

생물막 유동층 반응기에 의한 주정공장의 고농도 유기성 폐수처리

김 동 석 · *장 희 재 · 안 감 환 · 서 명 교 · 송 승 구
부산대학교 공과대학 화학공학과
*경남모직 생산기획부 기술개발과

The Treatment of Concentrated Organic Alcoholic Distillery Wastewater by the Fluidized-Bed Biofilm Reactor

Dong Seog Kim, Hee Jae Jang*, Kab Hwan An, Myung Gyo Suh and Seung Koo Song
Dept. of Chemical Engineering, Pusan National University
*Dept. of R & D. Kyung Nam Wool Textile Ind. Co., Ltd.

ABSTRACT

The purpose of this study is to investigate biomass characteristics and organic removal efficiency by changing superficial upflow velocity and organic loading rate in treating alcoholic distillery wastewater.

Since the biomass concentration and the thickness of biofilm are very sensitive to superficial upflow velocity, a high concentration of biomass could be achieved by decreasing superficial upflow velocity which lowered the organic removal efficiency. Therefore, superficial upflow velocity should be controlled as to give optimum conditions and removal efficiency.

Generally, activated sludge system shows 70% COD removal efficiency at $1.5\text{kgCOD} / \text{m}^3 \cdot \text{day}$, but the fluidized-bed biofilm reactor shows 80% COD removal efficiency even at $6\text{kgCOD} / \text{m}^3 \cdot \text{day}$.

서 론

우리나라의 주정공장에서 구구마, 쌀보리 및 타피오카를 주정원료로 사용하여 발생하는 폐수의 수질은 BOD, COD, SS 등이 모두 $20,000\text{mg} / \text{l}$ 이상의 고농도로 수질환경보전법 기준치 이하로 정화처리하는데 많은 어려움과 비용을 요구한다. 주정공장의 폐수는 일반적으로 소화법-활성슬러지법, 응집침전법 및 증발법 등으로 처리되는데, 증류 폐액을 여과기나 원심분리기에서 고형물과 여액으로 분리하고 여액을 다단효용 증발관에서 수분을 증발 건조시켜 사료로 사용하고자 하는 증발법은 동력비가 과다하게 요구되므로 사료의 경제성에 따라 채택될 수가 없다. 이를 제외하면 두 방법 모두 전처리로 소화법

또는 응집처리를 한 후 활성슬러지법으로 여액을 처리한다. 1차 혐기성 소화처리조에서 배출되는 폐수는 여전히 고농도의 BOD(약 $6,500\text{mg} / \text{l}$)를 나타내고 있을 뿐만 아니라, 2차 처리에 이용되는 활성슬러지법은 슬러지 침전성이 나쁘고 유기물 부하변동에 민감하여 미생물 농도를 높게 유지할 수 없는 단점 때문에 새로운 폐수처리 공법이 요구되고 있다.

고농도의 유기물 처리를 위하여 미생물 농도를 $5,000\text{mg} / \text{l}$ 이상으로 유지하면 포기조의 용적은 감소되나, 슬러지의 반송설비와 최종 침전지규모가 커져서 전체 시설비는 증가한다. 따라서 반응기 내의 미생물 농도를 높게 유지시킬 수 있는 생물학적 유동층 반응기(FBBR)에 관한 연구가 활발히 진행되고 있다(1-3).

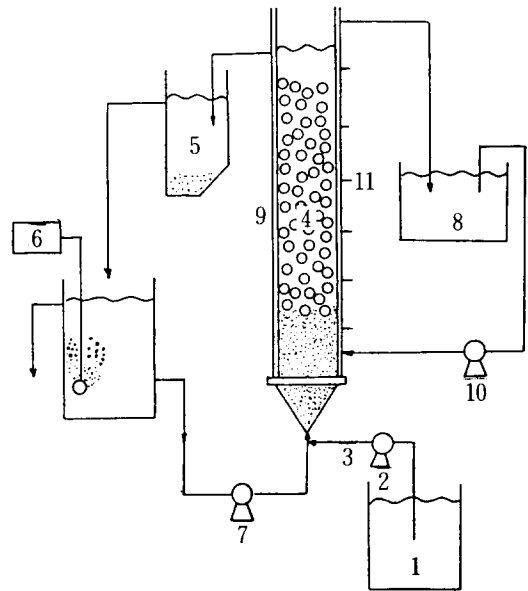
생물막 유동층 반응기는 동력비가 비교적 많이 소요되고 운전조작이 까다롭다는 단점이 있기는 하지만, 반응기 내 미생물 농도를 높게 유지할 수가 있을 뿐만 아니라, 미생물이 막을 형성함으로써 갑작스러운 부하 변동이나 유독성 폐수에 대한 안정도가 있고, 부유 미생물 농도가 적어 반송펌프가 불필요하게 되며, 또한 수직설계에 의함으로써 설치부지 면적을 적게 차지하는 커다란 장점이 있다.

본 연구는 생물막 유동층 반응기에서 조절가능한 인자 인 상향유속과 유기물 농도의 변화가 미생물 농도에 미치는 영향을 검토하고, 1차 소화처리된 주정폐수를 처리하기 위한 생물막 유동층 반응기의 설계에 필요한 자료를 얻고자 주정폐수 농도를 서서히 증가시키면서 연속처리 실험을 행하여 유기물 부하에 따른 미생물 농도와 미생물막 두께의 변화 및 유기물 처리효율을 고찰하였고, 미생물막의 두께, 미생물막 건조밀도 등을 측정하여 생물막 유동층 반응기 내의 미생물 농도를 예측하여 실측한 미생물 농도와 비교 고찰하였다.

재료 및 방법

본 실험에 사용된 장치는 Fig. 1과 같이 직경이 8.9 cm이고 총 높이가 210cm인 투명한 아크릴 원통관으로 제작하였으며, 시료를 채취하기 위하여 반응기에 25cm간격으로 탭을 설치하였다.

지지체는 비중이 약 2.65인 동해안산 규사를 체로 걸러서 직경이 Sauter mean diameter로 629 μ m의 입자를 사용하였다. 원폐수는 정량 주입펌프에 의해서 반응기 하부로 주입시켰고, 산소 공급 방식은 간접 포기 방식으로 순환수 폭기조에 충분한 공기를 공급하여 용존산소 농도를 9mg/l로 유지시키면서 반응기 하부로 부터 유입시켜 지지체를 유동시켰다. 반응조 내 온도는 항온수



- 1. Feed tank
- 2. Feed inlet pump
- 3. Feed line
- 4. Reactor
- 5. Sand trap
- 6. Aerator
- 7. Recycle pump
- 8. Water bath
- 9. Water jacket
- 10. Jacket pump
- 11. Sampling port

Fig. 1. Schematic diagram of a Fluidized-Bed Biofilm Reactor.

조와 자동온도조절 장치를 사용하여 22 \pm 1 $^{\circ}$ C로 유지하였다.

부산 소재 주정생산업체에서 배출되는 주정폐수를 소화조에서 1차 처리한 유출수는 Table 1에 나타난 바와 같이 TCOD 농도가 평균 9,700mg/l 이었으며, 이를 본 연구의 기질로 사용하였다. 식종용 미생물은 부산 소재 W식품의 반송슬러지를 채취하여 3개월 이상 순환시킨 후 반응기에 서서히 투입하므로써 미생물을 모래에 부착시켰다. 유체의 상향 유속을 각각 22m/h, 32m/h, 42m/h로 변화시켜 상향유속에 대한 미생물 성장의 변화를 고찰하였고, 또한 상향유속을 22m/h, HRT를 12시간으로 고정된 상태에서는 유입수 농도를 점진적으로 증가시키면서 미생물 성장의 변화를 조사하였다.

본 실험에서 수질분석은 Standard method(4)에 따라서 수행하였고, 미생물 농도는 지지체와 분리한 후 건조시켜 측정하였으며 앞서 발표한 논문(5)에 상세히 기술하였

Table 1. Characteristics of alcoholic distillery wastewater from anaerobic digester

| Contents | Values |
|------------|--------|
| TCOD(mg/l) | 9,700 |
| SCOD(mg/l) | 4,500 |
| TBOD(mg/l) | 6,600 |
| TSS(mg/l) | 3,100 |
| VSS(mg/l) | 2,600 |
| TKN(mg/l) | 550 |
| pH | 7.7 |

다. 지지체와 bioparticle의 직경 및 미생물막 두께는 현미경으로 실측하였다.

반응기 내에서 미생물 농도를 예측하는 식은 지지체 직경과 밀도가 일정하고 반응기 상하부의 미생물막 두께가 모두 균일하다는 가정 하에서 다음과 같이 구하였다 (6).

$$X = \rho_{bd} \cdot (1 - \epsilon) \left[1 - \left[\frac{dm}{dp} \right]^3 \right] \quad (1)$$

윗 식은 bioparticle의 특성인 미생물막 건조밀도(ρ_{bd}), 공극율(ϵ), 지지체 직경(dm) 및 bioparticle 직경(dp) 등을 실험적으로 구하면 미생물 농도를 예측할 수 있을 을 보여준다.

결과 및 고찰

상향유속의 변화에 따른 미생물 성장의 변화

미생물막 반응기에서 기질전환속도는 미생물 농도의 함수이므로 미생물막 건조밀도와 미생물막 두께에 영향을 받는다. Hoehn과 Ray(7)는 미생물막 건조밀도는 미생물막 두께에 따라서 변화하고 최대 활성을 띤 미생물막 두께에서 최대 값을 갖는다고 하였다. 미생물막이 얇거나 유입 기질농도가 높을 때는 미생물막 속으로 기질이 완전히 침투할 수 있기 때문에 미생물의 성장은 기질의 부족에 영향을 받지 않게 되며, 높은 미생물막 건조밀도를 형성하게 한다.

그러나 미생물막 두께가 증가할수록, 유입 기질 농도가 감소할수록 미생물막내에 물질전달제한이 발생하여 미생물 성장이 방해를 받게 되므로 미생물막 내부의

미생물은 내호흡상태에 있게 되며 미생물막 건조밀도를 감소시키는 원인이 된다. 유기물 농도가 2,050mg/l 이고 HRT를 1day로 일정하게 유지한 상태에서 상향유속을 22m/h, 32m/h 및 42m/h로 변화시키면서 상향유속에 따른 미생물 두께 및 미생물 농도와의 관계를 Fig. 2에 나타내었으며 상향유속이 증가함에 따라 미생물막 두께와 미생물 농도는 감소하였다. 이는 상향유속이 증가할수록 미생물막이 전단력을 많이 받으므로 미생물막이 증가할 수 없고 미생물 농도도 증가할 수 없음을 알았다. 그러므로 상향유속을 조절함으로써 미생물막의 두께를 조절할 수 있었다.

측정한 미생물막 건조밀도와 미생물막 두께와의 관계를 Fig. 3에 나타내었는데, 그림에서 보는 바와 같이 미생물막 두께가 증가함에 따라 물질전달제한의 영향으로 기질부족현상이 발생하여 미생물막 건조밀도는 감소하였다. 일반적으로 미생물막 두께가 증가하면 미생물 농도는 증가하나, Fig. 4를 보면 미생물 농도가 직선적으로 증가하다가 일정하게 유지되었는데, 이러한 현상은 미생물막 두께가 커질수록 미생물막 건조밀도가 감소하여, 미생물막 건조밀도가 미생물 농도를 감소하는 방향으로 영향을 미친 것으로 사료되었다.

이상의 결과들을 고찰해 보면, 최대 미생물 농도를 유지하려면 상향유속을 낮게 하는 것이 바람직하나, 최소 유동화 속도 이상에서 반응기를 운전하여야 하므로 미생물 농도를 높게 유지하면서 상향유속을 최소화하는 최적 상향유속을 선정하여야 한다. 또한 미생물 농도를 높게만 유지하는 것은 과도한 미생물막 두께를 초래함으로써

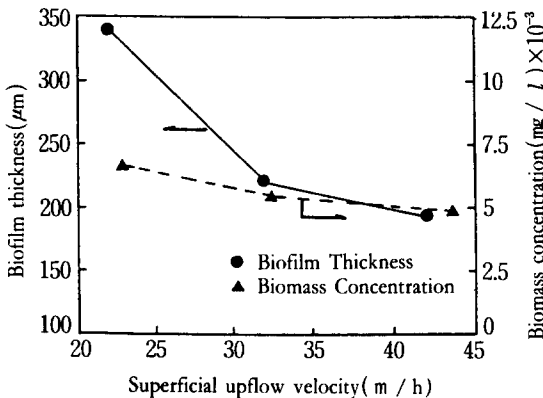


Fig. 2. Effect of superficial upflow velocity on biofilm thickness and biomass concentration.

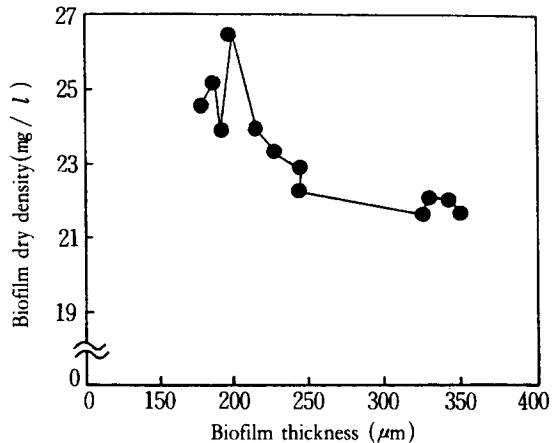


Fig. 3. Dependence of biofilm thickness on biofilm dry density.

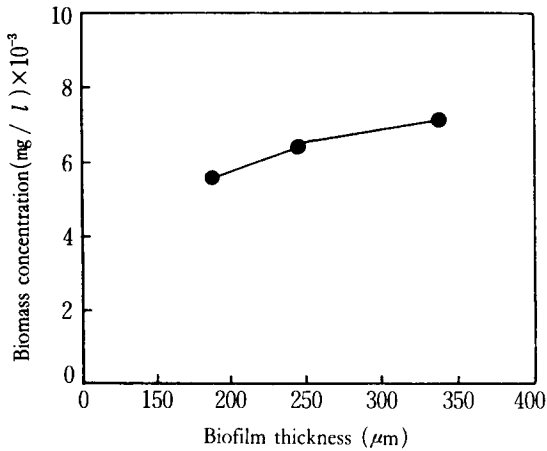


Fig. 4. Effect of biofilm thickness on biomass concentration.

유기물의 확산저항에 의해 최적의 유기물 처리효율을 얻지 못하기 때문에 최적의 유기물 처리효율을 얻을 수 있는 미생물막 두께와 미생물 농도가 더욱 중요하였다(5).

미생물 농도의 예측

미생물 농도에 영향을 미치는 인자들인 공극율, 미생

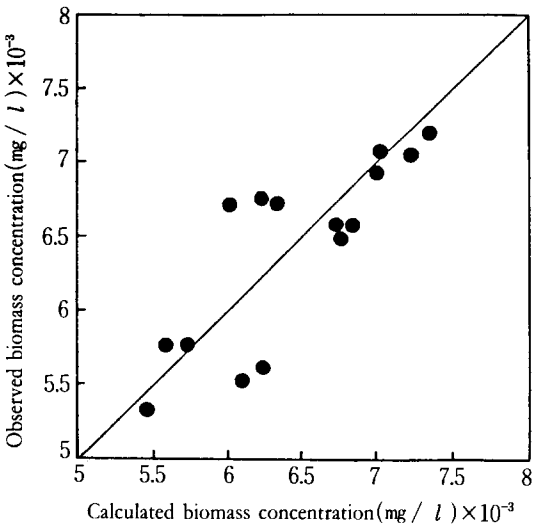


Fig. 5. Comparison of calculated and observed biomass concentration in FBBR.

물막 건조밀도 및 미생물막 두께로 부터 미생물 농도를 식(1)을 이용하여 계산하였고, 실측한 미생물 농도와 비교하여 Fig. 5에 나타 내었다.

미생물막 두께는 현미경을 이용하여 실측하였고, 층 공극율과 미생물막 건조밀도는 모래의 농도와 시료(폐수 + bioparticle)의 농도를 측정하여 계산하였다. 계산된 미생물 농도는 실측치와 근접하였으며 상대오차는 5.07%이었다. 이 결과로 부터 일정한 유기물 부하에서는 상향유속을 변화시킴으로써 미생물막 건조밀도, 층 공극율 및 미생물막 두께를 조절할 수 있어 미생물 농도도 제어할 수 있었다.

유기물 부하율에 따른 미생물 성장과 유기물 처리효율의 변화

생물막 유동층 반응기에서 HRT를 12시간, 온도를 22±1℃로 유지하여 정상상태에 도달했을 때, 유기물 부하율에 따른 TCOD와 SCOD 처리효율의 변화를 Fig. 6에 나타내었다. Fig. 6를 보면 유기물 부하율에 따른 SCOD 처리효율은 유기물 부하율의 증가에 따라 서서히 감소하여 유기물 부하율이 6kgCOD / m² · day에서 80% 이상의 높은 처리효율을 나타내었으나, TCOD의 경우에는 1kgCOD / m² · day에서는 80%의 처리 효율을 보여주나 유기물 부하를 8.4kgCOD / m² · day로 증가시켰을 때에는 40% 정도의 처리효율을 나타내어 폐수중에 유기-무기 복합합물등의 난분해성 물질이 많이 존재함을 나타내었다. 그러나 일반적으로 이용되고 있는 활성슬러지법에서는 유기물 부하율 1.5kgCOD / m² · day에서도 70%이하의 처리효율을 나타내므로(8), 생물막 유동층 반응기가 주정폐수처리에 있어 우수한 폐수처리 반응기임을 알 수 있었다.

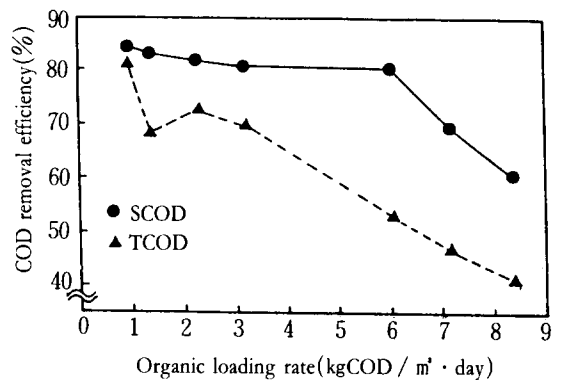


Fig. 6. Organic loading rate versus COD removal efficiency.

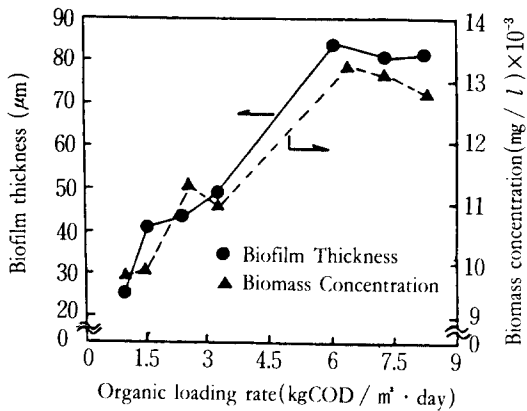


Fig. 7. Effect of organic loading rate on biofilm thickness and biomass concentration.

상향유속을 22m / hr로 고정한 상태에서 유기물 부하율에 대한 미생물 농도변화와 미생물막 두께변화를 Fig. 7에 나타내었는데, 유기물 부하율이 증가함에 따라 미생물 농도와 미생물막 두께는 증가하는 경향을 나타내고 있으며, 유기물 부하율 6kgCOD / m² · day 이상에서는 미생물 농도와 미생물막 두께의 변화가 거의 없었다. 합성폐수에서는 유기물이 미생물에 의해 충분히 분해될 수 있어 유기물 부하율이 증가할수록 미생물막 두께는 거의 직선으로 증가하였는데 비해, 주정공장 폐수에서는 유기물 부하율이 증가함에 따라 미생물의 성장을 저해하는 유기물의 축적으로 유기물 부하율이 6kgCOD / m² · day 이상에서는 미생물막의 두께의 변화가 나타나지 않았다. 이 값을 미생물이 주정폐수의 용해성 유기물을 섭취할 수 있는 한계점으로 판단할 수가 있었다.

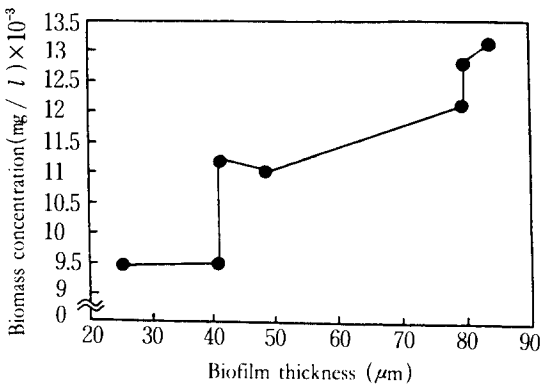


Fig. 8. Effect of biofilm thickness on biomass concentration.

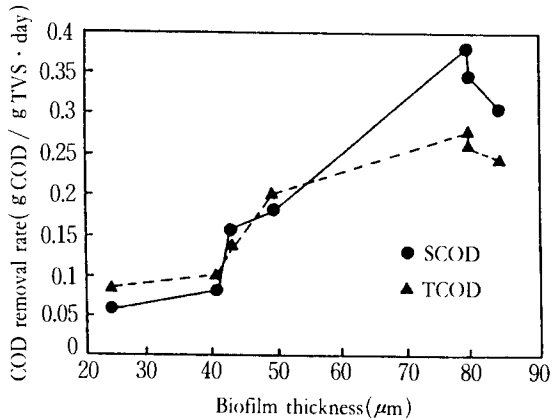


Fig. 9. Effect of biofilm thickness on COD removal rate.

상향유속은 22m / hr로 고정한 상태에서 유입 유기물 농도를 변화시킬 때의 미생물막 두께변화에 따른 미생물 농도 변화를 고찰하여 Fig. 8에 나타내었다. 미생물 두께가 증가할수록 반응기내 미생물 농도는 거의 직선적으로 증가하는 경향을 나타내었으나, 미생물막의 두께 80μm 정도에서 미생물 농도의 증가는 멈추었다. 이러한 현상을 420μm 두께까지 성장한 합성폐수(9)의 경우와 비교해보면 주정폐수에 난분해성 물질과 미생물의 성장을 저해하는 물질이 많은 것을 알 수 있었다.

미생물막 두께 변화에 따른 유기물 제거율의 변화를 Fig. 9에 나타내고 있는데, 미생물막이 증가함에 따라 SCOD와 TCOD 제거율은 증가하는 경향을 나타내고 있으나 미생물막 두께가 80μm 이상에서는 SCOD 제거율과 TCOD 제거율이 모두 감소하는 경향을 나타내고 있으므로, 미생물막 두께 80μm이 본 실험에 이용된 주정공장폐수에서의 미생물막 한계점임을 확인하였다.

요 약

본 연구에서는 생물막 유동층 반응기를 이용하여 주정공장폐수를 처리함에 있어 상향유속과 유기물 부하의 변동에 따른 미생물의 성장과 유기물 처리효율을 조사하고, 미생물 성장에 따른 미생물 농도의 변화를 계산하여 이를 실측한 미생물 농도와 비교하였다.

상향유속에 따라 미생물 농도, 미생물막 두께는 민감한 반응을 보였고, 미생물 농도를 높게 유지하기 위해서는 상향유속을 낮게 유지하는 것이 효과적이나, 이에 따라 미생물막도 증가하나 유기물의 제거율은 상대적으로 증가하지 못하므로 적절한 상향유속을 유지하는

것이 유기물 제거율의 측면에서는 유리한 것으로 고찰되었다.

또한 기존 활성슬러지법에서 주정폐수를 처리할 때는 유기물 부하율 $1.5\text{kgCOD} / \text{m}^3 \cdot \text{day}$ 에서 70% 이하의 COD 처리효율을 나타내는데 반해, 생물막 유동층 반응기에서는 $6\text{kgCOD} / \text{m}^3 \cdot \text{day}$ 이상에서도 80%의 COD 처리효율을 나타 내었다.

감 사

본 연구는 1990년도 학술진흥재단 연구 조성비로 수행되었으며, 연구비 지원에 대해 심심한 감사를 드립니다.

참 고 문 헌

1. N. K. Najari, K. C. Khliar and S. P. Mahajan (1984), *Biotech. and Bioeng.*, **26**, 1445.
2. T. C. Chun, W. K. Shieh and A. M., ASCE (1986), *J. of Envi. Eng.*, **112**, 4, 718.
3. M. Tosezos and A. Benedek (1986), *JWPCF*, **52**, 4, 718.
4. *Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater*, (1985), APHA, AWWA, WPCF, 16th Edition.
5. 김동석, 안갑환, 이민규, 송승구(1991), *한국생물공학회지*, **6**, 2, 115.
6. R. C. Hoehn and A. D. Ray (1973), *JWPCF* **45**, 23 08.
7. W. K. Shieh and C. Y. Chen (1984), *Chem, Eng. Res. Des.*, **62**, 133.
8. A. S. vernick and E. C. Walker (1982), *Handbook of Wastewater Treatment Process*, Burns and Roe Co: Paramus, New Jersey.
9. 김동석, 안갑환, 서명교, 박태주, 송승구(1991), *한국 화학공학*, **29**, 4, 448

(Received; October 10, 1991, Revised; October 28, 1991, Accepted; November 12, 1991)