

# 생물막 유동층 반응기를 이용한 폐수처리시 운전조건 고찰

이민규\*, 안갑환\*\*

## Operational Condition Evaluation in a Fluidized-Bed Biofilm Reactor for Wastewater Treatment

Min-Gyu Lee\* and Kab-Hwan An\*\*

### Summary

This experiment was conducted to investigate organic material removal efficiency according to the variance of organic loading rate and F/M ratio in a fluidized-bed biofilm reactor (FBBR). The substrate was glucose based synthetic wastewater. Substrate removal efficiency was about 95% and 85% at organic loading rate of  $10 \text{ kgCOD/m}^3 \cdot \text{day}$  and F/M ratio of 1.5, respectively. And substrate removal efficiency was above 70% at high organic loading rate of  $80 \text{ kgCOD/m}^3 \cdot \text{day}$  and high F/M ratio of 2.5.

An analytical model which could approximate the steady state concentrations in FBBR was developed. The concentration of COD obtained from experiments was consistent with model equation. By simulation, organic removal efficiency with changes of feed flow rate, recycle flow rate and recycle flow ratio were investigated.

## 서 론

유기성 폐수처리에 있어 현재까지 경제적이면서 가장 효율이 좋은 방법으로는 생물학적 폐수처리공법(biological wastewater treatment)으로 알려져 있다. 생물학적 폐수처리 공법에는 일반적으로 부유 미생물(suspended growth type)을 이용한 활성슬러지공법과 부착미생물(attached growth type)을 이용한 살수여상법 및 회전원판법이 대표적이다.

활성슬러지 공법과 같이 부유미생물을 이용하는 공법은 운전상의 한계부하량이 있어 그 처리기능의 보안을 위해 여러방법이 개발되고 있으나, 유입 기질의 여러가지 충격 부하에서는 공정의 안전성과 효율성에 많은 제약이 따른다. 살수여상법과 회전원판법은 미생물이 고농도로 부착할 수 있는 조건은 제공되나, 살수여상법은 미생물성장에 따른 산소전달 등의 물질확산에 어려움이 있고, 회전원판법은 미생물의 증식에 의해 지지재로부터 미생물층의 탈리에 의한 처리능력의 변화 및 지지재 폐쇄등의 문제점이 나타

\* 공과대학 화학공학과 (Dept. of Chem. Eng., Cheju Univ., Cheju-do, 690-756, Korea)  
\*\* 지산간호보건전문대학 환경관리과

나고 있다(Choi, 1973; LaMotta, 1976; Fox 등, 1990; Golla와 Overcamp, 1990; 박 등, 1990).

그러나 생물막 유동층 공법은 미디어에 미생물을 고농도로 부착 유지하는 것이 가능하며 SRT가 길게 유지되어 슬러지 발생량이 적고, 특히 갑작스런 부하 변동 및 유독성 폐수에 대한 안정도가 높은 장점을 지니고 있어 많은 연구의 대상이 되어 오고 있다 (Ngian, 1980; Kargi와 Park, 1982; Reiber와 Stensel, 1985; 김 등, 1991; 이 등, 1992).

생물막 유동층 공법을 현장에서 이용하기 위한 시도가 있으나, FBBR은 미생물의 특성에 의해서 영향을 받을 뿐만 아니라 유동 특성에도 매우 민감한 영향을 받으므로, 많은 parameter로 인하여 반응기 해석에 어려움이 있으며, 또한 반응기 구조 및 조작에 따라서 성능이 민감하게 달라지므로 조작상의 어려움을 가지고 있다(Ngian 등, 1980; Theodore, 1980; Mulcahy와 Shieh, 1987).

생물막에 의한 기질제거가 이루어지는 system은 용액상과 반고체상의 two phase system으로 기질은 용액중에 존재하고, 생화학 반응은 생물막내에서 이루어지므로 system의 해석은 부유식 미생물을 이용한 처리방식에 비해 훨씬 복잡하다. 그러나 생물막내에서의 기질분해와 세포합성에 관한 연구가 거의 없는 실정이라 생물막내에서도 부유 성장하는 미생물과 동일한 분해와 합성을 거치는 것으로 가정하여, 미생물에서 얻어진 각종 상수를 그대로 적용하여 사용하고 있다.

생물막 유동층 반응기에 의한 기질제거 효율을 표현하기 위하여 여러가지의 경험적 및 이론적 연구가 진행되어져 왔다. 그러나 지금까지는 FBBR에 관한 많은 연구가 대부분 저농도 범위에서의 공업체 및 가수분해물 직접 적용함으로써 처리효율면에서 좋은 결과를 얻었으나, 각각이 서로 다른 기질과 다른 범위에서 서로 다른 점만 고찰하였다(高瀨 등, 1987). 따라서 본 연구에서는 주 기질로 glucose를 사용한 합성폐수를 조제하여 기질을 단순화하고 농도 범위를 넓혀 고농도까지 변화시키면서 처리효율을 관찰하고 FBBR운전을 안정적으로 유지할 수 있는 조건을 고찰하고자 하였다. 각 농도에서의 유기물 제거속도를 조사한 다음, 이론적으로 구한 유기물 제거속도 모델식의 타당성 여부를 검토하고, simulation에 의

한 반응기의 운전조건을 살펴보고자 하였다.

## 이 론

생물막 유동층 반응기에서의 기질제거 효율을 표현하기 위한 이론적 모델을 검토하였다.

### 1. 회분실험 모델

회분실험 경우의 개요도는 Fig. 1과 같다. 회분실험의 모델은 그림에 나타낸 것과 같이 순환조 및 유동층은 완전혼합되며, 제거속도는 유동층내에서 일어나는 것으로 가정하였다.

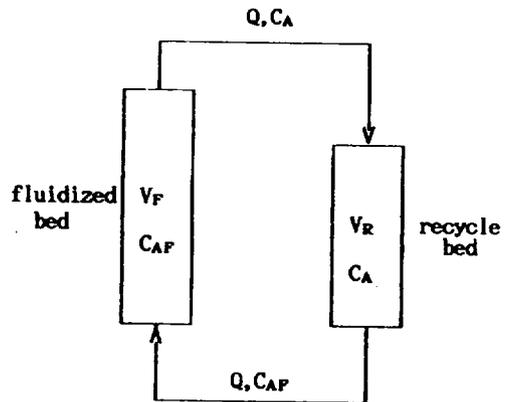


Fig. 1. Schematic diagram for batch experiment model.

순환조에서의 물질수지는 다음과 같이 되며

$$Q(C_A - C_{AF}) = V_R \frac{dC_{AF}}{dt} \quad (1)$$

유동층내에서의 물질수지는 다음과 같다.

$$Q(C_{AF} - C_A) = r_A V_F + V_F \frac{dC_A}{dt} \quad (2)$$

반응을 1차반응이라 가정할 때 반응속도식은 다음과 같으며

$$r_A = kC_A$$

이때 초기조건은  $t=0$ 에서  $C_{AF}=C_{AF0}$ ,  $C_A=C_{A0}$  이 된다.

식 (1)을 정리하면

$$C_A = \frac{V_R}{Q} \cdot \frac{dC_{AF}}{dt} + C_{AF} \quad (3)$$

식 (2)를 다시 정리하면

$$C_{AF} - C_A = kC_A \frac{V_F}{Q} + \frac{V_F V_R}{Q^2} \cdot \frac{d^2 C_{AF}}{dt^2} + \frac{V_F}{Q} \cdot \frac{dC_{AF}}{dt} \quad (4)$$

식 (4)에 식 (3)을 대입하여 정리하면 다음과 같이 된다.

$$a \frac{d^2 C_{AF}}{dt^2} + b \frac{dC_{AF}}{dt} + c = 0 \quad (5)$$

여기서  $a=V_F V_R$ ,  $b=QV_F + (Q+kV_F)V_R$  및  $c=kQV_F$ 이다.

식 (5)를 풀면 다음과 같이 된다.

$$C_{AF} = D_1 \exp(m_1 t) + D_2 \exp(m_2 t) \quad (6)$$

여기서  $m_1, m_2 = (-b \pm \sqrt{b^2 - 4ac}) / 2a$ 이며,  $D_1$ 과  $D_2$ 는 다음과 같다.

$$D_1 = \frac{C_{AF0}(m_2 V_R / Q + 1) - C_{A0}}{(m_2 - m_1) V_R / Q}$$

$$D_2 = \frac{C_{A0} - C_{AF0}(m_1 V_R / Q + 1)}{(m_2 - m_1) V_R / Q}$$

## 2. 연속실험 모델

연속실험의 경우 개요도는 Fig. 2와 같다. 순환조에서의 물질수지는 다음과 같으며

$$FC_{A0} + QC_A = C_{AF}(F+Q) \quad (7)$$

유동층에서의 정상상태 물질수지는 다음과 같이 된다.

$$QC_{AF} = QC_A + V_F \cdot r_A \quad (8)$$

1차반응의 경우 반응속도는 아래와 같다.

$$r_A = kC_A$$

식 (7)을 정리하면

$$C_{A0} + RC_A = C_{AF}(1+R) \quad (9)$$

식 (8)을 정리하면

$$C_{AF} = C_A(1+k\tau) \quad (10)$$

여기서  $\tau = V_F / Q$ 이며,  $R = Q / F$ 이다.

따라서 식 (9)와 (10)을 정리하면 다음과 같이 된다.

$$C_{AF} = \left( \frac{C_{A0}(1+k\tau)}{(1+(1+R)k\tau)} \right) \quad (11)$$

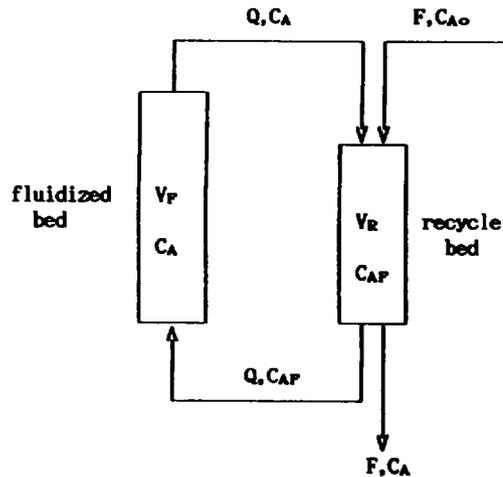


Fig. 2. Schematic diagram of continuous experiment model.

## 실험재료 및 방법

본 실험에서 폐수는 glucose를 주 기질로한 합성 폐수를 사용하였으며, 내경이 8.9cm, 높이가 190cm, 총 부피가 12L인 아크릴 원형관을 반응기로 사용하였다. 반응기는 COD 농도를 측정하기 위해 약 40cm 간격으로 6개의 채취구를 설치하였으며, 반응기 측

면에 아크릴로 jacket을 설치하여 순환용 펌프로 항온수를 순환시켜 항온을 유지시켰다(이 등, 1992). Media는 비중이 약 2.65인 동해안산 규사를 체로 걸러서 sauter 평균직경이 약  $629\mu\text{m}$ 인 입자를 사용하였다.

유입 폐수는 정량펌프를 사용하여 반응기 하부에 설치된 시료 유입구에서 주입시켰으며, 반응기 상부에 교반기를 설치하여 과도 성장한 bioparticle을 깨뜨려 media는 다시 반응기로 유입시키고 슬러지는 반송시켰다. 반응기 밖으로 유출되는 media는 상부에 설치된 media trap을 통하여 다시 반응기로 유입시켰다. 반응기내 산소의 공급방식은 간접 폭기방식으로 저장 탱크에서 산소를 순환수에 용존시켜 반응기로 공급하였으며, 반응조내의 온도는 항온수조와 자동 온도조절 장치를 사용하여  $22\pm 1^\circ\text{C}$ 로 유지하였다.

본 실험에 사용된 시료분석은 Standard method (1985)에 따라서 행하였다.

## 결과 및 고찰

### 1. 유기물 제거속도

유동층내의 미디어 입자에 부착된 미생물에 의한 유기물 제거속도를 검토하기 위하여 Fig. 1과 같이 회분실험을 행하여 유동층에서의 COD농도를 순환 개시 직후부터 시간경과에 따라 측정한 실험결과를 Fig. 3에 나타내었으며, 연속운전시 유입수의 COD농

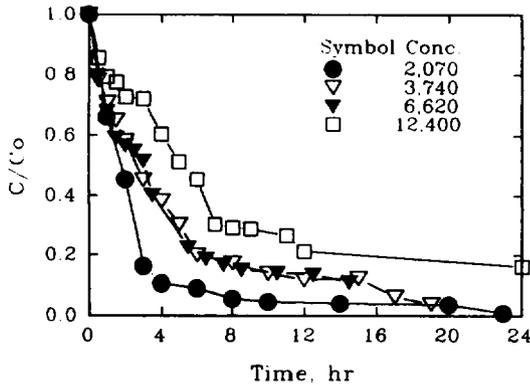


Fig. 3. The change of COD concentration on operation time.

도변화에 따른 유출수의 농도 변화를 Fig. 4에 나타내었다. Fig. 4에서 보여지는 바와 같이 생물막 유동층 반응기에서는 유입수의 변동이 큰 쪽으로 변할 경우에도 처리수는 빠른 시간내에 안정됨을 알 수 있었다.

모델 식(6)으로 부터 계산된 계산결과와 실험치를 비교해 본 결과 Fig. 5에 나타난 바와 같이 비교적 잘 일치하였다.

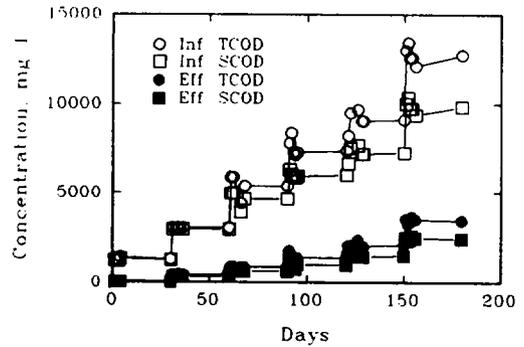


Fig. 4. Effect of operation period on influent and effluent COD concentration.

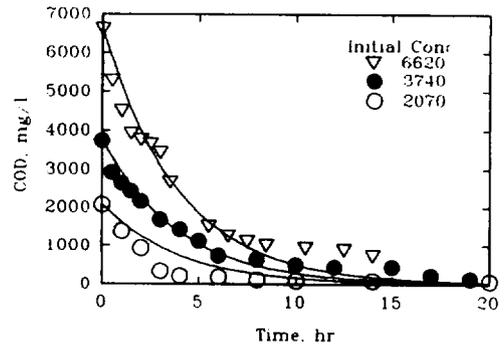


Fig. 5. Comparison of obtained value and calculated value from model eq. (6). (Solid line is obtained from model eq.)

### 2. F/M 변화에 따른 제거 효율

HRT를 5시간, 운전온도를  $22^\circ\text{C}$ 를 유지하여 미생물막이 완전히 정상 상태에 도달했을 때, F/M비에 따른 COD 제거효율을 Fig. 6에 나타내었다. 그림에서 보면 F/M비가 1.5에서 85% 이상의 제거효율을 보이며, F/M비를 2.0까지 높여 주어도 80% 이상의 제거

효율을 보였다. 그러나 F/M비가 2.0보다 커지면 제거효율은 감소하여 F/M비가 2.5 정도에서는 70% 정도의 제거효율을 보였다. 일반적인 활성 슬러지 공정의 F/M 0.5-0.6과 비교해 볼 때 약 2.5의 F/M에서 유기물 제거효율은 70% 이상을 유지하고 있으므로 생물막 유동층 반응기는 높은 F/M 조건하에서도 처리능이 우수함을 알 수 있었다.

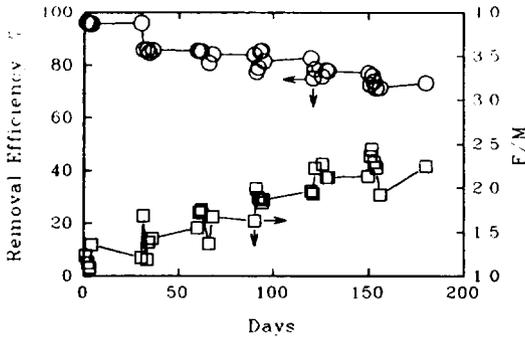


Fig. 6. F/M ratio and COD removal efficiency versus operation time.

### 3. 유기물 부하량에 따른 제거 효율

미생물막이 완전히 정상 상태에 도달했을 때, 유기물 부하량에 따른 COD 제거효율을 Fig. 7에 나타내었다. 그림에서 보여지는 바와 같이 유기물 부하량에 따른 제거효율도 F/M비에 따른 제거효율과 유사한 변화를 보였다. 유기물 부하량이 10kgCOD/m<sup>3</sup>·day에서 95% 이상의 제거 효율을 보이며, 20-50kgCOD/

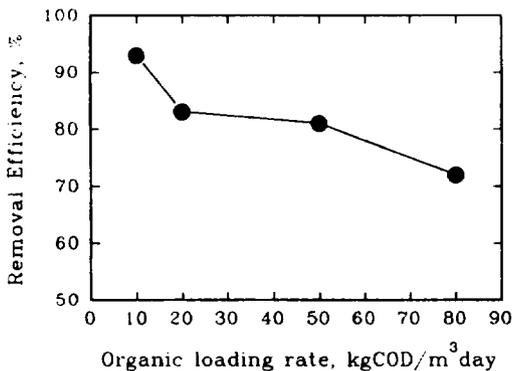


Fig. 7. Effect of organic loading rate on COD removal efficiency.

m<sup>3</sup>·day에서도 80% 이상의 제거효율을 나타내었고, 유기물 부하량 80kgCOD/m<sup>3</sup>·day에서도 70% 이상의 제거효율을 보이고 있다. 일반적인 활성슬러지 공정의 유기물 부하량 1.5kgCOD/m<sup>3</sup>·day와 비교해 보면 FBBR 공법이 고농도 폐수를 처리하는데 우수할 뿐만 아니라 유기물 부하량의 변화에도 안정함을 알 수 있었다.

### 4. 시뮬레이션 결과

미생물막 유동층 반응기의 운전조건을 구하기 위하여 정상상태 조건하에서 식(11)을 이용하여 시뮬레이션하였다. 원수유량의 영향을 살펴보기 위하여 원수유량 F를 변화시킬 때 처리수의 COD제거율을 계산한 결과를 Fig. 8에 나타내었다. 그림에서 보여지는 바와 같이 원수유량을 0-3ℓ/day의 범위에서 변화시킬 때 제거율은 약 35% 변하였다. 그러나 유동층내 체류시간 τ의 변화가 COD제거율에 미치는 영향은 매우 작음을 알 수 있었다.

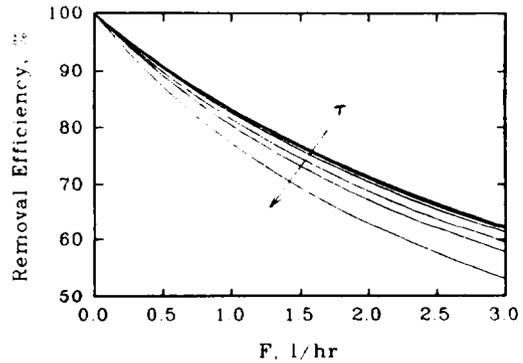


Fig. 8. Effect of feed flow rate on removal efficiency.

순환유량의 영향을 살펴보기 위하여 순환 유량비 R 및 원수유량 F를 parameter로 하여 순환유량 Q를 변화시킬때 처리수의 COD 제거율을 계산한 결과를 Fig. 9에 나타내었다. 그림에서 보여지는 바와 같이 R을 parameter로 하여 순환유량을 0-9ℓ/hr의 범위로 변화시키더라도 COD 제거율은 약 10% 변하였으며, F를 parameter로 할 경우 순환유량의 변화에 따른 COD 제거율의 영향은 매우 적으며 순환유량이 3 ℓ/hr 이하에서는 제거율이 급격하게 감소됨을 알 수

있었다. 이러한 특성은 생물막 유동층 반응기내의 메디아의 유동특성을 제어하고, 운전 관리하는데 있어 중요한 자료가 될 수 있을 것으로 생각된다.

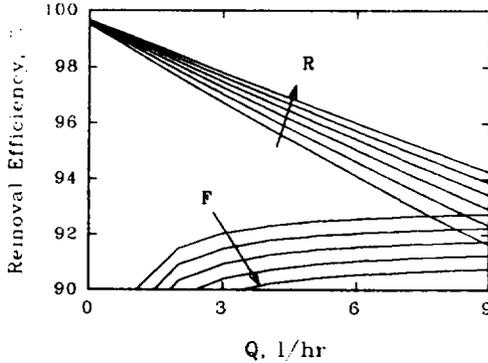


Fig. 9. Effect of recycle flow rate on removal efficiency.

## 적 요

본 실험에서는 미생물막 유동층 반응기내에 유기물 부하량과 F/M비의 변화에 의한 유기물 제거효율을 검토하고자 하였다. 사용된 폐수는 글루코오스를 기질로한 합성폐수이며, 기질 제거효율은 유기물 부하량이  $10 \text{ kgCOD}/\text{m}^3 \cdot \text{day}$ 에서 95%, F/M 비가 1.5일 때 85%에 달하고, 유기물 부하량이  $80 \text{ kgCOD}/\text{m}^3 \cdot \text{day}$ , F/M 비가 2.5 이상에서도 70% 이상의 높은 제

거효율을 보였다.

정상상태 미생물막 유동층 반응기운전시 유기물 농도를 구할 수 있는 해석적 모델식으로 부터 구한 값과 실험치는 잘 일치하였다. 또한 원수유량, 순환유량 및 순환유량비의 변화에 따르는 유기물 제거효율의 변화를 모델식을 시뮬레이션하여 조사하였다.

## 기 호 설 명

$C_A$	COD concentration	( $\text{ML}^{-3}$ )
$C_{AO}$	initial COD concentration	( $\text{ML}^{-3}$ )
COD	chemical oxygen demand	( $\text{ML}^{-3}$ )
$D_1, D_2$	constant in eq. (6)	-
F	flow rate of raw water	( $\text{L}^3 \text{T}^{-1}$ )
F/M	food : microorganism	-
HRT	hydraulic retention time	(T)
Q	recycle flow rate	( $\text{L}^3 \text{T}^{-1}$ )
R	flow rate ratio = $Q/F$	-
$V_F$	liquid volume in fluidized bed	( $\text{L}^3$ )
$V_R$	liquid volume in recycle bed	( $\text{L}^3$ )
k	reaction rate constant	( $\text{T}^{-1}$ )
$m_1, m_2$	constant in eq. (6)	-
$r_A$	reaction rate	( $\text{ML}^{-3} \text{T}^{-1}$ )
t	time	(T)
$\tau$	mean residence time in fluidized be	(T)

## 참 고 문 헌

- Choi, E., 1973. A Fixed Media Complete Mixing Activated Sludges, ph. D. Thesis, Univ. of Kansas, Lawrence.
- Fox P., T. S. Makram and T. B. John, 1990. A Comparison of Media Types in Acetate Fed Expanded-Bed Anaerobic Reactors. *Wat. Res.*, Vol. 24(7), 827-835.
- Golla, P. S. and T. J. Overcamp, 1990. Simple Solutions for Steady-State Biofilm Reactors. *J. of Environ. Eng.*, Vol. 116(5), 829-836.
- Kargi, F. and J. K. Park, 1982. Optimal Biofilm Thickness for Fluidized-Bed Biofilm Reactors. *J. Chem. Tech. Biotechnol.*, Vol. 32, 744-748.
- 김동석, 안갑환, 이민규, 송승구, 1991. 생물막 유동층 반응기에서 미생물 성장에 따른 속도론적 고찰. *한국생물공학회지*, Vol. 6(2), 115-121.
- 高瀬均, 苗田則義, 杉本益規, 1987. 流動層型生物膜廢水處理裝置によるBOD除去造作の検討. *下水道協會誌*, Vol. 24(272), 54-64.
- LaMotta, E. J., 1976. Internal Diffusion and Reaction in Biological Films. *Environmental Science and Technology*, Vol. 10(8), 765-769.
- 이민규, 안갑환, 김성수, 1992. 생물막 유동층 반응

- 기름 이용한 폐수처리시 미생물 농도 예측에 관한 연구. 제대논문집, Vol. 35, 209-216.
- Mulcahy, L. T. and W. K. Shieh, 1987. Fluidization and Reactor Biomass Characteristics of The Denitrification Fluidized Bed Biofilm Reactor. *Wat. Res.*, Vol. 21(4), 451-458.
- Ngian, K. F., 1980. Bed Expansion characteristics of Liquid Fluidized Particles with Attached Microbial Growth. *Biotech. and Bioeng.*, Vol. 22, 1843-1856.
- 박태주, 이민규, 안갑환, 송승구, 1990. 고정 생물막 공법을 이용한 고농도 폐수 처리시 비표전적 영향. 화학공학회지, Vol. 28(1), 114-123.
- Reiber, S. and D. Stensel, 1985. Biologically Enhanced Oxygen Transfer in Fixed Film System. *JWPCF*, Vol. 57(2), 135-142.
- "Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater", 1985. APHA, AWWA, WPCF, 16th ed.
- Theodore, C. S., 1980. Fluidized Bed for Biological Wastewater Treatment. *ASCE*, Vol. 106, 227-241.