

## 미생물 유동층 폐수처리 공정에 관한 연구 (호기성 미생물 유동층 반응기에서의 산소 반응속도)

윤 인 주 · 이 원 홍

서강대학교 화학공학과

(1983년 8월 31일 접수)

## A Study on Biological Fluidized Bed Treatment of Waste-Water (Rate of Oxygen Consumption in an Aerobic Fluidized Bed Biofilm Reactor)

Yoon, In-Joo and Lee, Won-Hong

Department of Chemical Engineering,

Sogang University, Seoul 121, Korea

(Received; August 31, 1983)

### 요 약

호기성 미생물 유동층 반응기에서 혼합미생물층에 의한 산소 반응속도를 연구하였다. 반응기내에서 산소가 한계침투 성분으로 유지될 때의 산소반응속도를 수식화하여 모델식을 얻었으며 글루코오스를 단일 유기물로 하는 합성폐수와 혼합미생물을 이용한 실험으로 모델식을 검토하였다. 실험에 의하면 반응기 입구의 글루코오스 농도가 산소농도 보다 5.4 배 이상 크면 반응기내에서 산소가 한계침투 성분으로 유지되었다.

### ABSTRACT

A study was done on the rate of oxygen consumption by a mixed culture microbial film in an aerobic fluidized bed biofilm reactor. For the description of oxygen consumption rate in the reactor where oxygen was a flux limiting component, a mathematical model was obtained and tested by an experiment performed with mixed culture microbes and a synthetic waste water containing glucose as the only carbon source. The experimental result showed that oxygen remains as a critically penetrating component as far as the inlet glucose concentration is

above 5.4 times that of oxygen.

## 1. 서 론

최근에 미생물에 의한 폐수처리의 새로운 방법으로 유동층의 이용이 활발히 연구되고 있다. 유동층 폐수처리 반응기는 지름이 0.2~2mm 인 유동입자의 표면에 미생물이 부착하여 반응기내에 서식케 함으로서 반응기 단위부피당 미생물의 양을 기존 반응기들 보다 월등히 증가시킬 수 있는 잇점이 있다. 근간에 Jeris,<sup>1)</sup> Sutton<sup>2)</sup> 등이 수행한 시험공장 규모의 실험으로 이러한 잇점의 실용화가 가능시되고 있으나 아직까지 반응기의 효율적인 설계와 운전을 위한 기초연구가 매우 부족한 상황이다.

호기성 미생물 유동층 반응기는 폐수의 유기물 제거를 주목적으로 한다. 유기물은 반응기내에 서식하는 호기성 미생물의 산소를 이용한 대사활동으로 제거되므로 산소를 공급해야 한다. 그러나 산소를 폐수에 용해시킨 후 반응기에 주입시키는 경우 공급 가능한 최대 산소량은 산소원으로 공기를 사용할 경우 7~9ppm<sup>3)</sup> 순수한 산소를 사용할 경우 40~50ppm<sup>3)</sup>으로 매우 적다. 따라서 반응기의 설계에는 처리할 유기물의 농도 외에도 산소의 공급량과 반응속도를 고려할 필요가 있으나 이에 대한 연구의 부족으로 반응기의 제작에 부적합한 결과들을 초래하였다. 예로서 Jeris<sup>1)</sup>는 4.7m 높이의 유동층반응기로 실험하였는데 공급한 산소가 0.8m 높이에서 완전히 소모되어 여분의 반응기는 유기물 제거에 효과가 없었다.

본 논문에서는 합리적인 반응기 설계를 위하여 반응기의 산소반응속도 모델식을 제시하였다. 모델식은 미생물층에서 산소가 유기물에 대하여 한계침투 성분으로 유지되는 조건으로 유도되었으며 실험적으로 이 조건이 성립되는 폐수의 산소와 유기물의 농도비율을 구하였다.

## 2. 이 론

### (1) 산소반응속도의 모델식

미생물 유동층 반응기내에서 미생물은 Fig. 1 (A)와 같이 구형입자의 표면에 부착하여 층을 이루며 서식한다. 미생물이 부착된 입자(bioparticle)들은 반응기 하부에서 주입되는 폐수에 의하여 유동층을 형성하며 폐수의 용존산소는 미생물층을 침투하며 미생물들의 대사반응으로 소모된다. 미생물들이 exponential growth 상태에

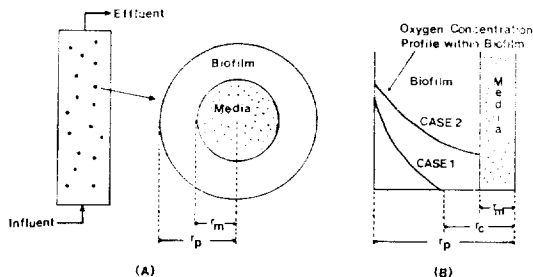


Fig. 1. Diagrammatic analysis of Fluidized Bed Bi-film Reactor.

(A) Schematic representation of FBBR and bioparticle.

(B) Penetration of oxygen into the Biofilm.

있다면 산소반응속도는 다음과 같이 Monod 식으로 표시된다.

$$r_{O_2} = \frac{\mu_m C}{Y_{O_2}(K_{O_2} + C)} \rho_b \quad (1)$$

윗 식에서  $K_{O_2}$ 는 대부분의 미생물에 대하여 0.032~0.53ppm<sup>4)</sup>의 적은 값이므로 혼합미생물의 산소반응속도를 다음과 같이 산소농도에 대해 영차반응식으로 가정한다.

$$r_{O_2} = \mu_m / Y_{O_2} \rho_b = \rho_b k \quad (2)$$

미생물층 내부에 활성있는 미생물들이 고루 분포되어 있는 것으로 가정하고 (2)식을 이용하여 bioparticle에 대해 정상상태에서의 산소물질수지식을 세우면 다음과 같다.

$$\frac{D_{ec}}{r} \frac{d}{dr} (r \frac{dc}{dr}) = r_{0_2} \quad (3)$$

액상에서의 산소전달저항을 무시하여<sup>5)</sup> 액상과 미생물층표면의 산소농도를 같다고 가정하면 식 (3)을 풀기위한 경계 조건으로 다음의 두 경우가 있다. (Fig. 1. (B)참조)

$$\text{Case 1; } \begin{aligned} r = r_p \text{ 에서 } C &= C_L \\ r = r_c \text{ 에서 } \begin{cases} \frac{dc}{dr} = 0 \\ C = 0 \end{cases} \end{aligned}$$

$$\text{Case 2; } \begin{aligned} r = r_p \text{ 에서 } C &= C_L \\ r = r_m \text{ 에서 } \frac{dc}{dr} &= 0 \end{aligned}$$

Sanders<sup>6)</sup>는 Microprobe를 이용하여 산소의 미생물층 침투깊이를 측정하였는데 그의 실험결과에 의하면 액상의 산소농도가 40ppm, 9ppm에 대하여 침투깊이는 각각 350 $\mu$ m, 170 $\mu$ m로서 본 논문의 실험결과에 의한 미생물층의 두께 500~1500 $\mu$ m(4-(2)참조)에 미달함으로 case 1의 경계조건을 식(3)에 적용함이 타당하다.

식(3)을 case 1의 경계조건으로 풀면 다음과 같다.<sup>7)</sup>

$$\begin{aligned} 1 - \left( \frac{r_c}{r_p} \right)^3 \\ = 3.012 \left( \frac{\rho_b k}{D_{ec}} \right)^{-0.45} (r_p)^{-0.9} C_L^{0.45} \end{aligned} \quad (4)$$

식(4)를 이용하여 반응기의 단위부피당 산소반응속도를 구하면 다음과 같다.

$$\begin{aligned} R &= \rho_b k (1 - \epsilon) \left[ 1 - \left( \frac{r_c}{r_p} \right)^3 \right] \\ R &= 3.012 (1 - \epsilon) (\rho_b k)^{0.55} (D_{ec})^{0.45} \\ &\quad (\bar{r}_p)^{-0.9} C_L^{0.45} \end{aligned} \quad (5)$$

반응기내에서 유체의 흐름이 플러그 흐름이라고 가정하면 다음과 같이 액상의 산소에 대한 미분방정식을 세울 수 있다.

$$\begin{aligned} v \frac{dC_L}{dz} + R &= 0 \\ z = 0 \text{ 에서 } C_L &= C_0 \end{aligned} \quad (6a)$$

반응기내에서 bioparticle들이 완전히 섞여서 높이에 따라  $\epsilon$ 와  $r_p$ 가 일정하다고 가정하면 식 (5)~(6a)로부터 다음의 산소반응속도 모델식을 얻을 수 있다.

$$C_L^{0.55} = -KZ + C_0^{0.55} \quad (7)$$

$$\begin{aligned} K &= 1.667 \epsilon (1 - \epsilon) (\rho_b k)^{0.55} \\ &\quad (D_{ec})^{0.45} / V (\bar{r}_p)^{0.9} \end{aligned} \quad (7a)$$

모델식(7)에 의하면 산소농도는 반응기 높이에 따라 0.55 차로 감소한다.

## (2) 산소반응속도에 대한 유기물농도의 영향

호기성 미생물은 유기물과 산소가 공존해야 정상적인 대사활동을 할 수 있다. 유기물이 없으면 호기성 미생물은 내호흡(endogeneous respiration)을 하는데 내호흡에 의한 산소반응속도는 유기물이 있을 때의 20~30%<sup>8)</sup> 정도이다. 유동층 반응기에서 두 성분은 각각 미생물층을 침투하며 반응하는데 산소가 침투한 깊이 전체에서 정상적인 반응속도를 유지하기 위해서는 두 성분 중에서 산소가 알계 침투하는 한계침투성분이 되어야 한다. 한계침투성분이 유기물이면 미생물층의 산소반응속도는 유기물의 침투깊이로 정해지므로 반응기의 산소반응속도는 모델식(7)을 따르지 않고 유기물의 농도에 의해 결정된다.

한계침투성분은 각 성분의 액상에서의 농도, 미생물층에서의 확산계수, 미생물의 대사반응에 의한 두 성분의 결합 비율등으로 정해진다. 마지막 두가지는 미생물층 자체의 특성인데 보통 일정한 값을 가지므로 결국 한계침투성분은 액상에서의 두성분의 농도비율로 결정된다.

## 3. 실험

### (1) 실험장치 및 재료

전체적인 실험장치의 간략도는 Fig. 2와 같다. 반응기는 내경 3.2cm 높이 60cm의 acryl column으로 제작하였다. 반응기의 온도를 일정하게 유지하기 위하여 Water Jacket을 외부에 설치하였으며 밑에서 7cm 높이에 액체분산판을 설치하였다. 반응기 벽면을 따라 6cm 간격으로 내경 3mm의 액체시료 채취구를 만들었고 시료 채취 중에 유동입자가 시료와 함께 새어 나오는 것을 방지하기 위하여 반응기 측의 구멍을 스크리인으로 막았다.

본 실험에서는 폐수로서 Table 1과 같이 글루코오스를 주성분으로 하는 단순한 조성의 합

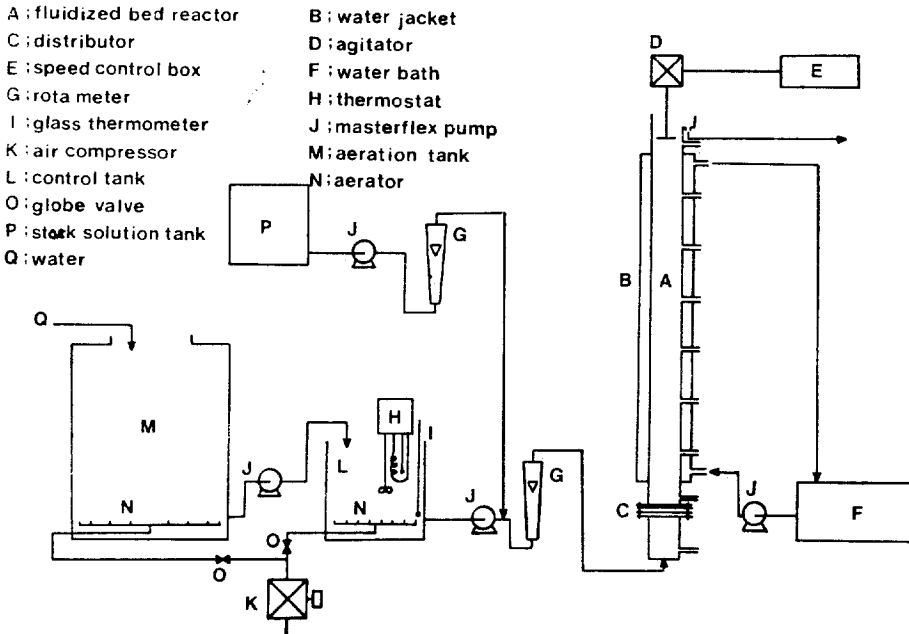


Fig. 2. Schematic flow diagram of the experimental apparatus.

Table 1. Composition of the synthetic waste water.

Constituent	Concentration (mg/l)
$C_6H_{12}O_6$	*
$K_2HPO_4$	300
$KH_2PO_4$	150
$(NH_4)_2SO_4$	150
$MgSO_4 \cdot 7H_2O$	10
$NaCl$	10
$FeCl_3 \cdot 6H_2O$	1
$MnSO_4 \cdot H_2O$	1
$CaCl_2 \cdot 2H_2O$	1
Water	to volume

\*changed for the diferent exp.

성폐수를 사용하였다. 합성폐수는 폭기조와 온도조절탱크를 거쳐서 일정한 온도에서 포화상태로 폭기된 물과 농축용액을 반응기 입구에서 혼합 제조회되어 주입되었다. 폭기조에서는 활성탄층을 통과하여 정제된 물을 공기압축기를 이용하여 확산폭기 방법으로 폭기하였다.

유동입자로는 평균직경이  $1.99mm (\pm 0.1mm)$ 이며 밀도가  $1.58g/cm^3$ 인 구형의 우레아수지 입자(국제진주사 제품)를 사용하였다.

## (2) 미생물층 배양 및 실험 방법

실험에 이용한 미생물은 혼합미생물로서 서울시 중랑 폐수처리장에서 이식해 온 활성오니를 합성폐수로 배양하여 새로운 환경에 충분히 적응시켜 얻었다.

미생물을 입자에 부착시키기 위하여 Liebman<sup>9)</sup>이 금속원판에 미생물을 부착시킨 방법을 응용하였다. Fig. 3 (A)처럼 폭기조에 합성폐수와 이식해 온 활성오니를 넣고 상부 수면과 거의 밀착하도록 스크리인을 설치한 후 그 위에 유라이트 입자들을 얇게 펼쳐 놓는다. 이 상태로 계속 폭기시키면서 배양하면 2~3일 후에 입자표면에 부분적으로 미생물층이 생긴다. 이것들을 반응기로 옮겨서 합성폐수를 300ml/min의 유량으로 순환시키면 약 이틀 후에 미생물이 입자 전체에 고루 퍼져 붙는다. 이때 미생물이 단단히 붙지 않았던 입자들은 서로의 충돌, 유체의 전단응력등의 영향으로 미생물층이 입자에서 떨어진다. 이 입자들은 미생물이 붙은 입자들에 비하여 종말속도가 크므로 반응기 하부로 모이는데 이들을 채취하여 앞의 과정을 반복함으로 미

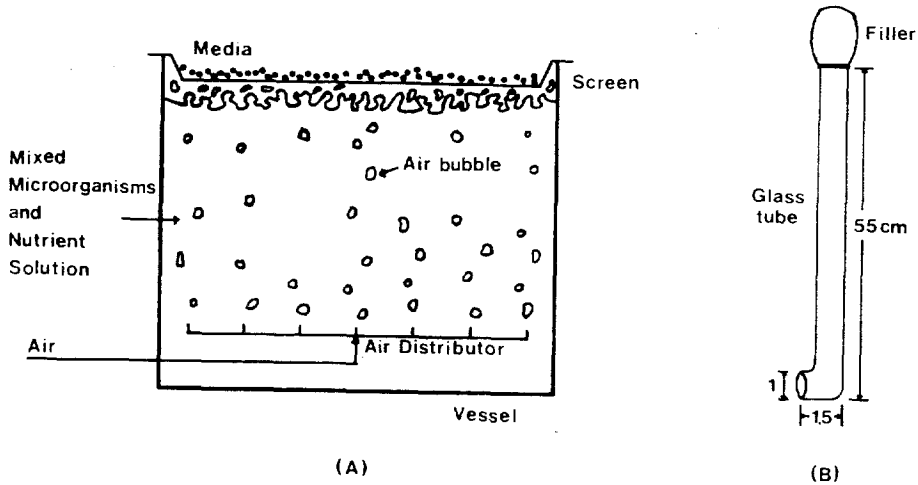


Fig. 3. (A) Biofilm Growing Apparatus.  
(B) Schematic representation of the Solid Sampler.

생물층이 잘 형성된 유동층을 얻었다. 이때 사용한 입자들의 총수는 7,200 개였다.

이와같이 유동층이 형성된 후 합성폐수의 유량은 300ml/min 로 고정하였으며 온도는  $25 \pm 0.5^\circ\text{C}$ , pH는 6.5~6.8로 유지하였다. 이 상태에서 유동층은 합성폐수에 잘 적응된 혼합미생물의 활발한 증식활동으로 미생물층의 두께가 두꺼워짐에 따라 높이가 점차 상승한다. 유동층의 높이를 일정하게 유지하기 위하여 반응기 상부의 교반기로 미생물층을 입자로 부터 분리 제거하였지만 미생물의 증식속도가 빠르고 견고하게 붙게되면 이 방법은론 충분치 못했다. 보완책으로 유동층의 높이가 52cm를 넘으면 42~43cm 위치까지 과다하게 미생물이 붙은 상층의 입자들을 반응기 밖으로 꺼내서 미생물층을 제거한 다음 다시 반입하였다. 이러한 방법으로 실험 중 유동층의 높이를 50~52cm로 유지하였다. 이때 유동층의 침전높이는 28~30cm로 일정하였다.

위의 방법으로 유동층의 높이를 일정하게 유지하며 반응기 출구에서 산소농도를 주기적으로 측정하여 농도의 변화가 없는 정상상태에 도달했을때 실험을 실시하였다. 산소농도는 갈바닉식 산소전극(일본 급수화학 연구소 제품)을 사용하여 측정하였다.

먼저 모델식을 검토하기 위하여 반응기 높이에 따라 산소농도를 측정하였다. 이 실험은 합성폐수의 글루코오스 농도를 1000ppm 으로 초기 산소농도(7.2~7.6ppm) 보다 매우 크게하여 반응기내에서 산소가 한계침투성분으로 유지되도록 하였다. 이후 글루코오스농도를 점차 감소하여 0 ppm 까지 11 가지 경우로 변화시키며 반응기 출구의 산소농도를 측정하여 반응기 입구의 글루코오스 농도가 산소반응속도에 미치는 영향을 실험하였다. 각 경우 반응기가 정상상태에 도달한 후 산소농도를 측정하였다.

Fig. 3(B)와 같은 특별히 고안된 고체입자 채취기구를 이용하여 반응기 높이에 따라 5cm, 25cm, 45cm 세 위치에서 bioparticle 을 채취하였다. 기구를 채취지점까지 이동할 때에는 기구의 입구를 반응기 벽면에 밀착하여 원치않는 위치의 입자들이 채취되는 것을 방지하였으며 이동 후 상부 Filler를 수축 이완하여 입자들을 채취하였다. 채취된 bioparticle 들을 곧 유리판 위로 옮겨 사진 촬영하여 크기를 측정하였다.

채취된 bioparticle 의 미생물층을 입자와 분리하여 배양액에 분산시킨 후 이 용액을 5ml 와 10ml 두경우로 120ml 크기의 D.O 측정병에 이식하여 혼합미생물의 산소반응속도를 측정하였다.

이 실험은 실험에 사용된 혼합미생물의 산소 반응속도가 산소농도에 대하여 영차반응으로 나타나는가를 확인하기 위해 수행되었다.

## 4. 결과 및 고찰

### (1) 혼합미생물의 산소반응속도

회분식 반응기에서 행한 혼합미생물의 산소반응속도 실험결과를 Fig. 4에 나타내었다. 이식한 혼합미생물양의 다과에 따라 반응속도를 나타내는 기울기는 다르게 나타났으나 시간에 따른 산소농도의 변화는 직선으로 나타나서 실험에 사용한 혼합미생물의 산소반응속도가 산소농도에 무관한 영차반응임을 보이고 있다. 따라서 모델식의 유도에 적용되었던 영차반응의 가정은 적합하였다.

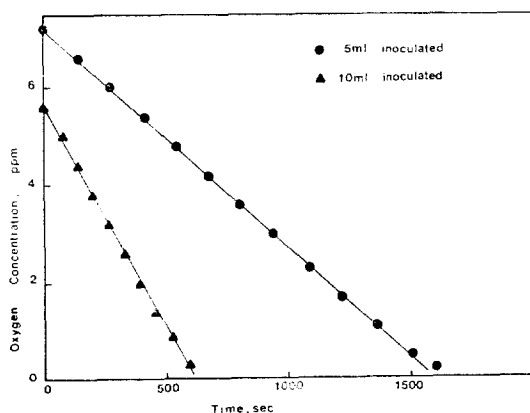


Fig. 4. Oxygen reaction rate of the Mixed Culture Microbes.

### (2) 모델식의 검토

반응기 높이에 따른 산소농도의 분포를 산소농도의 0.55차로 Fig. 5에 표시하였다. 산소농도의 분포는 거의 직선상에 나타남으로 모델식(7)과 같은 경향을 보이고 있다. 이러한 결과를 보면 모델식이 실제의 현상과 잘 일치함을 간접적으로 알 수 있다. 그러나 정밀한 모델식의 검토를 위해서는 모델식을 이루고 있는 기본변수들에 의한 논의가 있어야 하며 이에 대한 연

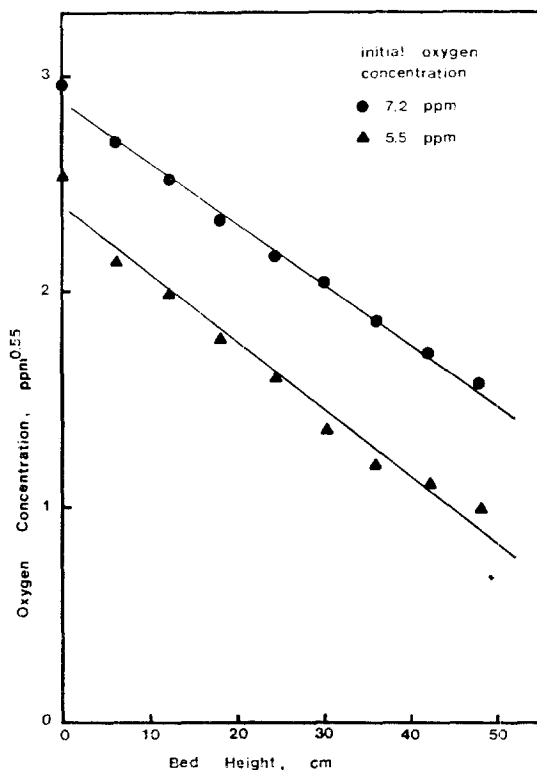


Fig. 5. Plot of  $C_{0.55}^L$  vs. bed height.

구가 앞으로 필요하다. Fig. 6에서 최소제곱법으로 구한 직선의 기울기로 모델식의  $K$ 를 정하면 본 실험조건에서의  $K$  값은  $0.0295 \text{ ppm}^{0.55}/\text{cm}$ 이다.

Fig. 5의 자료점들을 자세히 보면 반응기 상부로 갈수록 높이에 따른 산소농도 감소율이 조금씩 떨어짐을 알 수 있다. 이러한 경향은 bioparticle의 크기에 따른 층분리(Stratification)가 생김으로 나타나는 것으로 생각된다. 반응기의 세 높이 5cm, 25cm, 45cm에서 채취한 bioparticle들의 사진(Fig. 7)으로 측정된 각각의 평균지름은 3.1mm, 4.4mm, 5.0mm로서 입자 크기에 따른 유동층의 구분이 생김을 알 수 있다. 식(5)에 의하면  $r_b$ 가 증가하면  $K$ 가 감소하여 반응기 단위부피당 산소반응속도가 감소한다. 따라서 반응기 상부로 갈수록 bioparticle들의 크기가 커져서 산소반응속도가 감소함으로 산소농도의 감소율이 떨어지는 것으로 해석할 수

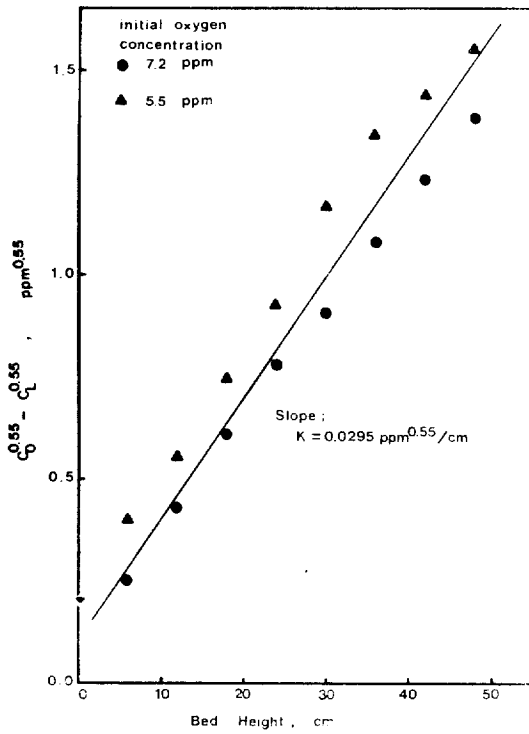


Fig. 6. Plot of  $C_{0.55}^0 - C_{0.55}^L$  vs. bed height.

있다.

Stratification 이 생기는 이유는 미생물층의 두께에 따라 bioparticle 의 밀도가 변하기 때문이다. 혼합미생물층의 wet density 는  $1.0 \sim 1.5 \text{ g/cm}^3$  으로 실험에 사용한 입자의 밀도인  $1.54 \text{ g/cm}^3$  보다 작음으로 미생물층이 두터워지면 전체적으로 밀도가 감소하는 효과를 나타낸다. 이에 따라 반응기 상부에는 미생물층이 두껍게 붙은 입자들이 모이고 하부에는 얇게 붙은 입자들이 모인다. Stratification 은 고액상간의 밀도차이, 유체의 흐름상태, 입자들의 밀도및 크기분포에 따라 그 정도가 다르게 나타난다. 모델식은 이러한 현상을 고려치 않은 관계로 정도가 큰 경우에는 이 효과를 고려한 보정이 필요할 것이다.

### (3) 산소반응속도에 대한 초기글루코오스농도의 영향

초기글루코오스농도의 변화에 따른 48cm 높이에서의 산소농도를 측정하여 Fig. 8 에 나타내

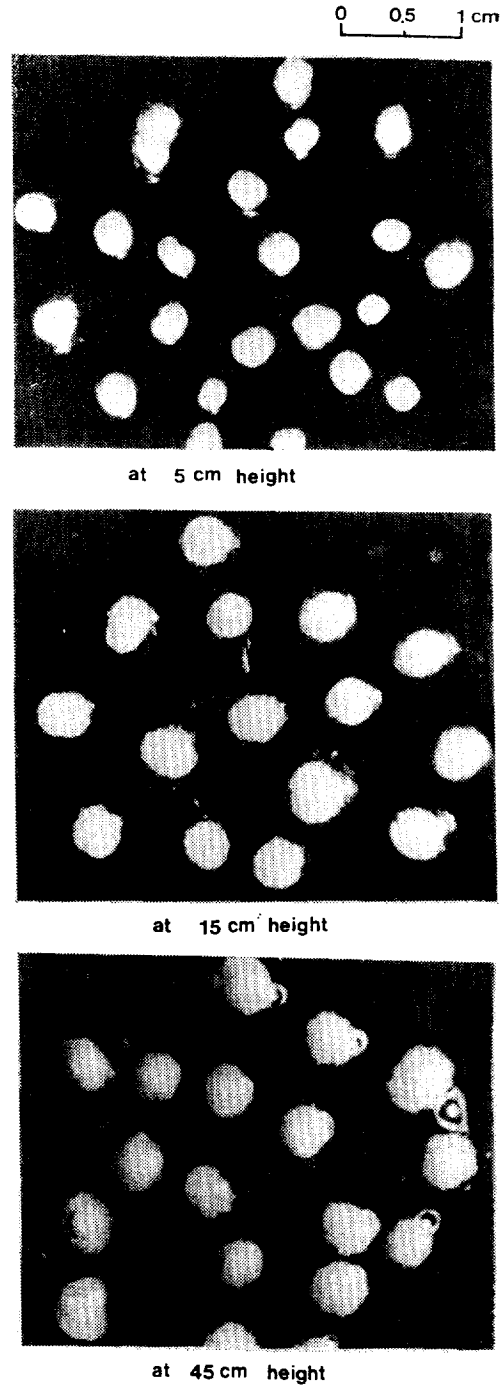


Fig. 7. Photograph of bioparticles segregating in the reactor. (magnification 2.1 times)

었다. 일주일 간격으로 행한 실험결과인데 두 결

과가 산소 소모량에서 약간의 차이를 보이는 것은 처음 실험 후 bioparticle들을 항온기에 보관 하던 중에 미생물층에 약간의 변화가 있었음을 의미한다. 그러나 실험의 목적인 초기글루코오스농도에 따른 산소반응속도의 변화는 두 실험이 같은 경향을 보인다.

반응기 출구(48cm 시료채취구)의 산소농도는 초기글루코오스농도가 1000~40ppm 사이에서는 거의 변화가 없으나 글루코오스농도가 40ppm 이하로 떨어짐에 따라 점차 상승한다. 이는 곧 산소 반응속도의 감소를 나타내며 앞의 이론에 비추어 볼 때 반응기내에서 한계침투성분이 초기글루코오스농도 40ppm을 전후로 산소에서 글루코오스로 전환되기 때문인 것으로 생각된다. Fig. 8에 의하면 글루코오스의 초기농도가 40 ppm, 산소의 초기농도가 7.4ppm에서부터 산소반응속도가 변하였고 이때 초기글루코오스농도의 산소농도에 대한 비율은  $\frac{40}{7.4}$  즉 5.4가 된다. 따라서 초기글루코오스농도가 초기산소농도의 5.4 배 이상 크면 산소반응속도는 초기글루코오스농도의 영향을 받지 않는다. Williamson<sup>10)</sup>은 이론적 계산으로 위의 비율이 9.6 배라고 하였는데 이 값은 미생물 층표면에서의 한계침투 성분 변화에 기준을 둔 것이다. 본 논문의 실험 값은 원인적으로 반응기내의 한계침투성분의 변화에 기인하여 결정되었지만 미생물층 표면의 농도비율은 아니므로 Williamson의 계산값과는 약간의 차이가 있다.

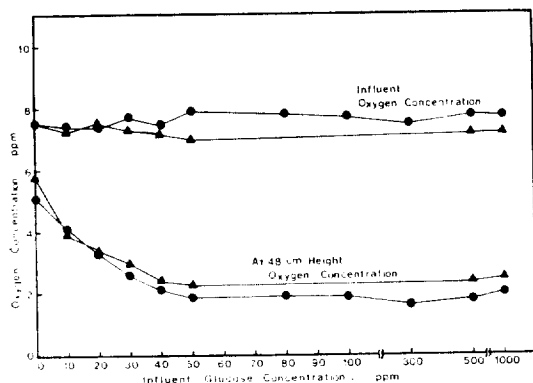


Fig. 8. Effect of the influent Glucose concentration on the oxygen reaction rate in the reactor.

## 5. 결 론

호기성 미생물 유동층 반응기에서의 산소반응 속도에 대한 이론적 고찰과 혼합미생물을 이용한 실험으로 다음과 같은 결론을 얻었다.

(1) 혼합미생물의 산소반응속도는 산소농도에 무관한 영차반응식으로 표시 가능하였다.

(2) 호기성 미생물 유동층 반응기에서의 산소반응속도는 산소가 한계침투 성분일 때 다음 식으로 표시된다.

$$C_L^{0.55} = -KZ + C_0^{0.55}$$

$$K = 1.657\epsilon(1 - \epsilon)(\rho_b k)^{0.55}$$

$$(D_{ec})^{0.45}/V(\bar{r}_p)^{0.9}$$

실험에서 측정된  $K$ 는  $0.0295 \text{ ppm}^{0.55}/\text{cm}$  였다.

(3) 실험결과에 의하면 반응기 입구에서 글루코오스농도가 산소농도 보다 약 5.4 배 이상 크면 반응기내에서 산소가 유기물에 대하여 한계 침투성분으로 유지되었다.

## 사 용 기 호

- $C$  oxygen concentration (mg/l)
- $C_L$  oxygen concentration in the liquid phase (mg/l)
- $C_0$  inlet oxygen concentration (mg/l)
- $D_{ec}$  effective diffusivity of oxygen in biofilm ( $\text{cm}^2/\text{s}$ )
- $K$  oxygen reaction rate coefficient defined by equation (7) ( $\text{mg}^{0.55}/\text{cm}$ )
- $k$  intrinsic zero-order reaction rate constant for oxygen ( $\text{s}^{-1}$ )
- $R$  reaction rate per unit volume of reactor ( $\text{mg}/\text{cm}^3\text{s}$ )
- $r$  radial parameter (cm)
- $r_c$  critical radius defined by Fig. 1(B) (cm)
- $r_m$  media radius (cm)
- $r_{O_2}$  oxygen consumption rate of Microbes ( $\text{mg}/\text{ls}$ )
- $r_p$  bioparticle radius (cm)
- $\bar{r}_p$  average bioparticle radius (cm)



- $V$  superficial upflow velocity (cm/s)  
 $v$  real liquid velocity (cm/s)  
 $Y_{O_2}$  yield of biomass upon oxygen  
 $z$  axial parameter (cm)

## Greek Letters

- $\rho_b$  biofilm dry density (mg/cm<sup>3</sup>)  
 porosity  
 $\mu_{\max}$  maximum growth rate (s<sup>-1</sup>)

## 참 고 문 헌

1. J.S. Jeris and R.W. Owens, J. Water Pollut. Control Fed., (1977), 816.
2. P.F. Cooper and B. Atkinson, "Biological Fluidized Bed Treatment of Water and Wastewater," Ellis Horwood, Chichester, England, 1981, p. 285.
3. J.W. Mellor, "A comprehensive Treatise on Inorganic and Theoretical Chemistry," Longmans, Green And Co., London, 1, (1952), 369.
4. T.K. Sherwood, "Mass Transfer," McGraw-Hill Book Co., New York, 1975, p. 221.
5. C.R. Baillod and W.C. Boyle, J. San. Eng. Div. Proc. Amer. Soc. Civil Eng., SA2, (1970), 525.
6. H.R. Bungay and W.M. Sanders, Biotechnol. and Bioeng., 11, (1969), 765.
7. L.T. Mulcahy, AIChE Sym. Seri., 77, (1981), 273.
8. A.P. Vernimmen and J.C. Lamb, J. Water Pollut. Control Fed. 39, (1967), 1006.
9. C.E. Renn and J.C. Liebman, Envir. Sci. and Tech., 2, (1968), 113.
10. K. Williamson and P.L. McCarty, J. Water Pollut. Control Fed., 48, (1976), 9.

## 감 사

본 연구는 문교부 학술 연구비의 지원으로 행해진 것으로 문교부 당국에 심심한 감사를 드립니다.

