

혐기성 유동층 생물막 반응기에서 순환유속 증가에 따른 층공극률 및 유기성 폐수 처리특성에 관한 연구

김재우·안재동*

경원전문대학 환경공업과
건국대학교 화학공학과*

A Study on the characteristics of the bed porosity and organic wastewater treatment with the circulation velocity in the anaerobic fluidized bed biofilm reactor

Jae-Woo Kim and Jae-Dong Ahn*

Dept. of Environmental Industry, Kyeongwon College

**Dept. of Chemical Engineering, Konkuk Univeristy*

Abstract

This study was performed to estimate the characteristics of the organic wastewater treatment and bed porosity with the circulation velocity in the anaerobic fluidized bed biofilm reactor. The results were as follows;

1. With increasing circulation velocity the fluidized bed expanded smooth, and with increasing initial particle volume the fluidized bed was increased.
2. With increasing circulation velocity the gas production was increased, but at 1.5cm/sec of circulation velocity AFBBR showed the highest value of methane production rate per removed COD. Therefore, for the purpose of economical operation in AFBBR, 1.5cm/sec of circulation velocity was optimum.
3. The microorganisms were colonized in the crevice of the media.
4. On fluidization, COD, VA, SS profiles with the reactor height were not showed.

In conclusion, AFBBR suit the organic wastewater treatment's purpose, and at 1.5cm/sec of circulation velocity the system is economical in an energy point of view.

I. 서 론

혐기성 유동층 생물막 반응기(anaerobic fluidized bed biofilm reactor, AFBBR)는 1970년에 Switzenbaum과 Jewell에 의해 개발되었고¹⁾, 탄소산화, 질산화, 탈질산화, 혐기성 처리 등 수처리의 여러 분야에서 사용이 되어왔으며 최근 폐수처리공법에서 새로운 기술로 대두되고 있다²⁾. 미생물이 반응기벽에 부착되거나 중력에 의해 미디어의 공간에 고정, 포획되는 고정상 반응기와는 달리, 미생물은 유동 미디어에 부착되어 있으며, 이 미디어는 순환수의 상방향 흐름에 의해 생성되는 항력에 의해 AFBBR내에 존재하게 된다. AFBBR은 유동 매질에 미생물이 성장하여 biofilm을 형성함으로써 반응기내의 미생물 농도를 최대로 유지할 수 있는 장점을 가지고 있다³⁾.

또한 유동화는 고정상 반응기에서 생성되는 편로현상, 뭉침현상과 높은 압력강화와 같은 운전 문제점을 해결해 준다. 유동층 시스템에서 미생물이 부착된 유동 미디어는 반응기로부터 쉽게 씻겨 나가지 않으며, 유동 매질은 미생물 부착을 위한 매우 넓은 표면적을 가지고 있어, 타 반응기에 비해 매우 높은 미생물 농도를 유지할 수 있다.

그리고 순환수에 의한 유입수의 초기 희석은 유입폐수가 산성일 경우 알카리도를 제공하여 중성화하고, 기질의 농도를 감소시키며, 독성물질의 유입으로 인한 반응기내 미생물의 충격효과를 크게 절감시킬 수 있는 장점을 가지고 있다.

유동층 반응기에서 미디어의 선정은 장치의 크기면이나, 재료비를 고려할 때 매우 중요한 인자로 작용한다. 입자의 크기는 유동화의 특성과 물질전달 및 부착표면적 등에 영향을 미친다. 더 큰 부착표면적을 제공하기 위하여 입자의 크기는 작을수록 효과적이지만, 너무 작은 입자는 운전하는데 문제가 되기 때문에 보통 0.1~0.7mm(100~700 μ m) 사이의 크기를 사용한다.

대부분의 미디어 물질은 부서진 돌, 모래, 활성탄 등을 사용하며, 크기와 형상은 규칙적이지 않다. 미디어의 크기분포에서 넓은 범위의 크기분포는 싸고 쉽게 이용할 수 있지만 조각면에 있어 몇가지 문제점이 생기는 반면, 매우 좁은 범위의 크기분포는 매우 비싸기 때문에 절충이 필요하다.

입자의 밀도는 유동층의 수력학에 영향을 미치며, 전력의 소비와 직접적인 관계가 있다. 입자의 밀도가 유동유체의 밀도에 가까워질수록 최소 유동화속도와 팽창시의 표면속도(superficial velocity)가 가까워지지만, 층의 수력학적 제어가 어렵게 된다. 반면 입자의 밀도가 클수록 최소유동화 속도와 팽창시의 표면속도의 차가 커지게 되므로, 많은 pumping cost를 요하게 된다.

유동층에서 입자는 지속적인 운동상태이고, 반응기 벽과 다른 입자와의 충돌을 견딜 수 있어야 한다. 만약 미디어가 깨지기 쉽다면, 입자는 부서지고 새로 형성된 입자는 다른 유동 특성(층분리, segregation)을 보이게 되어 유동층의 제어가 더욱 어렵게 된다.

Table 1. Studies of anaerobic fluidized bed treatment on the laboratory scale.

Substrate type	Reactor				Carrier			Operating Condition				η_{COD} (%)
	D(m)	H(m)	$V_R(I)$	V_{FB}/V_R (%)	Type	d(mm)	V_{sup} (m/h)	T(°C)	pH	τ (h)	COD (g/l)	
VFA	0.045	0.8	1.81	20-30	zeolite	0.32	9.5-12	35	7.2	6-48	1	—
phenol	0.032	0.75	0.6	12	GAC	20×40	4.5	35	7.0	43.2	2.4-3.3	71-91
molasses	0.075	0.5	1.65	100	sand	0.3-0.5	—	35	7.0	2-6	3.7-11.2	70-86
herring brine	0.31	4.76	359	—	sand	0.2-0.3	2-20	35	6.9	—	10-17.4	80-86
glucose	0.1	1.2	6.1	20	GAC	0.27	—	35	7.0	9-29	20	98.5
heat treat. liquor	0.15	1.8	50	—	sand	—	—	35	4.5-6.0	—	6.6	57-73
coal gasfi. waste	0.114	1.35	13.8	25	GAC	16×20	—	35	—	—	24.7	94
glucose	0.045	0.9	3.15	—	sand	0.6	—	37	7.0	—	11	—
corn starch	0.03	1.7	1.2	25	GAC	0.7	—	35	3.7-4.6	2-8	2-6	75
metal cutting fluid	0.076	0.8	3.63	30	GAC	12×20	—	36	—	0.36	3.3	60
molasses & phenol	0.033	0.33	0.43	150-200	sand	0.3	20	37	6.5-7.0	3-108	0.02-3	—
meat extract	0.05	2.0	4.0	20	sand	0.22	4.6-7.6	20-25	6.25	20.64	1.25	89.6

입자의 거칠기는 biofilm의 초기 형성과정에서 매우 중요하다. 박테리아는 입자주위에 필름형태로 결합을 형성한다. 만약 표면이 원만하다면, 다른 입자나 유동유체의 전단력에 의해 생성되는 충격에 견딜 수 있는 장소가 거의 없게 된다. 그러나 표면이 거칠다면, 미디어의 갈라진 틈사이에 부착되어진 미생물은 충격이나 전단력으로부터 보호받을 수 있다⁴⁾.

특히 GAC, 해포석(sepiolite), 경석(pumice), 고령토(kaolinite) 등과 같은 다공성 물질은 많은 내부 공극을 가지고 있기 때문에, 전단력으로부터 미생물을 보호할 수 있어 높은 농도의 미생물을 함유할 수 있다. 이와 같은 유동층 시스템을 이용한 기초 연구 자료를 개략적으로 정리하면, Table 1과 같다.

그러나 유동층 시스템의 운영시 입자의 선택, 순환유속(circulation velocity) 또는 상향유속(superficial velocity)의 결정 등이 매우 중요한 인자로 작용하고 있다. 위의 표에서 볼 때, 특히 순환 유속에 따른 층팽창이 매우 상

이한 것을 볼 수 있다. 순환유속은 유동층 반응기의 운영시 운전비와 매우 밀접한 관계를 가지고 있기 때문에 이의 확립은 매우 중요하다 하겠다.

따라서 본 연구에서는 (1)액·고 유동층 반응기에서 순환유속 증가에 따른 유동층의 공극률의 특성을 연구하기 위하여, 모래 입자를 사용하여 초기 용적 증가에 따른 층팽창의 특징 및 공극률 변화를 살펴보았으며, (2) 혐기성 유동층 생물막 반응기의 적합한 순환유속을 구하기 위하여 순환유속을 조절하여 층팽창을 증가시키면서 유기성 폐수의 처리 특성을 연구하였다. (3) 유동화에 의한 반응기 높이에 따른 특성을 연구하기 위하여, static상태와 fluidized 상태에서의 반응기 높이별 특성을 고찰하였다.

II. 실험장치 및 방법

1. 실험장치

혐기성 유동층 생물막 반응기 시스템은 내

경 9cm, 높이 150cm이었으며, 반응온도를 35℃로 유지하기 위하여, 반응기 외부에 내경 20cm, 높이 150cm인 외관을 설치하여 온도 조절기에 의해 가열된 물이 펌프에 의해 이 관을 통과하도록 하였으며, 시스템을 개략적으로 나타내면 Fig. 1과 같다.

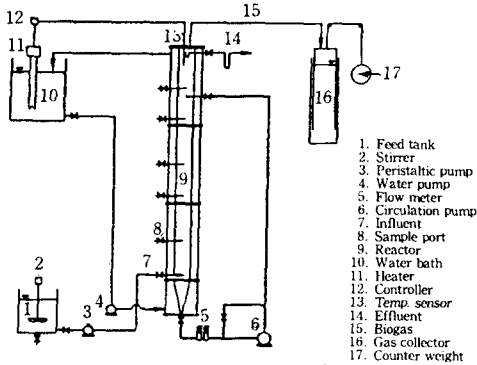


Fig. 1. Schematic diagram of the AFBBR.

분산을 위하여 반응기 하부에 20cm 높이의 콘을 제작하여 플랜지로 연결하였으며, 높이별 시료 채취를 위하여 25cm 간격으로 sample port를 설치하였다.

반응기 상부는 반응액과 생성된 biogas를 분리하기 위하여 U자관을 설치하였고, 반응기 상부에 온도 센서를 설치하여 온도 조절을 하였다.

반응기내에는 초기 biofilm형성과정에 매우 중요한 인자인 거칠기가 매우 좋고, 밀도가 모래보다 낮아 전력의 소비도 적으며, 미세 세공으로 인한 표면적이 매우 넓고, 전단력으로부터 미생물을 보호할 수 있는 갈라진 틈이나 홈을 가지고 있는 활성탄을 매디아로 사용하였다.

2. 모델 폐수

혐기성 유동층 생물막 반응기의 층팽창에 따른 영향만을 고찰하기 위하여, 사용된 기질

의 조성이 일정해야 한다. 이에 미생물의 영양 공급을 위해 탄소원으로 글루코오스 5,000mg/l를 사용하였으며, 무기 영양 공급을 위하여 다음과 같은 화합물(mg/l)을 첨가하였다: NH_4HCO_3 1,500; NaHCO_3 3,800; $\text{MgCl}_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$ 250; K_2HPO_4 280; $\text{CaCl}_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ 100; $\text{CoCl}_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$ 58; $\text{FeSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$ 58.

3. 분석 방법

COD, SS(suspended solids), VA(volatile acids)는 Standard Methods⁵⁾에 따라 3일에 한번씩 측정하였다. Biogas 성분(CH_4 , CO_2 , H_2 등)은 GC(HP5890-II)의 TCD detector를 사용하여 분석하였으며, 시료는 autosampler(HP 8673A)에 의해 GC에 주입되었다. 오븐, 주입구, 검출기의 온도는 각각 70℃, 80℃, 100℃이었으며, column은 porapack Q를 사용하였다. 가스성분은 표준가스(CH_4 61.8%, CO_2 38.2%)를 기준으로 정성 및 정량되었다.

4. 운전조건

4.1 액·고 유동층 반응기에서 순환유속 증가에 따른 층팽창 및 공극률의 변화

액·고 유동층 반응기의 수력학적 특성을 고찰하기 위하여 비중이 2.598g/cm³인 모래를 사용하여, 초기 용적 증가에 따른 층팽창 현상과, 순환 유속의 증가에 따른 공극률과의 관계를 알아보았다. 이때의 실험 조건을 Table 2에 나타내었다.

실험 방법은 모래 입자를 반응기에 채우고, 반응기 상부의 물을 순환시켜 층팽창에 의한 유동층 높이 h 를 측정하여, 공극률 $\epsilon (=1 - h_0/h)$ 를 계산하였다. 유량은 0.08-0.42m³/hr

(Flow cell, TB10417), 0.45-2.4m³/hr(Flow cell, TB1187)의 범위를 갖은 유량계를 이용하여 측정하였다.

Table 2. Conditions of the hydrodynamic in the AFBBR.

Media	volume (cm ³)	Initial height h(cm)	Theoretical height h ₀ (cm)	Flow rate (cm/sec)
Sand	1,000	29	20.0	0.35-3.71
	1,500	37	25.1	0.35-3.27
	2,000	45	29.1	0.35-2.62

4. 2 유동층 생물막 반응기에서 순환유속 증가에 따른 처리 특성

혐기성 유동층 반응기에서 순환 유속은 유기성 폐수의 처리효율 및 운전비를 좌우하기 때문에 최적의 순환 유속이 필요하다. 이에 순환 유속에 따른 최적의 운전효과를 얻기 위하여 Table 3과 같은 운전 조건하에서 순환유속 증가에 따른 처리 특성 및 유동층 반응기의 높이에 따른 특성을 살펴보았다.

Table 3. Operating conditions in the AFBBR.

Parameter	Data
pH	7.2-7.5
Hydraulic retention time(hr)	24
Influent Flow rate(ℓ/hr)	0.40
Influent COD(mg/ℓ)	5,000
Loading rate(kgCOD/m ³ ·day)	5.0
Circulation velocity(cm/sec)	0.0, 1.0, 1.5, 2.0

III. 결과 및 고찰

1. 액·고 유동층 반응기에서 순환유속 증가에 따른 총팽창 및 공극률의 변화
입자가 균일한 액·고 유동화 시스템은 유속

이 최소 유동화 속도에서부터 자유침강속도 (free settling velocity, terminal settling velocity)까지 증가할 때, 층이 부드럽게 팽창하는 특성을 가지고 있다. Richardson & Zaki는 유동화 속도에 따른 공극률의 특성을 $u/u_t = \epsilon^n$ 와 같은 관계식으로 나타내었다. 액·고 유동화 시스템에서 유속이 Intermediate 범위($2 < Re_p < 500$)일 때, 종말속도와 공극률은 다음과 같이 표현될 수 있다⁶⁾.

$$u_t = \frac{0.153^{0.71} d_p^{1.14} (\rho_s - \rho)^{0.71}}{\rho^{0.29} \mu^{0.43}}$$

$$\epsilon = k'' \left[\frac{u_0 \rho^{0.29} \mu^{0.43}}{g^{0.71} d_p^{1.14} (\rho_s - \rho)^{0.71}} \right]^d = k'' [K_i]^d$$

비중이 2.598g/cm³, 직경이 0.3625cm인 모래 입자의 초기 용량을 1000, 1500, 2000cm³으로 증가시키면서, 상향유속 증가에 따른 층 팽창률의 특성을 Fig. 2에 나타내었다. 미디어의 초기 용적이 크면 클수록 입자의 층팽창률은 더욱 급격하게 나타났다. 이는 초기 입자의 용적 및 상향유속이 증가할수록 공극률이 증가하므로 층팽창도 증가하는 것으로 사료된다.

일반적으로 액체 유동층 반응기는 초기 입자의 용적에 관계없이 항상 최소 유동화 속도는 일정하게 나타나고 있으며, 상향유속 증가에 따른 층팽창은 2차곡선으로 부드럽게 증가하고 있는 것을 관찰할 수 있었다.

상향유속과 총공극률과의 관계를 Fig. 3에 나타내었으며, Intermediate 영역에서 상향유속과 공극률과의 관계는 유속이 증가하면서 공극률은 증가하였으며, 반응기내 초기 입자의 용적이 증가할수록 공극률이 더욱 증가하였다.

상향 유속항을 포함하는 K_i와 공극률 ε와의 관계를 Non-linear approximation에 의해 구하면, 그 결과의 식은 Table 4와 같다.

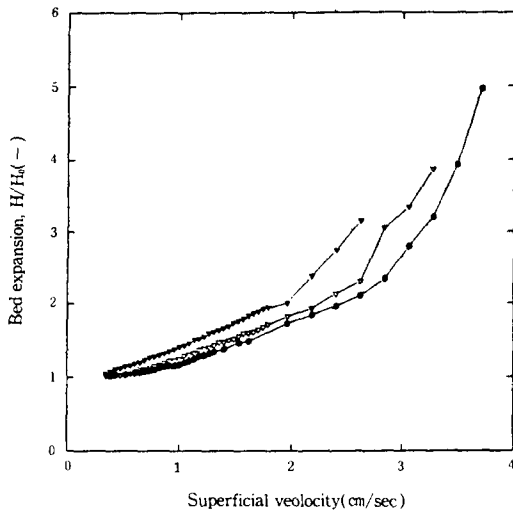


Fig. 2. Bed expansion with initial particle volume in an liquid- solid fluidized bed.

(●): 1000cm³, (▽): 1500cm³, (▼): 2000cm³

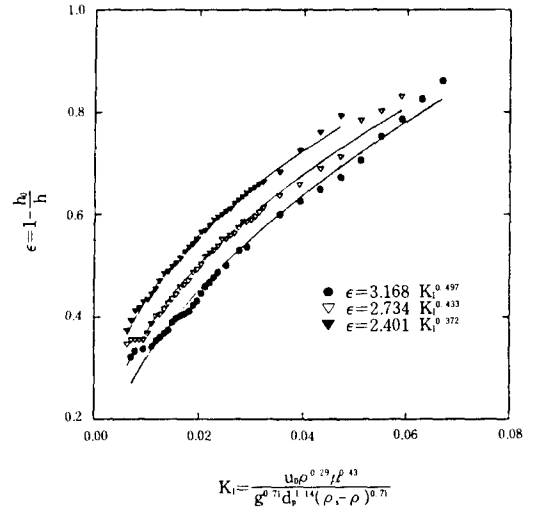


Fig. 3. Bed porosity vs. K_1 with initial particle volume in an liquid- solid fluidized bed.

(●): 1000cm³, (▽): 1500cm³, (▼): 2000cm³

Table 4. Comparison of the voidage with initial particle volume.

Initial particle volume(cm ³)	Voidage, ϵ
1,000	$\epsilon=3.168 K_1^{0.497}$
1,500	$\epsilon=2.734 K_1^{0.433}$
2,000	$\epsilon=2.401 K_1^{0.372}$

2. 유동층 생물막 반응기에서 순환유속 증가에 따른 처리 특성

유동층 생물막 반응기는 초기 startup이 매우 어렵기 때문에 초기 미생물 부착능이 매우 중요한 인자로 작용한다. 본 실험에서는 미생물 부착능 향상을 위해 유동층 생물막 반응기의 startup을 static-fluidized 방법을 택하였다. 이는 운전 초기 미생물이 채외 세포의 효소(extracellular enzyme)를 분비하여 매디아 내에 부착 시간을 좁과 동시에 번식할 수 있도록 하기 위함이다. 그러나 실제 유동층 반응기의 운전시 너무 작은 순환비에서는 bubble

slugging현상과 같은 문제점을 초래하는 반면, 너무 높은 순환비에서는 과도한 펌프 동력비 및 반응기의 크기를 요구하게 된다. 이에 유동층 반응기의 경제적인 운전을 위해서 적절한 순환유속, 총팽창이 요구된다.

이에 본 실험에서는 순환유속을 0.0cm/sec에서 2.0cm/sec까지 점차적으로 증가시키면서, 즉 총팽창을 증가시킴으로서 유동층 생물막 반응기의 처리 특성을 연구하였다. 이의 연구를 위해 반응기내의 매질의 양을 반응기 전체 부피의 40%로 충전하였다.

Fig. 4는 유동층 생물막 반응기에서 순환유속을 0.0cm/sec에서 2.0cm/sec까지 증가시키면서 생성되는 biogas를 운전시간별로 나타낸 것이다.

순환유속을 0.0cm/sec로 고정하여 총팽창을 시키지 않고, 초기 유동층 생물막 반응기의 startup을 static상태로 운전하였을 때의 생성

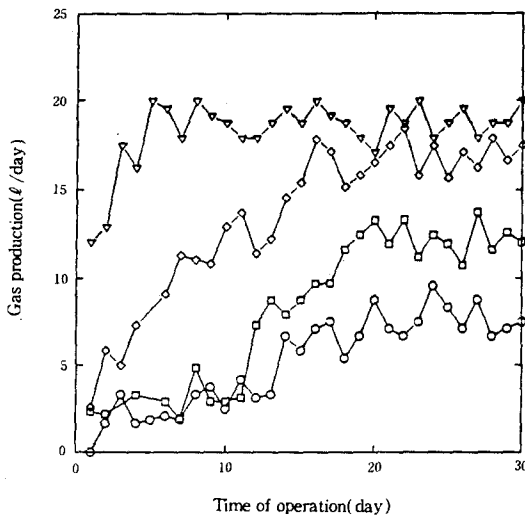


Fig. 4. Gas production with increasing circulation velocity in the AFBBR.

(○) : 0.0cm/sec, (□) : 1.0cm/sec,
(◇) : 1.5cm/sec, (▽) : 2.0cm/sec

된 biogas량의 특성은 다음과 같다. 운전이 시작되면서 중량천 하수 종말 처리장의 메탄 발효조의 슬러지는 glucose 폐수에 잘 적응되는 것을 볼 수 있었다⁷⁾. 약 18일정도에서 biogas 생성량은 일정해지기 시작했으나, 일별의 생산폭이 매우 심한 것을 볼 수 있었다. 반응기내의 미디어가 충전상태에 있기 때문에 미디어 사이에 포획되어 있거나 부유되어 있는 미생물에 의해 생성된 bubble이 다른 bubble과 합체되어 큰 bubble을 형성하였다. 이에 큰 bubble은 미디어 층을 상승시켜 bed rising 현상이 발생되어 반응기 운전상의 문제점을 초래하였다. 그러나 이 기간동안에 미디어인 활성탄의 홈이나 갈라진 틈사이에 많은 미생물이 부착되어 있는 것을 확인할 수 있었다⁸⁾.

Static상태에서 순환유속을 0.0cm/sec에서 1.0cm/sec로 증가시켜 층을 20%로 증가시켰을 때의 생성된 biogas의 특성은 다음과 같다.

반응기 상부의 액을 취하여 반응기 하부의 콘으로 주입하자 반응기내의 부유 미생물과 미디어에 약하게 부착되어 있는 미생물이 유출수와 함께 반응기 밖으로 유출되었다. 그러나 미디어의 홈이나 틈사이에 미생물이 계속해서 부착되어 있음을 SEM 사진으로 확인할 수 있었으며, 운전이 5일 이후부터는 반응기 밖으로 유출되는 부유미생물이 급격히 줄어들음을 확인할 수 있었다. 이는 미생물이 1.0cm/sec의 순환 유량에 적응하였으며, 이의 순환유속에 따른 전단력하에서도 탈리되지 않고 부착되어 존재함을 알 수 있었다. 또한 실험에 사용된 활성탄은 미생물이 전단력으로부터 보호받을 수 있는 많은 홈과 틈을 가지고 있다⁸⁾. 이와 같은 현상 때문에 순환유속을 증가시킨 후, 10일까지 biogas생성량은 매우 적지만, 그 이후부터는 점점 증가하기 시작하여, 운전 20일부터는 안정된 경향을 보여주고 있다.

순환유속을 1.0cm/sec에서 1.5cm/sec로 증가시켜 층을 50%로 증가시켰을 때의 biogas 생성량의 특성은 다음과 같다. 1.0cm/sec의 순환유속에 의해 생성되는 전단력으로부터 익숙해져 있는 미생물은 1.5cm/sec의 순환유속 증가시에도 운전 10일까지 급격한 미생물 탈리 및 유출 현상이 유발되었다. 그러나 1.5cm/sec의 유속하에서도 미생물은 미디어의 홈이나 틈사이에 존재함을 SEM 사진으로 확인할 수 있었으며, 미디어 전체적으로 biofilm형성은 되지 않았다.

생성되는 biogas는 1.0cm/sec의 유속에서와 같은 지체 현상을 보이지 않고, 13l/day에서 3l/day까지 감소하다가 서서히 증가하여 약 18일 정도에서 17l/day 정도로 일정한 양의 biogas가 생성됨을 알 수 있었다.

순환유속을 1.5cm/sec에서 2.0cm/sec로 증가시켜 총을 100%로 증가시켰을 때의 biogas 생성량의 특성은 다음과 같다. 2.0cm/sec의 유속에서는 빠른 유속으로 인하여 운전 7일에서는 100mg/l의 SS가 유출되었고, 운전 20일에서는 500mg/l의 SS가 유출됨을 볼 수 있었다. 이는 높은 순환유속으로 인해 media에 부착되어 있는 미생물이 탈리되고, 활성탄의 경도가 약하기 때문에 부서지는 현상에 기인하는 것으로 사료된다. 0.20cm/sec의 순환유속에서도 미생물은 media의 틈과 표면의 거친 홈 사이에서 성장하고 있음을 SEM 사진으로 확인할 수 있었다.

이와 같은 미생물 거동하에서 1.5cm/sec의 순환유속에 적응된 미생물은 2.0cm/sec로 증가시, 17 l/day의 biogas생성량에서 13 l/day로 감소하다가 운전 5일정도에서 18 l/day로 일정하게 biogas가 생성됨을 알 수 있었다.

결론적으로 순환유속이 0cm/sec에서 2.0cm/sec까지 증가하면서 생성되는 biogas량은 증가하는 경향을 보였지만, 0cm/sec에서 1.5cm/sec까지 증가시에는 정상상태에서의 biogas생성량이 직선적으로 증가하였지만, 1.5cm/sec에서 2.0cm/sec로 증가시에는 biogas의 생성량에 큰 차이가 나지 않음을 알 수 있었다. 즉 유동층 생물막 반응기의 운전시 과도한 순환유속은 미디어로부터 미생물의 과도한 탈리를 유발하고, 미디어의 부서짐을 유발하게 된다. 이에 본 실험에 사용된 유동층 생물막 반응기 시스템에서는 1.5cm/sec의 순환유속이 적절하였으며, 총팽창은 약 50%로 나타났다.

Fig. 5는 유동층 생물막 반응기에서 순환유속을 0.0cm/sec에서 0.20cm/sec까지 점차적으로

로 증가시키면서 생성되는 biogas내의 성분을 운전시간별로 나타낸 것이다.

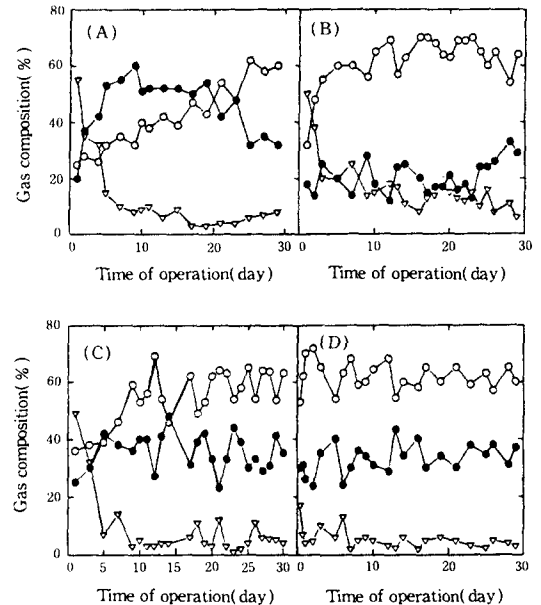


Fig. 5. Gas composition with increasing circulation velocity in the AFBBR.

(A): 0.0cm/sec, (B): 1.0cm/sec,
(C): 1.5cm/sec, (D): 2.0cm/sec

유동층 생물막 반응기의 startup에서 순환유속을 0.0cm/sec로 하였을 때(A), glucose 폐수에 적용될 때의 biogas의 조성을 나타낸 것이다. 운전을 시작하면서부터 미생물은 하수종말처리장에서 채취되어 본 반응기에 식종(seeding)된 후, glucose를 주입하였기 때문에 환경변화로 인하여 수소의 함량이 초기에 매우 높음을 알 수 있다⁹⁾. 그러나 운전 10일 정도에서는 미생물이 환경변화에 적응하여 수소의 함량이 안정화됨을 알 수 있다. 반면 이산화탄소의 함량은 수소의 함량과 반대로 초기 20% 정도에서 최소 60%까지 증가하다가 운전 30일 정도에서 약 36% 정도로 감소됨을

알 수 있다. 메탄의 함량은 25% 정도에서 계속적으로 증가하기 시작하여 약 58% 정도까지 증가됨을 보였다.

즉, 미생물이 새로운 환경에 적응시 초기에는 수소의 함량이 많지만 점점 감소하는 경향이이며, 메탄은 계속적으로 증가하는 추세이며, 이산화탄소는 수소의 함량에 반대의 경향을 나타내는 것을 볼 수 있다.

순환유속을 0.0cm/sec에서 1.0cm/sec로 증가시켰을 때(B)의 biogas의 조성의 특징은 다음과 같다. 순환유속을 증가시킴으로써 미생물은 환경변화에 매우 민감한 것을 수소의 함량을 통해서 알 수 있다. 초기 53%까지 증가하였으며, 운전 10일 이후부터 약간씩 감소하여 약 12% 정도가 됨을 알 수 있었다. 반면, 메탄의 함량은 운전초기 환경변화로 인해 60%에서 30%까지 감소하였지만, 5일 이후부터는 약 63% 정도로 안정화됨을 알 수 있다. 즉 미생물이 1.0cm/sec의 전단력에 순응되었음을 알 수 있다.

순환유속을 1.0cm/sec에서 1.5cm/sec로 증가시켰을 때(C)의 biogas의 함량의 특징은 다음과 같다. 1.0cm/sec의 전단력에 순응된 미생물은 다시 1.5cm/sec의 전단력하에서 수소의 함량은 50%까지 증가하다가 5일 정도에서 7% 정도로 떨어져 순응기간이 1.0cm/sec에서 보다 빠름을 알 수 있었다. 메탄의 함량도 63%에서 25% 정도로 감소하다가 서서히 증가하여 10일 정도에서 약 60%로 안정화됨을 알 수 있다.

순환유속을 1.5cm/sec에서 2.0cm/sec로 증가시켰을 때(D)의 biogas의 함량의 특징은 다음과 같다. 1.5cm/sec의 순환유속에 적응된 미생물은 2.0cm/sec로 증가시, 수소의 함량면

에서 볼 때, 1일 이내에 정상상태로 다시 회복됨을 알 수 있었다. 순환유속이 점점 빨라지면서 미생물은 전단력에 더욱 빨리 익숙해짐을 알 수 있었다.

결론적으로 혐기성 소화에서 glucose를 기질로 사용하였을 경우, 생성되는 biogas는 메탄과 이산화탄소이며, 함량은 각각 50%로 나타난다¹⁰⁾. 그러나 실제적인 혐기성 소화시 생성되는 biogas조성은 메탄과 이산화탄소 이외에 소량의 황화수소, 암모니아, 수소 등을 포함하고 있다. 지금까지의 연구에 의하면 혐기성 소화시 biogas의 조성은 메탄가스 60% 정도, 이산화탄소 35%, 그 외 가스가 5% 정도를 차지하고 있음을 알 수 있다. 그러나 시스템의 초기 가동시와 운전 조건의 변화 등 반응기의 환경이 변화하게 되면, biogas 성분에서 메탄의 함량은 거의 일정하며, 수소 함량의 변화가 매우 큼을 알 수 있다. 수소의 함량이 높게 되면, 반대로 이산화탄소의 함량이 떨어지게 된다. 그러나 미생물이 변화된 환경변화에 적응하여 시스템이 안정화되면, 수소의 함량은 급격히 떨어져 약 5% 정도 생성되고, 이산화탄소도 마찬가지로 약 35% 정도 된다.

순환유속이 0.0cm/sec에서 2.0cm/sec까지 증가하면서 생성되는 biogas내의 함량은 전반적으로 메탄의 함량이 약 60%, 이산화탄소의 함량이 약 35% 정도, 수소의 함량이 약 5% 이내임을 알 수 있었다.

재생에너지 측면에서 볼 때, 메탄의 함량이 40% 이상이 되면 에너지로 이용이 가능한 것으로 보고하고 있으며, 실제 혐기성 공정에서 생성된 biogas는 소화조의 가온과 전기를 생산하여 펌프의 동력 등 전력이 소모되는 공정에 이용이 되고 있다. 따라서 본 실험에서도

생성된 biogas는 대체 에너지로의 이용이 가능하였으며, 1.5cm/sec의 순환유속에서 일일 생성되는 메탄가스를 에너지로 환산하면 총 55kcal/day이다.

Fig. 6은 유동층 생물막 반응기에서 순환유속을 0.0cm/sec에서 2.0cm/sec까지 점차적으로 증가시키면서 미제거된 glucose를 COD로 환산한 후, COD제거효율을 운전시간별로 나타낸 것이다.

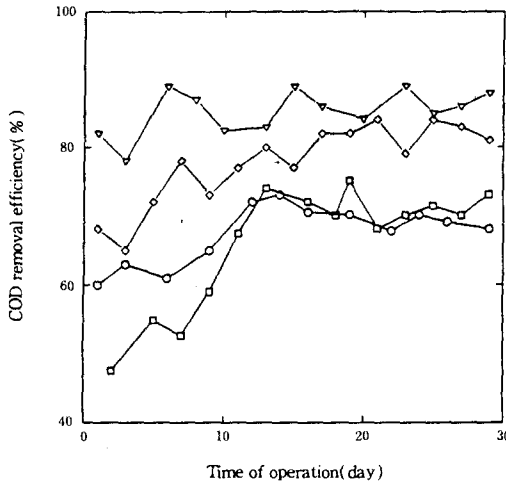


Fig. 6. COD removal efficiency with increasing circulation velocity in the AFBBR.

(○): 0.0cm/sec, (□): 1.0cm/sec,
(◇): 1.5cm/sec, (▽): 2.0cm/sec

유동층 생물막 반응기의 startup에서 미디어 층을 static상태로 한 뒤, glucose 폐수에 적응될 때의 COD제거효율의 특징은 다음과 같다. 운전 1일부터 13일까지 가스 생산율이 약 3l/day였으며, 15일 이후에는 약 8l/day였다. 이와 같은 추세를 따라 COD제거효율도 13일까지 60%에서 약간씩 증가하다가 이후 67% 정도로 일정해짐을 알 수 있다. COD유발 물질인 glucose의 분해로 가스가 생성되기 때

문에 COD제거효율과 가스 생산율은 같은 추세를 보이고 있음을 알 수 있다.

Static상태에서 순환유속을 0.0cm/sec에서 1.0cm/sec로 증가시켰을 때의 COD제거효율의 특징은 다음과 같다. 순환 유속을 증가시킴으로서 가스 생산량이 13일까지 3l/day정도가 생산되었다. 이때 COD제거효율도 층을 팽창시킴으로서 67%에서 50%까지 감소하였다가 환경에 적응되어 가면서 운전 13일정도에서 약 69%의 COD제거효율을 보이고 있음을 알 수 있다.

순환유속을 1.0cm/sec에서 1.5cm/sec로 증가시켰을 때의 COD제거율의 특징은 다음과 같다. 1.0cm/sec에서와 마찬가지로 COD제거효율이 69%에서 65%까지 감소하다가 10일 이후부터 약 82% 정도로 안정화됨을 알 수 있었다. 그러나 전반적으로 순환기간이 0.09cm/sec에서보다 짧음을 알 수 있었다.

순환유속을 1.5cm/sec에서 2.0cm/sec로 증가시켰을 때의 COD제거효율의 특징은 다음과 같다. 1.5cm/sec의 순환유속에 적응된 미생물은 2.0cm/sec로 증가시, COD제거효율이 82%에서 78%까지 감소하다가 5일정도 이후부터 안정화되었다. 안정화되는데 소요되는 시간이 가장 적었다. 이는 static상태에서 fluidized될 때의 적응기간이 가장 길었지만, fluidized 상태에서 유속을 증가시킬 때는 적응기간이 짧은 것을 알 수 있다. 일단 액체가 순환되면, 미생물은 그 순환유속에 익숙해지고 전 단력으로부터 보호받기 위해 미디어의 틈에 그룹을 지어 성장하기 때문으로 사료된다.

결론적으로 순환유속이 0.0cm/sec에서 2.0cm/sec까지 증가하면서 미생물은 환경변화에 잘 적응하였으며, 초기 static 상태에서 flui-

dized 상태로 될 때, 많은 시간을 소요하며, 그 이후의 순환유속의 증가에 순응되는 시간은 점점 짧아짐을 알 수 있었다. 전반적으로 순환유속이 증가하면서, 즉 층팽창이 증가되면서 COD 제거효율은 증가하였다. 그러나 순환유속이 1.0cm/sec에서 1.5cm/sec로 증가할 때 10% 정도로 가장 많이 증가하였으며, 나머지는 약 2~3%의 증가만을 보였다. 최대 COD제거효율은 순환유속이 2.0cm/sec, 층팽창 100%일 때 87%이었지만, 순환유속이 1.5cm/sec일 때와 5%의 차이밖에 나지 않았다. 즉 유동층 생물막 반응기의 가동시 동력비와 가장 밀접한 관계를 가지고 있는 순환유속은 본 실험 시스템에 있어서 50%가 가장 적절한 것으로 사료된다.

Fig. 7은 유동층 생물막 반응기에서 순환유속을 0.0cm/sec에서 2.0cm/sec까지 점차적으로 증가시키면서 유출되는 VA(volatile acids)를 나타낸 것이다. VA는 휘발유기산으로 혐기성 소화과정중에서 생성되는 대표적인 중간물질이다¹¹⁾. Complex organics는 산생성균에 의해 유기산으로 생성되며, 생성된 유기산은 다시 메탄생성균에 의해 메탄과 이산화탄소로 다시 분해하게 된다. 그러나 시스템의 환경변화로 인하여 유기산이 축적되면, pH가 중성이하로 떨어지게 되어 메탄생성균의 활동을 저해(inhibition)하게 된다. 일반적으로 혐기성 반응기의 pH는 유기산, 알칼리도 및 산도 유발물질 등의 상호작용에 의하여 결정되며, pH는 약 7.2정도로 유지된다.

유동층 생물막 반응기의 startup에서 메디아 층을 static상태로 한 뒤, glucose 폐수에 적용될 때의 유출 VA의 특징은 다음과 같다. 미생물의 환경변화로 인하여 초기 유기산의 농도가 1200mg/l 까지 유출되었으나, 7일정도

에서 약 600mg/l로 거의 일정하게 유지됨을 알 수 있었다. 유기산의 농도도 수소가스의 농도와 같이 환경변화에 따라 유출농도가 변함을 알 수 있다.

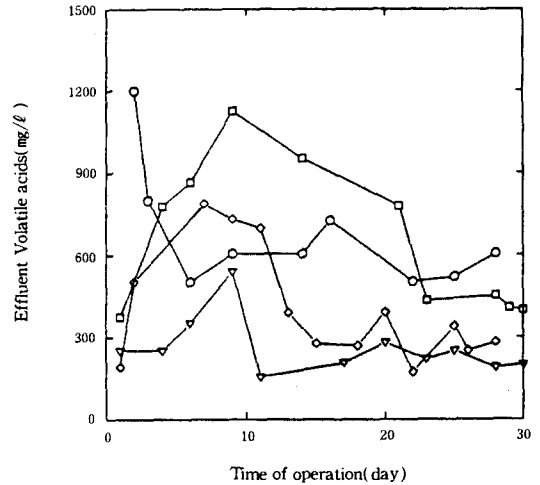


Fig. 7. Effluent VA with increasing circulation velocity in the AFBBR.

(○): 0.0cm/sec, (□): 1.0cm/sec,
(◇): 1.5cm/sec, (▽): 2.0cm/sec

순환유속을 0.0cm/sec에서 1.0cm/sec로 증가시켰을 때의 유출 VA의 특징은 다음과 같다. Static상태에서 살던 미생물에게 fluidized 하기 위하여 순환유속을 증가시켰을 때 미생물의 정상적인 대사작용이 일어나지 않으나 시간이 지나면서 다시 환경에 적응하는 것을 볼 수 있다. 순환유속을 증가시킴으로서 10일까지 1200mg/l 까지 계속 증가하다가 22일까지 630mg/l로 안정화되었다. 즉 환경 변화로 인하여 안정화되는데 20여일이 소요됨을 알 수 있었다.

순환유속을 1.0cm/sec에서 1.5cm/sec로 증가시켰을 때의 유출 VA의 특징은 다음과 같다. 1.0cm/sec에서와 마찬가지로 유출 유기산

의 농도가 순간적으로 증가하는 것을 볼 수 있다. 유출 VA는 6일까지 800mg/l 까지 증가하다가 13일까지 다시 감소하여 370mg/l로 안정화되었다. 1.0cm/sec의 순환유속에서보다 안정화되는데 소요되는 시간이 10여일 정도 짧아진 것을 볼 수 있다. 이는 1.0cm/sec의 순환 유속에서 생성되는 전단력에 어느 정도 순응되었기 때문으로 사료된다.

순환유속을 1.5cm/sec에서 2.0cm/sec로 증가시켰을 때의 유출 VA를 나타낸 것이다. 1.5cm/sec의 순환유속에 적응된 미생물은 2.0cm/sec로 증가시, 유출 VA는 5일까지 600mg/l로 증가하다가 9일까지 다시 감소하여 200mg/l로 안정화됨을 알 수 있었다. 1.5cm/sec에서보다 안정화되는데 소요되는 시간이 3일정도 짧아진 것을 볼 수 있다. 일단 초기 유동화 상태에서 미생물이 적응되면, 그 이후의 유속 증가에 대한 적응은 점점 짧아짐을 알 수 있었다.

결론적으로 상향유속이 0.0cm/sec에서 2.0cm/sec까지 증가하면서 미생물은 환경변화에 잘 적응하였으며, 초기 static 상태에서 fluidized 상태로 될 때, 안정화되는데 짧은 시간이 소요되며, 그 이후의 상향유속의 증가에 순응되는 시간은 점점 짧아짐을 알 수 있었다. 전반적으로 순환유속이 증가하면서, 즉 총팽창이 증가되면서 유출 VA는 감소하였다. 그러나 순환유속이 1.5cm/sec에서 가장 적은 유기산이 유출됨을 알 수 있었다. 그러나 정상상태에서 볼 때, 전체의 순환유속에서 안정된 혐기성 소화가 일어나고 있음을 알 수 있었다.

3. 유동층 생물막 반응기의 높이별 특성

유동층 반응기는 반응기 상부의 액을 취하여 반응기 하부로 다시 분산시키기 때문에, 유

입되는 폐수와 순환수와의 순간적인 혼합이 타 반응기에 비해 매우 뛰어나다. 이와 같은 장점 때문에 높은 부하에서도 처리가 가능하다. 유동층 생물막 반응기의 static-fluidized 과정에서 유동층 반응기에 대해 높이별 특성을 살펴보고자 하였다.

3.1 유동층 반응기 높이에 따른 COD 분포

Fig. 8은 유동층 생물막 반응기에서 순환유속을 0.0cm/sec에서 2.0cm/sec까지 점차적으로 증가시키면서 유동층 반응기의 높이별 COD를 나타낸 것이다.

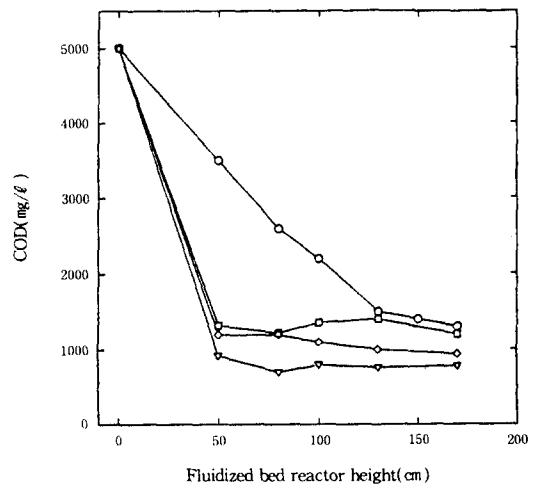


Fig. 8. COD profiles with increasing circulation velocity in the fluidized bed reactor height.

(○): 0.0cm/sec, (□): 1.0cm/sec,
(◇): 1.5cm/sec, (▽): 2.0cm/sec

Static상태에서 반응기 높이별 COD는 고정상 반응기에서 볼 수 있는 COD 분포를 볼 수 있다¹²⁾. 반응기 하부로 유입된 기질은 반응기 상하의 혼합이 없이 유입속도에 따라 층을 통과하면서 분해되어 유출되는 것을 볼 수 있다. 그러나 유동화 상태에서 상부의 액을 취하여

반응기 하부의 콘을 통해 액체를 순환시키기 때문에 유입된 기질은 급속히 혼합되어 static 상태에서와 같은 COD농도 분포를 찾아볼 수 없었다. 일반적인 UASBR에서 하부의 슬러지층에서 매우 높은 부하를 받게 되고 상부에서는 부하를 적게 받기 때문에 반응기의 전반적으로 미생물의 처리 효율이 다르다. 그러나 유동층 반응기는 균일한 혼합으로 인하여 반응기내의 미생물이 상대적으로 저부하상태에서 유기물을 처리할 수 있기 때문에 처리효율을 상승시킬 수 있는 장점이 있다.

3.2 유동층 반응기 높이에 따른 유기산 농도 분포

Fig. 9는 유동층 생물막 반응기에서 순환유속을 0.0cm/sec에서 2.0cm/sec까지 점차적으로 증가시키면서 유동층 반응기의 높이별 유기산 농도 분포를 나타낸 것이다.

COD 농도 분포와 비슷한 경향을 보였으며, static 상태에서 유기산의 농도가 100cm의 높이까지 계속 감소하였으며, 그 이후부터는 일정하였다. 이는 미생물 층이 반응기 높이 100cm까지 있었기 때문이며, 그 이상의 높이에서는 약간의 미생물만이 부유하기 때문에 유기산의 농도가 거의 일정한 것으로 사료된다. 그러나 액체가 순환되면서 유기산 농도 분포는 사라지게 되고, 반응기 전반적으로 균일한 유기산 농도를 찾아볼 수 있었다. 즉 유기산 자체가 COD를 유발하기 때문에 VA분포 자체는 COD분포와 비슷한 경향을 띄는 것으로 사료된다.

3.3 유동층 반응기 높이에 따른 부유고형물질 분포

Fig. 10은 유동층 생물막 반응기에서 순환

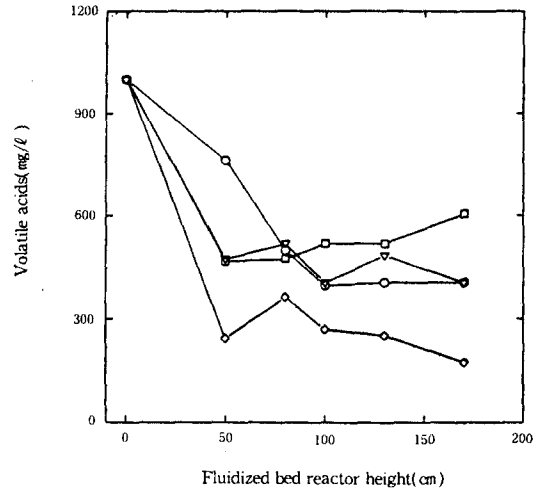


Fig. 9. VA profiles with increasing circulation velocity in the fluidized bed reactor height.

(○): 0.0cm/sec, (□): 1.0cm/sec,
(◇): 1.5cm/sec, (▽): 2.0cm/sec

유속을 0.0cm/sec에서 2.0cm/sec까지 점차적으로 증가시키면서 유동층 반응기의 높이별 부유고형물(mixed liquid suspended solids, MLSS)를 나타낸 것이다.

부유고형물질 분포와 휘발성 고형물질 분포(VSS)는 비슷한 경향을 보였으며, static 상태에서 반응기내의 부유고형물 분포는 반응기 높이 75cm까지는 GAC 층이기 때문에 2100 mg/l로 일정하였지만, 높이 100cm에서는 슬러지층이 형성되어 5400mg/l의 높은 고형물질을 보였다. 그러나 그 이상의 높이에서는 free board로서 생성된 biogas 기포가 sludge bed를 통과하면서 bed위의 미생물과 함께 반응기 위로 올라가기 때문에 대부분의 미생물이 부유상태로 존재하고 있다.

그러나 유동화를 시작하면서 반응기내의 부유상태의 미생물과 매디아 사이의 부유상태의 미생물은 모두 유출되어 반응기내의 미생

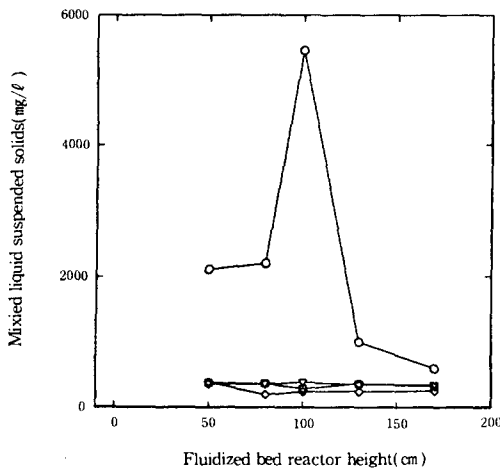


Fig. 10. MLSS profiles with increasing circulation velocity in the fluidized bed reactor height.

(○) : 0.0cm/sec, (□) : 1.0cm/sec,
(◇) : 1.5cm/sec, (▽) : 2.0cm/sec

물은 부착 미생물만이 존재하게 되었다. 유동화를 시작하면서부터 액체내의 부유고형물질 농도는 약 250~300mg/l 정도였다. 이는 유입되는 폐수내의 SS도 약 400mg/l 이기 때문에 유입된 폐수내의 부유 고형물에 의해서 유발된 SS인 것으로 사료된다.

IV. 결 론

혐기성 유동층 생물막 반응기에서 순환 유속의 증가에 따른 층팽창 및 공극률 변화와 유기물 처리 특성, 유동층 반응기 높이에 따른 특성을 살펴본 결과 다음과 같은 결론을 얻었다.

1. 액·고 유동층 반응기에서 층팽창은 부드럽게 증가하였고, 매디아의 초기 용적이 크면 클수록 입자의 층팽창을 및 공극률은 증가하였다.
2. 순환유속이 증가하면서 생성되는 biogas량

은 증가하는 경향을 보였으며, biogas는 약 60%의 메탄, 35%의 이산화탄소, 약 5% 이내의 수소를 함유하고 있었다. 이에 생성된 biogas는 대체 에너지로의 이용이 가능하였으며, 순환유속이 1.5cm/sec일 때 일일 생성되는 메탄가스를 에너지로 환산하면 총 55kcal/day이다.

3. 순환유속이 증가하면서 COD제거효율은 증가하여, 제거된 COD에 대해 생성된 메탄 가스량은 순환유속이 1.5cm/sec일 때 0.03 m³CH₄/kgCOD_{removed} 가장 높았다.
4. 유동화는 반응기 높이에 따른 COD, VA, MLSS를 균일한 농도로 유지시켰다. 유동화 상태에서 부유된 미생물은 거의 없었으며, 대부분의 미생물은 매디아의 흡이나 갈라진 틈사이에서 성장하고 있었다.
5. 미생물은 초기 static 상태에서 fluidized 상태로의 환경변화에서 가장 긴 적응기간을 필요로 하였으며, 그 이후의 순환 유속의 증가에서는 순응기간이 점점 짧아졌다. 결론적으로 혐기성 유동층 반응기는 유기성 폐수의 처리에 매우 적합하였으며, 운전조건중 순환유속을 1.5cm/sec로 하였을 때, 에너지 측면에서 가장 경제적임을 알 수 있었다.

참 고 문 헌

1. M. S. Switzenbaum and W. J. Jewell: Anaerobic attached-film expanded-bed reactor treatment, J.WPCF, 52, 1953, 1980.
2. 김동석, 송승구: 유동층 생물막 반응기의 폐수처리에의 응용, Chem. Ind. & Technol., Vol.13, No.1, 1995.

3. J. J. Heijne, A. Mulder, W. Enger and F. Hoeks : Review on the application of anaerobic fluidized bed reactors in wastewater treatment, *The Chemical Engineering Journal*, 41, B37- B50, 1989.
4. Akito Matsumoto and Tstsuya Noike : Effects of substrate composition and loading rate on methanogenic process in anaerobic fluidized bed systems, *Wat.Sci. Tech.*, Vol.23, Kyoto, 1311-1317, 1991.
5. APHA-AWWA : Standard methods for the examinatin of water and wastewater, 7th American Public Health Association, 1989.
6. E. W. Lewis and Ernest W. Bowerman : Fluidization of solid particle in liquids, *Chem. Eng.Prog.*, Vol.48, No. 12, 603-610, 1952.
7. 안재동, 김재우, 장인용 : 혐기성 고정상 반응기와 슬러지 Bed반응기에서 혼합-합성 폐수처리에 관한 연구, *한국환경위생학회지*, Vol.19, No.4, 38- 43, 1993.
8. P. Fox, M. T. Suidan and J. T. Bandy : A comparison of media types in acetate fed expanded-bed anaerobic reactors, *Wat.Res.*, 24, 7, 827, 1990.
9. S. R. Harper and M. T. Suidan : Anaerobic treatment kinetic, *Wat.Res.*, Vol.24, No.8., 61-78, 1991.
10. A. M. Buswell and H. F. Mueller : Mechanisms of methane fermentation, *Ind.Eng.Chem.*, 44, 550, 1952.
11. McCarty, P. L. : Anaerobic waste treatment fundamentals, *Pub.Works*, 95, 123-126, 1964.
12. 안재동, 강동수, 장인용 : 혐기성 고정상 생물 반응기에서 담체의 종류에 따른 Biogas 생성 및 미생물 부착 특성에 관한 연구, *한국환경위생학회지*, Vol.18, No.2, 75-81, 1992.