

하수고도처리 공정내 호기성, 무산소성 및 혐기성 반응조에서 종속영양 미생물 생산계수, Y_H 의 비교분석

신정섭[†] · 고광백 · 이지영 · 임세호 · 강승현 · 박재한

연세대학교 공과대학 토목환경공학과 환경공학연구소

Comparative Analysis of Biomass Yield Coefficient (Y_H) in Different Metabolic Regimes of Aerobic, Anoxic and Anaerobic Conditions

Jung Sub Shin[†] · Kwang Baik Ko · Ji Young Lee · Se Ho Lim · Seung Hyun Kang · Jae Han Park

School of Civil and Environmental Engineering, Yonsei University

(Received 1 September 2005, Accepted 9 January 2006)

Abstract

Heterotrophic biomass yield coefficients, Y_H , for aerobic, anoxic and anaerobic reactors were successfully estimated for the two wastewater treatment plants, where one plant was operating in the A^2/O process and the other was operating in the 4-stage BNR process. The estimation of Y_H was undertaken by plotting the biomass COD concentrations versus the soluble COD concentrations in order to calculate the Δ biomass COD/ Δ soluble COD in each batch reactor. The batch reactors employed in this study were fed by filtered influent and mixed liquors in the ratio of 10:1, and operated in the aerobic, anoxic and anaerobic conditions, which represented the actual operating conditions for the A^2/O and 4-stage BNR process. The average Y_H values of the aerobic, anoxic and anaerobic reactor for the A^2/O process were 0.52, 0.41 and 0.18 mg COD/mg COD, respectively, and those for the 4-stage BNR process were 0.58, 0.40 and 0.20 mg COD/mg COD, respectively. The average ratio of the Y_H for aerobic reactors to those for the anoxic reactors were about 1:0.79 for the A^2/O process, and about 1:0.69 for the 4-stage BNR process. The experimental method for anoxic and anaerobic Y_H estimation shown in this study has turned out to be simple and efficient in its practical application.

keywords : A^2/O process, Heterotrophic biomass yield coefficients, 4-stage BNR process

1. 서론

활성슬러지 공정의 개선을 위한 수질예측 모델들이 끊임 없이 개발되어왔다. 다양한 모델들이 미생물의 성장과 기질 이용에 대한 동역학적 연구를 통해 도출되었고, 이 모델들은 활성슬러지 공정 설계뿐만 아니라 공정운영에 대한 예측의 척도로 이용되어 왔다(Vanrolleghem et al., 1999; Weijers et al., 1997). 본 연구에서는 고도처리 공정인 A^2/O 공정과 4-stage BNR 공정을 대상으로 운영중인 하수처리장의 동역학 계수를 추정하고, 유입수 및 혐기성조, 무산소조와 호기성조의 수질 성상을 분석하였다.

여러 동역학 계수 중에서 종속영양 미생물 생산계수(Y_H : yield for heterotrophic biomass)는 시스템의 특성을 규정짓는 중요한 인자이며, 생물학적 폐수처리를 위한 모델링에 있어서 가장 기본적인 인자로서 잘 알려져 있다. 따라서 호기성, 무산소성 및 혐기성 조건에서의 종속영양 미생물 생산계수를 정확히 추정하면 활성슬러지 수질예측 모델에

적용되어 온 default값 대신에 실험을 통하여 추정 한 값을 모델에 적용할 수 있다.

2. 재료 및 방법

2.1. 실험방법

본 연구는 국내 하수처리장에서 고도처리를 위해 A^2/O 공정과 4-stage BNR공정을 채택한 하수처리장을 대상으로 하여 채취한 혼합액을 실험실에 설치한 회분식 반응조에 넣고, 처리장과 동일한 조건으로 실험을 진행하였다. 시료는 하수처리장이 안정화 상태로 운영되고 있을 때 채취하였다.

종속영양미생물의 호기성, 무산소성 및 혐기성 반응조의 생산계수를 측정하기 위해 2 L 용량의 회분식 반응조를 3 개 준비하였다. 0.45 μ m 여과지를 통해 유입하수를 여과시킨 후 이 여과한 유입하수와 호기성, 무산소성 및 혐기성 반응조에서 채취한 혼합액을 각각 10:1의 비율로 맞추어 2 L의 반응조에 주입하였다. 온도는 $20 \pm 1^\circ C$ 로 유지하였다. 혐기조는 질소가스를 사용하여 DO를 완전히 배제하였으며 NO_3^- 을 가능한 없도록 유지하였다. 무산소조 역시 같은 방법으로 DO를 배제하였다. 호기조는 실험시 질산화가 되는

[†] To whom correspondence should be addressed.
ilponte@hanmail.net

것을 억제하기 위하여 Thiourea 20 mg/L를 넣어주고 DO를 2~3 mg/L로 유지하였다. 각 반응조를 대상으로 3시간 동안 20분 간격으로 시료를 채취하여 TCOD와 SCOD를 측정하였다(Ekama et al., 1986).

2.2. 추정방법

종속영양미생물 생산계수는 용존 기질의 제거가 일어나는 동안 형성된 세포의 양을 측정함으로써 추정할 수 있다. 즉, 용존 물질로만 구성된 폐수에서 성장하는 미생물의 생산계수를 직접적으로 구하는 방법을 이용해야 한다(Henze et al., 1987a, 1987b).

입자상 COD를 제거시키기 위해 폐수의 일부를 여과한 후 회분식 반응조에 주입하고, 정상상태의 반응조에서 적은 양의 미생물을 식종하였다. 비교적 높은 용존 COD 농도의 시료를 사용하고, 초기 COD 농도에 비해 상대적으로 1% 이하의 미생물 농도로 식종하였다. 이것은 종속영양 미생물 생산계수가 사멸되어서 제거되는 미생물이 없을 때 성장한 미생물의 양을 추정하기 위함이며, 이를 직접적으로 측정할 수 있는 유일한 방법은 기질에 대해 상대적으로 작은 양의 미생물을 식종하는 것이다.

Biomass COD는 TCOD와 SCOD의 차이로 계산될 수 있으며 이를 표현한 것은 식 (1)과 같다.

$$\begin{aligned} \text{Biomass COD} &= \text{Total COD} - \text{Soluble COD} \\ &= \text{TCOD} - \text{SCOD} \end{aligned} \quad (1)$$

따라서 종속영양 미생물의 생산계수는 Soluble COD 차이에 대한 Biomass COD의 차이에 대한 비로 정의될 수 있다.

종속영양미생물 생산계수는 다음과 같은 식 (2)를 이용하여 산출하였다.

$$Y_H = \frac{\Delta \text{Biomass COD}}{\Delta \text{Soluble COD}} \quad (2)$$

여기서, Y_H = 종속영양미생물 생산계수, mg Biomass COD/mg Soluble COD이다. 따라서 시간의 변화에 따라서 측정된 SCOD와 TCOD의 선형관계를 이용하여 Y_H 를 기울기로 추정할 수 있다(Fig. 1-3 참조).

3. 결과 및 고찰

Fig. 1~3은 각각 A²/O 공정으로 운영된 하수처리장의 호기성, 무산소성 및 혐기성 반응조 내 종속영양미생물의 생산계수를 추정하기 위하여 시간의 변화에 따라 각 반응조에서 Soluble COD와 이 때 Biomass COD와의 관계를 도시한 그림들이다. 이 그림에서 모두 반응조 내 시간의 변화에 따라서 soluble COD가 감소함에 따라 Biomass COD는 증가하는 경향을 보였다.

이 그림에서 x축으로 나타낼 수 있는 Soluble COD의 차이(Δ Soluble COD)에 대하여 y축으로 나타낼 수 있는 Biomass COD의 차이(Δ Biomass COD)의 비가 추정하고자 하는 종속영양미생물의 생산계수이다.

1차 실험결과로 Fig. 1~3에서 각각 볼 수 있는 바와 같이 호기성, 무산소성 및 혐기성 반응조에서의 미생물 생산계수는 각각 0.517 mg COD/mg COD, 0.427 mg COD/mg COD 및 0.168 mg COD/mg COD이었다.

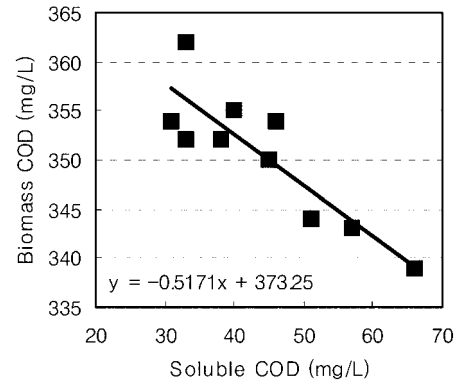


Fig. 1. Estimation of Y_H for the aerobic reactor operating in the A²/O process (1st experiment).

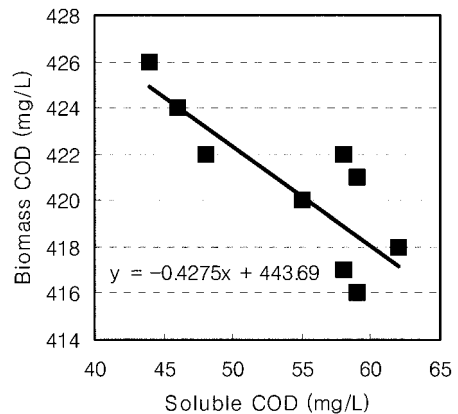


Fig. 2. Estimation of Y_H for the anoxic reactor operating in the A²/O process (1st experiment).

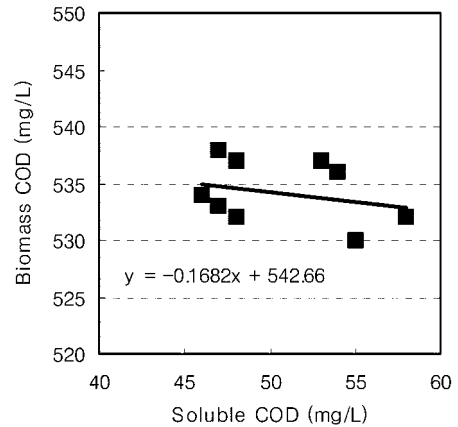


Fig. 3. Estimation of Y_H for the anaerobic reactor operating in the A²/O process (1st experiment).

특히 혐기성 반응조에서의 생산계수가 가장 낮았으며, 이는 혐기성 조건에서 성장하는 각종 미생물들은 호기성 혹은 무산소성 조건에서 용존 유기물을 섭취하여 성장하는 각종 미생물 보다 섭취한 용존 유기물을 에너지원으로 더 이용하는 반응 동력학적 에너지 이용 효율이 낮기 때문인 것으로 판단된다. 참고로 1차 실험결과를 도출하였을 때 혼합액을 채취한 A^2/O 공정의 유입하수, 유출수 및 호기성, 무산소성과 혐기성 반응조의 특징은 Table 1과 같았다. 4-stage BNR 공정으로 운영되었던 하수처리장에서 채취한 혼합액을 이용하여 추정된 1차 실험결과와 추가로 실시하였던 2차 및 3차 실험결과를 종합하면 Table 2와 같다.

A^2/O 공정의 호기조, 무산소조 및 혐기조에서의 평균 종속영양미생물 생산계수는 각각 0.52, 0.41, 0.18 mg COD/mg COD 의 값을 나타냈고, 4-stage BNR공정의 호기조, 무산소조 및 혐기조에서의 평균 종속영양미생물 생산계수는 각각 0.58, 0.40, 0.20 mg COD/mg COD이었다. ASM과 같은 수질예측 모형에서의 호기성조 생산계수의 default 값은 약 0.67 mg COD/mg COD이었으며 무산소조의 경우는 약 0.53 mg COD/mg COD 정도이었다. 이 때 호기조:무산

소조 생산계수의 비가 1:0.79 정도이었다(Muller et al., 2003). 본 연구에서는 A^2/O 및 4-stage BNR 공정에서 각각 1:0.79와 1:0.69를 나타내었다.

본 연구에서는 호기조와 무산소조에서 측정된 미생물 생산계수가 default 값 보다 작았으나, 혐기조에서 측정된 생산계수는 default 값보다 크게 측정되었다. 주요 이유로서는 각 공정의 운전조건과 유입하수의 특징에 기인할 수 있다고 판단된다. A^2/O 공정의 경우에 미생물 생산계수를 측정하기 위하여 혼합액을 채취할 때에 미생물의 평균 체류시간은 15 days이었으며 수리학적 체류시간은 7.4 hr이었다(혐기조: 0.5 hr, 무산소조: 1.4 hr, 호기조: 5.4 hr). 4-Stage BNR 공정은 미생물의 평균 체류시간을 17.25 days로 운전중이었으며, 수리학적 체류시간은 11.4 hr이었다(슬러지 탈질조: 0.4 hr, 혐기조: 1.1 hr, 무산소조: 2.9 hr, 호기조: 7.0 hr). 이와 같이 비교적 긴 수리학적 체류시간과 긴 미생물의 평균 체류시간 하에서는 상대적으로 큰 내생호흡으로 인하여 호기성조와 무산소조의 미생물 생산계수가 낮았을 수 있다고 판단된다.

Table 1에서는 A^2/O 공정을 대상으로 1차 실험을 수행하

Table 1. General characteristic of the influent, effluents from anaerobic, anoxic and aerobic reactors, and final clarifier effluent for the A^2/O process (1st experiment)

| Reactors Components | Units | Influent | Anaerobic | Anoxic | Aerobic | Effluent |
|----------------------------------|---------------------------|----------|-----------|--------|---------|----------|
| COD _{cr} | mg/L | 156.6 | 36.0 | 60.0 | 58.0 | 28.0 |
| BOD ₅ | mg/L | 61.6 | - | - | - | 2.2 |
| T-N | mg/L | 30.0 | - | - | - | 13.0 |
| NH ₄ ⁺ -N | mg/L | 21.4 | 4.0 | 6.3 | 2.2 | 0.1 |
| NO ₃ ⁻ -N | mg/L | 1.0 | 1.6 | 1.2 | 2.4 | 3.2 |
| T-P | mg/L | 2.66 | - | - | - | 0.3 |
| PO ₄ ³⁻ -P | mg/L | 2.5 | 4.6 | 6.3 | 2.2 | 0.1 |
| Alkalinity | mg/L as CaCO ₃ | 97.8 | 54.3 | 54.3 | 43.5 | 43.5 |
| SS | mg/L | 152 | 1,250 | 1,550 | 1,570 | 5.0 |
| VSS | mg/L | 128 | 730 | 1,100 | 900 | 2.0 |
| SVI | - | - | - | - | 89 | - |

Table 2. Estimated Y_H for aerobic, anoxic and anaerobic reactor operating in the A^2/O and the 4-stage BNR process (1st, 2nd and 3rd experiment)

| Heterotrophic Biomass Yield Coefficient | Number of experiments | Y_H | | Default values |
|--|--------------------------|-----------------|------------------------|-------------------|
| | | A^2/O process | 4-Stage BNR process | |
| Aerobic reactor | 1st | 0.52 | 0.61 | 0.67 |
| | 2nd | 0.51 | 0.59 | |
| | 3rd | 0.54 | 0.55 | |
| | Average | 0.52 | 0.58 | |
| Anoxic reactor | 1st | 0.43 | 0.48 | 0.53 |
| | 2nd | 0.40 | 0.36 | |
| | 3rd | 0.41 | 0.36 | |
| | Average | 0.41 | 0.40 | |
| Anaerobic reactor | 1st | 0.17 | 0.18 | 0.10 |
| | 2nd | 0.20 | 0.26 | |
| | 3rd | 0.18 | 0.15 | |
| | Average | 0.18 | 0.20 | |

였을 때의 유입수의 특징을 보여주고 있으며, 추가로 실시 하였던 2차 실험과 4-Stage BNR 공정을 대상으로 한 유입 수의 성상을 종합하면 Table 3과 같다. A²/O 공정에서는 유입수의 COD는 156.6~244.4 mg COD/L의 범위이었으며, 4-Stage BNR 공정의 유입수의 COD는 222.8~245.5 mg COD/L의 범위로서 정상적인 분류식 하수관거에서 하수처리장으로 유입되는 유입하수 내 평균 COD 약 430 mg COD/L와 비교할 때에 본 연구 대상 하수처리장 유입수의 COD는 정상적인 유입수의 COD 값의 약 1/2 정도로 매우 낮았다. 따라서 긴 미생물의 평균 체류시간 뿐만 아니라 낮은 유입수 내 유기물의 농도로 인하여 호기조와 무산소조의 미생물 생산계수가 상대적으로 낮게 측정되었다고 판단된다.

이 연구에서 혐기조에서 측정된 미생물 생산계수가 default 값보다 상대적으로 크게 측정된 이유는 명확하지 않았다. 외국의 경우뿐만 아니라 이 연구에서 측정된 유입수내 COD의 상대적 분포를 Table 4에 수록하였다. 앞에서 언급한 바와 같이 유입수 내 COD 값은 상대적으로 낮았고, 이와 아울러 이 표에서 보여 주는 바와 같이 연구 대상 공정이었던 A²/O 공정과 4-Stage BNR 공정으로 유입되는 유입하수의 퍼센트 COD 분포 중에서 X_s의 비중이 외국의 경우보다 매우 낮았다. 이는 공정의 선단에 설치된 혐기조 내 미생물들이 유입수내 X_s 보다는 상대적으로 많았던 S_s을 충분히 이용하여 그 성장이 활발하였기 때문으로 판단된다.

각종 미생물 성장 동역학 계수에 영향을 미치는 인자는 매우 다양하다. 하수처리장의 운전조건뿐만 아니라 하수관거 시스템, 계절적 요인과 지역적인 특징 및 실험 당일 유입하수의 성상 등이다. 특히 종속 미생물 생산계수는 유기물을 산화시키는 미생물군의 특성뿐만 아니라 유입하수 내 성장제한 기질의 특성에 따라 결정된다. 효과적인 수질예측

모델링을 위하여 이 계수는 유입하수 내 용존 유기물의 농도를 파악한 후에 가장 먼저 추정하여야 할 동역학 계수라고 알려져 있다(Henze et al., 1987b). 이 계수는 생물반응조 유출수 내 용존 기질의 농도와 미생물의 농도를 결정하는 가장 중요한 계수이다. 따라서 이 계수를 시험을 통하여 정확히 추정하지 않고서는 수질예측뿐만 아니라 공정 내 반응조의 용량을 선정하는 등 모든 후속 공정설계에 어려움이 따르게 된다.

4. 결론

A²/O공정과 4-stage BNR공정으로 운영되는 하수처리장을 대상으로 한 회분식 실험을 통한 종속영양 미생물의 생산계수와 유입하수 성상분석을 통하여 얻은 결론은 다음과 같다.

- 1) 호기조에서의 종속영양 미생물의 생산계수는 흔히 사용하는 default 값인 0.67 mg COD/mg COD 보다는 다소 낮은 값인 0.52와 0.58 mg COD/mg COD이었다. 지금까지 일반적으로 알려진 활성슬러지 공정 호기성조의 종속영양미생물 생산계수는 0.42~0.72 mg COD/mg COD 값의 범위이었다.
- 2) 일반적으로 무산소조의 생산계수 값은 호기성조의 종속영양 미생물의 생산계수 값과 같다고 가정하여 사용해 왔으나, 본 연구에서 얻은 무산소조의 생산계수 값은 A²/O공정을 이용한 하수처리장이 0.41 mg COD/mg COD, 4-stage BNR 공정을 이용한 하수처리장이 0.40 mg COD/mg COD이었고, 이 값들은 호기조의 종속영양 미생물의 생산계수 값에 비해 각각 0.79과 0.69배의 값을 나타냈다.
- 3) 혐기조의 생산계수 값은 흔히 사용하는 default 값인 0.10 mg COD/mg COD보다 다소 큰 0.18과 0.20 mg

Table 3. Characteristics in the influents for the A²/O process and the 4-stage BNR process

| Parameters | Unit | A ² /O process | | 4-stage BNR process | |
|--|----------|---------------------------|------|---------------------|------|
| | | 1st | 2nd | 1st | 2nd |
| Readily biodegradable substrate, S _s | mg COD/L | 80.3 | 86.2 | 93.2 | 66.5 |
| Soluble inert organic matter, S _i | mg COD/L | 18.0 | 32.0 | 16.0 | 30.0 |
| Slowly biodegradable particulate substrate, X _s | mg COD/L | 25.0 | 62.8 | 76.6 | 33.4 |
| Particulate inert organic matter, X _i | mg COD/L | 33.3 | 63.4 | 59.7 | 98.9 |
| Readily biodegradable organic nitrogen, S _{ND} | mg N/L | 2.0 | 7.2 | 6.6 | 3.7 |
| Slowly biodegradable organic nitrogen, X _{ND} | mg N/L | 10.2 | 30.0 | 38.9 | 11.3 |
| Soluble ammonia nitrogen, S _{NH} | mg N/L | 7.4 | 15.6 | 9.8 | 12.5 |
| Soluble inert organic nitrogen, S _{NI} | mg N/L | 8.2 | 3.9 | 6.6 | 1.7 |

Table 4. Typical COD percentages in the Influent wastewater (Henze et al., 1987b; Bidstrup et al., 1988)

| COD Components | IAWQ | Denmark | Switzerland | Hungary | U.S. | (Unit : %) | |
|----------------|------|---------|-------------|---------|------|---------------------------|---------------------|
| | | | | | | A ² /O process | 4-stage BNR process |
| S _s | 25.0 | 24.3 | 31.8 | 28.6 | 35.4 | 36.5 | 33.7 |
| S _i | 10.0 | 7.8 | 11.4 | 8.6 | 7.7 | 12.5 | 9.7 |
| X _s | 45.0 | 48.5 | 45.5 | 42.9 | 46.2 | 26.9 | 23.2 |
| X _i | 15.0 | 19.4 | 11.4 | 20.0 | 10.8 | 24.1 | 33.4 |

COD/mg COD으로 측정되었다. 이를 통해 본 연구 대상이었던 A^2/O 와 4-stage BNR 공정에서는 혐기성조에서 default로 사용되는 값보다 높게 나타났다.

- 4) 기존에 사용된 default 값들보다 호기조와 무산소조에서 미생물 생산계수가 약간 낮은 값을 나타낸 이유는 유입수 내 비교적 낮은 유기물의 농도와 긴 미생물 체류시간에 기인하였다고 판단된다. 혐기조에서 미생물 생산계수가 비교적 높게 측정된 이유는 선단에 설치된 혐기조 내 미생물들이 유입수 내 X_S 보다는 상대적으로 많았던 S_S 를 충분히 이용하여 성장이 활발하였기 때문으로 판단된다.

참고문헌

- 정수영, 이창주, 임도영, 유영수, 서준석, 조영일, 박병관, 울진읍 하수종말처리시설 최적공정선정 및 설계를 위한 하수성상 분석연구, 연세대학교 산업기술 연구소, 서울, pp. 72-76 (1999).
- Bidstrup, S. M. and Grady, C. P. L. Jr., SSS-Simulation of Single Sludge Processes, *J. WPCF*, **60**(3), pp. 351-361 (1988).
- Dold, P. L. and Marais, G. V. R., Evaluation of General the Activated Sludge Model Proposed by IAWPRC Task, **18**(6), pp. 63-89 (1986).
- Ekama, G. A., Dold, P. L. and Marais, G. V. R., Procedures for Determining Influent COD Fraction and Maximum Specific Growth Rate of Heterotrophs in Activated Sludge System, *Water Science and Technology*, **18**(6), pp. 91-114 (1986).
- Henze, M., Grady, C. P. L. Jr., Gujer, W., Marais, G. V. R. and Matsuo, T., A General Model for Single-sludge Wastewater Treatment System, *Water Research*, **21**, pp. 505-515 (1987a).
- Henze, M., Gujer, W., Mino, T. and Loosdrecht, M. V., *Activated sludge model No.1*, IWAPRC Scientific and Technical Reports (1987b).
- Henze, M., Gujer, W., Mino, T. and Loosdrecht, M. V., *Activated sludge models ASM1, ASM2, ASM2d and ASM3*, IWA Publishing, London, England, pp. 23-25 (2000).
- Metcalf and Eddy, Inc. *Wastewater Engineering* 4th Ed., McGraw-Hill, International Ed., pp. 579-580 (2003).
- Muller, A., Wentzel, M. C., Loewenthal, R. E. and Ekama, G. A., Heterotroph Anoxic Yield in Anoxic Aerobic Activated Sludge Systems Treating Municipal Wastewater, *Water Research*, **37**(10), pp. 2435-2441 (2003).
- Vanrolleghem, P. A., Spanjers, H., Petersen, B., Ginesteff, P. and Takacs, I., Estimating (combinations of) Activated Sludge Model No. 1 Parameters and Components by Respirometry, *Water Science and Technology*, **39**(1), pp. 195-214 (1999).
- Weijers, S. R. and Vanrolleghem, P. A., A Procedure for Selecting Best Identifiable Parameters in Calibrating Activated Sludge Model no.1 to Full-scale Plant Data, *Water Science and Technology*, **36**(5), pp. 69-79 (1997).