

CTB를 이용한 단일 생물반응기에서의 유체 거동 고찰

Investigation of Flow Distribution in One Stage Bioreactor with CTB (Cone Type Baffle)

박종훈^{1,2} · 김승준¹ · 최용수^{1,*} · 이상협¹ · 홍석원^{1,3} · 강선홍²

Jong-Hoon Park^{1,2} · Seung-Jun Kim^{1,4} · Yong-Su Choi^{1,*} · Sang-Hyup Lee¹ ·
Seok-Won Hong^{1,3} · Seun-Hong Kang²

1 한국과학기술연구원 수질환경 및 복원연구센터

2 광운대학교 환경공학과

3 서울대학교 지구환경시스템공학부

(2006년 9월 26일 논문 접수; 2007년 1월 3일 최종 수정논문 채택)

Abstract

In this study, the cone type baffle (CTB) was developed to improve the flow distribution in an upflow bioreactor. It was composed of two different zones (anoxic and oxic) by inserting the CTB in the middle of the bioreactor. Based on the results of the dye tracer tests, hydraulic retention time (HRT) for the anoxic, oxic and total volume of the bioreactor was found to be 0.998, 1.996 and 2.994 hr, respectively. And the theoretical HRT for each volume was 1.0, 2.0 and 3.0 hr, respectively. The values of HRT obtained from the tests coincide with theoretical values. Therefore, the flow pattern for each zone inside the bioreactor, which was divided by the CTB, was dominated by complete mix flow rather than plug flow. Based on the results of the transection measurements, the DO concentration for each zone inside the bioreactor was clearly distinguished. Consequently, the CTB played an important role in the separation of anoxic and oxic zones. Also, the each pollutants were reduced gradually along the height in the oxic zone. The reason is that the biomass in the media layer (Port 4 and 5) was higher than that in the mixed liquor layer without the media (Port 2 and 3).

Key words: Bioreactor, CTB(Cone Type Baffle), center hole, Dye tracer

주제어: 생물반응기, 콘 타입 경사판, Dye 추적자, 중앙 hole

*Corresponding author Tel: +82-2-958-5834, FAX: +82-2-958-5839, E-mail: yschoi@kist.re.kr (Choi Y.S.)

1. 서 론

소규모 마을단위 취락지역에서 발생하는 하수의 경우 그 특성상 하수종말처리시설까지의 관로가 미처 설치되지 않아 일반적으로 하천 및 그 지류로 방류되어 하천 오염의 주요 원인으로 작용하게 된다. 그에 따라 소규모 단위의 개별 하수처리장의 개설이 이루어지고 있으며 이와 같이 '농어촌지역의 수질오염을 초기단계에서 예방하기 위해 자연마을 단위로 설치하는 하수도로서 하수처리능력이 50m³/일 이상 500m³/일 미만인 공공하수도'를 마을하수도라 한다. 2005년 현재 약 1,100여 개(2004, 환경부)의 마을하수도 시설이 설치 운영되고 있으며 이들은 토양트렌치 및 박층법 또는 소규모 생물학적 고도처리 공법이 적용되고 있다. 그러나 토양트렌치 및 박층법의 경우 막힘 현상 등의 문제로 운영상에 문제가 있으며 생물학적 고도처리 공법의 경우 일정 이상의 소요부지면적이 요구되고 전문적인 관리인이 요구된다. 그러나 마을하수도는 그 특성상 작은 소요부지와 운전의 용이성이 요구되고 있다. 따라서 본 연구에서는 상기의 조건에 맞도록 단일생물반응기를 개발하였다. 개발한 생물반응기는 CTB(Cone Type Baffle)를 이용하여 호기와 무산소 구간을 나누어 질산화와 탈질이 동시에 이루어지도록 하였다. 개발한 생물반응기가 CTB에 의해 호기와 무산소구간의 구분이 잘 이루어지는 지에 대한 객관적인 검토가 필요하였다. 이를 위해 추적자의 유입 및 유출 농도를 이용한 실험에 의한 수치 해석방법이 일반적으로 적용되어 왔다.

추적자를 이용한 반응조의 수리학적 특성 해석은 반응조의 수리학적 성능을 평가하는 오랜 방법으로서, 실제 시공한 반응조의 수리학적 성능을 평가하는데 사용할 수 있는 가장 간단한 방법 중 하나이다. 추적자를 이용하여 단위 공정의 수리학적 특성을 해석하는 방법에는 크게 두 가지가 있다. 첫 번째는 Step Input test 방식(또는 Continuous feed tracer test)으로서 일정유량으로 추적자를 계속 주입하여 최종 유출수의 농도와 주입하는 추적자의 농도가 같아질 때까지 측정하는 방식이다. 두 번째는 Pulse Input test 방식(또는 Slug dose test)으로서 짧은 시간에 추적자를 주입한 후 추적자의 약 90% 이상이 유출되는 시점까지

측정하는 방식이다. 추적자 실험에 사용하는 추적자 물질로는 불소, Rhodamine WT, Lithium, Sodium, Chloride, Calcium, Anthraquinone dye 등이 있다.

본 연구에서는 추적자 실험 중 step-input test 방식을 통하여 생물반응기에서의 유체 거동 특성을 고찰하고자 하였다. 또한 생물반응기의 운전을 통해 CTB의 호기/무산소조 구분 특성을 고찰해 보고자 하였다.

2. 실험 장치 및 방법

2.1. 생물반응기 설계 및 제작

본 실험을 위해 아크릴을 이용하여 lab-scale 생물반응기를 제작하였다. 생물반응기는 원형으로 제작하였으며, 반응조의 전체 용적은 18L로 설계하여 제작하였다. 반응기의 전체 용적은 담체가 차지하는 부피와 CTB(Cone Type Baffle), 산기관 등이 차지하는 부피를 고려하였으며, 반응기에 실제 유입되는 물의 양은 약 13L 정도로 설계하였다. 제작한 CTB 생물반응기는 전체 용적의 약 2/3를 호기구간으로, 약 1/3을 무산소구간으로 나누었다. 호기구간은 다시 담체구간과 담체가 없는 구간으로 나누었다.

담체구간에 충전한 담체는 스펀지로 제작한 담체를 사용하였으며 담체구간에는 반응기 전체 용적의 약 15% 내외로 담체를 충전하였다. 기존연구에 의하면 하수처리시 반응조의 용적에 대한 담체 충전율은 15% 내외가 적당하다고 알려진바 있다(코오롱건설, 2000).

호기구간과 무산소구간의 구분을 위하여 역깔대기 모양의 CTB(Cone Type Baffle)를 제작하여 사용하였다. CTB는 경사각 45° 이상이었으며, 중앙 hole의 직경은 약 15mm이다. 호기구간의 교반 및 폭기를 위한 산기관은 반응기 벽과 닿는 부분의 CTB 산기관 지지대에 설치하였다. 무산소구간의 완전 혼합을 위해서는 V자형 임펠러를 설치하여 교반하였다. Fig. 2-1에 본 실험에 사용한 CTB 생물반응기의 모습과 유체 흐름을 간략히 나타내었다.

2.2. CTB 생물반응기 운전조건 및 분석 방법

본 연구를 위한 담체를 충전한 CTB 생물반응기의 운전은 중앙하수처리장의 반응슬러지를 이용하였으

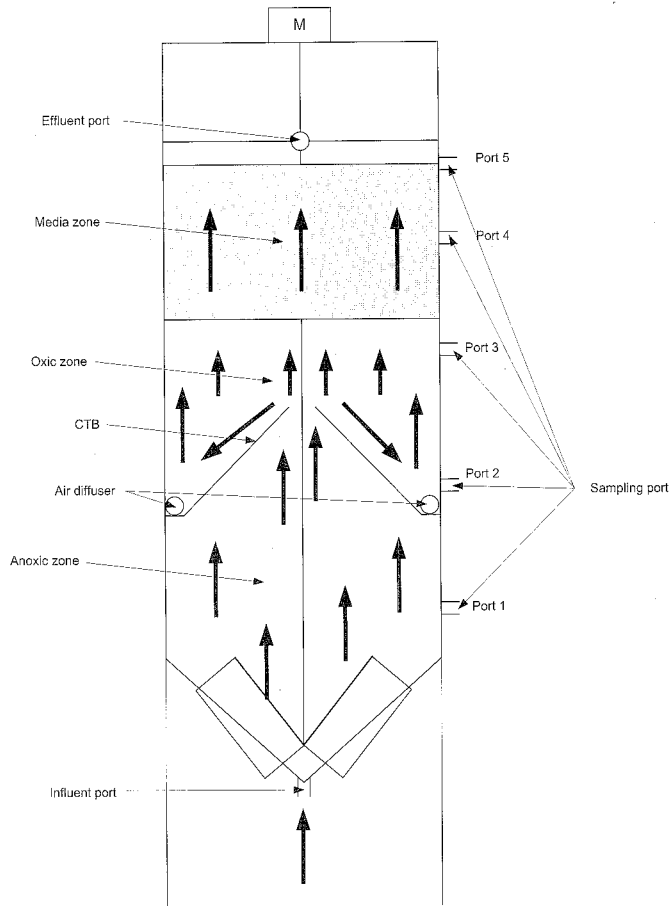


Fig. 2-1. Diagram of CTB bioreactor.

며, 수리학적체류시간(HRT)은 6시간으로 처리용량 52L/d이다. 반응은 유입유량의 100%로 하였고 SRT는 15~25일로 조절하였으며, 실험 중 온도는 실온(약 25°C)에서 수행하였다. 호기구간의 폭기량은 용존산소 농도를 지속적으로 확인하여 2.0~3.0L/min을 유지하도록 조절하였고 무산소구간의 완전 혼합을 위해 교반기를 10~15rpm으로 운전하였다.

본 연구를 위한 유입수는 탈지분유, 글루코스, 탄산나트륨, NH_4Cl , K_2HPO_4 등을 사용하여 제조한 인공하수를 사용하였다. 사용한 유입수의 농도를 Table 2-1에 나타내었다.

시료분석은 Standard Methods 20th edition(1998)에 제시된 방법에 따라 실시하였으며, port 별 분석을 위해 Dinox사의 IC(Ion Chromatographic) DX120와 YSI사의 DO 58을 사용하여 측정하였다.

Table 2-1. Influent characteristics

Item	Range	(unit: mg/L)
		Average
pH	5.98 ~ 7.85	6.74
TCOD_{Cr}	95.9 ~ 860.0	384.7
SCOD_{Cr}	17.9 ~ 606.9	275.6
BOD_5	12.5 ~ 520.7	221.1
SS	8.6 ~ 134.4	82.6
TN	34.3 ~ 72.3	47.5
$\text{NH}_4\text{-N}$	16.9 ~ 37.2	26.0
TP	3.0 ~ 9.7	6.1
Alkalinity	61.0 ~ 182.0	140.5

2.3. Dye 추적자 실험 운전조건 및 분석 방법

실험을 위한 CTB 생물반응기의 운전조건은 전체 유효용적, $V = 18\text{L}$; 반응기 내 추적자 초기농도, $C_0 = 300\text{mg/L}$; 유입 속도, $Q = 1.67\text{ml/sec}$; 수리학적 체류시간(HRT), $\theta = 3.0\text{h}$ 이다. 실험 중 반응은 하

지 않았으며 유입유량의 정량화를 위하여 미량정량펌프(master flex pump)를 이용하였고, 실험은 실온 약 25°C에서 수행하였다. 실험을 위한 추적자로는 anthraquinone dye들 중 RB4를 선택하여 사용하였다. 시간에 따른 dye의 농도는 UV(SHIMADZU, UV mini 1240)를 사용하여 측정하였다.

실험은 생물반응기의 유체 흐름과 완전 혼합이 이루어지는 것을 확인하기 위한 것이며, 최종 목표인 담체를 넣은 상태에서의 운전시에도 정상적인 유체 흐름과 완전 혼합이 이루어지는 것을 확인하기 위하여 행하였다. 따라서 실험은 담체가 없는 상태인 measured 1과 담체를 넣은 상태인 measured 2로 나누어 각각에 대해 실험을 하였다.

RB4를 증류수에 넣어 착색한 후 생물반응조의 유입구를 통해 유입한 후, measured 1의 경우, 12시간 동안 유입없이 교반과 폭기를 하여 생물반응기와 기기들에 의해 착색되어 제거되는 dye의 양을 감안하였다. measured 2의 경우 담체에 착색이 되어 제거되는 양이 많을 것을 우려하여 실험 시작 12시간 전에 담가 두어 충분한 착색이 이루어져 dye가 제거되는 것을 방지하였다. 생물반응기에 충분히 착색이 이루어진 후 증류수를 유입하여 dye가 제거되도록 하였다.

실험은 measured 1, 2에 대해 dye가 생물반응기에서 거의 제거되는 18시간 동안 실시하였다. 시료는 무산소구간인 port 1과 유출구에서 채취하였으며, 시작에서 2시간까지는 15분 간격으로, 2~6시간까지는 30분 간격, 6~18시간까지는 1시간 간격으로 하여 각각 총 29회 채취하여 측정하였다. 이때 시료 측정은 파장(λ) = 598nm에서 행하였다.

반응성이 없는 추적자가 주입된 CSTR(Completely Stirred Tank Reactor)의 이상적인 상태에서의 해석은 다음 물질수지 식을 사용하였다(Lee, Y.H., 2003).

$$V \frac{dC}{dt} = -QC \quad \text{eq. 2-1}$$

eq. 2-1을 적분하면,

$$C = C_0 e^{-\frac{t}{\theta}} \quad \text{eq. 2-2}$$

여기서,

V = 반응기 유체 용적, L

C = 반응기 유출수의 추적자 농도, mg/L

C_0 = 반응기 추적자 초기 농도, mg/L

Q = 유입 속도, L/h

θ = 수리학적 체류 시간(HRT), h

시료에 대한 해석은 유출수 추적자 농도를 초기 추적자 농도와의 비(C/C_0)로, 시간은 수리학적 체류 시간과의 비(t/θ)로 하여 표시하였다.

CTB 생물반응기 전체와 무산소구간에서의 평균체류시간(\bar{t})를 구하기 위하여 다음 식들을 이용하였다(화학반응공학, 2000).

$$C_{\max} = \frac{\dot{m}}{v} \left[\frac{\text{kg} \cdot \text{s}}{\text{m}^3} \right] \quad \text{eq. 2-3}$$

$$\bar{t} = \frac{\dot{m} \cdot V}{v^2 \cdot C_{\max}} \quad \text{eq. 2-4}$$

여기서

C_{\max} = step input으로 전환한 추적자의 최고 농도, mg/L

\dot{m} = 유입되는 유체속의 추적자 질량유속(mass flow rate), kg/s

v = 유입 유량, ml/s

V = 반응기 유체 용적, L

\bar{t} = 평균체류시간, hour

3. 연구 결과 및 고찰

3.1. CTB 생물반응기 운전 결과 및 고찰

CTB 생물반응기 운전 중 각 port에 대한 TCOD_{Cr} , $\text{NH}_4\text{-N}$, $\text{NO}_2\text{-N}$, $\text{NO}_3\text{-N}$, $\text{PO}_4^{3-}\text{-P}$ 와 용존산소 농도를 지속적으로 분석하여 호기구간과 무산소구간에서의 변화를 확인함으로써 CTB에 의한 생물반응기 내의 오염물 거동과 용존산소 농도를 확인하였다. TCOD_{Cr} 의 경우 무산소구간보다 호기구간에서의 제거가 많이 이루어짐을 알 수 있는데 이는 호기구간에서의 미생물의 활성이 크기 때문으로 판단된다. $\text{NH}_4\text{-N}$ 는 호기구간에서 질산화를 통해 빠르게 제거되는 것을 알 수 있다. $\text{NO}_2\text{-N}$ 은 CTB 생물반응기 전체에서 거의 남아있지 않았는데, 이는 호기구간에서는 대부분 질산화를 통해 빠르게 $\text{NO}_2\text{-N}$ 에서

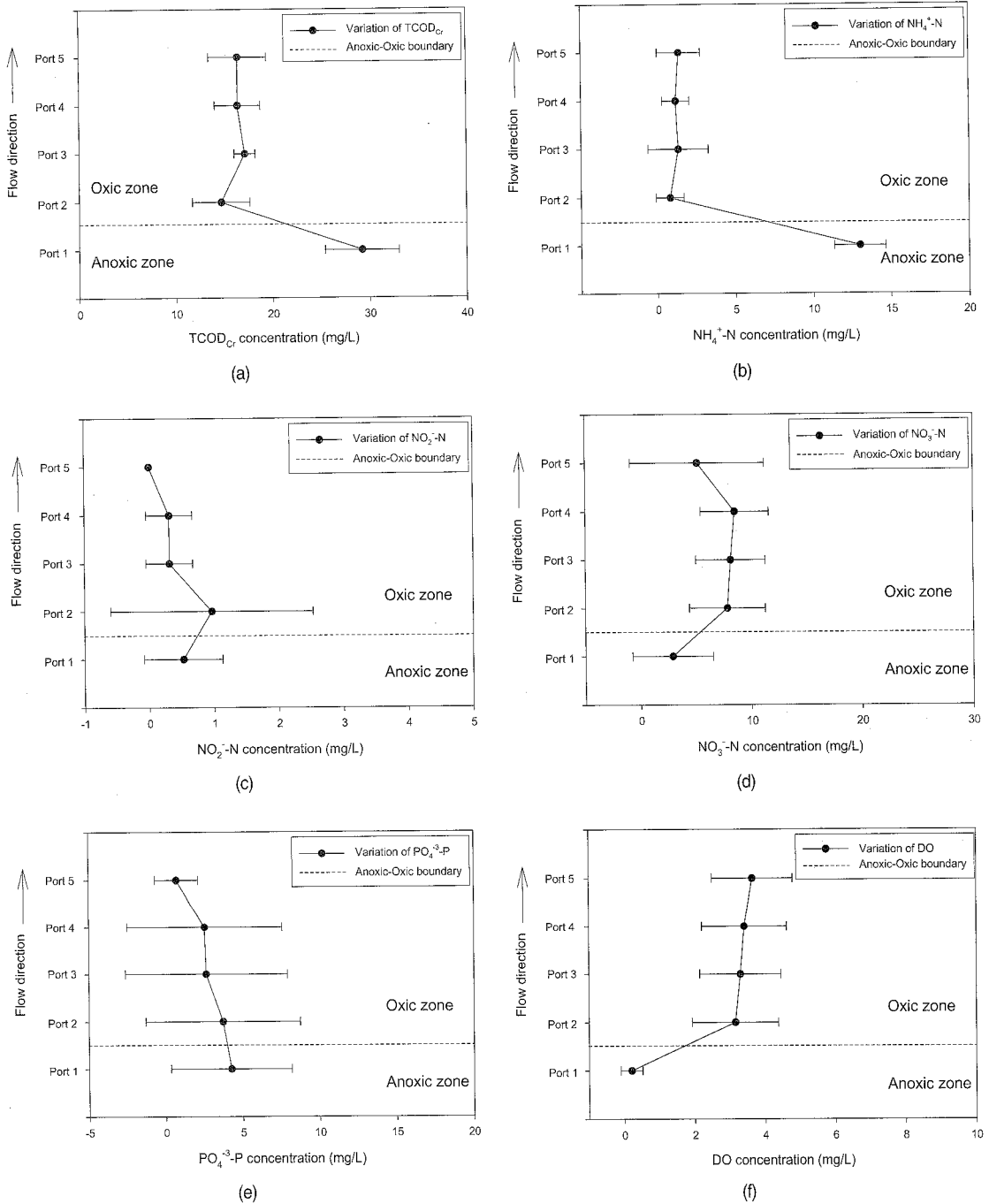


Fig. 3-1. Result of (a) $TCOD_{Cr}$, (b) NH_4^+-N , (c) $NO_2^- -N$, (d) $NO_3^- -N$, (e) $PO_4^{3-} -P$ and (f) DO by each port at CTB bioreactor.

$NO_3^- -N$ 로 변하기 때문이며 무산소구간에서도 탈질 반응을 통해 제거되는 것으로 판단된다. $NO_3^- -N$ 의 경우 무산소구간에서 탈질반응에 의해 제거되고, 호기구간에서는 질산화에 의해 생성되는 것을 알 수 있

다. $PO_4^{3-} -P$ 는 무산소구간에서 방출이 발생하고 호기 구간에서 제거가 일어나는 전형적인 생물반응기의 거동이 확인되었다(Wastewater Engineering: Treatment and Reuse, 4/e). Port 별 용존산소 농도 측정값으로

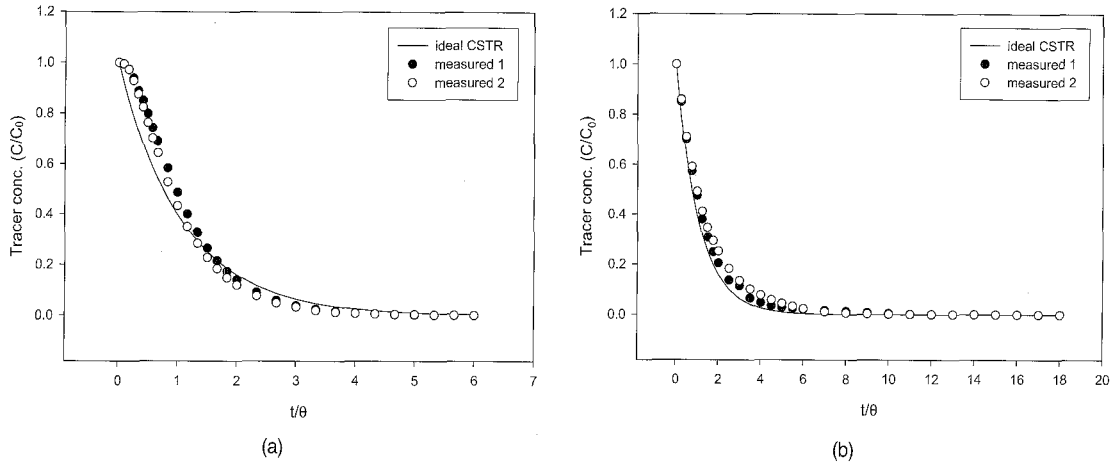


Fig. 3-2. Result of dye tracer test; (a) Bioreactor, (b) Anoxic zone of CTB bioreactor.

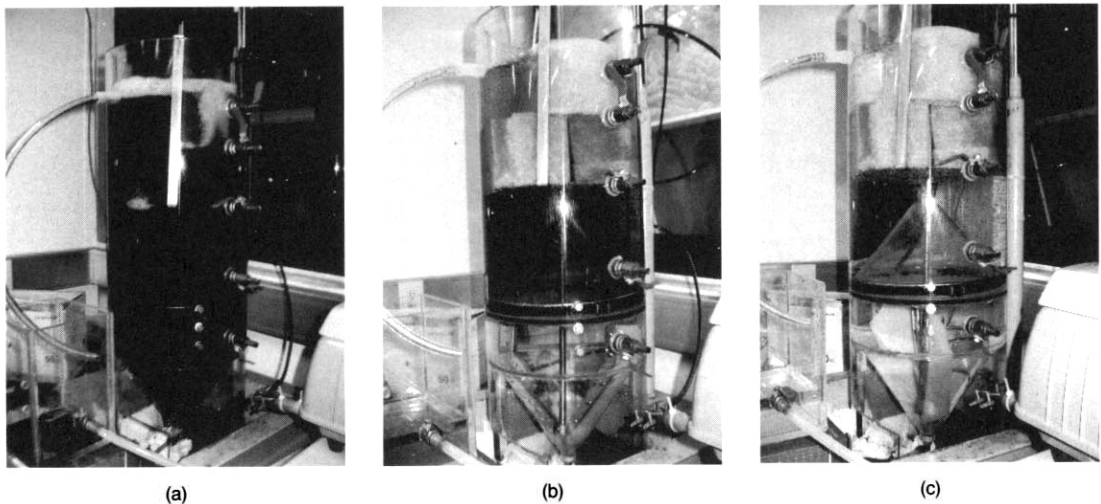


Fig. 3-3. Photo of the bioreactor for dye tracer test (a) test start, (b) after 12h, (c) test end.

호기와 무산소구간의 형성을 확인 할 수 있는데, 운전기간 중 호기구간은 port에 관계없이 평균 3.0mg/L 정도를 유지하였고 무산소구간은 평균 0.2mg/L 이하를 유지하였다. 호기구간의 폭기량에 관계없이 무산소구간의 용존산소 농도가 일정하게 유지되는 것을 확인하였다. 이는 CTB 생물반응기 내에 호기와 무산소구간의 구분을 위해 설치한 CTB에 의해 최초 목표인 호기와 무산소구간의 구분이 잘 이루어졌음을 의미한다. 실험 결과를 Fig. 3-1(a)~(f)에 나타내었다.

3.2. Dye tracer test 결과 및 고찰

CTB 생물반응기 전체에 대한 흐름을 유출부에서 채취한 시료를 해석하여 판단하였으며, 그 결과를 Fig. 3-2(a)에 나타내었다. 결과를 보면 최초 1시간 동안 이론적 CSTR 곡선에 비해 일치 정도가 떨어지는 것을 확인할 수 있는데, 이는 최초 1시간동안은 단독 반응기 역할을 하는 무산소구간에서 낮아진 농도가 호기구간으로 유입됨으로써 이루어지는 현상이다. 시간 경과에 따른 실험 사진(Fig. 3-3)을 보면 dye 농도가 무산소구간부터 낮아지고 호기구간이 낮아지는 것을 확인할 수 있다. 이 결과는 호기구간의 유체가

무산소구간으로 역류하지 않는다는 것으로 두 구간의 구분이 CTB에 의해 확실히 이루어졌음을 의미한다. 전체 생물반응기에 대한 곡선의 일치도는 이론적 CSTR 곡선과 90% 이상 근접한 결과를 보여 반응조 내에서의 유체가 완전 혼합과 원활한 흐름이 이루어지는 것을 알 수 있다. 또한 measured 1과 2의 결과거리의 일치함으로써 CTB 생물반응기 내에서 담체에 의한 유체 흐름의 방해는 적은 것을 알 수 있다.

무산소구간에 대한 호기구간이 미치는 영향 유무에 대해 파악하고자 무산소구간을 단일 반응기로 놓고 판단하였다. CTB 생물반응기에서 무산소구간의 부피는 전체 반응기의 1/3을 차지하므로 HRT를 1시간으로 하여 결과를 나타내었다(Fig. 3-1(b)). 결과에 의하면 무산소구간에서도 전체 반응기의 결과와 마찬가지로 이론적 CSTR 곡선과 90% 이상의 일치율을 볼 수 있다. 이는 무산소구간으로 호기구간에 있는 유체가 흐르지 않는다는 것을 의미하며, 무산소구간이 단일 반응기와 같은 역할을 수행한다는 것을 의미한다. 또한 무산소구간 내에서도 교반기에 의해 완전 혼합과 원활한 유체 흐름이 이루어지는 것을 알 수 있다. 실험 장치와 시간에 따라 변화하는 measured 2의 모습을 Fig. 3-3에 나타내었다.

식 2-3과 2-4를 이용하여 계산한 평균체류시간은 CTB 생물반응기 전체일 경우 2.994hour이고 무산소구간만 따로 계산하였을 때 0.998hour가 나와 수리학적 체류시간과 거의 일치함을 알 수 있다. 따라서 본 연구에 사용된 CTB가 생물반응기 내에서 호기와 무산소구간의 구분을 잘 이루고 있음을 알 수 있다. 또한 평균체류시간을 통해 호기구간으로 유입된 것이 무산소구간으로 재유입되지 않음을 확인 할 수 있다.

4. 결 론

(1) 본 연구에 의해 제작된 생물반응기는 초기 설

계 목적인 단일반응기에서의 호기구간과 무산소구간의 구분이 잘 이루어진 것을 확인 할 수 있었다. 이는 생물반응기 내에 설치된 CTB에 의해 의도된 대로 유체의 흐름이 이루어졌기 때문이다. CTB의 역할인 호기구간과 무산소구간의 구분을 수월하게 할 수 있음으로써 호기구간에서의 폭기를 반응기의 운전 상황에 맞게 조절하는 것이 가능할 것으로 판단된다.

(2) 상기 실험에 의해 본 연구에 의해 개발된 CTB 생물반응기는 CSTR 형태의 반응기로서, 원활한 유체 흐름과 교반과 폭기에 의한 완전 혼합이 이루어짐을 확인하였다.

(3) 본 연구에 의해 개발된 CTB의 중앙 hole의 직경에 따른 영향에 대한 추가 실험이 필요하다고 사료된다.

감사의 글

본 연구는 차세대환경기술개발사업의 지원에 의해 이루어졌습니다. 이에 감사드립니다.

참고문헌

1. 김상환, 임선기 (2000) 화학반응공학, 사이텍미디어.
2. 코오롱건설(주) Bio-cube를 이용한 하·폐수의 질소, 인 제거공정(NPR Process), 2000.
3. 환경부 (2004) 하수도사업 중기 투자계획.
4. Lee, Y.H. (2003) Reductive Biotransformation and Decolorization of Reactive Anthraquinone Dyes. Ph. D. Thesis, Georgia Institute of Technology, Atlanta,.
5. G. Tchobanoglous, F. Burton, H.D. Stensel, Wastewater Engineering: Treatment and Reuse, 4/e, Metcalf & Eddy, Inc.