

Celite에 고정화된 *Pseudomonas* sp.에 의한 폐수 중의 PVA 분해

성기달 · 김정목 · 조무환

영남대학교 공과대학 화학공학과
(1992년 1월 20일 접수, 1992년 4월 22일 채택)

Degradation of Polyvinyl Alcohol in Wastewater by *Pseudomonas* sp. Immobilized on Celite

Kee Dal Seong, Jeong Mog Kim and Moo Hwan Cho

Dept. of Chem. Eng., College of Eng., Yeungnam University, 214-1, Dae-Dong Gyongsan, Korea
(Received 20 January 1992; accepted 22 April 1992)

요 약

생물학적 난분해성 물질인 PVA 함유 폐수를 효과적으로 처리하기 위하여 celite를 고정화 담체로 사용한 air-lift reactor를 사용하였다. PVA 용적부하 2 g PVA/L·day, 체류시간 24 hr에서 PVA 제거 효율은 91.6%였으며, 이 때 F/M비는 0.13 g PVA/g cell·day로 나타났다. 동일한 체류시간에서 반응기 내의 미생물농도 증가에 따라 PVA 제거 효율의 증가율은 감소하였으며, 동일한 미생물 농도에서 유입수의 PVA 농도가 2 g/L 이상일 때 PVA 제거 효율은 거의 일정하였다. 동일한 PVA 용적부하에서 저농도의 폐수를 단시간 처리하는 것이 고농도의 폐수를 장시간 처리하는 것보다 제거 효율은 떨어지지만 처리수의 PVA 농도는 낮게 나타났다. 그리고 PVA 비제거 속도는 specific PVA loading이 0.7 g PVA/g cell·day까지는 직선적으로 증가하였으나 그 이상에서는 감소하였다. 이 때 제거 속도 상수 K는 0.069 L/mg/hr이며 PVA 제거 효율은 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$\frac{S_r}{S_0} = \frac{0.069X \cdot (V/Q)}{1 + 0.069X \cdot (X/Q)}$$

Abstract—The aim of this study is to treat efficiently PVA-containing wastewater. PVA is known as one of poorly biodegradable materials. As a microbial immobilization support, celite was used in the air-lift reactor. The PVA removal efficiency was 91.6% at 2 g PVA/L·day of PVA volume loading, and at 24 hr retention time, when F/M ratio was 0.13 g PVA/g cell·day. At the same retention time, an increasing rate of PVA removal efficiency was decreased with increasing concentration of microorganism in the reactor, and at the same concentration of microorganism. PVA removal efficiency was approximately constant when PVA concentration of influent was more than 2 g/L. At the same PVA volume loading, treating wastewater of low concentration at short period resulted in lower PVA concentration in effluent than treating wastewater of high concentration at long period with respect to the effluent PVA concentration, even though the removal efficiency of the former was lower than that of the latter. Specific PVA removal efficiency increased proportionally with specific PVA loading up to 0.7 g PVA/g cell·day. PVA removal rate constant, K was 0.069 L/mg/hr. PVA removal efficiency could be expressed as follows.

$$\frac{S_r}{S_0} = \frac{0.069X \cdot (V/Q)}{1 + 0.069X \cdot (X/Q)}$$

1. 서 론

최근에 여러 종류의 합성고분자가 생산되어 폭넓게 이용되고 있으나 분해가 어렵기 때문에 그들의 처리 문제가 발생하였다. 물에 용해되는 고분자는 물에 용해되지 않는 고분자보다 분해가 쉽다[1].

PVA(polyvinyl alcohol)는 물에 용해되는 합성고분자 물질로서 섬유, 접착제, 제지 및 바인더용으로 널리 사용되며, 특히, 섬유용으로서의 PVA는 적용섬유가 다양하기 때문에 대부분의 섬유공장에서 호제로서 사용되고 있다. 직포공정에서 경사에 먹여진 풀은 가공공정에서 처리하는 약액과 염료액의 침투를 방해함으로 가공공정의 제 1단계에서 제거해 주어야 한다. 따라서 염색가공 공장폐수는 생물학적 난분해성 물질인 PVA를 다량 함유하고 있다.

PVA의 미생물학적 분해에 관한 연구는 1936년 Nord [2]에 의하여 시작되었으며, 1962년 Yamamoto 등[3]은 PVA에서 성장하는 여러 종의 bacteria 및 mold를 토양에서 분리하였다. 최근 20년 동안 PVA의 생물학적 분해에 관한 많은 보고서가 발표되었으며, 특히 Suzuki 등[1,4]이 *Pseudomonas*속의 PVA 분해 bacteria를 분리하면서부터 연구가 활발히 진행되었다. 그러나 Sakazawa 등[5]은 분류학적으로 상이한 두 bacteria의 공생적 관계에 의한 PVA의 분해를 보고하였으며, Sakai 등[6,7]도 공생적 관계에 의한 PVA의 분해를 보고한 바 있다.

본 연구진에 의해서도 PVA가 유출되는 수계로부터 PVA 분해균주를 분리하여 동정한 결과, *Pseudomonas* 속의 두 균주가 공생관계에 의하여 PVA가 분해되는 것을 확인한 바 있다[8]. 그러나, 이와 같은 bacteria는 비성장 속도가 상당히 느리며, 미생물의 응집성이 없기

때문에 기존의 활성오니법에 의한 PVA의 효과적인 분해가 거의 불가능하다. 즉, 폭기조 내에 미생물의 농도를 높이기 위하여 체류시간을 길게 해야 하며 따라서 폐수처리 시설이 커지며, 슬러지 팽화(sludge bulking), 과도한 오니발생 및 각종 충격부하에 약한 단점을 가지고 있다.

따라서 본 연구에서는 활성오니공법의 단점을 보완하기 위하여 고정화 담체로서 celite를 사용한 air-lift식 반응기를 제작하여 유기물부하 및 수량부하에 따른 미생물의 부착상태 및 유기물 제거 효율 등을 조사하였으며 반응기의 성능을 해석하였다.

2. 실험

2-1. 균주

PVA 분해균은 본 연구진에 의하여 분리·동정한 *Pseudomonas* 속 Strain G₅Y 및 PW의 두 균주를 사용하였다[8].

2-2. 순양배지 및 합성폐수의 조성

Table 1에서 보는 바와 같이 균주를 순양시키기 위하여 탄소원으로 PVA만 첨가된 분리용 배지를 사용하였으며, 합성폐수는 실제 섬유공장에서 발생하는 폐수와 유사하도록 탄소원으로 corn starch를 첨가하였으며 Table 1과 같다. 또한 합성폐수의 pH변화는 0.1 N NaOH 및 0.1 N HCl을 사용하여 조정하였다.

2-3. 고정화 담체

고정화 담체로는 삼풍산업(서울)의 입상 규조토 #200을 분쇄하여 표준체 300 mesh와 400 mesh를 사용하여 체분리하여 사용하였으며 입자의 물리적 특성은 Table

Table 1. Composition of resting medium and synthetic wastewater

Resting medium		Synthetic wastewater	
Composition	Concentration	Composition	Concentration
PVA 1500	2.0 g	PVA 1500	1-4 g
(NH ₄) ₂ SO ₄	1.0 g	(NH ₄) ₂ SO ₄	1 g
KH ₂ PO ₄	1.0 g	KH ₂ PO ₄	0.2 g
K ₂ HPO ₄	8.0 g	K ₂ HPO ₄	1 g
MgSO ₄ ·7H ₂ O	0.2 g	MgSO ₄ ·7H ₂ O	0.2 g
NaCl	0.1 g	NaCl	1 g
Stock solution*	10 ml	FeSO ₄ ·7H ₂ O	0.01 g
Distilled water	990 ml	Corn starch	0.2 g
pH	7.5	Distilled water	1,000 ml

*Stock solution: FeSO₄·7H₂O 0.1 g, CaCl₂·2H₂O 0.02 g, Na₂MoO₄·2H₂O 0.5 mg, MnSO₄ 0.5 mg, Ca-pantothenate 0.4 mg, Inositol 0.2 mg, Niacin 0.4 mg, P-aminobenzoate 0.2 mg, Pyridoxine 0.4 mg, Thiamine 0.4 mg, Biotin 2 µg, Vitamin B₁₂ 0.5 µg. Distilled water 100 ml

Table 2. Physical properties of celite

H ₂ O(%)	6.4
Particle size(μm)	40-50
Bulk density(g/cm ³)	0.675
pH(10% solution)	5.5

2와 같다.

2-4. 실험장치 및 방법

실험장치는 Fig. 1과 같으며, 가로 4 cm, 세로 7.5 cm, 높이가 46 cm, 총 부피가 800 mL인 air-lift reactor이다. 반응기의 외부온도는 water jacket을 설치하여 항상 30 ± 1°C를 유지하였다.

폐수는 미량 정량펌프를 사용하여 반응기의 상부에서 도입하였으며, 공기는 확산석을 사용하여 반응기의 하부에서 공급하였다. 반응기의 중간에 격벽을 두고 air-lift를 형성시켜 담체입자에 부착된 미생물을 회전시키며, 반응기 내에서 담체를 쉽게 회전시키기 위하여 반응기의 하부를 60° 및 40°의 각도를 주어 둥글게 하였다.

유입되는 폐수의 반대편에 처리수가 유출되며 처리수의 수질을 양호하게 하고 입자의 침강성을 향상시키기 위하여 유출수 부분에도 격벽을 설치하였다.

반응기 내에는 김, 조 등[8]이 분리·동정한 *Pseudomonas* sp.를 점종시키고 초기 순양배지를 0.55 ml/min의 속도로 유입시켜 미생물을 순양시켰다. 약 20일 후 순양된 미생물의 농도가 증가하여 3.5 g/L가 되었을 때 celite를 45 g/L의 농도로 투입하였다.

고정화된 *Pseudomonas* sp.의 농도가 일정한 수준이 되었을 때 합성폐수를 유입하였으며, 정상 상태에 도달하였을 때 유출수의 PVA 농도, COD, 미생물의 농도 및 celite의 농도를 각각 측정하였다. 이 때 반응기 내의 온도는 30°C, pH는 7.5를 유지하였다. 공기의 유속은 0.2 ml/min이며 미생물의 농도에 따라 점차 증가시켰다.

pH 변화에 따른 영향을 조사하기 위하여 유입수의 PVA 및 COD 농도를 각각 2, 1.75 g/L로 일정하게 유지시켰으며, 체류시간 6 hr, 공기유속 0.4 L/min 및 반응기 내의 미생물 농도를 7 g/L로 유지시키고, 0.1 N NaOH와 0.1 N HCl를 사용하여 반응기 내의 pH를 6에서 8.5까지 변화시켜 유출수의 PVA 및 COD농도를 각각 측정하였다.

체류시간 및 미생물 농도에 따른 영향을 조사하기 위하여 체류시간을 6, 12, 24 hr 그리고 반응기 내의 미생물 농도를 7, 9, 12, 15 g/L로 각각 변화하였다.

체류시간을 12 hr로 일정하게 유지하고 유입수의 PVA 농도를 1, 2, 4 g/L로 각각 변화시켜 PVA 농도에 따른 영향을 조사하였다. 이 때 반응기 내의 미생물 농도가

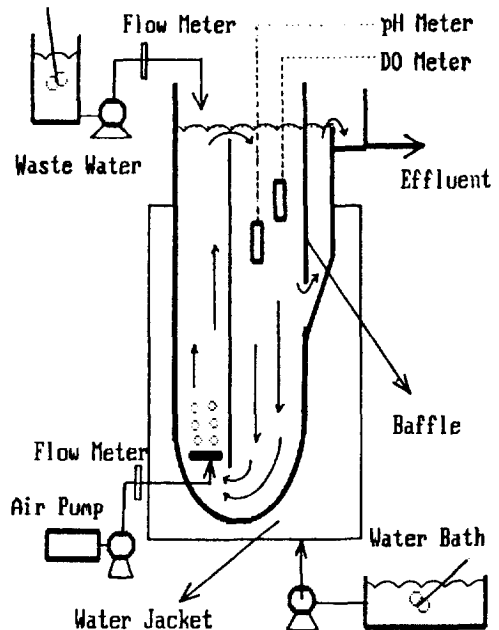


Fig. 1. Schematic diagram of air-lift reactor system.

7, 9, 12 및 15 g/L일 때 공기의 유속을 각각 0.4, 0.6, 0.8 및 0.8 L/min로 변화시켰다. 또한, PVA의 농도가 1, 2, 4 g/L일 때 체류시간을 각각 6, 12, 24 hr로 조정하여 동일한 PVA부피부하 4.0 g/L·day에서 수리학적 부하변화에 의한 수질변동 사항을 조사하였으며, 아울러 정량적 해석을 하였다.

모든 실험결과들은 조건이 바뀌고 난 이후 정상상태에 도달했을 때 측정하였으며, 분석결과 5개를 구한 다음 평균한 값을 그 조건의 실험결과로 나타내었다.

2-5. 분석방법

COD는 공해공정 시험법에 의한 산성 KMnO₄을 사용하였으며, PVA 농도는 Finley의 방법[9]에 의한 요오드발색으로 측정하였으며 공존하는 starch는 0.5 N HCl로 가수분해시킨 후 측정하였다. 0.5 N HCl 50 ml에 시료 적당량을 가해 1.5 hr동안 가열한다. 가열이 끝난 용액 1 ml를 취한 후 0.1 N iodine 용액 한두방울을 가해 반응시켜 본다. 전분이 완전히 가수분해 되었으면 푸른 색이 없어지며 0.1 N NaOH로 pH를 7.0으로 조정하면 후 PVA 측정을 위한 시료로 사용하였다.

반응기의 유입수와 유출수의 PVA 농도를 측정하여 PVA 제거 효율을 계산하였다.

미생물 농도의 측정은 시료를 원심분리 후 105°C에서 무게가 일정할 때까지 건조하여 celite 및 미생물의 전체 무게를 정량한 후 550°C에서 5 hr 회화시켜 미생물의

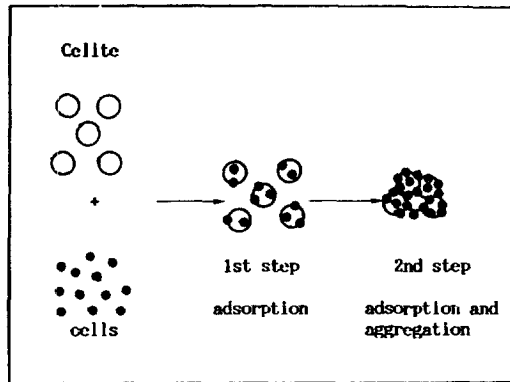


Fig. 2. Schematic diagram of immobilization mechanism.

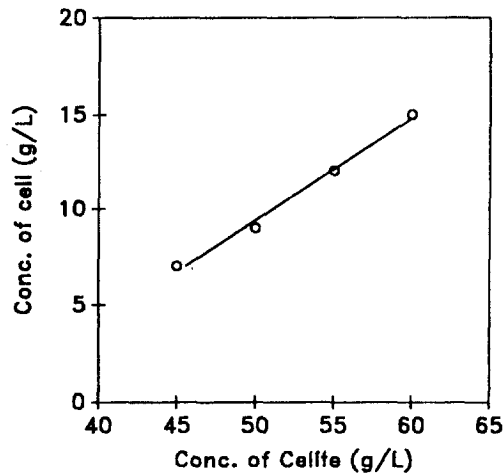


Fig. 3. Effect of celite concentration on cell concentration.

무게를 측정하였다.

3. 결과 및 고찰

3-1. 미생물 고정화

Pseudomonas sp.가 celite에 고정화되는 mechanism을 광학 현미경을 통하여 관찰하였으며 Fig. 2에 나타내었다. 초기에는 celite입자에 미생물이 흡착에 의하여 고정화가 일어났으며 흡착된 미생물의 양이 증가하면 입자 상호간의 응집이 일어나게 된다. 지나치게 커진 입자는 공기의 전단력에 의하여 미생물의 탈락이 일어나며 유출수와 함께 배출되어 반응기 내의 전체 미생물 농도는 일정하게 유지된다. Fig. 3은 반응기 내의 celite농도 변화에 따른 미생물의 농도를 나타내며 celite의 증가와 함께 미생물의 양이 증가하였으나 celite의 농도가 60 g/L 이상이 되면 전체 고정분의 농도가 높아져

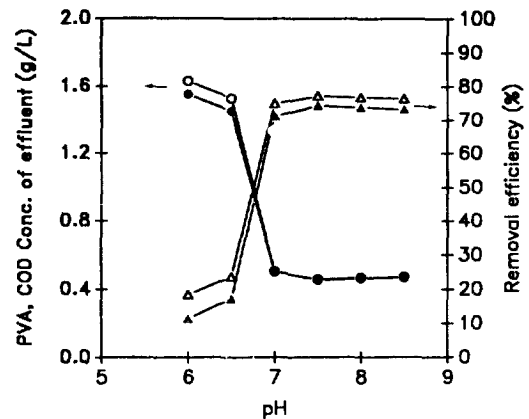


Fig. 4. Effect of pH on effluent PVA, COD concentration and removal efficiency.

(△: PVA removal efficiency, ▲: COD removal efficiency ○: PVA concentration, ●: COD concentration).

반응기 내에서 순환이 잘 일어나지 않았다.

3-2. pH 변화의 영향

반응기 내의 pH를 6.0에서 8.5까지 단계적으로 변화시켰을 때 유출수의 COD, PVA 농도 및 제거 효율을 측정하였으며 Fig. 4에 나타내었다. pH가 7.5일 때 PVA 및 COD 제거 효율이 가장 높았으며, 이 때 유출수의 PVA 농도는 458 mg/L이며, 제거 효율은 77.1%로 나타났다. 또한 pH 7.0 이상에서는 제거 효율이 70%이상 유지되었으나 6.5이하에서는 급격히 감소하였다.

3-3. 체류시간 및 미생물 농도 변화에 의한 유출수의 COD, PVA 농도 및 제거 효율

유입수의 PVA와 COD농도를 2 및 1.75 g/L로 일정하게 유지하고 체류시간과 반응기 내의 미생물 농도를 각각 변화시켰을 때의 결과를 Fig. 5, 6에 나타내었다. 체류시간과 미생물 농도의 증가에 따라 PVA 및 COD 제거 효율은 현저히 증가하였으며, 미생물의 농도가 7 g/L에서 9 g/L로 증가하였을 때 체류시간에 관계없이 제거 효율 상승비율이 9 g/L에서 12 g/L로 증가하였을 때의 상승비율보다 높게 나타났다.

또한, 체류시간이 6 hr에서 12 hr까지는 제거 효율이 현저히 증가하였으나 그 이상에서는 증가의 폭이 크지 않았다. 더욱이 미생물의 농도가 증가함에 따라 제거 효율은 체류시간 변화에 따른 영향이 적었으며, 15 g/L에서는 체류시간에 관계없이 거의 일정하였다. 이 때 체류시간 24 hr에서 PVA 제거율은 91.6%로 나타났으며, F/M비는 0.13 g·PVA/g·MLSS/day 이었다.

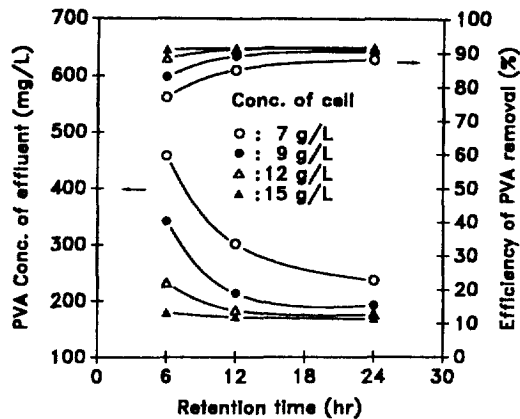


Fig. 5. Effect of retention time on effluent PVA concentration and PVA removal efficiency (PVA Conc. of influent = 2 g/L).

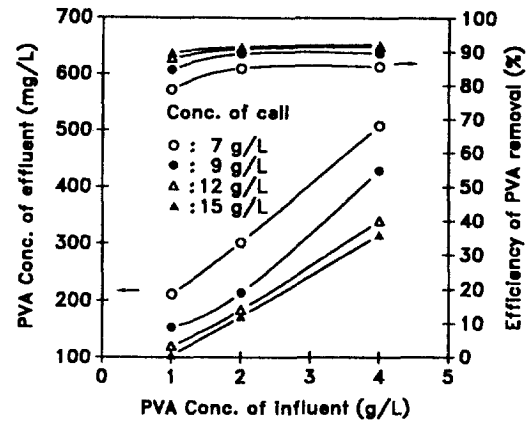


Fig. 7. Effect of influent PVA concentration on effluent PVA concentration and PVA removal efficiency (Retention time = 12 hr).

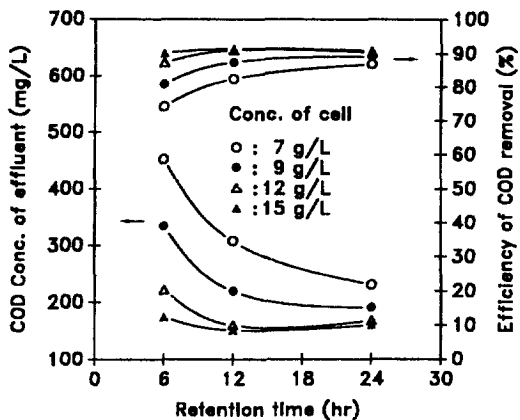


Fig. 6. Effect of retention time on effluent COD concentration and COD removal efficiency (COD Conc. of influent = 1.75 g/L).

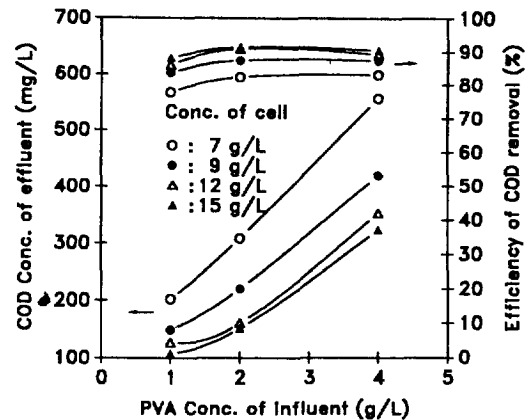


Fig. 8. Effect of influent COD concentration on effluent COD concentration and COD removal efficiency (Retention time = 12 hr).

3-4. PVA 농도 변화에 의한 유출수의 COD, PVA 농도 및 제거 효율

동일한 체류시간 및 미생물 농도에서 유입수의 PVA 농도가 증가할수록 유출수의 PVA 농도는 선형적으로 증가하였으며, 미생물의 농도가 증가하면 증가 비율이 낮았다. 그러나 유입수의 PVA 농도가 높을수록 제거 효율은 증가하였으며, 반응기 내의 미생물농도를 7 g/L으로 유지할 경우 유입수의 PVA 농도를 1 g/L에서 2 g/L으로 증가하였을 때 제거 효율은 약 7% 증가하였으나 그 이상에서는 거의 증가되지 않았다. 또한 미생물의 농도가 증가할수록 PVA 제거 효율의 증가율은 점차 감소하여 15 g/L일 때 유입수의 PVA 농도에 관계없이 거의 일정하였으며 Fig. 7에 나타내었다. 이와

같은 결과는 유입수의 PVA 농도가 낮을 때에는 미생물이 필요로 하는 탄소원인 PVA가 불충분하여 제거 효율이 증가하였으며 유입수의 PVA 농도가 2 g/L 이상일 때는 반응기 내의 미생물의 농도를 증가시키는 것이 PVA 제거에 효과적임을 알 수 있다. COD의 경우에도 이와 유사한 결과를 보였으며 Fig. 8에 나타내었다.

3-5. 동일한 PVA 부피부하에서 수리학적 부하변화의 영향

동일한 PVA 부피부하에서 체류시간이 감소할수록 즉, 유속이 증가함에 따라 PVA 제거 효율은 감소하였으나, 유출수의 PVA 농도는 낮게 나타났다. 따라서 동일한

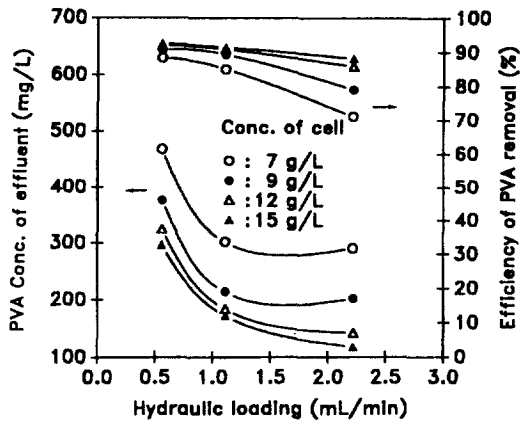


Fig. 9. Effect of hydraulic loading on effluent PVA concentration and PVA removal efficiency(PVA Volumetric loading=4.0 g/L·day).

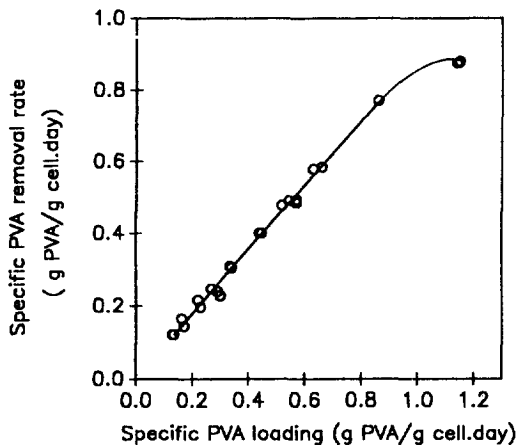


Fig. 10. Effect of specific PVA loading on specific PVA removal rate.

PVA 부피부하에서 유출수의 PVA 농도를 가장 낮게 유지하기 위해서는 유속을 최대하고 유입수의 PVA 농도를 최소로 하는 것이 바람직하다. 즉 저농도의 PVA를 짧은 체류시간으로 처리하는 것이 고농도의 PVA를 장시간 처리하는 것보다 처리효율은 낮지만 유출수의 PVA 농도는 감소함을 알 수 있으며, 결과를 Fig. 9에 나타내었다.

3-6. PVA 比負荷와 PVA 비제거 속도와의 관계

PVA 부하에 대하여 celite에 고정화된 PVA 분해 미생물의 비제거 속도와의 관계를 Fig. 10에 나타내었으며, PVA 비제거 속도는 PVA 비부피부하에 비례하여 증가하고 있다.

PVA 비제거 속도는 미생물에 의한 비기질 제거 속도이므로 Monod 식에서 미생물의 비증식 속도와 기질의 농도 즉 PVA와의 관계식으로 나타낼 수 있으며 총괄 기질 제거 속도는 식 (1)과 같다.

$$\left(\frac{ds}{dt}\right)_u = \frac{kXS}{K_s + S} \quad (1)$$

식 (1)에서 기질인 PVA 농도가 낮으면 $K_s \gg S$ 가 되어 비기질 제거 속도는 기질의 농도 즉 PVA의 농도와 비례하는 1차식이 된다.

$$\left(\frac{ds}{dt}\right)_u = KXS \quad (2)$$

$$K = k/K_s$$

Fig. 10에서 PVA의 비제거 속도는 (PVA 농도/미생물의 농도/시간)에 비례하여 증가되고 있음을 나타내고 있다. 이것은 식 (2)가 성립되며 비기질 제거 속도는 PVA의 농도와 비례하는 1차식이 성립됨을 보여주고 있다. 여기서 PVA 비부하가 0.7 g PVA/g cell·day 이하일 때는 PVA 제거 속도가 직선적으로 증가하여 식 (2)와 일치하지만 0.7 g PVA/g cell·day 이상일 때는 PVA 제거 속도가 둔화되었다. 이것은 PVA 비부하가 0.7 g PVA/g cell·day일 때가 전이영역에 속하며, 따라서 유출수의 PVA 농도가 낮고 제거 효율을 높이기 위해서는 0.7 g PVA/g cell·day 이하로 조건을 유지하는 것이 바람직하다.

3-7. 연속 반응기의 정량적 해석

PVA 비제거 속도를 1차식으로 가정하고 PVA에 대한 물질수지를 취하면 식 (3)과 같이 된다.

$$\left(\frac{dS}{dt}\right)_u = \frac{Q(S_0 - S_e)}{V} - KXS_e \quad (3)$$

정상상태에서 $(dS/dt)_u = 0$ 이므로 식 (4)가 된다.

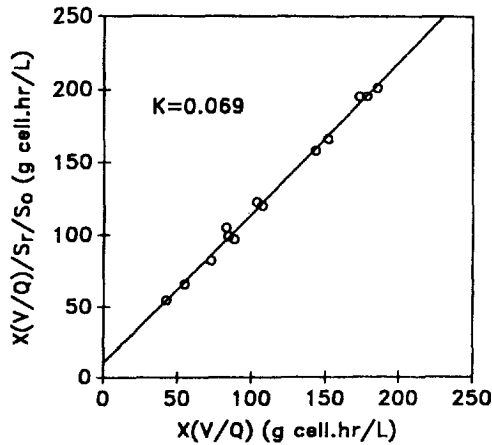
$$\frac{Q(S_0 - S_e)}{V} = KXS_e \quad (4)$$

식 (4)의 양변에 미생물의 농도, X를 나누면 비기질이용 속도 즉 PVA 비기질 제거 속도인 q가 된다.

$$\frac{Q(S_0 - S_e)}{VX} = K \quad S_e = q \quad (5)$$

식 (5)를 변형하면

$$\frac{S_e}{S_0} = \frac{1}{1 + KX(V/Q)} \quad (6)$$

Fig. 11. Plot of $X(V/Q)S_r/S_o$ vs $X(V/Q)$.

제거된 PVA 농도 S_r 에 대해서 $S_r = S_o - S_e$ 를 식 (6)에 대입하면 다음과 같다.

$$\frac{S_r}{S_o} = \frac{KX(V/Q)}{1 + KX(V/Q)} \quad (7)$$

식 (7)을 변형하면 식 (8)이 된다.

$$\frac{X(V/Q)}{S_r/S_o} = X(V/Q) + \frac{1}{K} \quad (8)$$

식 (8)에서 X 축을 $X(V/Q)$ 로 두고 Y 축을 $X(V/Q)/S_r/S_o$ 로 하여 실험결과를 작도하면 기울기가 1이고 절편이 $1/K$ 인 직선이 얻어지며 Fig. 11에 나타내었다.

여기서 PVA 제거 속도상수 $K = 6.9 \times 10^{-2}$ (L/mg/hr)를 얻었다. 이는 橋本과 尾崎[10]의 활성슬러지 공법에서 얻어진 결과 $K = 6.66 \times 10^{-3}$ (L/mg/hr) 값 보다 10 배 이상의 제거 속도를 가지는 것으로 나타났다. K 값을 식 (7)에 대입하여 PVA의 제거율을 미생물의 농도 및 체류시간과의 관계를 나타낼 수 있다.

$$\frac{S_r}{S_o} = \frac{6.9 \times 10^{-2} X \cdot (V/Q)}{1 + 6.9 \times 10^{-2} X \cdot (V/Q)} \quad (9)$$

4. 결 론

(1) Celite에 고정화된 미생물의 농도를 15 g/L, 체류시간 24 hr 및 PVA 농도 2 g/L의 조건에서 PVA 제거 효율은 91.6%였으며, 이 때 용적부하와 F/M비는 각각 2 g PVA/L·day, 0.13 g PVA/g cell·day로 나타났다.

(2) 동일한 체류시간에서 반응기 내의 미생물 농도를 7 g/L로 유지했을 때 유입수의 PVA 농도를 1 g/L에서 2 g/L으로 증가하면 PVA 제거 효율은 7% 증가하였으나

그 이상의 농도에서는 미생물 농도에 관계없이 PVA 제거 효율은 거의 증가되지 않았다. 또한 미생물의 농도가 증가할수록 PVA 제거 효율의 증가율은 점차 감소하였으며 15 g/L 일 때 유입수의 PVA 농도에 관계없이 거의 일정하였다.

(3) 동일한 PVA 용적부하에서 저농도의 폐수를 단 시간 처리하는 방법이 고농도의 폐수를 장시간 처리하는 것 보다 제거 효율은 떨어지지만 유출수의 PVA 농도는 낮게 나타났다.

(4) PVA 비부하가 0.7 g PVA/g cell·day 이하일 때는 PVA 비제거 속도가 일정한 비율로 직선적으로 증가하였으며 0.7 g PVA/g cell·day 이상의 조건에서는 증가 비율이 둔화되었다.

(5) PVA 제거 속도상수 $K = 6.9 \times 10^{-2}$ (L/mg/hr)로 나타났으며 제거 효율, 미생물의 농도 및 체류시간과의 관계는 다음 식과 같이 나타났다.

$$\frac{S_r}{S_o} = \frac{6.9 \times 10^{-2} X \cdot (V/Q)}{1 + 6.9 \times 10^{-2} X \cdot (V/Q)}$$

사용기호

- k : maximum specific substrate utilization rate [T^{-1}]
- K : specific substrate utilization rate constant [$L^3 M^{-1} T^{-1}$]
- K_s : half saturation velocity coefficient [ML^{-3}]
- q : specific substrate utilization rate [T^{-1}]
- Q : flow rate [$L^3 T^{-1}$]
- S : PVA concentration in the reactor [ML^{-3}]
- S_e : effluent PVA concentration [ML^{-3}]
- S_o : influent PVA concentration [ML^{-3}]
- S_r : removed PVA concentration [ML^{-3}]
- V : reactor volume [L^3]
- X : biomass concentration [ML^{-3}]

참고문헌

1. Suzuki, T., Ichihira, Y., Yamada, M. and Tonomura, K.: *Agric. Biol. Chem.*, **37**(4), 747(1973).
2. Nord, F. F.: *Naturwissenschaften*, **24**, 793(1936).
3. Yamamoto, Inagaki, Osumi: *Trans.*, 1962 Annual Meeting, Agricultural Chemical Society in Japan, 133(1962).
4. Suzuki, T.: *Ag. Biol. Chem.*, **40**(3), 497(1976).
5. Sakazawa, C., Shimao, M., Tanjiguchi, M. and Kato, N.: *Appl. Environ. Microbiol.*, **41**(1), 261(1981).
6. Sakai, K., Morita, M., Hamada, N. and Watanabe,

- Y.: *Agric. Biol. Chem.*, **45**(1), 63(1981).
7. Sakai, K., Hamada, N. and Watanabe, Y.: *Agr. Biol. Chem.*, **50**(4), 989(1986).
 8. Kim, J. M., Cho, M. H., Jo, Y. L. and Jeong, S. Y.: *Korean J. Biotechnol. Bioeng.*, **6**(4), 363(1991).
 9. Finley, J. H.: *Analytical Chemistry*, **33**(13), 1925 (1961).
 10. 橋本 獎, 尾崎保夫: 下水道協會誌, **17**(189), 28(1980).
 11. 橋本 獎, 尾崎保夫: 下水道協會誌, **17**(192), 17(1980).
 12. 橋本 獎, 尾崎保夫: 下水道協會誌, **17**(195), 24(1980).
 13. 橋本 獎, 尾崎保夫, 山川 公一郎: 下水道協會誌, **17**(198), 19(1980).
 14. Darby, R. T. and Kaplan, A. M.: *Appl. Microbiol.*, **16**, 600(1968).
 15. Awao, T., Komagata, K., Yoshimura, I. and Mitsugi, K.: *J. Ferment. Technol.*, **49**, 188(1971).
 16. Morita, M. and Watanabe, Y.: *Agric. Biol. Chem.*, **41**(8), 1535(1977).
 17. Sakai, K., Hamada, N. and Watanabe, Y.: *Agric. Biol. Chem.*, **50**(4), 989(1986).
 18. “환경오염공정시험법”(수질분야), 환경청(1988).