

상향류식 혐기성 생물막 여상(UBF)의 운전 특성 - 침출수 처리를 중심으로 -

김형석 · 김 철* · 성낙창
동아대학교 공과대학 환경공학과
*동의공업전문대학 환경공학과

Operational Characteristics of UBF - Anaerobic Digestion of Landfill Leachate -

Hyeong-Seok Kim, Chul Kim* and Nak-Chang Sung

Dept. of Environ. Eng., Dong-A University, Pusan, 604-714, Korea.

*Dept. of Environ. Eng., Dong-Eui Technical Junior College, Pusan, 614-715, Korea

ABSTRACT

The anaerobic landfill leachate treatment can surmount dilution problem of high concentration landfill leachate, collect methane gas as byproduct, and treat low phosphate concentration leachate because of low nutrient salt requirement. The problems of conventional anaerobic treatment that are requirement of large reactor because of low microbial growth rate(HRT=20-30 days) and low volumetric loading rate(VLR=0.5-2.0 kg COD/m³ · day) are able to surmount by introduction of high rate anaerobic treatment.

In this study, the upflow blanket filter(UBF) which is high rate anaerobic process was applied to the landfill leachate treatment. The acceptable volumetric loading rate and HRT were 18.23 kg SCOD/m³ · day and 13 hrs. SCOD removal rate was over 90% at VLR 18.23 kg SCOD/m³ · day. The methane gas yield was 0.15 l/CH₄/g SCOD added(at STP) at VLR 18.23 kg SCOD/m³ · day. The solids accumulation yield was 0.40 g VSS/g COD removed.

Keywords : UBF, VLR, landfill leachate

I. 서 론

국내의 폐기물 발생량은 종량제 실시이후 많은 양적인 감소를 가져왔으나 단위 생산량이 많고 그 처리 방법 또한 거의 대부분이 매립에 의존함으로써 국토가 좁은 우리나라에서는 NIMBY 현상에 의해 더욱 어려워진 폐기물 매립장을 확보하는 일과 매립에 의해서 야기되는 토양 오염과 지표수 및 지하수 오염등을 방지하면서 매립이 완료된 매립장의 효율적인 토지이용을 기하는 일은 중요한 국가적 당면 과제라 할 수 있다.

매립에 의한 폐기물의 처분은 세계 각국에서 널리 사용되어지고 있으나, 적절한 관리의 미흡과 이해부족으로 환경에 대해 잠재적인 위해성을 지니고 있으

며 특히 매립지 사후관리 측면에서 가장 중요한 문제는 침출수의 안정적인 처리로서 사회적 · 국가적으로 중요한 관심사로 부각되고 있다.

침출수의 처리방법으로는 응집-침전, 활성탄 흡착, 화학적 산화 등의 물리적/화학적 방법과 활성슬러지법, 회전원판법, 접촉포기법, 라구온 등의 호기성 공법과 재래식 혐기성 공법의 생물학적 방법이 근간을 이루고 있다.¹⁾

물리화학적인 방법은 침출수에 함유된 중금속과 색도유발물질을 제거하는데는 효과적이거나, 유기물질의 제거효율이 낮고 비교적 많은 양의 화학물질이 주입되므로 슬러지의 처분 문제가 대두된다. 그리고 호기성 공법은 유기물질의 제거특성은 우수하나 산소 투입 등으로 인한 운전비용의 증가와 함께 적정

처리를 위해서는 고농도 침출수의 다배수 희석이 필요하며 bulking과 거품문제 등으로 인하여 침전조에서 효과적으로 고액분리가 이루어지지 않는다.²⁾

외국의 경우 1974년 W.C. Boyle과 R.K. Ham³⁾에 의한 침출수의 혐기성 처리공법에 대한 적용을 시작으로 실제 처리장에서도 많은 운전^{4,5)}이 시행되어지고 있으나 국내의 경우 고율 혐기성 반응조를 이용한 침출수 처리에 관한 연구는 미비한 실정이다.

본 연구에서는 고율 혐기성 반응조로서 Guiot와 Van den verg⁶⁾에 의해 처음으로 고안되어 폐수처리에 적용한 상향류식 혐기성 생물막 여상(Uplow blanket filter, 이하 UBF라고 명명함)을 매립장 침출수 처리에 적용하여 생물막 공정의 운전 특성을 조사하였다.

II. 실험재료 및 방법

1. 실험장치 및 충진물

본 연구에 사용된 실험장치의 개략도를 Fig. 1에 나타내었다.

실험장치는 단면적 71 cm², 총높이 72 cm, 수심 70 cm의 원통형으로서 하부로 부터 40 cm 지점에서 60 cm 지점까지 충진물로서 Pall-Ring이 채워진 전체 용적 5.1 l(실용적 4.4 l, 유효용적 4.34 l, 충진물 용적 0.064 l, 충진물 184개; 0.353 ml/충진물)의 아크릴 판으로 제작된 2개의 반응조가 사용되었다.

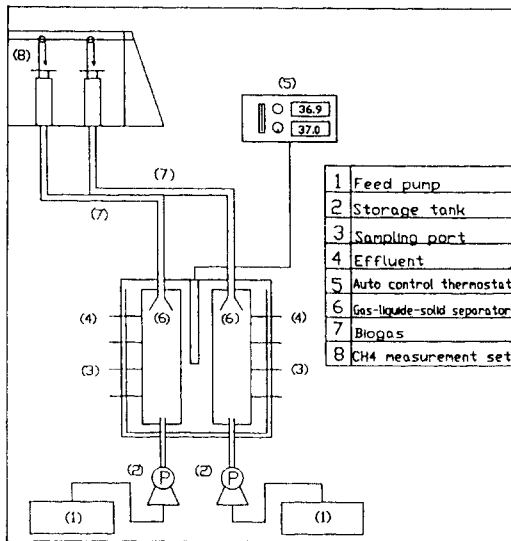


Fig. 1. Schematic diagram of upflow blanket filter reactors.

사용된 충진물은 15 mm의 Pall-Ring이며, 이 충진물은 격자형 충진물로서 비표면적(D)은 110 m²/m³, 충진밀도(N)는 6100 l/m³, 공극률(ε) 0.952 m³/m³의 물리적 특성을 가진다.

2개의 UBF 반응조는 37±1°C를 유지하는 자동 온도 조절 장치가 부착된 항온조에서 운전 되었으며, 폐수는 하부에서 2 cm지점에서 균일하게 주입되며, 일정한 시간에 일정한 유량을 주입하기 위해 정밀 정량 펌프를 MEC time switch (MT-2402 A)와 계전기에 연결 사용하였다.

반응조로부터 발생하는 가스는 반응조 상부에 설치된 3상 분리장치(Gas-Liquid-Solid Separator)에 의해 포집되어, 실리콘관으로 연결되어 1M NaOH용액을 이용, 수위 변위식 포집 장치로 정량화 하였다.

혐기성 처리 특성상 빛의 차단을 위해 가로 280 cm×세로 150 cm×폭 78 cm의 나무로 만든 암실내에 위의 모든 장치를 설치하였고, 암실 외부에는 검은 커튼을 설치하여 가능한 모든 빛의 투과를 막고자 하였다. 위의 내용을 정리하면 아래의 Table 1과 같다.

2. 시료 및 분석

본 실험에서 사용한 시료는 부산광역시 소재 E 매

Table 1. Physical characteristics of the UBF

Item	UBF
Dia. (cm)	9.50
Surface area (cm ²)	70.90
Height (cm)	72.00
Liquid height (cm)	65.00
Total volume (l)	5.10
Actual volume (l)	4.40
Effective volume (l)	4.34
Packing volume (l)	0.064

Table 2. Characteristics of raw leachate

Item	Concentration (mg/l)
TCOD	27000-53500
SCOD	21580-46600
TSS	560-1340
VSS	420-780
pH	5.93-7.60
SO ₄ ²⁻	621-2639
NH ₄ ⁺ -N	2067-3247
T-P	6.05-10.65
T-N	2273-3748
PO ₄ -P	1.33-10.55

립장에서 나오는 침출수를 이용하였다. 위 침출수는 24시간 침전시킨후 증류수로 희석하여 각각 10g SCOD/l, 20 g SCOD/l로 조절하여 사용하였으며, 침출수 성상은 Table 2에 나타난 바와 같다.

10 g SCOD/l, 20 g SCOD/l의 두가지 농도를 사용한 이유는 국내 침출수 수질의 경우 SCOD가 Table 2에 나타난 바와같이 20,000-50,000 mg/l의 고농도를 유지함으로써 20 g SCOD/l의 경우 희석없이 침출수 처리가 가능한가의 여부를 판단하기 위해서이고, 10 g SCOD/l의 경우 국내 실정에서는 유입수로서 고농도이지만 외국의 경우 고율 혐기성 반응조에 흔히 적용하는 농도로서 본 실험에서도 적용하였다.

실험에 사용된 식종 슬러지는 하수 종말 처리장 혐기성 소화조 시설 내의 소화슬러지로서, TSS 34.9 g/l, VSS 16.1 g/l로서 VSS/TSS 비는 0.46 이었다. 초기 식종량은 반응조 유효용적의 80%로서 UBF는 $4.3 \times 0.8 = 3.44$ 이다.

반응조의 운전상태를 조사하기 위해 분석은 유입수와 유출수의 수질, 메탄 가스 등을 대상으로 실시하였으며 분석방법은 Standard Method⁷⁾에 준하여 시행하였다.

III. 실험결과 및 고찰

1. 유기물 제거 특성

본 실험에서는 현재까지 알려진 여러 가지 혐기성 소화 영향 인자 중에서도 초기 운전 단계에서 반응조 내 슬러지와 유입 폐수 간의 혼합 효과 증대와 상대적으로 가벼운 입자들의 선택적인 제거를 위해 최

적 상승 유속으로 알려져 있는 $0.72-0.96 \text{ m/day}$ ⁸⁾를 고려하여 조절하였다.

Fig. 2는 농도가 10 g SCOD/l로 조절되어 유입되는 UBF-A 반응조에서 운전기간에 따른 용적부하율(Volumetric loading rate, 이하 VLR이라고 명명함) 변화와 SCOD 제거율의 관계를 도식한 것이다.

초기 VLR $12.45 \text{ kg SCOD/m}^3 \cdot \text{day}$ 에서부터 VLR $18.23 \text{ kg SCOD/m}^3 \cdot \text{day}$ 까지는 유기물 제거율이 90% 이상으로 양호한 상태였지만 VLR $20 \text{ kg SCOD/m}^3 \cdot \text{day}$ 를 넘어서면서 부터는 SCOD 제거율이 70% 이하로 감소함을 볼 수 있다.

상기 실험 결과는 침출수 농도가 10 g COD/l인 경우, UBF 반응조에 의한 적용 가능 부하율이 $18.23 \text{ kg SCOD/m}^3 \cdot \text{day}$ 이고 HRT 13 시간으로 단축시킬 수 있음을 알 수 있다.

외국에서의 혐기성 공법에 의한 침출수 처리사례와 비교해 볼 때, Chang⁹⁾의 경우 대만에서 침출수를 UBF반응조로 처리한 결과 VLR $13 \text{ kg SCOD/m}^3 \cdot \text{day}$ 까지는 SCOD제거율이 92% 이상이었고, $21.77 \text{ kg SCOD/m}^3 \cdot \text{day}$ 의 최대 VLR에서는 제거율이 70% 이하로 하락하였다고 보고하고 있다. UBF반응조를 처음 개발한 Kennedy 등⁴⁾의 실험에 의하면 Canada의 침출수 경우 UBF반응조로 처리했을때 VLR $33 \text{ kg SCOD/m}^3 \cdot \text{day}$ 까지는 SCOD제거율이 95%이상이며, $42 \text{ kg SCOD/m}^3 \cdot \text{day}$ 까지는 88%, $70 \text{ kg SCOD/m}^3 \cdot \text{day}$ 일때 58%로 하락한다는 연구 결과를 보고하였다. 물론 각국의 침출수 성상이 상당히 다르고, 우리나라의 매립장 여건을 생각할 때

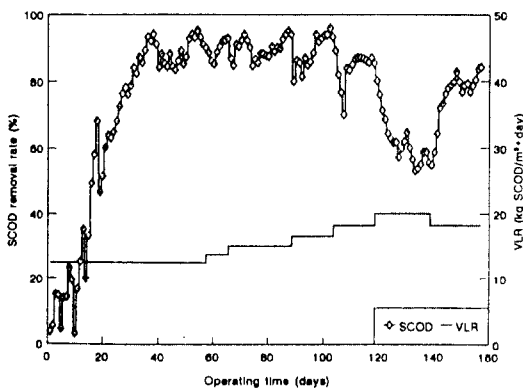


Fig. 2. Relationship between SCOD removal rate and VLR during the operating time of UBF-A reactor.

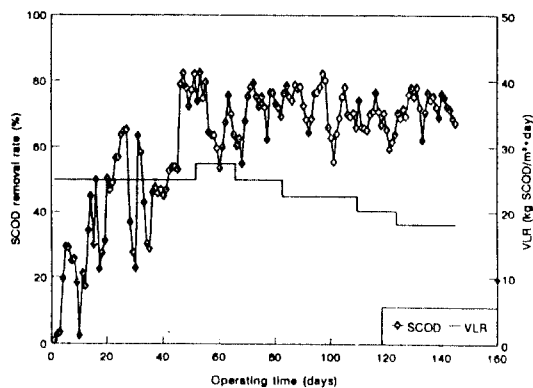


Fig. 3. Relationship between SCOD removal rate and VLR during the operating time of UBF-B reactor.

외국과 비교하여 난분해성과 유해성 물질의 유입을 예상할 수 있지만 UBF반응조에 대한 연구가 좀더 활발히 진행된다면 외국의 결과 못지않은 좋은 결과를 얻을 수 있으리라 생각된다.

Fig. 3은 10 g SCOD/l의 농도로 조절되어 유입되는 UBF-B에서의 운전시간에 따른 VLR 변화와 SCOD 제거율의 관계를 도시한 것이다.

Fig. 3에 나타난 바와같이 운전시작후 52, 66, 83, 110, 124, 146 일째 초기 VLR 24.91 kg SCOD/m³·day로 부터 27.40, 24.91, 22.40, 20.18, 18.16 kg SCOD/m³·day으로 변화시켰다. 운전시작 47일 전후 부터 SCOD 제거율이 80%가 되었지만, 제거율의 변화가 매우 심하여 이 시기를 안정화 단계로 관찰하기가 쉽지 않았다.

이 시점에서 VLR을 낮추는 것이 옳지만 반응조의 성능을 검사하기 위해 52일째 VLR을 27.4 kg SCOD/m³·day로 올려본 결과 SCOD 제거율이 60% 전후로 급격히 떨어지는 경향을 나타내었다. 운전시작 66일째 VLR을 24.91 kg SCOD/m³·day로 감소시켰을때 SCOD 제거율은 80% 까지 증가했지만 불안한 상태에서 60% 까지 감소하는 결과를 관찰 할 수 있었다.

이후 실험을 종료할때 까지 VLR을 18.23 kg SCOD/m³·day 까지 낮추어 갔지만 SCOD 제거율은 70% 전후에서 불안정한 상태를 나타내었다.

위 실험의 결과 유입수 농도가 20 g SCOD/l인 UBF-B에서는 VLR 20 kg SCOD/m³·day적용시 SCOD 제거율이 80% 정도 임을 보여주지만 매우 불안한 상태로서, 운전초기의 과부하 적용으로 인한 활성 미생물의 유실과 충격으로 판단된다.

2. CH₄ 가스 발생

상기 2개의 반응조에 대해 운전기간에 따른 VLR 변화와 메탄 가스 발생량을 비교하여 Fig. 4, Fig. 5에 도시하였다.

Fig. 4에 나타난 바와같이, UBF-A 반응조에서는 운전 시작 후 26일부터 메탄가스 발생량이 점차 증가하는 경향을 볼 수 있다.

운전 시작후 58, 66, 89일째 VLR을 13.69, 15.07, 16.58 kg COD/m³·day로 단계적 증가에 따라 메탄 가스량도 7.63-9.35, 9.32-12.2, 9.12-13.4 l CH₄/day (at STP)로 증가하였으나, 104일째 VLR을 18.23 kg SCOD/m³·day으로 증가시켜 14일 동안 운전하였으나 메탄가스 발생량은 더 이상 증가 추세를 보이지 않았다.

119일째 VLR을 20.06 kg SCOD/m³·day으로 증가시킨후 20일동안 운전하였을때 메탄가스 발생량은 6.69-8.42 l CH₄/day(at STP)로 감소하였고 136일째 VLR을 직전 상태인 18.23 kg COD/m³·day로 감소한 결과 7.77-11.9 l CH₄/day(at STP)정도로 다시 메탄가스 발생량의 증가상태를 보여주었다.

위 실험의 결과 유입수 농도 10 g SCOD/l, 최대 적용 가능 VLR 18.23 kg SCOD/m³·day로 운전한 경우 메탄가스 발생은 7.77-11.9 l CH₄/day(at STP)로서 최대 메탄가스 발생율로부터 메탄가스 회수율을 구하면 0.15 l CH₄/g SCODadded (at STP)를 얻을 수 있었다.

위의 메탄가스 발생량에 대한 실험결과 UBF-A 반응조의 경우 HRT 13h, VLR 18.23 kg SCOD/m³·day에서 최대 2.84 l CH₄/l·day의 값을 보여

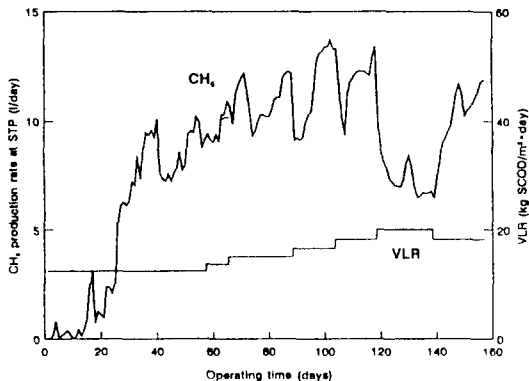


Fig. 4. Relationship between CH₄ production rate and VLR during the operating time of UBF-A reactor.

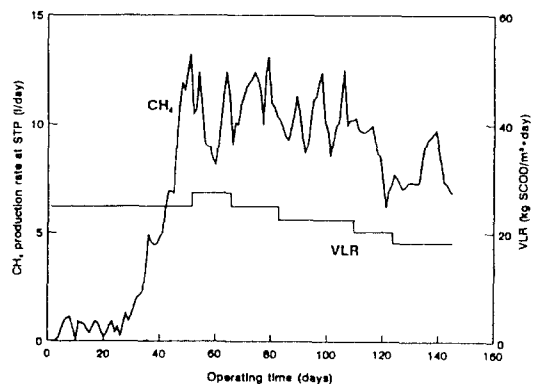


Fig. 5. Relationship between CH₄ production rate and VLR during the operating time of UBF-B reactor.

주었다. 국내의 경우는 UBF반응조에 의한 침출수 처리는 아직 보고되지 않은 상황이며 조 등¹⁰⁾에 의해 실험실 규모의 순환 UBF 반응조에 주정폐수를 적용된 적이 있는데 VLR은 $10.6 \text{ kg SCOD/m}^3 \cdot \text{day}$ 까지 적용하였고 최대 $2.40 \text{ l CH}_4/\text{l} \cdot \text{day}$ 의 결과를 발표하였다. 외국의 경우 Kennedy 등⁴⁾에 의한 UBF와 DSF의 침출수 처리결과를 보면 UBF의 경우 HRT 1.5days, VLR $14.5 \text{ kg SCOD/m}^3 \cdot \text{day}$ 에서 최대 $6.18 \text{ l CH}_4/\text{l} \cdot \text{day}$ 와 DSF의 경우 HRT 1.5days, VLR $14.7 \text{ kg SCOD/m}^3 \cdot \text{day}$ 에서 최대 $4.60 \text{ l CH}_4/\text{l} \cdot \text{day}$ 의 결과를 보고하고 있다. 이들의 높은 가스 발생량은 HRT가 본 실험에 비해 UBF의 경우 3.7배정도 길기 때문으로 생각되며, DSF반응조 역시 HRT를 감안한다면 본 실험의 UBF-A반응조와 유사한 양의 메탄가스를 발생한 것으로 생각된다. 또, 대만의 Chang⁹⁾의 경우 UBF반응조를 사용하여 침출수를 처리했을 때 HRT 2.16 days, VLR $12.80 \text{ kg SCOD/m}^3 \cdot \text{day}$ 에서 최대 $6.55 \text{ l CH}_4/\text{l} \cdot \text{day}$ 의 값을 얻었음을 보고하였다. 본 실험의 결과와 비교할때 기존의 대부분의 반응조 실험에서는 높은 VLR에 대한 반응조 적응능력의 우려때문에 대부분 낮은 값의 VLR을 유지한 후 점차 이를 늘려가는 추세였으나, 조의 관리어부에 따라서는 초기부터 높은 VLR을 적용하여도 충분히 미생물이 적응할 수 있다는 결과를 얻을 수 있었으며, 이는 앞으로의 혐기성 폐수처리에 있어서 현재 가장 난점중의 하나인 HRT를 줄일 수 있다는 점을 생각해보면 앞으로 많은 실험이 시행되어야 한다고 생각된다.

Fig. 5는 UBF-B의 경우로서, 운전시작 45일째까지는 초기 VLR $24.91 \text{ kg SCOD/m}^3 \cdot \text{day}$ 값의 변화가 없음에도 불구하고 매우 불안정한 메탄 가스 발생량을 나타내고 있다.

운전시작 46일 부터 51일까지는 메탄가스를 발생함으로서 $6.82\text{-}15.9 \text{ l CH}_4/\text{day}$ (at STP)의 매우 심한 변화를 나타내었다. 반응조의 성능을 알아보기 위해 52일째 VLR을 $27.4 \text{ kg SCOD/m}^3 \cdot \text{day}$ 으로 증가한 결과 메탄 가스 발생율은 $8.18\text{-}12.4 \text{ l CH}_4/\text{day}$ (at STP)로 줄어들면서 매우 불안정한 상태를 나타내고 있어, 안정 상태인지를 확인할 수 없었다.

운전시작후 66, 83, 110, 124일째 VLR을 $24.91, 22.42, 20.18, 18.16 \text{ kg SCOD/m}^3 \cdot \text{day}$ 으로 감소하였음에도 메탄 가스 발생량은 계속 불안정한 상태에서 감소하는 방향으로 진행되었다.

3. 반응조 성능

Guiot와 Van den berg⁶⁾에 의하면 반응조 내부에서 기질 축적이 없다면 반응조에 축적되는 미생물량은 TCOD와 총 유출 COD의 차이로 구할 수 있다고 제시하였으나, 이는 정상상태에서 이루어 지는 것으로 보고하였다. 미생물 축적은 다음 식으로 표시할 수 있다.

$$R_{X_a} = DS_o \cdot (DC_o + R_{CH_4})$$

여기서, R_{X_a} : 미생물 축적율

$$(\text{g VSS or g COD/l, 전환 배수;} \\ 1.42 \text{ g COD/g VSS})$$

D ; 반응조의 회석율 ($Q/V ; d^{-1}$)

S_o ; 유입수내의 용존성 유기물 (g COD/l)

C_e ; 유출수내의 (용존성+입자상) 총 유기물 (g COD/l)

R_{CH_4} ; 메탄생성율

$$(\text{l CH}_4 \text{ or g CH}_4\text{-COD/l} \cdot \text{day,} \\ 0.35 \text{ l CH}_4/\text{g COD at STP})$$

또한 아래의 식과 같이 R_{X_a} 값을 COD제거율로 나누면 유입 SCOD 1g 제거시 미생물 증식량인 축적수율 계수 Y로 바꿀수 있는데, Fig. 6과 같이 0.35에서 총 COD 제거율 對 메탄 생성율의 직선 회귀식 기울기 값을 빼면 계산할 수 있다.

$$Y = R_{X_a} / \text{SCOD removal rate}$$

여기서, Y ; 미생물 축적 수율 계수

$$(\text{g VSS/g SCOD removal})$$

$$\text{SCOD removal rate (g SCOD/l} \cdot \text{day)}$$

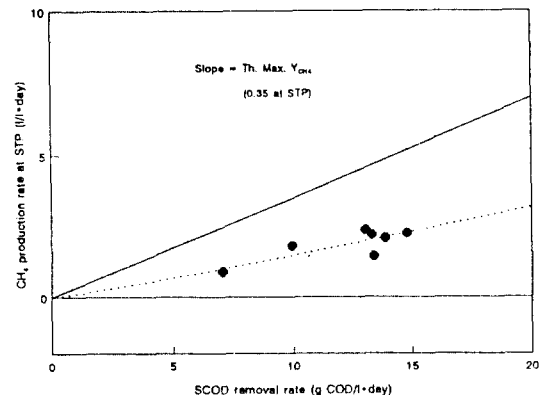


Fig. 6. Effect of SCOD removal rate on methane gas production rate at UBF-A reactor.

Table 3. Summary of published true growth yields for methanogenic consortia utilizing complex substrates

Reactor type	Substrate	Temp. (°C)	Y(g VSS/g COD)
UASB	wood ethanol stillage	37	0.191
stir/settle	stillage	35	0.142
-	glucose	25	0.170
contact	glucose/peptone beef extract	35	0.192
semicontinuous contact	glucose	35	0.208
contact	piggery effluent	35	0.213
UASB	glucose+GAC	35	0.140
This study	Leachate	37	0.400

Table 3은 지금까지의 여러 연구자들의 미생물 축적 수율 계수를 정리한 것이다.

UBF-A의 경우 Y의 평균값은 각각 0.4 g VSS/g SCOD rem로서 이와 같은 결과는 UBF 반응조 내에서 활성 미생물의 유지 능력이 우수함을 판단할 수 있었다.

IV. 결 론

UBF 반응조를 이용한 매립장 침출수의 혐기성 처리에 관한 연구결과는 다음과 같다.

1. 침출수 유입 농도가 10 g SCOD/l인 경우, UBF 반응조에 의한 적용 가능 부하율이 18.23 kg SCOD/m³·day로서 SCOD 제거율이 90% 이상이고 HRT 13 시간으로 단축시킬 수 있음을 알 수 있다.

2. 유입수 농도 10 g SCOD/l, 최대 적용 가능 VLR 18.23 kg SCOD/m³·day로 운전한 경우 메탄 가스 발생은 7.77-11.9 l CH₄/day(at STP)로서 최대 발생율로 부터 메탄가스 수율을 구하면 0.15 l CH₄/g SCODadded(at STP)를 얻을 수 있었다.

3. 미생물 축적 수율 계수 Y의 평균값은 0.4 g VSS/g SCOD rem로서 이와 같은 결과는 UBF 반응조 내에서 활성 미생물의 유지 능력이 우수함을 판단할 수 있었다.

참고문헌

1) Pohland, F.G. and S.R. Harper. : Critical Review and Summary of Leachate and Gas Production

from Landfills, EPA/600/2-86/073, U.S. Env. Prot. Agency, Washington, D.C., 1986.

2) Chian, E.S.K. and F.B. Dewalle. : Sanitary Landfill Leachates and their Treatment, ASCE, 102(EF-2), 411, 1976.

3) Boyle, W.C. and Ham, R.K. : Biological Treatability of Landfill Leachate, *J. WPCF*, **46**(5), 860-872, 1974.

4) Kennedy, K. J., Hamoda, M. F. and Guiot, S. G. : Anaerobic Treatment of Leachate using Fixed Film and Sludge Bed Systems, *J. WPCF*, **60**(9), 1675-1683, 1988.

5) Keenan, P.J., Iza J., and Switzenbaun, M.S. : Inorganic Solids Development in a Pilot-Scale Anaerobic Reactor Treating Municipal Solid Waste Landfill Leachate, *J. Water Environment Research*, **65**(2), 181-188, 1993.

6) Guiot, S. R. and Van den berg, L. : Performance of an Upflow Anaerobic Reactor Combining a Sludge Blanket and a Filter Treating Sugar Waste, *J. Biotech. Bioeng.*, **27**, 800, 1985.

7) American Public Health Association : Standard methods for the examination of water and wastewater, 18th ed., N.Y., 1992.

8) Campos, C. M. M. and Anderson, G. K. : The Effect of Liquid Upflow Velocity and the Substrate Concentration on the Start-up and Steady-state Periods of Lab-scale UASB Reactors, *J. Wat. Sci. Tech.*, **25**(7), 41-50, 1992.

9) Juu-En Chang : Treatment of Landfill Leachate with an Upflow Anaerobic Reactor Combining a Sludge Bed and A filter, *J. Wat. Sci. Tech.*, **21**, 133-143, 1989.

10) 조재경, 문광은, 홍종준 : UBF 반응기를 이용한 주정 폐기물의 혐기성 처리에 관한 연구, 한국폐기물학회지, **8**(1), 21, 1991.