

고정화 미생물 반응조의 운전특성 및 생활하수처리 적용

차수길† · 이병헌 · 정승현*

부경대학교 환경공학과 · *주식회사 이엔텍 기업부설연구소

Operational characteristics and application of reactor using entrapped microorganism in the sewage treatment

Su Gil Cha† · Byung Hun Lee · Seung Hyun Jeong*

Department of Environmental Engineering, Pukyong National University

*Research Institute in Affiliation for E&TECH CO., Ltd.

ABSTRACT

Entrapped media with cellulosic triacetate in which activated sludge was applied to induce operating factors and sewage treatment on site. The results are summarized as follows; The treatment efficiency of entrapped media is 92%, 90% and 80% at the size of 5mm, 7mm, and 12mm, respectively. Also, treatment efficient rate was increased by the packed amount of media in less than 30 % packed, while in more than 40 % packed that was decreased. It takes 10 day to reach the steady states and it is less than the existing activated sludge method. The slopes of oxygen consumption rate are almost parallel both in the entrapped media and free sludge. When organic loading rate is less than 1.0 kg/m³ · d on site, it is achieved good removal rate independent of changes of loading rate.

Keywords : entrapped media, cellulosic triacetate, sewage treatment

I. 서 론

인구증가 및 생활수준의 향상과 더불어 생활하수 발생량은 매년 증가추세에 있다. 1999년 전국의 생활하수 발생량은 16,273천톤/일에 이르고 있어 산업 폐수 발생량 4,068천톤/일과 비교할 때 전체 수질 오염물질의 약 80 %에 해당된다.¹⁾ 생활하수 발생량은 상수 급수량과 밀접한 관계가 있으며, 주요 오염원은 일반가정, 상가, 숙박업, 목욕탕 등의 수세식 변소, 세면장, 주방 등에서 주로 발생된다. 이러한 생활하수 중에는 유기물질, 부유물질 및 영양염류 등이 주요 오염물질이다. 1991년 3월 오수, 분뇨 및 축산폐수처리에 관한 법률의 제정으로 그 동안 공장에서 배출되는 산업폐수에만 국한하여 규제하고 있던 정책을 생활하수에 대하여도 관심을 가지게 되었다. 1999년 현

재 우리 나라 하수종말시설은 114개소에 시설용량 16,618천톤/일으로 약 65 %의 하수 처리율을 나타내고 있어¹⁾ 인구밀집지역에서는 대규모 하수처리시설을 설치하여 문제를 해결할 수 있지만 하수처리시설이 없는 중소규모 도시나 농어촌지역은 간이처리 또는 재래식방법으로 처리됨으로서 공공수역의 오염은 더욱 가속화되고 있다. 일반적으로 오수처리시스템은 소규모이면서 처리효율이 높고 상주관리자를 두지 않는 순회처리방식으로도 안정된 처리수질을 얻을 수 있어야 함은 물론 경제적이면서 유지관리가 용이하여야 하는 등의 까다로운 조건을 가지고 있다.²⁾ 더욱이 2002년부터는 오수정화시설의 방류수 수질기준이 강화됨에 따라서 기존의 처리방법으로는 수질기준을 만족시키는데 어려움이 예상되고 있어 유지관리가 용이하고 고효율을 낼 수 있는 처리방안에 대한 연구가 시급한 실정이다. 최근에는 폐수처리 분야에서도 바이오테크놀로지를 이용한 폐수처리 시스템이 개발되고 있으며, 특히 이 중에서도 미생물을 고정화한 시스템이 다각도로 연구되고 있다. 고정화

†Corresponding author : Dept. of Environmental Engineering, Pukyong National Univ.

Tel 055)211-1533 Fax 055)211-1419

E-mail : cha0503@lycos.co.kr

미생물은 반응조에 고농도의 미생물을 유지할 수 있을 뿐만 아니라 폐수의 성상에 맞는 미생물을 선택할 수 있고 독성물질에 대한 저해작용이 적으며, 재래식 활성슬러지법에서 문제가 되고 있는 고액분리가 용이하며 Bulking현상이 일어나지 않는 잇점이 있다³⁾. 주로 연구되고 있는 고정화 미생물로는 메탄균, 질산화균, 탈질균, 페놀분해균 등⁴⁻⁷⁾이며, 고정화재료는 천연 고분자물질인 알긴산염 및 키토산 등이 사용되어 왔으나⁸⁾ 미디어 강도가 낮기 때문에 최근에는 합성고분자물질을 이용하는 연구가 진행되고 있다^{5,9, 10-13)}

본 연구에서는 Cellulose triacetate를 고정화 재료로 하여 활성슬러지를 포괄 고정화한 미디어의 운전 특성을 연구하고 오수처리 등 소규모 생활 하수처리에 적용하여 연속처리 가능성을 검토하였다.

II. 연구방법

1. 고정화 방법

본 연구에서는 고정화 대상 미생물로 도시하수처리장 폭기조 내 슬러지를 이용하였으며, 이를 현장에서 바로 채취하여 침전·농축한 후 5,000 rpm에서 10분간 원심분리(HITACH Centrifuge, 05P-21)시켰다. 원심분리된 슬러지의 TS, VS 함량 및 함수율은 각각 67.76 g/l, 59.46 g/l 및 89 %였다. 고정화는 Kolarik¹⁴⁾이 개발한 방법을 수정하여 수행하였다. 분말상의 셀룰로즈 트리아세테이트를 염화메틸렌(methylene chloride)에 10 % (w/v)로 용해하여 슬러지와 혼합한 후 일정 틀에 부은 즉시 톨루엔에 담근 후 24 시간동안 고정화시켰다. 고정화된 고정화 미디어는 꺼내어 적당한 크기로 자른 후 톨루엔과 염화메틸렌을 물로 잘 씻어 실험에 사용하였다.

2. 폐수 성상 및 조제

고정화 미생물 미디어의 운전특성조사를 위한 실험에 사용된 합성폐수는 Table 1에 나타난 바와 같이 글루코스와 글루타민산을 주성분으로 하여 조제·사용하였다. 또한 고정화 미디어의 현장 적용 가능성을 검토하기 위해서 Table 2와 같은 조성의 창원 소재 연구원에서 발생하는 오수처리장 저류조의 오수를 이용하였다.

Table 1. Composition of synthetic wastewater

Content	Concentration(mg/l)
Glucose	250
L-Glutamic acid	250
(NH ₄) ₂ SO ₄	125
MgSO ₄ · 7H ₂ O	20
FeCl ₂ · 6H ₂ O	0.125
KH ₂ PO ₄	131.75
K ₂ HPO ₄	267.5
MnSO ₄ H ₂ O	2.5
CaCl ₂	1.87

Table 2. Composition of sewage

Content	Concentration(mg/l)
BOD	60~120
SS	30 ~ 50
NH ₄ -N	12 ~ 46
T-N	22 ~ 75
T-P	2 ~ 3

3. 실험 장치

Fig. 1은 미생물 고정화 미디어의 특성조사 실험에 사용한 반응조의 모식도를 나타낸 것이다. 반응조 유효용량은 2 l 이고 산소공급은 공기펌프와 산기석을 이용하였고 최종 침전지 없이 운전하였다.

Fig. 2는 현장 오수처리 실험에 사용한 반응조로써 1차 침전지, 생물반응조, 2차 침전지로 구성되어 있다. 각각의 유효용량은 0.08, 0.11, 0.04 m³ 이다. 이상의 실험장치는 유동상으로 운영되며 정량펌프를 이용하여 연속식으로 운전하였다.

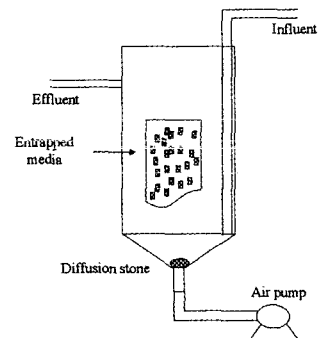


Fig. 1 Schematic diagram of lab-scale experiment apparatus.

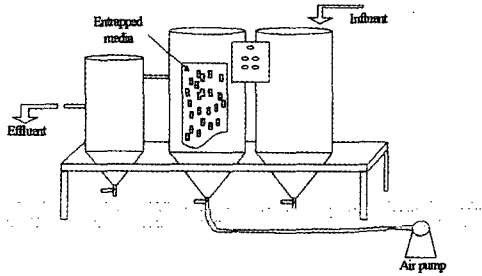


Fig. 2 Schematic diagram of sewage treatment system for on site treatment.

4. 실험 방법

실험은 크게 고정화 미생물 미디어의 운전특성조사 및 고정화 미디어를 이용하여 현장 오수처리의 적용 가능성에 대한 실험으로 나누어 수행하였다. 운전 특성 실험은 미디어 크기에 따른 처리효율, 반응조에 대한 미디어 최적 충전율 및 부하율 변화에 따른 운전 특성 및 고정화 미디어의 활성도 측정 등을 조사하였다. 미디어는 5, 7, 12 mm 크기의 육면체 형태로 만들었으며, 충전율은 반응조 유효용적의 10, 20, 30, 40, 50 %로 충전시켰다. 유기물 부하는 0.3~0.90 kg BOD/m³·d로 단계적으로 증가시켰다. 또한 현장 오수에 적용하여 HRT를 8~2 시간으로 변화시켜 가면서 처리효율을 조사하였다. 처리효율은 BOD, SS로 평가하였다.

III. 결과 및 고찰

1. 고정화 미디어 크기 결정

고정화 미디어를 이용하여 수처리 할 경우 미디어 내부에서 기질 및 산소확산의 영향을 고려할 필요가 있다. 미디어의 크기는 이러한 성질에 크게 작용한다고 생각된다. 5, 7, 12 mm의 육면체형태로 만들어 합성폐수를 기질로 하여 실험을 수행하였다. Fig. 3은 미디어의 크기에 따른 제거효율을 나타낸 것이다. 5, 7, 12mm의 고정화 미디어로 운전된 처리효율은 각각 92, 90, 80%로 5, 7mm에서는 뚜렷한 차이를 보이지 않았으나 12mm에서는 처리효율이 현저히 낮아지고 있음을 알 수 있다.

Matines¹⁵⁾은 메탄올과 글리신으로부터 L-serin의 생성에서 고정화 bead의 직경이 작을수록 생성율이 증가한 것으로 보고하였으며, 角野立夫¹⁶⁾는 Pseudomonas sp.를 고정화하여 생균분포를 조사한 결과 표면에서 1.2 mm까지 집중적으로 증식하고 있다고 하였다. 또한 戶田¹⁷⁾은 효모를 한천배지에 고정하

여 배양한 결과 고정화 bead가 작을수록 증식속도가 증가하고 최고 농도에 도달하는 시간이 짧음을 나타내고 있으며 이것은 고정화 bead 내부로 산소 및 기질의 확산에 의한 것으로 보고하고 있다.

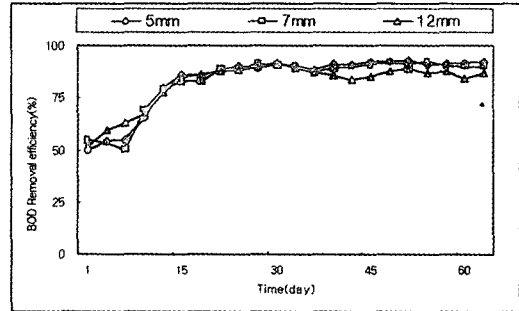


Fig. 3 Variation of BOD removal efficiency according to media size.

2. 미디어 충전율에 따른 처리효율

Fig. 4는 고정화 미디어 충전율의 변화에 따른 합성폐수의 처리효율을 나타내고 있다. 전체 반응조 유효용량의 10, 20, 30, 40, 50 %로 고정화 미디어를 충전하여 HRT 8시간으로 운전하였다. 충전율을 30 %까지 증가시켰을 때 충전율에 따라서 처리효율이 증가하였으나 40 %이상 충전하였을 경우는 미디어의 유동이 거의 일어나지 않고 고정상으로 운전되었다. 충전율이 높을수록 초기에는 처리효율이 증가하였으나 어느 정도 시간이 경과함에 따라 50 %충진 반응조에서는 처리효율이 점차 저하되어 60 %이하로 감소되었다. 이러한 원인은 미디어 유동이 원활하지 않아 산소공급이 부족하고 미디어 외표면에 자생미생물이 부착성장하다가 미디어의 상호충돌과 폐수의 흐름에 의한 전단력으로 인하여 탈리됨으로써 유출수 수질이 악화된 것으로 생각된다.

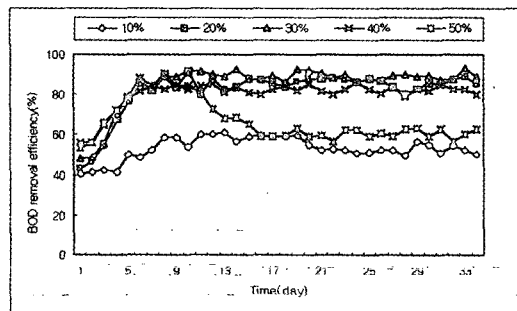


Fig. 4 Variation of BOD removal efficiency according to filling rate.

한편, 박¹⁸⁾은 한천 아크릴아미드로 고정화한 미생물을 이용하여 PVA 합성폐수처리에서 bead의 주입량에 따라서 분해율은 정비례관계가 성립하지 않은 것으로 보고하고 있다.

3. 유기물 부하량에 따른 처리효율

합성폐수를 이용하여 유기물 부하량을 증가시키면서 처리수의 수질을 조사하였다. 반응조 유효용적의 30 %를 충전하여 HRT 8시간으로 운전한 결과를 Fig. 5에 나타내었다. 초기 10일까지는 50 % 이하의 낮은 처리효율을 보이고 있으며 그 이후는 정상상태에 도달하여 안정된 처리효율을 나타내고 있다. P.Y Yang¹³⁾은 고정화 미생물을 이용한 폐놀화합물의 처리에서 정상상태에 도달하는데 4~7 일정도 요구된 것으로 보고하고 있으며, 이처럼 고정화 미생물을 이용할 경우 초기 적용기간이 짧은 것으로 나타났다. 또한 유기물 부하량을 0.30, 0.42, 0.60, 0.75, 0.90 kgBOD/m³ · d로 단계적으로 증가시키면서 관찰한 결과 90 %이상의 제거효율을 나타내고 있으며 또한 부하변동에 의한 영향이 없는 것으로 관찰되었다. 角野立夫¹⁹⁾는 고정화 미생물을 이용한 유기성 하수를 처리한 결과 재래식 활성슬러지 보다 3~5 배의 높은 처리효율을 얻은 것으로 보고한 바 있다.

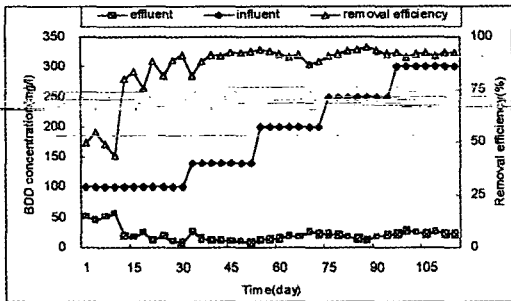


Fig. 5 Variation of BOD concentration and removal efficiency according to organic loading rate.

4. 고정화 미생물의 활성도 측정

호기성 미생물에 산소를 공급하는 것은 중요하며 특히 고정화 미생물을 이용한 시스템에서는 고정화 매트릭스에 의한 기질 및 산소확산이 제한되고 반응조 내 미생물을 고밀도로 유지하기 때문에 더욱 중요하다.²⁰⁾

Fig. 6은 고정화 미생물 매디아와 활성슬러지의 유기물에 대한 산소 소비율을 나타낸 것이다. 300ml BOD병에 고정화 매디아 18 g(20ml)을 넣고 BOD농

도 200 mg/ℓ의 합성폐수를 채웠다. 비교 실험으로 2,000 mg/ℓ 활성슬러지를 이용하였다.

그림에 나타난 바와 같이 단위시간 당 산소소비량은 거의 비슷한 것으로 측정되었다. 유기물의 생물학적 산화에 있어서 산소는 호흡작용에 일부 사용되고 대부분의 경우는 합성작용을 위해 이용되며, 또한 미생물의 내분해와 질산화에도 역시 산소가 필요하다.²¹⁾ 따라서, Fig. 6의 결과에 나타난 바와 같이 미생물을 고정화시켜도 활성 미생물과 비슷한 산소소비율과 유기물 분해속도를 가지며, 이는 Hashimoto 등²²⁾과 Hanaki 등²³⁾의 보고에서처럼 고정화 이후에도 미생물의 활성도는 유지 또는 회복된다는 것을 간접적으로 나타내고 있다.

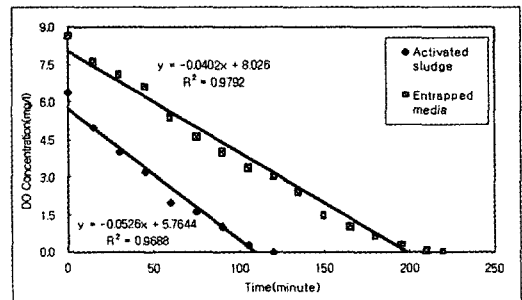


Fig. 6 Relationship of DO consumption rate between entrapped media and free sludge.

5. 현장 오수처리

오수정화조 저류조에서 펌핑되는 오수는 입자성분이 너무 많아 1차 침전지를 거쳐 고정화 생물반응조로 유입하였다. 반응조는 유효용적이 0.11 m³ (diameter 50 cm, height 60 cm)이며 고정화 매디아를 30 %정도 충전하였다. 유입되는 원수는 오수정화조, 구내식당 배출수 및 실험실에서 나오는 냉각수, 세척수 등으로 BOD 60~120 mg/ℓ, SS 30~50 mg/ℓ의 범위로 농도 변화가 심하다.

Fig. 7 및 8은 HRT 8, 6, 4.5, 3.5, 2시간에서 각각 30 일간으로 운전한 결과를 나타내었다. 실험개시 7 일까지는 점차 감소추세를 나타내며 정상상태로 도입되어 16일 이후부터는 90 %의 처리효율을 보이고 있다. 합성폐수에서의 정상상태 도달기간과 비슷한 결과를 보여주고 있다. HRT 3.5시간까지는 유기물 부하에 관계없이 BOD, SS 모두 10mg/ℓ 이하의 안정된 처리수를 얻을 수 있었다. 그러나 HRT 2시간으로 변화시킨 결과 처리효율이 40~72 %사이에서 불안정한 경향을 나타내었다.

Fig. 9는 유기물 부하를 0.2~1.5 kg/m³·d로 증가에 따른 처리효율 변화를 나타내었으며, 1.0 kg/m³·d 이하에서는 BOD 85 %, SS 70 %의 제거효율을 보여주고 있다. 그러나 1.5 kg/m³·d 이상에서는 처리효율이 60%이하로 감소되고 있음을 알 수 있다.

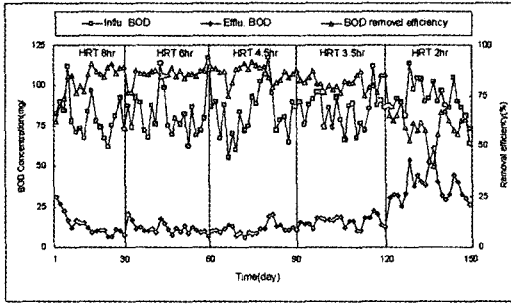


Fig. 7 Variation of BOD concentration and removal efficiency according to HRT.

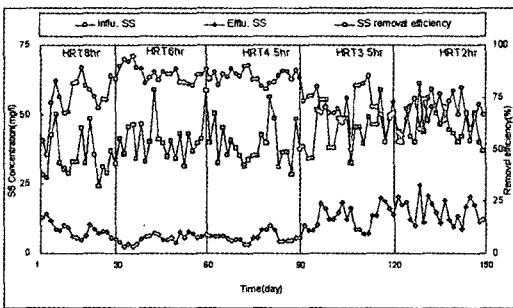


Fig. 8 Variation of SS concentration and removal efficiency according to HRT.

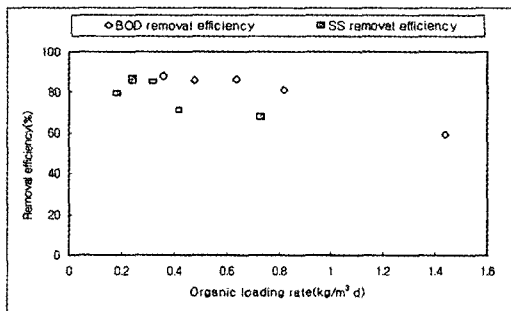


Fig. 9 Variation of removal efficiency according to organic loading rate.

IV. 결 론

Cellulose triacetate를 재료로하여 활성슬러지를 포괄 고정화한 매디아를 이용하여 실험실 규모의 반응조를 운전한 결과 운전인자 도출 및 현장 오수처리에 적용 가능성을 검토하였다.

1. 고정화 매디아의 크기에 따른 처리효율은 5mm, 7mm, 12mm에서 각각 92%, 90%, 80%로 나타났다.
2. 반응조의 매디아 충전량을 10, 20, 30, 40, 50%로 변화시켰을 경우 30%까지는 충전량에 따라 처리효율이 증가하지만 40, 50%에서는 초기에는 증가하나 시간경과에 따라 감소추세를 나타내었다.
3. 운전 개시후 정상상태에 도달되는데 10일정도의 기간이 소요되었다.
4. 유기물 부하를 0.3~0.9kgBOD/m³·d까지 단계적으로 증가시켜도 90%이상의 안정적인 제거율을 보였다.
5. 고정화 매디아의 산소 소비속도는 활성슬러지의 산소 소비속도 함수의 기울기와 거의 평형을 이루고 있다.
6. 현장 오수처리에 적용한 경우 HRT를 8~2시간으로 단계적으로 변화시키면서 운전한 결과 3.5시간까지는 부하변동에 관계없이 BOD, SS 모두 20mg/l이하의 양호한 처리효율을 나타내었다.

참고문헌

- 1) Ministry of Environment : A white book on environmental, 449-457, 2000.
- 2) Kim Ueong ho and Suh kyu tae : Maintenance and efficient management of village sewage system, Proceedings of the Second Annual Conference, The Korea Research Society of Rural Environment, 45-68 , 1997.
- 3) Hashimoto S. and Furukawa K. : Immobilization of activated sludge by PVA boric acid method, Biotechnol. Bioeng. 30, 52-59, 1987.
- 4) 田中修三, 野島健治 : 호리비닐알킬릴による嫌氣性醱酵菌の包括固定化, 用水と廢水, Vol. 30, 36-42, 1988.
- 5) Kokufuta, E. : Coimmobilized of Nitrosomonas europaea and Paracoccus cells using polyelectrolyte complex stabilized calcium alginate gel, J. Ferment, Technol., Vol. 56, 659-664, 1987.

- 6) 田容正三 : 固定化 *Paracoccus denitrificans* による脱窒とその固定化細胞の保存特性. 醱酵工學, Vol. 66, 235-240, 1984.
- 7) Bettman, H. and Rehm, H. J. : Degradation of phenol by polymer entrapped microorganisms, *Applied microbiol. Biotechnol.*, 20, 235-2908.(1984) Knott, D. and Daly, M., Mechanics and diffusional change observed in multilayer chitosan/alginate coacervate capsules. *Process Biochem.* 48, pp. 48-50, 1988.
- 9) Emily J.T.M. Leenen(1996) : Characteristics and selection criteria for support materials for cell immobilization in wastewater treatment. *Wat. Res.* Vol. 30, 12, 2985-2996.
- 10) Kazuhiro Tanaka : Application of immobilized nitrifiers gel to removal of high ammonium nitrogen. *Wat. Sci. Tech.* Vol. 29, 9, 241-250, 1994.
- 11) H. Asano : A study of nitrification utilizing whole microorganisms immobilized by the PVA freezing method. *Wat. Sci. Tech.* Vol. 26, 5, 1037-1046, 1992.
- 12) 橋本獎, 古川憲治 : 活性汚泥の固定化とその浄化機能に関する研究. *下水道協會誌*, Vol. 23, 261, 41-48, 1986.
- 13) P.Y. Yang and T.S. See : Packed entrapped mixed microbial cell process for removal of phenol and its compounds. *J. Environ. Sci. Health*, A26(8), 1491-1512, 1991.
- 14) Kolarik, M. J., Chen, B. J., Enery, A. H. Jr., and Lin, H. C. : Glucose Isomerase Cells Entrapped in Cellulose Acetates. ; *Immobilized Enzymes in Food and Microbial Processes*. Colson, A. C., and Cooney, C. L., eds., Plenum, New York. 71-83, 1974.
- 15) Martines, A., Alginate as immobilization material corelation between chemical and physical properties of alginate of gel beads. *Biotechnol. Bioeng.*, 33, 79-89, 1989.
- 16) 角野立夫, アクリルアミド包括固定化法による排水処理. *用水と処理*, 29, 735-741, 1987.
- 17) 戸田 : 固定化微生物の廢水處理への 應用. *用水と處理*, 27, 992-999, 1985.
- 18) Park Yung Kyu and Lee Chul Hee, Treatment characteristic of PVA wastewater by immobilized microorganism. *J. of KSEE*, Vol. 16, 8, 985-993, 1994.
- 19) 角野立夫, 包括固定化微生物を用いた廢水處理技術. *用水と廢水*, Vol. 27, 1024-1029, 1985.
- 20) A. Tanaka, Oxygen diffusivity of synthetic gels derived from prepolymers. *Appl. Microbiol Biotechnol*, 28, 1-7, 1988.
- 21) AWARE, Inc. (1974) : *Process Design Techniques for Industrial Waste Treatment*. edited by C.E.Adams, Jr. and W.W.Eckenfelder, Jr. Nashville, Tenn.: Enviro Press.
- 22) Hashimoto, S., and Furukawa, K. : Immobilization of Activated Sludge by PVA-boric Acid Method. *Biotech. Bioeng.*, Vol.15, 52-59, 1987.
- 23) Hanaki, K., Hirunmasuwan, S., and Matsuo, T., Selective Use of Microorganism in Anaerobic Treatment Processes by Application of Immobilization. *Wat. Res.*, Vol.28, 4, 993-996, 1994.