

의사독성농도(C_{PT}) 개념을 도입한 활성슬러지 공정 pH 저해 모델 개발

고주형 · 장원호 · 임정훈 · 우혜진* · 김창원

부산대학교 환경공학과
*부산대학교 환경기술 · 산업개발연구소

(2000년 6월 1일 접수, 2000년 9월 29일 채택)

Development of the pH Inhibition Model Adapting Pseudo Toxic Concentration (C_{PT}) Concept for Activated Sludge Process

Joo-Hyung Ko · Won-Ho Jang · Jeong-Hoon Im · Hae-Jin Woo* · Chang-Won Kim

Department of Environmental Engineering, Pusan National University
**Institute of Environmental Technology and Industry, Pusan National University*

ABSTRACT

It has been reported that the inhibition effect of pH on activated sludge follows noncompetitive inhibition kinetics. However, the noncompetitive inhibition kinetic equation can not be directly applied to pH inhibition because of the difficulty in quantification of pH in terms of inhibitor concentration. So, many empirical equations have been developed to describe the pH inhibition effect especially for acidic condition. In this research, the pseudo toxic concentration (C_{PT}) concept model to quantify pH inhibition effect on activated sludge was proposed and compared to other existing models. The C_{PT} concept model can explain the reduction of the maximum specific growth rate (μ_{max}) caused by the pH inhibition more accurately than any other models, at a wide range of pH. The only model parameter, K_I can be easily estimated by Lineweaver-Burk linearization method.

Key Words : pH Inhibition, Pseudo Toxic Concentration, Activated Sludge,
Respiration Rate

요 약 문

산성 혹은 염기성 pH가 활성슬러지 공정에 미치는 저해 작용은 비경쟁적 저해 동력학(noncompetitive inhibition kinetics)을 따르는 것으로 알려져 있으나, pH를 저해 물질의 농도항으로 정량화하기 어렵기 때문에 실질적으로 비경쟁적 저해 동력학식(noncompetitive inhibition kinetic equation)으로 해석하기 어렵다. 따라서 pH에 의한 저해 작용을 기술하는 경험식들이 여러 연구자들에 의해 개발되어 왔는데, 이들은 주로 산성 조건에 대해서만 적용 가능한 것들이다. 본 연구에서는 의사독성농도(pseudo toxic concentration, C_{PT}) 개념을 이용하여 pH가 활성슬러지 공정에 미치는 저해 영향을 정량화하는 기법을 개발하였고, 기존에 알려진 모델들과 비교하였다. 그 결과 C_{PT} 개념을 이용한 모델은 넓은 범위의 pH에 대해 최대비성장속도(μ_{max})의 감소를 비교적 정확하게 예측할 수 있었고, 같은 동력학식을 이용하여 산성 조건뿐만 아니라 염기성 조건에 대해서도 적용 가능한 것으로 나타났다. 또한 저해계수(inhibition coefficient, K_I)의 추정이 간단하다는 장점이 있다.

주제어 : pH 저해작용, 의사독성농도, 활성슬러지, 호흡율

1. 서 론

산업폐수처리장 또는 산업폐수를 병합 처리하는 국내 대부분의 하수처리장에 유입되는 폐수에는 중금속이나 유기화합물, 산, 알칼리성 폐수 등 다양한 형태의 독성물질이 존재할 가능성이 상존한다. 일반적으로 독성물질은 미생물의 성장율, 기질 제거율, 호흡율 등에 영향을 주며, 그것의 메카니즘은 각각의 물질에 따라서 다양한 식으로 표현되어져 왔다.¹⁻³⁾ pH가 활성슬러지 공정에 미치는 저해 작용은 noncompetitive inhibition kinetics, 즉 미생물의 최대비성장속도(μ_{max})를 감소시키는 방향으로 작용한다고 알려져 왔다. 그러나 pH에 의한 미생물 성장의 저해는 noncompetitive inhibition kinetic equation만으로는 표현하기 어려운데, 그것은 pH를 저해 물질의 농도로 정량화하기 힘들기 때문이다. 따라서 pH가 최대비성장속도에 미치는 영향을 기술하기 위한 여러 가지 경험식들이 제안되어 왔다.

Sreekrishman 등⁴⁾은 less acidophilic bacteria의 성장속도가 pH의 자연 로그 값에 선형적인 관계를 가지고 있다는 것을 관찰하였고, Tyagi 등⁵⁾은 Sreekrishman 등이 제안한 식을 변형하여 보다 구체적인 식을 제안하였다.

$$\mu_1 = \mu_1^* \frac{C_1 + \ln(pH)}{C_1 + \ln(7.0)}$$

where

$$\mu_1^* = A_1 + B_1 \ln(7.0)$$

Siegrist와 Gujer⁶⁾는 pH가 질산화균의 최대비성장속도에 미치는 영향을 아래의 식으로 기술하였다.

$$\mu_{max, I} = \frac{\mu_{max}}{1 + 10^{(6.5 - pH)}}$$

U. S. EPA⁷⁾는 7.2 이하의 pH가 질산화에 미치는 영향을 기술하기 위해 다음 식을 제안하였고,

$$\mu_{n, pH} = (\mu_n, 7.2)[1 - 0.833(7.2 - pH)]$$

이와 유사한 관계식이 University of Capetown⁸⁾에서도 제안되었다.

$$\mu_{n, pH} = (\mu_n, 7.2)(2.35)^{pH - 7.2}$$

이상의 방법들과는 다르게 최⁹⁾는 noncompetitive inhibition kinetic equation을 그대로 사용하면서, pH를 저해 물질의 농도로 표현하기 위해 의사독성농도(C_{PT} : pseudo toxic concentration)라는

개념을 도입하였다. 의사독성농도는 pH 독성의 강도에 따라 그에 상응하는 농도만큼 독성 물질이 폐수 중에 존재하는 것처럼 기술하는 방법이다. 최근 의사독성농도를 중성 pH에서 임의의 시간에서의 pH를 Δ 값으로 정의하였으며, 이 모델을 이용하여 pH로 인한 반응기 내 실제호흡율의 변화를 모사하였다.

$$\frac{\mu_{max,I}}{\mu_{max}} = \frac{1}{1 + \frac{I}{K_I}} = \frac{K_I}{I + K_I}$$

$$I = C_{PT} = \Delta pH = (pH_N - pH)$$

이렇듯 현재까지 pH 저해 영향을 기술하기 위해 많은 동력학 식들이 제안되고 이용되어져 왔지만, 기존의 모델식들은 특정 미생물이 특정한 환경하에서 받는 영향을 표현하는 것으로서 다양한 미생물과 기질이 동시에 존재하는 활성슬러지 공정에 대해 적용하기에는 어려움이 있다. 따라서 특정 미생물에 제한되지 않고 넓은 범위의 pH가 활성슬러지 공정에 미치는 영향을 잘 서술할 수 있는 모델 개발의 필요성이 대두되었다.

본 연구에서는 위에 정의된 의사독성농도 개념은 매우 한정적인 pH 범위에 대해서만 적용될 수 있으며, 매우 높거나 낮은 pH에서는 그 영향이 대단히 과소 평가된다는 사실을 확인하였다. 또한 Δ pH를 구할 때의 기준이 되는 pH는 neutral pH보다는 threshold pH를 사용하고, C_{PT}를 (pH_{th}-pH)²로 정의함으로써 넓은 범위의 pH에 대해 정확한 예측이 가능하고, 산성 뿐 아니라 염기성 조건에 대해서도 적용할 수 있다는 것을 발견하였다. Threshold pH는 산성 또는 염기성 조건에 의한 미생물 성장 방해가 나타나기 시작할 때의 pH로 정의되고, 따라서 C_{PT}의 정의는 다음과 같이 변경된다.

$$I = C_{PT} = (pH_{th} - pH)^2$$

pH에 의한 미생물 성장 속도의 저해는 최대호흡율을 이용하여 측정될 수 있다. 호흡율은 호기성 호흡 동안에 단위 시간 단위 부피당 소비된 산소의 양으로 정의된다.¹⁰⁾ 최대호흡율은 기질을 과잉으로 공급함으로써 측정할 수 있으며,^{11,12)} 유입되는 기질

농도에 영향받지 않으므로 유입 독성에 대한 훌륭한 indicator가 될 수 있다.¹³⁾ 특히 noncompetitive inhibition의 경우 그 영향은 μ_{max} 가 감소하는 형태로만 나타나므로, 최대호흡율을 통해 매우 빠르고 정확하게 감지될 수 있다.

$$\frac{r_{max,I}}{r_{max}} = \frac{\mu_{max,I}}{\mu_{max}}$$

본 연구에서는 pH 저해 영향에 의한 μ_{max} 의 감소를 최대호흡율의 감소로부터 구하였고, 넓은 pH 범위에 대하여 활성슬러지에 미치는 영향을 평가하는 일반적인 모델을 제시하고자 하였다.

2. 재료 및 방법

본 연구는 안료폐수처리장을 약 1/1,200으로 축소한 pilot-scale의 활성슬러지 공정과 이에 설치된 독성감지장치를 이용하여 수행되었다. Fig. 1에서 보는 바와 같이 pilot plant는 각 750 L 용적의 3단 포기조(2.25 m³)와 침전조, 최대호흡율 측정에 사용되는 원수와 슬러지의 혼합을 위한 접촉조 (부피 \approx 10 L, HRT \approx 13.6분), 기타 펌프들로 구성되어 있고, 독성감지를 위한 연속식 호흡율 측정장치와 pH meter가 설치되었다. 일반적인 유기물 농도는 1,200~1,500 mgCOD/L 정도이며, 그 중 생분해 가능한 분율의 변화가 심하다. 또한 주로 산성 폐수가 발생하므로 포기조에 유입되기 이전에 중화조

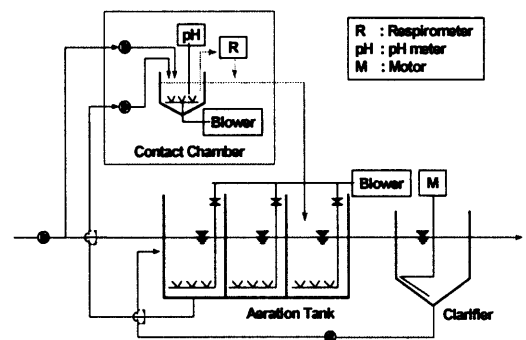


Fig. 1. Pilot plant equipped with the respirometer.

를 거치는데, 중화조가 적절히 운전되지 않을 경우 강산성 또는 강염기성 폐수가 생물학적 반응기로 유입될 수 있다.

최대호흡을 측정을 위해 원수의 일부와 폭기조 첫 단에서 인출된 슬러지가 1:1의 비율로 접촉조에서 혼합되며, 이 혼합액이 호흡을 측정장치로 이송되었다. 이렇게 높은 원수비를 유지함으로써 잦은 유입 부하의 변동에도 안정적인 최대호흡율을 얻을 수 있었다. 접촉조에서 DO를 5 mg/L 이상으로 유지함으로써 산소 농도 제한이 발생하는 것을 억제하였다. 원폐수에 H₂SO₄ 또는 NaOH를 첨가하여 산성 폐수는 pH 5.5, 5.0, 4.5, 4.0으로, 염기성 폐수는 pH 8.5, 9.0, 10.0, 11.0으로 제조하여 공급하였다. 한 단계의 실험이 그 다음 실험에 미치는 영향을 최소화하기 위해 접촉조 및 호흡을 측정장치의 유출수는 폭기조 마지막 단으로 이송되었다. 그리고 한 단계의 실험이 끝난 후 최대호흡율이 산성 또는 염기성 폐수 유입 이전의 정상상태 값으로 완전히 회복된 것을 1시간 이상 확인한 후에 다음 단계의 실험을 실시하였다.

3. 결과 및 고찰

3.1. pH 독성이 활성슬러지 최대호흡율에 미치는 영향

최대호흡을 측정에 기초한 연속식 독성감지장치는 독성 유입시 급격한 최대호흡율의 감소와 유입당시 빠른 회복을 보여 주었다(Table 1). pH 4.5, 4.0의 강산성 폐수 유입시 최대호흡율이 60% 감소하는데 각각 34분, 26분이 소요되었으며 정상상태

값의 80%로 회복되는 시간은 20분, 24분이 소요되었다. 강염기성 폐수의 경우는 pH 10, 11의 강염기성 폐수 유입시 최대호흡율이 60% 감소하는데 각각 45분, 36분이 소요되었으며 정상상태값의 80%로 회복되는 시간은 22분, 25분이 소요되었다.

3.2. 모델 매개변수 추정

앞에서 언급된 pH 저해를 나타내는 여러 모델들과 C_{PT} concept model을 pilot plant에서 얻어진 실험 데이터에 적용하여, C_{PT} concept model의 예측 성능을 기존 모델들과 비교하였다. 실험 데이터들은 특정 미생물이 아닌 일반 활성슬러지를 대상으로 하여 얻어진 반면, Tyagi 등의 모델은 less acidophilic species에서, Siegrist와 Gujer, U.S. EPA 및 UCT model은 질산화균을 대상으로 하여 얻어졌다. 또한 모든 대상 모델들은 경험적인 식이기 때문에 각 식들은 실험 데이터로부터 계산된 경험 상수를 포함하고 있다. 이러한 이유로 일반 활성슬러지를 대상으로 얻어진 저자들의 실험 데이터를 다른 모델에 직접 적용할 수는 없으며, 모델에 포함된 경험 상수를 다시 추정하는 작업이 필요하다. 이러한 작업을 통해 기존 모델이 개발 당시의 조건 이외의 다른 실험 조건에서 얻어진 데이터들에 대해서도 적용 가능한지 확인할 수 있다. 대상 모델들은 모두 강산성 폐수에 의한 저해 영향을 해석하기 위해 개발되었지만, 이 식들이 염기성 폐수에 대해서도 적용이 가능한지를 확인하였다.

3.2.1. C_{PT} concept model

C_{PT} concept model은 noncompetitive inhibi-

Table 1. Variation of r_{max} under various influent pH

pH	Acidic condition				Basic condition			
	5.5	5.0	4.5	4.0	8.5	9.0	10.0	11.0
Before toxic input	137.3	145.6	143.1	145.1	128.8	127.7	126.3	122.9
After toxic input	102.4	53.2	30.6	20.0	125.2	100.2	45.8	40.3
60% reduction time of r _{max} (min)	-	52	34	26	-	-	45	36
80% recovery time of r _{max} (min)	-	18	20	24	-	-	22	25
r _{max} reduction ratio (%)	25.4	63.5	78.6	86.2	2.8	21.5	63.8	67.2
μ _{max,1} / μ _{max}	0.746	0.365	0.214	0.138	0.972	0.785	0.362	0.328

tion kinetics에 기초하고 있으며, 따라서 이 모델의 inhibition coefficient, K_I는 Lineweaver-Burk linearization method를 이용하여 간단히 구해질 수 있다. 비경쟁적 저해 동력학식의 역수를 취하면 다음 식과 같고, 여기서, y절편을 1로 두고, 저해 물질 농도 I에 따른 (μ_{max,I}/μ_{max})를 plot하였을 때 기울기의 역수가 K_I가 된다.

$$\frac{\mu_{max}}{\mu_{max,I}} = \frac{K_I + I}{K_I} = \frac{1}{K_I} \cdot I + 1$$

Table 1에 나타난 실험 결과로부터 산성 조건과 염기성 조건에 대해 각각 다른 K_I값들(K_I = 1/1.3367 ≈ 0.748 for acidic conditions, K_I = 1/0.8377 ≈ 1.194 for basic condition)을 얻었다 (Fig. 2). 대단히 강산성인 경우를 제외하면(C_{PT} ≤ 3, 유입수 pH 4.5~5.5인 경우) 상관도는 더욱 높게 나타났다(K_I=0.812). 또한 이 과정에서 산성 및 염기성 조건에 대해서, 저해 작용이 나타나기 시작하는 threshold pH를 구할 수 있었으며, 그 값은 각각 6.77, 7.80이었다. 이는 곧 pH 6.77과 7.80 사이에서는 저해 작용이 없다는 것을 의미하며, 따라서 이 범위에서 C_{PT}는 0으로 설정된다. C_{PT} concept model이 가지는 장점 중의 하나는 저해 영향이 (pH_{th}-pH)의 제곱에 비례하므로 염기성 조건에 대해 적용할 경우에도 모델 구조를 변경할 필요가 없다는 점이다.

3.2.2. Tyagi model

Tyagi 등⁵⁾은 자신들의 model의 유일한 매개변수인 C_T에 대해 -1.33±0.05라는 값을 제시하였는데, 저자들의 실험 데이터를 이 모델을 이용하여 해석하기 위하여 상수값을 다시 추정하였다.

$$\mu_{max,I} = \mu_{max} \frac{C_T + \ln(pH)}{C_T + \ln(7.0)}$$

where C_T = constant for Tyagi model

여기서 7.0이라는 pH는 저자들이 실험한 조건에서 독성 영향이 나타나는 기준이 되는 pH를 의미하므로, 다른 실험 조건에 적용할 경우에는 그에 적당한 값을 사용하여야 한다. 여기서는 앞서 밝혀진

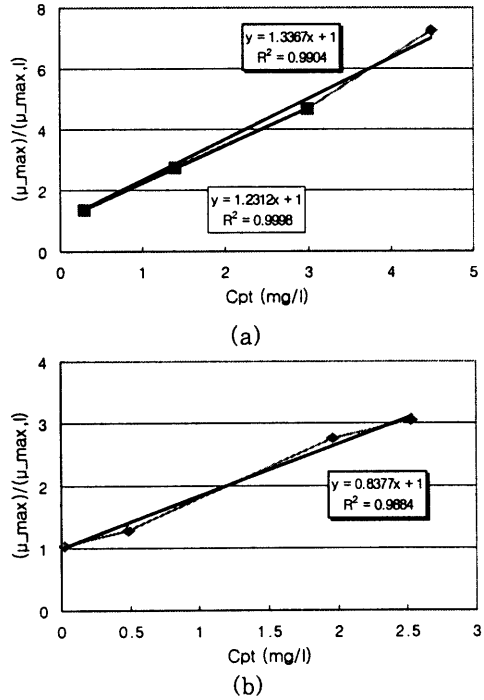


Fig. 2. Model parameter estimation for the C_{PT} concept model; (a) acidic, (b) basic.

6.77과 7.80을 각각 산성 및 염기성 조건에서의 pH_{th}로 사용하였다.

$$\begin{aligned} \frac{\mu_{max,I}}{\mu_{max}} &= \frac{C_T + \ln(pH)}{C_T + \ln(pH_{th})} \\ &= \frac{C_T}{C_T + \ln(pH_{th})} + \frac{1}{C_T + \ln(pH_{th})} \cdot \ln(pH) \end{aligned}$$

모델상수 C_T는 ln(pH)에 따른 (μ_{max,I}/μ_{max})를 plot하였을 때의 기울기와 y절편으로부터 각각 구해질 수 있다.

$$C_{T, slope} = \frac{1}{slope} - \ln(pH_{th}) \text{ or}$$

$$C_{T, Y_{intercept}} = \frac{Y_{intercept} \cdot \ln(pH_{th})}{1 - Y_{intercept}}$$

염기성 조건에 대해 적용할 경우에는 식의 형태가 다음과 같이 변하고,

$$\frac{\mu_{max,I}}{\mu_{max}} = \frac{C_{T, base} + \ln(pH_{th})}{C_{T, base} + \ln(pH)}$$

따라서 $C_{T,base}$ 를 구하기 위해서는 $\ln(pH)$ 에 따른 $(\mu_{max,i}/\mu_{max,1})$ 를 plot하여야 한다. 그렇게 하였을 때 위와 같은 식으로 기울기와 y절편으로부터 $C_{T,base}$ 를 구할 수 있다. 기울기로부터 계산된 값과 y절편으로부터 계산된 값은 거의 일치하였으며, 산성 조건에 대해 -1.46, 염기성 조건에 대해 -1.877의 값을 보였다(Fig. 3).

3.2.3. U.S.EPA model

U.S.EPA model은 7.2 이하의 pH가 질산화에 미치는 영향을 기술하며, 하나의 경험 상수(0.833)를 포함하고 있다. 모델 개발에 사용된 것과 다른 미생물군에 대해 적용하기 위해 모델에 포함된 기준이 되는 pH를 7.2 대신 pH_{th} 로 표시하고 경험 상수를 C_E 로 표시하였다. 이러한 과정들을 통하여 모델은 다음과 같이 수정되었다.

$$\frac{\mu_{max,i}}{\mu_{max}} = 1 - C_E(pH_{th} - pH)$$

where $C_E = \text{constant for EPA model}$

염기성 조건에 대해 적용할 때, 식은 다음과 같이 변경되어야 한다.

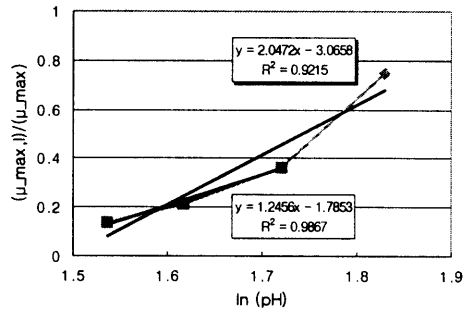
$$\frac{\mu_{max,i}}{\mu_{max}} = 1 - C_{E,base}(pH - pH_{th})$$

상수 C_E 는 y절편을 1로 두고 $(pH_{th}-pH)$ 에 따른 $\mu_{max,i}/\mu_{max}$ [염기성 조건에서는 $(pH-pH_{th})$ 에 따른 $\mu_{max,i}/\mu_{max}$]를 plot하였을 때의 기울기이며, 산성 및 염기성 조건에 대해 각각 0.444, 0.423이 적절한 값으로 나타났다(Fig. 4).

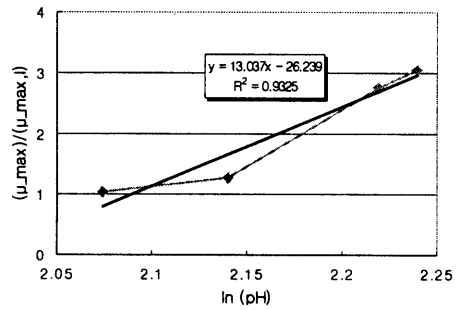
3.2.4. UCT model

UCT 모델 역시 7.2 이하의 pH가 질산화에 미치는 영향을 기술하며, 하나의 경험 상수를 포함하고 있다. U.S.EPA model에서와 같은 과정을 거쳐 모델은 다음과 같이 표현된다.

$$\frac{\mu_{max,i}}{\mu_{max}} = C_U^{(pH-pH_a)}$$

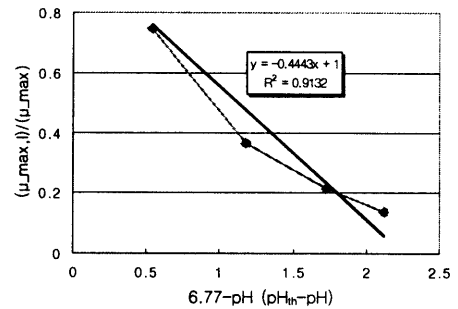


(a)

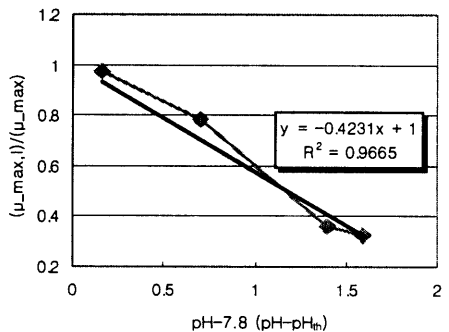


(b)

Fig. 3. Model parameter estimation for Tyagi model; (a) acidic, (b) basic.



(a)



(b)

Fig. 4. Model parameter estimation for U.S. EPA model; (a) acidic, (b) basic.

$$\ln \frac{\mu_{max,I}}{\mu_{max}} = (pH - pH_{th}) \cdot \ln C_U$$

where C_U = constant for UCT model

염기성 조건에 대한 식은 아래와 같다.

$$\frac{\mu_{max,I}}{\mu_{max}} = C_{U,base}^{(pH_a - pH)}$$

$$\ln \frac{\mu_{max,I}}{\mu_{max}} = (pH_{th} - pH) \cdot \ln C_{U,base}$$

여기서 y절편을 0으로 두고 (pH-pH_{th})에 따른 ln(μ_{max,I}/μ_{max}) [염기성 조건의 경우 (pH_{th}-pH)에 따른 ln(μ_{max,I}/μ_{max})]를 plot하였을 때 기울기가 ln(C_U)가 된다. 적합한 직선의 기울기는 산성 및 염기성 조건에 대해 각각 0.8962, 0.6735이고 따라서 상수는 각각 2.45, 1.96으로 나타났다. 산성 조건에서의 C_U는 저자들에 의해 제안된 값인 2.35와 매우 유사하다(Fig. 5).

3.3. 예측 정확도와 예측 정확도 지표

여러 모델들의 예측 정확도를 정량화하여 다른 모델과 비교하기 위한 지표로서 prediction accuracy (PA)와 prediction accuracy index(PAI)를 개발하였다. PA는 실험된 pH값으로부터 μ_{max,I}/μ_{max}를 추정하고, 이것을 실험된 μ_{max,I}/μ_{max}로 나눈 값으로 정의되며, 따라서 PA가 1에 가까울수록 정확하게 예측된 것이라 볼 수 있다.

$$Prediction\ Accuracy = \frac{(\mu_{max,I}/\mu_{max})_{estimated}}{(\mu_{max,I}/\mu_{max})_{experiment}}$$

PAI는 전체 실험 대상 pH 구간에서 예측 신뢰성에 대한 직관적인 정보를 얻기 위한 목적으로 개발되었다. 일반적으로 사용되는 표준편차는 정확한 값이 알려져 있지 않을 때 실험값들이 평균값 주위로 얼마나 산재되어 있는지를 나타내는 것이며, 정확한 값이 알려져 있을 때는 평균값 대신 알려진 정확한 값을 기준으로 편차를 계산하는 것이 바람직하다.

예측값의 정확도를 점수화하기 위해 PAI는 1에서 PA=1을 기준으로 한 편차를 뺀 값에 100을 곱한

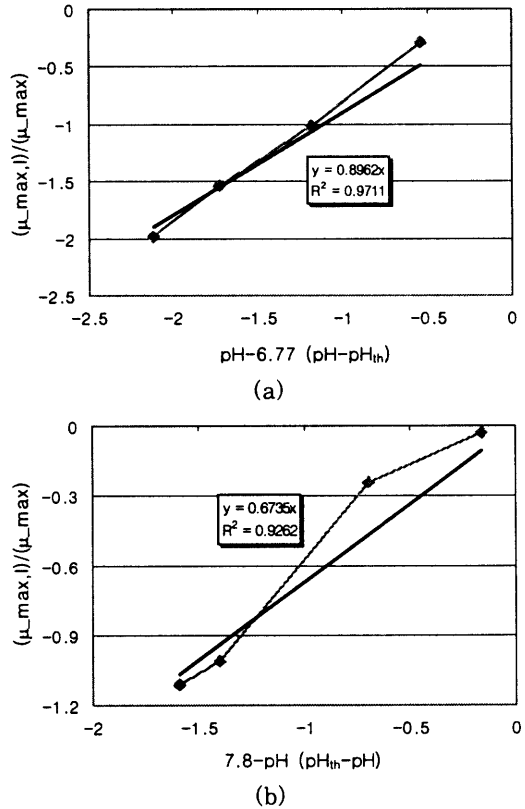


Fig. 5. Model parameter estimation for UCT model: (a) acidic, (b) basic.

값으로 정의하였다. PAI는 100 이하의 값을 가지며, 모델을 통한 예측값이 실험값과 크게 다른 경우에는 0 이하가 될 수도 있다. PAI가 100에 가까울수록 사용한 모델을 통한 정확한 예측이 가능한 것으로 판단된다.

$$Prediction\ Accuracy\ Index =$$

$$\left(1 - \sqrt{\frac{\sum(PA_i - 1)^2}{n-1}} \right) \times 100$$

실험 데이터에 대해 여러 모델들의 PA와 PAI를 구한 결과들을 보면 모델의 예측 정확도에 있어 UCT model만이 유일하게 C_{PT} concept model과 비교될 수 있다는 점이 드러난다. C_{PT} concept model과 UCT model을 제외한 나머지 모델들은 염기성 조건에 대해서는 전혀 적용될 수 없었고, 산성 및 염기성 조건 모두에서 C_{PT} concept model을 이

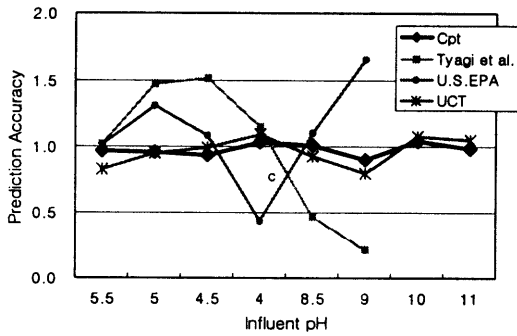


Fig. 6. Prediction accuracies of the tested models.

Table 2. Prediction accuracy indexes of the tested models

Model	PAI
C _{PT} concept model (Acid)	94.6
C _{PT} concept model (Base)	93.7
Tyagi <i>et al.</i>	58.8
U.S.EPA	62.2
UCT (Acid)	88.4
UCT (Base)	86.4

용하여 예측한 결과가 가장 정확하였다. 이런 정확성은 C_{PT} concept model이 pH의 저해 영향을 원리적으로 설명하는 비경쟁적 동역학식을 기본으로 하여 세운 모델이기 때문이라고 사료된다. Tyagi model에서 기준이 되는 pH를 산성 및 염기성 조건에 대해 각각 6.77, 7.8로 두는 것이 7.0으로 고정시킨 것에 비해 눈에 띄게 정확도를 증가시키지는 않았다.

본 연구의 결과들로부터 나타난 C_{PT} concept model의 장점을 다음과 같이 요약할 수 있다. C_{PT} concept model은 널리 알려진 inhibition kinetics의 형태를 그대로 사용하기 때문에 이것이 저해 (inhibition)의 영향을 기술하는 식이라는 것을 직관적으로 알 수 있다. 또한 inhibition coefficient의 크기만으로도 대략적인 저해 영향의 정도를 판단할 수 있다. 무엇보다 큰 장점은 기존의 다른 모델들에 비해 더욱 정확하게 pH의 저해 작용을 예측할 수 있었다. 염기성 조건에 대하여 적용할 때에도 모델 구조를 변경할 필요 없이 바로 적용할 수 있었다. 그러나 다른 기존의 모델들은 염기성 조건에 대하여는

전혀 적용할 수 없거나, 적용시에 모델 구조를 변경하여야 하며, 수정된 모델 구조로도 그다지 정확하게 예측할 수는 없었다. C_{PT} concept model은 단 하나의 매개변수(K_i)를 가지고 있으며, 그 값은 Lineweaver-Burk linearization method를 통해 쉽게 추정될 수 있다.

4. 결 론

활성슬러지 공정에 대한 pH 저해 영향을 기술하는 기존의 모델식들은 특정 미생물이 특정한 환경에서 받는 영향을 표현하는 것으로서 다양한 미생물과 기질이 동시에 존재하는 활성슬러지 공정에 적용하기에는 어려움이 있다. 따라서 특정 미생물에 제한되지 않고 넓은 범위의 pH가 활성슬러지 공정에 미치는 영향을 잘 서술할 수 있는 모델 개발의 필요성이 대두되었고, 이에 의사독성농도 모델을 개발하고 평가하였다. 의사독성농도, C_{PT}는 threshold pH와 반응기 내 pH의 차를 제공한 값이며, 비경쟁적 동역학(noncompetitive inhibition kinetics)의 저해물질 농도를 대체한다.

C_{PT} concept model은 기존의 다른 모델들에 비해 더욱 정확하게 활성슬러지 공정에서 나타나는 pH의 저해 작용을 예측할 수 있었다. 기존의 모델들은 염기성 조건에 대하여는 전혀 적용할 수 없거나, 적용시에 모델 구조를 변경하여야 하고, 수정된 모델 구조로도 그다지 정확하게 예측할 수 없었던 반면 C_{PT} concept model은 모델 구조의 변경없이 바로 적용할 수 있을 뿐 아니라 저해 영향의 예측 정확도 역시 매우 높게 나타났다. 또한 매개변수 추정이 간단하여 다른 조건에서 이루어진 실험 데이터에 대해서도 쉽게 적용할 수 있는 장점이 있다.

사 사

본 논문은 한국과학재단 지정 환경기술·산업개발연구센터(RRC-IETI)의 지원(과제번호 : 99-10-01-01-A-3)에 의하여 연구되었으며 이에 감사드립니다.

기 호 설 명

μ_{max}	the maximum specific growth rate, day ⁻¹
$\mu_{max,i}$	the maximum specific growth rate when inhibited, day ⁻¹
I	the maximum specific growth rate of the less acidophilic species at that pH, day ⁻¹
I*	the maximum specific growth rate of the less acidophilic species at a pH 7.0, day ⁻¹
μ_{Am}	the maximum specific growth rate of nitrifying bacteria, day ⁻¹
μ_A	the maximum specific growth rate of nitrifying bacteria at that pH, day ⁻¹
$\mu_{n,7.2}$	the maximum specific growth rate of nitrifying bacteria at a pH of 7.2, day ⁻¹
$\mu_{n,pH}$	the maximum specific growth rate of nitrifying bacteria at that pH, day ⁻¹
A ₁ , B ₁	constants (pH dependence of growth of less acidophilic species), dimensionless
C ₁	A ₁ /B ₁ , dimensionless
C _T , C _E , C _U	constant for Tyagi, EPA and UCT model respectively, dimensionless
K _i	inhibition coefficient, mg/L
I	inhibitor concentration, mg/L
n	number of samples
PA	prediction accuracy
PA _i	prediction accuracy of i _{th} sample
PAI	prediction accuracy index
pH _N	neutral pH
pH _{th}	threshold pH
r _{max}	the maximum respiration rate, mg O ₂ /L-hr
r _{max,i}	the maximum respiration rate when inhibited, mg O ₂ /L-hr

참 고 문 헌

1. Mazierski, J., "Effect of chromium ((CrVI)) on the growth rate of denitrifying bacteria," *Water Research*, **28**(9), 1981~1985(1994).
2. Chang, H.-L. and Lisa, A.-C., "Model for the cometabolic biodegradation of chlorinated organics," *Environmental Science and Technology*, **29**, 2357~2367(1995).
3. Wackett, L. P. and Householder, S. R., "Toxicity of trichloroethylene to *Pseudomonas putida* F1 is mediated by toluene dioxygenase," *Applied and Environmental Microbiology*, **55**(10), 2723~2725(1989).
4. Sreerkrishman, T. R., Tyagi, R. D., Blais, J. F., and Campbell, P. G. C., "Kinetics of heavy metal bioleaching from sewage sludge - I. Effect of process parameters," *Water Research*, **27**(11), 1641~1651(1993).
5. Tyagi, R. D., Sreerkrishnan, T. R., Campbell, P. G. C., and Blais, J. F., "Kinetic of heavy metal bioleaching from sewage sludge-II. Mathematical model," *Water Research*, **27**(11), 1653~1661(1993).
6. Siegrist, H. and Gujer, W., "Demonstration of mass transfer and pH effects in a nitrifying biofilm," *Water Research*, **21**, 1481~1487(1987).
7. U. S. Environmental Protection Agency, "Process design manual for nitrogen control, Office of technology transfer," Washington, DC. (1975), readapted from Randall, C. W., Barnard, J. L., and Stensel, H. D., "Design and retrofit of wastewater treatment plants for biological nutrient removal," *Water Quality Management Library*, Volume 5, Technomic Publishing Co. Inc.(1992).
8. University of Capetown, "Theory, design and operation of nutrient removal activated sludge process," *Water Research Com-*

- mission*(1984) Pretoria S. A. 5-4, readapted from Randall, C. W., Barnard, J. L., and Stensel, H. D., "Design and retrofit of wastewater treatment plants for biological nutrient removal," *Water Quality Management Library*. Volume 5, Technomic Publishing Co. Inc.(1992).
9. Choi, K. S., DO concentration and respiration rate control and toxicity detection by means of respirometry in activated sludge process, Ph.D. Thesis, Pusan National University, Republic of Korea (1999).
 10. Spanjers, H., Vanrolleghem, P., Olsson, G., and Dold, P., Respirometry in control of activated sludge process (principles), IAWQ Scientific and Technical Report No. 7(1997).
 11. Klapwijk, A., Spanjers, H., and Temmink H., "Control of activated sludge plants based on measurement of respiration rate," *Water Science and Technology*, **28**(11-12), 369~376(1993).
 12. Spanjers, H., Temmink, H., and Klapwijk, A., "Monitoring of the maximum respiration rate," *Water Science and Technology*, **30**(4), 285~288(1994).
 13. Kim, C. W., Kim, B. G., Lee, T. H., and Park, T. J., "Continuous and early detection of toxicity in industrial wastewater using an on-line respiration meter," *Water Science and Technology*, **30**(3), 11(1994).