

단상 및 이상혐기소화공정을 이용한 음폐수의 바이오에너지화

The Single- and Two-Phase Anaerobic Digestion of Food Waste Effluent

황보준권¹ · 서재건² · 윤희철³ · 박현건³ · 이보원³

Jun-Kwon Hwangbo¹, Jae-Gun Seo², Heui-Chul Yoon³, Hyeon-Gun Park³, and Bo-Won Lee³

(Received July 21, 2010 / Revised October 8, 2010 / Accepted November 1, 2010)

요 약

음식물폐기물 처리 과정에서 발생하는 음폐수의 효율적인 처리를 위한 혐기소화공정을 선정하기 위하여, 단상 및 이상혐기소화공정을 대상으로 데모 플랜트(일 5톤 처리용량)를 활용하여 성능을 비교하였다. TS, VS, tCOD 및 sCOD 처리율을 비교하여 보면 모든 항목에서 단상혐기소화공정의 처리율이 우수하였지만, 바이오가스는 오히려 이상혐기소화공정에서 더 많이 발생하였다. 이는 단상혐기소화공정의 경우 운전기간 동안 음폐수 투입량이 상대적으로 적어 처리효율은 뛰어 났지만, 음폐수 투입량 변동에 따른 바이오가스의 발생이 민감하게 반응을 한 결과로 해석된다. 이상혐기소화공정의 경우 총 COD가 상대적으로 매우 낮은 수준임에도 불구하고 바이오가스 발생량은 단상혐기소화공정보다 많이 발생되었다. 이는 음폐수 투입량이 일정하게 유지되었고, 산발효공정과 메탄발효공정이 분리되어 운영됨으로써 공정 전체가 안정적으로 운영되었기 때문인 것으로 판단된다. 음폐수 처리를 위해서는 공정 선정이 중요하지만 단순 유기물처리율 비교만으로는 종합적인 평가가 어려우며, 이를 보완하기 위하여 원료성상, 투입량, 처리율, 운전기간, 바이오가스발생량 등을 종합하여 소화성능을 평가하여야 할 것이다.

주제어 음폐수, 단상혐기소화, 이상혐기소화, 바이오가스

ABSTRACT

The anaerobic digestion of food waste effluent through single- and two-phase process was estimated and compared in this study. The treatment efficiencies for total solid(TS), volatile solid(VS), tCOD(total COD) and sCOD(soluble COD) were invariably higher in the single-phase process, which was accounted for by the fact that the treatment efficiency of organic wastes usually showed an inverse relationship with organic loading rate in the anaerobic digestion. In fact, the organic loading rate was lower for single-phase process. The concentration of tCOD were significantly lower in two-phase process but much more biogas was produced, compared to single-phase anaerobic digestion process, which might be explained partly by the relatively higher stability of two-phase process resulting from the separation of acid phase from methane phase.

Key words Food waste effluent, Single-phase anaerobic digestion, Two-phase anaerobic digestion, Biogas

1. 서 론

국내에서의 유기성폐기물 발생량은 인구의 증가, 신도시개발, 소득증가 및 생활수준 향상 등으로 인하여 지속적으로 증가하고 있는 형편이다. 2009년 현재 음식물 쓰레기는 연간 474만 톤이 발생하여 93.3%가 재활용되고 있으며, 나머지는 소각과 매립형태로 처리되고 있다. 하수슬러지는 연간 256만 톤이 발생하여 77.9%가 해양투기 되고 있으며, 소각 11.2%,

재활용 4.8%, 매립 1.7%, 기타처리 4.4%로 처리되고 있다. 폐수슬러지의 경우 연간 420만 톤이 발생하여 재활용 50.4%, 해양투기 37.9%, 소각 7.6%, 매립 4.1%로 처리되고 있으며, 분뇨처리 슬러지는 연간 43만 톤이 발생하여 해양투기 88.4%, 재활용 8.3%, 매립 1.9%, 소각 0.7%, 기타처리 0.7%로 처리되고 있다. 또한 축산분뇨는 연간 5,020만 톤이 발생하여 재활용 78.3%, 기타 21.7%로 처리되고 있다.

상기한 유기성폐기물 중에서 음식물류폐기물을 처리하거

1) 포항산업과학연구원 바이오에너지연구팀(교신저자: jkhwangbo@rist.re.kr)

2) 포항산업과학연구원 바이오에너지연구팀

3) 포스코건설 R&D 센터 녹색환경연구그룹

나 재활용하는 과정에서 발생하는 세척수와 음식물의 일부가 폐수로 발생하게 되는데 이를 음폐수로 정의한다. 음폐수는 평균적인 화학적산소요구량(COD)이 약 150,000mg/L(수도권 매립지공사 2007년 성상분석 결과)에 달하는 고농도의 폐수로서 방치할 경우 심각한 하천수계 및 토양 오염을 유발할 수 있다. 일반적으로 음폐수는 고형물 분리공정을 거쳐 5%의 부유물질을 포함한 폐수로 배출되게 되며 공공수역 방류를 위해서는 하수처리장 등에서 처리되어야 하지만 방류수 수질 기준 준수에 대한 부담으로 음폐수 처리를 기피하고 있는 실정이며, 공공시설 발생 음폐수 위주로 처리하고 있고, 민간처리 위탁업체의 경우 주로 비용이 저렴한 해양배출로 처리하고 있다. 현재 국내에서는 연간 음폐수의 발생량은 2007년 기준 약 1일 8,926 톤으로 지난 4년 동안 지속적으로 증가 추세에 있다(환경부, 2007). 그리고 2005년 음식물류 폐기물의 직매립이 금지됨에 따라 사료화나 퇴비화 등으로 재활용하려는 비율이 보다 증가하면서 음식물류 폐기물의 재활용 및 처리과정에서 발생하는 음폐수 또한 그 발생량이 증가하고 있는 추세이다. 발생하는 음폐수 중에서 5,420톤은 2009년 현재 해양배출에 의존하여 처리되고 있는 실정이다. 2007년 7월부터 해양배출로 처리되는 음폐수의 기준이 함유율 92% 이상인 음폐수로 강화되었고 이와 더불어 해양오염방지법 시행규칙 개정을 통하여 오는 2012년까지 음식물류 폐기물 및 음폐수, 축산분뇨, 하폐수슬러지 등 육상에서 발생하는 모든 유기성 폐기물의 해양투기를 전면 금지시키기로 결정됨에 따라 음폐수 처리 방법에 대한 대응책 마련이 시급한 국가적 사안으로 떠오르고 있다. 해양배출 되고 있는 음폐수의 육상 처리 대응책을 마련함과 동시에 음폐수에 함유된 고농도의 유기성 폐기물을 재생 가능한 자원으로 이용하여 에너지화 하기 위한 방안이 강구될 필요가 있다.

이러한 유기성폐기물의 처리 대안으로 혐기성소화를 이용한 유기성폐기물의 바이오에너지화 및 이를 통한 감량화 방법이 있다. 혐기소화는 유기성 폐자원을 효율적으로 감량화, 안정화 및 탈수 효율을 향상시킬 수 있는 환경생물공정으로 서, 이 과정에서 유기성 폐자원에 포함된 유기물은 다양한 종류의 미생물군집들의 상호작용에 의해 대체에너지로 활용이 가능한 메탄가스로 전환되며 슬러지 발생량은 호기성처리의 1/5 ~ 1/10에 불과하여 감량효과를 극대화 할 수 있다. 따라서 유기성 폐자원의 감량화와 에너지회수 측면에서 혐기소화법은 친환경적인 처리방법으로 인식이 되면서 국내는 물론 세계적으로도 보급이 점차 증가되고 있다. 무산소 조건에서

성장하는 혐기성 미생물을 이용한 혐기성 생물공정은 지속적인 환원과정을 거치며 유기성 폐자원을 탈질 공정에서 대체 탄소원으로 이용 가능한 유기산이나 에너지함량이 높은 메탄가스로 전환시킨다. 그러므로 혐기성 공정은 환경정화 및 대체에너지 생성이라는 두 가지 목적의 동시달성이 가능한 효율적인 생물공정이라 할 수 있다(Starkenbug, 1997).

통상 혐기소화는 산형성 박테리아와 메탄형성 박테리아가 한 반응조에서 함께 존재하면서 유기물을 처리하는 단상소화 방식으로 운영되어 왔다. 단상소화의 경우 메탄형성 박테리아의 메탄생성속도가 산형성 박테리아의 유기산 생성속도보다 느리기 때문에 유기산 축적이 일어날 가능성이 매우 높으며, 이러한 사유로 인하여 반응조의 pH를 감소시키게 되고 결국 높은 pH를 요구하는 메탄생성 박테리아의 활성을 저해함으로써 소화효율의 저하를 야기시키게 된다. 더욱이 산형성 박테리아와 메탄형성 박테리아는 생리적인 특성, 영양물질, 성장, 환경 적응성 등이 매우 상이하어 단상시스템의 안정적인 운영이 어려운 것으로 알려져 있다. 그에 따라 이러한 문제점을 해결하기 위하여 Ghosh는 산형성 박테리아와 메탄형성 박테리아를 공간적으로 분리하여 증식시키는 이상소화 방식을 제안하였다(Ghosh et al., 1995). 즉, 상이한 서식환경을 가진 박테리아를 분리하고 고유의 서식환경을 유지시킴으로써 혐기소화 효율을 극대화 하고자 하였다(Demirel and Yenigun, 2002). 본 연구에서는 해양투기 처분 되고 있는 음폐수를 효율적으로 자원화 하기 위하여 처리용량 100톤 규모의 데모플랜트 설비를 활용하였으며, 공정의 효율 비교를 위하여 단상 및 이상혐기소화를 각각 실시하여 결과를 비교하였다.

2. 연구방법

2.1 시료의 성상 및 혐기소화과정

본 실험에 사용된 음폐수는 광양시 음식물자원화 시설에서 채취하였고 성상자료는 표 1과 같다. 음폐수의 pH는 3.69~3.9 수준으로 산성을 나타내었으며, 단상혐기소화에 사용된 음폐수의 COD는 이상혐기소화에 사용된 음폐수 COD보다 거의 2배 수준으로 높았다. 하지만 다른 측정항목의 경우에는 비슷한 수준을 나타내었다. 식중 슬러지는 삼천포 하수처리장의 혐기 슬러지를 이용하였다. 실험에 사용된 혐기소화설비를 보면 단상혐기소화조의 경우 단통형으로 이루어져 있으며 일 5톤 처리 용량, 20일 체류, 총 처리량 100톤 설

표 1. 유입 음폐수 성상(mg/L)

	pH	tCODcr	sCODcr	TS	TSS	VS	VSS
단상소화	3.89	168,235	91,761	106,407	46,082	89,381	43,379
이상소화	3.69	88,051	58,917	103,516	58,993	87,580	30,544

표 2. 혐기소화공정 개요

시스템	단상 및 이상혐기소화조	pH	무조절
유효체적	산/메탄생성조 100톤	온도	35°C(중온혐기소화)
기질	음폐수	식중	혐기슬러지
체류시간	20일	유기물	5 톤/일



그림 1. 음폐수 혐기소화 설비

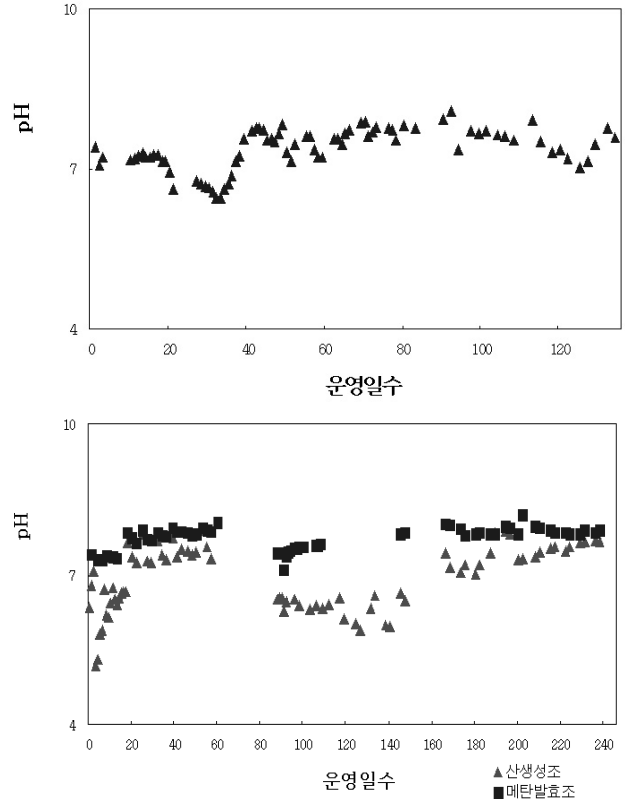


그림 2. 단상(상) 및 이상(하)혐기소화공정의 pH 변화

비이다. 이상혐기소화조의 경우에도 일 5톤 처리 용량, 20일 체류, 총 처리량 100톤 규모이며, 내통과 외통이 하나의 동심원을 이루면서 구성되어 있고, 내통의 경우 산발효 공정용으로 사용되며, 외통의 경우 메탄발생조의 역할을 수행한다. 이러한 구조를 통하여 산발생 및 메탄발생 미생물 군집의 공간적인 격리를 유도함으로써 메탄발생의 최적화를 도모하는 구조를 가지고 있다(표 2, 그림 1).

2.2 시료분석

본 실험에 사용된 시료는 단상 및 이상혐기소화조에서 매일 채취하였으며, 성상변화를 고려하여 채취 당일 분석을 원칙으로 하였다. 분석은 Standard Method에 따라 분석하였으며 항목으로는 TS(total solid), TSS(total suspended solid), VS(volatile solid), VSS(volatile suspended solid), 바이오가스(메탄+이산화탄소 혼합 기체) 발생량이었으며, VS 및 음폐수 투입 당 바이오가스 발생량을 계산하여 상호 공정을 비교하였다.

시료분석 방법은 다음과 같다. 평량병 또는 증발접시를 미리 550°C의 muffle furnace에서 1시간 반응시킨 다음 황산데시케이터 안에서 방냉하고 항량으로 무게를 측정한다(W1.) 다음에 105~110°C의 건조기안에서 시료와 함께 8시간 건조시킨 다음 황산데시케이터에 넣어 방냉하고 항량하여 무게(W2)를 측정한다. 마지막으로 550°C의 muffle furnace에서

시료를 1시간 동안 작열시킨 후 상온까지 식히고 항량으로 하여 무게(W3)를 정밀히 측정한다. TS 및 VS의 계산은 아래의 식을 사용하여 계산하였다.

$$TS = (W2-W1) / \text{샘플양(mL)}, VS = (W3-W2) / \text{샘플양(mL)}$$

TSS 및 VSS의 경우 유리섬유 거름종이(GF/C)를 여과기에 부착하여 일정량의 시료를 여과시킨 다음 상기한 측정법과 같은 방법으로 측정하였다. COD의 경우 tCOD(total COD)와 sCOD(soluble COD)로 분리하여 수질오염공정시험법에 따라 실시하였다. 측정시료를 황산산성으로 하여 중크롬산칼륨 일정과량을 넣고 2시간 가열반응 시킨 다음 소비된 중크롬산칼륨의 양을 구하기 위해 환원되지 않고 남아 있는 양을 황산제일철암모늄용액으로 적정하여 시료에 의해 소비된 양을 계산하고, 이에 상당하는 산소의 양을 측정하여 계산하였다.

3. 연구결과 및 논의

3.1 혐기소화공정의 처리율 비교

단상혐기소화조 내의 pH(그림 2, 상)는 초기부터 비교적 높게 유지되었는데 이는 초기 식중 슬러지의 영향을 받은 것으로 판단되며, 이후에도 pH가 낮은 음폐수가 유입됨에도 평

균 pH 7.4 수준을 유지한 것으로 보아 상대적으로 메탄생성 활성이 높게 유지되었던 것으로 판단된다. 또한 이상혐기소화조의 경우 산생성조는 평균적으로 pH 6.92, 메탄생성조는 7.72를 나타내어 pH에 있어 뚜렷이 구분되고 있었으며, 상호 안정된 값을 지속적으로 보이면서 고유의 활성을 나타낸 것으로 판단된다(그림 2, 하).

단상혐기소화조의 운전 기간 동안 유입 TS 농도는 평균 106,407mg/L이었으며, 혐기소화가 끝난 후 유출수의 TS 농도는 21,815mg/L로서 평균 79.5%의 TS 제거율을 나타내었다(그림 3, 상). 또한 이상혐기소화조의 운전 기간 동안 유입 TS 농도는 평균 103,516mg/L이었으며, 혐기소화가 끝난 후 유출수의 TS 농도는 27,005mg/L로서 평균 73.9%의 TS 제거율을 나타내었다(그림 3, 하). TS 제거율로 평가하면 단상혐기소화조의 제거율이 이상혐기소화조의 제거율보다 높았는데, 이는 단상혐기소화조의 음폐수투입량이 상대적으로 작아 제거율이 높았던 것으로 판단된다(이주길, 1993).

단상혐기소화조의 운전 기간 동안 유입 VS 농도는 평균 89,381mg/L이었으며, 혐기소화가 끝난 후 유출수의 VS 농도는 12,329mg/L로서 평균 86.2%의 VS 제거율을 나타내었다(그림 4, 상). 또한 이상혐기소화조의 운전 기간 동안 유입 VS 농도는 평균 87,580mg/L이었으며, 혐기소화가 끝난 후 유출수의 VS 농도는 17,708mg/L로서 평균 79.8%의 VS 제거율을 나타내었다(그림 4, 하). VS 제거율 또한 단상혐기소화조에서 높았다.

단상혐기소화조의 운전 기간 동안 유입 tCOD 농도는 평균

168,235mg/L이었으며, 혐기소화가 끝난 후 유출수의 tCOD 농도는 5,297mg/L로서 평균 96.9%의 tCOD 제거율을 나타내었다(그림 5, 상). 또한 이상혐기소화조의 운전 기간 동안 유입 tCOD 농도는 평균 88,051mg/L이었으며, 혐기소화가 끝난

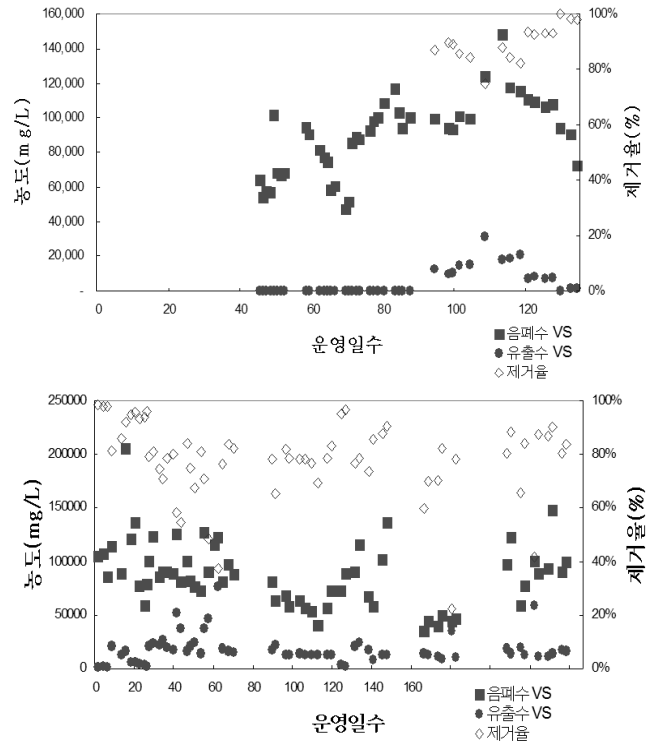


그림 4. 단상(상) 및 이상(하)혐기소화공정의 VS 제거

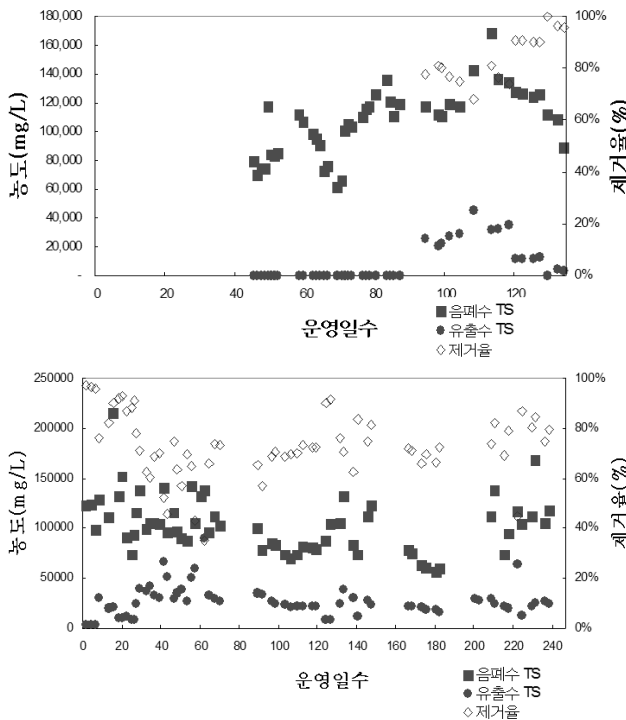


그림 3. 단상(상) 및 이상(하)혐기소화공정의 TS 제거

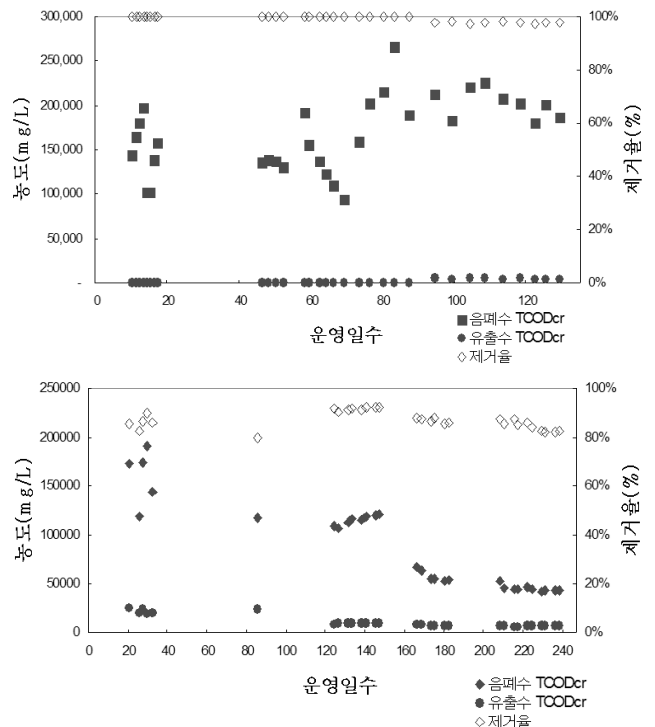


그림 5. 단상(상) 및 이상(하)혐기소화공정의 tCOD 제거

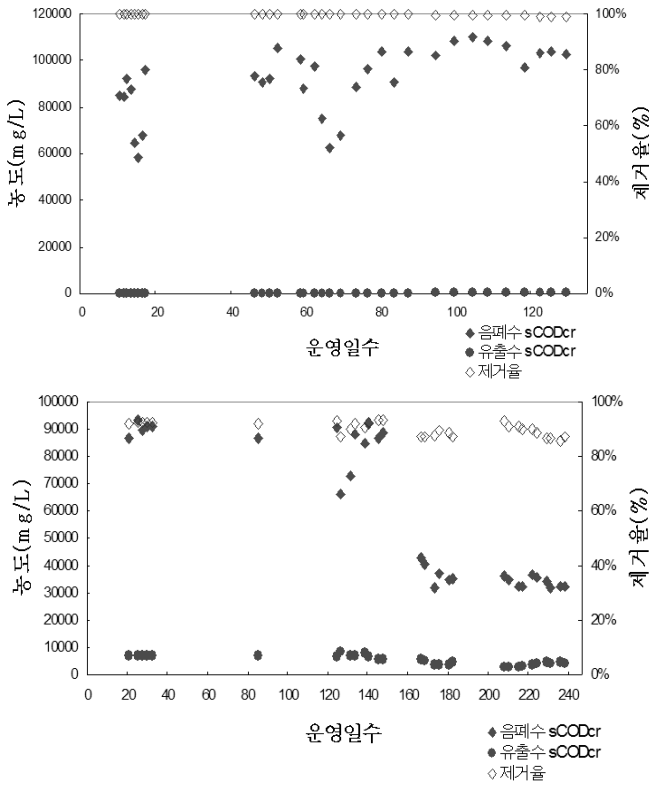


그림 6. 단상(상) 및 이상(하)혐기소화공정의 sCOD 제거

후 유출수의 tCOD 농도는 7,612mg/L로서 평균 91.4%의 tCOD 제거율을 나타내었다(그림 5, 하). 이상혐기소화조의 경우 유입 tCOD 농도가 단상혐기소화조의 50% 수준이었음에도 그 제거율이 91.4%를 나타내어 매우 우수한 제거율로 판단할 수 있다(이인규, 2008).

그림 6 단상(상) 및 이상(하)혐기소화공정의 sCOD 제거 sCOD는 용해성 COD를 의미하는 것으로서 농도가 높을수록 혐기소화에 유리하며, 특히 전체 tCOD에서 sCOD가 차지하는 비율(sCOD/tCOD)이 높을수록 혐기소화에 유리하다(최광근 등, 2006). 단상혐기소화조의 운전 기간 동안 유입 sCOD 농도는 평균 91,761mg/L이었으며, 혐기소화가 끝난 후 유출수의 sCOD 농도는 610mg/L로서 평균 99.3%의 sCOD 제거율을 나타내었다(그림 6, 상). 또한 이상혐기소화조의 운전 기간 동안 유입 sCOD 농도는 평균 58,917mg/L이었으며, 혐기소화가 끝난 후 유출수의 sCOD 농도는 4,714mg/L로서 평균 92%의 sCOD 제거율을 나타내었다(그림 6, 하).

단상혐기소화조의 운전 기간 동안 측정된 바이오가스 발생량은 음폐수 투입 톤당 평균 74m³였다. 하지만 전체적으로 음폐수 투입량 변이가 매우 커서 그에 따른 바이오가스 발생량 변화 폭 또한 매우 컸다(그림 7, 상). 따라서 투입물질의 성상도 안정적인 혐기소화조 운영에 영향을 미치지만 투입량 또한 일정하게 유지되어야 안정적인 혐기소화조 운영을 기대할 수 있을 것으로 판단된다.

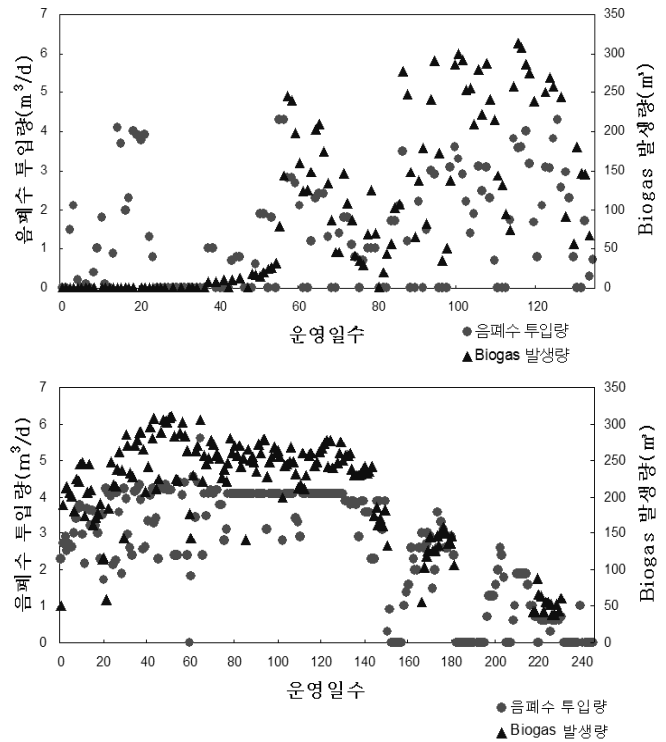


그림 7. 단상(상) 및 이상(하)혐기소화공정의 바이오가스 발생

한편 이상혐기소화조의 경우 바이오가스 발생량은 음폐수 투입 톤당 81m³로 단상혐기소화조보다 약간 높은 값을 나타내었다. 이상혐기소화조의 경우 운전기간 동안 음폐수 투입량이 상대적으로 많았지만, 단상혐기소화조보다 음폐수 투입량의 변이가 작았고(그림 7, 하), 산발효공정과 메탄발효공정의 분리로 인한 안정적인 혐기소화공정의 운영으로 바이오가스 생산량 증대가 이루어진 것으로 판단된다(Poulsen, 2003). 게다가 투입 음폐수의 tCOD 및 sCOD가 단상혐기소화공정 투입수보다 낮았음에도 이상혐기소화공정은 상대적으로 많은 바이오가스를 발생시켜 높은 효율성을 나타내었다.

하지만 이상혐기소화조의 경우 TS, VS, tCOD, sCOD 처리율이 단상혐기소화조보다 떨어졌는데 이는 상대적으로 많은 양의 음폐수가 공정에 투입되어 전체적으로 효율이 저하되었던 것으로 판단된다. 실제로 혐기소화공정의 유기물제거효율은 유기물부하량과 반비례 한다는 보고가 있다(김남천, 2008; 이주길, 1993). 따라서 단순한 처리율의 비교만으로는 혐기소화공정의 평가가 어려우며, 이를 보완하기 위하여 원료성상, 투입량, 처리율, 운전기간, 바이오가스발생량 등을 종합하여 소화성능을 평가하여야 할 것이다.

4. 종합결론

음식물폐기물 처리 과정에서 발생하는 음폐수의 효율적인 처리를 위한 혐기소화공정을 선정하기 위하여, 단상 및 이상

혐기소화공정을 대상으로 데모플랜트(일 5톤 처리용량)를 활용하여 성능을 비교하였다.

1. 공정 내 반응액 pH를 측정된 결과 두 공정 모두 안정적인 pH를 지속적으로 유지하여 기본적인 공정의 안정성은 유지하였다.
2. TS, VS, tCOD 및 sCOD 처리율을 비교하여 보면 모든 항목에서 단상혐기소화공정의 처리율이 우수하였지만, 바이오가스는 오히려 이상혐기소화공정에서 더 많이 발생하였다. 이는 단상혐기소화공정의 경우 운전기간 동안 음폐수 투입량이 상대적으로 적어 처리효율은 뛰어나지만 음폐수 투입량 변동에 따른 바이오가스의 발생이 민감하게 반응을 한 결과로 해석된다.
3. 이상혐기소화공정의 경우 총 COD가 상대적으로 매우 낮은 수준임에도 불구하고 바이오가스 발생량은 단상혐기소화공정보다 많이 발생되었다. 이는 음폐수 투입량이 일정하게 유지되었고, 산발효공정과 메탄발효공정이 분리되어 운영됨으로써 공정 전체가 안정적으로 운영되었기 때문인 것으로 판단된다.

혐기소화공정을 이용한 효율적인 음폐수 처리를 위해서는 공정 선정이 중요한 인자로 작용한다. 하지만 단순한 음폐수 처리율의 비교만으로는 혐기소화공정의 전체적인 비교 및 평가가 어려우며, 이를 보완하기 위하여 원료성상, 투입량, 처리율, 운전기간, 바이오가스발생량 등을 종합하여 소화성능을 평가하여야 할 것이다.

참고문헌

1. 김남천(2008), “하수농축슬러지의 혐기성소화에 따른 바이오가스 생산과 유기물질 감량화에 관한 연구”, 「한국폐기물학회지」, 25(1): 50-57.
2. 이인규, 김승재, 권순국, 김현욱(2008), “음식물 쓰레기, 돈분뇨, 하수슬러지의 이상병합혐기성소화”, 「대한환경공학회 춘계학술연구발표회논문집」, 461-465.
3. 이주길(1993), 「슬러지의 혐기성소화시 수리학적 체류시간이 유기물 제거효율과 탈수특성에 미치는 영향」, 인하대학교 석사학위논문.
4. 최광근, 김선집, 이태준, 이준철, 박대원, 이원권(2006), “효율적 슬러지 전처리를 위한 최적 가용화 방법 탐색”, 「대한환경공학회 춘계학술연구발표회논문집」, 452-457.
5. 환경부(2007), 「음식물류폐기물처리시설 폐수 육상처리 및 에너지화 로드맵」.
6. Demirel, B. and Yenigun, O. (2002), “Two-phase Anaerobic Digestion Processes: A Review”, *J. Chem. Tech. and Biotech.*, 77: 743~755.
7. Ghosh, S., Buoy, K., Dressel, L., Miller, T., Wilcox, G. and Loos, D. (1995), “Pilot- and Full Scale Two-phase Anaerobic Digestion of Municipal Sludge”, *Water Environment Research*, 67(2): 206~214.
8. Poulsen, T. (2003), 「Solid Waste Management - Chapter 5 Anaerobic Digestion」, Aalborg University.
9. Van Starckenburg, W. (1997), “Anaerobic Treatment of Wastewater: State of Art”, *Microbiology*, 66: 589-596.