



ORIGINAL PAPER

원저

## UASB 반응조를 이용한 매립지 침출수의 혐기성 처리

이채영<sup>†</sup>

수원대학교 토목공학과

(2006년 9월 30일 접수, 2006년 10월 25일 채택)

## Anaerobic Treatment of Landfill Leachate Using a Upflow Anaerobic Sludge Blanket Reactor

Chae-Young Lee<sup>†</sup>

Dept. of Civil Engineering, The University of Suwon

### ABSTRACT

Anaerobic treatment of landfill leachate was studied to investigate the behaviors of pollutant and the characteristics of microorganism for 10 months. The upflow anaerobic sludge blanket (UASB) reactor achieved about 90% chemical oxygen demand (COD) removal at organic loading rates (OLR) up to 20kg COD/m<sup>3</sup>.d. At higher OLR (18–20kg COD/m<sup>3</sup>.d), the propionate concentration increased, indicating that converting propionate to acetate was the rate-limiting step. Nevertheless, increase in the precipitate inside and on the surface of granules as well as on the wall of the reactor resulted in operational problems. The main inorganic precipitate in the granule was calcium compound. Although specific methanogenic activity (SMA) was not affected seriously in this study, metals had to be removed prior to anaerobic treatment so as to be free from the excessive inorganic accumulation that resulted in operational problems.

Keywords : Granular Sludge, Inorganic Precipitate, Landfill Leachate, Specific Methanogenic Activity, Upflow Anaerobic Sludge Blanket Reactor

### 초 록

침출수의 혐기성 처리시 오염물질 거동과 미생물 특성을 평가하기 위하여 10개월간 실험을 수행하였다. 상향류 혐기성 슬러지 블랭킷 (UASB) 반응조의 경우 최대 유기물 부하 20kg COD/m<sup>3</sup>.d까지 약 90%의 COD 제거율을 나타내었다. 높은 유기물 부하 (18–20kg COD/m<sup>3</sup>.d)에서는 프로피온산의 농도가 상대적

<sup>†</sup>Corresponding author (chaeyoung@suwon.ac.kr)

으로 증가하여 프로피온산의 초산으로의 전환이 율속단계로 나타났다. UASB 반응조를 이용한 침출수 처리는 높은 유기물 제거능에도 불구하고 입상슬러지와 반응조 내부 등의 무기물 축적으로 인한 운전상의 문제가 발생하였다. 입상슬러지 내 주된 무기물의 성분은 칼슘화합물로 나타났다. 본 연구에서는 비메탄 활성도의 급격한 감소는 발생되지 않았으나 무기물 축적으로 인한 운전상의 문제를 저감하기 위해서는 무기물 제거를 위한 전처리 공정의 도입이 필요할 것으로 판단된다.

핵심용어 : 입상슬러지, 무기침전물, 매립지 침출수, 비메탄 활성도, 상향류 혐기성 슬러지 블랭킷 반응조

## 1. 서론

매립에 의한 생활 폐기물의 처분 방법은 관련 기술의 발달로 자원순환에 중요한 역할을 수행하고 있으나 기존 매립지의 폐쇄로 인한 신규 매립지 확보, 악취와 침출수로 인한 잠재적인 환경 문제를 내포하고 있다. 특히, 우수와 침투수(seepage water)가 매립지 상부를 통해 유입되어 매립된 폐기물과 접촉하여 용존성 물질을 추출하면서 발생하는 침출수는 매립으로 인한 이차오염 중 가장 심각한 문제로 대두되고 있는 실정이다<sup>1)</sup>. 침출수 성상은 매립지내에서 발생하는 생물학적 작용뿐만 아니라 매립 폐기물의 특성, 매립년한 및 수리학적 특성에 따라 상이하다. 침출수는 유기물과 암모니아성 질소 및 중금속 등의 다양한 무기물이 고농도로 존재하여 처리시 많은 문제점을 야기하고 있다. 적절히 수집, 처리 및 처분되지 않은 침출수는 지하수, 토양 및 수자원의 잠재적인 오염원으로 작용함으로 방류 전에 적절한 처리를 수행하여야 한다.

초기 매립지에서 발생하는 유기물질은 대부분 용존성 상태로 존재하며, 주로 VFAs (volatile fatty acids)로 구성되어 있다. Chian (1977)은 침출수 내 총유기 탄소 (total organic carbon) 중 약 49%가 VFAs로 구성되어 있으며 상대적으로 높은 BOD/COD 비를 나타내어 혐기성 처리가 매우 효과적인 것으로 제시하고 있다<sup>2)</sup>.

혐기성 공정을 이용한 침출수 처리는 1970년 이후 Boyle과 Ham (1974)에 의해 시작된 후 다양한 연구자들에 의해 시도되고 있다<sup>3)</sup>. Boyle과 Ham (1974)은 혐기성 회분식 반응조를 이용하여 유기물 부하 0.4–2.2kg COD/m<sup>3</sup>.d에서 90–96%

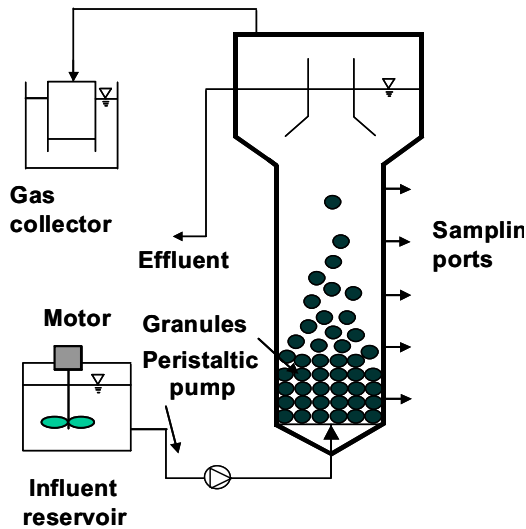
의 COD 제거율을 달성하였다<sup>3)</sup>. 혐기성 공정은 낮은 슬러지 발생량, 폭기에 필요한 에너지 소모량 불필요, 높은 유기물 부하의 적용 가능성, 발생하는 메탄 가스의 재이용 및 호기성 조건에서 제거되지 않은 할로젠 화합물 분해 등의 다양한 장점을 지니고 있다. 최근에는 공정에 대한 이해증진으로 인해 상향류 혐기성 슬러지 블랭킷 반응조, 혐기성 여상, hybrid 반응조 등 다양한 고율 혐기성 공법들이 개발되어 많은 연구들이 수행되고 있다<sup>4–10)</sup>.

비록 많은 연구자들에 의해 다양한 연구들이 수행되었으나 고율 혐기성 공법을 이용한 침출수 처리시 오염물질 거동과 미생물 특성에 관한 연구는 상대적으로 미진한 실정이다. 그러므로 본 연구에서는 UASB 반응조를 이용한 침출수 처리시 오염물질과 미생물의 거동을 평가하고자 한다. 그리고 UASB 공법의 침출수 적용성을 평가하기 위하여 유기물 부하에 따른 오염물질 처리능과 운전상의 문제점으로 야기되는 무기 침전물의 특성을 파악하고자 한다.

## 2. 재료 및 방법

### 2.1 반응조 운전

본 연구에서는 침출수의 혐기성 처리 실험을 위하여 [Fig. 1]에 제시된 것과 같이 유효용량 5.4L의 UASB 반응조를 이용하여 35°C에서 운전하였다. 초기 운전시 C 공장에서 채취한 입상슬러지 2.5L를 식중슬러지로 사용하였다. 실험에 사용된 침출수는 4°C 냉장고에서 연동 펌프를 이용하여 연속적으로 반응조에 주입되었으며, pH 조정 및 영양물질의 첨가 등의 전처리는 수행하지 않았다.



[Fig. 1] Schematic diagram of UASB reactor.

침출수의 높은 유기물 농도 및 낮은 인 함량으로 인해  $K_2HPO_4$ 와  $KH_2PO_4$ 를 혼합액을 이용하여 인을 첨가하였다. 반응조의 수리학적 체류시간 5일, 유기물 부하  $0.5kg-COD/m^2.d$ 에서 운전을 시작하여 점차 유기물 부하를 증가시켰다. 사용된 침출수는 매립지의 집수조에서 주기적으로 채취하여  $4^\circ C$  냉장 보관 후 사용하였으며, 실험 말기에는 유기물 부하 증가를 위해 매립지 내부에서 채취한 침출수를 이용하였다.

## 2.2 회분식 실험

미생물의 메탄 활성도를 평가하는 SMA (specific

methanogenic activity) 실험은 Shelton과 Tiedje (1984)가 제시한 방법을 수정하여 이용하였다<sup>11)</sup>. SMA 실험에서는 120ml serum bottles를 이용하였으며, 사용한 MSM (mineral salts medium)은 [Table 1]에 제시되었다. 알카리도 유지를 위해  $NaHCO_3$ 를 첨가하였으며, pH는 2N HCl과 6N NaOH를 이용하여 6.8-7.2로 고정하였다. 최종적으로  $N_2$  가스를 이용하여 purging 후  $35^\circ C$ 로 고정된 rotary incubator에서 실험을 수행하였다.

## 2.3 분석방법

가스 조성은 TCD (thermal conductivity detector)가 장착된 GC (gas chromatography, Gow Mac series 580)를 이용하였으며, 칼럼은 Porapak Q (80/100 mesh)를 충전제로 사용한  $6ft \times 2mm(i.d)$  stainless steel column을 사용하였다. Column, injector 및 detector의 온도는 각각  $50, 80$  및  $90^\circ C$  이며, 헬륨 ( $30ml/min$ )을 운반기체로 이용하였다.

VFAs (volatile fatty acids)는 FID (flame ionization detector)가 장착된 GC (HP 5890 series II)를 이용하여 분석하였다. FFAP capillary column ( $50-m$  long,  $0.2mm$  (i.d),  $0.17m$  (film thickness))을 사용하였으며, oven, injector 및 detector 온도는  $150, 230$  및  $250^\circ C$  이며, 질소를 운반기체로 이용하였다. 용존성 유기탄소 (dissolved organic carbon)는 UV 산화 및

[Table 1] Composition of Anaerobic Mineral Salts Medium

Composition and concentration (per liter)	
Phosphate buffer (adjusted pH 7.0) 0.27g of $KH_2PO_4$ 0.35g of $K_2HPO_4$	Trace Metals 0.5 mg of $MnCl_2 \cdot 4H_2O$ 0.05 mg of $H_3BO_3$ 0.05 mg of $ZnCl_2$
Mineral Salts 0.53g of $NH_4Cl$ 0.075g of $CaCl_2 \cdot 2H_2O$ 0.1g of $MgCl_2 \cdot H_2O$ 0.02g of $FeCl_2 \cdot 4H_2O$	0.03 mg of $CuCl_2$ 0.01 mg of $Na_2MoO_4 \cdot 4H_2O$ 0.5 mg of $CoCl_2 \cdot 6H_2O$ 0.05 mg of $NiCl_2 \cdot 6H_2O$ 0.05 mg of $Na_2SeO_3$

적외선 검출기가 장착된 TOC (Dohrmann DC-180, USA)를 이용하여 분석하였다. 음이온은 Dionex 전도도 검출기와 Ionpac AS4A-SC column이 장착된 Dionex 120 IC를 이용하여 분석하였으며, 중금속은 유도 결합 플라즈마 원자 방출 분광 광도계 (Shimadzu ICP-AES 1000III, Japan)를 이용하여 분석하였다. 입상슬러지의 특성과 미세구조 평가는 전자 주사 현미경을 이용하였다. 다른 분석항목은 Standard Methods에 준해 실험을 수행하였다<sup>12)</sup>.

### 3. 결과 및 고찰

#### 3.1 침출수 특성

본 실험에 사용된 침출수 특성은 [Table 2]에 제시되어 있다. 침출수에 존재하는 유기물질은 대부분 용존 상태로 존재하며 주로 VFAs로 구성되어 있다. DOC 중의 VFAs가 차지하는 비율은 51%로 나타나 초기 매립지에서 발생하는 침출수의 특성을 나타내고 있다. 또한, BOD/COD 비는 0.62를 나타내어 높은 생분해 특성을 나타내고 있으며, 질소와 염의 함량이 높은 특징을 보이고 있다. pH는 중성영역을 나타내고 있으며, 높은 유기물 농도에 비해 상대적으로 낮은 인의 함량을 나타내어 인 부족 현상이 야기될 것으로 판단된다. 주된 중금속은 칼슘, 마그네슘, 철, 망간으로 나타났으며, 기타 중금속의 농도는 알루미늄과 납을 제외하고는 상대적으로 매우 낮은 값을 나타내었다.

#### 3.2 연속운전 UASB 반응조의 침출수 처리능

UASB 반응조를 이용한 혐기성 침출수 처리 실험을 위하여 초기 운전 기간 27일을 포함하여 약 300일간 실험을 수행하였다. Fang과 Chui (1993)는 COD 제거율은 유기물 부하에 따라 상이하다고 제시하여 본 연구에서는 유기물 부하를 유입수의 COD와 수리학적 체류시간 (hydraulic retention time; HRT)을 변화시켜 운전초기 0.5kg COD/m<sup>3</sup>.d에서 20kg COD/m<sup>3</sup>.d까지 증가하여 운전하였다<sup>13)</sup>.

[Fig. 2]에 제시된 것과 같이 UASB 반응조는 운전 212일까지 90% 이상의 COD 제거율을 나타내었으며, 초기 운전 기간을 제외하고는 초산과 프로피온산 등의 VFAs 축적 현상은 일어나지 않았다. 운전 215일 경 COD 제거율은 침전물 축적으로 인한 반응조 폐색현상과 일시적인 유기물 부하 증가로 인하여 일시적으로 감소하였다. Keenan 등(1993)은 무기물 축적은 기질과 미생물의 접촉을 저해하며, 단회로 현상을 유발하여 반응조내 수리학적 체류시간을 단축한다고 제시하고 있다<sup>14)</sup>. El-Mamouni 등(1995)도 무기물의 형성은 channeling과 폐색 현상을 유발한다고 제시하고 있다<sup>15)</sup>. 침출수의 혐기성 처리시 VFAs는 메탄균에 의해 이산화탄소와 메탄으로 전환되어 반응조의 pH와 알칼리도가 증가하게 된다. 이와 같은 현상은 혐기성 공정을 이용한 침출수 처리시 탄산칼슘 또는 탄산마그네슘 형태의 무기물 축적 현상을 야기하며, 첨가한 인의 경우도 칼슘과 수산화인회석 (hydroxylapatite) 등의 침전물을 형성하여 침출수 처리시 침전물 형성의 중요한 원인으로 작용하는 것으로 판단된다. 또한, 인의 첨가는 불용성의 orthophosphate 형성하는 것으로 알려져 있다<sup>16)</sup>. 비록 형성된 무기물은 생물학적 공정에는 영향을 주지 않으나 스케일 형성과 폐색 현상 등과 같은 운전상의 문제를 야기하는 것으로 알려져 있다<sup>17, 18)</sup>.

폐색 현상 극복과 유기물 부하에 대해 미생물이 적응함에 따라 COD 제거율은 점차 증가하였으며, 최대 유기물 부하 20kg COD/m<sup>3</sup>.d, 수리학적 체류시간 0.8일에서 평균 COD 제거율은 90%를 나타내었다. 높은 유기물 부하 (18-20kg COD/m<sup>3</sup>.d)에서 유출수의 초산(112-359 mg/L)과 프로피온산 (122-467 mg/L) 농도가 증가하였으며, 이와 같은 결과는 프로피온산의 초산으로의 전환이 율속단계임을 제시하고 있다. 특히, 락산은 유출수에 거의 검출되지 않았으며, 락산의 초산으로의 전환은 율속단계로 작용하지 않음을 알 수 있다. Lin (1991)은 혐기성 공정을 이용한 침출수 처리시 프로피온산의 경우 상대적으로 느린 분해를 보였다고 제시하고 있다<sup>19)</sup>. 또한 프로피온산의 분해는 초

[Table 2] Characteristics of Landfill Leachates

Parameter	Concentration			
	Range	Average	Median	Std. dev.
COD	7750–34992	21641	22027	5844
BOD	4510–18498	13493	16042	6063
DOC	5039–8373	6922	7498	1484
Acetic acid	553–5984	2638	1530	2282
Propionic acid	269–5352	1616	1008	1898
n–Butyric acid	392–2200	1427	1368	642
iso–Butyric acid	49–1299	605	603	477
n–Valeric acid	179–577	366	375	109
n–Caproic acid	262–829	531	526	237
TKN	2582–3427	2791	2666	319
Ammonia nitrogen	1507–2498	2148	2242	358
Total phosphate	4.3–7.2	6.1	6.6	1.1
Orthophosphate	3.8–5.9	5.1	5.3	0.8
Chloride	2713–4911	4292	4299	953
Sulfate	1310–2838	1864	1851	563
pH	7.0–7.7	7.3	7.3	0.3
Alkalinity <sup>1</sup>	8012–12001	10917	11359	1478
ORP <sup>2</sup>	–282.3~–150.3	–243.8	–253.6	–48.5
TSS	782–4660	1726	1051	1489
TDS	13258–29350	20229	19211	5476
VSS	400–2600	951	658	828
Iron	40–295	130	115	96
Manganese	1.0–23.8	7.6	5.5	8.4
Zinc	1.4–15.4	4.4	2.5	5.4
Calcium	532–1544	1155	1153	377
Magnesium	215–875	419	350	241
Sodium	2400–3076	2669	2500	317
Potassium	1696–1962	1822	1814	86
Chromium <sup>3</sup>	ND–0.3	0.1	ND	0.1
Copper <sup>4</sup>	ND–0.2	0.03	ND	0.08
Aluminum	3.0–53.2	15.7	8.3	18.8
Lead <sup>5</sup>	ND–9.8	4.1	3.4	3.3
Color <sup>6</sup> (unit PtCo color)	182–471	323	321	93

Unit: mg/L except for pH, ORP and color

<sup>1</sup> mg/L as CaCO<sub>3</sub>;

<sup>2</sup> mV;

<sup>3</sup> ND: not detected (0.05 mg/L);

<sup>4</sup> ND: not detected (<0.08 mg/L);

<sup>5</sup> ND: not detected (<0.2 mg/L);

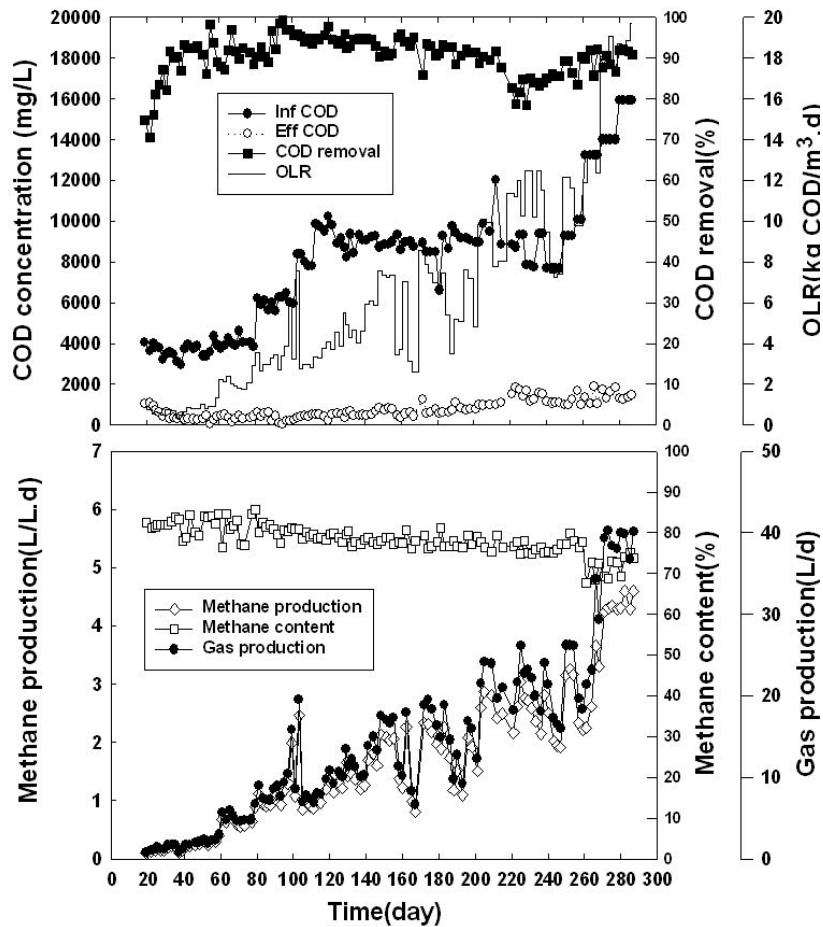
<sup>6</sup> measured in the 1:10 diluted leachate sample

산의 농도, 수소분압 및 환경조건에 매우 민감한 것으로 알려져 있다<sup>20, 21)</sup>.

[Fig. 2]에 제시된 것과 같이 메탄 발생량은 유기물 부하 증가에 따라 점차 증가하는 경향을 보였으며, 유기물 부하 20kg COD/m<sup>3</sup>.d에서 4.6L/L.d를 나타내고 있다. 운전 261일 경까지 발생가스중의 메탄 함량은 75-85%을 나타내었다. 그러나 유기물 부하 증가를 위해 상대적으로 높은 VFAs 및 낮은 pH와 알카리도를 지닌 침출수를 사용한 경우에는 상대적으로 메탄 함량이 다소 감소하는 경향을 나타내었다. 일반적으로 혐기성 공정에서 유입수의 pH와 알카리도가 낮은 경우에는 메탄에 비해 이산화탄소의 함량이 증가하는 경향을 나타낸다. 기존의 연구결과에 의하면 혐기성 공정을 이용한

침출수 처리시 발생 가스 중의 메탄 함량(70-90%)은 상대적으로 높게 유지되는 것으로 보고되고 있다<sup>4, 6, 8)</sup>. Kettunen와 Rintala (1998)의 연구결과에 의하면 낮은 온도(13-14°C)에서 운전한 혐기성 반응조에서 발생하는 가스의 경우도 높은 메탄 함량을 나타내었으며, 침출수의 혐기성 공정을 이용시 획득할 수 있는 에너지 수율이 매립가스로부터 얻을 수 있는 경우보다 크다고 제시하고 있다<sup>9)</sup>.

[Fig. 3]은 침출수를 처리한 UASB 반응조내 입상슬러지의 비메탄활성도 값을 제시하고 있다. 침출수의 혐기성 처리는 초산화(actogenesis)와 메탄화(methanogenesis)와 같은 일련의 복잡한 생화학 공정으로 구성되어 있다. 초산, 프로피온산



[Fig. 2] Performance of UASB reactor treating landfill leachate.

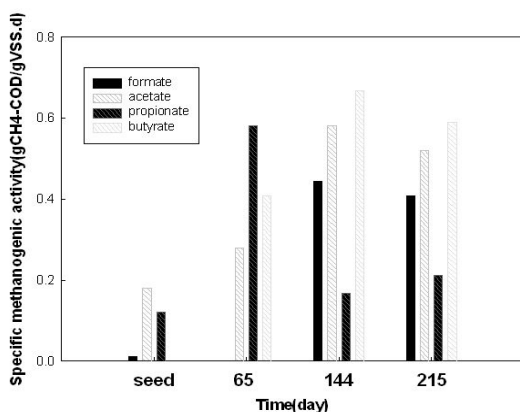
및 락산 등의 저분자량의 지방산이 침출수에 존재하는 주된 유기물이다. 단계 III에서 비메탄 활성도 값은 다소 저감하였으나 유기물 부하 증가와 미생물이 기질에 적응함에 따라 증가하는 경향을 보이고 있다. 초산과 락산을 기질로 이용한 비메탄 활성도 값은 비슷한 경향을 나타내었으며, 개미산과 프로피온산을 기질로 이용한 비메탄 활성도에 비해 높은 값을 보였다. Keenan 등(1993)은 혐기성 공정을 이용하여 침출수를 처리한 경우 5개월과 9개월 운전한 미생물의 비메탄활성도가 각각 0.56 및 0.25 g CH<sub>4</sub>-COD/g-VSS.d로 나타났다고 보고하고 있다<sup>14)</sup>. 뿐만 아니라 축적된 무기물에 의해 비메탄 활성도가 저감되는 결과를 보였다고 제시하고 있다<sup>14)</sup>. El-Mamouni 등(1995)의 경우도 미생물내 무기물이 축적됨에 따라 비메탄활성도가 0.77에서 0.13 g CH<sub>4</sub>-COD/g-VSS.d로 저감하였다고 보고하고 있다. van Langerak 등(1998)은 미생물내의 칼슘 축적은 비메탄 활성도에 좋지 않은 영향을 미치며, Kettunen과 Rintala(1998)는 반응조내 무기물 축적이 미생물의 비메탄 활성도를 저감하는 원인이라고 제시하고 있다<sup>9, 22)</sup>.

일부 물 보다 밀도가 가벼운 입상 슬러지가 반응조 상부에 다수 부상하는 경향이 운전 기간 중에 나타났다. 이와 같은 입상슬러지는 유기물 부하 증

가에 따른 전단력 증가에 따라 슬러지의 깨짐 현상이 발생하였다. Iza 등(1992)은 입상슬러지에 과도한 침전물의 축적은 hollow granules을 형성하게 되며, 결국은 미생물의 내생성장과 입상슬러지 내부에서 발생하는 가스로 인하여 부상된다고 제시하고 있다<sup>23)</sup>.

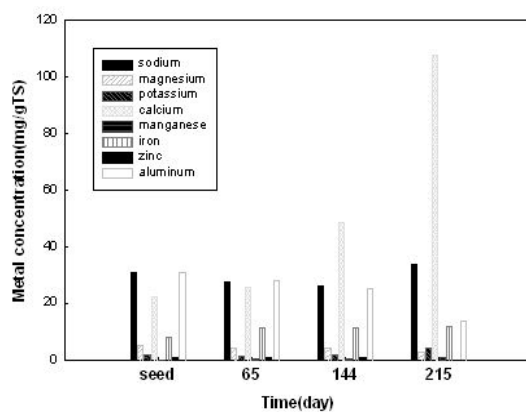
입상슬러지에 존재하는 무기 침전물의 EDAX (electron dispersive X-ray)와 ICP-AES (inductively coupled plasma atomic emission spectrophotometer) 분석 결과 [Fig. 4]와 [Fig. 5]에 제시되어 있는 것과 같이 칼슘화합물로 나타났다. 입상슬러지내의 높은 칼슘 농도는 침출수 특성과 입상슬러지 표면에 존재하는 체외효소의 음전하를 띤 카르복실기, 인산염기와 칼슘의 결합에 기인하는 것으로 판단된다. 뿐만 아니라 전질에서 언급한 것과 같이 인의 첨가도 칼슘화합물의 침전물 형성에 중요한 원인으로 사료된다. 기존의 문헌에 의하면 일부 연구자들에 의해 혐기성 반응조에서의 CaCO<sub>3</sub> 및 Ca<sub>5</sub>(PO<sub>4</sub>)<sub>3</sub>(OH) 등의 형태의 칼슘 침전물의 형성이 보고되고 있다<sup>9, 14, 24)</sup>.

[Fig. 5](c)에 제시되어 있는 것과 같이 유입수조에 형성된 침전물의 성분 분석 결과 마그네슘 (510.5 mg/gTS), 칼슘 (349.2 mg/gTS), 철 (49.4 mg/gTS) 및 망간 (13.8 mg/gTS)이 주된

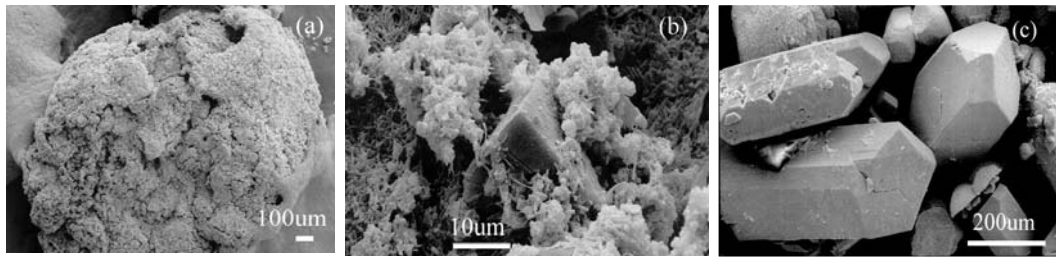


[Fig. 3] Specific methanogenic activity with operation time.

Note: SMA of seed using butyrate was not detected  
SMA using formate at 65 days was not available



[Fig. 4] Metal concentration of granule with operation time.



[Fig. 5] Scanning electron microscope photographs of :

- (a) granule from the reactor;
- (b) calcium precipitate in microorganisms;
- (c) crystalline precipitate in influent reservoir.

구성성분으로 나타났다. 반응조 내부 및 유입수 분배 장치 등에도 무기물로 인한 스케일 형성이 발생하였다. 비록 본 연구에서는 무기물 축적으로 인하여 비메탄 활성도의 현저한 저감 현상은 발생하지 않았으나, 안정적인 운전을 위해서는 혐기성 공정 전단에 무기물 제거를 위한 전처리 공정의 도입이 필요한 것으로 나타났다.

#### 4. 결론

1. UASB 반응조를 이용한 초기 매립지 침출수의 유기물질 제거는 매우 효과적인 것으로 나타났다. 최대 유기물 부하 20kg COD/m<sup>3</sup>.d와 수리학적 체류시간 1일 미만에서도 90%의 COD 제거가 가능하였다.
2. 메탄 가스 발생량은 유기물 부하 20kg COD/m<sup>3</sup>.d에서 4.6L/L.d로 나타났으며 발생가스 중 메탄 함량은 75-85%로 나타났다. 높은 유기물 부하 (18-20kg COD/m<sup>3</sup>.d)에서는 프로피온산의 농도가 상대적으로 증가하여 프로피온산의 초산으로의 전환이 율속단계로 나타났다.
3. UASB 반응조를 이용한 침출수 처리시 입상 슬러지의 부상이 관찰되었으며, 반응조와 입상 슬러지에 축적된 무기물은 운전상의 문제를 야기하였다. EDAX와 ICP-AES 분석결과 이와 같은 물질은 주로 칼슘과 마그네슘 화합물로 나타났다. 비록, 운전기간 동안 비메탄 활성도

의 현저한 저감 현상은 나타나지 않았으나 안정적인 운전을 위해서는 혐기성 처리 공정 전단에 무기물을 제거하는 전처리 공정이 필요한 것으로 나타났다.

#### 참고문헌

1. Lema, J. M., Mendez, R., and Blazquez, R. "Characteristics of landfill leachates and alternatives for their treatment: A review", *Water Air, Soil Pollut.*, 40, pp. 223~250 (1998).
2. Chian, E. S. K. "Stability of organic matter in landfill leachates", *Wat. Res.*, 11, pp. 225~232 (1977).
3. Boyle, W. C., and Ham, R. K. "Biological treatability of landfill leachate", *J. Wat. Poll. Control Fed.*, 46(5), pp. 860~872 (1974).
4. Henry, J. G., Prasad, D., and Young, H. "Removal of organics from leachates by anaerobic filter", *Wat. Res.*, 21(11), pp. 1395~1399 (1987).
5. Rumpf, M. I., and Ferguson, J. F. "Anaerobic pretreatment of a landfill leachate for metals and organics removal", *Pro. Am. Soc. Chem. Eng.*



- Specialty Conf. Environ. Eng. C. R. OMelia (Ed.), pp. 552~559 (1990).
6. Berrueta, J., and CastrillóL. "Anaerobic treatment of leachates in UASB reactors", *J. Chem. Tech. Biotechnol.*, 54, pp. 33~37 (1992).
  7. García, H, Rico, J. L., and García, P. A. "Comparison of anaerobic treatment of leachates from an urban-solid-waste landfill at ambient temperature and at 35°C", *Bioresource Technology*, 58, pp. 273~277 (1996).
  8. Kennedy, K. J., Hamoda, M. F., and Guiot, S. G. "Anaerobic treatment of leachate using fixed film and sludge bed systems", *J. Wat. Poll. Control Fed.*, 60(9), pp. 1675~1683 (1988).
  9. Kettuen, R. H., and Rintala, A. "Performance of an on-site UASB reactor treating leachate at low temperature", *Wat. Res.*, 32(3), pp. 537~546 (1998).
  10. Ağdağ, O. M, and Sponza, D. T. "Anaerobic/aerobic treatment of municipal landfill leachate in sequential two-stage up-flow anaerobic sludge blanket reactor (UASB)/completely stirred tank reactor (CSTR) systems", *Process Biochemistry* 40, pp. 895~902 (2005).
  11. Shelton, D. R., and Tiedje, J. M. "General method for determining anaerobic biodegradation potential", *Appl. Environ. Microbiol.*, 47(4), pp. 850~857 (1984).
  12. APHA-AWWA-WEF, 1992. *Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater*. 18th edition, Am. Public Health Assoc., Washington, D. C., USA.
  13. Fang, H. H. P., and Chui, H. K. "Maximum COD loading capacity in UASB reactors at 37°C", *J. Envir. Engrg., ASCE*, 119(1), pp. 103~119 (1993).
  14. Keenan, P. J., Iza, J., and Switzenbaum, M. S. "Inorganic solids development in a pilot-scale anaerobic reactor treating municipal solid waste landfill leachate", *Water Environment Research*, 65(2), pp. 181~188 (1993).
  15. El-Mamouni, R., Guiot, S. R., Mercier, P., Safi, B., and Samson, R. "Limiting impact on granules activity of the multiplate anaerobic reactor (MPAR) treating whey permeate", *Bioprocess Eng.*, 12, pp. 47~53 (1995).
  16. Percival, L. J., Senior, E., and Southway, C. "Treatment of a high-strength leachate from a closed co-disposal landfill site in south africa", *Water SA*, 23(4), pp. 411~418 (1997).
  17. Ehrig, H. J. "Treatment of sanitary landfill leachate: biological treatment", *Waste Manage. Res.* 2, pp. 131~152 (1984).
  18. Knox, K. "Leachate treatment with nitrification of ammonia", *Wat. Res.*, 19(7) pp. 895~904 (1985).
  19. Lin, C-Y. "Anaerobic digestion of landfill leachate", *Water SA*, 17(4), pp. 301~306 (1991).
  20. Heys, R. H., and Hall, R. J. "Kinetics of two subgroups of propionate-using organisms in anaerobic digestion", *Appl. Environ. Microbiol.*, 46(30), pp. 710~715 (1983).

21. Lin, C-Y, Sato, K., Noike, T., and Matsumoto, J. "Methanogenic digestion using mixed substrate of acetic, propionic, and butyric acids", *Wat. Res.*, 20(3), pp. 385~394 (1986).
22. van Langerak, E. P. A., Gonzalez-gil, G., van Aelst, A., van Lier, J. B., Hamelers, H. V. M., and Lettinga, G. "Effects of high calcium concentrations on the development of methanogenic sludge in upflow anaerobic sludge bed (UASB) reactors", *Wat. Res.*, 32(4), pp. 1255~1263 (1998).
23. Iza, J., Keenan, P. J., and Switzenbaum, M. S. "Anaerobic treatment of municipal landfill leachate: operation of a pilot scale hybrid UASB/AF reactor", *Wat. Sci. Tech.*, 25(7), pp. 255~264 (1992).
24. Mennerich, A., and Albers, H. "Anaerobic pre-treatment of high concentrated landfill leachates", *Proc. Eur. Water Pollut. Control Assoc. Conf., Anaerobic treatment: a grown-up technology*, Amsterdam, p. 361 (1986). 