

## 3상 유동층생물반응기를 이용한 메탄처리에 관한 연구

†김 동 옥 · <sup>1</sup>서 혁 상

인제대 공과대학 화학공학과, <sup>1</sup>부산대 약학대학 제약학과

(접수 : 1997. 9. 26., 게재승인 : 1998. 3. 5.)

### Removal of Methane Using a Three Phase Fluidized Bed Bioreactor

Dong-Uk Kim<sup>†</sup> and Hyuk-Sang Seo<sup>1</sup>

Department of Chemical Engineering, Inje University, Kimhae, Kyongnam 621-749, Korea

<sup>1</sup>Department of Pharmacy, Pusan National University, Pusan 609-735, Korea

(Received : 1997. 9. 26., Accepted : 1998. 3. 5.)

To remove the low concentration of methane biologically, a three phase fluidized bed bioreactor immobilized with *Methylosinus trichosporium* OB3b was used. Optimum pH, temperature and bed height for the operation were pH7.0, 30°C and 150cm, respectively. For the inlet methane concentration of 100-400ppm and flow rate of 2-4L/min, the removal efficiencies of the bioreactor using the activated carbon as a carrier were the range of 54-71%, whereas those using the biosand were the range of 45-56%. It was found that activated carbon was more efficient than the biosand for the removal of methane. When aeration tank was equipped with the bioreactor, the removal efficiency increased to 6-13% and maximum removal rate obtained in the experiment was 1184mg · CH<sub>4</sub>/min.

Key Words : methane oxidizing bacteria, three phase fluidized bed bioreactor, immobilization, removal efficiency, removal rate

### 서 론

메탄은 늪, 호수침전층, 쓰레기매립장 및 축산분뇨 등에서 유기산균과 메탄생성균에 의한 혐기적 소화의 결과로 다량 발생되며(1,2), LNG의 89%를 차지하는 성분으로 연료로도 많이 사용된다(3). 수증기개질법을 이용한 수소제조공정(4) 등의 화학공장에서 원료로 사용하는 기체이기도 한데, 폐기체에 포함되어 대기로 방출되면 환경을 오염시킬 뿐만 아니라, 높은 농도로 대기 중에 존재하면 폭발의 위험성을 가진다. 그러나 메탄을 포집하여 재활용하기에는 메탄의 포집량이 너무 적고, 압축비용이 많이 들어 경제성이 맞지 않아, 기존시설에서는 대기 중에 방출하고 있는 실정이다. 따라서 대규모 메탄발생시설에는 메탄을 안전하게 처리하는 장치가 필수적이다. 유해가스의 생물학적 처리는 물리적, 화학적 방법인 흡수, 흡착 등에 비해 일반적으로 비용이 적게 들고 장기간 안정적으로 처리할 수 있으며 이차오염을 유발하지 않는 등의 장점을 가지고 있다(5).

본 연구에서 메탄처리를 위해 메탄자화균(methanotroph)을 사용하고자 하는데, 메탄자화균은 크게 ribulose monophosphate 경로를 거쳐 일탄소화합물을 동화하는 I형과 serine 경로를 거치는 II형으로 나눌 수 있다. I형에 속하는 균들은 *Methylobacter*, *Methylomonas*, *Methylococcus* 등이 있고 II형에 속하는 균들에는 *Methylosinus*, *Methylocystis*, *Methylobacterium* 등이 있다(6). 또한 메탄자화균들은 대부분 휴지기에 낭체나 외생포자를 형성하며 최적조건에서 세포이분시간은 3.5-5시간으로 알려져 있다(7, 8). 일반적으로 메탄자화균은 메탄을 산화하여 메탄올, 포름알데히드, 포름산을 거쳐 최종산물로 CO<sub>2</sub>를 생성하며, 메탄을 생성반응식은 아래와 같다(6).



특히 메탄자화균은 메탄의 메탄올산화를 위해서 methane monooxygenase (MMO)를 생산하는데 이 과정에서 다량의 에너지가 소모된다. MMO는 특히 O<sub>2</sub>의 두원자중 한원자를 OH기의 형태로 유기물에 첨가시키므로, 최근 난분해성 유기물의 생물학적 처리에 큰 주목을 받고있다. 따라서 메탄자화균을 이용하여 CHCl<sub>2</sub>F(9), 선형알킬벤조솔포네이트(LAS)(10), 염화페놀류(11), 삼염화에텐(TCE) (12, 13) 등 다양한 난분해성 유기물의 생물학적 처리가 시도되고 있다. 또한 MMO의 대량배양을 위한

† Corresponding Author: Department of Chemical Engineering, Inje University, 607 Obang-dong, Kimhae, Kyongnam 621-749, Korea

Tel: 0525-20-3396, Fax: 0525-22-2679,

e-mail : Chedukim@ijnc.inje.ac.kr

배양조건의 연구도 수행되어지고 있다(14).

메탄산화균의 또다른 특징은 기질의 선택성에 있다. 비록 모든 메탄산화균이 메탄을 산화하여 메탄올로 전환하지만 일단 메탄올기질에 적용된 균들의 메탄처리능은 전무하거나 극히 낮고, 일부의 *Methylomonas*를 제외하면 대부분의 메탄산화균은 0.1%의 메탄올에서 성장하지 못하는 것으로 알려져 있다(7). 따라서 메탄처리를 위한 균들은 고농도의 메탄에서 대량배양 후 반응기에 주입되어야 한다.

본 연구에서 사용하고자하는 메탄산화균은 *Methylosinus trichosporium* OB3b로서, 이 균은 간형의 호기성균으로 그람음성이며, 최적성장온도는 30 °C, 최적 pH는 6.5-8.0이고 메탄올 기질로 사용할 경우 대수성장기는 20-50시간, 최대비성장속도는 0.08hr<sup>-1</sup> 로 알려져 있다(15).

일반적인 생물학적 유해가스처리에는 미생물이 배양된 용액에 유해가스와 공기를 동시에 주입하는 공기부상반응기와 미생물이 고정화된 담체를 반응기에 충전하는 biofilter가 사용되었다. 그러나 공기부상반응기는 미생물과 가스의 접촉에 문제가 있고, biofilter는 충전물로 인하여 많은 양의 가스처리 시 물질전달이 제한되는 단점이 있다(16). 이에 비해 유동층반응기는 많은 양의 기체를 빠르게 처리하고, 미생물과 기체의 접촉을 원활히 하며, 액상의 혼합을 증가시켜서 물질전달을 향상시키는 등 많은 장점을 가진 반응기이다(17).

따라서 본 연구에서는 *M. trichosporium* OB3b를 활성탄 및 바이오샌드의 두종류 담체에 고정화한 3상 유동층생물반응기를 이용하여 온도, pH, 그리고 반응기내 액상높이변화에 따른 반응기의 최적운전조건을 결정하고, 최적조건에서 유입메탄농도와 가스유량에 따른 메탄처리효율과 제거속도를 확립하고자 한다.

**재료 및 방법**

**균주 및 배양**

본 실험에서 사용한 균은 부산대 박성훈교수로부터 제공받은 *Methylosinus trichosporium* OB3였다. 배지로는 modified Higgins nitrate mineral salts medium(15)을 사용하였고, 그 조성을 Table 1에 나타내었다. 균의 고농도배양을 위해 500mL 배양병의 한쪽 끝에 실리콘고무로 봉해진 바이알을 부착하여 사용하였으며, 배양액의 부피는 50mL였고, 균체의 접종량은 0.8mL였으며, 배지는 균의 최적조건인 30°C, pH 7.0로 유지하였다. 메탄공급을 위해, 99.99% 메탄과 공기를 각각 100mL/min로 바이알을 통해 3분간 주입하였으며, 교반속도를 250rpm으로 하여 48시간 동안 진탕배양하였다.

배양된 액상의 *M. trichosporium* OB3b를 직접 3상 유동층 생물반응기 내부에 채우는 것 보다 균을 적절한 담체에 고정화하여 배지와 함께 주입하면 균의 유출을 줄일 수 있을 뿐만 아니라 장기간 동안 안정적인 처리가 가능해진다. 다공성물질인 활성탄과 바이오샌드를 담체로 사용하여 균을 고정화하였으며 담체의 물리적 특성을 Table 2에 나타내었다. 균을 고정화하기 위해, 500mL의 배양병에 배지 50mL와 담체 7.5g을 채우고, 별도로 액상에서 고농도배양된 균용액 2mL를 첨가한 후, 99.99% 메탄과 공기를 각각 100mL/min로 바이알을 통해 3분간 주입하였다. 그 후, 교반속도 250rpm으로 72시간 동안 진탕배양하였으며, 독립적으로 준비된 고농도 액상배양용액과 함께 반응기에

Table 1. Composition of modified Higgins nitrate minimal salt medium.

Components	mg/L
NaNO <sub>3</sub>	850
K <sub>2</sub> SO <sub>4</sub>	170
MgSO <sub>4</sub> · 7H <sub>2</sub> O	37
CaCl <sub>2</sub> · 2H <sub>2</sub> O	7
KH <sub>2</sub> PO <sub>4</sub>	530
Na <sub>2</sub> HPO <sub>4</sub>	860
ZnSO <sub>4</sub> · 7H <sub>2</sub> O	0.574
MnSO <sub>4</sub> · 7H <sub>2</sub> O	0.446
H <sub>3</sub> BO <sub>3</sub>	0.124
NaMoO <sub>4</sub> · 2H <sub>2</sub> O	0.096
CoCl <sub>2</sub> · 6H <sub>2</sub> O	0.096
KI	0.166
CuSO <sub>4</sub> · 5H <sub>2</sub> O	0.5
FeSO <sub>4</sub> · 7H <sub>2</sub> O	44.8

Table 2. Physical properties of activated carbon and biosand.

	Activated carbon	Biosand
Composition(%)	C : 91.4, Ash : 2.0	SiO <sub>2</sub> : 15, H <sub>2</sub> O : 85
Mean Diameter(mm)	4.6	2.0
Density(g/cm <sup>3</sup> )	1.37	1.27
Specific surface area(m <sup>2</sup> /g)	936	539
Total pore area(m <sup>2</sup> /g)	956	589

주입되었다.

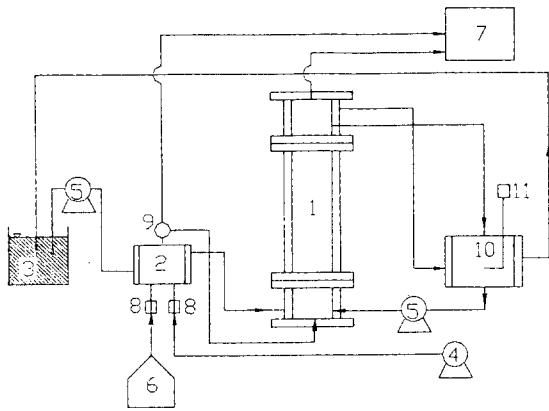
담체에 고정화된 균의 농도를 측정하기 위해 진탕배양된 담체를 분리하여 0.9% NaCl로 수차례 세척한 후, 용액을 배양액으로 적절히 희석하여 고정배양을 실시하였고 메탄가스와 공기를 주입한 박스에서 10일간 배양하여 균수를 결정하였다. 72시간 진탕배양 후 담체에 고정화된 균수는 활성탄의 경우 3.0x10<sup>7</sup> cell/g활성탄, 바이오샌드의 경우 1.7x10<sup>7</sup> cell/g바이오샌드 이었다.

**실험장치**

메탄의 생물학적 처리를 위해 Figure 1과 같은 3상 유동층 생물반응기가 사용되었다. 반응기의 column은 내경 5cm, 높이 170cm로 하였으며, 반응기의 운전부피는 폭기조를 설치하지 않았을 경우, 2159cm<sup>3</sup>이었다. 반응기는 상부, 중부 및 하부의 3단으로 연결설치하였으며 출구에서 배출되는 메탄가스의 농도에 따라 그 높이를 조절할 수 있게 하였고, 재질은 내부를 잘 관찰할 수 있도록 투명한 아크릴을 사용하였다. 또한 주입메탄의 농도와 유량을 일정하게 조절하기 위해 혼합조를 설치하였다.

반응기내 액상의 부피를 크게 하고, 용액에 용존산소를 추가 공급하기 위해 직경 13.9cm 높이 15.9cm의 폭기조가 설치되었으며, 폭기는 소형공기펌프(Gold air pump, DH-3000S, 대화전자)를 사용하여 실시되었고, 폭기조를 사용한 실험에서는 전체 폭기조높이의 40%정도를 용액으로 채웠다.

폭기조를 반응기에 추가 설치함으로써 용액의 용존산소가 폭



- 1. Fluidized bed bioreactor
- 2. Gas mixing chamber
- 3. Water bath
- 4. Air compressor
- 5. Circulation pump
- 6. CH<sub>4</sub> bomb
- 7. Gas analyzer
- 8. Flowmeter
- 9. 3-way valve
- 10. Aeration tank
- 11. Aerator

Figure 1. Schematic diagram of three phase fluidized bed bioreactor.

기초 설치 전 4~6mg/L에서 폭기조 설치 후 7~8mg/L로 크게 증가하였고, 용액의 부피가 44%(957cm<sup>3</sup>) 증가하였다. 실험은 추가되는 액상의 부피와 용존산소의 영향을 알아보기 위해 폭기조를 포함하는 경우와 포함하지 않은 경우로 나누어 실시되었다.

반응기내부의 pH는 유출배지의 pH를 측정하고, 순환배지에 NaOH, HCl 용액을 주입하여 조절하였다. 반응기내의 온도를 일정하게 유지하기 위해 반응기, 혼합조 및 폭기조의 주위에 재킷을 설치하여 일정 온도의 물을 순환시켰다. 주입기체를 반응기에 고르게 분산되게 하고, 반응기내 담체의 결손을 방지하기 위해 직경 1.7mm의 구멍 76 개로 구성된 분배기를 반응기의 하단에 설치하였다.

유동화전 담체의 높이는 유사한 연구(18)에서 aspect ratio (L/D)와 측정효율을 비교한 결과 aspect ratio가 1.0인 경우 효율이 가장 높았으므로, 반응기의 직경과 같은, 분배기로 부터 5cm 위로 하였으며, 담체의 총질량은 활성탄의 경우 93g, 바이오샌드의 경우 101g이었다. 반응기 입구와 출구의 메탄가스농도는 메탄센서가 부착된 가연성가스측정기(XP-336, New Cosmos Electric Co., Japan)를 사용하여 측정되어졌으며 측정범위는 0~1000 ppm이었고, 오차의 범위는 ±5% 였다.

고정화담체와 고농도 배양된 균용액은 3상 유동층생물반응기에 주입되었으며, 이후 48시간동안 공기를 반응기에 계속 주입하여 균을 새로운 시스템에 적응시키고, 30ppm 정도의 저농도 메탄과 공기를 반응기에 일정기간 주입하여 반응기를 안정화시킨 후 주어진 농도와 유량에서 메탄처리효율 측정이 이루어 졌다.

**결과 및 고찰**

Figure 2는 30℃, pH7.0의 반응기내 용액상태, 주입메탄농도 200ppm, 유량 4L/min에서 미생물이 포함되지 않은 액상과 기

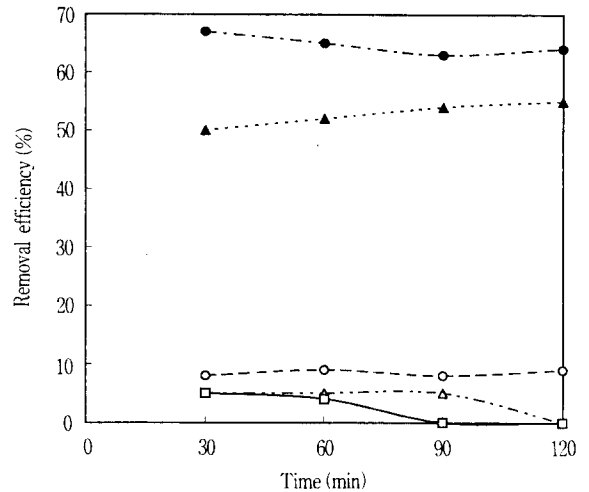


Figure 2. Removal efficiencies of CH<sub>4</sub> for two phase fluidized bed reactor (□), three phase fluidized bed reactor with bio-sand(▲), activated carbon(○), and three phase fluidized bed bioreactor immobilized on biosand(▲), activated carbon(●) without aeration. Inlet CH<sub>4</sub> concentration, gas flow rate, solution temperature and pH is 200ppm, 4L/min, 30℃ and pH7.0, respectively.

상의 2상 유동층반응기, 미생물이 포함되지 않은 액상 및 담체와 기상의 3상 유동층반응기, 그리고 미생물이 포함된 액상, 고정화미생물을 포함하는 담체 및 기상의 3상 유동층생물반응기에 대한 메탄처리효율(removal efficiency=(C<sub>in</sub>-C<sub>out</sub>)·100/C<sub>in</sub>)을 보여준다. 2상 유동층반응기의 경우 처리효율은 평균 2%로 아주 낮았으며, 이는 30℃에서 메탄의 물에 대한 Henry상수가 4.49 x 10<sup>4</sup> atm·m<sup>3</sup>/Kmol로 메탄의 물에 대한 용해도가 극히 낮음에 기인한다. 활성탄과 바이오샌드를 담체로 사용한 3상 유동층반응기의 경우 처리효율은 각각 평균 9%와 4%였는데, 2상 유동층반응기에 비해 약간 증가한 것은 메탄의 담체에 대한 흡착에 기인한다고 사료되며, 또한 활성탄을 담체로 사용하였을 때 바이오샌드를 사용하였을 경우에 비해 평균 5% 높은 이유는 메탄의 높은 활성탄흡착특성에 원인이 있는 것으로 생각된다(19).

미생물을 함유한 3상 유동층생물반응기의 경우, 활성탄을 담체로 이용할 때 처리효율은 평균 65%, 바이오샌드를 담체로 사용할 때 효율은 평균 53% 정도였으며, 처리효율의 증가는 반응기내 액상과 담체에 존재하는 *M. trichosporium* OB3b의 활발한 메탄산화에 기인한다. 따라서 *M. trichosporium* OB3b가 활성탄에 고정화된 3상미생물유동층반응기는 메탄의 처리에 비교적 우수한 성능을 보인다.

30℃, 메탄농도 200ppm, 유량 4L/min의 조건에서 pH6.0~8.0의 변화에 대한 메탄처리효율이 Figure 3에 나타나 있는데, pH 7.0에서 가장 높은 평균 67%의 처리율을 보여주었다. *M.trichosporium* OB3b의 플라스크 배양시 균성장의 최적 pH가 6.5~8.0인데 비해, 3상 유동층생물반응기의 최적 pH는 7.0으로 나타났다. pH7.0, 메탄농도 200ppm, 유량 4L/min의 조건에서 20~40℃의 온도변화에 대한 3상 유동층생물반응기의 메탄처리효율이 Figure 4에 나타나 있는데, 30℃에서 가장 높은 처리효

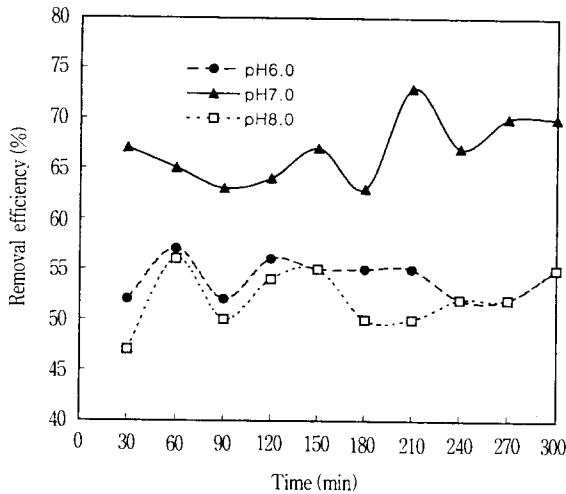


Figure 3. Removal efficiencies of CH<sub>4</sub> using activated carbon as a cell carrier for pH changes without aeration at inlet CH<sub>4</sub> concentration of 200ppm, gas flow rate of 4L/min, and 30°C.

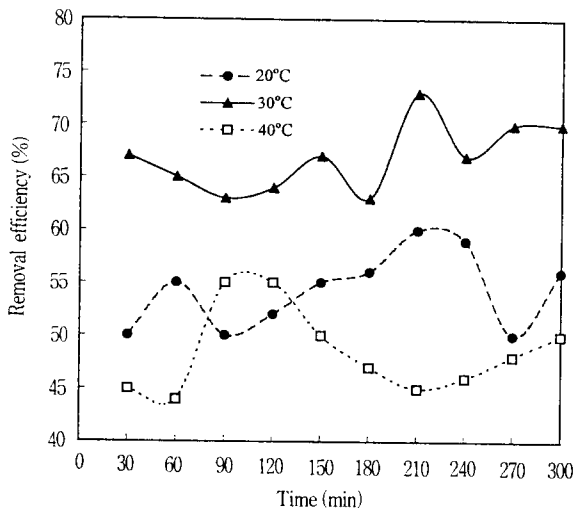


Figure 4. Removal efficiencies of CH<sub>4</sub> using activated carbon as a cell carrier for temperature changes without aeration at inlet CH<sub>4</sub> concentration of 200 ppm, gas flow rate of 4L/min, and pH7.0.

율을 보여주었으며, 이는 균의 최적성장온도와 일치한다.

반응기의 액상높이변화에 따른 메탄처리효율이 Figure 5에 나타나 있는데, 바이오샌드를 담체로 사용한 경우, 액상높이가 증가함에 따라 처리효율이 조금씩 증가하였으나, 활성탄을 사용한 경우 처리효율은 액상의 높이가 110cm 이상에서는 동일하였다. 이는 처리효율이 낮은 경우, 액상높이가 증가함에 따라 메탄과 미생물간의 접촉시간이 증가하여 처리효율이 향상되나, 활성탄의 경우처럼 처리효율이 높은 경우, 접촉시간의 증가는 처리효율에 큰 영향을 미치지 못한다고 해석할 수 있다. 바이오샌드를 담체로 사용한 경우, 액상높이가 165cm에서 가장 높은 처리효율을 보여주었으나, 액상의 높이가 반응기의 전체높이(170cm)에 비해 너무 높은 관계로 용액이 반응기 밖으로 누출되는 현상이

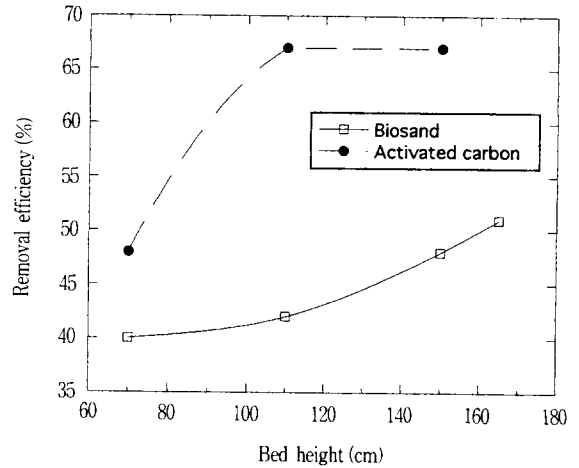


Figure 5. Removal efficiencies of CH<sub>4</sub> for bed height changes without aeration at inlet CH<sub>4</sub> concentration of 400ppm, gas flow rate of 2L/min, 30°C, and pH7.0.

자주 일어났다. 따라서 메탄제거를 위한 반응기의 적절한 액상높이를 150cm로 하였다. 그러므로 Fig.3-5에서 얻어진 3상 유동층생물반응기의 최적조업조건은 pH7.0, 30°C, 그리고 액상높이 150cm였다.

최적조업조건인 3상 유동층생물반응기에서 바이오샌드를 담체로 사용하였을 때, 2, 4L/min의 기체유량, 100, 200, 400ppm의 메탄농도에 대한 처리효율과 처리속도(removal rate= $Q \cdot C_{in} \cdot \eta / 100$ )가 Table 3에 나타났다. 반응기내 용액중 낮은 균농도 및 메탄의 저흡수 등으로 인하여 평균처리효율은 45-56%로 비교적 작았으나, 평균처리속도는 농도 및 유량이 증가함에 따라 증가하였다.

최적조업조건인 3상 유동층생물반응기에서 활성탄을 담체로 사용하였을 때, 2, 3, 4L/min의 기체유량, 100, 200, 400ppm의 메탄농도에 대한 처리효율과 처리속도가 Table 4에 나타났다. 처리효율은 54-71%로, 동일 유량 및 농도의 조건에서 바이오샌드를 담체로 사용한 경우와 서로 비교해 보면 처리효율의 변화는 -2~24%였다. 활성탄을 담체로 사용한 경우, 처리효율이 대체로 증가하는 데, 이는 활성탄의 메탄 흡착력이 뛰어나고, 담체에 고정화된 균수가 바이오샌드보다 큰 점에서 기인한다고 사료된다.

최적조업조건인 3상 유동층생물반응기에서 4L/min의 기체유량, 100-400ppm의 메탄농도에 대한 반응시간에 따른 메탄처리속도가 Figure 6에 나타나 있는데, 측정시간동안 비교적 안정적인 처리효율을 보여주었다. 폭기조를 설치하지 않았을 때, 본 실험에서 얻어진 최대 처리속도는 1072mg · CH<sub>4</sub>/min이었다.

반응기의 처리효율을 높이기 위해 반응장치에 폭기조를 추가 설치한 경우 처리효율이 Table 5에 나타나 있다. 바이오샌드를 담체로 사용한 경우에 대해, Table 3과 Table 5를 비교해보면, 폭기조를 설치한 경우 처리효율은 동일한 유량 및 농도조건에서 폭기조를 설치하지 않은 경우에 비해 6-13% 증가하였다. 활성탄을 담체로 사용한 경우, 역시 동일한 조건에서 비교해보면, 폭기조를 설치하였을 때, 처리효율이 7-11% 증가하였다. 폭기조를 설치한 경우 본 실험에서 얻어진 최대처리속도는 1184mg · CH<sub>4</sub>/min이었다.

Table 3. Mean removal efficiencies and mean removal rates of three phase fluidized bed bioreactor without aeration using biosand as a carrier.

CH <sub>4</sub> Concentration(ppm)	Gas flow rate (L/min)	Time (hours)	Mean removal efficiency (%)	Mean removal rate (mg CH <sub>4</sub> /min)
100	2	3	56	112
200	2	2	45	180
400	2	2	48	384
100	4	2	48	192
200	4	3	51	408
400	4	3	53	848

Table 4. Mean removal efficiencies and mean removal rates of three phase fluidized bed bioreactor without aeration using activated carbon as a carrier.

CH <sub>4</sub> Concentration(ppm)	Gas flow rate (L/min)	Time (hours)	Mean removal efficiency (%)	Mean removal rate (mg CH <sub>4</sub> /min)
100	2	5	54	108
200	2	5	69	276
400	2	5	56	448
100	3	5	71	213
200	3	5	60	360
400	3	3	62	744
100	4	3	60	240
200	4	5	58	464
400	4	3	67	1072

Table 5. Mean removal efficiencies and mean removal rates of three phase fluidized bed bioreactor with aeration.

Carrier	CH <sub>4</sub> Concentration(ppm)	Gas flow rate (L/min)	Time (hours)	Mean removal efficiency (%)	Mean removal rate (mg CH <sub>4</sub> /min)
Biosand	100	2	3	62	124
"	200	2	3	58	232
"	400	2	3	54	432
Biosand	100	3	3	54	216
"	200	3	3	55	440
"	400	3	3	59	944
Activated Carbon	100	4	3	67	268
"	200	4	3	69	552
"	400	4	3	74	1184

폭기조의 설치로 3상 유동층생물반응기내 용액중 산소가 충분히 공급되고, 액상의 부피가 44% 증가하여 더 많은 메탄이 용해되므로, 메탄처리효율이 증가한 것으로 사료된다. 그러나, 폭기량과 액상의 부피증가에 비해 메탄처리효율의 증가는 크지 않았다. 따라서, 메탄의 처리효율을 보다 향상시키기 위해서는 메탄과 산소의 물질전달을 크게 하는 반응기의 형상변화보다는 새로운 균의 개발 등을 통한 균의 성장속도를 개선하는 노력이 필요하다고 본다.

본 연구에서는 메탄산화균 *Methylosinus trichosporium* OB3b를 담체에 고정화한 3상 유동층생물반응기를 사용하여 메탄의 생물학적 처리가 연구되었으며, 실험을 통하여 얻어진 최적조건은 30℃, pH7.0, 액상높이 150cm, 활성탄담체였다. 위의 최

적조건에서 2-4L/min의 기체유량, 100 -400ppm의 메탄농도에 대해 실험을 수행한 결과, 처리율은 54-71%였고, 폭기조를 추가 설치하였을 때, 처리율은 7-11%증가하였으며, 본 실험에서 얻어진 최대처리속도는 1184mg · CH<sub>4</sub>/min이었다.

## 요 약

저농도 메탄의 생물학적 처리를 위해 *Methylosinus trichosporium* OB3b가 담체에 고정화된 3상 유동층생물반응기를 사용하였으며, 최적조건은 pH7.0, 30℃, 액상높이 150cm였다. 2-4L/min의 기체유량, 100-400ppm의 메탄농도에 대해 활성탄을 담체로 사용한 경우 처리율은 54-71%였고, 바이오샌드를 담

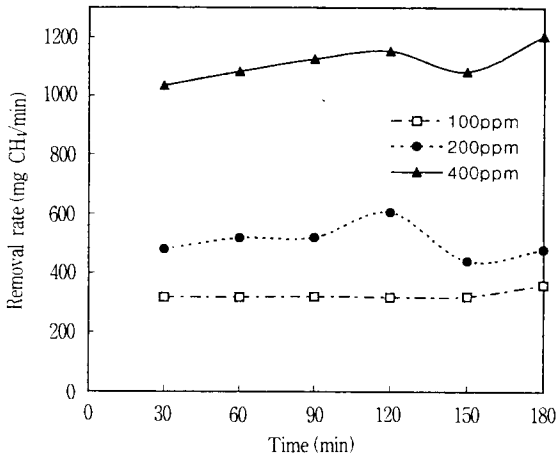


Figure 6 Removal rates of CH<sub>4</sub> without aeration at inlet CH<sub>4</sub> concentration of 100-400ppm, gas flow rate of 4L/min, 30°C, and pH7.0.

체로 사용한 경우 처리율이 45-56%여서, 활성탄이 메탄제거를 위한 담체로 보다 적절하였다. 메탄처리효율을 증가하기 위해, 폭기조를 추가 설치하였을 때, 처리율은 6-13%증가하였으며, 본 실험에서 얻어진 최대 메탄처리속도는 1184mg · CH<sub>4</sub>/min이었다.

감 사

본 연구는 교육부의 96년 생물화학공학연구비(과제번호: F-17)에 의하여 수행되었으며 이에 감사드립니다.

사 용 기 호

- C<sub>in</sub> : Inlet concentration of methane [ppm]
- C<sub>out</sub> : Outlet concentration of methane [ppm]
- D : Diameter of the bioreactor [cm]
- L : Bed height of liquid [cm]
- Q : Volumetric flow rate of inlet gas [L/min]
- η : Removal efficiency = (C<sub>in</sub>-C<sub>out</sub>)x100/C<sub>in</sub>

참 고 문 헌

1. 최의소, 조광명 (1994), 환경공학, p. 246, 청문각, 서울.
2. Stanier, R. Y., J. L. Ingraham, M. L. Wheelis, and P. R. Painter(1986), The Microbial World, 3rd ed., p. 331-333, Prentice-Hall, Englewood Cliff, NJ.
3. 황재웅, 박성훈 (1996), 메탄자화균 *Methylosinus trichosporium* OB3b를 이용한 액화 천연가스로부터 poly-β-hydroxybutyric acid (PHB)의 생산, *한국생물공학회지*, 11, 246-253.
4. 설수덕, 김학준, 박대원, 김병관 (1992), 무기공업화학, p. 108, 대영사, 서울.
5. Chung, Y.-C., C. Huang, and C.-P. Tseng (1996), Biodegradation of Hydrogen Sulfide by a Laboratory-Scale

- Immobilized *Pseudomonas putida* CH11 Biofilter, *Biotechnol. Prog.*, 12, 773-778.
6. Brock, T. D., and M. T. Madigan (1991), Biology of Microorganisms, 6th ed., p. 763-765, Prentice-Hall, Englewood Cliff, NJ.
7. Whittenbury, R., K. C. Phillips and J. F. Wilkinson (1970), Enrichment, Isolation and Some Properties of Methane-Utilizing Bacteria, *J. Gen. Microbiol.*, 61, 205-218.
8. Chetina, E. V. and Y. A. Trotsenko (1985), Estimation of the Digestibility of the Biomass of Methanotrophic Bacteria, *Prikladnaya Biokhimiya i Mikrobiologiya*, 20, 539-543.
9. Oremland, R. S., D. J. Lonergan, C. W. Culbertson, and D. R. Lovley (1996), Microbial Degradation of Hydrochlorofluorocarbons in Soils and Sediments, *Appl. Environ. Microbiol.*, 62(5), 1818-1821.
10. Hrsak, D., and G. D. Grbic (1995), Biodegradation of Linear Alkylbenzenesulphonates(LAS) by Mixed Methanotrophic-heterotrophic Cultures, *J. Appl. Bacteriol.*, 78 (5), 487-494.
11. Adriaens, P., and G. D. Grbic (1994), Cometabolic Transformation of Mono- and Dichlorobiphenyls and Chlorohydroxybiphenyls by Methanotrophic Groundwater Isolates, *Environ. Sci. Technol.*, 28(7), 1325-1330.
12. Uchiyama, H, O. Yagi, K. Oguri, and E. Kokufuta (1994), Immobilization of Trichloroethylene-degrading Bacterium, *Methylocystis* sp. strain M in Different Matrices, *J. Ferment. Bioeng.*, 77(2), 173-177.
13. Fennell, D. E., Y. M. Nelson, S. E. Underhill, T. E. White, and W. J. Jewell (1993), TCE Degradation in a Methanotrophic Attached-Film Bioreactor, *Biotechnol. Bioeng.*, 42, 859-872.
14. Shah, N. N., S. Park, R. T. Taylor, M. W. Droege (1992), Cultivation of *Methylosinus Trichosporium* OB3b: III. Production of Particulate Methane Monooxygenase in Continuous Culture, *Biotechnol. Bioeng.*, 40(6), 705-712.
15. 강문선, 황재웅, 박성훈(1995), 메탄자화균 *Methylosinus trichosporium* OB3b의 메탄올 기질에서의 성장, *한국생물공학회지*, 10, 212-220.
16. 김영관 (1997), *Phanerochaete chrysosporium*을 이용한 생물정화기에서의 BTX분해, 인제대학교 부설 환경연구소 제6회 심포지움 발표논문집, pp. 66-75.
17. 김동식 (1994), 유기성 폐수처리를 위한 역 유동층 생물막반응기의 연구, 박사학위논문, 화학공학과, 부산대학교, 부산.
18. Oh, K. J., D. Kim, and I.-H. Lee (1997), Development of the Effective Hydrogen Sulphide Removing Equipment Using *Thiobacillus* sp. IW., *Environmental Pollution in Press*.
19. Yang, R. T. (1987), Gas Separation by Adsorption Processes, p. 13, Butterworths, Stoneham, MA.