



## 유동상 반응조를 이용한 하수의 혐기성 처리에 관한 연구

### A Study on Anaerobic Sewage Treatment Using a Fluidized Bed Reactor

예형영<sup>1,2</sup> · 이은영<sup>1</sup> · 배재호<sup>1\*</sup>

Hyoungyoung Ye<sup>1,2</sup> · Eunyoung Lee<sup>1</sup> · Jaeho Bae<sup>1\*</sup>

1 인하대학교 환경공학과 2 롯데건설 기술연구원

(2012년 1월 30일 접수; 2012년 4월 12일 수정; 2012년 4월 14일 채택)

#### Abstract

Anaerobic sewage treatment is drawing attentions due to high energy consumptions and sludge production associated with aerobic treatment. This study evaluates the treatment characteristics and energy balance of a fluidized bed reactor (FBR) for treating domestic sewage at 20~25°C for 245 days. Sewage fed to the FBR was a primary clarifier effluent of a domestic sewage treatment plant with COD of 99~301 mg/L and BOD<sub>5</sub> of 37~149 mg/L. Effluent SBOD<sub>5</sub> and its removal efficiency at HRT of 1~3 h were 6~15 mg/L and 73.4~85.5%, respectively, achieving high removal efficiency for soluble organic substances even at short HRTs. COD removal efficiency and its effluent concentration were 53.8~75.9% and 51~83 mg/L, respectively. The energy production potential from gaseous methane was 0.009~0.028 kWh/m<sup>3</sup>, which satisfies the energy required for the FBR operation.

**Key words:** anaerobic, methane, energy, fluidized bed reactor, sewage

**주제어:** 혐기성, 메탄, 에너지, 유동상 반응조, 하수

## 1. 서론

혐기성 하수처리는 호기성 처리와는 달리 유기물의 80% 이상을 바이오가스인 메탄가스로 안정화시킨다. 따라서 혐기성 하수처리는 호기성 하수처리와 비교하여 첫째, 동력 및 유지관리 비용 저감, 둘째, 2차 슬러지 발생량 저감, 셋째, 메탄가스로의 에너지 회수 등의 장점을 가지고 있다. 국내 하수처리장의 호기성 처리공정에서 평균 소비전력은 0.243 kWh/m<sup>3</sup>으로, 이중 40% 이상이 포기조의 송풍기

운영에 소모된다(박 등, 2007). 운영비의 경우 2004년 국내 하수처리장 유지관리비용 중 전력비와 슬러지 처리 비용이 차지하는 비율은 각각 20.2 및 15.2%이었다(유 등, 2005). 혐기성 하수처리는 생물 반응조의 포기가 불필요하기 때문에 전력비 측면에서 상당한 저감 효과를 기대할 수 있다. 혐기성 공정의 슬러지 발생량은 호기성 공정의 약 10%에 불과하므로 특히 관리가 어려운 2차 슬러지 처리비용이 크게 절감될 수 있다. 온실가스 측면에서도 혐

\* Corresponding author: Tel +82-32-860-7507 Fax +82-32-865-1425 E-mail [jhb@inha.ac.kr](mailto:jhb@inha.ac.kr)(J.H. Bae)

기성 하수처리는 상당한 잠재력을 가지고 있다. 대표적인 호기성 고도처리 공정인 A<sub>2</sub>O 공법을 적용한 100,000 m<sup>3</sup>/d 규모의 하수처리장에서는 GWP 기준 연간 약 20만 톤의 온실가스가 발생할 수 있다고 보고되어 있다(오 등, 2011). 반면 혐기성 처리 공정을 적용한다면 대부분의 온실가스를 회수 및 포집의 방법을 통해 제어할 수 있을 것이다.

유기물 농도가 낮은 하수처리에는 수리학적 체류 시간과 미생물 체류시간을 다르게 운영할 수 있는 고속 혐기성 반응조가 주로 사용되며, 실규모 하수 처리에 가장 많이 적용되어온 공정은 상향류 혐기성 슬러지 블랭킷(UASB)이다. 브라질, 멕시코, 인도와 같은 아열대 기후 지역을 중심으로 200곳 이상의 실규모 하수처리시설에 UASB 공정이 적용되었으며 평균적인 화학적 산소 요구량(COD) 제거 효율은 70% 수준이었다(Gomec, 2010). Vieira (1988)은 UASB 공정을 이용하여 상온에서 COD 265~316 mg/L의 하수를 HRT 4.7~9 h에서 처리하였을 때 제거효율은 50~70%이었다고 보고하였다. Tandukar 등(2007)은 UASB와 호기성 DHS가 결합된 반응조를 이용하여 하수처리 시 약 8.5 h의 HRT에서 COD 및 BOD 제거효율이 각각 89% 및 94%라고 보고하였다.

유동상 반응조(fluidized bed reactor, FBR)는 물질전달율이 높기 때문에 짧은 체류시간 조건에서 처리가 가능하며 활성탄을 사용할 경우 미량 오염 물질을 추가적으로 제거할 수 있다. Sanz와 Fdz-Polanco (1990)는 COD 475 mg/L인 하수를 10°C, HRT 2.5 h 조건에서 FBR을 이용하여 처리한 결과, COD 제거효율이 76% 정도라고 보고하였다. 그러나 짧은 처리시간을 적용할 수 있다는 장점을 가진 공정임에도 불구하고 실제 하수처리 연구 결과는 상대적으로 적은 실정이다. 본 연구에서는 FBR을 이용한 혐기성 하수처리의 가능성을 제시하기 위하여 실험실 규모의 반응조의 유기물 제거 특성 및 에너지 수지를 평가하였다.

## 2. 실험재료 및 방법

### 2.1 FBR의 장치 구성 및 Start-up

본 연구에서 사용한 FBR의 개요도를 Fig. 1에 나타내었다. 반응조는 직경 2.5 cm, 길이 50 cm의 컬럼부와 직경 7.5 cm, 길이 10 cm의 가스-매질 분리조로 구성하였으며 컬럼부의 유효 용량은 0.245 L이다. 순환라인은 직경 1.3 cm의 PVC 관으로 제작하였으며, 순환 펌프는 마그넷 펌프를 이용하였다(Pan World Magnet Pump, NH-100PX-Z, Korea). 유입수는 peristaltic 펌프를 이용해 컬럼의 하부로 주입되었으며, 유출수는 U자형 튜브를 통해 유출되어 혐기성 상태의 컬럼에서 포집하였다. 매질로는 10X30 mesh의 입상 활성탄(MRX-M, Calgon Carbon Corp, Pittsburgh)을 사용하였다. 충전된 활성탄 부피는 유효 용적의 1/3 로 활성탄 30 g과 식종 용도의 생물막이 부착된 입상 활성탄 20 mL로 구성되었다.

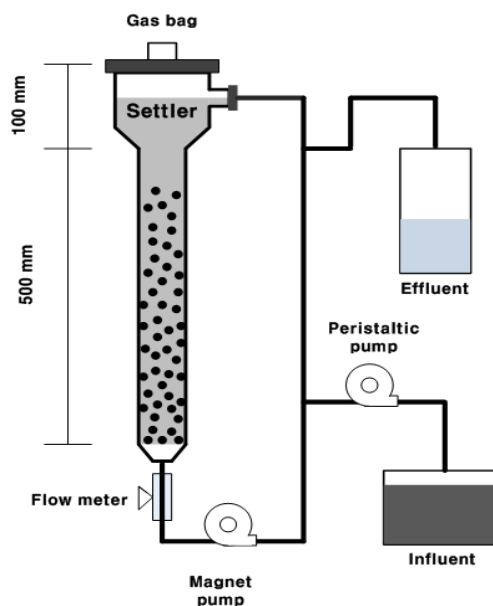


Fig. 1. Schematic diagram of a fluidized bed reactor.

FBR은 하수 슬러지를 처리하는 실험실 규모 CSTR 반응조 유출수와 아세트산과 프로피온산으로 구성된 인공합성 폐수를 처리하는 실험실 규모 FBR

의 생물막이 부착된 입상 활성탄을 이용하여 식중 하였으며, 운전초기에는 batch mode로 운영되었다. 식중에 앞서 FBR 반응조에 아세트산과 프로피온산을 1:1로 혼합한 COD 200 mg/L 농도의 인공폐수를 채우고 중탄산나트륨을 이용해 알칼리도를 500 mg/L as  $C_6CO_3$ 로 조절한 뒤 질소가스로 purging 하였다. 초기 식중은 CSTR 유출수 30 mL (VSS 기준 417 mg)로, 그리고 3일 후에는 실험실 규모 FBR에서 채취한 생물막이 부착된 입상 활성탄 20 mL (VSS 기준 751 mg)를 주입하였다. 8일간의 start-up 기간 후에는 하수를 이용한 연속 운전을 시작하였다.

### 2.2 FBR의 운전조건

FBR의 운전조건 및 유입하수 성상은 Table 1에 나타내었다. 운전온도는 20~25°C이었으며, HRT는 Mode I, II, III, IV에서 각각 3, 2, 1, 1.5 h이었고, 유기물 부하는 대체적으로 HRT에 반비례하였다. 재순환 유량 504 L/d에서 반응조내 유체의 상향 유속은 42.8 m/h로 일반적인 FBR의 상향 유속 10~30 m/h (Marin 등, 1999)보다 높은 수준이다. 이는 반응조의 높이/단면적 비율이 높고 초기 주입한 활성탄의 비중이 크기 때문이다. 매질의 팽창 높이는 16~45 cm (팽창률 33~275%)로 일정한 상향 유속에서 팽창 높이가 다른 이유는 생물막의 부착량에 따라 매질의 비중이 다르기 때문이다.

본 연구의 처리 대상 하수는 도시 하수처리장 1차 침전조 유출수로, 매주 동일 시간에 채취하여 4°C에 보관하였으며, 반응조에 유입되기 전에 비활성 고형물의 제거를 위해 10  $\mu$ m 카트리지필터를 이용해 여과하였다. 유입수의 COD 및 BOD<sub>5</sub> 평균 농도는 각각 182 ± 48 및 75 ± 25 mg/L이고, 용해성 유기물의 비율은 각각 66.5 및 66.9%로 용해성 유기물의 비중이 높았다. 유입수 유기물 농도는 Mode I에서 가장 낮고 Mode II에서 가장 높았으며, Mode III에서 유기물 부하 변동이 가장 컸다.

Table 1. Operating conditions of the fluidized bed reactor

Operating conditions				
Mode	I	II	III	IV
Days of operation	1~57	58~69	70~152	153~245
HRT (h)	3	2	1	1.5
OLR (kg/m <sup>3</sup> -d)	1.4 ± 0.3	3.4 ± 0.5	4.8 ± 1.2	2.9 ± 0.6
Temperature (°C)	23-25	23-25	20-25	20-25
Influent flow rate (L/d)	2	3	6	4
Influent				
TCOD (mg/L)	164 ± 40	278 ± 38	196 ± 49	179 ± 34
SCOD (mg/L)	104 ± 24	176 ± 8	136 ± 31	119 ± 23
TBOD <sub>5</sub> (mg/L)	54 ± 8	117 ± 29	77 ± 28	79 ± 17
SBOD <sub>5</sub> (mg/L)	34 ± 5	81 ± 13	55 ± 19	53 ± 14
TSS (mg/L)	46 ± 14	56 ± 14	42 ± 14	36 ± 8
VSS (mg/L)	40 ± 12	50 ± 15	37 ± 13	33 ± 7
SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup> (mg/L)	-	-	61 ± 4	61 ± 2
NH <sub>4</sub> <sup>+</sup> -N (mg/L)	-	-	34 ± 2	18 ± 3
Fluidization conditions				
Q' (L/d)	504	504	504	504
Up-flow velocity (m/h)	42.8	42.8	42.8	42.8
Bed height (cm)	30-33	30-33	16-45	16-19

### 2.3 분석방법

Table 2에 항목별 분석방법을 정리하였다. 유입수와 유출수의 COD, SS, BOD<sub>5</sub>는 1주일에 2~3회 측정하였으며, NH<sub>4</sub><sup>+</sup>, SO<sub>4</sub><sup>2-</sup>, gas composition은 Mode III부터 간헐적으로 측정하였다. VFA 농도를 분석할 때는 반응조 유출수를 NaOH 용액을 이용해 pH를 11 이상으로 증가시킨 뒤 증발 농축하여 분석하였고, 유출수의 COD, BOD<sub>5</sub>를 분석할 때는 황화합물의 영향을 배제하기 위해 pH 2에서 10분간 포기한 후 분석하였다.

유기물 농도가 낮은 하수를 혐기성으로 처리할 경우에 발생하는 메탄가스의 일부는 처리수에 용존되어 방출된다. 메탄가스의 용해도는 헨리법칙을 따라 분압과 헨리상수에 비례하며, 헨리상수는 온도에 반비례한다. 용해성 메탄가스의 측정을 위해 반응기 유출수를 54 mL serum bottle에 가득 채운 뒤 고무튜브와 알루미늄 마개를 이용해 밀봉하였다. 주사기를 이용해 27 mL 유출수를 제거하면서 질소가스를 유출수 부피만큼 동시에 주입하고, 미생물의 활성을 억제하기 위해 3 N NaOH 용액 0.2 mL를 주입하였다. 이렇게 준비된 serum bottle을 35°C shaker에서 1시간 동안 혼합하며 가스-기체 평형을 이루게 한 뒤, 용기의 head space 부분에서 가스를 채취하여 GC-TCD를 이용해 메탄 함량을 분석하였다. 용해성 메탄의 양은 측정된 메탄의 양을 표준 온도조건으로 환산하여 결정하였다.

Table 2. Analytical methods

Item	Method
pH	Electrometric
Alkalinity	Titrimetric
NH <sub>4</sub> <sup>+</sup>	Electrometric
Chemical Oxygen Demand	Closed Reflux, Colorimetric
Biological Oxygen Demand	5 days BOD
Suspended Solids	Gravimetric
VFAs	GC-FID
Gas composition	GC-TCD
SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup>	IC

### 3. 결과 및 고찰

#### 3.1 FBR의 유기물 제거효율

##### 3.1.1 COD 제거효율

Fig. 2와 3에는 유입수 및 유출수의 TCOD 및 SCOD 농도 변화를 나타내었다. Mode I (HRT = 3 h)에서 유출수 TCOD 및 SCOD는 각각 37 및 16

mg/L으로 빠르게 안정화되는 경향을 보였는데, 이는 초기 식중에 사용된 입상 활성탄의 미생물 활성이 높고, 반응조 운영 초기 약 2주간 유입수의 TCOD (99~145 mg/L)가 비교적 낮았기 때문이다. Mode I 유입수의 평균 TCOD 및 SCOD는 각각 170 및 108 mg/L, 유출수의 평균 TCOD 및 SCOD 농도는 각각 51 및 30 mg/L로, 평균 제거율은 각각 69.2 및 70.4%이었다. Mode II에서는 HRT가 2 h로 짧아지고 유입수 평균 TCOD가 278 mg/L으로 높아져 유기물 부하가 2.4배 정도 증가하였지만, 유출수의 COD 제거는 안정적으로 유지되었기 때문에 12일 동안만 운전하였다. 유출수의 평균 TCOD 및 SCOD는 각각 67 및 38 mg/L이었으며, 평균 제거율은 75.7 및 78.3%이었다.

Mode III (HRT = 1 h)의 유입수 평균 TCOD와 유기물 부하는 196 mg/L 및 4.8 kg/m<sup>3</sup>-d로 전체 운전기간 중 가장 높고 부하 변동도 심하여 Mode III 운전 시작과 함께 유출수 TCOD는 93 mg/L까지 증가하였지만, 약 2주에 걸쳐 60~70 mg/L 수준으로 안정화되었다. Mode III 초기 40여 일간 유출수 평균 TCOD 및 SCOD 농도는 각각 73 및 41 mg/L로 Mode II와 유사하였지만 평균 제거율은 63.6 및 72.0%로 다소 낮았다. 그러나 운영일수 110일 이후 약 40일에 걸쳐 초기 식중에 사용된 입상 활성탄 생물막의 과다 성장에 따른 매질의 유동 문제가 발생하면서 생물막에 부착되었던 미생물과 입자성 유기물이 탈착되어 일시적으로 처리 효율이 큰 폭으로 저하되었다. Mode III의 TCOD 및 SCOD 평균 농도는 각각 83 및 45 mg/L이고 제거율은 56.0 및 66.1%이었지만, Mode III의 초기 40일간의 결과를 미루어 볼 때, FBR이 안정적으로 운영된다면 HRT 1 h에서도 높은 처리 수질을 기대할 수 있을 것으로 생각된다.

HRT 1.5 h에서 93일간 운전한 Mode IV에서는 운전 26일 후 생물막이 과다하게 성장된 입상 활성탄 20 mL를 제거하고 새로운 활성탄 20 mL를 충전

하였다. 바이오매스가 가장 많이 부착되어 있는 유동상 상부의 활성탄을 제거했음에도 유출수의 SCOD는 평균 34 mg/L 정도의 안정적인 수준을 유지하였다. 반면 입자성 유기물은 일시적으로 제거효율이 급감하여 활성탄 교체 직후 TCOD가 152 mg/L까지 증가하였다. 이는 매질 표면 생물막의 흡착에 의한 입자성 유기물 제거 효과가 저감되었기 때문인 것으로 추정된다. 유출수 TCOD는 이후 유입수의 유기물 부하와 반응조 운영이 안정화되면서 점차적으로 감소하였다. Mode IV에서 유출수의 평균 TCOD 및 SCOD 농도는 각각 70 및 34 mg/L이었고, 평균 제거율은 53.5 및 66.1%이었다. 활성탄 교체로 인해 입자성 유기물 제거율은 높지 않으나, 용해성 유기물의 처리효율은 HRT 2 및 3 h에서 결과와 유사하였다.

하수의 혐기성 처리에 적용실적이 가장 많은 UASB의 일반적인 TCOD 제거 효율은 50~70%이며 HRT는 4~12 h이다. 본 연구의 FBR은 HRT 1~3 h에서 처리 효율이 53.8~75.9%로 UASB보다 짧은 체류 시간에서도 다소 높은 처리 효율을 얻을 수 있었다.

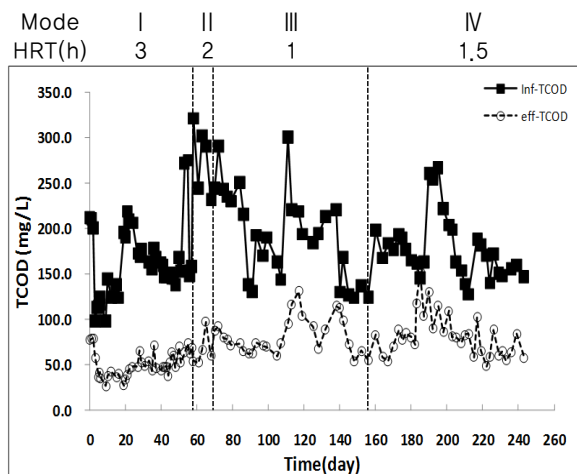


Fig. 2. Changes in TCOD at various HRTs.

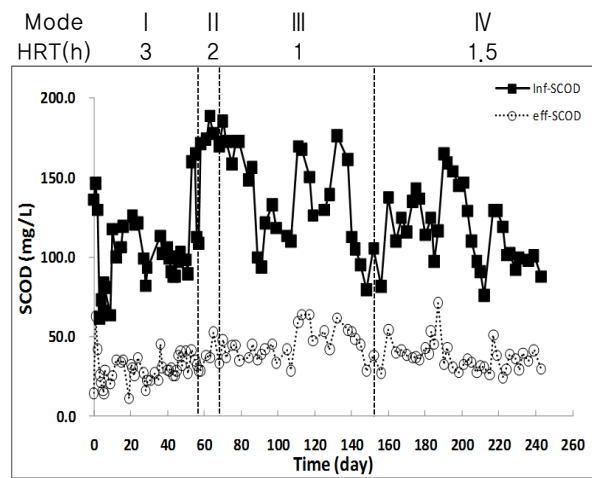


Fig. 3. Changes in SCOD at various HRTs.

### 3.1.2 BOD<sub>5</sub> 제거효율

Fig. 4 및 5에는 유입수 및 유출수의 TBOD<sub>5</sub>, SBOD<sub>5</sub> 및 VFA 농도 변화를 나타내었다. Mode I 유입수 TBOD<sub>5</sub> 및 SBOD<sub>5</sub> 평균 농도는 각각 54 및 34 mg/L로 유입 농도가 낮고 큰 변화가 없었으나, 그 이후부터는 유입수 농도가 전반적으로 높고 변화가 컸다. 총 운영기간 유출수의 TBOD<sub>5</sub> 및 SBOD<sub>5</sub> 평균 농도는 각각 20 및 10 mg/L이었으며, 평균 제거율은 72.1 및 81.1%이었다. 유출수의 TBOD<sub>5</sub> 및 SBOD<sub>5</sub>는 부하가 가장 낮았던 Mode I에서 각각 11 및 6 mg/L로 가장 낮았고, 반응조 운전이 불안정하였던 Mode III에서 각각 27 및 15 mg/L로 가장 높았다. 반응조 운영이 다소 불안정하였던 Mode III을 제외하면 전 구간에서 안정적인 처리 성능을 보였으며, 유출수 SBOD<sub>5</sub>의 경우 대부분 10 mg/L 미만의 농도를 유지하여 FBR 반응조의 용해성의 생분해성 유기물 제거 성능이 높다는 것을 알 수 있다.

총 운전기간동안 COD로 환산한 VFA 평균 농도는 3.9 mg/L as COD로써 SBOD<sub>5</sub> 평균 농도의 41%를 차지하였다. VFA는 대부분 아세트산이었으며, VFA를 제외한 생분해성 유기물 성분은 SMP(soluble microbial product)로 판단된다.

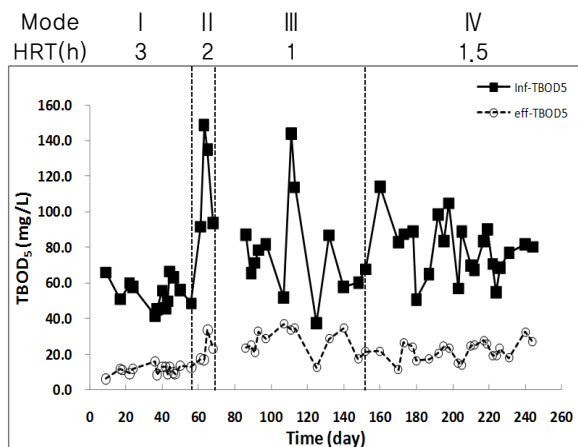


Fig. 4. Changes in TBOD<sub>5</sub> at various HRTs.

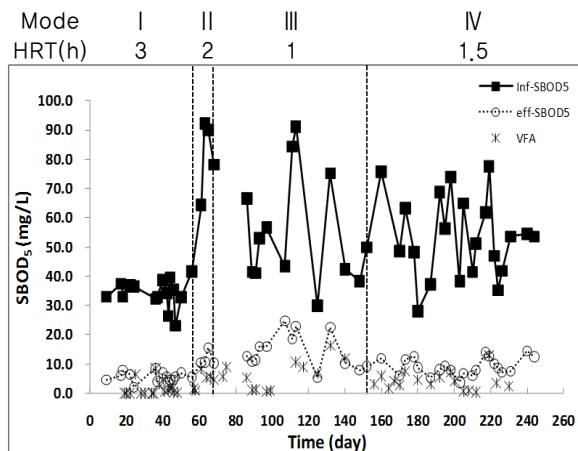


Fig. 5. Changes in SBOD<sub>5</sub> and VFA at various HRTs.

### 3.1.3 SS 제거효율

Fig. 6에는 유입수와 유출수의 VSS 농도 변화를 나타내었다. 실험기간 동안 유입수의 TSS 및 VSS 평균 농도는 각각 42 및 37 mg/L로 TSS의 89%가 VSS이었다. 평균 VSS 제거율은 30.4~59.3%로 운영일수 100일을 전후로 하여 큰 차이를 나타내었다. 반응조 운영 110일 이전에는 약 60%의 VSS 제거효율을 보였으나 그 이후에는 약 30%로 낮아졌다. 그 원인은 앞서 언급한 식중에 사용된 입상 활성탄 생물막의 흡착효과에 의한 것으로 판단된다. 식중된 생물막이 두꺼운 입상 활성탄이 유동상 상부에 위치하면서, 일부 입자성 유기물은 흡착·분해

시키고, 일부는 GAC 입자 사이에 축적시킴으로서 제거효율이 높게 유지되었다. 그러나 과도한 생물막 형성에 따른 유동상의 문제가 발생하면서 VSS 제거량은 현저히 저하되었다. Mode IV부터는 GAC의 유동이 안정화되어 VSS 제거량이 증가하였으나, 생물막이 과도하게 성장된 입상 활성탄을 유동 문제로 인해 새로운 활성탄으로 교체하면서 다시 감소하였다. 운영 210일 이후부터는 GAC 유동의 안정화로 생물막 형성이 용이하여 VSS 제거효율이 증가하였다.

FBR과 같이 빠른 상향유속이 적용되는 고속 혐기성 반응조에서의 VSS 제거효과는 높지 않다고 알려져 있지만(Manariotis와 Grigoropoulos, 2006) 본 연구의 전반부에서 생물막의 흡착 효과에 의해 나타난 높은 VSS 제거효과를 활용할 수 있다면 입자성 유기물 제거에 취약하다고 알려진 FBR의 처리 효율 개선에 도움이 될 수 있다고 생각된다. 물론, VSS가 반응조 내에 과도하게 축적될 경우 전반적인 처리 효율 저하를 가져 올 수 있다고 알려져 있기 때문에(Herbert, 2010) 실제로 어떤 수준까지 반응조내에 입자성 유기물을 축적시키면서 효과적으로 제거시킬 수 있는지는 추가적인 연구가 필요할 것으로 판단된다.

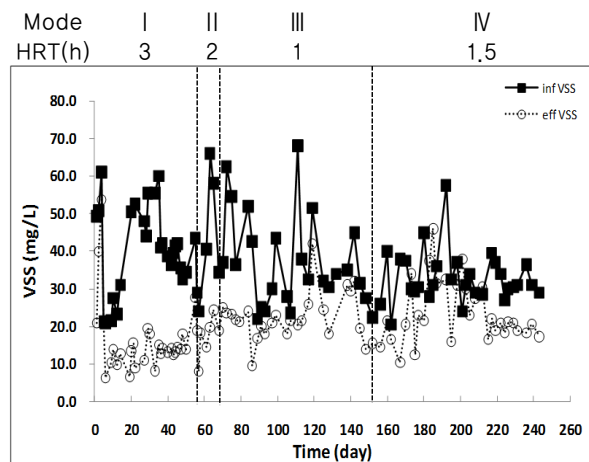


Fig. 6. Changes in VSS at various HRTs.

### 3.1.4 기타 분석 결과

운영기간 중 pH, 알칼리도, NH<sub>4</sub><sup>+</sup>-N, SO<sub>4</sub><sup>2-</sup> 결과를 Table 3에 정리하였다. 반응조의 Mode별 반응조 pH의 평균 범위는 7.0~7.3이었으며, 알칼리도는 223~250 mg/L as CaCO<sub>3</sub>이었다. 유입수의 황산염 농도는 약 60 mg/L로 Mode III에서는 50% 가량 제거되었지만, Mode IV에서는 90% 이상 제거되었다.

Table 3. Average values of pH, alkalinity, NH<sub>4</sub><sup>+</sup>-N, SO<sub>4</sub><sup>2-</sup>

Mode	I	II	III	IV
Influent (mg/L)				
NH <sub>4</sub> <sup>+</sup> -N	-	-	34 ± 2	18 ± 3
SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup>	-	-	61 ± 4	61 ± 2
Effluent (mg/L)				
pH	7.2 ± 0.3	7.3 ± 0.1	7.2 ± 2.9	7.0 ± 0.2
Alkalinity (as CaCO <sub>3</sub> )	-	-	250 ± 10	223 ± 20
NH <sub>4</sub> <sup>+</sup> -N	-	-	31 ± 0	20 ± 4
SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup>	-	-	30 ± 3	6 ± 2

### 3.2 FBR의 에너지 수치

혐기성 유동상 반응조의 운전에 필요한 순환 펌프의 동력 요구량을 Eq. 1에 근거하여 산정하였다 (Kim 등, 2011).

$$P = \frac{Q\gamma E}{1000} \quad (\text{Eq. 1})$$

where, P = Power requirement (kW)

Q = Flow rate (m<sup>3</sup>/s)

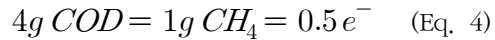
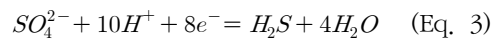
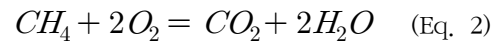
γ = Specific weight (9800 N/m<sup>3</sup>)

E = Hydraulic pressure head (m)

Mode IV에서 순환 유량은 6.7×10<sup>-6</sup>m<sup>3</sup>/s이었으며, 19 cm의 활성탄 베드의 수두손실은 0.0338 m이었다. 이를 Eq.1에 대입하면 에너지 요구량은 2.2×10<sup>-6</sup> kW이고, HRT에 따른 처리 유량 2~6 L/d을 고려할 때 활성탄 유동에 필요한 에너지 요

구량은 0.009~0.026 kWh/m<sup>3</sup>으로 산출되었다.

Mode III 및 IV에서 황산염 환원 및 메탄 생성 (용존+가스상)을 포함한 COD 물질 수지를 Fig. 7에 나타내었다. 발생 메탄의 COD 당량은 Eq. 2 및 Eq. 4를 근거로 계산하였고, 황산염을 황화수소로 환원시키는데 필요한 COD 당량은 Eq. 3 및 Eq. 4를 근거로 계산하였다.



Mode III에서 제거된 COD는 166 mg/L로서 황산염 환원 및 가스상 메탄과 용해성 메탄으로 전환된 비율은 각각 12, 24.8, 그리고 56.5%이었다. 참고로 가스상 메탄 발생량은 0.65 mmol/L<sub>하수</sub>이었다. Mode IV에서는 110 mg/L의 COD가 제거되어 황산염 환원 및 가스상 메탄 그리고 용해성 메탄으로 전환된 비율은 각각 34.0, 11.8 그리고 35.2%이었다. 총 COD 제거량에 차이가 있음을 감안하더라도 Mode IV에서 Mode III에 비해 가스상으로 회수된 메탄의 양이 적은 이유는 Mode IV에서 황산염 환원에 소모된 COD 당량이 많기 때문이다. 따라서 황산염의 환원량이 많아지면 가스상의 메탄으로 회수할 수 있는 에너지가 감소한다.

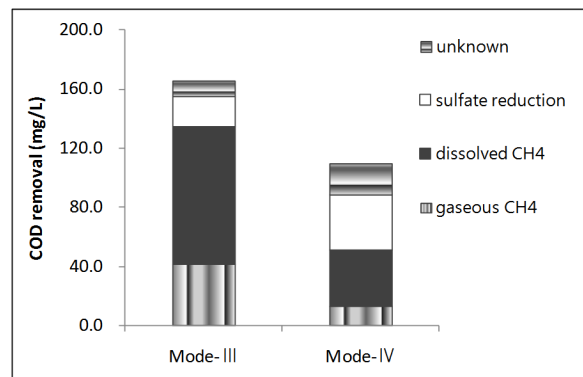
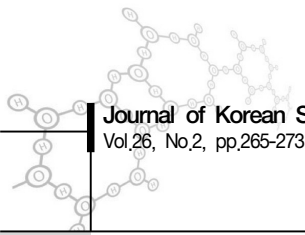


Fig. 7. COD balances for the fluidized bed reactor.



메탄가스의 열량을 800 KJ/mol로 가정하였을 때, Mode III 및 IV의 가스상 메탄 발생량의 열량을 에너지로 환산하면 각각 0.144 및 0.044 kWh/m<sup>3</sup>이다. 발전효율 30%, 모터·펌프의 효율 80%, 펌프 임펠러 효율 85%, 인버터 효율 95%를 감안하였을 때(Kim 등, 2011) 실제로 회수할 수 있는 에너지는 0.009~0.028 kWh/m<sup>3</sup> 정도로 추정된다. FBR의 운전 전에 소모되는 에너지가 0.009~0.026 kWh/m<sup>3</sup>으로 추정되므로 FBR을 이용한 하수처리는 매질의 유동에 요구되는 대부분의 에너지를 메탄가스를 통해 회수할 수 있는 에너지 생산형 하수처리가 될 수 있을 것으로 판단된다.

#### 4. 결론

유동상 반응조의 하수 처리성능을 평가하기 위한 실험실 규모 연구를 통해 다음과 같은 결론을 얻었다.

1) 운전온도 20~25°C에서 혐기성 유동상 반응조의 SBOD<sub>5</sub> 평균 제거율은 HRT 3 및 1.5 h에서 각각 83.5 및 82.6%로 큰 차이가 없었으며, 1 h에서는 73.4%로 다소 감소하였다. 그러나 총 운영기간 유출수의 평균 SBOD<sub>5</sub> 농도가 10 ± 5 mg/L로 짧은 체류시간에서도 방류수 수질기준이하로 처리할 수 있었다.

2) FBR 매질의 생물막은 SS 성분을 흡착한 후 가수분해 시킴으로서 SS의 제거 효율을 증가시키는 기능이 있지만 흡착능력 및 가수분해 속도 등에 대해서는 추가 연구가 필요하다.

3) 유입수 COD가 200 mg/L 이하로 낮음에도 불구하고, 가스상 메탄으로 회수할 수 있는 에너지는 0.009~0.028 kWh/m<sup>3</sup>으로 FBR 유동에 요구되는 에너지 0.009~0.026 kWh/m<sup>3</sup>를 충족할 수 있었다. 따라서 FBR을 이용한 혐기성 하수처리 공정은 에너지 사용 및 슬러지 관리 측면에서 호기성 처리에 비해 장점을 갖는다고 판단되었다.

#### 사 사

본 연구는 환경부 글로벌탑 환경기술개발사업의 “하·폐수고도처리기술개발사업단”의 지원에 의해 수행된 과제임 (과제번호 : GT-11-B-01-012-0)

#### 참고문헌

- 박승호, 김병주, 배재호, 이철모, 김용호 (2007) 국내 공공하수도 시설의 에너지 사용 및 자원화실태 조사연구, 대한상하수도학회지, 21(5), pp. 539-549.
- 오테석, 김민정, 임정집, 김용수, 유창규 (2011) 기후변화를 고려한 하수처리공법별 온실가스 및 슬러지 배출량 상정 및 환경성 평가, 한국화학공학회지, 49(2), pp. 187-194.
- 유상용, 김덕진, 이선구 (2005) 국내 하수처리장 유지관리비용 분석 및 절감방안, 공동 국제학술발표회 논문집, 대한상하수도학회·물환경학회, 광주, pp. 69-77.
- Gomec, C. Y. (2010) High-Rate Anaerobic Treatment of Domestic Wastewater at Ambient Operating Temperatures: A Review on Benefits and Drawbacks, *Journal of Environmental Science and Health*, 45(10), pp. 1169-1184.
- Herbert, H. P. F. (2010) Environmental Anaerobic Technology-Application and New Development, World Scientific Publishing Co, pp. 212-243.
- Kim, J., Kim, K., Ye, H., Lee, E., Shin, C., McCarty, P. L., and Bae, J. (2011) Anaerobic Fluidized Bed Membrane Bioreactor for Wastewater Treatment, *Environmental Science and Technology*, 45(2), pp. 576-581.
- Manariotis, I. D., and Grigoropoulos, S. G. (2006) Municipal Wastewater Treatment Using Upflow Anaerobic Filters, *Water Environment Research*, 78(3), pp. 233-242.
- Marín, P., Alkalay, D., Guerrero, L., Chamy, R., and Schiappacasse, M. C. (1999) Design and Startup of an Anaerobic Fluidized Bed Reactor, *Water Science and Technology*, 40(8), pp. 63-70.
- Sanz, I., and Fdz-Polanco, F. (1990) Low Temperature Treatment of Municipal Sewage in Anaerobic Fluidized Bed Reactors, *Water Research*, 24(4), pp. 463-469.
- Tandukar, M., Ohashi, A., and Harada, H. (2007)



Performance Comparison of a Pilot-Scale UASB and DHS System and Activated Sludge Process for the Treatment of Municipal Wastewater, *Water Research*, 41(12), pp. 2697-2705.

Vieira, S. M. M. (1988) Anaerobic Treatment of Domestic Sewage in Brazil. Research Results and Full-Scale Experience, In Proceeding of the Fifth International Conference on Anaerobic Digestion, Bologna, pp. 185-196.