

## 二段式 複合 生物酸化에 의한 廢水處理

윤현희\* · 김영성 · 장호남 · 김영준\*\* · 이준식\*\*

한국과학기술원 화학공학과 · 생물공학과\*\*

(1982년 7월 5일 접수)

## Wastewater Treatment Using a Dual Biological Reactor System

Hyon Hee Yoon\*, Young Sung Ghim, Ho Nam Chang,  
Young Jun Kim\*\*, and Joon Shick Rhee\*\*

*Department of Chemical Engineering and*

*\*\*Department of Biological Science and Engineering,  
The Korea Advanced Institute of Science and Technology,  
Seoul 131, Korea*

(Received; July 5, 1982)

### 要 約

完全混合式 반응조와 充塡塔 반응조를 수직으로 연결한 새로운 형태의 폐수처리 장치를 고안하였다. 4.16l의 完全混合 반응조는 内部에 원통형의 流路를 설치함으로써 自動적으로 혼합이 되도록 하였고, 둘째 단으로 가기 전에 슬러지가 재순환되도록 하였다. 充塡塔의 부피는 1.84l였으며 Raschig ring으로 充塡하였다.

4, 7, 10, 15 시간의 네가지 체류시간과 292, 675, 1300mg/l COD의 세가지 유기물 농도에 대하여 각각 실험하였다. 유기물 負荷 1.6—1.9kg COD/m<sup>3</sup>·day에서 90% 이상의 處理效率을 보여주었는데 充塡塔의 마무리효과는 一段 瀑氣槽의 배출류를 기준으로 約 70%를 나타내었다. 슬러지 發生率은 gCOD當 0.21~0.31g으로 다른 공정에 비하여 낮았으며, 廢슬러지의 SVI는 最適 負荷에서 26.2—36.6이었다.

### ABSTRACT

A new dual biological reactor system for wastewater treatment was developed by combining CSTR and PBR. A circular tank of 4.16 liters with a concentric draft tube was used for the first stage and a column of 1.84 liters packed with Raschig rings was vertically attached. By arranging two reactors in one column, it is unnecessary to install a separate sludge settler

\* 한국에너지연구소(대덕)

for recycle.

The process was operated with various combinations of four retention times (4, 7, 10, 15 hours) and three organic concentrations (292, 675, 1300 mg/liter COD) with synthetic sewage. It was found that the process was capable of removing more than 90% of COD under organic loadings of 1.6 to 1.9 kg COD/m<sup>3</sup>·day. Results for polishing in PBR showed that about 70% of the influent COD from CSTR was removed and the effluent SS was maintained less than 30 mg/liter. The sludge yield was 0.21 to 0.31 g SS/g COD removed, and the SVI for an optimum organic loading was in the range 26.2 to 36.6.

## 1. 緒 論

生物學的 폐수처리는 폐수 中の 유기오염물질이 미생물의 대사작용에 의하여 분해되는 것을 이용한 것으로 여러가지 처리공정이 있다.<sup>1)</sup> 보통 반응조 內에서의 미생물의 성장형태에 따라 浮遊성장체제와 附著성장체제로 구별되며, 대표적인 공정으로는 각각 活性汚泥法과 撒水濾床法이 있다. 원래의 二段式 공정은 기존시설을 확장하는 가운데 이 둘을 직렬로 연결하였던 것으로, 공정상의 安定度가 좋아지고 浮遊 유기물질이 감소하여 性能이 증대된다고 알려져 있다.<sup>2,3)</sup>

그러나 Young<sup>4,5)</sup> 등은 一連의 論文에서 充填塔 공정이 二次 처리에 대하여 우수한 마무리

(polishing) 효과를 나타낸다고 보고하였다. 따라서 본 연구에서는 Fig. 1에서 보는 바와 같이 폭기조와 충전탑을 연결한 二段式 複合 生物酸化處理장치를 고안하였다. 첫단은 '瀑氣'에 의하여 완전혼합의 형태가 되고, 원통형 流路(draft tube)에 의하여 부유물질이 再循環되어 流失(washout)을 막을 수 있다. 침강원추(settling cone)를 통하여 슬러지를 배출시킴으로써 반응기 內에 원하는 슬러지 농도를 유지시킬 수 있으며, 첫단에서 제거되지 않은 유기물은 둘째단에서 제거된다. 보통 充填塔에서는 미생물이 자람에 따라 流路가 막히는 현상(clogging)이 일어날 수 있으나, 본 장치에서는 瀑氣에 의하여 이를 防止할 수 있게 된다.<sup>6)</sup>

## 2. 實 驗

새로운 생물학적 폐수처리장치에 대해 인공폐수로써 그 성능을 조사하였다. 실험장치는 두개의 unit에 동시에 인공폐수와 공기를 공급할 수 있도록 만들어졌으며, Fig. 2는 장치의 概略圖를 나타낸 것이다.

한 unit은 1단계와 2단계로 구성되어 있으며, 1단계는 内部에 流路(內徑 8.8cm, 높이 20cm)가 설치된 원통(內徑 14cm, 높이 25cm)이며, 밑부분에는 沈降원추(부피 200ml)가 부착되어 있다. 또한 반응기 내부에는 공기의 공급을 위해 多孔性 分散장치가 설치되어 있다. 2단계는 充填塔으로써 Polypropylene Raschig ring을 깊이 41cm까지 충전시켰다. 충전탑의 比表面積은 4.2cm<sup>2</sup>/cm<sup>3</sup>, 空隙率은 0.736, 빈 타

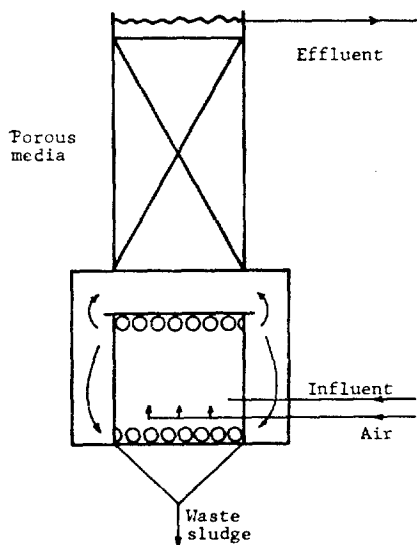
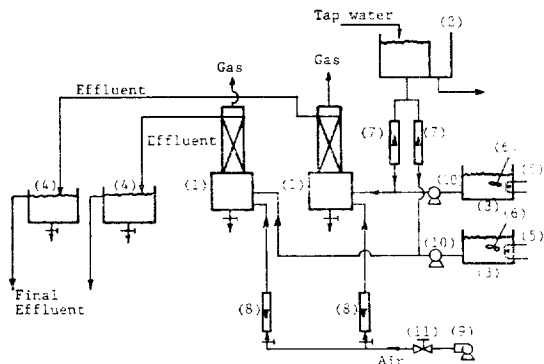


Fig. 1. Schematic diagram of dual biological system.



**Fig. 2.** Schematic flow diagram of experimental process

- (1) Reactor
- (2) Constant head tank
- (3) Feed tank
- (4) Settling tank
- (5) Cooler
- (6) Stirrer
- (7) Rotameter
- (8) Rotameter
- (9) Air compressor
- (10) Peristaltic pump
- (11) Pressure regulator

의 용량은 2500ml 이다.

반응기의 온도를 20°C로 유지하기 위해 外部에 호스를 감고 恒溫水槽에서 물을 순환시켰다.

人工廢水는 Table 1 과 같은 비율로 각 성분을 물과 적당히 섞어 貯藏溶液을 만든 다음(이때 COD를 측정해 놓는다), 원하는 기질의 농도는 반응기의 입구부분에서, 물과 4°C 이하로 유지시킨 냉각용기 속의 貯藏용액을 조절하여 섞

**Table 1.** Substrate composition.

Material	Amount (Mineral base)
Glucose	5g
Peptone	1g
Urea	0.5g
K <sub>2</sub> HPO <sub>4</sub>	1g
MgSO <sub>4</sub> ·7H <sub>2</sub> O	0.2g
FeSO <sub>4</sub> ·7H <sub>2</sub> O	10mg
CaCl <sub>2</sub>	10mg
Trace elements (Mn, Mo, Cu, Zn)	0.05 mg

어서 만들었다. 또한 공기의 공급량은 1 liter/min 정도로 유지시켰다.

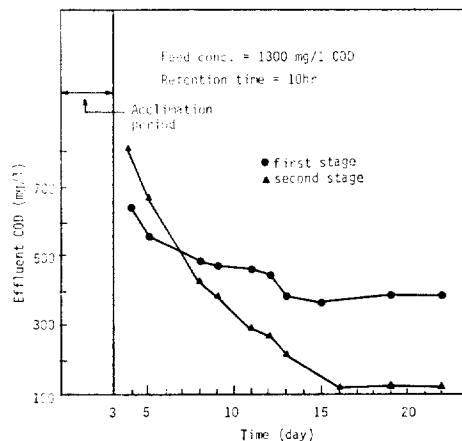
청계천 하수처리장의 循環에너지를 種菌으로 사용했으며, 種菌을 3 日 동안 인공폐수에 적응시킨 후 얻은 혼합미생물群을 반응기 內에 가득 채우고 실험을 시작했다.

실험은 연속적으로 基質과 공기가 반응기에 주입되도록 행하였으며, 첫단과 둘째단의 放出流의 COD, SVI, pH, DO, MLSS, 온도 등을 매일 측정하였다.<sup>7)</sup> 체류시간과 基質의 농도를 조업변수로 택하여 각각 4, 7, 10, 15 時間과 1300, 675, 292mg/l COD로 변화시켰다.

### 3. 結果 및 考察

### 3.1. 操業始作

작 반응기는 회분식으로 인공폐수에 적응시킨 혼합 미생물 群으로 가득 채운 후 연속식으로 조업하기 시작하였다. 이때 試料의 농도를 1300과 675mg/l COD, 체류시간은 10시간으로 조업조건을 정하고 하루 한번씩 效率를 분석하였다. Fig. 3에서 보는 바와 같이 반응기가 정상상태에 도달하는데 약 3주가 걸리는 것을 알 수 있다. 여기서 測定値가  $\pm 5\%$  이내로 변화가 없을 때를 정상상태로 보았다. 그림에서 初期에는 둘째단의 放出流의 COD가 첫단의 그것보다 높는데 이는 충전탑에서는 外部의 변화에 대한 적응이 쉽지 않기 때문이다. 조업조건을 바꾸었을 때



**Fig. 3.** COD removal for start-up.

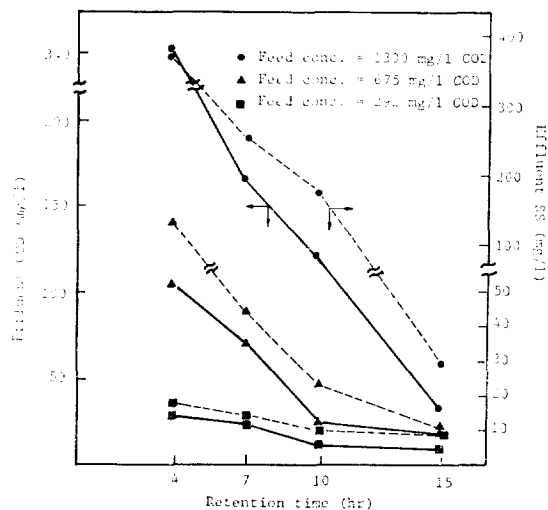


Fig. 4. Effluent quality as a function of retention time.

에는 약 1주일 후에 정상상태에 도달하였다. 이때 放出流의 pH는 7.0, D.O.는 5.0 ppm 부근에서 안정되게 유지되었다.

### 3.2. 반응기의 성능

체류시간에 따른 放出流의 水質을 Fig. 4에 나타내었는데, 각 試料농도의 증가에 따라 체류시간이 4, 7, 10, 15時間일 때 각각 만족할 만한 처리가 이루어짐을 알 수 있었다. 또한 3가지 試料농도에 대하여 체류시간의 COD 제거효율에 대한 영향을 Fig. 5에 나타내었는데, 試料농도

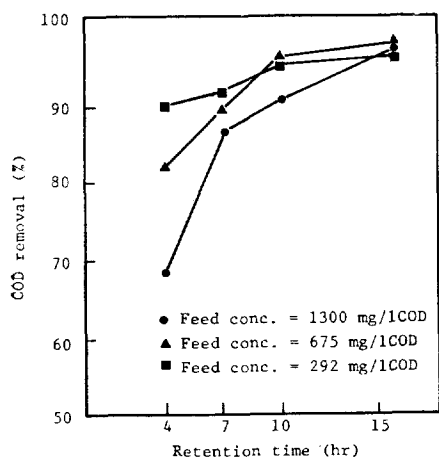


Fig. 5. Overall process performance as a function of retention time.

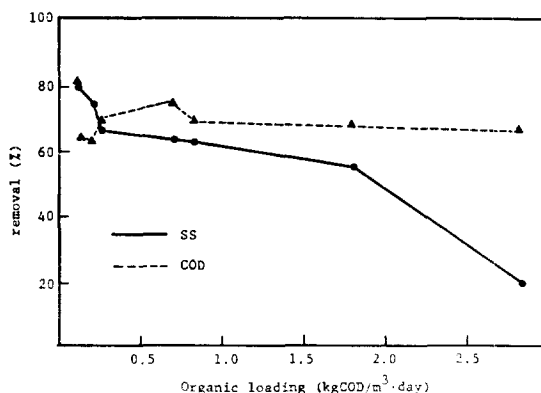


Fig. 6. Performance in second stage

1300, 675, 272mg/l COD에 대하여 체류시간이 각각 4, 7, 9時間일 때 COD 제거효율이 약 90% 정도임을 알 수 있다. 이때 각각의 유기물 부하는 1.8, 1.6, 1.9kg COD/m<sup>3</sup>·day이며, 본 공정에서 이 값들을 각각의 試料농도에 대한 최적부하로 여길 수 있다. 이것은 일반적인 활성오니법과 살수여상법의 유기물 부하<sup>1,2)</sup>와 비교하면 상당히 높은 값을 알 수 있다.

Fig. 6에 충전탑에서의 COD와 SS 제거효율을 나타내었다. 그림에서 넓은 범위의 유기물 부하에 대해 충전탑의 COD와 SS 제거효율이 크게 변하지 않는 점을 관찰할 수 있다. 즉 유기물 부하 0.5~2kg COD/m<sup>3</sup>·day에서 COD의 약 70%, SS의 60%가 除去됨을 알 수 있다.

2 단계에서의 COD 제거효율이 1 단계보다 낮은데, 1 단계에 비하여 포도당 등 炭素源이 줄어든다는 理由와 함께 脫窒化 工程에 의하여 제거하여야 할 Peptone과 같은 有機物이 試料에 포함되어 있기 때문인 것으로 생각된다. 이와같은 현상은 Fig. 4에서도 볼 수 있는데 시간에 따라 제거되는 비율은 증가하지만 그 속도는 감소함을 알 수 있다.

### 3.3. 슬러지 發生率 및 沈降性

유기물 負荷에 관련하여 gSS/g COD removed로 표현된 오타발생계수를 관찰하였다. Fig. 7에서, 유기물 부하가 낮을수록 슬러지 발생계수가 감소함을 볼 수 있다. 보통 슬러지발생율이 낮을수록 좋은 공정으로 여길 수 있는데, 슬러

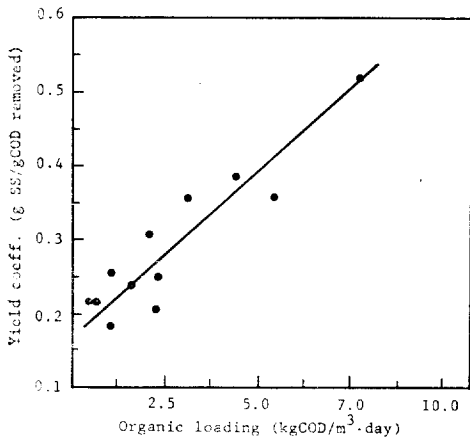


Fig. 7. Effect of organic loading on sludge yield coefficient.

지발생물은 폐수의 성분과 영양상태, 주로 자라고 있는 미생물의 종류, pH, 온도, 체류시간, 유기물부하 등에 따라 변한다.<sup>1)</sup> 따라서 다른 공정과의 비교에 어려움이 있기는 하나, 본 공정의 최적부하에서 나타난 슬러지발생물 0.21~0.31g SS/g COD removed는 通常의 공정에 비하여 낮은 값을 알 수 있다(Table 2).

슬러지의 침강성은 보통 SVI로 측정하고 있는데, 활성오니법에서는 SVI가 100 이하일 때 침강성이 좋다고 여기고 있다. 본 공정의 경우廢슬러지의 SVI는 최적부하에서 26.2~36.6이며 Fig. 8에서 보면, 沈降속도가 부피비율로 0.00167m<sup>-1</sup>, 密集속도가 0.0011m<sup>-1</sup>임을 알 수 있다.

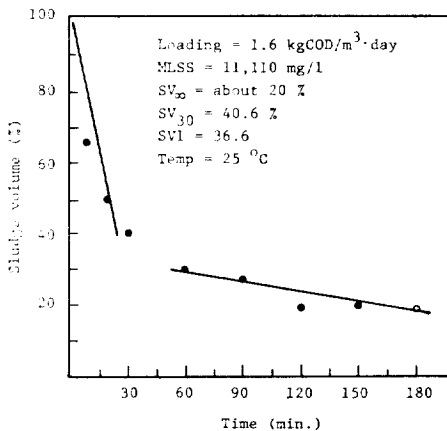


Fig. 8. Sludge thickening curve.

### 3.4. 工程解析

#### 3.4.1. 一段 曝氣槽

活性汚泥法에서 반응속도식은 우선 Lawrence와 McCarty<sup>6)</sup> 등이 사용한, 반응기 內의 基質 농도를 변수로 한 Monod 式을 생각할 수 있다. 그러나 여러 복합반응이 동시에 일어나는 폐수 처리의 특성上, 流入流의 농도를 고려하여 수정한 반응식이 최근 발표되고 있다.<sup>9-11)</sup> 본 논문에서는 基質의 比除去속도(specific removal rate)가 활성오니 負荷에 의존한다고 제안한 Suschka<sup>12)</sup>의 모형을 따랐으며 이때,

$$W = W_{\max} \frac{L}{K_w + L} \quad (1)$$

Fig. 9는 (1)식을 Lineweaver Burk plot 型으로 변환하여 구성한 것인데, 기질의 농도를 변수로 한 그림에 비하여 실험결과와 상당히 잘 일치함을 보여주고 있다.<sup>13)</sup> 이는 Suschka 모형의 타당성을 입증하는 것으로 工程의 설계에 활성오니 負荷를 변수로써 적절히 사용할 수 있음을 나타내고 있다.

#### 3.4.2. 二段 充塡塔

通常의 경우 充塡塔의 흐름은 筒流(plug flow)로 해석하게 되나, 첫단에서 曝氣가 행하여지는 본 공정과 같은 경우는 軸방향의 分散이 상당히

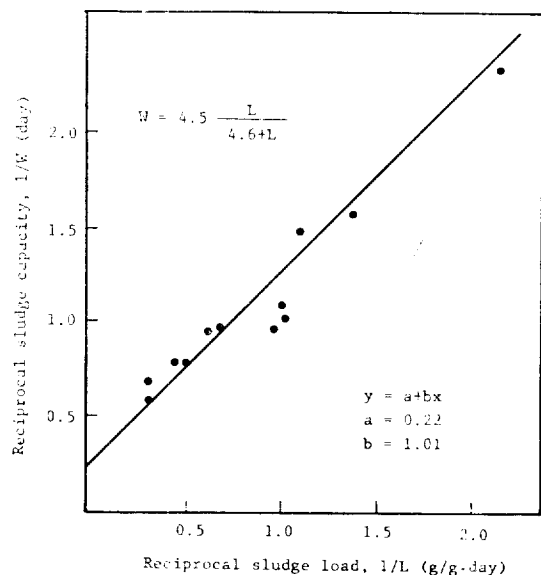


Fig. 9. Plot of 1/W vs. 1/L

Table. 2. Comparison of different systems (1, 2, 15, 16).

Process	Organic loading kgBOD/M <sup>3</sup> ·d	sludge yield	removal efficiency %	Effl. BOD mg/l
		$\frac{\text{g sludge}}{\text{gBOD removed}}$		
Dual biological system	0.8-1.2*	0.11-0.19*	90-98*	13-21*
Conventional activated sludge	0.3-0.8	0.4-0.6	85-95	10-30
Pure-oxygen activated sludge	1.6-3.3	0.4-0.6	85-95	20
High rate trickling filter	0.32-1.0	0.5	65-80	30-40
Low rate trickling filter	0.08-0.32	0.2	80-85	20
Rotating biological contactor	1.5-3.2	0.4-0.5	90	—

\* Estimated value based on COD/BOD = 1.6 - 20.

커지리라는 것을 짐작할 수 있다. Requa와 Schroeder<sup>14)</sup>가 시도하였던 바와 같이 탑을 一連의 混合槽로 생각하면,

$$\left(\frac{C_0}{C_e}\right)^{\frac{1}{n}} - 1 = K_1 \frac{\tau}{n} \quad (2)$$

反應은 미생물막의 표면에서만 일어난다고 보았으며, 一段階를 거친 폐수에 대한 마무리 作業임을 감안하여 反應次數는 1次로 하였다.  $n$ 을 변화시켜가며, (2)식의 좌우변을 구성하여  $K_1$ 을 계산하였는데,  $n=1$ 일 때가 모형식과 실험치와의 편차가 가장 작았다. 즉 曝氣하는 충전탑은 오히려 CSTR에 가까웠으며, 이때  $K_1$ 은 Fig. 10의 기울기로부터  $1.12\text{hr}^{-1}$ 임을 알 수 있다.

#### 4. 結 論

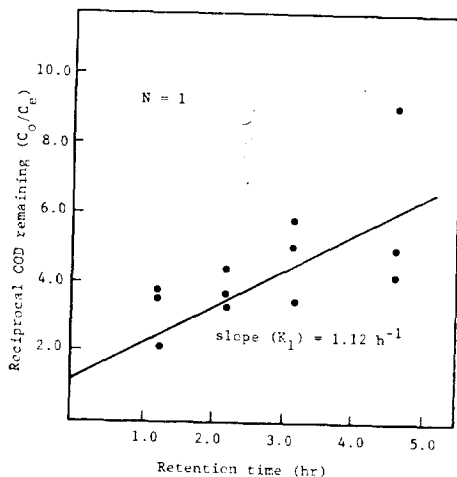
本 공정을 다른 공정들과 비교하여 Table 2에서 보는 바와 같이 상당히 우수함을 알 수 있었다.

各 項目別로 살펴보면,

(1) 本 논문에서 제안한 二段式 복합생물산화 처리법은 도시폐수와 유사한 농도의 폐수처리에 안정되게 사용할 수 있다.

(2) 보통의 活性汚泥法이나 撒水濾床法에 비해 높은 유기물 負荷에서 조업할 수 있다.

(3) 有機物 負荷  $1.6-1.9\text{kg COD/m}^3\cdot\text{day}$ 에서 90% 이상의 COD가 제거되며, 슬러지 발생

Fig. 10. Plot of  $C_e/C_0$  vs.  $c$ .

물은 gCOD 당 0.21~0.31g이었다.

(4) 充填塔에서의 마무리효과는, 一段 曝氣槽에서의 流入量을 기준으로 약 70%의 COD 제거 효율을 나타내었으며, 排出 SS는  $30\text{mg/l}$  이하로 유지되었다.

(5) 활성오니법에서 生物學的 반응속도는 활성오니 負荷에 크게 의존함을 알 수 있었으며, 曝氣하는 충전탑은 오히려 CSTR에 가까웠다.

#### Nomenclature

$C$  Substrate concentration ( $\text{ML}^{-3}$ );  $C_0$ , at entrance;  $C_e$ , at exit

$K_w$  Constant, equal to the sludge loading

when  $W = W_{\max} (T^{-1})$

- $K_1$  Biological reaction rate constant ( $L^{-1}T^{-1}$ )  
 $L$  Sludge loading ( $T^{-1}$ )  
 $n$  Number of mixing elements  
 $W$  Specific substrate removal rate capacity ( $T^{-1}$ );  $W_{\max}$ , maximum  $W$   
 $\tau$  Retention time ( $T$ )

### Abbreviations

- COD Chemical oxygen demand  
 CSTR Continuous stirred tank reactor  
 DO Dissolved oxygen  
 MLSS Mixed liquor suspended solids (SS)  
 SVI Sludge volume index  
 SV<sub>t</sub> Sludge volume after t minute settling  
 PBR Packed bed reactor

### References

1. Metcalf and Eddy Inc., "Wastewater Engineering: Treatment, Disposal, Reuse," 2nd ed., McGraw-Hill, N.Y., 1979.
2. A Joint Committee of the WPCF and the ASCE, "Wastewater Treatment Plant Design," MOP/8, Lancaster Press, Lancaster, 1977.
3. R.F. Roskopf, J.C. Young, and E.R. Baumann, *J. Env. Eng. Div., ASCE*, **102** (1976) 1005.
4. J.C. Young and P.L. McCarty, *J. WPCF*, **41** (1969) R160.
5. J.C. Young, E.R. Baumann, and D.J. Wall, *J. WPCF*, **47** (1975) 46.
6. R.L. Johnson and E.R. Baumann, *J. WPCF*, **43** (1971) 1640.
7. "Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater," 14th ed., Amer. Pub. Health Assn, 1975.
8. A.W. Lawrence and P.L. McCarty, *J. San. Eng. Div., ASCE*, **96** (1970) 757.
9. L. Vandevenne and W.W. Eckenfelder, Jr., *Water Res.*, **14** (1980) 561.
10. C.P. Grady and D.R. Williams, *Water Res.*, **9** (1975) 171.
11. P. Grau, M. Dohanyos, and J. Chudoba, *Water Res.*, **9** (1975) 637.
12. J. Suschka, *Water Res.*, **14** (1980) 197.
13. H.H. Yoon, M.S. Thesis, KAIST, Seoul, 1981.
14. D.A. Requa and E.D. Schroeder, *J. WPCF*, **45** (1973) 8.
15. W. Inoue, T. Tsuchiya, and H. Kawahara, *Water & Wastewater*, **22** (1980) 647.
16. R. Antonie, D. Klnuge, and J. Mielka, *J. WPCF*, **46** (1974) 498.

