

광합성세균 미생물막반응기에 의한 유기성폐수의 처리특성

오광근* · 이철우 · 전영중 · 이재홍

제일제당(주) 종합연구소

Characteristics of Organic Wastewater Treatment with Biofilm Reactor of Phototrophs. Kwang-Keun Oh*, Cheol-Woo Lee, Yeong-Joong Jeon and Jae-Heung Lee. R & D Center, CHEILJEDANG Corporation, Ichon 467-810, Korea — An efficient packed-bed type biofilm reactor charged with immobilized phototrophs was developed to treat organic wastewater at an extremely high volumetric loading rate. The packed bed reactor (PBR) charged with porous ceramic beads was superior to a fluidized-bed reactor suspended with activated carbon powders in terms of many aspects such as BOD removal efficiency, operational stability, and overall economics. For wastewater with BOD concentration as high as 20,000 mg/l, the BOD removal efficiency was maintained above 90% when the hydraulic retention time (HRT) was longer than 1 day. The allowable volumetric BOD loading rate of this reactor (20 gBOD/l·day) is more than ten-folds higher than that of an ordinary activated sludge method. The behaviour of the reactor was represented well by a Monod type kinetic equation with a maximum specific BOD loading rate(P) of 22.2 gBOD/l·day and a half saturation constant(K_s) of 1,750 mgBOD/l.

광합성세균(phototrophs)을 이용한 폐수처리 방법은 크게 두가지로 나눌 수 있는데, 그 하나는 폐수에 함유되어 있는 유기물을 저분자 유기산으로 가용화시킨 다음 광합성세균을 우점종으로 유지시켜 처리하는 방법이고, 다른 하나는 종래의 활성오니법(activated sludge method)을 변형한 것으로 폭기조에 존재하는 미생물과 광합성세균과의 공생관계에 의한 폐수처리 방법이다(1-3). 그러나 광합성세균은 성장속도가 느리고 균체농도가 낮기 때문에 폐수처리에 이용할 경우 순수 배양한 광합성세균을 주기적으로 공급해주어야 한다. 최근에 고농도폐수의 처리 및 유해물질의 분해에 많이 이용하고 있는 미생물막법(microbial films, biofilms)은 다공성 담체(media)에 미생물을 고정화(immobilization)시키는 방법으로서 단위부피당 미생물이 부착, 증식할 수 있는 표면적을 크게 하여 높은 농도의 미생물을 반응기내에 유지시킬 수 있으므로 폐수처리 효율을 크게 높일 수 있다(4,5). 본 연구는 광합성세균을 이용한 폐수처리의 효율을 높이기 위하여 광합성세균 미생물막반응기(biofilm reactor)를 사용하여 고농도폐수를 처리하는 특성에 관하여 고찰한 것이다.

재료 및 방법

균주 및 배양

본 연구에 사용한 균주는 토양으로부터 분리한 것으로 *Rhodospseudomonas capsulata* ATCC 11166으로 확인된 공지의 균주(6)이다. 기본배지(초산나트륨 3g,

황산암모늄 0.3g, 인산제2수소칼륨 0.5g, 황산마그네슘 0.2g, 염화나트륨 0.1g, 염화철6수화물 5mg, 염화칼슘2수화물 50mg, 효모추출물 10mg을 물 1l에 가하여 만든 배지, pH 7.3) 100ml가 함유된 500ml 플라스크에 *R. capsulata*를 접종하여 표면조도 3,000 Lux의 빛을 쬐어주면서 혐기조건하에서 온도 28°C로 3일간 배양후, 본배양을 위하여 기본배지 2l를 함유한 광합성세균 배양기에 5%의 *R. capsulata*를 접종하고 표면조도 3,000 Lux의 빛을 쬐어주고 혐기조건하에서 pH 7.5, 온도 28~32°C로 조정하면서 균체가 충분히 증식하도록 3~5일간 배양하였다.

폐수의 조성 및 특성

본 연구에서 사용한 폐수는 합성폐수와 실제 산업 폐수인 G폐수이다. 합성폐수 I은 포도당 3g, 황산암모늄 1.5g, 인산제2수소칼륨 0.5g, 황산마그네슘 0.2g, 염화나트륨 0.1g, 염화철6수화물 5mg, 염화칼슘2수화물 50mg, 효모추출물 10mg을 물 1l에 가하여 만든 COD_C농도 3,000 mg/l인 폐수(pH 7.0)이며, 합성폐수 II는 포도당 20g, 황산암모늄 10g, 인산제2수소칼륨 0.5g, 황산마그네슘 0.2g, 염화나트륨 0.1g, 염화철6수화물 5mg, 염화칼슘2수화물 50mg, 효모추출물 10mg을 물 1l에 가하여 만든 COD_C농도 20,000 mg/l인 폐수(pH 7.0)이다. G폐수는 음료공장에서 발생하는 BOD농도 35,000 mg/l 이상인 고농도폐수로서 그 특성은 Table 1에 나타내었고 필요에 따라 3,000~35,000 mg/l(pH 7.0으로 조정)로 희석하여 사용하였다.

*Corresponding author.

Key words: *Rhodospseudomonas capsulata*, packed-bed reactor, biofilm reactor, organic wastewater treatment

미생물막반응기

미생물막반응기는 담체에 미생물을 부착하여 형성된

미생물막을 이용하여 생물학적인 폐수처리를 하거나 생화학물질을 생산하는 반응기로서 본 연구에서는 Rittman 등(7)의 것을 변형한 것으로 Fig. 1에 표시한 형태의 반응기를 사용하였다. 원통형 컬럼(60(φ)×400(H) mm, vol=1130 ml)에 다공성 유리입자인 porous ceramic bead(PCB, WG-1, 쌍용양회제조) 또는 과립형 활성탄(RB-4, Norit사)을 충전시키고 자체순환(linear velocity 0.15 m/hr, 순환조에서 1,500 Lux의 빛을 조사)할 수 있는 완전혼합형 Packed-bed reactor(PBR)를 준비하였다.

미생물막의 형성

PCB 400 g을 충전시킨 원통형 컬럼(60(φ)×400(H) mm, vol=1130 ml)에 광합성세균의 배양액과 합성폐수 I을 1:1로 혼합하여 체류시간(hydraulic retention time, HRT) 1일로 1일간 유입한 후, 다음 2~3일간은 합성폐수 I만을 유입시켰다. 같은 조건으로 다음 30일간은 합성폐수 II를 유입시켜서 광합성세균의 미생물막을 형성시켰다. 그리고 G폐수를 5,000~10,000 mg/l

Table 1. Composition of G wastewater.

Contents	Composition
Main compounds	Sucrose, glucose, NaCl, citric acid, vitamin B etc.
pH	2.8~3.5
COD Cr	54,700 mg/l
Mn	31,800 mg/l
BOD ₅	36,500 mg/l
Suspended solid	1,940 mg/l
Total nitrogen	About 230 mg/l
Total phosphorus	Aabout 35 mg/l
Total sugar	44,000 mg/l
Major ions (mg/l)	Na ⁺ 166; Ca ⁺² 26; K ⁺ 268; Cl 549; PO ₄ ⁻³ 252; NO ₃ 76; SO ₄ ⁻² 27

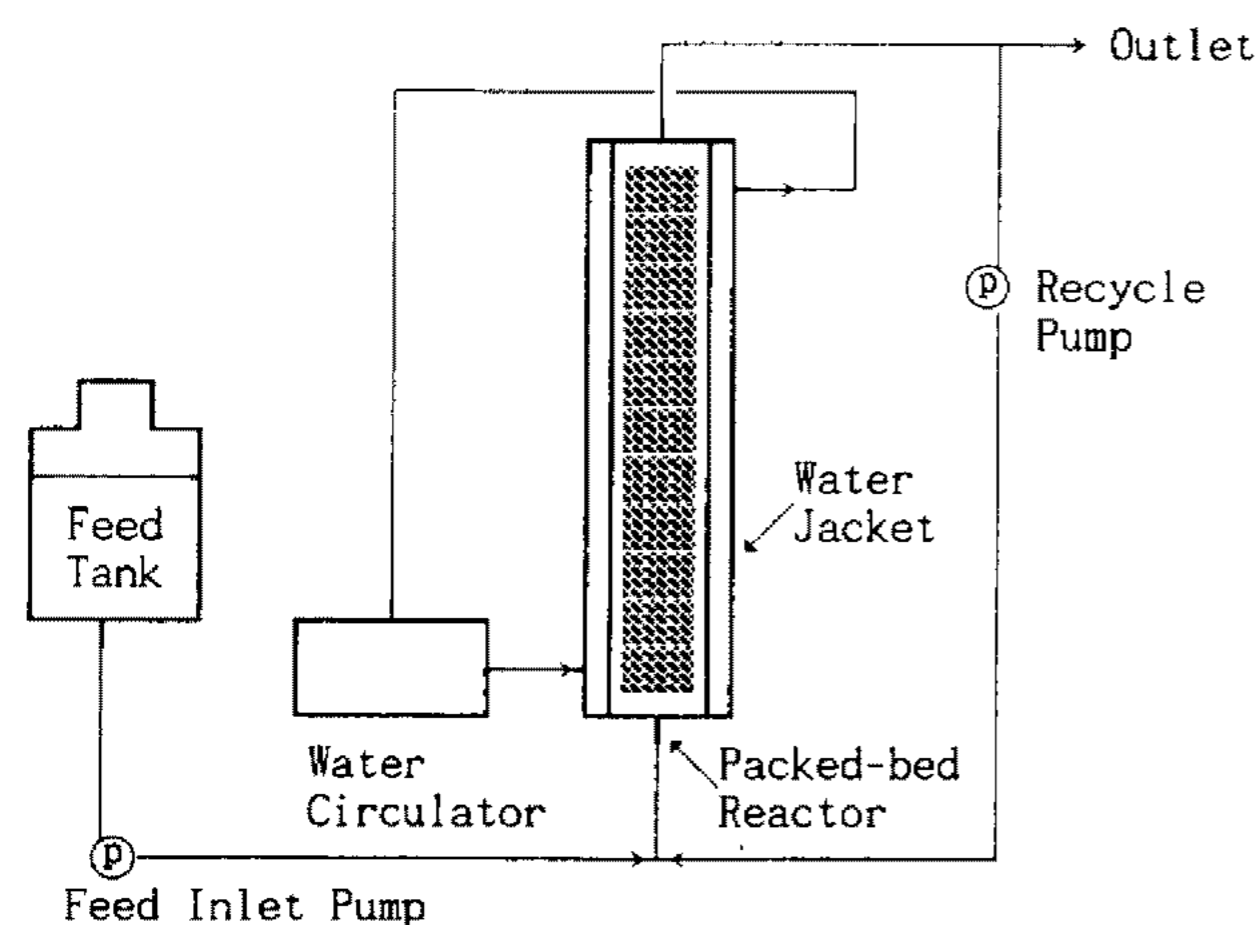


Fig. 1. Schematic diagram of PBR type biofilm system. PBR was packed with PCB or RB-4.

로 희석하여 동일한 조건에서 10~20일간 유입시키며 미생물막 성장 및 폐수적응을 진행하였다.

분석

생화학적 산소요구량(biochemical oxygen demand, BOD)과 화학적 산소요구량(chemical oxygen demand, COD_{Cr}) 등은 Standard Methods(8)을 기준으로 행하였다.

결과 및 고찰

미생물막반응기의 비교

생물학적인 폐수처리에 사용될 수 있는 미생물막 반응기의 형태로는 여러 가지 선택이 있을 수 있으나 산소 및 물질전달이 원활하고 반응기의 효율성과 안정성이 확보되는 등의 기본조건을 갖추어야 한다(9). 효과적인 반응기의 선택을 위해 광합성세균을 이용한 미생물막반응기로 PCB를 충전시킨 Packed-bed reactor (PBR)를 사용하여 처리특성을 살펴보았다. 앞에서 설명한 방법에 따라 미생물막이 형성된 PBR을 사용하여 HRT를 2일로 하고 G폐수의 유입농도를 3,000~35,000 mg/l로 변화시켜 유기물부하량(BOD loading rate)을 달리하면서 처리성을 비교한 결과는 Fig. 2와 같았다. BOD 용적부하가 증가함에 따라 거의 비례적으로 서서히 처리효율이 감소하였으나 용적부하 20 gBOD/l·day에서도 처리효율이 90% 이상을 유지하였다. 한편 비교목적으로 분말활성탄을 현탁시킨 Fluidized-bed reactor(FBR)에 광합성세균의 미생물막을 형성시켜 동일하게 실험을 진행한 결과 BOD 용적부하가 2.5~6.0

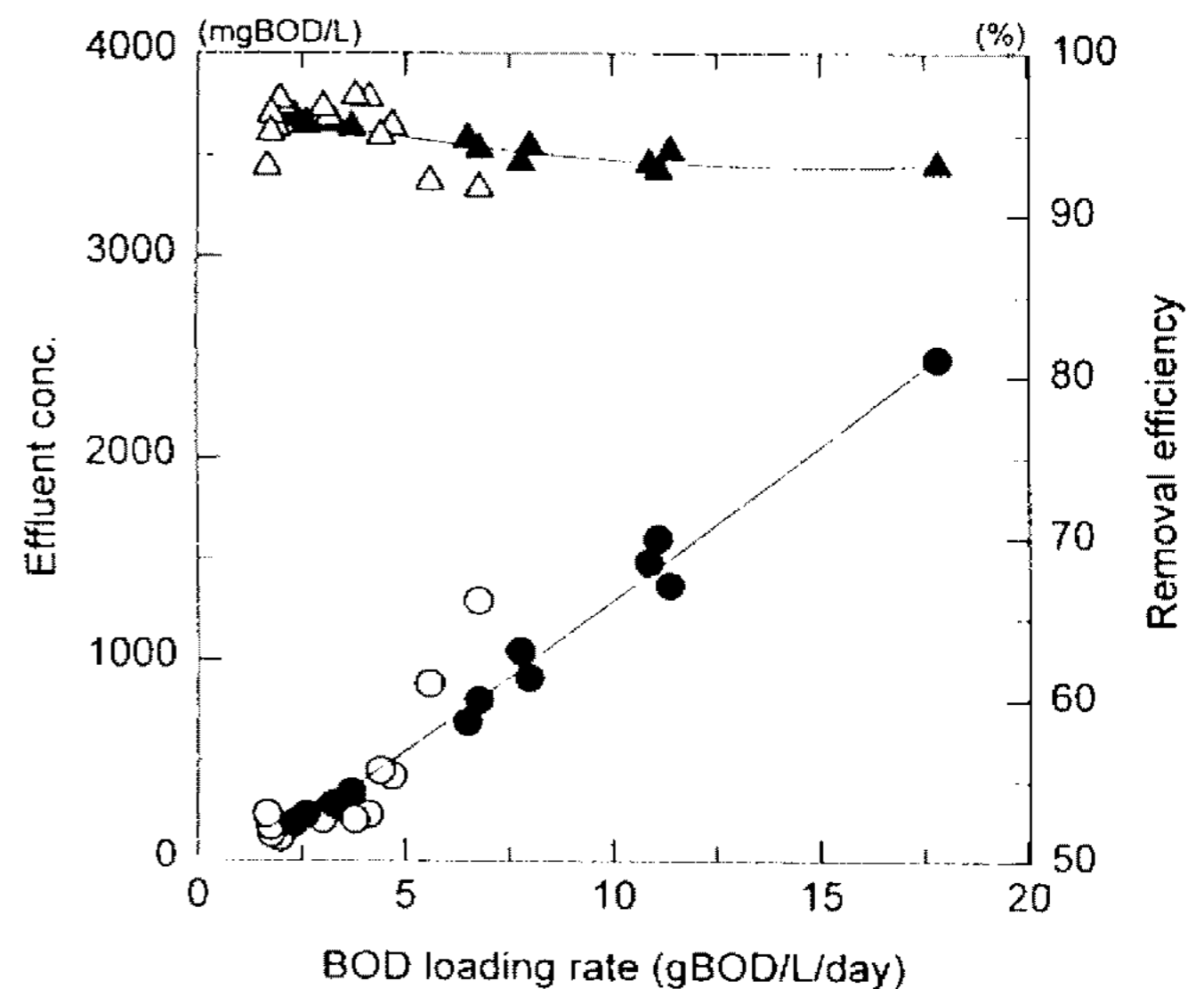


Fig. 2. The effect of BOD loading rate on the BOD removal efficiency for two reactor types. ●: effluent BOD of PBR; ○: effluent BOD of FBR; ▲: BOD removal efficiency of PBR; △: BOD removal efficiency of FBR.

gBOD//l·day인 범위에서만 90% 이상의 처리효율을 가지며 bell-shape를 나타내었다. 이 경우 BOD 용적 부하가 낮은 범위에서 처리효율이 떨어지는 것은 유기물의 부하가 낮아 부착미생물이 충분히 처리할 수 있는 기질농도에도 미치지 못하여 유기물의 제거속도가 낮기 때문인 것으로 생각된다. 이 결과로써 PBR이 FBR에 비해서 보다 안정적인 처리를 할 수 있는 미생물막반응기로 판단되었으며, 두 반응기에 대하여 기타 운전상

특성을 요약하면 Table 2와 같은데 PBR이 FBR에 비하여 처리효율뿐 아니라 안정성 및 종합적인 경제성에 있어서도 유리하였다.

HRT의 영향

PCB를 충전시킨 PBR(60(φ)×400(H)mm, vol.=1130 ml)을 여러 개 준비하여 광합성세균의 미생물막을 형성시켜 G폐수에 적응시킨 후, 각 반응기별로 HRT를 달리하여 G폐수(BOD 10,000 mg/l, 20,000 mg/l)를 유입시키면서 HRT에 따른 유출수의 처리농도 및 처리성을 측정하였다. 그 결과는 Fig. 3에 나타낸 바와 같이 HRT가 1일 이상이면 유입농도가 10,000 mg/l일 때 처리효율이 95% 이상되고 20,000 mg/l일 때는 90% 이상 되는 것을 알 수 있으며, 유출수 농도가 BOD 300~800 mg/l 범위로 비교적 안정적으로 처리되는 것을 알 수 있었다. HRT 1일에서 BOD 제거속도는 유입농도가 10,000 mg/l일 때는 7.5 gBOD//l·day이고, 20,000 mg/l일 때는 15 gBOD//l·day로 유입농도가 높더라도 제거속도는 거의 일정하게 유지되는 것을 알 수 있으며, 따라서 광합성세균의 미생물막법에 의하여 고농도의 유기물을 비교적 짧은 시간에 높은 효율로 처리가능함을 알 수 있다.

유기물부하의 영향

미생물막반응기에서의 유기물부하가 미치는 영향을 살펴보기 위해서 PCB를 충전한 PBR에 미생물막을 형성시킨 후 HRT를 2일로 하고 G폐수의 농도를 3,000~35,000 mg/l로 하여 유기물부하량을 변화시키면서 유출수의 BOD 농도와 BOD 제거효율을 측정하였다.

Table 2. Effect of reactor type on wastewater treatment.

	PBR	FBR
COD conc. of effluent (mg/l)	500~600	500~700
Removal efficiency (%)	90~93	89~95
pH	5.5	8.0
Suspended solid (mg/l)	750	1500
Treatability	Excellent	Good
HRT	Above 0.5 day	Above 2 day
Waste sludge	Scarcely any	Some
Volumetric BOD loading rate (gBOD//l·day)	Above 20	About 5~8
Stability of operation	Very stable	A little unstable
Symbiosis	A little	Much
Supplement of microorganisms	Unnecessary	Intermittent supplement

*PBR and FBR are biofilm reactors of phototrophs with PCB and carbon powder, respectively.

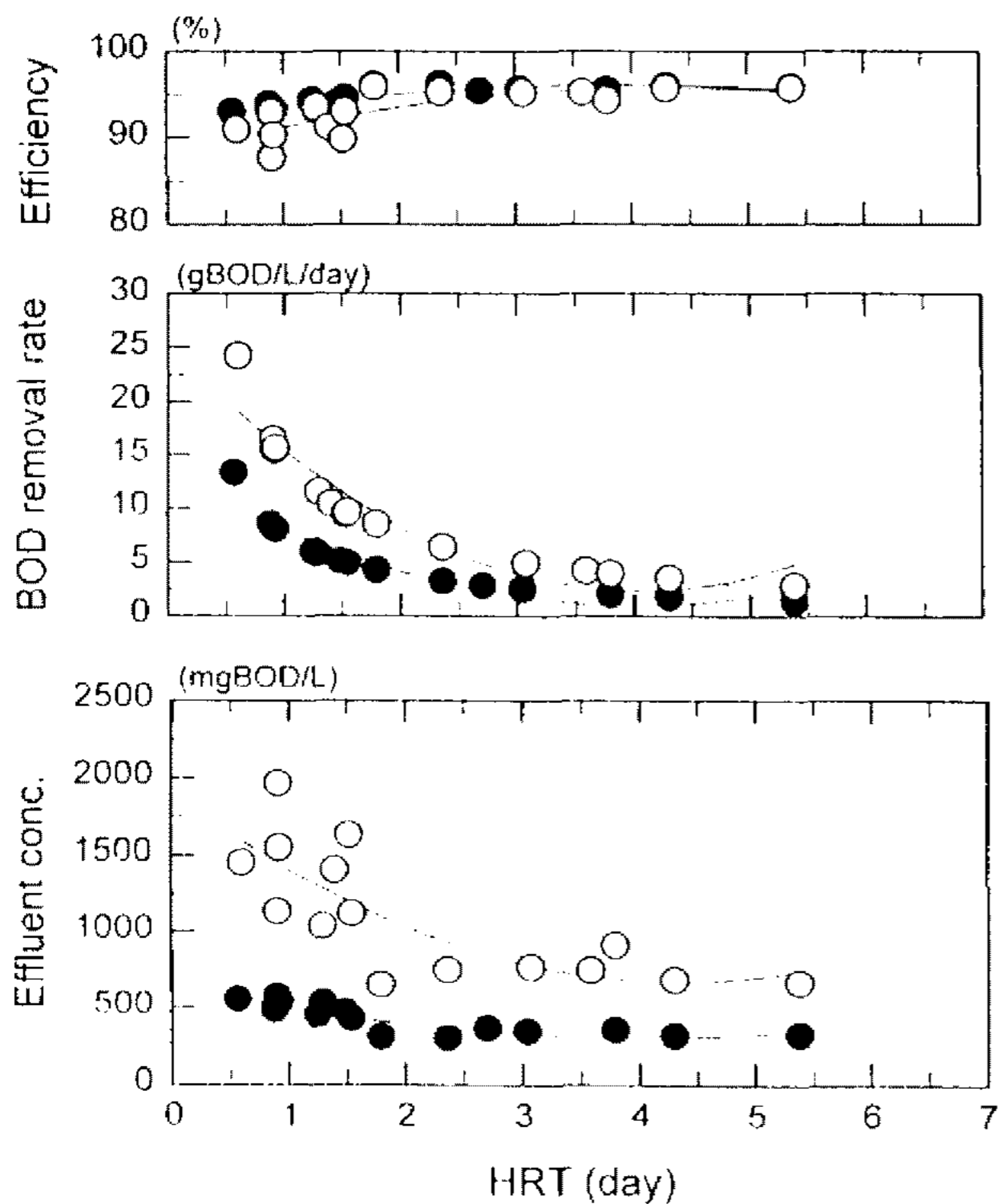


Fig. 3. The effect of HRT on BOD removal in PBR.(effluent concentration, BOD removal rate and removal efficiency) ●: influent BOD=10,000 mg/l; ○: influent BOD=20,000 mg/l.

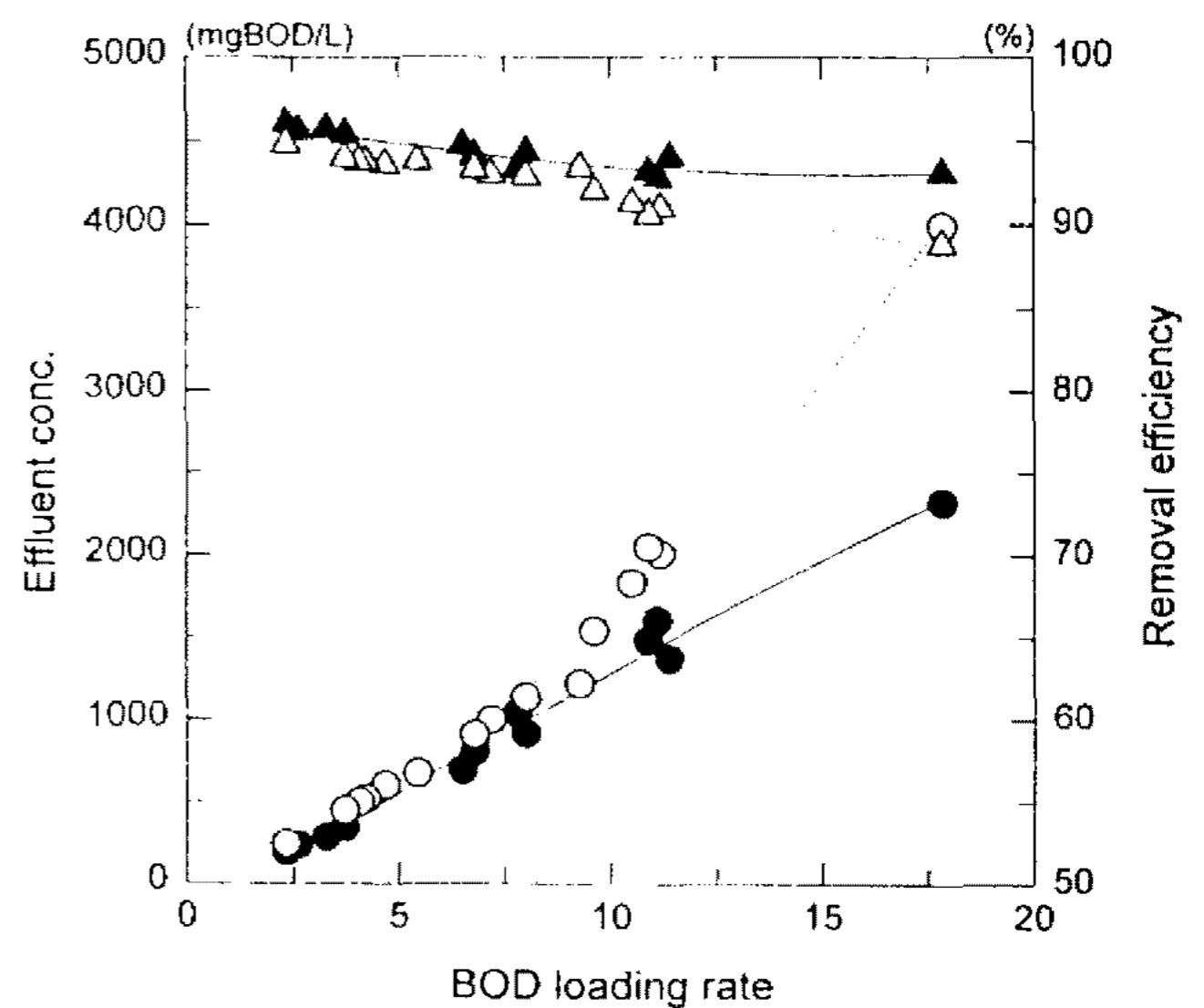


Fig. 4. The effect of BOD loading rate on BOD removal in PBR. ●,○: effluent BOD of PBR packed with PCB or RB-4, respectively; ▲,△: BOD removal efficiency of PBR packed with PCB or RB-4, respectively.

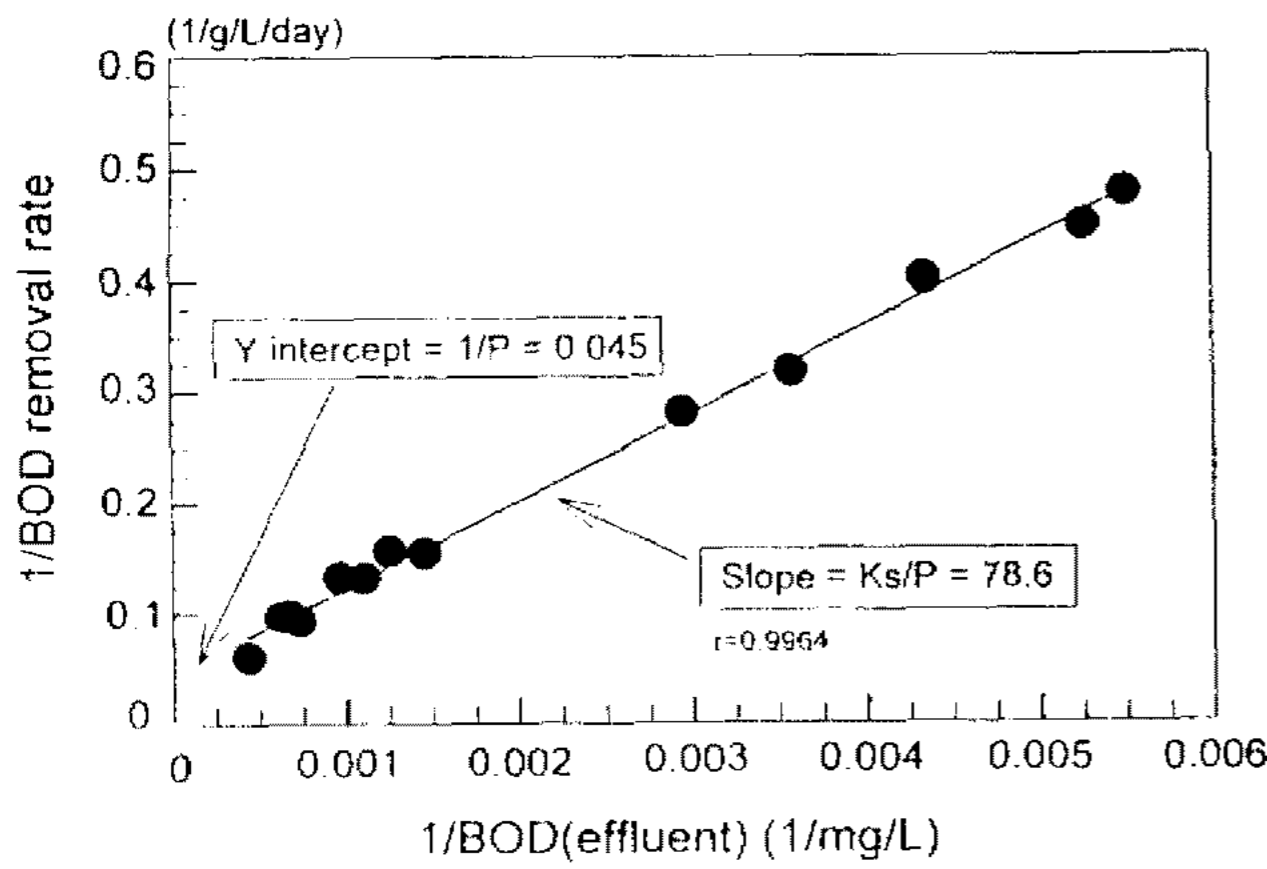


Fig. 5. Determination of kinetic parameters in PBR.

한편 과립형활성탄 RB-4를 충전하여 동일한 조건으로 비교실험을 실시한 결과 Fig. 4에 나타난 바와 같이 PCB 또는 RB-4를 충전한 경우 공히 유기물부하량이 증가함에 따라 유출수의 BOD 농도가 증가하여 BOD 제거효율이 감소하는 경향을 나타내고 있지만 PCB를 충전한 경우가 더 양호한 처리성을 나타내었다. PCB를 사용한 경우는 BOD 용적부하가 20 gBOD/l·day 정도에서도 90% 이상의 처리효율을 나타내었지만 RB-4를 사용한 경우는 10 gBOD/l·day 이상에서는 유출수의 BOD 농도가 급격히 증가하여 처리효율이 크게 감소하는 것을 알 수 있다. 이는 PCB를 사용했을 경우에 미생물막이 더 잘 형성되어 반응기내의 미생물 농도가 더 높게 유지되기 때문인 것으로 생각되며(PCB: 11,400 mg/l; RB-4: 3,700 mg/l), 따라서 고농도의 유기물 함유한 폐수처리에 PCB를 이용한 광합성세균의 미생물막법을 적용하므로써 안정적으로 처리할 수 있음을 알 수 있다.

Kinetic study

광합성세균의 미생물막법에 의한 폐수처리에 대해 유입수의 농도를 변화시키면서 이에 따른 유출수의 농도를 측정하여 Monod equation으로부터 유도된 다음 식에 적용하여 PBR의 운전에 대한 kinetic parameter를 구하였다. 이 식에서 P는 단위부피당 기질부하량 상수

$$\frac{1}{\text{BOD removal rate}} = \frac{K_s}{P} \cdot \frac{1}{[\text{BOD}]_{\text{eff}}} + \frac{1}{P}$$

(maximum specific BOD loading rate)이고 K_s 는 부착미생물의 포화기질 제한농도 상수(half saturation constant)를 나타낸다. 1/BOD removal rate vs. 1/[BOD]_{eff}을 plotting하면 Fig. 5와 같으며, P 및 K_s 를 구한 결과 각각 22.2 gBOD/l·day, 1,750 mgBOD/l이었다. P값 22.2 gBOD/l·day은 유기물의 용적부하를 알 수 있는 것으로 앞에서 언급한 실험결과처럼 20 gBOD/l·day이상의 용적부하에서도 안정적인 처리효율을 나타내는 것과 잘

Table 3. The comparison of performance of microbial films of *R. capsulata* with standard activated sludge method.

Contents	Standard activated sludge method	Microbial films of photosynthetic bacteria
Treatable conc. (mg/l)	BOD 150~1500	BOD 2000~30000
Removal efficiency of BOD (%)	80~90	90~95
Volumetric BOD loading rate (gBOD/l·day)	0.6	Above 20
Supply of oxygen	Aeration	Anaeration or microaeration

일치되는 결과이다. 또 K_s 값 1,750 mgBOD/l은 포화기질의 농도를 나타내는 것으로 PCB를 충전한 PBR이 적정하게 처리할 수 있는 유입수의 BOD 제한농도를 알 수 있는 것이다. 따라서 일반적으로 처리가 어려운 고농도폐수처리에 PCB를 충전한 광합성세균의 미생물막반응기 PBR을 사용하면 유리할 것으로 판단된다.

활성오니처리법과의 비교

광합성세균의 미생물막법에 의한 폐수처리와 활성오니처리법을 비교하면 Table 3에 나타난 것과 같으며 광합성세균의 미생물막반응기 PBR에서는 BOD 2,000~30,000 mg/l 정도의 고농도폐수 처리가 가능하고, BOD 용적부하 20 gBOD/l·day 이상에서도 그 처리효율이 90%를 넘는 것으로 나타났으며 이는 표준 활성오니법의 0.6 gBOD/l·day에 비하여 30배 이상으로 광합성세균의 미생물막반응기를 사용함으로써 적은 용량의 반응기로도 충분한 처리가 가능함을 알 수 있는 것이다.

요 약

홍색비유황 광합성세균인 *Rhodospseudomonas capsulata*를 선택하여 porous ceramic bead를 충전시킨 충전형 반응기(Packed-bed reactor, PBR)와 분말활성탄을 현탁시킨 유동상 반응기(Fluidized-bed reactor, FBR)에서 미생물막을 형성하여 폐수처리를 비교한 결과 PBR이 FBR보다 BOD 부하량 변화에 더 안정적인 처리성을 보였다. 체류시간(hydraulic retention time, HRT)에 따른 처리성은 유입폐수 농도를 각각 BOD 10,000, 20,000 mg/l로 하였을 때, HRT 1일 이상에서 90% 이상의 처리효율을 가지며, 유출수의 BOD 농도는 각각 350, 800 mg/l이었다. PBR에서 유입수의 BOD 농도변화에 따른 유출수의 농도를 측정하여 단위부피당 기질부하량 상수(maximum specific BOD loading rate, P) 및 부착미생물의 포화기질 제한농도 상수(half satu-

ration constant, K_s)를 구한 결과, 각각 22.2 gBOD/l·day, 1,750 mgBOD/l이었으며, 처리효율 90% 이상을 나타내는 BOD 용적부하(volumetric BOD loading rate)는 20 gBOD/l·day 이상으로 표준활성오니법의 0.6 gBOD/l·day에 비하여 30배가 넘는 값을 나타내었다.

참고문헌

1. Hirotani, H., Y. Agui, M. Kobayashi and E. Takahashi. 1990. Removal of coliphages from wastewater effluent by phototropic bacteria. *Wat. Sci. Tech.* **22**: 59-63.
2. Kobayashi, M., K. Fujii, I. Shimamoto and T. Maki. 1978. Treatment and re-use of industrial waste water by phototropic bacteria. *Prog. Wat. Tech.* **11**(1): 279-284.
3. Kobayashi, M. 1975. Role of photosynthetic bacteria in foul water purification. *Prog. Wat. Technol.* **7**: 309-315.
4. van Loosdrecht, M.C.M. and J.J. Heijnen. 1993. Biofilm bioreactors for wastewater treatment. *Trends Biotechnol.* **11**: 117-121.
5. Rittmann, B.E. 1982. Comparative performance of biofilm reactor types. *Biotechnol. Bioeng.* **24**: 1341-1370.
6. van Niel, C.B. 1931. On the morphology and physiology of the purple and green sulphur bacteria. *Arch. Mikrobiol.* **3**: 1-112.
7. Rittmann, B.E., L. Crawford, C.K. Tuck and E. Namkung. 1986. In situ determination of kinetic parameters for biofilms: isolations and characterization of oligotrophic biofilms. *Biotechnol. Bioeng.* **28**: 1753-1760.
8. Greenberg, A.E., R.R. Trussell and L.S. Clesceri. 1989. *Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater*, p. 503-538. 17th ed. APHA, AWWA, WPCF, Washington D.C.
9. Iwai, S., Y. Oshino and T. Tsukada. 1990. Design and operation of small wastewater treatment plants by the microbial film process. *Wat. Sci. Tech.* **22**: 139-144.

(Received 1 September 1996)