

수질개선을 위한 인공습지 실험자료에 의한 유출수 농도 추정식 개발

Development of Effluent Concentration Estimation Equation from Treatment Wetland Experimental Data

윤 춘 경* · 권 순 국** · 전 지 홍***
Yoon, Chun Gyeong · Kwun, Soon Kook · Jeon, Ji Hong

Abstract

Effluent concentration estimation equations for wetland system were developed through statistical analysis of treatment wetland experimental data. Existing empirical equations were reviewed for their accuracy with experimental data, and compared with the estimation equations. About 70 experimental data sets were used for multiple regression, and variables include influent concentration, hydraulic loading rate, average daily air temperature, and plant coverage. The estimation equations developed for BOD₅, SS, T-P, and T-N predicted effluent concentrations moderately well, and coefficient of determination (R^2) for them was 0.74, 0.60, 0.59, and 0.58, respectively. The equations obtained from same data but excluding plant coverage showed relatively lower R^2 than the former case, and it was 0.66, 0.52, 0.41, and 0.57, respectively. The EPA, WPCF, and Kadlec and Knight equations worked poorly and R^2 for them was significantly lower than the estimation equation developed in the study. The reason might be that the existing equations were oversimplified that they did not include important parameters such as air temperature and plant coverage. Therefore, developing reasonable estimation equations from experiment under realistic condition is highly recommended rather than using existing estimation equations.

I. 서 론

인구 증가와 생활수준 향상에 따른 오수 발생량의 증가 및 오수처리시설의 미비에 따라 생활오수에 의한 오염부하량이 수계의 자연정화능력을 초

과하였으며, 이는 하천이나 호소의 수질오염원인으로 지목되고 있다. 농업용수 수질측정망 161개 지점의 유역내 주요 오염원에 대한 자료에 의하면 생활하수에 의한 오염이 109개소로서 67.7%를 차지하여 수질오염 방지를 위해 생활오수처리의 중

* 건국대학교 농업생명과학대학

** 서울대학교 농업생명과학대학

*** 건국대학교 대학원

키워드 : 인공습지, 추정식, 다중회귀, 결정계수, BOD₅, SS, T-P, T-N

요성이 강조되고 있다.¹⁾ 하수도보급률이 저조한 상황에서 농촌지역에서는 발생한 점오염원의 대부분이 제대로 처리되지 못한 채 수계로 유입되고 있다. 축산폐수는 오염부하량 측면에서 살펴보면 소 8두, 돼지 36두 미만의 축산시설의 경우는 규제를 받지 않고 있으며, 이에 따라 전체 축산 폐수 발생량의 약 50% 정도가 규제미만의 축산농가에서 발생하고 있다.²⁾ 하수관거 설치가 현실적으로 어려운 농촌지역에서 생활오수나 축산폐수 등의 점오염원에 관한 특별한 관리가 요구된다.

근래에 자연정화원리를 이용한 수질개선용 인공습지에 대한 연구가 이루어지고 있는데,³⁻⁵⁾ 농촌의 지역적 특성을 고려해볼 때 건설비가 저렴하고 유지관리가 용이한 수질개선용 인공습지는 농촌지역에서 이용 가능성이 매우 높다고 할 수 있다. 수질개선용 인공습지에 있어 오염물질의 주 처리 메카니즘은 식물 뿌리 주변의 호기성 미생물에 의한 분해와 식물에 의한 흡수이다.⁶⁾ 이러한 처리는 자연의 정화능력에 의존하기 때문에 습지의 합리적인 설계기준이 수질개선용 인공습지 적용에 매우 중요하다. 그러나 기후나 식물의 생장주기는 나라마다 다르기 때문에, 인공습지의 효율적인 운영을 위해서는 그 나라의 특성에 맞는 설계인자나 설계기준의 정립이 요구된다.

본 연구에서는 1997년 3월에서 1999년 4월까지 건국대학교 농업생명과학대학에 설치된 수질개선용 인공습지 실험시설에서 BOD₅, SS, T-P, T-N의 실험결과를 사용하여 유출수 농도에 대한 표면부하량, 유입수 농도, 온도, 갈대의 被度 등과의 관계식을 유도하였고, 다른 문헌에서 제시한 관계식과 비교하며, 우리 나라에 적합한 수질개선용 인공습지의 설계인자와 설계기준을 제시하고자 시도하였다.

II. 재료 및 방법

2. 수질개선용 인공습지의 제원

실험에 사용한 인공 습지의 형태는 지하흐름형

습지(subsurface flow system)이며 모래에 갈대(*Phragmites communis*)를 식재한 형태였다. 습지의 깊이는 식물이 뿌리에 산소를 공급할 수 있는 근권(root zone)에 따라 좌우되는데, 갈대의 경우는 근권이 보통 60cm 정도이기 때문에 습지의 깊이를 0.6m로 하였다. 실험용 인공습지의 규모는 폭 2m, 길이 9m로 하였는데, 처리조의 유입부와 유출부의 0.5m를 자갈로 채워 실제 처리에 사용된 부분은 폭 2m, 길이 8m로서 폭과 길이의 비는 1:4이고, 표면적은 16m²이었다. 습지의 바닥 경사는 1%이었고 처리조 내는 모래로 채워졌으며, 사용한 모래는 삼각분류법에 의하면 sandy loam, 통일분류법에 의하면 silty sand이었다.

2. 입력 자료

1997년 3월부터 1999년 4월까지 건국대학교 농업생명과학대학에 설치된 수질개선용 인공습지의 수질자료 70여개를 이용하였다.

1997년 3월부터 1998년 4월까지 적용된 유량은 2.5m³/day이고, 수리학적 부하율은 0.16m³/m²/day이었으며, 이론적 체류기간은 1.38일이었다. 1998년 5월부터 1999년 4월까지 적용된 유량은 1.0m³/day이고, 수리학적 부하율은 0.09m³/m²/day이었으며, 이론적 체류기간은 3.5일이었다. 본 연구기간 동안 BOD₅, T-P, T-N, SS의 유입수 총평균 농도는 각각 143.34mg/L, 13.46mg/L, 113.76mg/L, 63.13mg/L이었고 유출수의 총 평균농도는 각각 48.69mg/L, 7.70mg/L, 83.70mg/L, 18.72mg/L이었다. 시료채취는 거의 일주일 단위로 이루어졌으며 수질 분석은 Standard Methods⁷⁾를 따랐다.

식물의 생장은 대기온도와 밀접한 관계가 있으므로, 본래는 식물생장정도를 별도로 측정하지 않고 온도 측정으로서 추정하고자 하였다. 그러나 실험결과에 의하면 기온은 8월을 정점으로 점점 감소하는데 반하여, 갈대는 11월 초까지 왕성하게 자랐기 때문에, 대기 온도 외에도 식물생장정도의 고려가 필요하였다. 따라서 매일 작성하는 실험시찰관찰일지를 근거로 하여 처리조 내에 성장하는

Table 1. Monthly plant coverage of the treatment wetland basin (%)

year \ month	Jan	Feb	Mar	Apr	May	Jun	Jul	Aug	Sep	Oct	Nov		Dec
											early	late	
1997			0	0	30	70	100	100	100	100	80	20	0
1998	0	0	0	10	30	70	100	100	100	100	100	40	0
1999	0	0	0	20									

갈대의 피복정도(被度, coverage)를 유출수 농도 추정공식에 포함시켰다. 실험일지를 근거로 산정한 갈대의 被度는 Table 1과 같다.

3. 유출수 농도 추정식

수질개선용 습지에서 유출수 농도 추정 관계식은 EPA⁶⁾와 WPCF,⁸⁾ Kadlec and Knight⁹⁾ 등에 의하여 제시된 바 있다.

EPA⁶⁾에서는 유출수의 BOD₅ 농도 추정을 위해 BOD₅ 제거는 first-order를 따르며 처리조 내의 흐름은 plug-flow라는 가정 하에 유입수 농도, 기온, 체류기간 등을 고려한 설계용 관계식을 만들었으며 식 (1)과 같다.

$$BOD_5 = \frac{C_e}{C_i} = e^{-K_T \cdot T} \dots\dots\dots(1)$$

$$K_T = K_{20}(1.1)^{(T-20)} \dots\dots\dots(2)$$

여기서,

- C_e = 유출수 BOD₅ 농도 (mg/L)
- C_i = 유입수 BOD₅ 농도 (mg/L)
- K_T = 감소계수 (day⁻¹)
- T = 수온 (°C)
- t = 수리학적 체류기간 (day)
- K₂₀ = 수온 20°C에서의 감소계수

WPCF⁸⁾는 유입수 농도와 수리학적 부하율을 독립변수로 하여 다중회귀분석에 의해 유출수 T-N 농도를 추정하는 관계식을 식 (3)와 같이 유도하였으며, BOD₅에 관한 공식은 EPA공식과 동

일하였다.

$$T-N : C_e = 0.193 \cdot C_i + 1.55 \cdot H_L - 1.75 \dots\dots(3)$$

(R² = 0.79, n = 34)
12.2 < C_e < 122 mg/L

여기서,

- C_e = 유출수 T-N 농도 (mg/L)
- C_i = 유입수 T-N 농도 (mg/L)
- H_L = 수리학적 부하율 (m³/m²/day)

Kadlec and Knight⁹⁾는 유입수 하나의 인자를 이용하여 유출수의 BOD₅, SS, T-N, T-P 농도를 추정하기 위해 식 (4)~식 (7)과 같은 관계식을 제시하였다.

$$BOD_5 : C_e = 0.11 \cdot C_i + 1.87 \dots\dots\dots(4)$$

(R² = 0.74, n = 73)
1 < C_i < 330 mg/L
0.008 < H_L < 0.22 m³/m²/day

$$SS : C_e = 4.7 + 0.09 \cdot C_i \dots\dots\dots(5)$$

(R² = 0.67, n = 77)
0 < C_i < 330 mg/L
0.008 < H_L < 0.22 m³/m²/day

$$T-N : C_e = 2.6 + 0.46 \cdot C_i + 0.124 \cdot H_L \dots\dots(6)$$

(R² = 0.45, n = 135)
5.1 < C_i < 58.6 mg/L
0.7 < H_L < 48.5 m³/m²/day

$$T-P : C_e = 0.51 \cdot C_i^{1.10} \dots\dots\dots(7)$$

(R² = 0.64, n = 90)
0.5 < C_i < 20 mg/L

$$C_e = a \cdot H_L^b \cdot C_i^c \cdot T^d \cdot P^e \dots\dots\dots(8)$$

여기서,

- C_e = 유출수 농도(mg/L)
- H_L = 수리학적 부하율(m³/m²/day)
- C_i = 유입수 농도(mg/L)
- T = 일 평균기온 + 20 (°C)
- P = 갈대의 被度(소수점) + 0.1
- a, b, c, d, e = 회귀계수

EPA⁶⁾에서 제시한 설계용 관계식 (1)은 수온 인자가 포함되어 있어 설계시 시스템 내의 수온자료가 필요하다.

식 (3)~식 (7)은 유입수의 농도와 수리학적 부하율, 혹은 유입수 농도만을 고려한 관계식이었고, 실제 수질개선용 습지의 오염물질 처리율에 영향을 주는 기온을 고려하지 않은 공식이었으며, 앞에서 제시한 모든 관계식들에는 갈대의 被度를 고려하지 않았다. 따라서 기후변화에 따라 식물의 被度가 변화하는 우리 나라의 경우는 위의 식을 그대로 적용하기에 무리가 있다.

본 연구에서는 3년간의 실험용 인공습지에 의한 오수처리 현장실험자료를 통계적으로 분석하여 관계식을 유도하였다. 갈대의 被度를 포함하였을 경우와 포함하지 않았을 경우로 구분하여 유출수의 농도에 대한 표면부하율, 유입수 농도, 대기온도, 갈대의 被度와의 인자에 대한 다중회귀분석을 실시하였다. 이 인자들을 선정할 이유는 이들이 습지의 처리효율에 중요한 역할을 하고 있음을 실험을 통해 확인하였기 때문이었다. 대상 수질 항목은 BOD₅, T-P, T-N, SS이었으며 다음과 같은 표현 모델식을 이용하여 다중회귀분석을 실시하였다.

여기에서 T와 P는 통계프로그램의 적용상 오류를 방지하기 위하여, T는 음수가 되지 않도록 20°C를 더하였고 P는 0이 되지 않도록 0.1을 더하여 조정하였다.

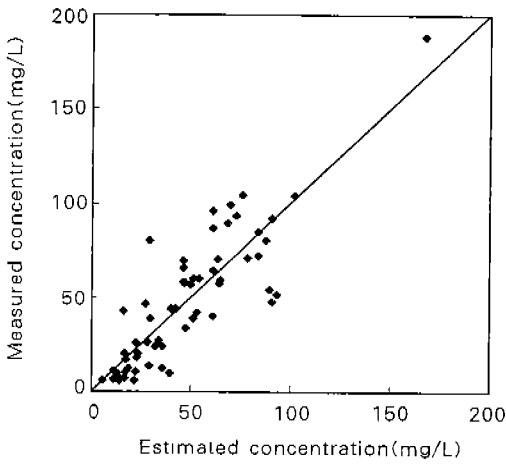
실험기간 동안 수집된 자료를 통계용 전산 프로그램인 SPSS for windows 7.5에 의해 통계처리하였으며 회귀분석에 의해 도출된 관계식이 얼마나 설명력을 가지고 있는가를 나타내기 위하여 결정계수(R²)를 구하였고 RMSE(root mean square error)를 구하여 실측치와 예측치와의 상관성을 분석하였다.

III. 결과 및 고찰

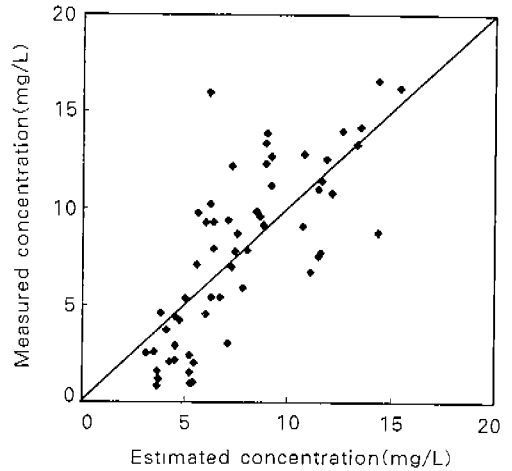
수질개선용 인공습지의 수질자료를 이용한 유출수의 BOD₅, T-P, T-N, SS 농도에 대하여 갈대의

Table 2. Estimation equations obtained from multiple regression of the experimental data

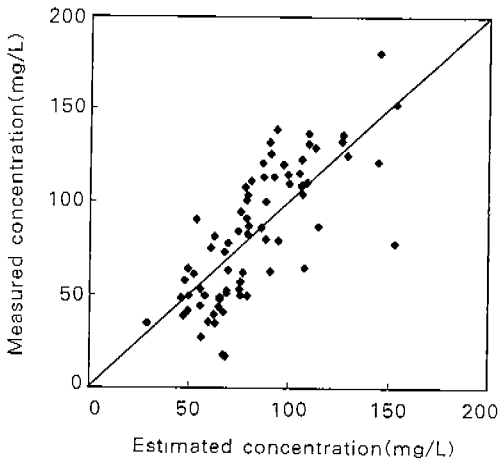
Item	plant coverage	Estimation equation	R ²	RMSE (mg/L)	Data number
BOD ₅	Include	$C_e = 0.15277H_L^{0.0515} \cdot C_i^{1.1467} \cdot T^{-0.0667} \cdot P^{-0.2762}$	0.75	17.29	62
	Exclude	$C_e = 0.2718H_L^{0.1653} \cdot C_i^{1.399} \cdot T^{-0.4460}$	0.66	19.99	62
T-P	Include	$C_e = 0.989H_L^{-0.0129} \cdot C_i^{0.6718} \cdot T^{-0.0184} \cdot P^{0.3499}$	0.59	2.86	72
	Exclude	$C_e = 36.39H_L^{0.1400} \cdot C_i^{0.500} \cdot T^{-0.7288}$	0.41	3.40	72
T-N	Include	$C_e = 3.629H_L^{-0.2721} \cdot C_i^{0.6190} \cdot T^{-0.1375} \cdot P^{-0.0496}$	0.58	23.11	72
	Exclude	$C_e = 4.930H_L^{0.2580} \cdot C_i^{0.6367} \cdot T^{-0.2275}$	0.57	23.29	72
SS	Include	$C_e = 0.2039H_L^{0.2144} \cdot C_i^{0.8047} \cdot T^{-0.3875} \cdot P^{0.4371}$	0.60	11.04	72
	Exclude	$C_e = 4.125H_L^{0.1822} \cdot C_i^{0.7693} \cdot T^{-0.3303}$	0.52	12.34	72



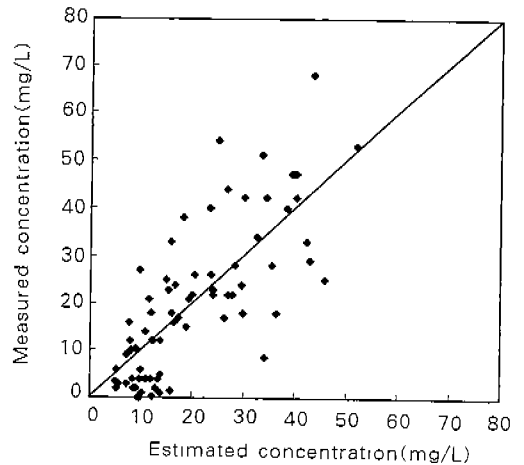
(a) BOD₅



(b) T-P



(c) T-N



(d) SS

Fig. 1. Scatterplots of BOD₅, T-P, T-N, SS effluent concentrations

被度를 포함시켰을 경우와 포함시키지 않았을 경우 수리부하율, 유입수 농도, 일 평균기온, 갈대의 被度와의 회귀분석한 결과는 Table 3과 같다.

결정계수가 가장 높은 수질 항목은 BOD₅이었으며, SS, T-P, T-N의 경우 비슷한 값을 나타내었다. 갈대의 被度を 고려하였을 경우와 고려하지 않았을 경우를 비교해 보면, 갈대의 被度を 고려하였을 경우의 결정계수가 모두 높고, RMSE가 낮은 것으로 나타나서, 갈대의 被度を 고려하였을

시 유출수의 농도를 좀더 정확히 추정할 수 있다는 것을 알 수 있다. 갈대의 被度の 포함 여부에 따른 R²의 차이는 T-P에서 가장 크게 나타났으며 T-N에서 가장 적게 나타났는데, 이 결과에 의하면 T-P는 식물에 의한 제거가 다른 항목에 비하여 상대적으로 중요한 역할을 하고 있음을 알 수 있다.

갈대의 被度を 포함한 예측치에 대한 실측치의 산점도는 Fig. 1과 같다. 결정계수가 높을수록

산점도의 밀집정도가 높다는 것을 의미하는데, 계산된 결정계수와 Fig. 1의 밀집정도가 서로 다르게 보이나 이것은 graph의 scale이 다르기 때문이다. 결정계수가 가장 높은 BOD₅의 산점도가 가장 밀집해 있으며, 특히 유출수가 저농도의 경우 측정치와 추정치가 매우 근접한 것을 알 수 있다. BOD₅와 T-P, SS의 산점도를 보면 저농도의 경우에는 예측치가 실측치보다 높은 경향을 나타내었는데, 이러한 관계식을 이용하여 설계하였을 경우는 안전설계로 인해서 보다 여유 있는 처리시설을 확보하게 될 것이다.

관계식 추정에 있어 사용된 수질 자료를 기존에 발표된 관계식에 적용시켜 갈대의 被度를 포함시켰을 경우를 Table 3에서 비교하였다.

본 연구에서 얻은 관계식과 문헌에 제시된 관계식을 비교해 볼 때 본 연구에서 얻은 관계식의 결정계수가 상대적으로 높은 것으로 나타났다. 이것은 당연한 결과인데, 이유는 실험에서 구한 자료를 이용한 관계식이 다른 관계식보다 상관성이 높았기 때문이다. EPA에서 제시한 BOD₅의 관계식의 결정계수가 0.64로서 문헌상에 제시한 관계식 중 비교적 높은 상관성을 나타내었으며, 갈대의 被度를 제외한 BOD₅ 유출수 농도추정 관계식의 결정계수(0.66)와 매우 근사한 값을 나타내었다.

그 외에 유입수의 농도와 수리학적 부하율만을 고려한 관계식의 결정계수는 매우 낮은 편이었으며, 이는 유출수의 농도 추정에 있어 유입수 농도와 수리학적 부하율 뿐 아니라 갈대의 被度나 미생물의 활동에 영향을 미치는 온도와 식물의 인자를 고려하지 않았기 때문일 것이다. 이와 같이 유입수 농도와 수리학적 부하율만을 고려한 관계식으로는 보다 신뢰성 있는 유출수의 농도추정에 한계가 있으므로, 본 연구에서와 같이 이틀 외에도 온도나 갈대의 被度를 고려한 관계식의 도출이 필요하다.

IV. 요약 및 결론

오수처리용 실험 인공습지를 2년간 현장 실험한 자료를 이용하여 수질 항목별 관계식을 만들었으며, 이 자료들은 기존 문헌의 관계식에 의한 추정치와 비교 분석하였다. 본 연구에 대한 결과를 요약하면 다음과 같다.

1. 갈대의 被度를 포함시켰을 경우 추정된 관계식의 결정계수는 BOD₅, SS, T-P, T-N 항목에 대하여 각각 0.74, 0.60, 0.59, 0.58이었으며, 갈대의 被度를 포함시키지 않았을 경우에는 각각 0.66, 0.52, 0.41, 0.57의 결정계수를 나타내어 갈대의 被

Table 3. Comparison of estimation equations for the experimental data

Classification		Estimation Equation	R ²	RMSE(mg/L)
BOD ₅	This study	$C_e = 0.15277H_L^{0.0515} \cdot C_i^{1.1467} \cdot T^{0.0667} \cdot P^{-0.2762}$	0.74	17.29
	EPA	$[C_e/C_i] = e^{-Kt}$	0.64	29.88
	Kadlec et al	$C_e = 0.11 \cdot C_i + 1.87$	0.34	41.91
T-P	This study	$C_e = 0.989H_L^{0.0129} \cdot C_i^{0.6718} \cdot T^{0.0181} \cdot P^{0.3499}$	0.59	2.86
	Kadlec et al	$C_e = 0.51 \cdot C_i^{1.10}$	0.45	5.10
T-N	This study	$C_e = 3.629H_L^{-0.2721} \cdot C_i^{0.6190} \cdot T^{-0.1375} \cdot P^{0.0496}$	0.58	23.11
	WPCF	$C_e = 0.193 \cdot C_i + 1.55 \cdot H_L - 1.75$	0.04	86.99
	Kadlec et al	$C_e = 2.6 + 0.46 \cdot C_i + 0.124 \cdot H_L$	0.45	40.38
SS	This study	$C_e = 0.2039H_L^{0.2144} \cdot C_i^{0.8047} \cdot T^{-0.3875} \cdot P^{0.4371}$	0.60	11.04
	Kadlec et al	$C_e = 4.7 + 0.09 \cdot C_i$	0.32	23.67

도를 고려할 경우에 상관성이 높은 추정이 가능하였다. 수질 항목을 기준으로 하였을 경우 BOD₅가 가장 높은 결정계수를 나타냈다.

2. 본 연구에서 이용된 수질 자료를 기존에 제시한 관계식에 적용하여 결정계수를 비교하였다. BOD₅ 항목에 있어 수온, 유입수 농도, 체류기간을 인자로 사용한 EPA의 관계식과 수리학적 부하율, 유입농도, 기온을 인자로 하여 연구에 의해 얻은 관계식과의 결정계수는 비교적 비슷하게 나타내었다. 그러나 유입수 농도와 수리학적 부하율만을 고려한 다른 관계식의 결정계수는 비교적 낮은 편이었다. 이유는 온도 및 식생이 처리에 미치는 영향을 고려하지 않았기 때문으로 생각된다.

본 연구는 수질개선용 인공습지의 설계인자와 설계기준도출을 위해 1997년 3월에서부터 1999년 4월까지의 수질자료를 통계적인 기법에 의해 유출수와 여러 인자와의 관계식을 제시하였다. 실험은 현재에도 진행중이며, 이러한 방법을 이용하여 많은 측정자료를 사용하여 추정공식을 개발하면 유출수의 농도를 보다 정확히 추정할 수 있을 것으로 예상된다.

참 고 문 헌

1. 농림부, 1997, '97 농업용수 수질조사 보고서, pp. 644.
2. 환경부, 1998, 환경백서, pp. 371-375.
3. 김형중, 1997, 자연정화방법을 이용한 농촌지역의 소규모 오폐수처리 시스템, pp. 35-37.
4. 안태석외 10인, 1997, 인공습지를 이용한 군부대 오수정화처리에 관한 연구.
5. 윤춘경, 권순국, 권태영, 1998, 인공습지의 농촌지역 오수정화시설에 적용가능성 연구, 한국농공학회지, 40(3), pp. 83-93.
6. EPA, 1988, Constructed Wetlands and Aquatic Plant Systems for Municipal Wastewater Treatment, pp. 2, 18-22.
7. Andrew D. Eaton, 1995, Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater.
8. WPCF, 1990, Natural Systems for Wastewater Treatment, Water Pollution Control Federation, Manual of Practice FD-16, pp. 241-248.
9. Kadlec, R. H., and Knight, R. L., 1996, Treatment Wetlands, pp. 603-640.