

입상미생물을 이용한 고농도 유기성폐수의 혐기성처리

임재명* · 한동준** · 전태성*** · 이현주****

Anaerobic Treatment of High Strength Organic Wastewater by Granulated Microorganism

Jay-Myoung Rim* · Dong-Joon Han** · Tae-Sung Jun*** · Hyun-Joo Lee****

ABSTRACT

This research aims to find granulation and organic removal of the piggery wastewater with the upflow blanket filter(UBF) reactor. UASB process had the effect of high pH on the granulation phase. But the effect was decreased after the granule formation. The filter zone of the UBF reactor had the function of GSS and contributed to removing the organic because of its biofilm formation. The removal rates of total COD and soluble COD were 70 ~ 80% and 60 ~ 80% at an influent organic loading range of 2 ~ 17.4 kgCOD/m³ · d, respectively. The methane production rate with the organic removal was 0.21 ~ 0.34 l CH₄/gCOD_{rem} and the maximum methane production rate was 0.34 CH₄ l/gCOD_{rem} at the volumetric loading 5 kgCOD/m³ · d.

1. 서 론

수질오염에 대한 사회적 관심의 고조로 각 오염원에 대한 처리대책이 시급한 실정이다. 그동안 국내에는 정책적으로 도시하수를 중심으로 1995년 말 기준 총 71개소의 하수종말처리시설이 건설되었으나 축산

폐수와 같은 고농도 유기성폐수에 대한 대책은 아직 미흡하다고 할 수 있다. 특히 축산폐수중 돈사폐수는 오염물질의 발생형태로 볼때 점오염원(point source)에 가까우며, 고농도 유기물과 영양염류를 함유하고 있어 미처리시 지하수오염 및 지표수의 부

* 강원대학교 환경공학과 교수

** 강원대학교 시간강사, 공학박사

*** 충주산업대학교 환경공학과 교수

**** 용인대학교 강사, 공학박사

영양화를 유발하게 된다.

고농도 유기성폐수처리에 있어 혐기성처리는 오래전부터 적용되어 CH_4 가스와 같은 에너지의 회수, 슬러지 발생량 감소등 많은 장점을 보여주었으나 반응조내의 체류시간이 길어 규모가 대형화되는 문제를 지니고 있었다. 그러나 최근에는 많은 고율혐기성 반응조의 개발로 점차 해결되었고, 특히 Lettinga등⁽¹⁾에 의하여 개발된 UASB(upflow anaerobic sludge blanket)공정은 현재 많은 유기폐수 및 산업폐수에 적용되고 있으며, 최근에는 생활하수와 같은 저농도폐수에도 이용되고 있다. UASB공정은 혐기성 미생물의 granule형성으로 고농도의 미생물을 확보할 수 있어 고부하 적용등의 장점을 지니고 있으나, 식중 초기와 gas의 발생과 함께 활성미생물의 유출등의 문제를 유발하기도 한다. 따라서 UASB공정에서는 상부의 gas와 고액분리를 위한 GSS(gas solid separator)장치가 필수적으로 필요하며 이에 대한 개발도 많이 이루어지고 있다. Guiot와 Berg⁽²⁾는 GSS장치 대신 반응조의 상부에 플라스틱 여재를 충전한 UBF공정을 개발한 바 있다. 또한 Samson과 Guiot⁽³⁾는 UBF반응조의 혼합특성 연구에서 재순환이 없는 조건에서 약 18%의 dead space가 있음을 밝혔고, 당폐수를 이용하여 COD부하 $25 \text{ kg/m}^3/\text{d}$ 에서 용존성 COD를 95% 제거하였음을 보고한 바 있다.

본 연구에서는 UBF 공정을 이용하여 고농도 유기성폐수인 돈사폐수의 유기물제거와 granule의 형성을 검토하고자 하였다.

2. 실험재료 및 방법

2.1 폐수의 성상

본 실험에 이용된 돈사폐수는 시멘트형 돈사시설의 저류조에서 채취한 것으로 연구 수행기간동안 동일한 돈사목장에서 채취하여 돈사시설 및 청소방법등의 형태에 따른 성상의 변화는 없는 것으로 판단되나, 계절별 용수사용량과 온도에 의한 영향이 뚜렷히 나타났다.

다음 Table 1은 실험기간 동안의 돈사폐수 성상을 계절별로 나타낸 것으로 모든 항목에 있어 큰 차이를 보이고 있다. 특히, 여름철의 경우 $PO_4\text{-P}$ 를 제외하고 모든 항목에 있어 낮은 농도를 보이고 있다. 이는 돼지의 용수사용량이 많고 돈사의 청소회수가 많아 청소수에 의한 희석의 원인을 가장 먼저 생각할 수 있으며, 또한 대기의 온도상승에 인한 저류조에서의 유기물 분해 및 질소성분의 탈기를 고려할 수 있다. 특히 인의 존재형태의 변화, 즉 여름철의 T-P농도가 다른 계절보다 낮음에도 불구하고 $PO_4\text{-P}$ 의 농도가 다른 계절보다 높은 것은 온도에 의한 영향과 저류조 바닥 혐기성층에서 인의 용출(release)이 일어나는 것으로 판단된다. 사계절 중 여름철을 제외하고는 비교적 농도의 변화가 적게 나타났으나, 가장 농도가 높은 것은 봄철(3 ~ 5월)인 것으로 나타났다. 유기물농도인 COD는 $2,800 \sim 3,400 \text{ mg/L}$, TKN $670 \sim 790 \text{ mg/L}$, 그리고 T-P는 $180 \sim 200 \text{ mg/L}$ 의 범위를 보여주었다. SS의 경우는 계절에 따라 많은 차이를 보이는데, 이는 저류조의 청소와도 관계되며, 특히 여름에는 온도상승으로 인한 침적 고형물의 rising현상으로 매우 높게 나타나는 경우도 있었다.

2.2 실험 장치

실험장치는 Figure 1에 제시된 바와 같이 혐기성반응조(UBF) 2개가 이용되었다.

Table 1. Seasonal variations of piggery wastewater.

(unit : mg/L)

Season (Month) Constituents	Spring (3 - 5)	Summer (6 - 8)	Autumn (9 - 11)	Winter (12 - 2)
pH	8.4~9.5	8.0~8.7	8.1~9.3	8.7~9.4
SS	540~760	320~1254	250~440	240~520
SCOD _{cr}	1800~2600	1500~2200	1800~2300	1800~2500
TCOD _{cr}	2800~3400	2400~2700	2600~3100	2800~3300
TKN	670~790	400~550	580~700	650~800
NH ₃ -N	580~710	310~450	510~660	530~680
T-P	180~200	130~170	170~200	170~200
PO ₄ -P	40~50	70~80	40~55	30~40
Alkalinity (asCaCO ₃)	1800~2900	1200~1800	1900~2700	2200~2900

반응조의 폐수 주입방식이 upflow 시스템으로 내부 직경 9cm, 총 높이 155 cm의 원형 아크릴판으로 제작되었다. 반응조의 총 용적은 6.68 L이고 상부여유고 10cm를 제외한 유효용적은 6.04L이다. 반응조 하부 60cm는 미생물의 granule이 형성될 수 있는 UASB형태이고, 상부 35cm에는 망상형 여재를 5cm × 5cm 크기로 충전한 anaerobic filter의 형태를 갖추었다.

상부 filter의 역할은 활성슬러지의 유실을 막기 위하여 UASB공법에서의 GSS장치의 역할을 하게된다. 또한 높이별 반응조의 상태를 파악하기 위한 sampling port를 24cm간격으로 3개를 설치하였고, gas가 유출되는 반응조의 상부에는 포집장치를 설치하였다. 혐기성분해로 발생하는 gas량의 측정은 포화 식염수를 넣은 용기에서 부력식으로 이루어졌다. 폐수의 주입은 미량펌프를 이용하여주입하였으며, 처리수는 용량 2L의 침전지를 거친 후 유출되었다. 모든 실험은 35℃의 중온에서 이루어졌으며, 가온은 heating bar에 의하여 외부 가온하였고, 균등한 온도유지를 위하여 가온조에 air를 주입하여 혼합하였다.

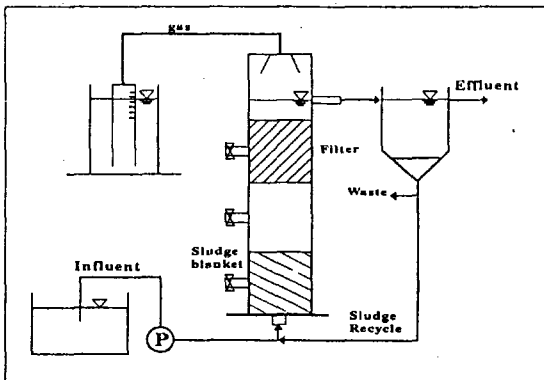


Figure 1. Schematic diagram of UBF reactor.

2.3 실험 방법

고율혐기성 반응조의 초기 식종(seeding)은 도시하수처리장의 소화슬러지를 이용하였다. 식종에 이용된 소화슬러지는 TS 31,160mg/L과 VS 17,180mg/L의 농도를 함

유하고 있으며, 반응조내의 sludge blanket 및 bed zone에 해당되는 약 4 L정도가 이용되었다.

운전 초기에는 유입폐수의 pH를 약 7.1 내외로 조절하였으며, 유기물 용적부하 (volumetric loading rate : 이하 VLR)도 0.5 ~ 2 kgCOD/m³/d의 낮은 범위에서 운전되었다. 운전일수 185일 이후에 유입폐수의 pH를 조절하지 않고 주입하여 적응기간 동안의 pH의 영향을 검토하였다. 그러나 pH의 충격으로 유출수 수질이 악화되어 다시 유입폐수의 pH를 7.3 ~ 7.5 내외로 조절하였다.

운전일수 617일 부터는 유입폐수의 pH를 조절하지 않고 주입하였는데 pH는 8.5이상이었다. Sludge blanket의 상부 bed층에서의 granule 형성은 운전시작 후 약 230일 부근에서 관찰되었고 처리수및 gas발생량 등이 안정됨을 나타내었다. 유기물 용적부하의 변화는 유입수 유량변화로 이루어졌으며, 정상상태에서의 유기물 부하변화는 2 ~ 17.4 kgCOD/m³/d 범위였다. 시료채취 및 분석은 4 ~ 5일 주기로 이루어졌으며, gas발생량은 매일 정기적으로 측정하였고 gas의 성분분석은 gas chromatography (GOW-MAC INS. CO. SERIES 150 TCD, U.S.A)를 이용하여 각 부하별 대표시료에 대하여 3회 이상 실시하였다. 반응조내의 미생물 관찰은 SEM(scannig electron microscope: model HITACHI S-2500)을 이용하였는데, 전고정(1%paraformaldehyde - 1% glutaraldehyde in 0.12M cacodylate buffer : 4°C, 2시간)과 후고정 (2% OSO₄ in cacodylate buffer : 4°C, 2시간) 을 거친 후 gold 코팅을 하였다.

다음 Table 2에는 고율 혐기성 반응조인 UBF의 운전조건을 나타내었다.

Table 2. Operational conditions of UBF reactor.

Items	Operational Range	
	Start-up	Steady State
Reactor Volumn (L)	6.04	6.04
Flow Rate (L/day)	1.9~6.5	6.5~21.3
HRT (days)	1.5~5.1	1.5~0.2
VLR (kgCOD/m ³ /d)	0.6~2.3	2.0~17.4
Temperature (°C)	35±2	35±2
Recycle Rate (XQ _{inf})	2~4	0~2
Operation Period (days)	230	500

3. 결과 및 고찰

돈사폐수를 처리하기 위하여 적용된 UBF공정은 식중에서 부터 granule이 형성 되기까지 약 230일이 소요되었으며, 입자의 크기도 초기 발전단계로 간주되는 매우 작은 것으로 관찰되었다. 그러나 처리수에 있어서는 비교적 안정된 상태를 보였으며, 입자의 크기는 점점 커짐을 알 수 있었다. 본 실험이 수행된 730여일의 반응기간중 granule의 형성은 계속 진행되었으며, 약 600일 부터 뚜렷히 나타났다.

Figure 2는 실험기간동안 운전된 조건을 도식화한 것으로 전체 운전기간은 약 730일 동안 진행되었고, 반응조내의 HRT는 적응기간인 230일 동안은 약 1.5 ~ 5일로 운전되었으며, 정상상태에서는 0.2 ~ 1.5일로 운전되었다. 유입 유기물 용적부하는 낮은 부하에서 높은 부하로 유량의 증가로 이루어졌으며, 2.0 ~ 17.4 kgCOD/m³/d의 범위에서 운전되었다. UASB공정의 초기운전시 pH는 입자의 형성에 영향을 주는 것으로 알려져 있다. 혐기성 미생물의 생화학적경로에 있어 pH의 영향은 산형성 미생

물과 메탄생성미생물로 구분되어 연구되었다. Zoetemeyer등⁽⁴⁾은 pH 5.8 ~ 6.2범위에서 활발한성장이 일어남을 보고한 바 있으며, Zehnder등⁽⁵⁾은 메탄생성균의 pH와 온도의 영향에서 적정 pH는 7.5내외임을 밝혔다. 또한 실험실규모의 UASB공정 연구에서 Brummeler등⁽⁶⁾은 pH 6.0 ~ 7.5범위에서 입자의 형성이 잘 이루어졌음을 보고하였다. 그러나 그들은 반응조내의 최적 pH 조건은 과부하로 인한 산(acid)의 충격을 완충하기 위하여 6.7 ~ 7.5의 범위를 추천하였다. 본 실험에서는 돈사폐수의 pH가 약 8.5 이상으로 너무 높아 초기 유입폐수를 pH 7.1로 조절하여 운전하였고 185일째에 pH조절하지 않고 유입한 결과(pH : 8 ~ 9), 처리수가 급격히 악화되었으며, gas의 발생도 작게 나타났다. 따라서 그 후 유입폐수의 pH를 7.3과 7.5로 조절하여 주입하였다. 그리고 입자의 형성이 완전히 이루어진 반응시간 617일 이후에는 pH조절 없이 주입하였다.

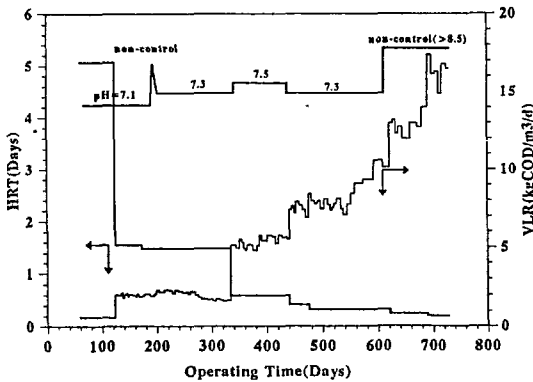


Figure 2. Variations of organic loading rate, pH and HRT with operating time.

Figure 3 과 Figure 4 는 운전기간에 따른 유입수와 처리수의 TCOD 및 SCOD의 수질을 나타낸 것으로 유입수의 농도는 계절의 변화에 따라 많은 차이를 나타내고 있으나 유출수의 농도는 부하에 따라 다소

차이는 있으나 비교적 안정된 수질로 나타났다. 운전초기 pH의 영향을 파악하기 위하여 pH 조절없이 주입한 결과, 현저히 수질이 악화되었으며 정상상태로 회복되는 기간도 약 10일 정도가 소요되었다. 그러나 입자의 형성이 완전히 이루어졌다고 판단되는 운전 마지막단계에서는 유입수의 pH가 8.5 이상으로조절을 하지 않았음에도 불구하고 유출수 수질은 식중 초기 pH영향과 비교할 때 영향이 적은 것으로 나타났다. 따라서 돈사폐수와 같은 높은 pH를 지나는 폐수에 있어서는 입자의 형성단계에서는

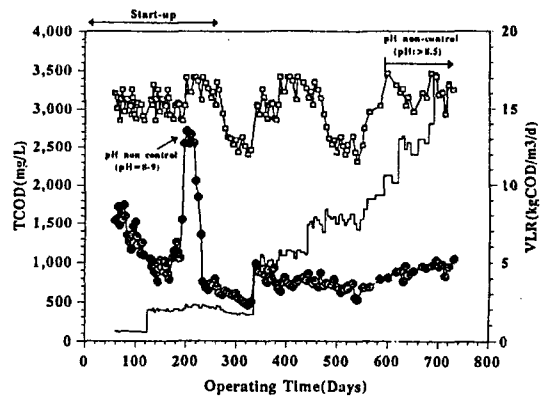


Figure 3. Variations of TCOD concentration with operating time.

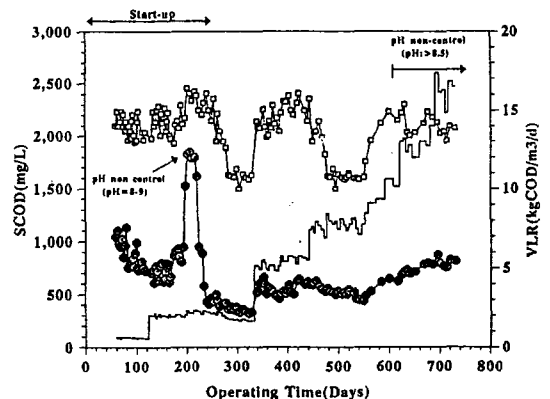


Figure 4. Variations of SCOD concentration with operating time.

pH의 조절이 필수적이며, 입자의 형성이 충분히 이루어진 경우에는 pH의 영향이 적은 것을 알 수 있었다.

Figure 5는 용적부하에 따른 유기물 제거율과 유출수의 농도를 나타낸 것으로 용적부하 2 ~ 17.4 kgCOD/m³/d범위에서 TCOD의 제거율은 약 70 ~ 80%범위이고, SCOD의 제거율은 60 ~ 80 %의 범위로 나타났다. 반응조 초기의 낮은 부하에서 비교적 제거효율이 높지 않은 것은 입상화가 완전히 진행되지 않은 상태인 것으로 판단된다.

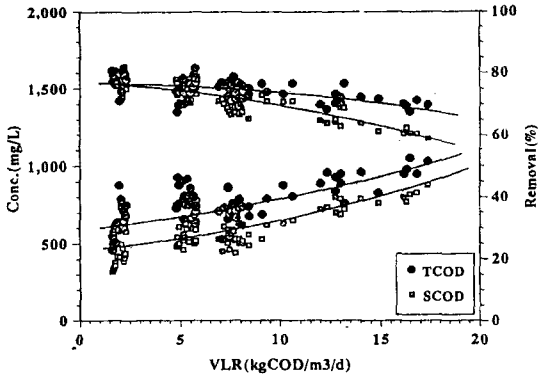


Figure 5. Effluent TCOD and SCOD conc. and total removal rate with VLR.

Figure 6은 용적부하에 따른 sludge blanket층의 MLSS와 MLVSS의 농도를 나타낸 것으로 용적부하 10 kgCOD/m³/d까지는 급속한 증가를 보였으며, 이때의 MLSS와 MLVSS는 각각 38g/L와 27g/L이었다. 그리고 최대 평균부하인 16.3 kgCOD/m³/d에서는 MLSS와 MLVSS가 각각 43.5 mg/L, 31.4 mg/L로 매우 높게 유지되었다. 일반적으로 유입부하량이 증가될수록 SS에 대한 VSS의 함량(VSS/SS)은 감소되는 경향을 나타내는데, 본 실험 결과에서는 다소 증가되는 것으로 나타났

다. 이는 유입 돈사폐수의 VSS/SS비가 약 0.8이상으로 높아 반응조내의 MLVSS에 다소 영향을 준 것으로 판단된다.

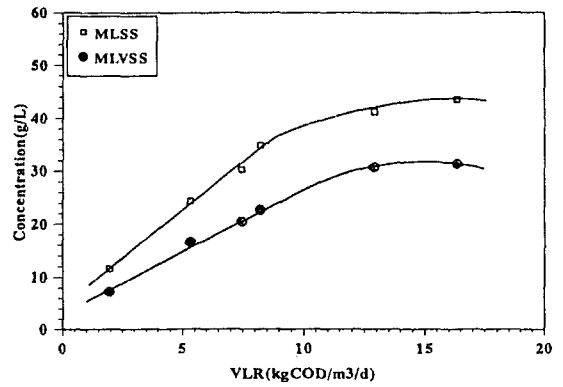


Figure 6. MLSS and MLVSS conc. with VLR.

Figure 7은 용적부하에 따른 침전지 유입전 UBF반응조 유출수의 VSS농도를 나타낸 것으로, 부하량의 증가, 즉 유입유량과 gas발생량의 증가로 인한 상향유속의 증가로 VSS유출량은 크게 증가하는 것으로 나타났다. 또한 고형물과 gas를 분리하기 위하여 설치한 상부의 여재층에 미생물막이 형성되었고 운전기간이 길어짐에 따라 미생물의 탈리(sloughing)와 축적 고형물이 유속과 함께 씻겨 나가는 것으로 판단된다. 따라서 상부 여재층은 UASB의 GSS장치의 역할과 미생물막을 형성하여 anaerobic filter의 기능을 하는 장점은 있으나 장시간 운전될 경우 유출수의 VSS농도를 증가시키는 문제를 지니고 있다. 그러나 생물막에서 탈리된 슬러지는 침강성이 양호하므로 호기성반응조에서의 SS영향은 없는 것으로 나타났다.

Figure 8은 용적부하에 따른 VSS당 COD제거율을 나타낸 것으로 용적부하가 커짐에 따라 제거율도 크게 나타났으며,

0.65~1.1 gCOD/gVSS/d의 범위를 나타내었다. Samson과 Berg⁽³⁾는 당 폐수처리에서 용적부하 25 kgCOD/m³/d 까지는 거의 직선의 증가를 보이고 25 kgCOD/m³/d 이상에서 최대 제거율인 약 1.2 gCOD/gVSS/d로 일정한 값을 유지하는 것으로 보고하였다. 본 실험에서 수행된 부하의 범위는 미생물당 기질의 제거율의 경향으로 볼때, 계속적인 증가를 나타내고 있어 더 높은 부하로 운전하여도 가능할 것으로 판단된다.

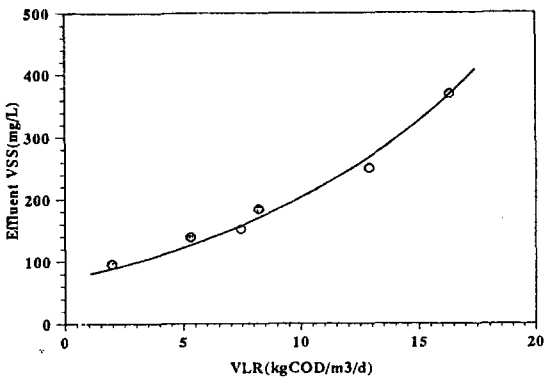


Figure 7. Effluent VSS conc. with VLR.

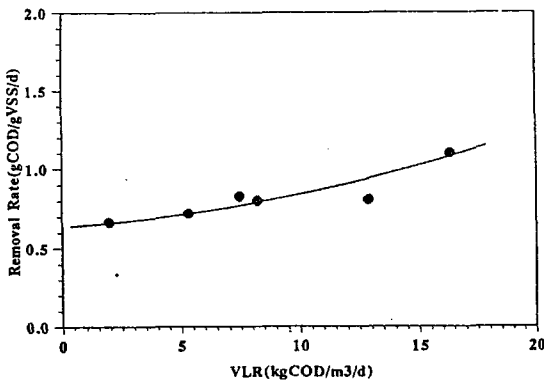


Figure 8. COD removal rate with VLR.

Figure 9와 Figure 10은 운전기간 동안 gas발생량과 유기물 용적부하에 따른 gas 발생량 및 유기물제거당 메탄 gas발생량을

나타내고 있는데, 용적부하가 증가함에 따라 gas발생량도 급격히 증가하여 부하변화 경향과 거의 유사하게 나타났다. 그러나 총 gas의 발생량은 부하증가와 함께 증가하였으나 유기물제거당 메탄 gas의 발생량은 용적부하 5 kgCOD/m³/d이상에서는 감소하는 것으로 나타났다. 이는 발생 가스중 메탄함량의 감소로 인한 것으로 판단된다.

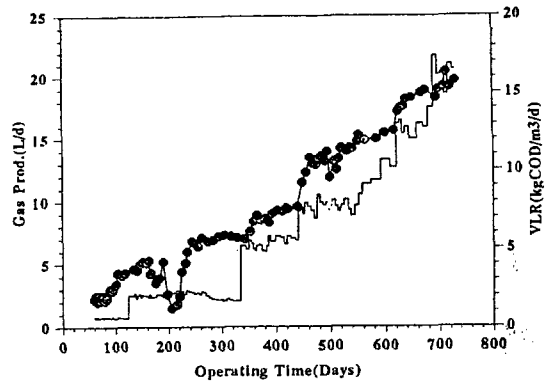


Figure 9. Variations of gas production rate with operating time.

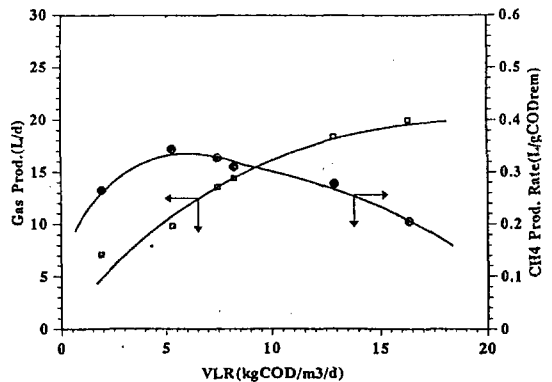


Figure 10 Gas and methane production rate with VLR.

이론적으로 1g의 COD 제거당 CH₄발생은 표준상태에서 0.35 L이나, 실제 35°C에서의 메탄의 발생량은 온도보정과 증기압

을 보정하면 약 0.418 L이다. 따라서 본 실험에서의 최대 메탄가스발생량은 0.34 L/gCOD_{rem}로서 이론치인 0.418 L보다 작게 나타났다.

다음 Table 3 에는 고율혐기성 공정인 UBF공정을 이용하여 돈사폐수를 처리한 결과를 요약하였다.

Table 3. Experimental results of piggery wastewater treatment using UBF reactor.

Items	HRT(hrs)	36	14	10	8	6	4
VLR (kgCOD/m ³ /d)		1.94	5.31	7.45	8.22	12.89	16.33
Sludge blanket zone(g/L)							
MLSS		11.6	24.3	30.2	34.8	41.2	43.5
MLVSS		7.3	16.6	20.5	22.7	30.7	31.35
Removal rate (%)							
TCOD		80	77	76	74	72	70
SCOD		79	75	72	69	65	61
Effluent conc.(mg/L)							
pH		7.6	8.1	7.6	7.6	8.0	7.7
TSS		127	217	245	252	350	480
VSS		96	139	152	184	250	370
Alkainity(as CaCO ₃)		2,092	2,690	1,793	1,825	2,380	2,200
Alkalinity prod. rate (as CaCO ₃ /COD _{rem})		0.04	0.17	0.10	0.03	0.02	0.04
Gas production (L/d)		7.1	9.8	13.6	14.4	18.4	20.0
CH ₄ contents (%)		79	84	82	79	75	71
CH ₄ prod. rate (L/gCOD _{rem})		0.266	0.344	0.327	0.310	0.278	0.205

Figure 11은 UBF반응조의 유기물 용적 부하 약 15 kgCOD/m³/d 인 마지막 단계에서 sludge blanket 지역의 biopellet을 SEM을 이용하여 관찰한 사진으로 육안에 의한 granule의 크기는 약 2~5 mm내외 였으며, 색깔은 검은색을 지니고 있었다.

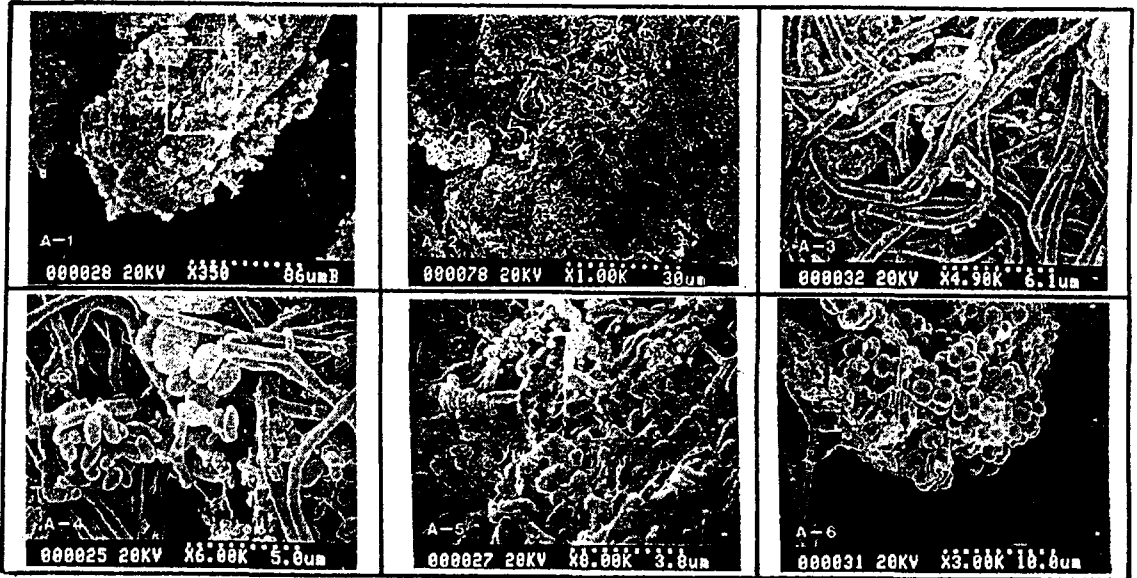
일반적으로 granule sludge의 미생물상은 SEM 과 X-ray 촬영으로 관찰되어 왔으며, 지금까지 널리 알려진 미생물은 *Methanothrix soehngenii*^(6, 7), *Methanobacterium*, *Methanobrevibacter*, and *Methanosarcina*^(8, 9) 등이다. 또한 McLead 등⁽¹⁰⁾은 granule내의 미생물을 세 개의 층

으로 구분하여 보고한 바 있는데, 내부 핵층은 *Methanothrix*로 구성되고 이들은 초기 granule형성에 필수적임을 주장하였다. 그리고 중간층은 수소생성균과 수소이용 미생물 모두를 포함하는 rod형태의 미생물이 우점하고, 외부 층에는 rod, cocci 그리고 filamentous형태의 미생물이 혼합되어 나타나는 것으로 보고하였다.

Figure 11 은 본 연구의 granule내에 포함된 미생물상을 SEM으로 관찰한 것으로 전처리 후 절단등을 수행하여 고찰하였다.

사진<A-1>은 biopellet의 전체형상을 고찰하기 위한 것으로 전처리과정에서

Figure 11. Scanning electron micrograph of biopellet in UBF reactor.



granule의 형상이 다소 변형되었다. 사진 <A-2>에서 <A-4>는 biopellet의 갈라진 부분을 촬영한 것으로 acetate를 기질로 하는 filaments 형태의 *Methanotrix*가 주종을 이루고 있었으며, <A-6>에서 나타난 바와 같이 cocci 형태의 수소이용 메탄생성균인 *Methanobrevibacter*로 추측되는 균락이 포도송이 모양으로 형성되어 있었다. 또한 전처리를 거친 biopellet은 약 4 ~ 5 mm 정도 크기였으며, 이를 mess를 이용하여 약 1 ~ 2 mm의 크기로 granule 형성단계에서는 높은 pH의 영향이 크게 나타났으나, granule이 형성된 후에는 pH 8.5 이상에서 pH의 영향이 초기단계 보다 적은 것으로 나타났다.

잘라 내부층 관찰을 수행하였는데 다음 <A-5>사진과 같이 나타났다. 입상슬러지의 내부에는 다량의 점액질인 체외폴리머 성 물질(extracellular polymer : ECP)로 덮혀 있음이 확인되었다.

4. 결 론

- 1) UBF 반응조의 운전초기에 있어 미생물의 granule 형성단계에서는 높은 pH의 영향이 크게 나타났으나, granule이 형성된 후에는 pH 8.5 이상에서 pH 영향이 초기단계 보다 적은 것으로 나타났다.
- 2) 유기물 용적부하 2 ~ 17.4 kg/m³/d 범위에서 TCOD와 SCOD 제거율은 각각 70 ~ 80%와 60 ~ 80%였으며, 용적부하에 따른 VSS당 COD 제거율은 0.65 ~ 1.1 gCOD/gVSS/d의 범위였다.
- 3) UASB공정의 GSS장치에 해당되는 UBF 반응조의 상부 filter는 gas와 고형물의 분리와 더불어 혐기성 생물막을 제공해 주므로 효율면에서 유리하나, filter의 생물막 탈리시 VSS의 유실이 나타나게 된다.
- 4) 유기물 제거에 따른 메탄 gas 발생량은 0.21 ~ 0.34 CH₄ L/gCOD_{rem}로서 용적부하 약 5 kgCOD/m³/d 에서 0.34 CH₄

L/gCOD_{rem}의 최대 메탄가스 발생량이 나타났다.

참 고 문 헌

- [1] Lettinga, G., "Feasibility of the Upflow Anaerobic Sludge Blanket Process", Proc. 1979 National Conf. on Eng. ASCE, San Francisco, 1979.
- [2] Guiot, S. and van den Berg, L. Performance of an Anaerobic Reactor combining a Sludge Blanket and a Filter Treating Sugar Waste. *Biotechnology and Bioengineering*, 27, 800-806, 1985.
- [3] Samson, R. and Guiot, S., Mixing Characteristics and Performance of the Anaerobic upflow Blanket Filter(UBF) Reactor, *J. Chem. Tech. Biotechnol.*, 35B, 65-74, 1985.
- [4] Zoetemeyer, R. J., van den Heuvel, J. C., and Cohen, A., pH Influence on Acidogenic Dissimilation of Glucose in an Anaerobic Digester, *Wat. Res.*, 16, 303-311, 1982.
- [5] Zehnder, A. J. B., Ingvorsen, K., and Marti, T., Microbiology of Methanobacteria. In: Anaerobic Digestion 1981, Hughes, D. E., et. al. (eds), Elsevier Biomedical Press B.V., 45-68, 1982.
- [6] Brummeler, E. T., Hulshoff Pol, L., Dolfing, J., Lettinga, G., and Zehnder, A. J. B., Methanogenesis in an Upflow Anaerobic Sludge Blanket Reactor at pH 6 on an Acetate - Propionate Mixture. *Appl. and Environ. Microbio.*, 49, 1472-1477, 1985.
- [7] Hulshoff, P. L. W., de Zeeuw, W. J., Velboer, C. T. M., and Lettinga, G. Granulation in UASB Reactor. *Wat. Sci. Tech.*, 15, 291-304, 1982.
- [8] Visser, F. A., van Lier, J. B., Macario, A. J. L., and de Macario, E. C., Diversity and Population Dynamics of Bacteria in A Granular Consortium. *Appl. Environ.* 57, 1728-1734, 1991.
- [9] Wu, W. M., Hu, J. C., Gu, X. S., Zhao, Y. Z., and Gu, G. G., Cultivation of Anaerobic Granular Sludge in UASB Reactors with Aerobic Sludge as Seed. *Wat. Res.*, 21, 789-799, 1987.
- [10] McLead, F. A., Guiot, S. R., and Costerton, J.W., Layered Structure of Bacterial Aggregates in An Upflow Anaerobic Sludge Bed and Filter Reactor. *Appl. Environ. Microbiol.*, 56 : 1598-1607, 1990.