ORIGINAL PAPER 원저

복합 전처리를 통한 하수슬러지의 가용화 및 생물학적 유용성에 관한 연구

강정현, 이희수, 이태진†
서울과학기술대학교 환경공학과
(2011년 07월 28일 접수, 2011년 09월 08일 수정, 2011년 09월 24일 채택)

A study for Solubilization and Bioavailability of Sewage Sludge Using the Complex Pre-treatment

Jung-hyun Kang, Hee-soo Lee, Tae-jin Lee†
Department of Environmental Engineering, Seoul National University of Science & Technology

ABSTRACT

In this study, anaerobic biological decomposition were attempted after solubilization treatment of sewage sludge with the complex pre-treatment (acid/base treatment with ultrasonic radiation). Solubilization ratios were compared for ultrasonic treatment at acid or base condition. Solubilization effect of the complex pre-treatment was more effective at higher pH. Biological decomposition of complex pre-treated sludge was faster than non treated (raw) sludge, showing 10 times higher total gas production. Biological digestion of the sludge shows more biogas production. B/A ratio. which indicates hydrogen production potential, was 50% higher with complex pre-treated sludge than raw sludge but lactic acid or propionic acid were also detected during anaerobic decomposition process.

Keywords : Sewage sludge, Ultrasonic treatment, Sludge solubilization, Acid/base treatment

초 록

본 연구에서는 하수슬러지를 전처리 과정을 통해 가용화한 후 혐기성 생물학적 분해를 실시하였다. 산 또는 알칼리 조건과 초음파처리를 복합적으로 적용하여 전처리 후 슬러지의 가용화율을 비교하였으며 알칼리 조건에서 초음파처리를 병행하였을 때 최대 가용화율을 얻을 수 있었다. 가용화된 슬러지의 생물학적 유용성은 복합전처리를 실시한 경우 빠른 생물학적 분해와 더불어 총 가스 발생량은 10배 이상 증가하였으며 가용화된 슬러지에서 바이오가스 생산 가능성을 확인 하였다. 전처리를 실시한 슬러

†Corresponding author(leetj@snut.ac.kr)

지를 이용하여 생물학적 분해를 실시하였을 때 약 50%정도 높은 수소생성율의 지표가 되는 B/A비를 확인할 수 있었으나 수소생성에 저해가 되는 lactic acid와 propionic acid가 검출되는 것으로 보아 후속연구가 필요할 것으로 판단되었다.

핵심용어 : 하수 슬러지, 초음파 처리, 슬러지 가용화, 산・알칼리처리

1. 서론

현재 서울시 하수처리장의 슬러지 발생량은 '11년도에 1일 2,467톤으로 추정하고 있으며 이는 '01년도 슬러지 발생량 보다 43.8% 증가한 것이다[1]. 서울시 이외의 다른 지역 역시 매년 슬러지 발생량은 증가하는 추세에 있으며 이러한 슬러지의 처리방법으로는 육상매립, 해양투기, 소각, 재활용 등을 들 수 있으나 '03년 7월부터 시행된 하수슬러지의 육상매립 금지조치의 영향으로 '04년의 경우 하수슬러지 발생량의 77%를 해양투기에 의존하였다[2]. 그러나 향후 해양 생태계 보호를 위해 강화된 국제협약 (런던협약 의정서, 1996)등에 의해 하수슬러지의 해양투기가 전면 금지됨에 따라 하수슬러지 최종처분 비용이 급격히 증가할 것으로 예상되며, 매년 증가 추세에 있는 슬러지 처리문제는 매우 심각하고 시급한 현안으로 부각되고 있다.

하수슬러지의 발생량 감소를 위해 일반적으로 널리 적용되고 있는 혐기성 소화공정은 유기물의 감량으로 안정된 최종 슬러지를 얻을 수 있을 뿐만 아니라 메탄가스 등의 유용한 자원을 회수할 수 있어 해양투기 금지조치에 대한 대안으로 가장 적합한 공정이지만, 느린 소화속도로 인한 장시간의 체류시간으로 인하여 소화조 용적이 커지는 단점을 가지고 있다. 혐기성 소화공정에서의 이러한 느린 소화속도는 분해가 힘든 입자상 유기성 물질의 가수분해가 율속단계로 작용하기 때문인 것으로 알려져 있으며[3], 이를 극복하기 위하여 다양한 슬러지 전처리 방법이 연구되어 왔다. 현재 발표된 주요 전처리 방법으로는 냉동처리, 오존처리, 산・알칼리 처리, 초음파, 열처리, 효소처리, 산처리, 기계적 분쇄, 고주파 처리, 염소처리 등이 있다.

이들 방법 중에서 초음파 처리공정은 유체 내에 높은 음향강도를 지닌 초음파를 조사하면 국지적인 압력강하로 인하여 캐비테이션(Cavitation)이 발생하는 현상을 이용하는 것으로 실제 하수처리장에서 슬러지의 부피감소와 연계된 소화공정의 처리효율을 제고하기 위한 전처리 방법으로 많이 이용하고 있다. 초음파를 슬러지에 발생시키면 캐비테이션이 발생하면서 생성되는 캐비테이션 기포(Cavitation bubble)의 성장 및 파과에 따라 순간적인 고온 고압 조건을 형성하고, 이에 따른 충격파 및 전단력에 의해 슬러지 내 미생물 세포가 파괴되는 것으로 알려져 있다. Mason(1991)과 Young 등 (1989)에[4),5)] 의하면 초음파를 이용한 슬러지 전처리 시 미세공간 내부의 버블이 충돌하면서 생기는 온도와 압력은 5000K와 수백기압으로 이와 같은 미세공간 내부의 버블에 존재하는 화합물의 열적파괴와 반응성이 높은 OH 라디칼이 형성된다고 제시한바 있고 Neyens 등 (2004)에[6)] 의하면 형성된 OH 라디칼은 미생물의 체외고분자물질과 반응하여 슬러지의 탈수능을 향상시킨다고 보고하였다. 또한 Thihm 등 (2001)은[7)] 초음파 주파수 41~3217 kHz에서 연구를 수행한 결과 낮은 주파수에서 가용화 효과가 우수하다고 제시하고 있다.

슬러지의 해양투기금지라는 국제적 협약의 시행에 즈음하여 슬러지의 처분은 시급한 현안이며 연구자들에 의해 초음파 처리공정과 같은 효과적인 전처리 공정이 제시되고 있지만 본 연구에서는 보다 효율적인 슬러지 전처리 방법을 확보하기 위해 기존의 단일 전처리 방법이 아닌 초음파 처리공정과 산・알칼리 전처리 공정을 복합적으로 적용하여 슬러지의 가용화율을 비교 검토하고

자 하였다. 또한 복합적 전처리공정이 적용된 가용화 슬러지를 혐기상태에서 생물학적 분해를 실시하여 총 가스 발생량과 수소생성률을 검토함으로서 복합적 슬러지 전처리 공정의 슬러지 처리 효과를 정량적으로 평가하고자 하였다. 따라서 본 연구의 실험결과는 하수슬러지를 효율적으로 처리하고자 하는 현장에서 효과적 슬러지 처리를 위한 방법을 모색하는데 있어서 기초자료로 활용될 수 있으리라고 기대된다.

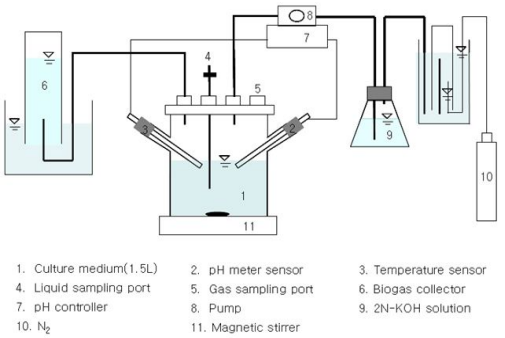
2. 실험장치 및 방법

2.1 슬러지의 복합 전처리 방법

서울시 J 물재생센터에서 채취된 표준 활성슬러지 공정의 반송슬러지를 이용하여 산·알칼리 조건에서 초음파 처리한 (복합 전처리) 후 슬러지의 가용화율을 측정하였다. 채취된 슬러지는 4℃에서 냉장 보관하였으며 본 실험에서 슬러지의 산·알칼리처리는 HCl과 5N-KOH를 사용하여 pH 3~13으로 조절하였으며, 초음파 처리장치는 미국 Sonics & Materials에서 제작한 Ultrasonic Processor VCX-750 모델로서 초음파 강도는 750W이고, 발생 초음파의 주파수는 최적조건으로 Grönroos 등에 의해 보고된 20kHz로 고정하였으며, 1.2W/mL의 동력밀도로 처리하였다[8].

2.2 혐기적 슬러지 분해실험

[Fig. 1]은 본 연구에 사용된 슬러지의 생물학적 분해 장치로 하수슬러지를 넣고 N_2 가스로 Purging 시켜 혐기성 상태로 만든 후 가스의 유출입이 없도록 완전 밀폐시켰다. 균주로는 J 물재생센터 활성 슬러지조의 미생물을 계대 배양시킨 배양액을 실험 전 24시간 배양시켜 균의 활성화를 도모한 후 주입하였다[9)~11)] 실험은 30±3℃의 온도 조건에서 수행되었으며 미생물의 배양기간 동안 반응기 내 pH를 5.5로 일정하게 유지하기 위해 2N-KOH 용액을 pH와 온도 센서가 연결된 pH Controller에서 자동 조절되어 주입되도록 하였다. 반응조의 유효 용적은 1.5L이며 배양액을 완전혼합하기 위한 교반속도는 200rpm으로 유지 하였다. 이 때 주입된 초기 배양액은 반응기 유효용적의 1% (v/v)이였다. 주입된 하수슬러지는 복합전처리를 실시한 슬러지와 전처리를 실시하지 않은 슬러지를 주입하여 가스발생량을 비교·검토하였다. 한 실험에 두 대의 반응기가 각각 다른 조건에서 운전되었으며 각 반응기는 독립적으로 분석되었다.



[Fig. 1] Schematic diagram of the batch reactor for anaerobic biological digestion.

2.3 분석방법

2.3.1 가스분석

배양 중 발생하는 전체 가스는 2% 황산이 들어있는 포화식염수를 담은 gas collector에 포집하였으며, 수소함량은 반응기 내 head space의 가스를 gas-tight syringe로 100㎕를 채취하여 열전도도 검출기를 장착한 가스 크로마토그래피 (GOW-MAC series 350)를 이용하여 측정하였다. 사용된 칼럼은(6'×1/8'' stainless steel SS 350A(Molesieve 13X(80/100mesh))이였으며 발생가스 중 수소가스 정량을 위한 GC의 조건은 column온도 80℃, injector 온도 100℃, 그리고 detector 온도는 100℃ 이였으며, carrier gas는 질소이고 flow rate는 30 mL/min로 유지하였다.

2.3.2 유기산 분석

유기산은 배양액 일정량을 원심분리 (13,000rpm HANIL MICRO-12) 5분 동안 균

체와 상등액을 분리하였으며, 상등액 20㎕를 SUPELCOGEL C-610H(130mm×7.8mm ID) column을 장착한 HPLC로 분석하였다. 각종 유기산의 peak는 UV detector (Detector ERC-7215, ERMA CR. INC.)를 이용하여 파장 210nm에서 측정하였으며, 0.1% H_3PO_4를 이동상으로 하여 flow rate 0.7mL/min로 흘려주었다.

2.3.3 탄수화물 분석

배양액 내에 잔존하는 탄수화물을 정량하기 위하여 배양액 일정량을 취하여 원심분리(11,000rpm, 5min)하여 균체를 제거한 후, 상등액을 취하여 페놀-황산법[12]으로 발색시켜 흡광도 파장 490nm에서 측정하였다.

2.3.4 DATA분석

용존성 COD를 이용한 슬러지 가용화율의 계산은 식 (1)에 나타난 바와 같다[13].

$$Solubilization = \frac{(SCOD_f - SCOD_O)}{(TCOD_O - SCOD_O)} \times 100 \quad (1)$$

여기서, $SCOD_f$ = 복합전처리 후 용존성 COD (mg/L)

$SCOD_o$ = 복합전처리 이전 용존성 COD (mg/L)

$TCOD_o$ = 복합전처리 이전 총 COD (mg/L)

누적 가스 생산량 곡선은 일정시간마다 측정된 head space의 수소함량과 발생된 총 가스량으로부터 계산되었다. 회분식으로 구성된 반응조에서 혐기성 미생물에 의해 생성된 가스 생성 곡선을 분석하여 최대 가스 생산율을 산정하기 위해 다음 식 (2)와 같은 수정된 Gompartz 방정식[14,15]을 이용하였다.

$$M = P \cdot \exp\left\{-\exp\left[\frac{R \cdot e}{P}(\lambda - t) + 1\right]\right\} \quad (2)$$

여기서 M은 누적가스 생성량(cumulative gas production), λ는 지연시간(lag phase time), P는 가스 생성량(gas production potential), R은 최대 가스 생성율(maximum gas production rate) 그리고 e는 exp(1)을 나타낸다.

슬러지의 미생물의 분해는 가용화된 슬러지 내 탄수화물의 농도를 식 (3)에 제시된 바와 같이 가일차반응식을 이용하여 분석하였다.

$$C = C_0 \cdot e^{-kt} \quad (3)$$

여기서 C_0는 초기 탄수화물의 농도, C는 어떤 시간에 탄수화물의 농도, k는 가일차반응상수이며 t는 반응시간을 나타낸다.

3 결과 및 고찰

3.1 가수분해를 위한 복합전처리를 통한 가용화율 비교

본 연구에 이용된 서울시 J 물재생센터에 채취된 슬러지의 성상을 **[Table 1]**에 나타내었다. **[Table 1]**에서 보는 바와 같이 슬러지는 성상의 변화가 크며 이는 슬러지가 발생되는 하수처리 공정상의 특성, 요일 및 계절 등의 시간적인 요인과 운전상의 요인들에 의해 다양하게 나타나기 때문이라고 판단된다. 따라서 본 실험에서는 사용된 슬러지의 성상을 가능한 균일하게 유지하기 위해 같은 기간에 채취된 동일한 슬러지를 실험기간 동안 사용하였고, 실험데이터는 신뢰성을 확보하기 위해 4회분석한 평균값을 사용하였다.

초음파를 이용한 조사시간은 Bougrier 등(2006)이[16] 제시한 것과 같이 슬러지 가용화 성능과 초음파 조사시간은 선형관계를 보이는 결과를 참고하여 슬러지는 60분 동안 처리 하였으며, 각각 산 또는 알칼리 조건을 유지하여 초음파 조사와 슬러지의 초기 pH의 최적 조건을 도출하였다. 하수슬러지에 포함된 고분자 유기물질은 복합전처리를 통하여 저분자화로 변환을 시도하였으며 저분자화 된 유기물의 양을 CODcr으로 측정하여 확인하였다. **[Table 2]**에 제시된 것과 같이 각각의 초기 pH에 따라 슬러지를 초음파 처리하였을 때, SCOD 농도가 증가하는 경향을 보였으며 이는 초음파 조사에 의해 가용화가 원활하게 일어나고 있음을 나타내었다. 초기 pH별 초음파 처리 시 SCOD농도의 증가 원인은 세포용해(cell lysis)시 세포 성분의 용출과 floc 파괴 시 체외고분자 물질의 방출에 기인하는 것으로 보고된 바 있다[17].

[Table 1] Characteristic of Sludges used in this Study

Composition	Concentration (mg/L)
TCOD	27,879.75±1,213.08
SCOD	4,011.99±1,841.66
T-N	790.02±257.34
T-P	278.11±45.18

[Table 2] Sewage Sludge Composition Change Using Complex Pre-treatment

Pre-treatment	Composition	Concentration (mg/L)					
		pH 3	pH5	pH7	pH9	pH11	pH13
Ultrasonic + pH	TCOD	28,479.10	28,115.10	29,420.95	29,491.80	28,081.95	29,779.10
	SCOD	4,540.58	5,300.85	11,720.25	16,271.25	17,288.25	22,373.25

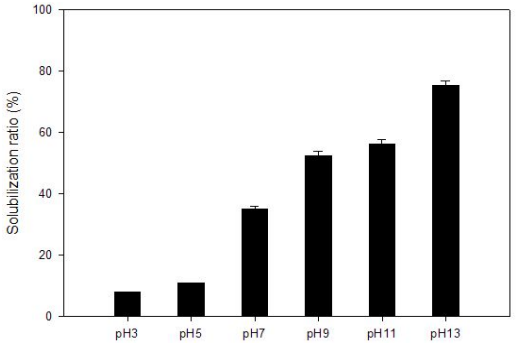
김동진 등 (2010)의[13] 보고에서 초음파를 이용한 슬러지 전처리 시 가용화율은 44%로 보고된 바 있으나 **[Fig. 2]**에 나타난 바와 같이 초기 pH를 다르게 조성하고 초음파 처리를 실시한 결과 슬러지의 가용화율은 각각 8.05%, 10.92%, 35.14%, 52.31%, 56.15%, 75.34%로 나타났다. 이는 알칼리 환경에서 가용화율이 산 환경보다 더 높게 나타난다고 보고한 Müller (2001)의 실험과 동일한 결과를 나타내었다[18]. 이를 통하여 초음파를 이용하여 슬러지를 가용화하고자 할 때 초기 pH를 알칼리 조건으로 유지하는 것이 중요하며 이러한 조건에서 약 84%의 가용화율 개선 효과를 기대할 수 있을 것으로 확인되었다.

단 슬러지의 초기 pH를 조정함에 있어서 경제성을 확보하기 위해 pH 적정 곡선을 파악할 필요가 있으며 **[Fig. 3]**에 나타난 바와 같이 본 실험에서 사용된 슬러지의 경우 pH 12이상에서 pH를 상승시키기 위한 알칼리성 시약의 요구량이 급격하게 증가하므로 초음파 처리와 병행한 복합 전처리의 초기 슬러지의 pH는 약 12 정도에서 시행하는 것이 적정하다고 판단되었다.

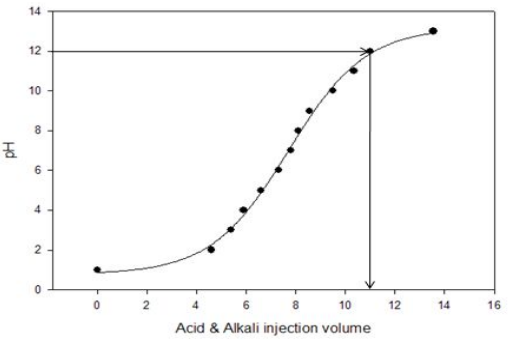
3.2 복합 전처리된 슬러지의 생물학적 분해

복합 전처리를 수행한 하수슬러지(가용화된 슬러지)를 이용하여 혐기성 생물학적 분해를 실시하였다. 복합 전처리를 실시하지 않은 슬러지를 전처리한 슬러지와 동일한 조건에서 실험하여 비교하여 보았다. 가용화된 슬러지의 분해양상은 탄수화물의 농도 변화를 측정하여 비교 분석하였으며 각각의 분해양상을 Eq. (3)을 이용하여 가일차반응으로 회귀분석하였다. 슬러지 내 탄수화물의 분해양상은 **[Fig. 4]**에서 제시되는 바와 같이 가일차반응의 상수 k는 각각 0.084day^{-1}과 0.181day^{-1}로 나타나 가용화된 슬러지에서 유기물의 분해가 훨씬 빠르게 진행됨을 알 수 있었다. 이는 복합 전처리를 통한 가용화 과정을 통하여 슬러지 내 거대 유기물 분자의 저분자화가 진행되어 슬러지의 미생물 분해가 원활하게 수행될 수 있음을 나타내는 것이다.

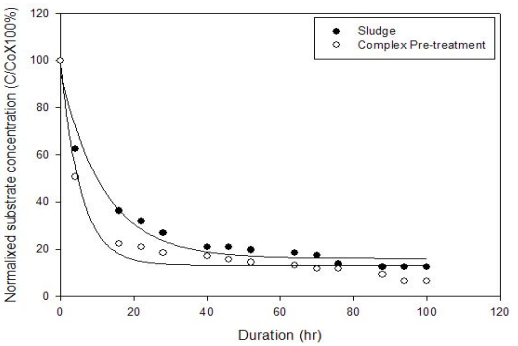
[Fig. 5]는 복합 전처리를 실시한 슬러지를 이용한 생물학적 분해를 통해 발생된 가스생산량을 나타내었다. 전처리를 수행하지 않은 슬러지의 가스발생량은 50.51 mL이며, 복합 전처리를 수행한 경우 518.38 mL로 나타났다. 미생물 분해 과정에서 생성된 가스는 수소와 이산화탄소로 구성되어 있었으며 메탄의 생성은 관찰되지 않았다. 복합 전처리를 이용하여 가용화된 슬러지의 미생물 분해 시 약 10배 정도의 많은 가스가 생



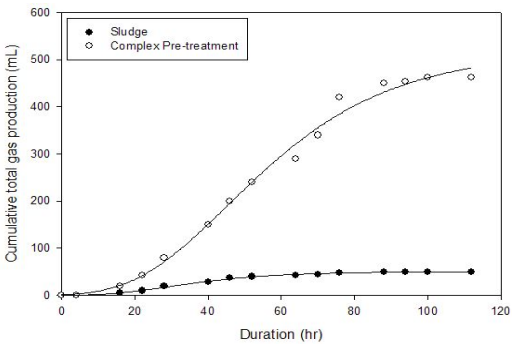
[Fig. 2] Solubilization ratio of Sewage Sludge using the complex pre-treatment.



[Fig. 3] pH profiles of the sewage sludge with acid and alkali addition. Regression of experimental data was performed by Sigma Plot of SPSS Science Inc. using a nonlinear equation.



[Fig. 4] Effect of pre-treatment on substrate degradation by a mixed anaerobic microbial flora. Regression of experimental data was performed by Sigma Plot of SPSS Science Inc. using pseudo-first order reactions equation.(k=0.084 and 0.181, r2=0.99, p-value= <0.0001)



[Fig. 5] Gas production curve with microbial digestion of the complex pre-treatment of Sewage Sludge. Regression of experimental data was performed by Sigma Plot of SPSS Science Inc. using the modified Gompertz equation.

성되었으며 이는 가용화된 슬러지의 생물학적 유용성이 더욱 크다는 것을 확인해 주는 결과이라고 판단된다.

가용화된 슬러지의 혐기성 생물학적 분해에 따른 가스 발생량(Ph)과 가스 생산율(Rh)을 **[Table 3]**에 나타내었다. 실험결과는 Eq. (2)를 이용하여 Gompartz 방정식에[14,15] 따라 분석하였으며 이 때 r-square 값은 0.99 이상이고 p-value는 0.0001이하로 본 회귀분석의 99% 신뢰구간에서 통계적으로 중요한 의미를 가진다는 것을 확인하였다. 총 가스 생산 중 수소생산율은 총 가스 생산량에 비해 상대적으로 미미하나, 복합 전처리에 의해 가용화 된 슬러지의 경우 수소생성율이 약 20%정도 개선된 것을 볼 수 있다.

따라서 위 실험에 대한 결과에 의해 하수 슬러지의 생물학적 유용성은 복합적 전처리 과정을

통하여 많이 개선되었으며 슬러지를 이용한 수소 생산 가능성을 확인 할 수 있었다. 단, 하수슬러지를 이용한 수소가스의 생성과 같은 생물학적 반응에 의한 바이오 가스 생산에 가용화된 슬러지를 이용하고자 할 경우 반응 중 pH와 온도 그리고 적정 미생물 군집의 배양과 같은 최적화 과정이 필수적으로 수반되어야 하며 이에 대한 더욱 체계적 연구가 필요할 것으로 판단하였다.

3.3 발효산물 분포 특성 및 물질 수지

가용화된 슬러지를 이용한 수소생산 시 생성된 유기산의 분포특성을 살펴보기 위해 수소생산과 밀접하게 관계된 주요 유기산의 생산량을 측정하였으며, lactic acid와 propionic acid가 많이 검출되었다. 기존의 연구에서 lactic acid와 propionic acid의 생성은 낮은 수소생산을 유발한다고 보고된 바 있다[19,20]. 이는 위에 언급한 바와 같이 수소생성에 필요한 적정 환경조건이 충족되지 않은 상태에서 수반되는 결과로 판단된다. 초기 COD를 100%로 설정하여 물질수지를 검토하였으며 **[Table 4]**에 부산물의 분포를 나타내었다. 반응 후 여액에 잔류하는 others는 대부분 에탄올과 같은 알코올로 구성되어 있다고 보고된 바 있음을 상기하였을 때[21] 가용화된 슬러지의 COD 유발성 유기물의 70% 이상이 알코올류로 잔존한다고 파악되었다. 수소 생성률에 관한 지표로 활용되는 뷰틸산/아세트산(B/A)비는 전처리를 수행하지 않은 것 대비 복합 전처리를 실시한 경우가 각각 0.19와 0.38로 나타나 복합 전처리를 실시함에 따라 B/A비가 50% 향상된 것을 볼 수 있다. 총 가스 발생량과 수소 생성률 모두 복합 전처리된 슬러지에서 크게 나타나고 있고 이와 더불어 B/A비 역시 크게 나타나는 현상은 B/A비가 높을수록 바이오가스 발생량이 증가한다는 기존의 연구결과와 동일하다.[19,20] 본 연구의 결과를 통하여 복합 전처리를

[Table 3] Parameter Values from Nonlinear Regression of Modified Gompartz Equation for gas Production with Complex pre-treatment

Method		Production potential		Production rate		r^2
		P_h(mL)	p-value	R_h(mL/hr)	p-value	
Total gas	No pre-treatment	50.505	<0.0001	1.124	<0.0001	0.99
	Complex pre-treatment	518.376	<0.0001	7.541	<0.0001	0.99
Hydrogen gas	No pre-treatment	–	–	0.606	<0.0001	0.99
	Complex pre-treatment	–	–	0.768	<0.0001	0.99

[Table 4] Material Balance with Complex Pre-treatment of Sewage Sludge (unit: %)

Method	Initial COD	VFAs					Bio mass	remain of substrate	others	H_2	recovery
		lactic acid	formic acid	acetic acid	propionic acid	butyric acid					
Not pre-treatment	100	2.50	0.89	0.30	1.90	1.52	12.80	0.43	70.98	0.52	91.84
Complex pre-treatment	100	1.98	0.77	0.54	1.23	1.42	14.17	0.30	72.32	2.05	94.79

Others : SCOD – (VFA + soluble carbohydrate)

통한 슬러지의 바이오가스생산 시 약 50% 향상될 것으로 판단된다.

4. 결론

본 연구에서는 초음파와 산·알칼리 복합 전처리를 이용한 하수슬러지 가용화율과 그에 따른 혐기성 생물학적 반응기에서의 가스 생산효율을 살펴보았으며, 다음과 같은 결론을 도출할 수 있었다.

1) 하수 슬러지를 초음파 조사와 더불어 산·알칼리 처리를 병행하였을 때 가용화율은 최고 75.34%로 산·알칼리 조건을 고려하지 않고 초음파 처리 단독 적용한 경우보다 약 26%의 가용화율이 우수하게 나타났다. 또한 슬러지의 복합 전처리는 산성 조건 보다 알칼리성 조건에서 가용화율이 개선되는 것으로 판명되었다.
2) 생물학적 분해를 이용한 가용화된 하수 슬러지 내 유기물의 분해속도가 미처리된 슬러지에 비해 약 2배 이상 빠르게 진행되었으며, 총 가스 발생량 역시 복합 전처리를 수행한 경우 약 10배가량 많이 생성되었다. 이는 슬러지의 복합 전처리(가용화)과정을 통하여 생물학적 유용성이 큰 저분자 유기물의 생성이 증가하였다는 결과를 나타낸 것이다.
3) 복합 전처리를 실시한 후 슬러지의 바이오가스는 0.768 mL/hr 로 나타났으며, 이러한 결과는 전처리를 실시하지 않은 슬러지 대비 약 50% 정도의 빠른 생성율을 나타낸다. 분해산물의 분석을 통하여 수소생성에 적합하지 않은 젖산과 프로피오닉산 (propionic acid로가 검출되었으며, 70%이상이 여액에 알코올류로 존재함을 알 수 있었다. 수소생성율의 지표로 활용되는 B/A비(구체적으로 기술요망) 역시 복합전처리를 실시함에 따라 전처리를 실시하지 않은 반응보다 50%정도 향상된 것을 볼 수 있었다.

5. 사사

이 논문은 환경부의 폐기물에너지화·자원화 전문인력양성사업으로 지원되었습니다. 이에 감사드립니다.

참고문헌

1. 유기영, "서울특별시 하수슬러지 처리현황", 유기성자원학회, 11(1), pp. 25~29 (2003).
2. 환경부. 2004 하수도통계 (2005).
3. Li, Y. and Noike, T., "Upgrading of anaerobic digestion of waste activated sludge by thermal pretreatment", Wat, Sci. Technol., 26, pp. 857~866 (1992).
4. Masonn, T., Practical Sonochemistry: User's Guide to Application in Chemistry and Chemical Engineering, Ellis Horword Ltd., (1991).
5. Young, F. R., Cavitation, McGraw-Hill, pp. 40~76 (1989).
6. Neeyens, E., Baeyens, J., Dewil, R, and Deheyder, B., "Advanced sludge treatment affects extracellular polymeric substance to improve activated sludge dewatering", J. Hazard, Mater. 106B, pp. 83~92 (2004).
7. Tiehm. A., Nickel, K., Zellhorn, M. and Neis, U., "Ultrasonic waste activated sludge disintegration for improving anaerobic stabilization", Wat. Res., 35(8), pp. 2003~2009 (2001).
8. Grönroos, A., Kyllönen, H., Korpijärvi, K., Pirkonen, P., Paavola, T., Jokela, J. and Rintala, J., "Ultrasound assisted method to increase soluble chemical oxygen demand (SCOD) of sewage sludge for digestion," Ultrasonics Sonochemistry, 12, pp. 115~120 (2005).
9. Logan, B. E., OH, S. E., Kim, I. S. and Ginkel, S. V., "Biological hydrogen production measured in batch anaerobic respirometers," Environ. Sci, Technol., 36, pp. 2530~2535 (2002).
10. Fang, H. H. P. and Liu, H., "Effect of pH on

hydrogen production from glucose by a mixed culture," Bioresour. Technol., 82, pp. 87~.93 (2002).
11. Chen, C.-C. and Lin, C.-Y., "Using sucrose as a substrate in an anaerobic hydrogen-producing reactor," Adv. Environ. Res., 7, pp. 695~.699 (2003).
12. Dubois, M., Gilles, K. A., Hamilton, J. K., Rebers, P. A. and Smith, F., "Colorimetric method for determination of sugars and related substances," Anal. Chem., 28(3), pp. 350~.356 (1956).
13. 김동진, 김혜영, "전처리 방법에 따른 슬러지 가용화가 혐기소화에서 메탄 생산과 슬러지 감량에 미치는 영향", 대한환경공학회, 48(1), pp. 103~109 (2010).
14. Samir Kumar Khanal, Wen-Hsing Chen, Ling Li, Shihwn Sung, "Biological hydrogen production: effects of pH and intermediate products," Int. J. Hydrogen Energy, 29, pp. 1123~1131 (2004).
15. Ginkel, S. V. and Sung, S. H., "Biohydrogen production as a function of pH and substrate concentration," Environ. Sci, Technol., 35, pp. 4726~4730 (2001).
16. Bougrier, C., Albasi, C., Delgeněs, J. P. and Carrěre, H. "Effect of ultrasonic, thermal and ozone pre-treatment on waste activated sludge solubilization and anaerobic digestion", Chem. Eng. Process, 45, pp. 711~718. (2006).
17. 이채영, 박승용. "하수슬러지의 초음파 전처리를 통한 가용화 및 혐기성 생분해도 향상", 유기성자원학회, 16(3), pp. 83~90 (2008).
18. Müller, J., Lehne, G., Schwedes, J., Battenberg, S., Näveke, R., Kopp, J., Dichtl, N., Scheminski, A., Krull, R. and Hempel, D. C. "Disintegration of sewage sludges and influence on anaerobic digestion." Wat. Sci. Tech., 38(8-9), pp. 425-433 (1998).
19. Leclere, M., Bernalier, A., Donadille, G. and Lelait M., "H_2/CO_2 metabolism in acetogenic bacteria isolated from the human colon," Anaerobe, 3, pp. 307~315 (1997).
20. Morvan, B., Rieu-Lesme, F., Fonty, G. and Gouet, P., "In vitro interactions between rumen H_2-utilizing acetogenic and sulfate-reducing bacteria," Anaerobe, 2, pp. 175~180 (1996).
21. 이승무, 박주량, 안준수, "유기성 폐기물로부터 혐기성 발효에 의한 알코올 생성에 관한 연구 (Ⅰ)", 한국폐기물자원순환학회, 3(2), pp. 49~64 (1986).