

굴패각을 담체로 사용한 침적고정 생물막공법 및 예측

문 병 현 · 이 택 순 · 서 정 윤 · 서 희 정
창원대학교 환경공학과
(1996년 12월 21일 접수)

The Submerged Biofilm Process using Oyster-Shell Media for Wastewater Treatment and Prediction

Byung-Hyun Moon, Taek-Soon Lee, Jeoung-Yoon Seo, and Hee-Jung Seo

Dept. of Environmental Engineering, Chang-Won National University

(Manuscript received 21 December 1996)

This study was conducted to use oyster shell as media for biological wastewater treatment. The comparison between the removal efficiencies of the activated sludge and the submerged biofilm process with oyster shell media (5% of reactor volume) for domestic sewage treatment was made. The contaminant removal efficiencies of the submerged process were higher than that of the activated sludge process. And the removal efficiencies of the submerged biofilm process with oyster shell media of 10% and 18% were investigated at various loading rate. The removal efficiencies of 10% were higher than that of the 18% during the experimental period. The effluent concentration from the submerged biofilm process using oyster shell media was predicted by the Stover-Kincannon model.

Key words : Oyster Shell, Activated Sludge Process, Submerged Biofilm Process, The Stover-Kincannon model.

1. 서 론

유기성 폐수처리에 있어서 가장 보편적으로 이용되는 방법은 미생물을 이용하는 생물학적 처리방법이다. 특히, 부유성 미생물을 이용한 활성슬러지법이 사용되고 있으나, 이 방법은 다량의 슬러지 발생과 사상균 번식 등으로 슬러지 벌킹현상에 의한 고액분리와 질소, 인의 제거효율이 비교적 낮은 문제점이 있다. 따라서, 이러한 문제점을 해결하기 위해 접촉담체를 이용한 생물막법에 대한 연구가 진행되고 있으며, 이는 폭기조 내에 미생물 담체를 이용하여 다량의 미생물을 유지함으로써 처리효율을 높이는 동시에 슬러지 발생도 줄일 수 있다. 그러나

미생물 담체를 이용한 생물막법 역시 담체의 막힘현상, 미생물막의 탈리현상 등이 문제점으로 지적되고 있어 실제현장에 적용할 경우 보다 효율적인 처리를 위해 많은 노력이 요구되어지며 미생물 담체의 재질과 형태, 경제적인 면 등을 감안하여 담체의 선택을 고려해야 한다.

우리 나라의 해안 양식업에서 비중이 높은 굴양식업은 부산물로 다량의 굴패각을 발생시키며 이는 연안어장의 오염과 공유수면 관리상 지장을 초래하고 자연경관을 훼손시키는 등 환경문제를 초래하고 있다. 특히, 경상남도의 총 패각 발생량은 28만톤에 이르고 있으나 그 중

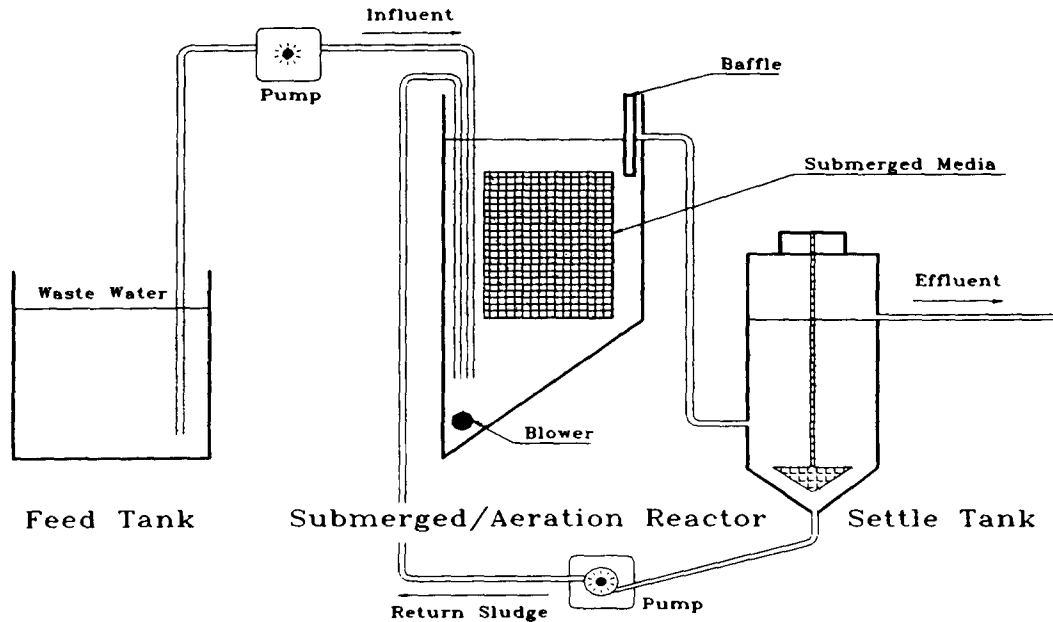


Fig. 1. Schematic Diagram of the Experimental Apparatus.

10%정도만이 가공 처리되고 있을 뿐이다(김선근 외 4인, 1996; 황선치 외, 1994). 이러한 현황을 감안하여 볼 때, 해양 수산 폐기물인 굴패각의 처리방안과 자원으로의 재활용 연구는 시급하다고 할 수 있다. 담체로서의 굴패각은 표면적이 불규칙할 뿐만 아니라 비표면적이 높아 생물막 형성이 용이하리라 생각된다.

본 논문에서는 해양수산폐기물인 굴패각을 생물막 담체로 적용하여 폐수처리의 효율을 평가하고 처리수의 수질을 유추할 수 있는 모델을 정립하여 실측된 수질과 비교하였다.

2. 재료 및 방법

본 실험은 실제하수를 이용하여 활성슬러지법과 굴패각을 생물막 담체로 사용한 침적법의 비교실험을 하였으며, 합성폐수를 사용하여 고부하조건에서 굴패각 충진을 변화에 따른 비교실험을 수행하였다.

2.1 실험장치

본 연구에 이용한 실험장치의 개략도를 Fig. 1에 나타내었다.

실험장치는 상용화된 장치(Minamotor)를 사용하였으며 폭기조의 크기는 10 l 이고 침전조의 크기는 용적 6 l 이다. 반응조 내의 원수

의 공급은 정량펌프를 이용하여 하향류식으로 공급하였으며, 자동온도 조절기를 이용하여 반응조 내의 온도를 20 ℃전후로 유지하였다. 폭기조 내의 용존산소 농도는 수시로 측정하여 농도가 3~5 mg/l 로 유지하도록 공기유량을 조절하였다. 또한, 폭기로 인한 슬러지의 유출을 방지하기 위해 폭기조 유출부 부근에 방해판을 설치하였다.

사용된 담체는 굴 양식업이 활발한 남해안에 대량으로 야적되어 있는 굴패각을 수집하여 염분 및 기타 이물질 제거한 후 100~105 ℃에서 약 2시간 건조기에서 건조시켜 폭기조 내에 주입하였다. 굴패각의 겉보기밀도는 1.48 g/cm³으로 측정되었다(東畑平一郎 외, 1989).

2.2 실험방법

본 연구에서는 각각 폭기조 부피의 5%, 10%, 18%의 굴패각을 폭기조에 충전하여 실험하였다. 5%의 굴패각 충진을 실험에서는 일반하수를 사용하여 수리학적 체류시간을 변화시키면서 실험하였고, 10%, 18%의 충진을 비교실험은 인공하수를 이용하여 고부하에서 실험을 수행하였다.

2.2.1 5% 침적형법과 활성슬러지법

Fig. 1과 같이 활성슬러지 반응조와 동일한

Table 1. Characteristics of Influent Wastewater (unit : mg/ℓ)

Parameters	Range	Average
pH	6.60 ~ 7.56	6.97
TBOD	60.0 ~ 153.0	80.1 (22.4)
TCOD	32.0 ~ 108.0	70.1 (17.1)
SBOD	12.0 ~ 72.0	35.0 (12.0)
SCOD	12.5 ~ 51.0	25.7 (7.4)
SS	19.0 ~ 116.0	59.3 (18.0)
T-N	16.15 ~ 32.74	25.39 (3.5)
NH ₄ -N	12.44 ~ 29.17	20.99 (3.8)
NO ₂ -N	0.01 ~ 0.13	0.07 (0.02)
NO ₃ -N	0.00 ~ 0.38	0.07 (0.1)
T-P	1.56 ~ 8.87	5.78 (1.1)

* ()는 표준편차

반응조내에 침적조를 제작·설치하였다. 침적조는 망상형으로 가로 175 mm, 세로 107 mm, 높이 175 mm의 크기로 제작하였다. 이용된 굴패각은 침적조내에 충진을 용이하게 하고 폐수와 굴패각의 접촉면을 높이기 위해 3~5 cm 크기로 분쇄하여 폭기조의 부피의 5%를 침적시켰다. 실험에 사용할 슬러지는 본 실험에서 사용한 오수로 약 1개월 동안 순화시킨 후 MLSS농도 2630 mg/l (MLVSS 1960 mg/l)로 각각의 반응조에 주입하여 운전하였다.

5% 침적형법과 활성슬러지법의 처리효율을 비교하기 위해 각 반응기의 수리학적 체류시간(HRT:Hydraulic Retention Time)을 12 hr, 10 hr, 8 hr, 6 hr, 4 hr으로 조정하여 실험하고 미생물의 적응기간은 체류시간을 변화시킨 후 10일 경과한 후를 정상상태로 가정하여 분석하였다. 실험에 사용된 유입폐수를 Table 1에 나타내었다. 본 실험에 사용한 유입시료는 구내의 식당오수를 집수조 입구에서 직접 채수하여 1 mm체에 여과시켜 비교적 큰 조대 입자는 제거한 후 사용하였다. 원수의 수질을 최대한 일정하게 유지하기 위해 점심시간 2시간 경과 후에 채취하였으나 그 농도의 변화폭이 상당히 컸다. 원수 BOD:T-N:T-P의 비는 100 : 32 : 7로 영양염류의 농도가 높았다. 원수의 pH범위가 중성부근을 유지하였으므로 pH의 조절은 하지 않았으며 시료는 4 ℃냉장 상태에서 보관하였다.

2.2.2 10% 현수법과 18% 침적형법

Table 2. Composition of Synthetic Wastewater

Compounds	g/ℓ-tap water
Glucose	4.0
Peptone	4.0
Yeast	0.4
(NH ₄) ₂ SO ₄	3.2
KH ₂ PO ₄	0.64
MgSO ₄ ·7H ₂ O	0.80
MnSO ₄ ·6H ₂ O	0.072
FeCl ₃ ·6H ₂ O	0.004
CaCl ₂ ·2H ₂ O	0.08

이물질을 제거한 후 세척한 굴패각을 분쇄하지 않고 원형 그대로를 이용하여 각각의 반응조에 10%와 18%로 충진하였다. 반응조 내 굴패각 주입방법을 충진을 10%의 경우는 반응조내에 줄을 이용하여 현수시켰으며, 18%의 경우는 반응조내에 직접 침적하여 충진하였고 MLSS농도 5200 mg/l (MLVSS 4300 mg/l)로 주입하여 운전하였다.

각 반응기의 수리학적 체류시간을 6시간으로 고정하고 실험에 사용한 폐수는 glucose, peptone과 여러 가지 무기물질을 첨가하여 인공시료(Yamamoto et al, 1989)를 조제하여 부하율에 적합하도록 희석하여 사용하였다. 그 조성을 Table 2에 나타내었다.

2.3 분석방법

시료의 분석은 Standard Method(APHA, 1991)에 준하여 실험하였으며 COD_{Mn}은 수질오염 공정시험법에 따라 수행하였다. NH₃-N, NO₂-N, NO₃-N, 인산염인은 시료를 여과지여과한 후 여액을 이용하였고, T-N, T-P는 여과하지 않고 고압멸균기를 사용하여 전처리 후 자외선 흡광광도법으로 측정하였다. pH와 DO는 pH meter, DO meter를 이용하여 측정하였다.

3. 결과 및 고찰

3.1 처리효율의 비교

BOD부하에 따른 제거율을 Fig. 2에 나타내었다. 실제하수를 이용한 5%충진율의 침적형법과 활성슬러지법에서는 침적형법이 80% 이상의 안정적인 효율을 나타내었으며, 10%침적형법과 18%침적형법에서는 10%침적형법이 1.0 kg BOD/m³/day이상에서 더 우수한 제거

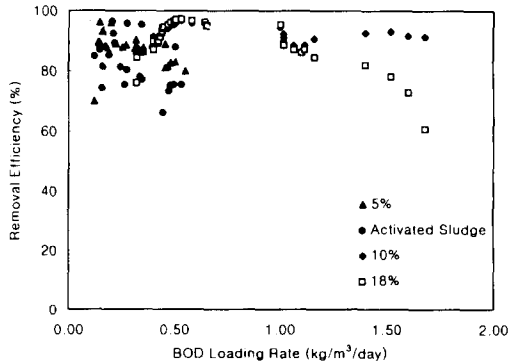


Fig. 2. BOD Removal Efficiencies versus BOD Loading Rates.

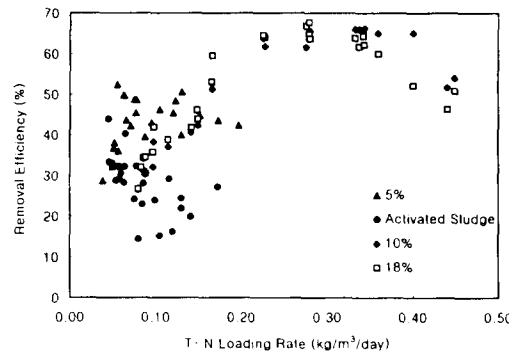


Fig. 3. T-N Removal Efficiencies versus T-N Loading Rates.

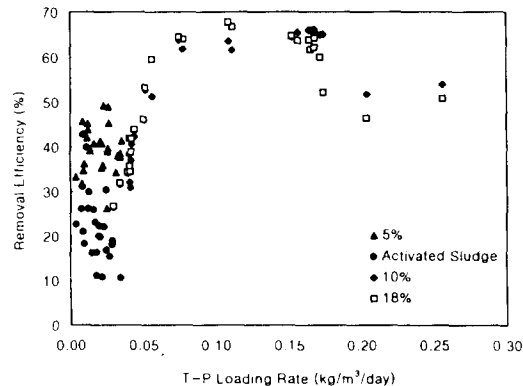


Fig. 4. T-P Removal Efficiencies versus T-P Loading Rates.

효율을 나타내었다. 이는 18%침적형법에서는 굴패각의 공급과 부착된 생물막 내에 산소의 공급이 원활하지 못해 생물막 내에 혐기성 상태가 진행됨에 따라 수질의 악화현상이 발생되었다고 생각된다. T-N의 경우 Fig. 3에 나타

낸 바와 같이 활성슬러지법은 평균 28 %의 제거율을 보였으며 5%침적형법에서는 42 %의 제거율을 나타내었다. 또한, 충진율 변화에 따른 실험에서 대략 50 %정도의 제거율을 보였으며 부하율이 증가할수록 10%침적조가 제거효율이 좋았다. Fig. 4에는 T-P부하율에 따른 제거율을 나타내었다. T-P의 경우도 굴패각을 담체로 사용한 침적형법의 제거효율이 높았으며 T-N의 제거 경향과 비슷한 경향을 나타내었다. 이는 T-P의 제거가 미생물에 의한 제거인지 굴패각 자체성분과의 화학적 결합에 기인한 것인지의 추가 실험이 필요하다고 사료된다.

3.2 모델의 적용

침적형 생물막공정은 충진된 담체에 미생물을 부착시켜 부유성장 미생물을 이용하는 활성슬러지법보다 미생물을 다량 유지하여 처리효율을 높일수 있는 장점이 있다. 이에 대한 동력학적 해석을 위해서는 반응기의 운전중에 미생물의 양을 측정하여야 한다. 그러나, 정확한 미생물의 양을 측정하는 것은 어렵고 측정방법에 따라 오차가 심하다. 또한 반응기의 운전중 담체에 부착한 미생물을 측정한 후 다시 담체에 부착시켜야하는 등의 어려움이 있다(박종웅과 유명진, 1990; 이규훈 외, 1995).

따라서 본 연구에서 굴패각을 담체로 이용한 생물막법에 용이하게 적용할수 있는 모델을 선택하여 모델과 실험결과를 비교하였다. 선택한 모델은 Stover-Kincannon 모델로써 침적형 생물막 반응기의 예측에 적합하다고 보고되고 있다(이규훈 외, 1995; Shgehisa, 1989; Simn, 1992).

완전혼합 반응기에서 Stover-Kincannon Model은 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$L_R = \frac{Q(S_0 - S_e)}{A} = M \frac{L_0}{k + L_0} \quad (2.1)$$

여기서, L_0 = 유기물 부하율($g/m^2/day$)

L_R = 기질 제거율($g/m^2/day$)

M = 최대 비기질 제거율($g/m^2/day$)

k = 비기질 제거율($g/m^2/day$)

S_0 = 유입기질농도(mg/l)

S_e = 유출기질농도(mg/l)

A = 매디아의 표면적(m^2)

Q = 폐수의 유량(m^3/d)

이 모델은 부착미생물량과 유기물제거율은 유기물 부하량의 함수며 Monod식과 유사한 형태로 표현하고 있다. 위의 식(2.1)으로 부터 상수값인 M과 k값을 구하기 위해 선형화하면 식(2.2)과 같다.

$$\frac{1}{L_R} = \frac{k}{M} \frac{1}{L_o} + \frac{1}{M} \quad (2.2)$$

식(2.2)로부터 동력학적 변수 M과 k값이 실험적으로 결정되며 이들 값은 폐수-미생물의 특성을 나타낸다. 이들 값을 식(2.1)에 대입하여 반응기 유출수질의 항인 S_e에 대해 전개하면 다음과 같다.

$$S_e = S_o \left(1 - \frac{M}{k + L_o}\right) \quad (2.3)$$

따라서, 식(2.3)으로부터 부하조건에서 반응기 유출수의 수질을 유추할 수 있다.

위의 모델을 적용하기 위해서는 본 실험에 이용된 굴폐각의 표면적을 측정하여야 한다. 그러나 작은입자로 제조하지 않은 원형 그대로의 굴폐각 표면적은 측정이 어려우므로 위의 식에서 사용된 표면적부하 (g/m²/day)가 아닌 굴폐각 주입량에 대한 유기물량(g/kg oyster shell/day)을 사용한 수정된 Stover-Kincannon Model을 이용하여 동력학적 변수 m과 K를 결정하여 유출 수질을 예측하였다.

식(2.1)의 Stover-Kincannon 식의 분자와 분모에 $a (= \frac{m^2}{g \text{ oyster shell}})$ 을 곱하면 $L_R = aM \frac{L_o}{a(k+L_o)}$ 으로 변형되며 각 변을 정리하면 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$l_R = m \frac{l_o}{K + l_o} \quad (2.4)$$

- 여기서, l_R = 기질 제거율 (g/g oyster shell/day)
- l_o = 유기물 부하율 (g/g oyster shell/day)
- m = 최대 비기질 제거율 (g/g oyster shell/day)
- K = 비기질 제거율 (g/g oyster shell/day)

식(2.4)으로 부터 상수 m, K를 구하기 위해 선형화하여 유출수 값을 예측하기 위한 식으로 표시하면 다음과 같다.

$$\frac{1}{l_R} = \frac{K}{m} \frac{1}{l_o} + \frac{1}{m} \quad (2.5)$$

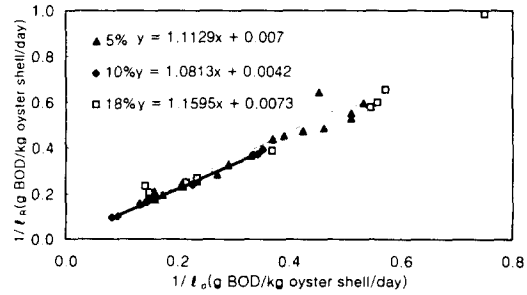


Fig. 5. Graphical Representation of the Modified Stover-Kincannon Model using BOD Values (m, K=kinetic coefficients).

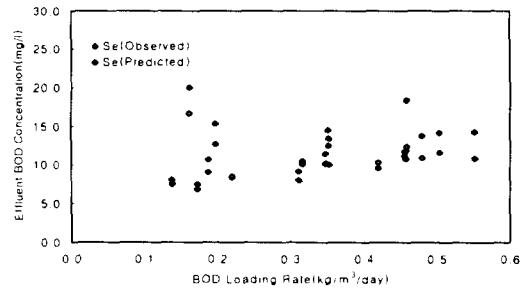


Fig. 6. Comparison of Observed Effluent BOD Concentration with Predicted Values for the 5% Oyster-Shell Reactor.

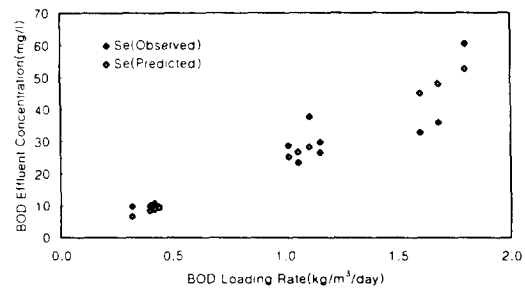


Fig. 7. Comparison of Observed Effluent BOD Concentration with Predicted Values for the 10% Oyster-Shell Reactor.

$$S_e = S_o \left(1 - \frac{m}{K + l_o}\right) \quad (2.6)$$

3. Model의 상수값 결정

3.1 BOD값을 이용한 m, K 값 결정

수정된 Stover-Kincannon Model을 적용하여 BOD값을 이용하여 m과 K를 구하기 위해

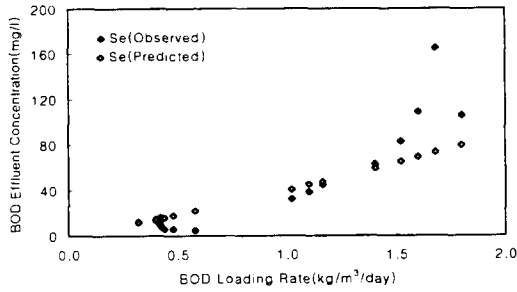


Fig. 8. Comparison of Observed Effluent BOD Concentration with Predicted Values for the 18% Oyster-Shell Reactor.

도식화한 결과를 Fig. 5에 나타내었다. 각각의 충전율에 따른 결과에서 유기물 부하율과 기질의 제거율은 직선에 가까우며 이 직선의 기울기와 절편으로 m 과 K 값을 계산하면 다음과 같다.

5%침적형법의 경우 $m = 142.9$, $K = 159.0$ 였고, 10%침적형법은 $m = 238.1$, $K = 257.5$ 이고, 18%침적형법의 경우 $m = 137.0$, $K = 158.9$ 으로 계산되었다. 결과와 같이 5%, 18%의 경우는 유사한 값을 보였지만 10%의 충전율 반응조에서 상수 m , K 값이 다소 높음을 알 수 있었다. m , K 값의 차이는 반응기내의 미생물의 특성이나 활성이 다르다는 것을 나타내므로 5%와 18%침적형법은 거의 유사한 값을 보여 반응기 내의 미생물 반응은 유사하며 10%침적형법의 경우는 미생물의 활성이 뛰어난 것으로 생각된다.

Fig. 6, 7, 8에 각각의 m , K 값을 이용하여 유출수의 수질을 부하율에 따른 값으로 나타내어 실측값과 비교하였다. 5%침적형법에서는 경우는 모델의 결과와 유출수가 비슷한 추이를 나타내고 있다. 10%, 18%침적형법에서는 부하율 1.0 kg BOD/m²/day이하에서는 모델의 예측값과 실험값이 유사한 값을 나타내었으나 그 이상의 부하에서는 차이를 보였다. 이는 부하율이 증가함에 따라 부유성 미생물이 다량으로 증가하여 부유성 미생물에 의한 영향이 고려되지 않은 본 연구에서 사용한 model의 개선되어야 할 점이다.

3.3 NH₄-N값을 이용한 m , K 값 결정 NH₄-N값을 수정된 Stover-Kincannon

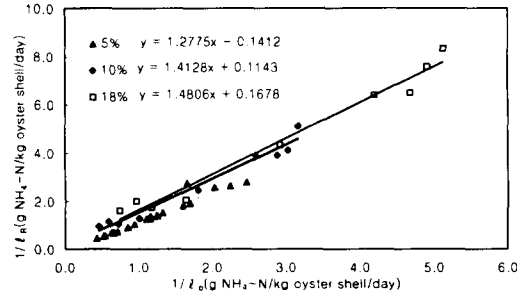


Fig. 9. Graphical Representation of the Modified Stover-Kincannon Model using NH₄-N Values (m , K =kinetic coefficients).

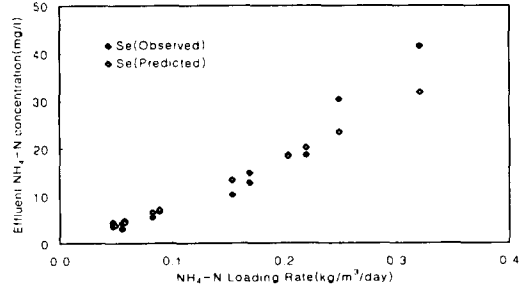


Fig. 10. Comparison of Observed Effluent NH₄-N Concentration with Predicted Values for the 10% Oyster-Shell Reactor.

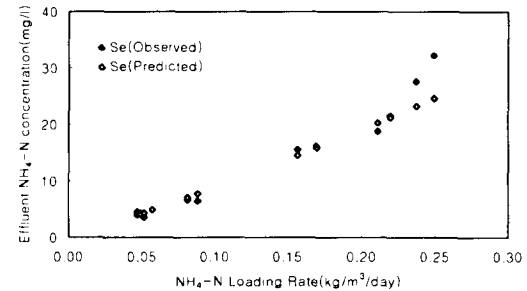


Fig. 11. Comparison of Observed Effluent NH₄-N Concentration with Predicted Values for the 18% Oyster-Shell Reactor.

Model을 적용하여 최대기질 제거율 m 과 비례상수 K 를 구한 결과를 Fig. 9에 나타내었다. 유기물 부하율과 기질의 제거율은 거의 직선에 가까우며 이 직선의 기울기와 절편으로 최대기질 제거율 m 과 비례상수 K 값을 계산하면 5%의 경우는 $m = -7.08$, $K = -9.04$, 10%는 $m = 8.75$,

K = 12.36, 18%의 경우는 m = 5.96, K = 8.82를 얻을 수 있었다.

5%침적형법의 경우 상수 m, K의 값이 음의 값을 나타내어 Stover-Kincannon Model을 사용하는 것은 부적절한 것으로 생각된다. 이는 m과 K값을 구하기 위해 선형화하여 절편과 기울기값을 결정하는 과정에서 독립변수 및 종속변수로 사용한 유기물부하율과 유기물 제거율이 낮을수록 (즉 $1/l_0$ 값과 $1/l_R$ 이 클수록) 즉, 측정이 부정확한 범위를 중요시하는 계수결정 방법에서 일부 기인하고 있다고 생각된다. 또한 유기물분해와 질산화 과정의 상관영향 등 좀더 세밀한 실험과 고찰이 필요한 것으로 사료된다.

10%와 18%침적형법에서 기울기가 비슷한 값을 나타내는 것으로 보아 각각의 반응조 내에서 미생물 반응은 유사하다고 생각되며, 10%반응조의 m, K값이 큰 것으로 보아 질산성 박테리아의 성장이 필요한 산소의 공급과 기질의 순환이 좋은데서 기인한 것으로 판단된다. 각각의 반응조에서 구한 상수값을 이용하여 실측 유출수의 값 비교하여 Fig. 10, 11에 나타내었다. Fig. 10, 11에서 보는 바와 같이 부하율 $0.20 \text{ kg NH}_4\text{-N/m}^2\text{/day}$ 까지는 실측치와 거의 유사한 값을 보였으며 그 이상에서는 계산치와 다소 차이를 보였다.

4. 결 론

굴폐각을 미생물 담체로 이용한 폐수처리 실험 결과 다음과 같은 결론을 얻었다.

1) 대체적으로 침적식법이 활성슬러지법에 비해 우수하였으며, 충진율을 변화시켰을 경우에는 10% 굴폐각을 충전한 침적형법이 우수한 처리효율을 나타내었다.

2) 질소의 제거율에서는 활성슬러지법에서는 평균 28 %정도의 제거율을 나타내었지만 5%침적형법에서는 42 %의 제거율을 나타내었다. 또한, 충진율 변화 실험에서는 부하율이 증가할수록 10%침적식법의 질소제거율이 우수하였다.

3) T-P의 제거율도 굴폐각을 담체로 사용한 침적형법이 활성슬러지법의 제거효율보다 높았으며 T-N의 제거 경향과 비슷한 경향을 나타내었다. 이는 T-P의 제거가 미생물에 의한 생물학적 제거인지 굴폐각 자체성분과의 화학

적결합에 기인한 것인지의 추가 실험이 필요하다고 사료된다.

4) BOD값을 이용하여 수정된 Stover-Kincannon Model로 유출수질을 예측해 본 결과 최대기질 제거율 m과 비례상수 K값이 5%침적형법의 경우 각각 142.9, 159.0, 10% 경우는 238.1, 257.5, 18%침적형법은 137.0, 158.9였다. 5%침적형법의 경우는 실험치와 예측치가 비슷하였다. 10%, 18%침적형법의 $1.0 \text{ kg/m}^2\text{/day}$ 까지의 부하범위에서 실험치와 거의 유사한 값을 나타내었으나 부하율이 증가하여 부유미생물양이 증가할수록 실험치와 예측치의 차이가 있었다.

5) $\text{NH}_4\text{-N}$ 값을 이용하여 최대기질 제거율 m과 비례상수 K값을 계산한 결과 10%에서는 8.75, 12.36이었으며, 18% 경우는 5.96, 8.82의 값을 얻을 수 있었다. 또한, 유출수질을 실험치와 비교해 본 결과 부하율 $0.2 \text{ kg/m}^2\text{/day}$ 까지의 범위에서는 실측치와 유사한 결과를 보였으며, 5%경우에는 Model의 적용이 부적절하였다.

감사의 글

이 연구는 1995년도 교육부 학술연구조성비(지역개발연구과제)의 지원사업으로 수행된 것입니다.

참 고 문 헌

- 김선곤, 차수길, 조인철, 김종원, 김태송, 1996, 굴 폐각의 재활용 방안 조사연구, 경남보건환경연구원보, 4, 226~249.
- 박종웅, 유명진, 1990, 고율 호기성 침적형 생물막법에서의 미생물 성장과 반응속도론에 관한 연구, 대한환경공학회지, 12(2), 81~89.
- 이규훈, 박태주, 송승구, 김창원, 1995, 호기성 침적 고정생물막 반응기에서 부착미생물과 유출수질의 예측, 대한환경공학회지, 17(7), 701~708.
- 이병헌, 김정숙, 1992, 고정상 활성슬러지공법과 부유성 활성슬러지공법의 비교연구, 수질보전학회지, 9(1), 23~30.
- 황선치, 우용태, 이무강, 1994, Oyster (*Crassostrea gigas*) Shell에 의한 중금속 흡착 제거 특성에 관한 연구, 경성대학교

- 환경연보, 4(1), 71~80.
- 東畑平一郎, 城塚正, 小島和夫, 1989, 化學工學實驗, 産業圖書, 39~40.
- APHA, AWWA, WPCF, 1991, Standard Methods for the Analysis of Water and Wastewater, 18th Edition.
- Shgehisa, I. and Takane, K., 1994, Wastewater treatment with microbial films, Technomic Publishing Company, Inc..
- Simn Gonzlez-Martnez and Javier Duque-Luciano, 1992, Aerobic Submerged Biofilm Reactors for Wastewater Treatment, *Water Research*, 26(6), 825~833.
- Yamamoto, K., Hiasa, M., Mahmood, T., and Matsuo, T., 1989, Direct Solid-Liquid Separation Using Hollow Fiber Membrane in an Activated Sludge Aeration Tank, *Water Science & Technology*, 21, 43~54.