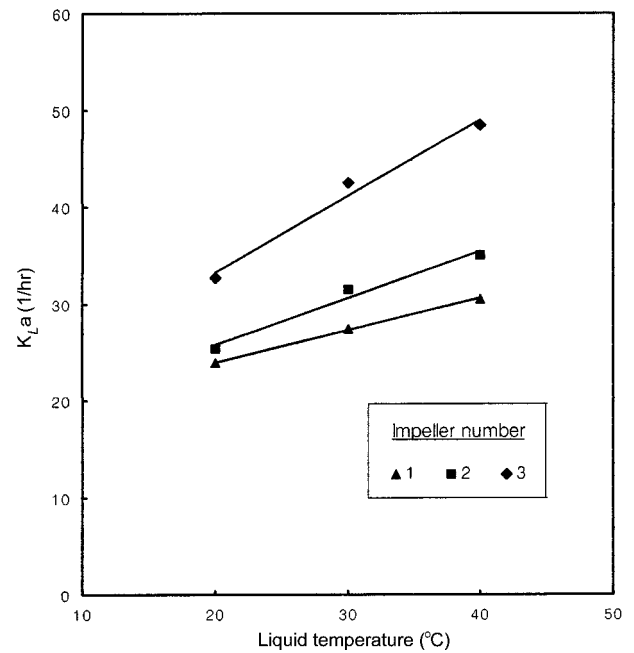


Fig. 9. Effect of liquid temperature on  $K_La$  in agitated aeration tank as a function of impeller number (rotation speed: 750 rpm).

따른 총괄물질전달계수의 변화를 임펠러수의 함수로 나타낸 것이다. 액상온도에 따른 총괄물질전달계수의 증가현상은 교반속도가 높고 임펠러수가 많을수록 좀더 뚜렷하였다. 즉, 교반속도가 750 rpm일 때에 액상온도를 20 °C에서 40 °C로 증가시키면 총괄물질전달계수는 임펠러가 1개인 경우 약 30% 증가하나 임펠러가 3개인 경우에는 약 50% 증가하였다.

### 3.3. 총괄물질전달계수에 대한 상관식

본 실험에서 얻은 총괄물질전달계수를 액상교반속도( $N$ : 250-1,000 rpm), 공기공급량( $Q_g$ : 0.5-3.0 l/min), 액상온도( $T$ : 20-40 °C) 및 임펠러수( $S$ : 1-3)

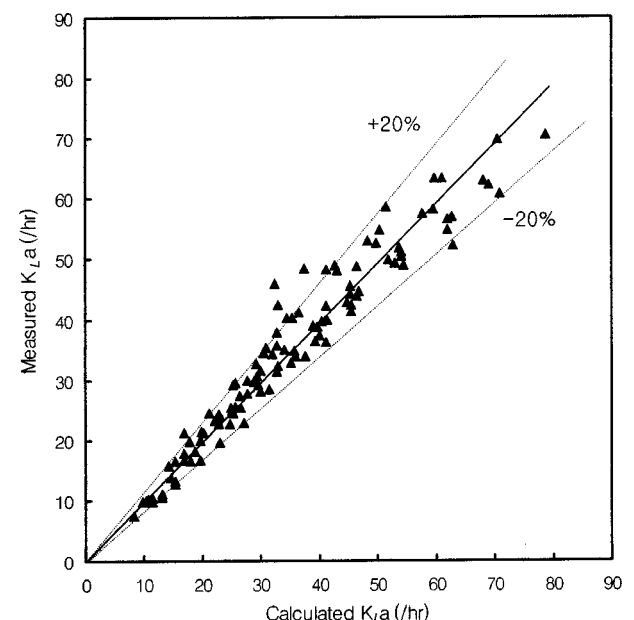


Fig. 10. Comparison of calculated overall mass transfer coefficient with measured one.

에 대한 상관식으로 표시할 경우에 식 (3)과 같이 나타낼 수 있었다.

$$K_L a = 0.5081 N^{0.364} Q_g^{0.800} T^{0.445} S^{0.229} \quad (3)$$

또한, 식 (3)으로부터 얻어진 계산치와 실험치를 비교한 결과는 Fig. 10과 같았는데, 계산치와 실험치간의 상관 계수는 0.937이었다. 따라서 이러한 상관식은 유사한 조건에서 적용되는 포기조의 설계 및 조업에 관련된 기초 자료를 얻는 데 유용하게 활용될 수 있을 것으로 판단된다.

#### 4. 결 론

수질오염물질의 산화처리용 포기조의 회분식 실험을 통해 얻어진 결론은 다음과 같다.

(1) 산화처리용 포기조에서 공기공급량, 교반속도, 액상온도가 증가할수록 산소의 총괄물질전달계수는 증가하였으며, 특히 공기공급량과 교반속도의 증가는 기체체류량 증가와 기포분쇄효과에 따른 기-액 접촉면적의 증가를 통해 총괄물질전달계수에 커다란 영향을 주는 것을 알 수 있었다.

(2) 포기조에서 교반기의 임펠러수가 증가할수록 총괄물질전달계수는 증가하지만 임펠러의 기능을 극대화하기 위해서는 교반속도가 500 rpm 이상으로 유지되고 임펠러 간격이 충분히 넓게 적용되는 것이 필요함을 알 수 있었다.

(3) 산화처리용 포기조에 있어서 공기공급량, 교반속도, 임펠러수, 액상온도와 같은 주요 실험변수에 대한 총괄물질전달계수는 다음과 같은 상관식으로 표시되었다.

$$K_L a = 0.5081 N^{0.364} Q_g^{0.800} T^{0.445} S^{0.229}$$

#### 참고문헌

1. Woo, K. J., Cho, Y. J., Kim, K. I., Kang, Y. and Kim, S. D.: *HWAHAK KONGHAK*, **36**, 937(1998).
2. Park, C. J.: *J. of KSEE*, **20**, 621(1998).
3. Kang, Y., Min, B. T., Nah, J. B. and Kim, S. D.: *HWAHAK KONGHAK*, **28**, 560(1990).
4. Han, S. W., Choi, I. G., Yun, Y. W. and Kim, S. Y.: *HWAHAK KONGHAK*, **31**, 521(1993).
5. Kang, Y. S., Kim, J. W. and Lee, W. K.: *HWAHAK KONGHAK*, **24**, 371(1986).
6. Park, Y. S., Lee, E. D., Kim, G. B. and Lee, H. K.: *Energy Engg. J.*, **9**, 123(2000).
7. Park, C. J.: *J. of KSEE*, **18**, 725(1996).
8. Kim, J. O. and Kim, S. D.: *Particulate Sci. and Technol.*, **5**, 309(1987).
9. Koh, J. C., Kim, B. S., Kim, C. L., Lee, J. M. and Lee, B. S.: *HWAHAK KONGHAK*, **30**, 106(1992).
10. Yun, Y. W., Kim, S. Y. and Kim, D. Y.: *J. of KSEE*, **16**, 365(1994).
11. Lee, K. H. and Doh, D. S.: *HWAHAK KONGHAK*, **31**, 395(1993).
12. Kwon, H. M. and Doh, D. S.: *HWAHAK KONGHAK*, **23**, 19(1985).
13. Lee, D. H., Kim, J. O., Han, J. H. and Kim, S. D.: *HWAHAK KONGHAK*, **31**, 118(1993).
14. Choi, I. G., Baek, J. H., Han, S. W. and Kim, S. Y.: *HWAHAK KONGHAK*, **35**, 225(1997).
15. Lu, W. M., Wu, H. Z. and Chou, C. Y.: "Effect of Impeller Blade Number on  $K_L a$  in the Mechanically Agitated Vessels," Proceedings of the 6th Asian Conference on Fluidized-Bed and Three-Phase Reactors, 167(1998).
16. Do, J. H., Thakur, N. N., Chang, H. N. and Lee, S. Y.: *Theories and Applications of Chemical Engineering*, **6**, 1265(2000).
17. Kang, J. H., Lee, C. H., Haam, S. J. and Moon, H. M.: *Theories and Applications of Chemical Engineering*, **6**, 1877(2000).
18. Lee, M. S., Kang, J. H. and Haam, S. J.: *Theories and Applications of Chemical Engineering*, **5**, 1701(1999).
19. Choi, K. H., Han, H. H. and Lee, W. K.: *HWAHAK KONGHAK*, **28**, 220(1990).
20. Joung, O. J., Han, S. W. and Kim, S. Y.: *Theories and Applications of Chemical Engineering*, **5**, 4169(1998).
21. Han, S. W., Choi, I. G. and Kim, S. Y.: *Theories and Applications of Chemical Engineering*, **5**, 2441(1996).
22. Kim, D. J.: "Measurement of  $K_L a$  in Bubble Column Fermentation with Oxygen Enriched Air," Korea Advanced Institute of Science and Technology, Master Thesis(1996).
23. Bird, R. B., Stewart, W. E. and Lighfood, E. N.: "Transport Phenomena," John Wiley & Son, Inc., New York, 503(1960).