

음식물 탈리액 처리를 위한 파일럿 규모의 막결합형 2상 혐기성 소화 공정 가능성 평가

A feasibility study of a pilot scale two-phase anaerobic digestion with ultra filtration for the treatment of garbage leachate

이은영 · 허안희 · 김형국 · 김희준* · 배재호

Eun-young Lee · Ahn-hee Heo · Hyung-kuk Kim · Hee-jun Kim* · Jae-ho Bae

인하대학교 환경공학과

(2008년 6월 21일 접수 ; 2009년 8월 4일 수정 ; 2009년 9월 28일 채택)

Abstract

A feasibility of a pilot scale two-phase anaerobic digestion with ultra filtration system treating garbage leachate were evaluated. The treatment system consisted of a thermophilic acidogenic reactor, a mesophilic methanogenic reactor, and an UF membrane. The average COD removal efficiency of the treatment system was 95% up to the OLR of 3.1 g COD/L/d. The higher COD removal efficiency with membrane unit resulted from the removal of some portion of soluble organics by membrane as well as particulate materials. When the membrane unit was in operation, bulk liquid in acidogenic and methanogenic reactors was partially interchanged, which maintained the acidogenic reactor pH over 5.0 without external chemical addition. Also, with the production of methane in the acidogenic reactor, the organic loading rate of the methanogenic reactor reduced. The initial flux of the membrane unit was 50~60 L/m²/hr, but decreased to 5 L/m²/hr after 95 days of operation due to clogging caused by particulate materials such as fibrous materials in garbage leachate. To prevent clogging caused by particulate materials, a pretreatment system such as screening is required. With the improvement with membrane unit operation, the two-phase anaerobic digestion with ultra filtration system is expected to have the possibility of treating garbage leachate.

Key words : garbage leachate, two phase anaerobic digestion, ultrafiltration, tubular

주제어 : 음식물 탈리액, 2상 혐기성 소화, 한외여과, 관형

1. 서 론

음식물 탈리액(이하 음폐수)은 호기성 퇴비화를 비롯한 음식물 쓰레기 자원화공정에서 발생하는 고농도 유기성 폐수로 그 처리가 용이하지 않기 때문에 현재 대부분을 해양투기하고 있는 상황이다. 그러나 해양오염방지법 강화에 따라

2013년부터는 사실상 해양투기가 금지될 것이므로 육상에서 처리하여야 한다. 혐기성 처리는 음폐수의 처리와 함께 에너지로 사용할 수 있는 메탄을 회수하는 폐기물의 자원순환 촉진 방안의 하나이다.

혐기성 처리로부터 발생한 메탄을 이용한 발전은 경제적 이익뿐만 아니라 이산화탄소 배출거래권 제도에 적극 대응

* Corresponding author Tel:+82-32-867-9919, Fax:+82-32-867-9919, E-mail: muzeo@hanmail.net(Kim, H.)

할 수 있는 청정개발체제(Clean development mechanism, CDM) 사업 등에도 참여할 수 있으므로 유럽을 중심으로 한 에너지 선진국에서는 1990년대 이후 실증 혐기성 플랜트가 다수 건설되어 2005년에는 2,500개 이상의 플랜트가 운영되고 있으며, 소화가스 발전규모는 약 650 MW에 달하고 있다(Philipp 등, 2006).

우리나라도 2011년까지 신·재생에너지의 비율을 5%까지 확대 보급할 계획으로 이중 바이오가스에 의한 발전계획은 100만 kW 규모로 약 7.9%를 차지한다. 그러나 현재 국내에서 혐기성 바이오가스에 의한 발전량은 일부 하수 처리장 소화조 및 매립지에만 제한적으로 적용되고 있는 실정 이므로, 향후 그 확대 보급이 필요하다.

혐기성 처리방법 중 2상 혐기성 소화공정에서는 산발효 및 메탄발효의 각 단계에서 작용하는 미생물의 생리적인 특징 및 영양적 요구 조건을 고려하여 적합한 환경조건을 유지시킬 수 있다. 그 결과 미생물의 활성이 극대화되어 전체 공정의 반응 속도 및 안정성을 향상시켜 유기물 제거 효율 및 메탄회수율을 향상시킬 수 있다(김남천 등, 2002). Demirer과 Chen (2005)은 축산폐수 처리 시 유기물 부하가 2 g VS/L/d에서는 단상과 2상의 가스발생량이 비슷하지만 부하가 5~6 g VS/L/d로 증가하면 2상의 가스발생량이 50~60% 정도 더 많았고 2상에서는 최대 12.6 g VS/L/d에서도 정상적으로 운전되었으나 단상에서는 운영이 불가능하다고 보고하였다. Ahn 등(2001)은 맥주 폐수를 처리할 때 유기물 부하 10 g/L/d에서 단상과 2상의 COD 제거효율은 80%로 비슷하였지만 유기물 부하가 30 g/L/d로 증가하면 제거효율은 각각 57% 및 62%로 2상의 제거효율이 높았으며 유기물 부하 증가에 따라 단상과 2상의 제거효율의 격차도 증가하였다고 보고하였다.

막결합형 혐기성 소화는 막을 이용하여 슬러지를 혐기성 소화조로 순환함으로써 소화조 내 미생물 농도를 높게 유지하고, 분해가 느린 생분해성 고형물과 미생물과의 접촉시간을 증가시킴으로써 처리효율을 높일 수 있다. 그 결과 기존 완전혼합형 소화조보다 단위용적 당 처리용량을 증가시키고 에너지의 회수와 설비 면적의 축소 등의 장점을 기대할 수 있다. 그러나 아직까지 막결합형 혐기성 소화는 대상 폐수에 포함된 고농도의 무기물 및 유기물로 인한 막힘 현상의 가능성이 높아 호기성 처리에 비해 제한적으로 적용되어 왔다. 그 중에서도 2상 혐기성 소화와 막을 결합한 처리 공정은 적용 예가 거의 없으며 특히 유기성 폐수 처리 분야에서는 연구가 미비한 실정이다.

본 연구는 파일럿 규모의 막결합형 2상 혐기성 소화 공정을 이용하여 음폐수의 처리 가능성 및 공정의 특성, 안정적인 분리막 운영 방법을 파악하기 위하여 수행하였다.

2. 실험재료 및 방법

2.1 유입수 성상

본 연구에서 사용한 음폐수는 인천광역시 남동구 음식물 폐기물 자원화 시설의 각 공정에서 발생하는 음폐수 및 폐수가 혼합된 저류조 혼합폐수로, 그 성상은 Table 1과 같다. 음폐수는 평균 pH 4.1, TCOD 172.5 g/L, TKN 4,515 mg/L로 고농도의 유기물과 질소를 함유하고 있으며 성상의 변화폭이 크다.

2.2 실험장치

실험 장치는 인천 서구 수도권 매립지 침출수 처리장 옆 가건물 내에 설치하였으며, 공정의 구성은 Fig. 1에 나타내었다. 막결합형 2상 혐기성 소화 공정은 완전혼합반응조 형태의 가수분해 및 산발효를 위한 산발효조, 메탄생성을 위한 메탄조와 고액분리 및 미생물 반송이 목적인 분리막으로 구성되었으며, 그 밖에도 원수저류조, 전처리 장치, buffer tank, 방류조, 세정조, 농축조, 탈황설비, 가스저장조, 보일러가 설치되었다.

원수저류조에 저장한 음폐수는 매일 10~20회에 나누어 산발효조로 유입시켰으며, 초기 HRT는 3 m³ 처리기준, 산발효조와 메탄조 각각 5일 및 20일이었다. 산발효조는 15 m³의 용량으로 55℃의 고온조건에서, 메탄조는 60 m³의 용량으로 35℃의 중온조건에서 운전하였다. 분리막은 막 모듈 8개를 직렬로 연결한 것을 1단으로 하여 총 5단을 병렬로 연결, 40개의 모듈을 설치하였다. 분리막은

Table 1. Characteristics of garbage leachate

characteristics	garbage leachate	
	range	average
pH	3.6 ~ 6.2	4.1
TCOD (g/L)	76.2 ~ 259.2	172.5
SCOD (g/L)	44.0 ~ 138.6	96.1
BOD ₅ (g/L)	51.2 ~ 121.7	79.1
TS (g/L)	48.1 ~ 155.5	96.3
VS (g/L)	37.1 ~ 116.0	79.5
TSS (g/L)	24.2 ~ 88.2	46.3
VSS (g/L)	23.5 ~ 82.9	43.0
NH ₄ ⁺ (mg N/L)	182 ~ 2,100	734
TKN (mg N/L)	4,270 ~ 4,760	4,515
TP (mg P/L)	803 ~ 1,410	1,107
VFAs (g COD/L)	0.5 ~ 21.4	8.9

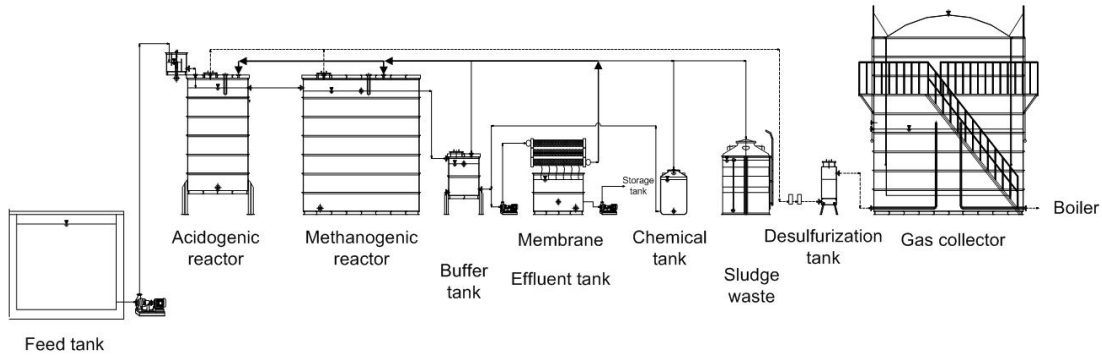


Fig. 1. Schematic diagram of a pilot scale two-phase anaerobic digestion with ultra filtration.

Table 2. Operating conditions of two-phase anaerobic digestion with ultra filtration

Mode	Time (day)	OLR (g COD/L/d)	Inflow (m ³)		membrane operation	pre-treatment
			plan	actual		
I	0~84	0.1~5.6	3	2.8 ± 1.1	○	X
	85~119	6.1 ± 1.5	3	2.8 ± 1.0		
II	124~139	5.3 ± 1.5	1.5	2.0 ± 0.5	X	X
	153~207	3.6 ± 1.7	1.5	1.9 ± 0.7		
	216~222	6.1 ± 0.7	2	2.2 ± 0.6		
	223~225	3.1	1	1.6 ± 0.7		
III	226~261	3.1 ± 1.0	1	1.3 ± 0.5	○	X
	262~338	3.1 ± 1.3	1	1.2 ± 0.4	○	○

tubular 형식의 한외여과(Ultrafiltration, UF) 막으로 분획분자량은 30,000 dalton 이었다. 운전 중 막간차압 (Transmembrane pressure, TMP)은 2.0 kgf/cm²이었으며, 운전방식은 유체가 압력에 의해 막 내부에서 외부로 투과하며 고액분리가 이루어지는 가압식이었다. 소화 공정에서 발생한 가스는 탈황설비를 거쳐 습식형 가스저장조에 저장하였으며 보일러에서 각 반응조 가온 목적으로 사용하고 나머지는 연소설비에서 폐기하였다.

2.3 운전조건

반응조의 식중슬러지로는 음폐수를 처리하고 있는 UASB 공정의 슬러지를 이용하였으며, 산발효조 및 메탄조에 각각 14.4 m³ 및 48.4 m³씩 식중슬러지를 적용 및 안정적 인소화를 위하여 음폐수를 TCOD 기준 5 kg/m³ 농도로 희석하여 유입하였으나 운전 약 85일 이후부터 음폐수 원액을 유입시켰다.

음폐수를 처리하기 위한 공정은 Table 2에 나타난 바와

같이 Mode I, II, III로 나누어 운전하였다. Mode I 은 슬러지 순환기간으로 5단(40개 module)의 분리막을 TMP 2.0 kgf/cm², 막면유속 4.1 m/s 조건으로 운전하였으며, 운전 85일 이후부터는 원액을 유입하였다. 분리막 운전 시에는 농축수가 짧은 시간동안 메탄조로 반송되면서 메탄조의 수위가 일시적으로 상승하여 메탄조 내액이 산발효조로 역류하는 현상이 발생하였다. 그 결과 산발효조의 pH는 약품 주입 없이 조절이 가능하였다. Mode II는 막의 막힘 현상이 발생하여 분리막 운전을 중단한 기간으로 음폐수 원액을 약 1.5~2 m³씩 유입시켰으나 pH 감소 및 SCOD 증가 등 처리 효율이 저하되는 경우 유입을 일시적으로 중단시켰다. 산발효조의 pH는 메탄조 내액을 3 m³/일 유량으로 반송시키며 조절하였다. Mode III은 분리막을 재가동하며 운전한 기간으로 원액 유입량을 통해 OLR을 조절하여 평균 OLR은 3.1 g COD/L/d이었다. 지속적인 분리막 막힘현상을 제어하기 위하여 262일 이후부터 음폐수를 전처리 장치를 통해 0.3 mm 이상의 고형물을 제거한 후 유입시켰다.

2.4 분석항목 및 방법

유입수, 유출수 및 각 반응조에 대해서 pH, alkalinity, NH_4^+-N , NH_3-N , TCOD, SCOD, BOD_5 , TS 및 VS, TSS 및 VSS, TKN, TP, VFAs, 가스성분(CH_4 , CO_2 등) 등의 항목을 분석하였다. 그 중 수중의 용존성 암모니아(NH_3-N), 암모늄 이온(NH_4^+-N)은 이온전극법(ammonia-selective electrode)을 이용하였다.

VFAs는 HP-INNOWax column($30\text{ m} \times 0.25\text{ mm} \times 0.15\text{ }\mu\text{m}$)이 장착된 GC-FID(Agilent 6890N)을 이용하였으며, 가스성분은 Alltech-CTR I column($6\text{ft} \times 1/4''$ outer, $6\text{ft} \times 1/8''$ inner)이 장착된 GC-TCD(HP 6890 series)를 이용하여 조성 및 농도를 분석하였다. 이외의 분석항목은 Standard Methods(APHA, 1998) 및 수질오염 공정시험법(환경부, 2006)에 준하여 분석하였다.

3. 결과 및 고찰

3.1 Overall performance

3.1.1 유기물 제거효율

전체 시스템의 유기물 제거효율은 분리막 및 메탄조 유출수의 TCOD 및 SCOD를 기준으로 산정하여 Fig. 2와 3에 나타내었다. 분리막 유출수는 최종 유출수에 대한 값으로 분리막을 거치면서 고액분리가 이루어지므로 TCOD와 SCOD가 거의 일치하여 TCOD 제거효율이 메탄조 유출수를 이용할 경우보다 높게 산정되었다. 메탄조 유출수에 대한 제거효율은 분리막을 사용하지 않을 경우에 대한 값이다. 분리막 유출수의 COD 제거효율을 살펴보면, 분리막을 운전한 Mode I에서는 운전초기 COD 제거효율은 95% 이상이었으나, 유기물 부하를 최대 8.7 g COD/L/d 까지 증가시켰을 때 SCOD의 증가와 더불어 TCOD 제거효율이 90%까지

감소하였다. Mode II의 경우에는 분리막을 운전하지 않아 분리막 유출수에 대한 제거효율은 구할 수 없었다. SCOD 제거효율은 5.3 g COD/L/d 의 부하에서 약 80%이었으나, 원액 유입량을 조절하여 3.1 g COD/L/d 의 부하에서는 90% 정도로 높아졌다. Mode III에서는 분리막 운전과 더불어 TCOD 제거효율은 평균 3.1 g COD/L/d 의 유기물 부하에서 95% 이상으로 나타났다. 그러나 후반에 메탄조 온도가 $4\text{ }^\circ\text{C}$ 까지 상승하여 SCOD 제거효율이 95% 이상에서 75%까지 감소하였다. Mode I 및 III에서 분리막 유출수의 높은 유기물 제거효율은 대부분의 입자성 유기물이 농축되어 메탄조로 반송되었기 때문이다.

메탄조 유출수에 대한 COD 제거효율은 운전초기부터 꾸준히 증가하였으며, 특히 SCOD 제거효율은 운전초기부터 80% 이상이었다. Mode I에서 메탄조 유출수에 대한 TCOD 및 SCOD 제거효율은 정상상태에서 평균 유기물 부하 6.1 g COD/L/d 에서 각각 72% 및 82%이었다. Mode II에서는 메탄조 유출수를 기준으로 산정한 결과, 평균 77%의 효율을 보였다. 약 180일쯤의 효율 감소는 단순히 유입수의 농도가 감소하여 나타난 것으로 실제 메탄조 내 TCOD는 큰 차이가 없었다. Mode III 후반에 SCOD 제거효율이 감소한 원인은 메탄조 온도가 $44\text{ }^\circ\text{C}$ 까지 상승하였기 때문이다. 분리막 유출수의 SCOD 제거효율은 메탄조 유출수의 SCOD 제거효율보다 약 2~5% 정도 높았는데, 이는 분리막을 통해 SCOD 중 30,000 dalton 이상의 분자량을 가지는 성분, 즉 용해성 물질의 일부도 제거되었기 때문이다.

고농도 음식물 폐수를 대상으로 한 He 등(2005)의 연구에서는 용적부하 $4.5\text{ kg/m}^3\text{d}$ 에서 COD 제거율이 81~94%라 보고하였다. 또한 Raynal 등(1998)은 야채폐수를 중온 2상 혐기성 소화조로 처리할 경우 3.7 g COD/L/d 의 OLR에서 COD 제거효율이 87% 정도라고 보고하였다. 본 연구에

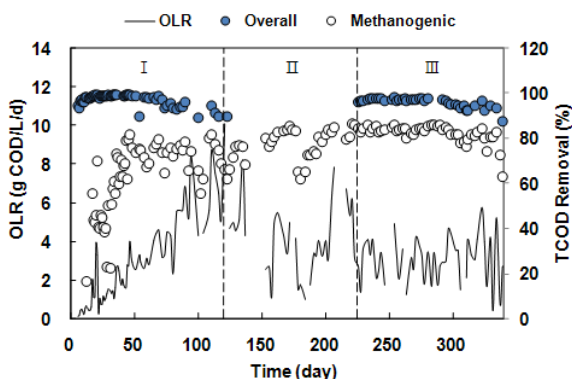


Fig. 2. Variations of TCOD removal efficiency.

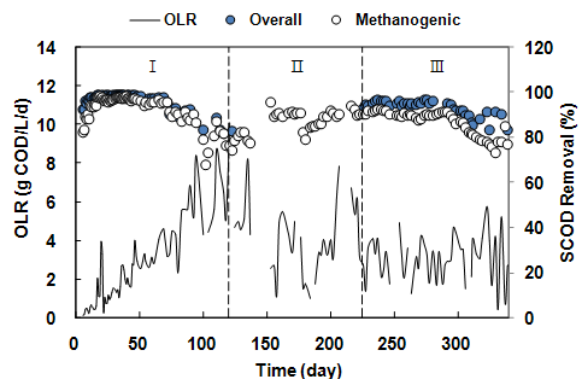


Fig. 3. Variations of SCOD removal efficiency.

서는 평균 유기물 부하 3.1 g COD/L/d에서 TCOD 및 SCOD 제거효율은 모두 95% 이상으로 막결합형 2상 혐기성 소화 공정에 의한 음폐수의 안정적인 처리가 가능함을 파악하였다. 또한 유출수의 SCOD 중 용해성 물질의 일부도 분리막에 의해 제거되었기에 처리수질이 향상되었다.

3.1.2 메탄함량

산발효조 및 메탄조 각 반응조 및 산발효조 가스와 메탄조 가스가 혼합된 가스저장조의 CH₄ 성분을 분석하여 Fig. 4에 나타내었다. 메탄조는 대체적으로 유기물 부하 변화에 크게 민감하지 않았으며 메탄 함량 60% 이상의 안정적인 소화 가스를 얻을 수 있었다. 산발효조는 운전조건에서 언급한 바와 같이 분리막 운전애 따른 메탄조 내액 역류현상에 의해 유입된 메탄균에 의해 pH가 높게 유지되었으며, 일부 유기물이 메탄으로 전환되었다. 그에 따라 산발효조의 평균 메탄 함량은 46%이었다.

3.1.3 고형물 농도

Fig. 5와 6에 유입수, 유출수 및 각 반응조의 총 부유물

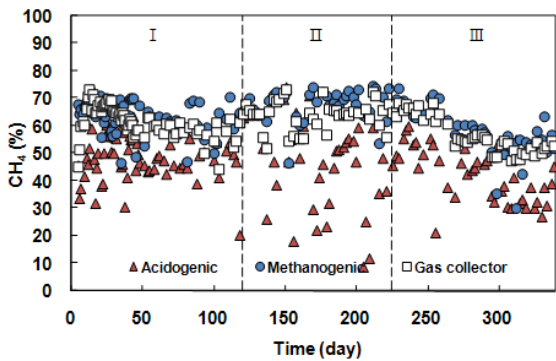


Fig. 4. Variations of methane contents.

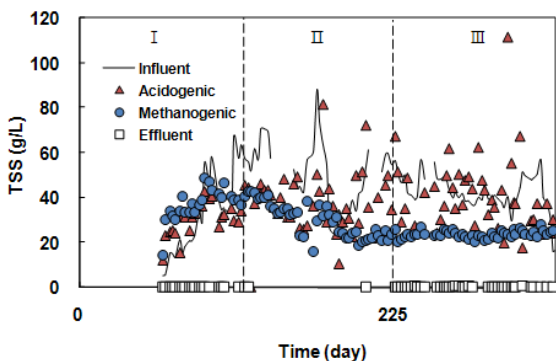


Fig. 5. Variations of TSS concentrations.

(TSS)와 휘발성 부유물(VSS) 농도를 나타내었다. 분리막 운전 기간 동안에는 투과수는 유출시키며 농축수는 메탄조로 반송시키므로 별도의 고형물 폐기는 없었으며, 그에 따라 시스템 내의 고형물 농도가 증가할 것으로 기대되었다. Mode I의 경우 유기물 부하 증가로 인한 유입수 고형물 농도 증가와 분리막 운전애 의한 효과로 메탄조의 TSS와 VSS가 초반에 비해 5.6 및 7.8 g/L씩 증가하여 42.8 및 25.8 g/L까지 증가하였다. 반면, Mode II에서는 메탄조의 고형물이 계속적으로 유출되어 고형물 농도가 점차적으로 감소하여 TSS 및 VSS는 각각 23.5 및 16.8 g/L로 낮아졌다. 분리막을 재운전한 Mode III에서는 운전기간이 짧아 고형물 농도 증가속도가 다소 낮았다. 분리막 운전애 의한 고형물 유지효과 및 그에 따른 유기물 제거 증가를 확인하기 위해서는 더 오랜 기간 운전할 필요가 있는 것으로 판단된다.

3.2 산발효조의 특성 및 미생물 반응 효과

산발효조에서 가수분해 및 산생성 효율을 증대시키기 위해서는 pH를 5.0~6.0 이상이 권장되고 있으나(Suzuki 등, 1997), 평균 pH 4.1의 음폐수가 산발효조로 유입되면 유기물이 발효생성물인 유기산으로 전환되면서 반응조 pH는 적정 범위 이하로 감소하게 된다. 이를 방지하기 위하여 일반적으로 음폐수 처리 시스템에서는 NaHCO₃, 석회와 같은 알칼리성 용액을 이용하여 pH를 조절한다. 그러나 약품 투입은 전체 처리 비용을 증가시킬 뿐만 아니라 첨가된 알칼리도에 의해 후속 메탄조의 pH가 높아져 NH₃ 독성에 의한 처리효율 저하 및 처리수의 용존 고형물 농도 증가 등의 문제가 발생할 수 있다.

본 연구에서는 pH 조절을 위하여 알칼리도가 비교적 풍부한 메탄조 유출수를 산발효조 내로 유입시킴으로써 산발효조의 pH를 5.0 이상으로 조절하고 메탄균도 공급하였다.

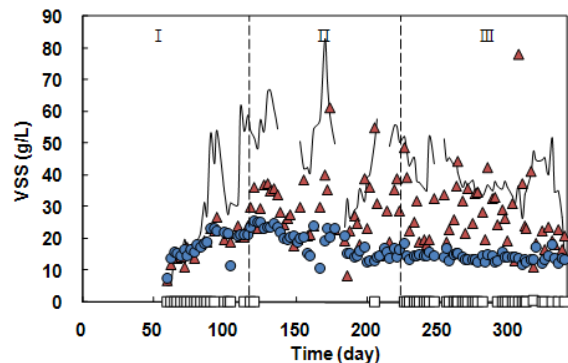


Fig. 6. Variations of VSS concentrations.

이로 인해 약품을 사용하지 않으면서 pH 조절이 가능하였고, 산발효조에서 메탄생성을 통해 유기물 제거도 얻을 수 있었다.

음폐수 원수 및 산발효조, 메탄조의 pH를 나타낸 Fig. 7을 살펴보면, 분리막이 정상적으로 운전된 Mode I에서는 인위적인 메탄조 유출수 반송 없이도 산발효조의 pH가 6.0 이상으로 유지됨을 확인할 수 있다. 이는 분리막이 운전되면 분리막 내부를 통과한 농축수가 다시 메탄조로 짧은 시간동안 반송되는데 그 때 메탄조의 수위가 일시적으로 상승하여 메탄조 내액이 산발효조로 역류되기 때문이다. 그러나 이때 두 반응조 사이로 흐르는 유량은 정확히 파악할 수 없었다. 관 폐색(clogging) 및 막 오염(fouling) 등의 문제가 생겨 분리막 운전이 중단된 Mode II은 산발효조의 pH가 5.0 이하로 감소하였다. 이 경우에는 산발효조의 pH 조절을 위해 인위적으로 메탄조 유출수를 3 m³/일 유량으로 반송하였다. Mode III의 경우 분리막의 운전으로 인해 산발효조는 pH 및 미생물 유지문제는 도움이 되었으나 pH가 5.0 이하로

낮아지는 경우가 발생하여 간헐적으로 3 m³씩 메탄조 내액을 산발효조로 반송하였다.

분리막 운전 기간 동안 발생한 메탄조 내액의 일시적 역유입은 산발효조 내 메탄생성균 개체수를 증가시켜 메탄생성을 통해 유기물을 제거하는 효과도 나타나(Fig. 4 참조), 메탄조에서의 유기물 부하를 감소시키는 효과도 얻을 수 있었다.

3.3 Tubular형 분리막의 운전 특성

분리막 운전 flux는 Fig. 8에 나타내었다. Mode I에서는 분리막을 1단에 8개씩 5단을 병렬로 연결하여 TMP 2.0 kgf/cm²에서 운전하였다. 분리막은 간헐적인 on-off 방식으로 운전하였는데 이는 메탄조와 분리막 사이에 buffer tank를 놓고 일정량이 채워지면 분리막으로 펌프를 통해 보냈기 때문이다. 운전초기에는 50~60 L/m²/hr으로 높았으나 운전 55일쯤부터는 flux가 반으로 감소하였으며 운전 95 일에는 5 L/m²/hr 정도로 낮아졌다. 하수슬러지의 막결합형 혐기성 소화조를 연구한 Abdullah 등(2005)은 HRT 7.8일에서 COD 제거율이 96.8~99.0%이며 플럭스는 막 오염 현상에 의해 62.1 L/m²/hr에서 6.9 L/m²/hr으로 감소한다고 보고하였다. 그러나 본 연구에서 급속한 플럭스 저하 원인은 Abdullah 등(2005)이 말한 막 표면 오염보다는 분리막 유입구 막힘현상과 막 내부 슬러지 농축 현상 때문이다.

분리막 유입구 막힘 현상은 섬유질 등의 이물질과 기름 알갱이가 묻쳐 덩어리를 만들며 발생하였다(Fig. 9). 각각의 분리막 모듈은 Fig. 9의 첫 번째 사진과 같은 U자관으로 연결되어 있는데 사진에서 볼 수 있듯이 U자관에서 분리막 유입 부분이 섬유질 등의 큰 고형물로 막혀있었다. 또한, 간헐적 분리막 운영으로 인하여 분리막 운영이 Off 모드인 동안에는 중력에 의해 막 내부에 정체되어 있는 슬러지 중 수분이 분리막을 통과하여 농축되는 현상이 발생하였다. Mode II에서 고형물을 제거한 후 재운전 하였으나 같은 현상이 2~3일 뒤 다시 발생하여 분리막 운전이 불가능하였다. 유입구 막힘 현상을 방지하기 위하여 Mode III부터는 분리막이 연속으로 운전하여 간헐운전에 따른 분리막 내 고형물 축적

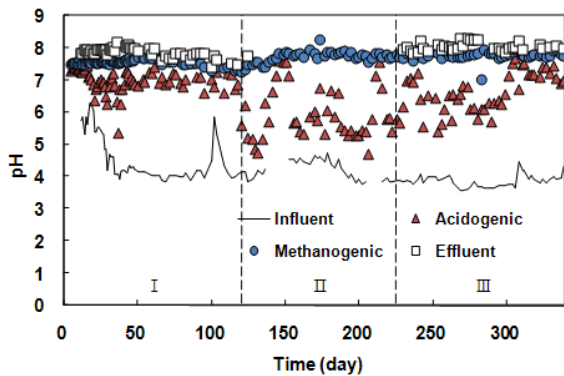


Fig. 7. Variations of pH.

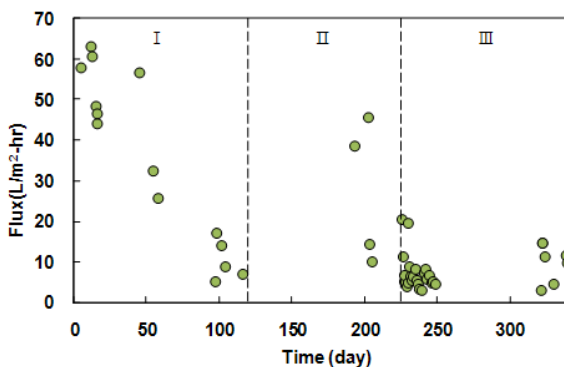


Fig. 8. Variations of membrane flux.



Fig. 9. Clogging at the entrance of the tubular membrane module.

을 방지하였고, Mode III 후반부터는 전처리 장치를 이용하여 0.3 mm 이상의 고형물을 제거한 후 음폐수를 유입시켜 분리막 유입구의 고형물 축적 및 분리막 내부의 슬러지 농축 가능성을 배제하였다.

향후 지속적인 운전을 위해서는 분리막에서 슬러지 농축을 최소화할 수 있도록 연속운전이 필수적이며, 음폐수 전처리 장치를 사용하여 일정 크기 이상의 고형물 및 기름성분을 제어할 필요가 있다. 또한 막 오염(fouling) 문제를 대비하여 보다 정확하게 flouling을 일으키는 물질을 판단하여 그에 맞는 적절한 세정법 연구가 필요하다.

4. 결론

본 연구는 파일럿 규모의 막결합형 2상 혐기성 소화 공정의 음폐수 처리 가능성을 평가하기 위하여 수행하였으며 다음과 같은 결론을 얻었다.

- 1) 음폐수를 막결합형 2상 혐기성 소화 공정을 이용하여 처리할 경우 평균 유기물 부하 3.1 g COD/L/d에서 95% 이상의 높은 COD 제거효율을 보였으며, 메탄함량 60% 이상의 소화가스를 얻을 수 있었다.
- 2) 분리막 운전 시 반응조 내의 VSS를 분리막을 운전하지 않을 때보다 높게 유지할 수 있었으나, 분리막 운전에 의한 고형물 유지효과 및 그에 따른 유기물 제거 증가를 확인하기 위해서는 더 오랜 기간 운전할 필요가 있다.
- 3) 산발효조는 메탄조 내액을 반송함으로써 약품을 사용하지 않고도 pH를 조절할 수 있었으며, 역유입된 메탄생성균에 의해 유기물을 제거하는 효과가 나타나 메탄조의 부하를 경감하는 효과도 있었다.
- 4) 분리막의 flux는 초기에 50~60 L/m²/hr이었으나 clogging 현상에 의해 평균 5~10 L/m²/hr 감소하였다. 이 물질 및 유지성분에 의한 유입구 막힘 현상 등을 해결하기 위해서는 전처리 장치가 필요하다.
- 5) 효율적인 분리막 운전을 위한 전처리 장치 도입 시 막결합형 2상 혐기성 소화 공정의 안정적인 음폐수 처리가 가능한 것으로 판단된다.

감사의 글

본 연구는 에너지관리공단 신재생에너지개발사업(과제번호: 2005-N-BI02-P-03-0-000, 과제명: 유기성 폐기물과 음식물 탈리액 혼합처리를 위한 고효율 고온혐기성소화공정 개발)의 연구비 지원에 의해 수행되었으며 이에 감사드립니다.

참고문헌

1. 김남천, 유기영, 안중우, 김영준, 허관, 정연구, 배재근 (2002) 혐기성소화공정에 의한 바이오가스화의 기술 원리 및 응용; 음식물쓰레기 및 하수슬러지의 혐기성소화기술, *한국유기성 폐자원 학회지*, **10**(1), pp. 7~23.
2. 환경부 고시 제2004-188호 (2006) 수질오염공정시험방법.
3. Abdullah, A. G. L., Idris, A., Ahmadun, F. R., Baharin, B. S., Emby, F., Megat Mohd Noor, M. J. and Nour, A. H. (2005) A kinetic study of a membrane anaerobic reactor (MAR) for treatment of sewage sludge, *Desalination*, **183**, pp. 439-445.
4. Ahn, Y. and Min, K., Speece, R. E. (2001) Pre-acidification in anaerobic sludge bed process treating brewery wastewater, *Wat. Res.*, **35**(18), pp. 4267-4276.
5. APHA, AWWA and WEFW (1998) Standard methods for the examination of water and wastewater, 20th ed., Washington DC, USA.
6. Demirel, G. N. and Chen, S. (2005) Two-phase anaerobic digestion of unscreened dairy manure, *Proc. Biochem.*, **40**, pp. 3542-3549.
7. He, Y., Xu, P., Li, C. and Zhang, B. (2005) High-concentration food wastewater treatment by an anaerobic membrane bioreactor, *Wat. Res.*, **39**, pp. 4110-4118.
8. Philipp, W., Drca, M., Ade-Kappelmann, K., Lorenz, H., B hm, R. (2006) Hygiene rules for anaerobic digestion plants in the future, ORBIT 2006 Biological Waste Management from Local to Global, pp. 729-734.
9. Raynal, J., Delgenes, J. P., Moletta, R., "Two-phase anaerobic digestion of solid wastes by a multiple liquefaction reactors process", *Bioresource Technology*, **65**, pp. 97-103(1998).
10. Suzuki, H., Yoneyama, Y. and Tanaka, T. (1997) Acidification during anaerobic treatment of brewery wastewater, *Wat. Sci. Tech.*, **35**(8), pp. 265-274.