

활성슬러지 하수처리장 포기조내 산소 전달특성(α , β 와 R)의 효율적 산정방안 개발

Determination of Oxygen Transfer Characteristics (α , β and R) in an Aeration Basin at a Conventional Activated Sludge Wastewater Treatment Plant

고광백* · 최미영**

Ko, Kwang Baik · Choi, Mee Young

Abstract

The major objective of this study is to develop an effective method to estimate α and β in an aeration basin at a conventional activated sludge wastewater treatment plant. A series of unsteady state batch tests were simultaneously performed with clean water and mixed liquor in two batch reactors under identical operational conditions. Oxygen uptake rates (OURs) of the mixed liquor were measured during the tests. The results show that the OURs due to synthesis respiration and endogenous respiration were averaged about 17.96 mg/(l·hr) and about 12.29 mg/(l·hr), respectively. The corresponding α and β were ranged between 0.65 to 0.95, and between 0.88 to 0.93, respectively. Based on the overall experimental results, the proposed experimental test method and the proposed method for determination of α and β are found to be relatively simple and easy to use in evaluating the characteristics of aeration systems.

요 지

본 연구에서는 활성슬러지 하수처리장 포기조내 산소전달 특성 즉, α 와 β 를 효율적으로 산정할 수 있는 측정 및 추정방법을 개발하였다. 동일한 운영조건하에서 원통형 회분식 포기조 2 대를 제작 운영하여 상수와 포기조에서 채취한 혼합용액을 대상으로 동시에 unsteady state batch test를 수행하였고, 이와 동시에 호기성 미생물의 호흡으로 인한 용존산소 소모율도 추정하여 궁극적으로 α 와 β 를 산정하였다. 연구대상 하수처리장의 경우에 합성호흡에 의한 용존산소 소모율은 평균 약 17.96 mg/(l·hr) 이었고, 내생호흡에 의한 용존산소 소모율은 평균 약 12.29 mg/(l·hr)이었다. 아울러 α 는 0.65~0.95의 범위이었고, β 는 0.88~0.93의 범위이었다. 이 값들은 통상적인 α 와 β 의 범위이었고, 본 연구에서 개발된 측정 및 추정방법 또한 비교적 단순하고 용이하여 현장에서 산소전달 특성을 규명하는데 활용할 수 있으리라고 판단된다.

* 정희원 · 충북대학교 공과대학 환경공학과 부교수

** 삼성전자 수원공장 가전연구소 연구원

1. 서 언

Ardern and Lockett에 의하여 1914년 개발된 활성슬러지 하수처리 공정에는 여러가지 변형이 있지만 도시하수의 효과적 처리를 위한 가장 대표적인 방법이다. 활성슬러지 공정을 이용하는 하수처리장의 처리과정을 조정하고자 할 경우에 반드시 고려하여야 할 대표적인 사항으로서는 포기량의 조절, 폐슬러지 배출량 및 반송슬러지 유량의 결정등 있다. 폐슬러지 배출량 및 반송슬러지 유량의 효과적 산정방안¹⁻³⁾은 이미 구체적으로 연구되어 있으나, 포기조내 포기율(aeration rates)의 측정방안은 아직도 많은 연구의 대상이 되어 다양한 연구가 수행 중에 있다.

본 연구에서는 활성슬러지 하수처리장의 포기조내에서 산소전달의 특성을 나타내는 $\alpha(=K_{Laf}/K_{La})$ 및 $\beta(=C^*/C^*)$ 를 효과적으로 산정하는 방안을 개발하였으며, 아울러 현장에서 실제로 널리 사용되고 있는 동일한 규격의 미세기포 산기기(fine bubble ceramic diffuser) 2대와 동일한 규격으로 제작된 원통형 회분식 포기조 2대에 상수(clean water or tap water)와 활성슬러지 포기조에서 채취한 혼합용액(mixed liquor or process water)을 각각 투입하여 성공적으로 unsteady state batch test를 수행함으로써 이들의 측정과정 및 산정과정을 구체적으로 규명하였다. 현재 국내외에 산재하여 있는 활성슬러지 하수처리장에서 포기조내의 용존산소를 적정선으로 유지하는데 많은 어려움이 있다는 사실을 고려하여 볼 때, 본 연구에서 개발한 용존산소 전달특성의 산정방안은 보다 효과적인 산소전달 시스템의 설계 및 운영을 위하여 상당한 기여가 되리라고 판단된다.

2. 산소전달 모형 및 기존 측정방법

산소전달 시스템은 크게 산기식 포기시스템(submerged or diffused aeration system)과 표면 포기 시스템(surface or mechanical aeration system)으로 구별할 수 있으며, 이 2가지의 경우에 모두 Lewis and Whitman의 Two-film Theory에 기초를 둔 수학적 모형을 사용하여 산소전달 시스템을 설계할 수 있다.⁴⁻⁶⁾ 이 이론을 기초로 포기시스템내 상수에

압축공기를 인위적으로 주입하여 그 상수의 용존산소를 증가시키는 경우에는 다음식을 적용할 수 있다.

$$V \frac{dC}{dt} = K_{La}(C^* - C)V \quad (1)$$

여기서 V = 포기조의 부피, L
 C^* = 실험결과로 추정된 평균 포화 용존산소의 농도, mg/l
 K_{La} = 산소전달계수, hr⁻¹
 C_0 = 시간 t=0일 경우에 상수내 용존산소의 농도, mg/l
 C = 용존산소의 농도, mg/l
 t = 시간, hr

초기조건 $C=C_0$ at $t=0$ 를 고려하여, 상기한 미분방정식의 해를 구하면 아래와 같다.

$$C = C^* - (C^* - C_0) \exp(-K_{La}t) \quad (2)$$

상기한 수학적 모형은 steady state hydraulic condition하에 운영되는 완전 혼합조 혹은 회분식 반응조에 적용할 수 있으며, C_0 , C^* 및 K_{La} 와 같은 계수들은 비선형회귀분석법을 이용하여 동시에 추정할 수 있다.⁶⁾

특히 본 연구대상인 포기조내 혼합용액에는 수많은 호기성 미생물들이 서식하고 있어 이들의 호흡으로 인한 용존산소의 소모를 아울러 고려한 수학적 모형은 다음과 같다.^{4,7-10)}

$$V \frac{dC}{dt} = K_{Laf}(C^*_f - C)V - RV \quad (3)$$

여기서 C^*_f = 실험결과로 추정된 평균 포화 용존산소의 농도, mg/l
 K_{Laf} = 산소전달계수, hr⁻¹
 R = 호기성 미생물의 호흡으로 인한 용존산소 소모율(Oxygen Uptake Rate), mg/(l·hr)

초기조건 $C=C_0$ at $t=0$ 를 고려하여 상기한 미분방정식 해를 구하면 아래와 같다.

$$C = C^*_f - \frac{R}{K_{Laf}} - (C^*_f - \frac{R}{K_{Laf}} - C_0) \exp(-K_{Laf}t) \quad (4)$$

활성슬러지 하수처리장의 포기조에는 처리를 요

구하는 하수가 유입될 뿐만아니라 유기물을 분해시키는데 미생물과 부유고형물이 있기 때문에 상수를 이용하여 얻은 C_o , C^* 및 K_{La} 를 가지고는 포기조내 혼합용액에서의 C_o , C^*_f 및 K_{Laf} 를 추정할 수 없다. 따라서 상수를 대상으로 C^* 와 K_{La} 를 추정하여 혼합용액의 C^*_f 및 K_{Laf} 를 산정하기 위하여서는 유입하수의 특성과 온도에 대한 보정이 필요하다. 이를 위하여 α , β , θ 및 τ 와 같은 보정계수(correction factor)를 고려할 수 있다. 이들은 아래와 같이 정의되어 사용되고 있다.^(4,5)

$$\alpha = \frac{K_{La} \text{ in process water}}{K_{La} \text{ in clean water}} = \frac{K_{Laf}}{K_{La}} \quad (5)$$

여기서 첨자 f 는 포기조내 혼합용액을 의미한다.

$$\beta = \frac{C^* \text{ in process water}}{C^* \text{ in clean water}} = \frac{C^*_f}{C^*} \quad (6)$$

$$\theta^{(T-20)} = \frac{K_{Laf}}{K_{La20}} \quad (7)$$

여기서 $\theta = K_{La}$ 에 대한 온도 보정계수이며, T 와 20 은 온도 $T^\circ\text{C}$ 와 20°C 의 수온을 나타낸다.

$$\tau = \frac{C^*_T}{C^*_{20}} \quad (8)$$

여기서 $\tau = C^*$ 에 대한 온도 보정계수

활성슬러지 하수처리장의 경우에는 유입하수의 특성 및 미생물에 의한 용존산소 소모율의 잦은 변화로 인하여 이러한 보정계수의 측정은 지극히 어려우며, 통상 소규모 산소전달 실험을 같은 조건하에 상수와 혼합용액 대상으로 동시에 실시하여 추정하고 있는 실정이다.⁽¹¹⁻¹⁵⁾ 활성슬러지 하수처리장 포기조내의 경우에 α 는 약 0.4~1.2 정도이고, β 는 약 0.8~1.0의 범위이며, θ 는 1.024 정도이다.⁽⁴⁾

하수처리장의 포기조내 산소전달 현상을 규명하기 위하여 흔히 사용되는 방법으로는 크게 물질수지법, Off-Gas Method 및 Dual Nonsteady State Test Method 등이 있다. 이들 중 일부는 α 만을 추정하기 위하여 개발된 방법으로서 β 는 통상 R 을 별도의 실험결과에서 도출한 후 이와 K_{Laf} 를 이용하여 간접적으로 산정하고 있다. 특히 Off-Gas Method는 포기조내 용존산소의 농도변화를 측정하지 않고도

산소전달률을 산정할 수 있는 방법이다.^(16,17)

물질수지법은 정상상태하에 운영되고 있는 포기조를 대상으로 용존산소에 대한 물질수지를 고려하여 K_{Laf} 를 추정하는 방법이다. 따라서 하수처리의 제반 운영조건이 정상상태에 도달하였다고 판단되었을 때 포기조를 대상으로 유입수와 유출수의 용존산소 농도를 측정하여야 하며, 바로 용존산소 측정 지점에서 R 도 반복하여 측정하여야 한다. 이와 동시에 동일한 규격의 포기조내에서 동일한 혼합강도, 공기유입량 및 온도하에 상수를 대상으로 추정한 K_{La} 를 구하면 α 를 산정할 수 있다.^(8,9)

물질수지법에서는 포기조를 경계로 포기조내 혼합용액의 용존산소의 농도변화를 고려하였으나, Off-Gas Method에서는 포기조로 공급되거나 유출되는 공기(공급된 공기중에 포함된 산소의 일부는 이미 혼합용액으로 전달되었으며)를 대상으로 산소에 대한 물질수지를 고려하는 방법이다.^(18,19) 이 방법의 특징으로는 α 의 추정이 비교적 용이하고, 공기유입량이나 유기물의 부하량 및 용존산소의 농도가 자주 변화하는 포기조에서도 이용할 수 있으며, 기존 하수처리장의 운영조건을 변화시킬 필요없이 어느 포기조에서도 실시할 수 있다는 점이다. 단점으로는 표면 포기시스템의 포기조나 포기조 표면에 거품이 많이 생성되는 경우에는 사용할 수 없으며, 특히 유출되는 공기의 습도와 CO_2 의 농도를 매우 정확히 측정하여야 한다는 점이다.

상기한 2가지 방법들이 K_{Laf} 를 추정하여 궁극적으로 α 를 산정하기 위한 방안이었으나, Dual Nonsteady State Test Method에서는 포기조를 대상으로 공기 주입량을 증가시켜 비정상 상태에서 용존산소의 농도변화를 측정 후 용존산소의 농도가 정상상태에 도달하였을 때 공기 주입량을 감소시켜 비정상 상태에서 다시 용존산소의 농도변화를 측정하여 K_{Laf} 와 R 을 동시에 추정하는 방법이다.⁽²⁰⁻²²⁾ 이 방법으로 추정된 용존산소 소모율은 합성호흡에 의한 용존산소 소모율(R_s , oxygen uptake rate due to synthesis respiration)이 일부 포함된 내생호흡에 의한 용존산소 소모율(R_e , oxygen uptake rate due to endogenous respiration)이기 때문에 포기조내의 R 이 실제의 값보다 상당히 과소 평가될 수 있다. 따라서 이를 기초로 산정한 C^* 는 부정확할 수 있어 β 의 산정에는 적합하지 않은 방법이라고 판단된

다.

3. 연구방법

3.1 α 와 β 의 추정을 위한 실험방법의 제안

위에서 기술된 방법을 운영중인 하수처리장의 포기조를 대상으로 실시하는 일은 유입하수 특성의 잦은 변화등과 같은 여러가지 운영상황을 고려할 때 용이하지 않다. 아울러 3식을 이용하여 α 와 β 를 추정하기 위해서는 실험중 R을 일정하게 유지하여야 하지만 이미 여러 조사연구^(8,9,16)에서 지적된 바와 같이 R의 값을 비교적 일정하게 유지하는데도 많은 어려움이 있다.

본 연구에서는 이러한 문제점을 보완하기 위하여 그림 1에서와 같은 동일한 규격의 원통형 회분식 포기조 2대(A 포기조와 B 포기조)를 연구대상 하수처리장 포기조 인근에 제작 설치하여 동시에 동일한 조건하에 운영하였다. A 포기조에는 상수를 투입하였다. 투입된 상수내 용존산소의 농도를 약 1.0 mg/l 이하로 낮추기 위하여 약 수분 동안 이 포기조에 질소 가스를 공급하였다. B 포기조에는 운영중인 활성슬러지 하수처리장 포기조에서 혼합용액을 채취한 후 즉시 채취한 혼합용액을 투입하여 이 혼합용액이 완전한 내생호흡 단계에 도달한 약 1시간 후에 산소전달계수를 추정하기 위한 실험을 실시하였다. 이 시간 동안 혼합용액내 부유고형물의 침전을 방지하기 위하여 인위적인 수직 완속혼합을 수행하였다. 이와 동시에 즉, A 포기조와 B 포기조를 운영하면서 동일한 혼합용액의 R을 측정하기 위한 BOD병 실험을 수행하였다.

본 연구에서 이용한 회분식 포기기는 높이가 약 2.4 m이고, 직경이 약 40 cm 정도의 원통형이다. 각 원통형 포기기의 저변부에 직경이 약 17.8 cm(7 inches) 정도의 미세기포 산기(Sanitaire, disc type) 한개를 설치하여 이를 통해 압축공기를 주입하였다. 이와 아울러 주입된 공기의 상대습도를 100%로 유지하기 위하여 원통형 가습기를 설치하였다. 공기 주입량을 조절하기 위한 rotameter와 주입되는 압축공기의 압력을 측정하기 위한 mercury manometer도 설치하였다. 시간의 변화에 따른 용존산소의 농도를 주기적으로 측정하기 위하여 각 포기조 수면에서 약 40 cm 깊이에 용존산소 측정기를 설치

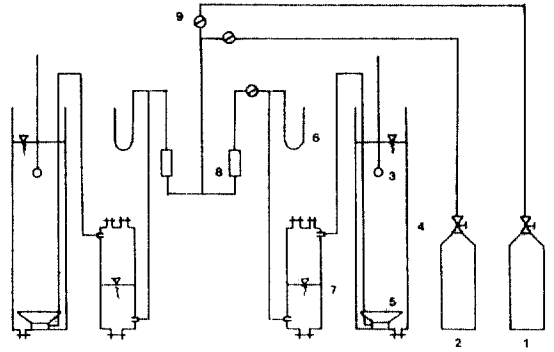


그림 1. 산소전달 실험설비의 구조(A 포기조와 B 포기조)

- 1: 압축공기 실린더
- 2: 질소가스 실린더
- 3: 용존산소 측정기
- 4: 원통형 포기조
- 5: 미세기포 산기
- 6: Mercury Manometer
- 7: 압축공기 가습기
- 8: Rotameter
- 9: Shut-Off Valve

하였다.

3.2 용존산소 소모율(R_s 및 R_e)의 측정

본 연구에는 기존 측정방법^(4,16)을 현장조건에 적합하도록 보완하여 합성호흡과 내생호흡에 의한 용존산소 소모율을 분리하여 측정하였다. BOD병 실험과정의 순서는 다음과 같다.

1. 포기조에서 약 500 ml의 혼합용액을 채취한다. 채취시간을 기준으로 시간의 변화에 따른 용존산소 소모율의 변화를 측정할 예정이므로 이때를 $t=0$ min으로 한다.

2. 채취한 혼합용액을 1 l graduated cylinder에 투입한 후 흔들어 혼합용액의 용존산소의 농도가 적어도 4~6 mg/l 이상이 되도록 한다.

3. 위의 재포기된 혼합용액을 300 ml BOD병에 투입한 후 시간의 변화에 따른 용존산소의 감소를 용존산소 측정기로 측정한다.

4. 용존산소의 농도가 약 1 mg/l 이하에 이르면 3항의 과정을 중지한 후, BOD병 내의 혼합용액을 graduated cylinder에 재투입하여 흔들어 준다. 2항과 3항의 과정을 용존산소의 농도가 약 1 mg/l 이

하로 감소하는데 소요된 시간이 거의 일정할 때까지 수차례 반복하여 실시한다.

5. 실험결과와 신뢰도를 높이기 위하여 1항에서 4항까지의 전과정을 수차례 반복한다.

6. 3항에서 얻은 자료를 기초로 시간의 변화에 따른 소모율을 추정하여 semi-logarithmic graph paper에 그린다. 곡선이 $t=0$ 축과 교차되는 지점은 $R(=R_s+R_e)$ 값으로 추정되며, 수평한 직선이 $t=0$ 축과 교차되는 지점은 내생호흡에 의한 R_e 값으로 추정된다(그림 4 참조).

3.3 α 와 β 추정방법의 제안

3.1절에서 기술한 바와 같은 A 포기조를 대상으로 용존산소에 대한 물질수지를 고려하면 (1)식 혹은 (2)식과 같다. 본 연구에서는 (2)식에 산소전달 실험결과로 얻은 시간(t)의 변화에 따른 용존산소의 농도(C) 측정자료를 대입하여 비선형회귀분석법으로 C^* , C_t 및 K_{Laf} 를 추정할 수 있다.⁽²³⁻²⁶⁾

위의 같은 추정방법을 다시 사용하기 위하여 B 포기조를 대상으로 용존산소에 대한 물질수지를 고려하면 (3)식 혹은 (4)식과 같다. 만일 (4)식의 일부를 아래와 같이 C_R 로 정의하면 (9)식과 같고, (9)의 C^*_t 는 (10)식과 같다.

$$C_R = C^*_t - \frac{R}{K_{Laf}} \quad (9)$$

$$C^*_t = C_R + \frac{R}{K_{Laf}} \quad (10)$$

B 포기조를 대상으로 A 포기조와 동일한 운영조건하에 산소전달 실험을 실시하여 (4)식에 시간(t)의 변화에 따른 용존산소의 농도(C) 측정자료를 대입한다면 비선형회귀법을 이용하여 (4)식과 (9)식의 C_R , C_t 및 K_{Laf} 를 동시에 추정할 수 있다. 포기조내 혼합용액을 대상으로 측정한 R 값과 추정된 C_R 을 (10)식에 대입한다면 C^*_t 를 산정할 수 있다. 이러한 방법은 하수처리장의 운영조건을 잠시 변화시키거나 중단하지 않고 실시할 수 있다. 이 경우에 측정한 R 값 보다도 R_e 값이 시간의 변화에 관계없이 비교적 일정하기 때문에 (4)식과 (9)식 및 (10)식의 R 값으로서 내생호흡에 기인한 용존산소 소모율인 R_e 값을 사용하였다. 따라서 이와같이 C^* , K_{Laf} , C^*_t 및 K_{Laf} 를 추정한 후 (5)식과 (6)식의 정의에 따라 α 와 β 를

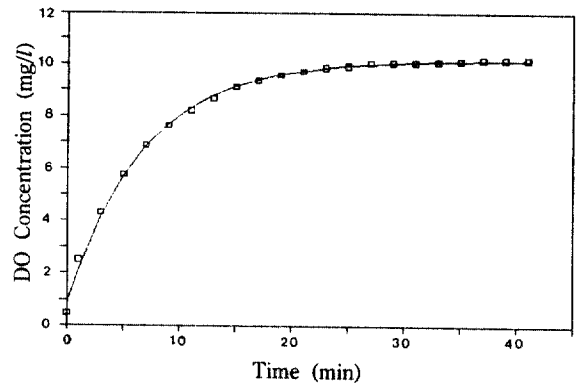


그림 2. A 포기조내 용존산소의 농도변화

산정할 수 있으리라고 판단된다.

4. 실험결과 및 비교분석

3.1절에서 제안한 실험방법 및 3.3절에서 제안한 추정방법을 이용하여, A 포기조와 B 포기조를 대상으로 동시에 산소전달 실험을 수행하였다. 이 와 동시에 3.2절의 방법으로 혼합용액의 R 도 측정하였다. 이 결과를 기초로 C^* , K_{Laf} , C^*_t 및 K_{Laf} 를 추정하여 궁극적으로 α 와 β 를 산정하였다.

실험중 A 포기조내 상수와 B 포기조내 혼합용액 및 BOD병(R 측정용)내 혼합용액의 수온은 각각 21.5°C와 27.0°C 및 20.1°C이었다. 대기의 온도는 22.0°C이었고, 대기중 상대습도는 68%이었으며, 대기압(local barometric pressure)은 995.5 mBar(=746.9 mmHg)이었다. 실험중 각 포기조에는 원형 미세기포 산기기를 이용하여 10 l/min의 깨끗한 압축공기를 지속적으로 공급하였으며, 포기조내 상수 혹은 혼합용액의 높이와 부피는 각각 약 186 cm와 약 234 l 정도이었다. 실험중 A 포기조와 B 포기조내 산기기로 압축공기를 공급하는 공기 공급관내 압력은 각각 14.8 cmHg와 14.0 cmHg이었다.

상기한 현장조건하에 상수를 대상으로한 산소전달 실험결과는 그림 2와 같고, 인근 황성슬러지 하수처리장 포기조에서 채취한 혼합용액을 대상으로한 산소전달 실험결과는 그림 3과 같았다. 그림 2에서와 같이 상수를 대상으로한 경우에는 초기 DO 농도가 약 0.5 mg/l에서 약 30분 경과 후 10.2 mg/l에 도달한 후 더 이상 변화하지 않았다. 그림 3은 혼합용액을

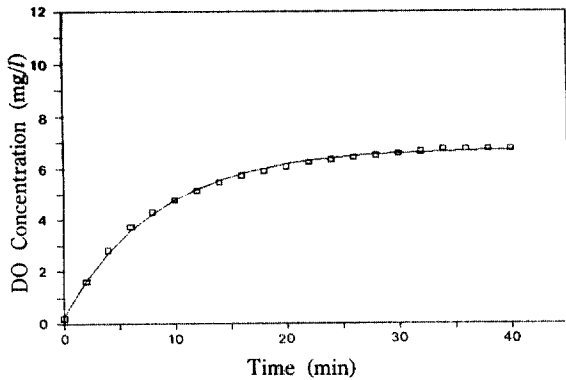


그림 3. B 포기조내 용존산소의 농도변화

표 1. 산소전달 모형의 각종 계수 추정결과

상수의 경우	C_0	C^*	K_{La}	관련식
추정 계수	mg/l	mg/l	min^{-1}	관련식
가정한 초기값	0.50	10.00	0.10	
추정 계수값	0.87	10.18	0.1475	2식
표준편차	0.10	0.05	0.0036	
혼합용액의 경우	C_0	C^*	K_{Laf}	관련식
추정 계수	mg/l	mg/l	min^{-1}	관련식
가정한 초기값	0.20	10.00	0.10	
추정 계수값	0.29	6.77	0.1177	(4)식과
표준편차	0.06	0.03	0.0027	(9)식

대상으로 상수의 경우와 동일한 조건(대기압, 산기, 압축공기 공급량, 혼합형태, 포기조의 규격등)하에서 운영한 결과로서 초기 DO농도가 약 0.2 mg/l에서 약 35분 경과 후 6.7 mg/l에 도달한 후 더 이상 변화하지 않았다.

이상과 같은 2개의 포기조를 대상으로 수행한 실험결과를 비선형회귀분석법을 이용하여 (2)식 및 (4)식과 (9)식에 대입하면 이 식들의 각종 계수들을 추정할 수 있으며, 추정결과는 표 1과 같다.

상기한 표 1의 결과를 기초로 α 및 β 를 산정하기 위하여서는 R값이 필수적이다. 본 연구에서는 R값을 측정하기 위하여 이미 3.2절에서 언급한 방법을 이용하였다. R을 측정하기 위하여 3회 수행하였던 용존산소 소모율 측정결과를 측정시간 별로 구분하면 표 2와 같다.

표 2의 소모율과 측정시간과의 관계를 Two cycle

표 2. 측정시간별 용존산소 소모율(20.1°C)

Test A		Test B		Test C	
time min	소모율 mg/(l·hr)	time min	소모율 mg/(l·hr)	time min	소모율 mg/(l·hr)
5	19.8	6	26.8	3	25.3
15	15.7	25	15.9	17	18.5
44	11.9	111	12.8	45	15.8
343	11.5	155	12.7	78	13.3

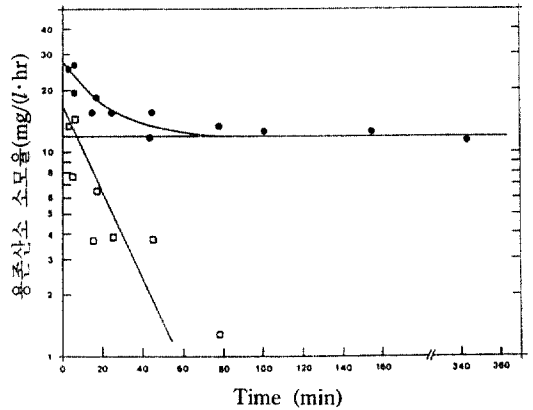


그림 4. 측정시간별 용존산소 소모율의 변화(Circles: 용존산소 소모율, Squares: 혼합용액에 의한 용존산소 소모율의 변화)

semi-logarithmic graph paper에 도식화하면 그림 4의 곡선으로 나타난다. 위에서 언급한 방법대로 R_0 값의 변화는 그림 4의 직선으로 나타낼 수 있다. 그림 4의 결과를 토대로 본 연구 대상 혼합용액의 R_0 값은 시료채취 시점($t=0$)을 기준으로 약 17.0 mg/(l·hr)이었으며, R_0 값은 약 12.0 mg/(l·hr)이었고, 이들의 합인 R 값은 약 29.0 mg/(l·hr)이었다. 본 연구에서는 이미 기술한 바와 같이 내생호흡만을 유발시켜 산소 전달실험을 수행하였으므로, 본 연구에서 필요로 하는 R 값은 바로 내생호흡에 의한 R_0 값인 12.0 mg/(l·hr)이다.

상기한 실험결과를 종합적으로 비교해 볼 경우에 상수와 혼합용액을 대상으로 산소 전달실험뿐만 아니라 R의 측정을 위한 BOD병 실험의 경우에도 온도만을 제외한 동일한 조건하에서 수행되었다. 따라서 최종적으로 α 와 β 를 산정하기 위하여서는 서로

표 3. α , β 와 R의 산정결과

추정계수	실험시 온도 (°C)	추정결과	20°C로 보정한 추정결과	관련식
K_{La} (min^{-1})	21.5	0.1475	0.1423	(2), (7)식
K_{Laf} (min^{-1})	27.0	0.1177	0.0997	(4), (7)식
α	-	-	0.70	(5)식
C^* (mg/l)	21.5	10.18	10.48	(2), (8)식
C_R (mg/l)	27.0	6.77	7.72	(4), (8)식
$R(=R_e, \text{mg}/(\text{l}\cdot\text{hr}))$	20.1	12.00	11.92	-
C^*_f (mg/l)	-	-	9.71	(11)식
β	-	-	0.93	(6)식

표 4. 추가로 실시한 용존산소 소모율($\text{mg}/(\text{l}\cdot\text{hr})$)

계수	Test 1		Test 2	
	실험시 추정값 (17.9°C)	보정한 추정값 (20.0°C)	실험시 추정값 (20.9°C)	보정한 추정값 (20.0°C)
R_e	20.2	23.38	14.5	13.62
R_e	9.8	11.34	14.5	13.62
R	30.0	34.72	29.0	27.24

상이한 온도를 온도 보정계수 θ 및 온도와 포화 용존산소의 관계를 이용하여 보정하여야 한다. 실제 온도하에서 추정된 각종 계수와 온도 보정계수를 이용하여 20°C로 보정한 각종 계수 및 이를 기초로 산정한 α 와 β 값은 표 3과 같다. R을 위한 온도 보정계수로서 1.072를 사용하였다.^(4,16)

표 3에서와 같이 인근 하수처리장 포기조내 혼합용액의 경우에 20°C로 보정된 산소전달계수 K_{Laf} 는 0.0997/min이었으며, 포화 용존산소의 농도 C^* 는 9.71 mg/l이었고, 내생호흡에 의한 용존산소 소모율 R_e 는 11.92 mg/(l·hr)이었다. 또한 α 값은 0.70이었고, β 값은 0.93이었다. 통상 α 의 범위가 0.4~1.2 정도이고, β 의 범위가, 0.8~1.0 정도임을 고려할 때 본 실험결과 추정된 α 와 β 값은 이 범위내이었다.

3.2절에 기술한 R의 추정을 위한 BOD병 실험을 추가로 2회 실시한 결과를 요약하면 표 4와 같다.

연구에서 제안한 실험방법과 추정방법의 활용 가능성을 재차 규명하기 위하여, 앞에서 기술한 산소

표 5. 추가로 실시한 산소전달 실험결과

실험조건	Case 1	Case 2
수온(°C)		
상수	22.3	22.0
혼합용액	26.0	27.0
BOD병(R 측정용)	20.9	20.1
기온(°C)	23.0	22.0
대기압(mBar)	1000.5	987.0
대기중 상대습도(%)	58	64
공기 공급량(l/min)	10	15
포기조내 수체깊이(cm)	186	186
포기조의 부피(l)	234	234
공기공급관내 압력(cmHg)		
상수	17.0	16.0
혼합용액	14.0	15.3
실험실시 수온에서		
$K_{La}(\text{min}^{-1})$	0.0950	0.2155
$K_{Laf}(\text{min}^{-1})$	0.0985	0.1587
$C^*(\text{mg}/\text{l})$	8.46	10.20
$C_R(\text{mg}/\text{l})$	4.59	7.16
$R(=R_e, \text{mg}/(\text{l}\cdot\text{hr}))$	14.5	12.0
20°C 수온에서		
$K_{La}(\text{min}^{-1})$	0.0900	0.2055
$K_{Laf}(\text{min}^{-1})$	0.0854	0.1344
α	0.95	0.65
$C^*(\text{mg}/\text{l})$	8.85	10.61
$C_R(\text{mg}/\text{l})$	5.14	8.17
$R(=R_e, \text{mg}/(\text{l}\cdot\text{hr}))$	13.62	11.92
$C^*_f(\text{mg}/\text{l})$	7.80	9.65
β	0.88	0.91

전달실험을 실시한 후 24시간 및 48시간 경과 후에 상수와 포기조에서 채취한 혼합용액을 대상으로 산소 전달실험을 수행하였다. 이와같이 추가로 실시한 실험결과를 요약하면 표 5와 같다. 압축공기 공급량을 Case 1의 경우는 10 l/min으로, Case 2의 경우는 15 l/min으로 조정하였기 때문에 각종 추정값들의 직접적인 비교는 어렵지만 Case 2의 산소전달계수인 K_{La} 와 K_{Laf} 가 Case 1의 값들 보다 큰 값으로 추정되었다.

5. 결 론

3절에서 제안한 연구방법을 사용하여 인근 활성 슬러지 하수처리장 포기조에서 채취한 혼합용액의 산소 전달특성 및 용존산소 소모율을 측정된 결과로 다음과 같은 결론을 도출하였다.

1. 본 연구대상 하수처리장 포기조내 혼합용액의 경우에 합성호흡에 의한 용존산소 소모율은 20°C 하에서 $13.62\sim 23.36\text{ mg}/(\text{l}\cdot\text{hr})$ 이었고 평균 약 $17.96\text{ mg}/(\text{l}\cdot\text{hr})$ 이었다. 내생호흡에 의한 용존산소 소모율은 $11.34\sim 13.62\text{ mg}/(\text{l}\cdot\text{hr})$ 의 범위로서 평균 약 $12.29\text{ mg}/(\text{l}\cdot\text{hr})$ 이었다. 따라서 이들의 합인 총 용존산소 소모율은 $27.24\sim 34.72\text{ mg}/(\text{l}\cdot\text{hr})$ 의 범위로서 평균 약 $30.25\text{ mg}/(\text{l}\cdot\text{hr})$ 이었다.

2. 산소전달 실험(20°C , 압축공기 공급량은 $10/\text{min}$)을 수행한 결과로 상수의 경우에 산소전달계수 K_L 는 $0.0900\sim 0.1423/\text{min}$ 의 범위로서 평균 약 $0.1162/\text{min}$ 이었다. 혼합용액의 경우에 K_{La} 는 $0.0854\sim 0.0997/\text{min}$ 의 범위로서 평균 약 $0.0962/\text{min}$ 이었다.

3. 비선형회귀분석법으로 추정된 산소전달계수와 포화 용존산소의 농도 뿐만 아니라 BOD병 실험의 결과로 측정된 내생호흡에 의한 용존산소 소모율을 기초로 산정된 α 는 $0.65\sim 0.95$ 의 범위이었고, β 는 $0.88\sim 0.93$ 의 범위이었다. 통상 α 의 범위가 $0.4\sim 1.2$ 정도이고, β 의 범위는 $0.8\sim 1.0$ 의 범위임을 고려할 때, 본 실험결과 산정된 α 와 β 는 모두 이 범위 이내이므로 본 연구에서 개발된 측정 및 추정방법의 타당성 및 이의 활용 가능성이 규명되었다. 특히 본 연구에서 제안한 측정 및 추정방법은 비교적 단순하고 용이하여 현장에서 산소 전달특성을 규명하는데 이용할 수 있으리라고 판단된다.

감사의 글

본 연구(과제번호: 891-1304-023-1)를 수행할 수 있도록 재정적인 지원을 한 한국과학재단 관계자 여러분께 감사드립니다. 아울러 Sanitaire fine bubble ceramic diffusers를 무상으로 제공한 Mr. J.D. Wren, Vice President, Water Pollution Control Corp., Milwaukee, WI U.S.A.과 각종 실험장치를 폐수처리장내 설치할 수 있도록 특별히 배려하고

포기조내 혼합용액을 제공한 환경관리공단 청주사업소 강찬영 소장 및 관계직원 여러분께 심심한 감사를 표합니다..

참고문헌

1. Montgomery, J.M., Aerobic Biological Wastewater Treatment Facilities: Process Control Manual, EPA 430/9-77-006, Office of Water Program Operations, U.S. EPA, Washington, DC, 1977.
2. Hartly, K.J., Operating the Activated Sludge Processes, Gutteridge Haskins and Davey, Pty, Ltd., Brisbane, Australia, 1985.
3. WPCF, Operation of Municipal Wastewater Treatment Plants, MOP-11, Vol. II & III, 2nd Eds., Alexandria, VA, 1991.
4. Boyle, W.C., Everything You Needed to Know about Oxygen Transfer but Were Afraid to Ask, Department of Civil Environmental Engineering, University of Wisconsin-Madison, Madison, Wisconsin, 1983.
5. Baillod, C.R., "Review of Oxygen Transfer Model Refinements and Data Interpretation", *Proceedings, Workshop Toward Oxygen an Transfer Standard*, EPA 600/9-78-021, 1979, pp. 17-26.
6. Brown, L.C., "Oxygen Transfer Parameter Estimation", *Proceedings, Workshop Toward an Oxygen Transfer Standard*, EPA 600/9-78-021, 1979, pp. 27-41.
7. Mueller, J.A. et al., "Oxygen Transfer in Closed System", *Proceedings, Workshop Toward an Oxygen Transfer Standard*, EPA 600/9-78-021, 1979, pp. 180-194.
8. McKinney, R.E., and Stukenberg, J.R., "On-Site Evaluation: Steady vs Nonsteady State Testing", *Proceedings, Workshop Toward an Oxygen Transfer Standard*, EPA 600/9-78-021, 1979, pp. 195-204.
9. Kalinske, A.A., "Problem Encountered in Steady State Field Testing of aerators and Aeration Systems", *Proceedings, Workshop Toward an Oxygen Transfer Standard*, EPA 600/9-78-021, 1979, pp. 205-209.
10. Ewing, L. et al., "Testing and Data Analysis of Diffused Aeration Equipment", *J. Water Pollu. Control Fed.*, Vol. 51, 1979, pp. 2384.
11. Bass, S.J., and Shell, G., "Evaluation of Oxygen Transfer Coefficients of Complex Wastewaters", *Proc. 32nd Ind. Waste Conf.*, Purdue University (1977) pp. 953-967.

12. Stenstrom, M.K., and Gilbert, R.G., "Effects of Alpha, Beta and Theta Factor upon the Design, Specification and Operation of Aeration Systems, *Water Research*, Vol. 15, 1981, pp. 643.
13. Otoski, R.M. et al., Bench scale and Full Scale Studies for Alpha, Beta Coefficient Variability Determination", *Proc. 33rd Ind. Waste Conf.*, Purdue University, 1978, pp. 835-852.
14. Schmit, F.L. et al., "The Effect of Tank Dimension and Diffuser Placement on Oxygen Transfer", *J. Water Pollu. Control Fed.*, Vol. 50, 1978, pp. 1750.
15. Barnhart, E.L., "Transfer of Oxygen in Aquous Solution", *J. San. Eng. Div., Proc. ASCE*, Vol. 95, No. SA3, 1969, pp. 645.
16. Campbell, H.J., "Oxygen Transfer Testing under Process Condition", *Proceedings: Seminar Workshop on Aeration System Design, Testing, Operation and Control*, EPA-600/9-85-005, U.S. EPA, Cincinnati, Ohio, 1985, pp. 345-363.
17. WPCF and ASCE, Aeration: A Wastewater Treatment Process, WPCF MOP FD-13, 1988.
18. Ewing, L., "New Directions-Off Gas Method", *Proceedings: Seminar Workshop on Aeration system Design, Testing, Operation and Control*, EPA-600/9-85-005, U.S. EPA, Cincinnati, Ohio, 1985, pp. 205-209.
19. Redmon, D. et al., "Oxygen Transfer Efficiency Measurements in Mixed Liquor Using Off-Gas Techniques", *J. Water Pollu. Control Fed.*, Vol. 55, No. 11, 1983, pp. 1338-1347.
20. Mueller, J.A. and Rysinger, J.J., "Diffused Aerator Testing Under Process Conditions", *Proc. of the 36th Annual Industrial Waste Conference*, Purdue University, Lafayette, Indiana, 1981, pp. 747-754.
21. Mueller, J.A. et al., "Dual Nonsteady State Evaluation of Static Aerators Treating Pharmaceutical Waste", *Proc. of the 37th Annual Industrial Waste Conference*, Purdue University, Lafayette, Indiana, 1982, pp. 271-283.
22. Mueller, J.A., "Comparison of Dual Nonsteady State and Steady State Testing of Fine Bubble Aerators at Whittier Narrows Plant, Los Angeles", *Proceedings: Seminar Workshop on Aeration System Design, Testing, Operation and Control*, EPA-600/9-85-005, U.S. EPA, Cincinnati, Ohio, 1985, pp. 375-399.
23. Brown, L.C., "Oxygen Transfer Parameter Estimation", *Proceedings: Workshop Toward an Oxygen Transfer Standard*, EPA-600/9-78-021, 1979, pp. 27-41.
24. Boyle, W.C. et al., "Pitfalls in Parameter Estimation for Oxygen Transfer Data", *J. Environ. Engr. Div., Proc. ASCE*, Vol. 100, No. EE2, 1974, pp. 391-408 .
25. Strenstrom, M.K. et al., "Oxygen Transfer Parameter Estimation", *J. Environ. Engr. Div., Proc. ASCE*, Vol. 107, No. EE2, 1981, pp. 379-397.
26. Brown, L.C. and Baillod, C.R., "Modeling and Interpreting Oxygen Transfer Data", *J. Environ. Engr. Div., Proc. ASCE*, Vol. 108, No. EE4, 1982, pp. 607-628.
27. APHA, AWWA and WPCF, Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater, 17th Edition, 1989, pp. 4-154~4-156.

(接受：1994. 4. 11)