

유출수 반송이 UASB 반응조 운전효율에 미치는 영향

이 현 모 · 양 병 수

부산수산대학교 환경공학과
(1993년 10월 23일 접수)

Effects of effluent recycling on the operating performance of UASB reactor

Heon-Mo Lee and Byung-Soo Yang

Department of Environmental Engineering, National Fisheries University of Pusan
(Manuscript received 23 October 1993)

Abstract

This study was aimed to evaluate the effects of effluent recycling on the UASB reactor performances at the various organic loading rates and influent substrate concentrations. The organic removal efficiency of the reactors operated with effluent recycle were above 85%. However, the efficiencies of the reactors operated without the recycle were below 40% even though the effort to increase the efficiencies was made by changing the influent substrate concentrations and the organic loading rates, and introducing the effluent recycle at the final stage of the experiment. It was realized that the certain amount of effluent recycling from the start-up stage in UASB reactors seemed to be necessary to provide the effective contact chances between the substrate and granular sludge for better performances of the UASB process.

1. 서 론

혐기성 처리공정을 최적화하기 위한 여러형태의 반응조가 개발되어 왔으며 이들 시스템 중의 하나가 UASB(upflow anaerobic sludge blanket)장치이다. UASB 반응조는 넓은 범위의 온도 조건 하에서 여러가지 다양한 유기물 농도를 갖는 여러 종류의 유기성 폐수에 적용되어지는 비교적 효율이 높은 혐기성 공정으로 보고되고 있다(Letting *et al.*, 1980, 1983a, 1984, 1985; Wang *et al.*, 1985). UASB 공정의 이용으로 혐기성 처리는 저농도 및 고농도의 여러가지 형태의 폐수 및 일부 불용성 폐수까지 처리할 수 있다는 가능성이 대규모의 처리장 뿐만 아니라 소형 및 대형 Pilot

plant UASB 반응조 연구에서 입증되고 있음은 물론 최근 매우 만족스러운 처리 결과가 보고되는등 UASB 공법은 효율적인 혐기성 처리 공법으로 평가되고 있다. UASB 공정의 주요 잇점은 반응조 내에서 입상슬러지가 매디아 역할을 하기 때문에 부착 매디아가 필요치 않으나 입상슬러지의 형성이 까다롭다는 점이 중요한 결점으로 알려지고 있다. UASB 반응조에서 입상슬러지가 형성되기까지 초기운전이 다소 까다롭고 소요시간이 다소 길지만 일단 형성된 입상슬러지는 대단히 안정하며 높은 유기물 부하에서도 양호한 처리효율을 갖는 것으로 알려져 있다(Lettinga *et al.*, 1983a). 일반적으로 UASB 반응조 운전시 미생물과 기질간의 접촉효율을 좋게하여 기질제거효율을 증가시키기

위하여 유출수 반송에 의한 슬러지층을 유동시키며 이때 입상슬러지의 파쇄로 인한 슬러지의 유실을 감소시키기 위하여 상향유속을 1 m/hr이하로 운전하도록 권하고있다(Zeeuw, 1988). 그러나 Lettinga *et al.*(1983b)은 UASB 반응조에서 유기물 제거로 생성된 소화가스에 의한 가스혼합으로 인하여 슬러지층의 팽창이 항시 일어나기 때문에 슬러지층의 유동화를 위한 유출수 반송은 필요치 않다고 보고한바 있다. 또한 UASB 공정에서 유출수 반송은 유입 유기물농도가 높거나 유독성 물질의 유입시 이들을 희석시켜 유입시키거나 소요되는 영양소나 알칼리도를 줄이는 것 외에는 별다른 이득이 없는 것으로 보고되고 있다(Lettinga *et al.*, 1980, 1983b). Man *et al.*(1988)은 휘발성산 용액을 UASB 공정으로 처리하면서 유출수 순환의 영향을 평가한 결과 유출수 순환이 기질 제거 효율에 크게 영향을 미치지 않는다고 보고하였다. Lettinga *et al.*(1983a, 1983b)은 UASB 반응조에서 유출수 반송은 특히 저농도 폐수에 있어서는 기질 농도를 저하시키며 그 결과 미생물의 비기질 이용 속도를 감소시키게 되며 또한 입상슬러지의 크기, 모양, 밀도등이 다르기 때문에 슬러지층의 유동화를 완전하게 이루기 어려우므로 유입수 분배장치만 잘만들게 되면 유출수 반송은 필요없다고 보고하는등 유출수 반송의 필요성을 제시하지 않았다. 특히 유출수 반송에 소요되는 동력비를 고려할때 유출수 반송이 UASB 반응조 운전전에 꼭 필요한지에 대한 의문점이 제시되며 무반송이 UASB 반응조 운전효율에 어떠한 영향을 미치는가에 대한 연구가 필요하나 이에 대한 체계적인 연구는 비교적 미흡한 상태에 있다.

따라서 본 연구에서는 UASB 반응조 운전시 유출수 무반송이 운전효율에 미치는 영향을 검토하고 나아가 유출수를 반송시킨 반응조와의 병행실험을 통하여 유출수 반송의 유무에 따른 운전특성을 비교 평가하고자 한다.

2. 실험장치 및 방법

2.1 실험장치

유출수 무반송시 유입기질농도, 유기물부하에

따른 반응조 운전특성을 평가하고 유출수 반송시와 비교 검토하기 위하여 UASB 반응조 4개를 실험실 규모로 제작하였다. 실험에 사용된 실험장치는 Fig. 1과 같이 기체-액체-고체 분리장치를 설치한 UASB 반응조 형태로 내경 6.4 cm 아크릴 원통을 사용하였으며 동일 유기물부하 또는 부하를 다르게 하면서도 전체 수리학적 체류시간(HRT)을 동일하게 하기 위하여 반응조 높이를 다르게 제작하였다. 반응조 하부는 유입된 폐수가 일정 방향으로 흐르는 것을 방지하기 위하여 반응조 하부 폐수 유입관의 밑 부분에 여러개의 구멍을 일정 간격으로 뚫어 유입수가 고루 분배되도록 하였다. 반응조 하부에서 부상하는 분산형태의 미생물과 입상형태의 슬러지를 반응조로 부터 유실되는 것을 막아주고 생성된 소화가스를 포집하기 위한 기체-액체-고체 분리장치는 반응조 상단에서 8 cm 아래에 설치하였다. 유출수가 유출되는 부분은 역사이폰 형식으로 제작하여 반응조내로의 공기유입을 방지하였다. 실험에 이용된 각 반응조의 주요 특성은 Table 1과 같다.

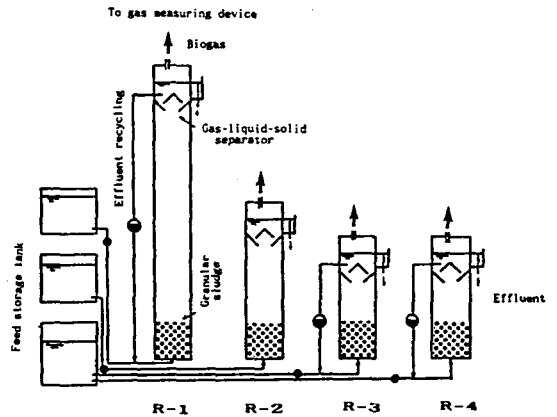


Fig. 1. Schematic diagram of UASB reactor Used in experiment.

Table 1. Specification of reactors used in this experiment

Reactor No	Reactor height (m)	Reactor diameter (cm)	Effective volume (ℓ)
R-1	1.60	6.4	4.8
R-2	0.85	6.4	2.4
R-3	0.60	6.4	1.6
R-4	0.60	6.4	1.6

2.2 실험방법

2.2.1 반응조 운전방법

본 실험에 사용된 식중 슬러지는 실제 UASB 공법으로 식품가공 폐수를 처리하고 있는 실규모 UASB 소화조 하부에서 채취하여 실험실 규모의 반응조에서 자당 및 탈지분유 혼합폐수를 기질로 하여 5 개월간 운전한 슬러지를 실험에 이용하였다. 동일량의 미생물을 4 개의 반응조에 식중하였 으며 반응조에 주입한 초기 미생물량은 40.7 g VSS였다. 유입수는 미량유량조절펌프(Watson marlow co., 502 S)를 사용하여 반응조내에 상향 류식으로 주입하였으며 반응조내 일정 상향유속을 유지시키기 위한 유출수 반송은 유량조절펌프를 이용하여 유입수와 함께 반응조 하부에 유입되도록 하였다. 반응조는 35 °C 로 유지되는 항온실에 두어 항상 일정한 온도가 유지되도록 한 상태에서 운전하였다. 본 연구에서는 유출수를 반송시키지 않은 상태에서 동일 HRT에서 유입기질농도 및 유기물부하 변화에 따른 운전효율을 평가하기 위하여 4 단계의 연속 실험으로 나누어 수행하였다.

1 단계 실험으로 동일 HRT 및 동일 유기물부하에서 유입 유기물농도에 따른 영향을 평가하기 위하여 무반송으로 운전되는 R-1, R-2 및 R-3 반응조에 유입수농도를 각각 3,000, 6,000 및 9,000

mg COD/ℓ 로 유입하였고 이때 각 반응조의 HRT 는 10 시간으로 하여 운전하였다.

2 단계 실험은 1 단계 실험의 연속실험으로 1 단계 실험이 끝난후 각각의 유입 유기물농도를 50 %로 감소시켜 낮은 농도에서 즉 유기물부하를 50 % 줄였을때 반응조 운전효율을 검토하기 위하여 R-1 반응조에는 1,500 mg COD/ℓ 의 유입수, R-2 및 R-3 반응조에는 각각 3,000 및 4,500 mg COD/ℓ 의 유입수를 반응조에 주입하여 실험을 수행하였다.

3 단계 실험에서는 무반송시 동일 HRT 및 동일 유기물농도에서 유기물부하 변화에 따른 반응조 운전효율의 영향을 검토하기 위하여 R-1, R-2 및 R-3 반응조 공히 유입 유기물농도를 1,500 mg COD/ℓ 로 하여 유기물 부하를 각각 17.28, 8.64 및 5.76 g COD/day가 되도록 운전하였다.

끝으로 4 단계 실험에서는 유기물과 미생물간의 접촉효율을 증진시켜 무반송후 유출수 반송의 영향을 평가하기 위하여 3 단계의 실험과 동일한 조건하에서 R-1 및 R-3 반응조에 대하여 상향유속이 2 m/hr가 되게 정량펌프를 이용하여 유출수를 반송시키고 R-2 반응조는 유출수 반송없이 대조 반응조로 유입수만을 주입시키면서 운전하여 각 반응조의 운전효율을 비교 검토하였다.

한편 R-3 반응조의 비교 반응조로서 동일 반

Table 2. Operation mode of each reactor used in this study

Operating time (days)	Stage	Reactor	Upflow velocity (m/hr)	Influent concentration (mg/ℓ)	HRT (hr)	Organic loading rate (g COD/day)	Effluent recirculation
0 - 30	I	R-1	0.15	3,000	10	34.56	without
		R-2	0.07	6,000	10	34.56	without
		R-3	0.05	9,000	10	34.56	without
31 - 56	II	R-1	0.15	1,500	10	17.28	without
		R-2	0.07	3,000	10	17.28	without
		R-3	0.05	4,500	10	17.28	without
57 - 83	III	R-1	0.15	1,500	10	17.28	without
		R-2	0.07	1,500	10	8.64	without
		R-3	0.05	1,500	10	5.76	without
84 -110	IV	R-1	2.00	1,500	10	17.28	with
		R-2	0.07	1,500	10	8.64	without
		R-3	2.00	1,500	10	5.76	with
0 - 30		R-4	2.0	9,000	10	34.56	with

응조 높이 및 동일 조건에서 유출수 반송의 효과에 따른 운전특성을 검토하기 위하여 R-4 반응조를 실험 시작부터 상향유속 2 m/hr가 되도록 정량펌프를 이용하여 유출수를 반송시켜 유출수 반송없이 운전한 R-3 반응조와의 효율을 비교 검토하여 유출수를 반송시켰을 때 나타나는 영향을 평가하였다. 실험에 이용된 각 반응조의 단계별 운전조건을 Table 2에 나타내었다.

2.2.2 인공폐수의 조제

실험을 위해 각 반응조에 주입된 폐수는 인공합성폐수로 자당과 탈지분유를 수돗물에 용해시켜 실험 농도로 맞추어 사용하였다. 반응조내 적절한 알칼리도를 유지시켜주기 위하여 NaHCO_3 를 2,000-3,000 mg/ℓ 이 되게 유입수중에 첨가시켰다. 실험에 사용된 인공폐수의 조성은 Table 3과 같으며 주입된 탈지분유의 성분조성은 Table 4와 같다.

Table 3. Composition of the synthetic wastewater

constituents	content	remarks
Sucrose($\text{C}_{12}\text{H}_{22}\text{O}_{11}$)	4.5 g	Carbon source
Nonfat dry milk	4.5 g	Carbon source
NaHCO_3	13.2 g	Buffer alkalinity
Tap water	to 1 Litter	

* Theoretical COD concentration = 9,000mg/ℓ

Table 4. Composition of the nonfat dry milk used in this experiment

Constituents	Weight percentage (%)
Milk protein	35.0
Fat	1.0
Carbohydrates	52.5
Ash and other	8.5
Moisture	3.0
Calories	398 cal/100g

2.2.3 시료의 분석

각 운전 단계별로 반응조의 운전특성을 평가하기 위한 분석항목은 가스생성량, 유입수 TCOD, 유출수 pH, 총부유물질(TSS), 휘발성부유물질

(VSS), SCOD, 휘발성산(VA), 총알칼리도(TA)였다. 반응조에서 유출되는 유출수의 pH는 반응조 상부 유출되는 지점에서 매일 측정하였으며, 유입수의 TCOD, 유출수의 SCOD 및 VA는 주 4-5회 분석하였다. 유출수의 TSS, VSS 및 TA는 주 3-4회 분석하였다. 모든 실험의 분석절차는 Standard Method(APHA, AWWA, WPCF, 1992)에 준하여 실험하였다.

3. 실험결과 및 고찰

3.1 화학적인자 변화

폐수의 혐기성 처리시 반응조내 pH, 총알칼리도(TA) 및 휘발성산(VA)은 반응조의 반응상태를 나타내는 지표가 되며 이들 인자들을 통하여 반응조내 운전상태를 평가할 수 있다. 운전기간중 pH, TA 및 VA의 범위 및 평균 농도값을 Table 5에 나타내었다.

Table 5. Chemical characteristics of the effluent

Reactor No.	pH	Total alkalinity (mg/ℓ as CaCO_3)	Volatile acid (mg/ℓ as CH_3COOH)	VA/TA
Phase I				
R-1	7.01-7.05 (7.03)	1,257-1,615 (1,146)	1,150-1,360 (1,255)	1.10
R-2	6.70-6.80 (6.75)	1,435-1,843 (1,654)	2,610-2,950 (2,756)	1.69
R-3	6.43-6.61 (6.52)	1,540-1,970 (1,736)	3,200-3,450 (3,325)	1.91
Phase II				
R-1	6.91-7.49 (7.09)	2,143-2,748 (2,591)	815-980 (892)	0.34
R-2	6.65-7.51 (6.84)	2,154-2,600 (2,453)	1,150-1,360 (1,215)	0.50
R-3	6.59-7.00 (6.67)	2,500-3,315 (2,872)	1,850-2,210 (1,955)	0.68
Phase III				
R-1	7.11-7.57 (7.27)	2,547-2,923 (2,736)	725-815 (745)	0.29
R-2	6.92-7.18 (7.14)	2,167-3,023 (2,725)	750-835 (785)	0.29
R-3	7.01-7.40 (7.26)	2,116-3,099 (2,753)	760-845 (795)	0.29
Phase IV				
R-1	7.30-7.70 (7.45)	2,413-2,822 (2,617)	642-795 (729)	0.29
R-2	7.01-7.21 (7.10)	2,354-3,428 (2,612)	740-832 (782)	0.30
R-3	7.28-7.76 (7.47)	2,120-3,020 (2,634)	730-825 (765)	0.28
R-4	6.94-7.04 (7.00)	2,510-3,050 (2,732)	905-1,210 (937)	0.34

() : average

pH는 운전 전기간을 통하여 6.43 - 7.76으로 나타나 일반적인 혐기성 반응조 운전에 적합한 pH 범위에서 운전된 것으로 생각된다. 소화조내의 pH 강하에 대한 완충능력을 나타내는 알카리도는 실험 전과정을 통하여 1,257 - 3,428 mg/l의 범위로 일반적으로 소화조내의 허용치인 1,000 - 5,000 mg/l 이내에 들고있어 각 반응조내의 완충능력은 충분했던 것으로 생각된다. 유출수의 휘발성 산의 농도는 동일 유기물 부하율에서 유입 유기물농도만을 변화시키고 1 단계 및 2 단계 실험을 통하여 유입 유기물농도가 높은 반응조에서 높게 나타났다. 반면 동일 유기물농도에서 유기물부하를 달리한 3 단계 실험에서 알 수 있는 바와같이 R-1, R-2 및 R-3 반응조의 휘발성산의 농도는 각각 745, 786 및 795 mg/l로 유기물 부하에 크게 영향을 받지 않고 일정한 값을 나타내었다. 3 단계의 연속실험으로 무반송후 유출수 반송의 영향을 평가하기 위한 4 단계 실험에서 유출수를 반송시킨 R-1 및 R-3 반응조의 평균 휘발성산의 농도가 각각 729 및 765 mg/l인 반면 연속 무반송시킨 R-2 반응조의 경우 782 mg/l로 나타나 유출수 반송의 효과로 효율이 미미하나마 증가된 것으로 평가되며 이는 유출수 반송에 의한 상향유속의 증가로 미생물과 기질간의 접촉효율을 증가시킨 결과라고 생각된다. 한편 동일 조건에서 유출수 반송을 시키지 않은 R-3 반응조와 실험 처음부터 반송을 시킨 R-4 반응조와의 비교 실험에서 유출수를 반송시킨 R-4 반응조의 경우 휘발성산의 농도범위는 905 - 1,210 mg/l로 평균 937 mg/l인데 비하여 반송을 시키지 않은 R-3 반응조의 경우 동일 유기물농도를 주입한 운전 30 일동안 3,200 - 3,450 mg/l로 평균 3,325 mg/l로 나타나 약 3.5배 이상의 차이를 나타내었다. 이와 같이 동일조건에서 무반송시킨 R-3 반응조의 경우 유출수를 반송시킨 R-4 반응조에 비해 상당량의 휘발성산이 축적되는 것으로 보아 반응조내 메탄생성 미생물이 저해를 받고 있으며 이는 동일조건에서 무반송의 경우 휘발성산/알카리도의 비가 1.91 정도의 상당히 높은 값을 나타낸 반면 유출수를 반송시킨 경우 0.34 정도로 낮은 값을 나타낸 결과에서도 확인할 수 있었다. 특이한 사실은 운전 31일부터 56

일 까지 25일동안 운전한 R-3 반응조의 경우 R-4 반응조에 비하여 유입 유기물부하를 50 %로 낮추어 운전하였음에도 불구하고 휘발성산의 농도가 평균 1,955 mg/l로 나타나 운전초기 유출수 반송이 중요하게 작용하는 것으로 생각된다.

3.2 유기물 제거 특성

3.2.1 유출수 무반송이 유기물 제거효율에 미치는 영향

UASB 반응조를 유출수 반송없이 운전하여 유입 유기물농도 및 부하가 유기물 제거효율에 어떠한 영향을 미치는지를 평가하기 위하여 동일 HRT로 운전되는 반응조에서 유기물부하를 동일하게 하고 유입 유기물농도만을 변화시켰고(1, 2단계), 반대로 동일 HRT 및 동일 유기물농도에서 유기물 부하를 변화시키면서 나타나는 영향을 평가하고(3단계), 최종적으로 유출수의 반송 유무가 처리효율에 어떠한 영향을 미치는가를 상대적으로 평가하였다(4단계). 본 실험에 이용된 슬러지는 유출수 반송을 하여 운전시킨 실험실 규모의 UASB 반응조에서 10 시간의 체류시간으로 85 % 이상의 유기물 제거효율을 얻었던 안정된 반응조에서 인출한 슬러지를 이용하였으므로 슬러지 활성에 있어서 문제가 없는 상태에서 실험을 수행하였다. 운전기간 경과에 따른 유기물 제거효율을 Fig. 2에 나타내었으며 각 운전 단계별 평균 COD 제거

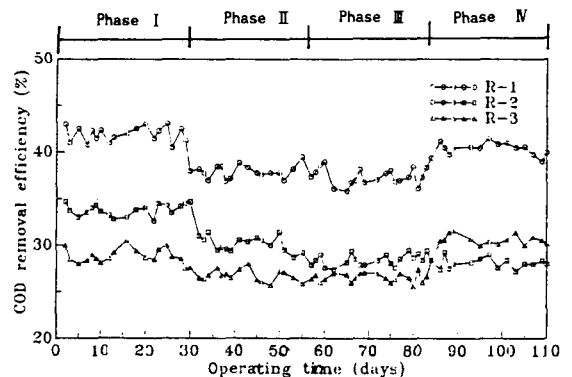


Fig. 2. Variation of COD removal efficiencies with operating time.

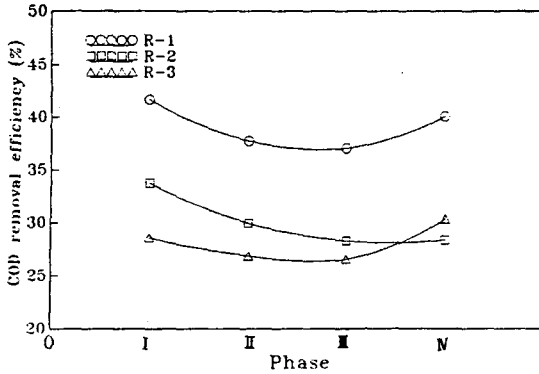


Fig. 3. Average COD removal efficiencies with each phase.

율을 Fig. 3에 도시하였다. 혐기성 처리공정으로 각 단계별 운전기간이 25-30일 사이로 비교적 짧지만 각 반응조 공히 모든 단계 실험동안 수리학적 체류시간을 10 시간으로 하여 운전하였으므로 비교적 빠르게 정상상태에 도달하였으며 각 반응조별로 상대적으로 비교할 수 있게 안정된 유출수 농도를 얻을 수 있었다.

Fig. 3에서 알 수 있는 바와같이 유기물 부하를 동일하게 하고 유입 유기물농도를 3,000, 6,000 및 9,000 mg COD/l로 달리한 1 단계 실험의 R-1, R-2, R-3 반응조에서 비교적 정상상태라고 판단되는 기간중의 평균 유기물 제거효율은 각각 41.7, 33.8 및 28.8 %로 나타나 동일부하에서 유입기질 농도가 낮은 R-1 반응조에서 유기물 제거효율이 높게 나타나고 있으나 전 반응조에서 전반적으로 40 % 전후로 나타나 유출수를 반송시키지 않고 운전할 경우 공정효율의 저하를 가져올 것으로 평가되었으며 그영향은 유입 유기물의 농도가 높을 수록 크게 나타났다. 따라서 유입수농도를 전체적으로 50 % 감소시켜 다소 낮은 농도에서 효율개선을 평가하기 위한 목적으로 2 단계 실험이 연속되었다.

유출수 반송을 시키지 않은 R-1, R-2 및 R-3 반응조에 대하여 유입기질 농도를 50 % 감소시켜 각각 1,500, 3,000 및 4,500 mg COD/l로 운전한 결과 평균 COD 제거효율이 R-1 반응조에서 37.9 %, R-2 반응조에서 30.1 % 및 R-3 반응조에서 26.7 %로 나타나 1 단계 실험과 비슷한 경향을 나타내었으며 오히려 높은 유입 유기물농도에서 실험한 1 단계 실험의 경우에 비하여 유기물 제거효

율이 낮게 나타나고 있어 유기물농도 및 부하감소가 효율에 크게 기여하고 있지 못함을 알 수 있었고 이는 반응조내 메탄생성박테리아의 기능이 계속되는 유기물 유입으로 인하여 크게 개선되지 못한 것으로 생각된다.

유출수 무반송시 낮은 유기물 부하에서 유기물 부하변동이 운전효율에 어떠한 영향을 미치는지를 검토하기 위하여 R-1, R-2 및 R-3 반응조에 1,500 mg COD/l의 동일 유입 유기물농도를 유입시키므로써 유기물 부하를 R-1 반응조에 17.28 g COD/day, R-2 반응조에 8.64 g COD/day, R-3 반응조에 5.76 g COD/day로 달리하여 유기물부하변동에 따른 반응조 운전효율의 영향을 검토한 결과 R-1, R-2 및 R-3 반응조에서 기질제거효율이 각각 37.4 %, 28.5 % 및 26.6 %로 나타나 효율에 별 변화에 없는 경향을 보이고 있어 반응조내 메탄생성미생물이 제 기능을 하지 못하고 있음을 추측할 수 있다. 이와같은 낮은 제거효율이 유출수 반송에 기인된다고 판단하여 유출수 반송의 영향을 평가하기 위하여 운전 84 일째부터 R-2 반응조는 3 단계 실험과 동일한 조건에서 유출수 반송 없이 운전하고 R-1 및 R-3 반응조에 대하여 유출수를 반송시켜 반응조내 상향유속을 2 m/hr로 하여 26일 동안 운전하였다. 그 결과 Fig. 3에서 보는 바와같이 유출수 반송을 시키지 않은 R-2 반응조의 경우 평균 COD 제거효율이 28.1 %로 나타나 3 단계의 경우와 비슷한 결과를 보인 반면 유출수 반송을 시킨 R-1 반응조에서 평균 COD 제거효율은 40.4 % 로 나타났고, R-3 반응조의 경우 30.5 %로 나타나 유출수 반송으로 인하여 효율증가폭은 적으나 기질제거효율이 증가하는 것으로 나타났다. Weimin *et al.*(1987)은 UASB 반응조 start-up시 고농도 폐수를 처리하기 위해서는 유출수 반송이 필요하다고 보고하였고, Henze and Harremoes(1983)는 혐기성 반응조, 특히 UASB 반응조 start-up시 유입 유기물농도 5,000 mg/l 이상의 폐수를 처리하고자 할때 유출수 재순환을 시키도록 보고한 연구 결과와 비슷한 결과를 나타내었다. 이상의 결과에서 알 수 있듯이 유출수 반송없이 운전할 경우 효율적인 유기물제거효율을 얻기 힘들며 이러한 현상은 유입 유기물농도 및

부하를 조정하여 실험한 경우에도 비슷한 결과를 나타내었다. 그러나 유출수 반송을 시킨 경우 유기물 제거효율이 크게 상승하지는 못하였지만 무반송에 비하여 효율이 좋게 나타나 UASB 반응조 운전시 유출수 반송을 통하여 유기물과 미생물과의 접촉효율을 증대시키므로서 반응조 운전효율을 향상시킬 수 있을 것으로 판단된다.

3.2.2 유출수 반송 및 무반송 운전시 유기물 제거효율 비교

유출수 반송의 유무가 반응조 운전효율에 어떠한 영향을 주는지를 평가하기 위하여 반응조 규격, 체류시간, 유기물 부하 및 유기물농도등 운전조건이 동일하게 유지하면서도 반송유무만을 운전 변수로 하여 운전초기부터 2 m/hr로 유출수를 반송시킨 R-4 반응조와 반송을 시키지 않은 R-3 반응조와의 운전효율을 비교하였으며 그 결과를 Fig. 4에 나타내었다.

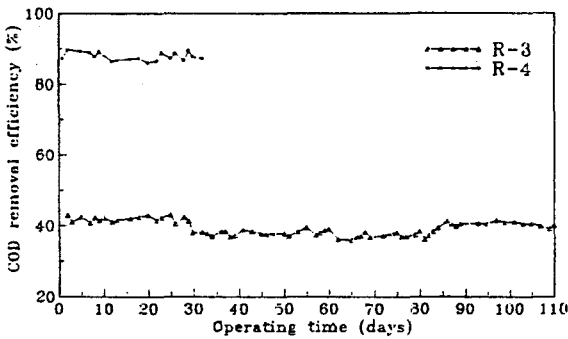


Fig. 4. Variation of COD removal efficiencies with operating time.

Fig. 4에서 보는 바와같이 동일조건에서 유입 유기물농도를 9,000 mg COD/l로 하여 운전초기 유출수 반송유무만 달리한 운전 30일까지의 운전결과를 보면 운전초기 반송을 시킨 R-4 반응조의 COD 제거효율이 85.0 % 이상이었는데 반해 유출수 반송을 시키지 않은 R-3 반응조의 경우 40.0 % 이하의 제거효율을 나타내었으며 운전 30일 부터 56일 까지 R-3 반응조만 유입 유기물농도를 50 % 낮추어 운전하였음에도 불구하고 역시 40.0 % 이하의 제거효율을 보여 유출수 반송에 따른

영향이 뚜렷하게 나타남을 알 수 있다. 특이한 사실은 R-3 반응조의 경우는 반응초기부터 운전조건이 R-4 반응조와 같았고 최종 4 단계에서는 유기물 부하를 낮추고 상향유속 역시 2 m/hr로 R-4 반응조와 같게 운전하였는데도 유기물 제거효율은 R-4반응조의 85 % 이상의 제거효율에 비해 크게 떨어지는 30.4 %로 나타났다. 이러한 결과에서 운전초기에 유출수 무반송으로 인해 혐기성 미생물에 주었던 영향이 계속 남아있는 것으로 평가되어 운전초기 유출수 반송의 중요성이 크게 부각되고 있음을 알 수 있다. Lawrence and McCarty (1969)는 프로피온산 및 뷰틸산과 같은 중간생성물을 아세트산으로 전환시키는 박테리아의 최소 배가시간(doubling time)은 1.5-4일이며 이들 박테리아의 활동은 저농도의 용존수소가스 있는 상태에서에서도 쉽게 중단되는 것으로 보고하였고, 또한 혐기성 공정내에서 과부하나 충격부하가 가해지면 공정내에 유기산이 축적되어 공정의 실패를 가져오며(Pohland and Bloodgood, 1963; McCarty et al., 1963), 이러한 중간 생성물의 축적은 수소생성박테리아와 수소이용박테리아간의 먹이공여관계 의해 조정되는 수소농도와 밀접한 관련이 있다고 보고되고 있다(Chung et al., 1976; Bryanbt et al., 1977; Smith and McCarty, 1990). 한편 미생물 크기 분포에 따른 활성도 관계에 있어서 Guiot et al.(1986, 1988, 1991)은 산생성 박테리아의 활성도는 입상슬러지의 크기가 감소함에 따라 증가하며 반면 메탄생성 박테리아의 활성도는 입상슬러지의 크기가 증가함에 따라 증가되는 것으로 보고하고 있다. 이러한 결과에서 유출수 반송이 없이 유입수만으로 상향유속을 낮게 하여 운전할 경우 반응조 하부 슬러지층의 유동으로 인한 슬러지층의 혼합이 이루어지지 않아 Fig. 5(A)에서 보는 바와 같이 입상슬러지와 분산미생물의 혼합상태가 그대로 유지하게 되며 이 상태에서 유기물을 주입시킬 경우 수소생성박테리아가 주로 구성되어 있는 분산형태의 미생물에 의하여 다량의 수소가 유기물 분해 과정에서 생성되는 반면 이들 수소를 기질로 하는 수소 이용 박테리아의 증식속도가 상대적으로 느려 생성된 수소를 빠른시간내에 제거되지 못하여 반응조내 수소분압이 증가하게되며 프로피온

산 및 뷰틸산의 원활한 분해를 저해시키며 이의 결과로 유기산의 축적이 일어나고 pH 저하와 더불어 메탄생성박테리아에 악영향을 미쳐 반응조 운전효율의 저하를 초래하게 될 것으로 생각된다. 따라서 본 연구에서 반응을 시키지 않은 반응조에서의 효율저하는 반응조하부에 존재하는 슬러지가 높은 유기물부하에서 생성되는 높은 수소분압의 환경에 노출된 결과로 생각된다. 그러나 운전초기 반응을 통하여 상향유속을 둘 경우 Fig. 5(B)에서 보는바와같이 슬러지층의 유동으로 인하여 큰 덩어리의 입상슬러지가 반응조 하부에 존재하게되고 상부로 갈수록 미세입자가 형성하게 되므로서 반응조내 수소 축적이 일어나지 않으며 또한 미제거된 수소는 상향류를 따라 방출되므로 낮은 수소분압상태하에서 미생물에 의한 원활한 유기물의 분해가 일어나게 되므로 운전 초기 반응에 의한 슬러지층 유동화가 중요한 것으로 평가되었다.

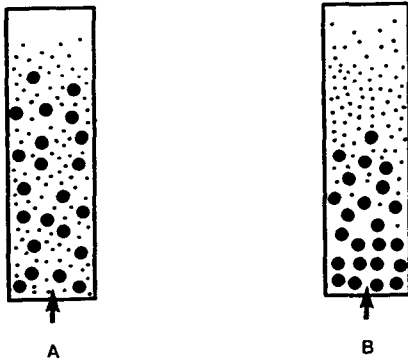


Fig. 5. Size distribution of granular sludge according to fluidization.

이러한 결과는 van den Berg(1981)가 UASB 반응조와 같은 고율혐기성 반응조에서는 외부장치에 의한 기계적 교반이 불필요하기 때문에 가스순환 및 유출수 반송등 물리적인 방법에 의한 슬러지층 유동화가 중요하다고 보고한 연구 결과와 유사한 결과를 나타내었다. 본 실험의 경우 운전 초기 유출수 반송을 시킨 경우가 반응을 시키지 않은 경우에 비해 훨씬 높은 효율을 나타내었으며 유출수 반송을 시키지 않고 운전할 경우 높은 수소분압에 의해 메탄생성박테리아가 저해를 받아 활성을 잃을 경우 유출수 반송을 시키더라도 원활

한 공정효율을 가져다 주지 못하는 것으로 평가되었다.

이상의 결과에서 반응조의 운전효율을 증가시키기 위하여 운전초기 유출수 반송에 의한 적정 상향유속이 유지되어야 하는 것으로 평가되었다.

3.3 유출수중의 TSS 및 VSS 농도

3.3.1 유출수 무반송 운전이 슬러지 유실량에 미치는 영향

반응조 운전시 슬러지 유실 및 축적은 반응조 운전효율에 있어 중요한 의미를 갖는다. 따라서 유출수 반송없이 운전한 R-1, R-2 및 R-3 반응조에 대하여 유원기질농도, 유기물부하변동 및 무반송후 유출수 반송이 슬러지 유실에 어떠한 영향을 미치는지를 평가하였으며 각 운전 단계별 평균 TSS 및 VSS 농도를 Fig. 6에 도시하였다.

Fig. 6에서 보는 바와같이 동일 HRT 및 동일

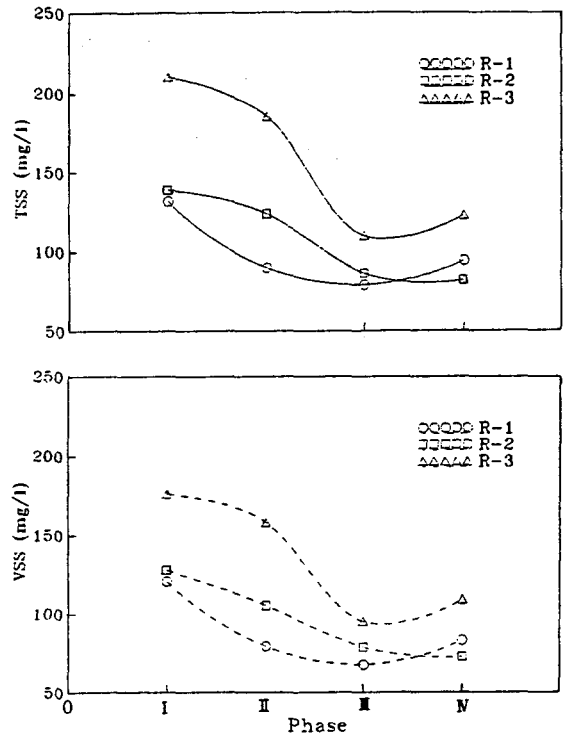


Fig. 6. Average effluent TSS and VSS concentration with operating time.

유기물 부하에서 유입 유기물농도의 변화가 슬러지 유실량에 어떠한 영향을 미치는가를 평가한 1 단계 및 2 단계 실험에서 유입 유기물농도가 높을수록 슬러지 유실량이 높게 나타나고 있어 슬러지 유실량은 동일 유기물부하에서 유입 유기물농도 또는 반응조 높이에 영향을 받는 것으로 나타났다. 동일 HRT 및 동일 유기물농도에서 유기물 부하변동이 슬러지 유실에 어떠한 영향을 미치는지를 평가하기 위하여 R-1, R-2 및 R-3 반응조에 공히 동일 유입 유기물농도인 1,500 mg COD/l로 유입시켜 유기물 부하를 각각 17.28, 8.64 및 5.76 g COD/day로 달리하여 운전한 3단계 기간동안의 슬러지 유실량은 1 단계 및 2 단계 실험에 비하여 그 차이가 크지 않는 것으로 나타나 동일 유입 유기물농도로 운전될 경우 유기물부하에 크게 영향을 받지 않는 것으로 생각된다. 특이한 사실은 동일 유입 유기물농도에서 유기물부하가 가장 큰 R-1 반응조가 가장 낮은 부하로 운전된 R-3 반응조에 비해 슬러지 유실량이 적게 나타나고 있으며 유기물부하가 클수록 슬러지 유실량이 작게 나타나는 현상을 보였다. 이러한 현상에 대한 이유는 1 단계 및 2 단계 실험의 결과와 유사하게 반응조 높이에 좌우되는 것으로 생각되며 반응조 높이가 높을수록 슬러지 유실량이 작게 나타난 결과로 판단된다. 동일조건에서 무반송후 유출수 반송의 유무가 슬러지 유실량에 미치는 영향을 비교 평가하기 위하여 4 단계 실험의 슬러지 유실 경향을 비교 평가하였다. 3 단계 실험과 동일한 조건에서 유출수 반송없이 운전한 R-2 반응조와 4 단계 실험에서 유출수를 반송을 시켜 상향유속을 2 m/hr로 유지하여 운전한 R-1 및 R-3 반응조에서 유실된 슬러지 농도는 Fig. 6에서 알 수 있는 바와같이 평균 TSS 농도가 R-1 반응조에서 94.3 mg/l로 나타났고, R-3 반응조의 경우 122.8 mg/l로 나타나 동일 기간동안 유출수를 반송시키지 않은 R-2 반응조의 평균 TSS 농도 81.9 mg/l에 비해 비교적 높게 나타나 상향유속이 슬러지 유실량에 영향을 미치는 것으로 생각된다. 동일 상향유속에서 운전된 R-1 반응조와 R-3 반응조를 비교하여 볼때 반응조 높이가 큰경우 슬러지 유실량이 작게 나타나 슬러지 유실에 반응조 높이가 다소 영향을

주는 것으로 생각되며 이러한 현상은 전체적인 운전기간을 평가하여 볼때 유기물부하가 높을수록 미생물 증식량이 많고 가스의 발생량이 많아서 유기물부하가 높은 R-1, R-2, R-3 반응조의 순으로 유출수의 SS 유실이 클 것으로 예상될 수 있으나 본 연구에서는 반응조 높이 순에 따라 SS농도가 감소하는 반대 경향을 나타내었다. 따라서 반응조 내 미생물 보유능력을 유지시키기 위해서는 적정 높이의 반응조에서 운전하는 것이 바람직할 것으로 판단된다.

3.3.2 슬러지 유실량에 대한 유출수 무반송과 반송의 비교

동일 반응조 높이 및 동일 운전조건에서 운전초기 유출수 반송의 유무가 슬러지 유실량에 어떠한 영향을 미치는지를 평가하기 위하여 운전초기부터 유출수를 반송시켜 상향유속을 2 m/hr로 유지시킨 R-4 반응조와 반송시키지 않은 R-3 반응조의 운전초기 30일간의 TSS 및 VSS 유실 경향을 Fig. 7에 나타내었다. 이 그림에서 알 수 있는 바와같이 동일 조건에서 유입 유기물농도를 9,000 mgCOD/l로 하여 운전초기 유출수 반송유무만을 달리하여 운전한 결과 R-4 반응조의 경우 유출수 중 TSS 농도 변화폭이 일정한데 비하여 R-3 반응조의 경우 TSS 농도의 변화폭이 크게 나타났다. 이러한 현상에 대한 이유로 유출수를 반송시킨 반응조의 경우 슬러지층의 유동화로 생성된 소화가스가 슬러지층내에 축적됨이 없이 반응조 밖으로 연속적으로 빠져나가 안정된 상태에서 거의 일정한 유출수 SS 농도를 보이고 있는 반면 무반송인 경우 유기물 제거로 생성된 적은량의 소화가스가 일정압까지 슬러지층내에 축적되어 있다가 일시적인 가스분출에 의해 부상된 슬러지가 유출된 것으로 생각된다. 이러한 결과는 Lettinga *et al.*(1980)이 반응조내 혼합의 필요성은 슬러지층의 유동화 정도에 따라 좌우되며 만약 반응조 하부에 슬러지가 조밀하게 차여 밀도가 큰 슬러지층을 형성하게 되면 유기물 분해시 생성된 소화가스의 유출이 방해되어 슬러지층 사이에 포획될 경우 가스 부상에 의해 슬러지층이 기체-액체-고체 분리기에

까지 상승하기 때문에 반응조내 유동화가 필요하다고 보고한 결과와 잘 일치하는 것으로 나타났다. 동일 기간동안 SS 유실량을 평균하여 비교하여 보면 R-4 반응조의 경우 평균 TSS 농도가 225 mg/l 인 반면 무반송시킨 R-3 반응조의 경우 210 mg/l 로 나타나 반송시 상향유속으로 인하여 슬러지 유실량이 비교적 높게 나타나는 현상을 보여 앞의 4단계 실험과 일치하는 결과를 나타내었다.

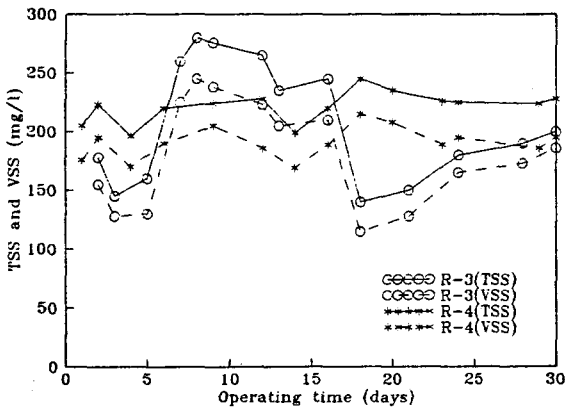


Fig. 7. Variation of effluent TSS and VSS concentration with operating time.

이상의 결과를 통하여 상향류식 혐기성 반응조에서 미생물 보유능력을 향상시키기 위해서는 적정 반응조 높이에선 운전하는 것이 바람직하며 유기물 제거효율을 고려한 최소한의 상향유속이 SS 유실량을 줄이는 요인으로 평가되었다.

4. 결 론

실험실 규모의 UASB 반응조를 이용하여 유입 유기물농도 및 유기물 부하변화에 따른 유출수 반송의 영향과 반송의 유무에 따른 반응조 운전효율 특성을 비교한 실험에서 얻은 결과는 다음과 같다.

1. 유출수 반송없이 운전한 반응조의 경우 유기물 제거효율이 40 % 이하로 나타났으며 이러한 현상은 유입 유기물농도 및 부하율을 조절하여 운

전한 경우에도 비슷한 결과를 나타내어 UASB 반응조 운전시 무반송은 공정의 효율을 감소시키는 요인으로 작용할 것으로 판단된다.

2. 동일 조건에서 운전초기 유출수를 반송시켜 운전한 경우 유기물제거효율이 85.0 % 이상으로 나타난 반면 반송을 시키지않고 운전한 경우 그리고 무반송으로 운전하다 반송을 시킨 경우 역시 40.0 % 이하의 유기물 제거효율을 나타내어 운전초기 유출수 반송이 중요한 요인으로 평가되었다.

3. 동일조건에서 운전되는 UASB 반응조에서 유출수로 유실되는 슬러지량은 유출수를 반송시켜 상향유속을 유지시켜 운전한 경우가 반송을 시키지 않은 경우에 비해 높게 나타났으며 또한 반응조 높이가 클수록 슬러지 유실량은 작게 나타났다. 따라서 UASB 반응조 운전시 운전효율을 증가시키고 미생물 보유능력을 향상시키기 위하여 유기물제거 측면을 고려한 최소한의 상향유속의 유지와 적정 반응조 높이가 중요한 요인으로 평가되었다.

참고문헌

- APHA, AWWA, WPCF, 1992, Standard methods for the examination of water and wastewater, APHA, AWWA, WPCF, 18th ed.
- Bryant, M.P. *et al.*, 1977, Growth of Desulfovibrio in Lactate or Ethanol Media Low in sulfate in Association with H₂-Utilizing Methanogenic Bacteria, *Appl. Environ. Microbiol.*, 33, 1162-1669.
- Chung K. T. *et al.*, 1976, Inhibitory Effects of H₂ on Growth of Clostridium cellovoparum. *Appl. Environ. Microbiol.*, 31(3), 342.
- Guiot, S. R., K. J. Kennedy and B. van den Berg, 1986, Comparison of the upflow anaerobic sludge blanket and sludge

- bed-filter concepts, Proc. EWPCF Conf. on Anaerobic Treatment A Grow-Up Technology, Aquatic, 86, Amsterdam, The Netherlands, 533-546.
- Guiot, S. R., A. Pauss, D. Bourque, M. El Housseimi, L. Lavoie, C. Beaulieu and R. Samson, 1988, Effect of upflow liquid velocity on granular sludge size distribution in an upflow anaerobic bed-filter (UBF) reactor, Fifth international Symposium on Anaerobic Digestion. Bologna, Italy, May 22-26.
- Guiot, S. R., Andre Pauss and J. William Costerton, 1991, A structure model of the Anaerobic granule Consortium, Sixth International Symposium on Anaerobic digestion, San Paulo, Brazil-12-16, May.
- Henze, M. and P. Harremoes, 1983, Anaerobic treatment of wastewater in fixed film reactors, a literature review, Water Science and Technology, 15(819), 1-101.
- Lawrence, A. W. and P. L. McCarty, 1969, Kinetics of methane fermentation in anaerobic treatment, JWPCF, 41(1), 17.
- Lettinga, G., A. M. F. van Velsen, S. W. Hobma, W. J. de Zeeuw, and A. Klapwijk, 1980, Use of the Upflow Sludge Blanket(USB) reactor concept for biological wastewater treatment especially for anaerobic treatment, Biotechn. Bioeng., 22. 699-734.
- Lettinga G., R. Roersma and D. Grin, 1983a, Anaerobic treatment of raw domestic sewage at ambient temperatures using a granular bed UASB reactor, Biotechnol. Bioengng 25, 1701 - 1723.
- Lettinga, G., L. W. Hulshoff Pol, S. W. Hobma, P. Grin, P. de Jong, R. Roersma and P. Ijspeert, 1983b, The use of a floating settling granular sludge bed reactor in anaerobic treatment, Proceedings of the European Symposium on Anaerobic Wastewater Treatment, 23 - 25, November 1983, Noordwijkerhout, The Netherlands, 411 - 430.
- Letting G., L. W. Hulshoff Pol, I. W. Koster, W. M. Wiegant, W. J. de Zeeuw, A. Rinze-ma, D. C. Grin, R. E. Roersma and S. W. Hobma, 1984, High-rate anaerobic wastewater treatment using the UASB reactor under a wide range of temperature conditions, Biotechnol. Genet. Engng Rev. 2, 253-284.
- Lettinga G., W. J. de Zeeuw, L. Hulshoff Pol, W. M. Wiegant and A. Rinzema, 1985, Anaerobic wastewater treatment based on biomass retention with emphasis on the UASB process, In Anaerobic Digestion 1985(Edited by China State Biogas Association), 279-301, Guangzhou, China.
- Man A. W. A., A. R. M. van der Last and G. Lettinga, 1988, The use of EGSB and UASB anaerobic system for low strength soluble and complex wastewaters at temperatures ranging from 8 to 30 °C, In (A. Tilche and A. Rozzi eds.) Poster Paper of the Fifth International Symposium on Anaerobic Digestion, Monduzzi Editore, Bologna, Italy, 197-209.
- McCarty, P. L., 1963, Individual volatile acids in anaerobic treatment, JWPCF. 35. 1501.
- Pohland, F. G. and D. D. Bloodgeed, 1963, Laboratory studies on mesophilic and thermophilic anaerobic sludge digestion, JWPCF, 35, 11.
- Smith, K. P. and P. L. McCarty, 1990, Factors governing methane fluctuations following shock loading of digesters, Research Journal WPCF. 62(1), 58 - 64.
- Van den Berg, L., 1981, Communication during the Seminar on Anaerobid Wastewater

- Treatment and Energy Recovery, Pitts-
sburgh, 3-4 November.
- Wang Z., Z. Chen and Z. Qian, 1985, Status and
prospects on study of anaerobic disposal
for industrial wastesater in China, In
Anaerobic Digestion 1985(Edited by
China State Biogas Association), 259-
278, Guangzhou, China.
- Weinin Wu, Hu Jicui, Gu Xiasheng, Zhao
Yizhang, Hui Zhang and Gu Guoguan,
1987, Cultivation of anaerobic granular
sludge in UASB reactors with aerobic
activated sludge as seed, Wat. Res. Vol.
21, No. 7, 789-799.
- Zeeuw, De, W. J., 1988, Granular sludge in
UASB-reactors. In : Proc. of the GAS-
MAT-workshop, Granular anaerobic
sludge: Microbiology and technology,
25-27 Oct. 1987, Lettinga, G., A. J. B.
Zehnder, J. T. C. Grotenhuis and L. W.
Hulshoff Pol,(Eds.), Pudoc, Wageningen,
Netherlands, 132-145.