



음식물 탈리액 처리를 위한 막결합형 고온 2상 혐기성 소화 공정의 평가 Evaluation of a Thermophilic Two-Phase Anaerobic Digestion Coupled with Membrane Process for Garbage Leachate Treatment

이은영¹ · 전덕우² · 이상화¹ · 배재호¹ · 김정환¹ · 김영오²*

Eunyoung Lee¹ · Dukwoo Jun² · Sanghwa Lee¹ · Jaeho Bae¹ · Jeonghwan Kim¹ · Youngo Kim²*

1 인하대학교 환경공학과, 2 현대건설 연구개발본부

(2011년 11월 3일 접수; 2012년 2월 2일 수정; 2012년 2월 6일 채택)

Abstract

This study evaluated the performance of a thermophilic two-phase anaerobic digestion (TTPAD) coupled with membrane process treating garbage leachate. The pilot-scale treatment system is consisted of thermophilic acidogenic reactor (TAR) and thermophilic methanogenic reactor (TMR) coupled with an ultrafiltration (UF) membrane unit. The hydraulic retention time of TAR and TMR were 4 and 20 days, respectively. Effluent TCOD and SCOD of the TTPAD were 25 ± 6 and 12 ± 3 g/L, respectively, and the corresponding TCOD and SCOD removal efficiencies were 77% and 81%, respectively. Propionate was major acids as 75% in the effluent. Scum formation was not observed in TTPAD, which might be resulted from complete lipid degradation. However, TTPAD was appeared to be sensitive to free ammonia toxicity. The UF membrane was operated with constant pressure filtration at average TMP 1.3 atm. Permeate flux had a range of 15-30 L/m²/hr. With UF membrane, TCOD removal increased from 77% to 93%, and this SS free effluent would be beneficial to subsequent processes such as ammonia stripping

Key word: garbage leachate, two-phase anaerobic digestion, thermophilic, membrane

주제어: 음식물, 2상 혐기성 소화, 고온, 분리막

1. 서론

우리나라는 2008년 8월에 국가에너지기본계획을 수립하여 2030년까지 총 111조원을 투자, 신·재생 에너지 이용을 11%로 확대하기로 하였다(지식경제부, 2008). 신·재생에너지의 5.3%를 차지하는 바이오 에너지는 유기성 폐자원, 수송용 바이오연료, 그리고 목질계 바이오에너지 등으로 구분되며, 메탄 회

수에 적절한 유기성 폐자원으로는 음식물 폐기물, 슬러지, 그리고 축산분뇨 등이 있으며, 이들은 2003년 기준 국내 바이오매스 발생량의 약 74%를 차지하고 있다(안 등, 2007). 이들 유기성 폐자원의 부존자원량은 음식물 폐기물 17만 toe/년, 축산분뇨 90만 toe/년, 그리고 슬러지 3만 toe/년이다(산업자원부, 2007). 2011년까지 바이오가스에 의한 발전계

* Corresponding author: Tel +82-31-248-7410 Fax +82-31-280-7678 E-mail yokim@hdec.co.kr

획량은 100만 kW 규모이지만 현재 국내에서 혐기성 소화가스에 의한 발전은 일부 하수 처리장 소화조 및 매립지에만 제한적으로 적용되고 있어, 향후 그 확대 보급이 필요하다. 음식물 쓰레기 탈리액(이하 음폐수)은 음식물 쓰레기의 사료화·퇴비화 등 자원화 공정에서 2007년 현재 매일 9,077 톤이 발생하고 있으며, 이는 음식물 폐기물 처리량의 77%에 해당한다(환경부, 2008). 이와 같이 음폐수 발생량이 많은 것은 음식물 폐기물의 함수율이 높고, 퇴비화 공정 등에서 염분제거를 위한 세척수 등이 폐수로 발생하기 때문이다. 발생한 음폐수는 일부 하수처리장 및 침출수 처리장 등에서 병합처리되고 있으나 50% 이상이 해양투기되고 있다. 해양오염방지법 강화에 따라 2012년부터 음폐수는 해양투기를 하지 않고 전량 육상에서 자원화 할 계획이지만(환경부, 2007), 아직 신뢰성과 경제성을 갖춘 공법이 미비한 실정이다.

음식물 폐기물은 고농도의 유기물과 질소를 함유하고 있어서 호기성 처리보다는 혐기성 처리를 이용하는 것이 경제적이다. 음식물 폐기물은 축산분뇨보다 발생량은 적지만 대부분이 생분해성 유기물로 구성되어 있고, 분리수거도 효율이 높기 때문에 메탄가스 회수 잠재력이 매우 크다. 그러나 우리나라에서는 혐기성 소화에 대한 불신으로 인하여 음식물 폐기물 처리에 퇴비화 및 사료화 등의 호기성 방법이 선호되어 왔으며, 음폐수의 낮은 해양배출비용, 기술개발 및 투자부진 등의 원인으로 바이오가스의 자원화 실적이 미흡하다.

최근 국내에는 유기성 폐기물의 혐기성 처리 시설이 다수 설치 운영되고 있으나 메탄회수율이 설계치 보다 낮고, 가동이 중단되는 등 운영상의 문제를 겪고 있는 곳이 적지 않다. 이는 부적절한 전처리, 혐기성 소화에 대한 이해의 부족, 소화조 운영 경험의 미숙, 공정실패에 대한 불안감 등에 기인한다. 또한 최근에 개발된 다양한 공법에 대한 운영 지침과 숙련된 기술자 등의 부재 역시 운영상

의 어려움을 야기하고 있다. 그 결과 우리나라에서는 음폐수로부터 메탄 회수 기술은 아직도 안정적인 기술로 인정받고 있지 못하고 있으며, 가용한 자원에 비하여 활용이 부족한 편이다.

2상 혐기성 소화 공정은 산발효조와 메탄조를 분리함으로써 각 반응에 관여하는 미생물의 활성을 최대화시킬 수 있다. 기존 2상 혐기성 소화 공정에 대한 연구는 고온 산발효조 및 중온 메탄조 공정이 대부분이었다. 음폐수는 고농도의 유분을 함유하고 있는데 이는 높은 메탄 생성 잠재력을 가진다. 그러나 짧은 체류시간에서는 분해가 쉽지 않으며 음폐수 내 고형물과 결합하여 scum 등을 유발할 수 있다. 따라서 음폐수를 효율적으로 처리하고 소화조 운영문제를 해결하기 위해서는 효과적으로 유분을 제거하는 것이 필요하다. 메탄조를 고온으로 운전할 경우 유분의 용해도를 높여 효율적인 제거가 가능할 수 있다. 또한, 긴 체류시간에서 운전한다면 이와 같은 문제를 해결할 수 있을 것이다.

혐기성 처리의 성공적인 달성을 위해서는 미생물을 반응기 내에 체류시켜 고형물 체류시간과 수리학적 체류시간을 효과적으로 분리하는 것이 필요하다. 혐기성 분리막 공정은 혐기성 처리와 분리막 처리기술을 결합한 공정으로 분리막이 지닌 탁월한 분리능력과 높은 집적도로 상대적으로 짧은 수리학적 체류시간에서 생물학적 반응조로부터 미생물의 유출방지를 달성시킬 수 있다. 이미 1990년대 하·폐수를 적용한 혐기성 분리막 공법에 관한 연구가 있었고(Choo와 Lee, 1996), 지금까지 다양한 혐기성 반응조와 결합한 분리막 기술들에 관한 연구가 진행 중에 있다(Kim 등, 2001, Akram와 Stuckey, 2008). 그러나 분리막 기술의 많은 장점에도 불구하고 입자성 물질, 콜로이드성 물질, 다양한 유기물질 등으로 인한 분리막의 막힘현상은 여전히 풀어야 할 숙제이다. 분리막의 막힘현상은 유입수의 성상 뿐만 아니라 운전조건에 많은 영향을 받을 수 있으므로 혐기성 분리막 공정의 성공적인 운영을 위해

서는 분리막의 막힘현상에 관한 이해가 필수적이다.

본 연구는 파일럿 규모의 막결합형 고온 2상 혐기성 소화 공정을 이용하여 음폐수를 안정적으로 처리하며, 분리막의 적용으로 산발효 및 메탄발효에 관여하는 미생물을 반응기 내에 농축시켜 미생물의 활성을 증대시키고 체류시간을 증가시킴과 동시에 궁극적으로 소화조의 메탄회수효율을 향상시키는데 있다. 또한 음폐수를 처리하는 분리막 결합형 고온 혐기성 소화공정을 통해 분리막의 막힘현상을 관찰하여 최적의 분리막 운전조건을 확립하는데 있다.

2. 실험 재료 및 방법

2.1. 유입 음폐수의 성상

본 연구에서 사용한 음폐수는 I시 C 음식물 폐기물 자원화 시설의 사료화 공정에서 발생하는 것으로, 그 성상은 Table 1과 같다. 음폐수는 평균 pH 3.5 ± 0.4, TCOD 113 ± 29 g/L, TKN 2,828 ± 530 mg/L로 고농도의 유기물과 질소를 함유하고 있다.

Table 1. Characteristics of garbage leachate used in this study

characteristics	garbage leachate	
	range	average
pH	2.3 ~ 4.2	3.5 ± 0.4
TCOD (g/L)	65 ~ 170	113 ± 29
SCOD (g/L)	59 ~ 85	62 ± 8
TS (g/L)	35 ~ 80	65 ± 12
VS (g/L)	24 ~ 65	50 ± 11
TSS (g/L)	10 ~ 49	32 ± 9
VSS (g/L)	9.8 ~ 46.9	30 ± 9
TKN (mg N/L)	1,599 ~ 3,494	2,828 ± 530
NH ₄ ⁺ (mg N/L)	224 ~ 607	368 ± 94
VFAs (g COD/L)	6 ~ 25	10 ± 5

2.2. 막결합형 고온 2상 혐기성 소화 공정

I시 C 음식물 폐기물 자원화 시설 가건물 내에 설치된 막결합형 고온 2상 혐기성 소화 공정은 Fig. 1과 같이 구성되었다. 주요 구성요소는 가수분해 및 산발효를 위한 완전혼합형 산발효조(Thermophilic Acidogenic Reactor, TAR), 메탄생성을 위한 완전혼합형 메탄조(Thermophilic Methanogenic Reactor, TMR), 고액분리 및 미생물 반송을 위한 UF 분리막 공정, 그리고 바이오가스 저장시설이다. 그 밖에도 혐기성 소화조 유출수를 처리하기 위한 고온 CO₂ 탈기조, 암모니아 탈기조, 고속응집침전조 및 호기성 MBR 공정이 설치되었으나, 본 논문의 범위를 벗어나 다루지 않았다.

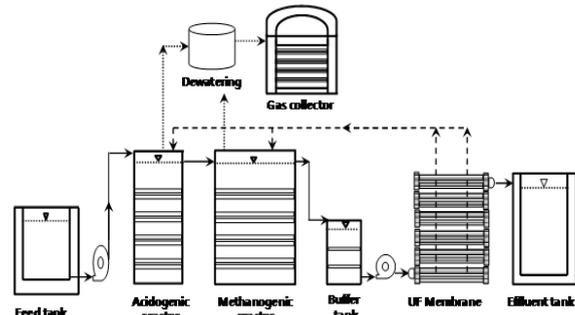


Fig. 1. Schematic diagram of a thermophilic two-phase anaerobic digestion coupled with membrane process.

총 700여 일의 운전기간 동안 TAR 및 TMR은 각각 55°C의 고온조건에서 운전되었으며, 용량은 각각 12 및 60 m³으로 수리학적 체류시간인 HRT는 음폐수 유입량을 조절하면서 변경시켰다. 운전 초기 90일 동안은 start-up 기간으로 반응조의 안정화 및 미생물 적응을 위하여 음폐수 유입량을 차츰 증가시켜 3 m³의 음폐수를 처리하였다. 이 때 각 반응조 HRT는 각각 4 및 20일이었다. 음폐수의 pH는 3.5로 낮기에 반응조 내 pH 조절이 필요하다. 본 공정에서는 TAR의 pH 조절을 위하여 이 등(2009)에서 제시한 방법과 같이 약품을 사용하지 않고 TMR 내액을 TAR로 순환시킴으로써 TAR의 pH 조

질 및 미생물 유지를 도모하였다. TMR 내액의 TAR로 반송량은 0.3 m³/day이었다. 본 연구에서 사용한 분리막은 tubular 형식의 한외여과(Ultrafiltration, UF) 막으로 사양 및 운전조건은 Table 2에 나타내었으며, 공정 운전 335일 이후부터 가동시켰다. 분리막의 분획분자량은 100 k Dalton 이었으며, 운전방식은 정압여과 방식으로 TMP (Transmembrane pressure)는 1~3 kgf/cm²이었다.

Table 2. Specifications of membrane unit

Specifications	Shape	Tubular
	Material	PVDF
	Diameter	11 mm
	MWCO	100 k Dalton
	Max. working Temp.	90 °C
Operating Condition	Total membrane area	13.1 m ²
	Operating pressure	1~3 kgf/cm ² (In-Out)
	Cross-flow velocity	1~3 m/sec

2.3. 분석항목 및 방법

유입수, 유출수 및 각 반응조에 대해서 pH, alkalinity, NH₄⁺-N, TCOD, SCOD, TS 및 VS, TSS 및 VSS, VFAs 등의 항목을 분석하였다. 그 중 NH₄⁺-N은 이온전극법(ammonia-selective electrode)을 이용하였으며, VFAs는 HP-INNOWax 칼럼(30 m × 0.25 mm × 0.15 μm, Agilent, USA)이 장착된 GC-FID (HP 6890 series, Agilent, USA)을 이용하여 분석하였다. 이외의 분석항목은 Standard Methods (APHA, 1998) 및 수질오염공정시험법(환경부, 2006)에 준하여 분석하였다.

3. 결과 및 고찰

3.1. 고온 2상 혐기성 소화 공정

분리막을 운전하기 이전 기간 동안 고온 2상 혐기성 소화 공정(Two-Phase Anaerobic Digestion, TPAD)의 유입수, TAR 및 TMR의 수질 특성 및 제

거효율을 Table 3에 요약하였다. 유입수의 TCOD 및 SCOD는 각각 113 ± 29 및 62 ± 8 g/L로 고농도의 유기물을 함유하고 있으며, 운전기간 동안 변화가 큰 편이었다. TAR 유출수의 평균 TCOD 및 SCOD는 각각 71 ± 25 및 42 ± 18 g/L이었으며, 원수 성상 변화에 따라 비슷하게 변화하였다. TMR 유출수의 TCOD 및 SCOD는 각각 25 ± 6 및 12 ± 3 g/L으로, 전체 처리공정의 TCOD 및 SCOD 제거효율은 각각 77% 및 81%이었다.

TAR의 산생성 효율을 높이기 위해서는 pH를 5.0~6.0으로 권장(Suzuki 등, 1997)하는데, 유입수의 pH는 평균 3.5로서 pH 조절이 필요하지만 약품 사용 시 운전비용이 증가한다. 본 연구에서는 TMR 내액을 0.3 m³/day (유입 유량의 10%) 유량으로 TAR로 순환시켜 pH가 권장치보다 다소 낮은 평균 4.1로 유지하였다. 이는 pH를 증가시키기 위한 순환량의 증가가 운전비용 상승으로 이어지며, 순환과 더불어 공급되는 메탄생성균이 산생성균 활성에 영향을 줄 수도 있다고 판단하였기 때문이다. TMR의 pH는 평균 7.7로, 메탄생성과 더불어 VFA가 소모되고, 단백질이 분해되며 암모니아성 질소가 생성되어 다소 높게 유지되었다.

TAR에서는 가수분해와 발효가 주 반응이므로 VFAs가 증가하여야 하는데, pH 조절을 위해 TMR 내액이 TAR로 반송되면서 메탄생성균이 지속적으로 공급되어 생성된 VFAs의 일부가 메탄으로 전환되었으며, 이는 이 등(2009)의 결과와 유사하다. TAR의 평균 VFAs는 8 g COD/L이었으며, 주요 성분은 acetate로 75%를 차지하였다. TMR에서는 평균 VFAs가 4 g COD/L이었으며, acetate와 propionate가 주요 VFAs 성분으로 각각 25% 및 75%를 차지하였다. 유사한 성분의 음폐수를 처리한 중온 TPAD 연구 결과에서는 중온 메탄조의 VFAs 중 acetate의 구성비가 약 69%로 대부분을 차지하여(이 등, 2009), 고온이 중온보다 propionate 비율이 높은 것을 알 수 있었다. 이는 단일 중온 및 고온 하

수 슬러지 소화 비교실험에서 중온 공정에서는 acetate, 고온 공정에서는 propionate가 중요 성분 이었다고 보고한 Song 등(2004)의 결과와 일치한다. 고온 소화에서 propionate 농도가 더 높은 이유는 obligate hydrogen-producing acetogens가 propionate를 분해하는 능력이 중온보다 고온에서 더 낮기 때문이다.

유입수의 TSS 중 대부분은 VSS로 유기물 성분이 높았다. TAR 유출수의 TSS 및 VSS 농도는 유입수 성장 변화에 영향을 많이 받았다. TMR 유출수는 VSS 농도의 변화가 크지 않았으며, 평균 10 g/L이었다.

Table 3. Thermophilic two-phase anaerobic digestion performance characteristics

Characteristics	Influent concentration (g/L)	Effluent concentration (g/L)		Total Removal (%)
		TAR	TMR	
TCOD	113 ± 29	71 ± 25	25 ± 6	77 ± 4
SCOD	62 ± 8	42 ± 18	12 ± 3	81 ± 3
Total VFAS	10 ± 5	8 ± 4	4 ± 2	-
Acetate	8 ± 0	6 ± 3	1 ± 1	-
Propionate	2 ± 0	2 ± 1	3 ± 2	-
TSS	32 ± 9	20 ± 3	15 ± 3	52 ± 12
VSS	30 ± 9	17 ± 3	10 ± 2	68 ± 7
pH	3.5 ± 0.4	5.0 ± 1.1	7.8 ± 0.2	-
Alkalinity	-	11 ± 7	12 ± 4	-
NH ₄ ⁺ -N	0.4 ± 0.1	0.8 ± 0.1	1.3 ± 0.1	-

3.2. 중온 및 고온 혐기성 소화 공정 비교

Table 3에 나타낸 고온 TPAD의 유기물 제거효율은 TCOD 및 SCOD 기준으로 각각 77% 및 81%이었다. 이는 유사한 음폐수를 대상으로 연구한 이 등(2009)의 중온 TPAD의 TCOD 및 SCOD 제거효율 82% 및 88%에 비하여 다소 낮은 편이다. 이 같은 온도에 따른 유기물 제거효율 차이는 고온에서의 암모니아 독성 영향과 빠른 세포 분해로 설명될

수 있다. TMR에서 NH₄⁺-N 농도는 대략 712~2,601 mg/L로, 이는 혐기성 소화에서 3,000 mg/L 이상으로 독성영향이 있다고 보고된 결과(McCarty, 1964)보다 낮았다. 그러나 총암모니아성 질소 중 NH₃-N의 비율은 온도가 증가함에 따라 다음 식과 같이 높아지며, 그 결과 암모니아 독성은 증가한다.

$$[NH_3] = \text{총암모니아성 질소} \times \left(1 + \frac{10^{-pH}}{10^{-\left(0.09018 + \frac{2729.92}{T(K)}\right)}} \right)^{-1}$$

Østergaard (1985)가 제안한 식에 따르면, 55°C에서 계산된 NH₃의 비율은 22%로 35°C에서 계산된 값보다 2.7배 높다. 따라서 고온에서 중온보다 낮은 유기물 제거효율은 NH₃에 의한 독성에 의한 것으로 판단된다. 또한, 고온 메탄조의 평균 VSS는 10 g/L로 유사한 음폐수를 처리한 중온 TPAD의 메탄조 VSS 23 g/L의 절반에 못 미치는 것으로 나타났다. 이는 고온 조건에서 상대적으로 높은 미생물 사멸율에 기인한 것으로 판단된다. 고온 메탄생성균의 최대비성장율은 중온 메탄생성균에 비해 2~3배 정도 높지만, 고온 메탄생성균이 미생물 세포 유지에 필요한 에너지가 더 많고, 약 2배의 사멸율을 가지기 때문에 미생물 성장 수율은 고온이 더 작을 수 있다(Mladenovska와 Ahring, 2000, Speece, 1996, Zeikus, 1979). 따라서 유기물 제거면에서 VSS가 더 높게 유지되는 중온 TPAD가 고온 TPAD보다 조금 더 높았던 것으로 사료된다.

총 700여 일의 운전기간 동안, 고온 TPAD에서는 고농도 유기성 폐수를 혐기성으로 처리할 때 가장 많은 문제를 일으키는 scum이 형성되지 않았다. 중온 TPAD에서는 scum층이 계속 발견되었다고 보고되었는데(이 등, 2009), 이는 lipid 분해가 느려 lipid granules 형성에 기인한 것이었다. 생성된 lipid granules은 결과적으로 후단에 연결되는 membrane에 fouling이나 관 등을 막는 현상을 초

래하였다. 그러나 본 연구에서는 lipid가 고온 메탄 생성균의 높은 기질 이용률과 고온에 따른 용해도 향상 등의 효과에 의해 거의 완전히 분해되어 scum층을 형성하지 않았으며, 후단에 연결된 membrane 역시 기름에 의한 막힘 유발이 없이 안정적으로 운전되었다.

3.3. 분리막 운전

TMR 유출수는 UF 분리막을 이용하여 고액분리한 후 분리된 고형물 즉, 미생물은 TMR로 재순환하였다. 분리막은 TMR에서 생성되는 유출수를 교차여과 방식으로 정압여과 처리하며 농축수는 TMR로 반송되어 TMR 내 미생물의 농도를 농축시켰다. 분리막 운전 416일부터 평균 TMP 1.3 atm, 선속도 2.3 m/sec으로 운전하였으며, 분리막 세정은 여과 후 청수를 주입하여 하루에 한번 약 40분 가량 역과진행 방향과 같은 방향으로 순환물 세정을 실시하였다. Fig. 2에는 운전 TMP 및 flux 변화를 나타내었다. 실험 결과, 약 350여 일 동안 처리유량 3 m³/day을 기준으로 분리막을 가동하였으며, 그 때 분리막 flux는 15~30 LMH 범위이었다. 운전결과 TMP 0.5 atm에서 운전 약 390일부터 분리막 막힘 현상으로 인한 투과플럭스 감소가 관찰되었으며 이를 증가시키기 위해 TMP를 약 1.0 atm으로 증가시켰으나 투과플럭스는 크게 증가하지 않았다. 이는 압력을 증가시키면서 동시에 파울링 저항이 증가하여 한계플럭스에 도달했기 때문인 것으로 판단한다. 선속도의 증가는 플럭스 증가에 큰 영향을 미치지 않다가 운전이 진행되면서 운전 약 630일까지 투과 플럭스가 서서히 증가하는 경향을 나타내었다. 이는 높은 선속도로 분리막 표면에서 발생하는 전단력으로 인해 분리막 표면으로부터 막 오염물질들의 역수송 발생에 기인된 것으로 사료된다.

분리막 투과수 수질은 Fig. 3에 나타내었다. 평균 투과수 TCOD는 7.6 g/L이었으며 최종 TCOD 제거 효율은 93%로, 분리막을 이용한 고액분리를 통해

TMR 제거효율인 77% 보다 16% 이상 효율이 증가하였다. 분리막 투과수의 SCOD 제거효율은 88%로 TMR 제거효율보다 약 7% 정도 증가하였다. 상대적은 낮은 SCOD 제거율은 100 k Dalton 보다 작은 일부 용해성 유기물질들이 분리막을 통과하였기 때문인 것으로 판단된다. 또한 높은 교차여과 속도로 인해 발생하는 전단력으로 인해 미생물들이 분해되고 이로 인해 미생물의 활동도를 감소시킨 것으로 사료된다. 고액분리 효과를 확인하기 위하여 분리막 투과수의 TSS 및 VSS 농도를 분석한 결과, 각각 평균 80 및 50 mg/L로 제거효율은 각각 99.8% 및 99.9% 이상이었다.

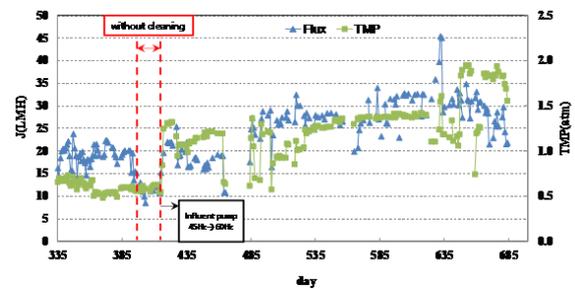


Fig. 2. Variations of membrane operating TMP and flux.

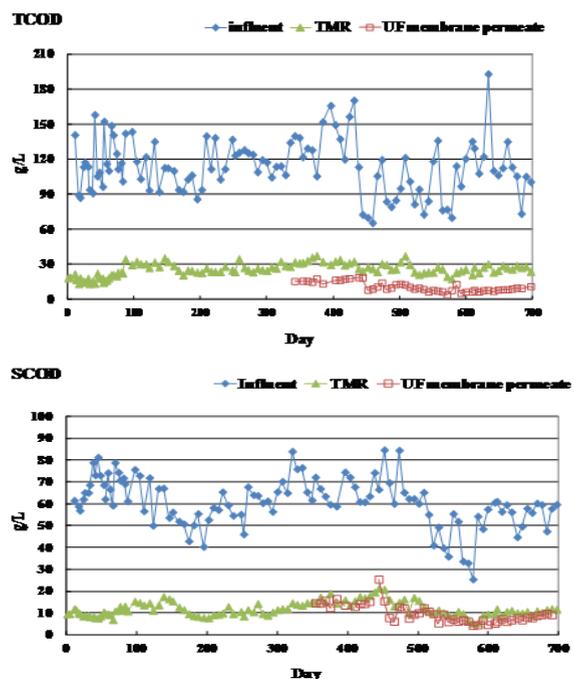


Fig. 3. Variations of TCOD and SCOD concentration.

4. 결론

1) 본 고온 2상 혐기성 소화 공정은 평균 TCOD 113 g/L의 음폐수를 대상으로 비교적 안정적으로 운전되었으며, 이때 TCOD 및 SCOD 제거효율은 각각 77% 및 81%이었다. 또한 고온 메탄조 유출수의 TCOD는 25 ± 6 g/L 정도이었다.

2) 고온 조건의 혐기성 소화공정은 lipid 성분의 분해율이 증온보다 높아 scum 형성 등의 문제점은 발견되지 않았으나, free ammonia 농도 증가에 따라 암모니아 독성영향에는 민감한 것으로 보였다.

3) 고온 2상 혐기성 소화 공정 메탄조의 유출수의 처리효율과 UF 분리막 여과 연계처리 시 투과수의 처리효율 비교하여 볼 때 UF 분리막 여과 연계처리 시 투과수의 처리효율 중 TCOD는 77%에서 93%, SCOD는 81%에서 86%로, TSS는 52%에서 99.8%로, VSS는 68%에서 99.9%로 제거효율 증가를 보였다.

4) 메탄조 순환 농축방식으로 운영 시 UF 분리막은 평균 TMP 1.3 atm, 선속도 2.3 m/sec에서 운전하였으며 이때 투과 flux는 15~30 LMH이었으며 연속적으로 안정적인 운전이 가능하였다.

감사의 글

이 논문은 현대건설(주) 연구개발과제(10ECOS01)와 환경부의 폐기물에너지화 자원화 전문인력양성사업의 지원을 받아서 수행되었습니다.

참고문헌

- 안종화, 이창수, 정명숙, 오길중, 황석환 (2007) 유기성폐기물이 통합처리 및 바이오매스 이용기술, 유기물자원화, 15(1), pp. 85-94.
- 이은영, 김형국, 티 투이 장, 배재호, 배영신, 원종철, 이재훈, 박성균, 조용완 (2009) 막결합형 2상 혐기성 소화 공정을 이용한 음식물 탈리액 처리, 대한환경공학회지, 31(11), pp. 997-1006.
- 산업자원부 (2007) 신·재생에너지 RD&D 전략 2030.
- 지식경제부 (2008) 제1차 국가에너지기본계획 2008~2030.
- 환경부 (2007) 음식물류 폐기물 처리시설 발생폐수 육상처리 및 에너지화 종합대책 [2008-2012].
- 환경부 (2008) 2007년 음식물류폐기물 자원화시설 운영현황.
- 환경부 고시 제2004-188호 (2006) 수질오염공정시험방법.
- Akram, A. and Stuckey, D. C. (2008) Flux and performance improvement in a submerged anaerobic membrane bioreactor (SAMBR) using powdered activated carbon (PAC), Process Biochemistry, 43, pp. 93-102.
- APHA (1998) Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater, 20th ed., New York.
- Choo, K. and Lee, C. (1996) Effect of anaerobic digestion broth composition on membrane permeability, Water Science and Technology, 34(9), pp. 173-179.
- Kim, J., Kim, K., Ye, H., Lee, E., McCarty, P. L., and Bae, J. (2011) Anaerobic fluidized bed membrane bioreactor for wastewater treatment, Environmental Science and Technology, 45, pp. 576-581.
- McCarty, P. L. (1964) Anaerobic waste treatment fundamentals, Part 2 : Environmental requirement and control, Public Works, Oct., pp. 123-126.
- Mladenovska, Z. And Ahring, K. (2000) Growth kinetics of thermophilic Methanosarcina spp. Isolated from full-scale biogas plants treating animal manures, FEMS Microbiology Ecology, 31(3), pp. 225-229.
- Østergaard, N. (1985) Biogasproduktion i det thermofile temperaturinterval. STUB rapport nr. 21. Kemiteknik Dansk Teknologisk Institut, Taastrup.
- Speece, R. E. (1996) Anaerobic biotechnology for industrial wastewaters, Archae Press, Nashville, TN.
- Song, Y., Kwon, S., and Woo, J. (2004) Mesophilic and thermophilic temperature co-phase anaerobic digestion compared with single-stage mesophilic- and thermophilic digestion of sewage sludge, Water Res., 38, pp. 1653-1662.
- Suzuki, H., Yoneyama, Y., and Tanaka, T. (1997) Acidification during anaerobic treatment of brewery wastewater, Water Sci. Technol., 35(8), pp. 265-274.
- Zeikus, G. (1979) Thermophilic bacteria: ecology, physiology, and technology, Enzyme Microb. Technol., 1, pp. 243-251.