



Pulse Power를 이용한 폐활성슬러지 전처리의 파이럿 규모 연구

유희찬[†], 홍승모*, 최한나**

가톨릭대학교 생명공학부 환경공학전공, (주)대우건설 기술연구소 환경연구팀*, 아주대학교 수원발전연구센터**
(2005년 8월 16일 접수, 2005년 9월 12일 채택)

Pilot-scale Study for Pulse Power Pretreatment of Waste Activated Sludge

Hee Chan Yoo[†], Seung Mo Hong*, Han Na Choi**

Section of Environmental Engineering, The Catholic University of Korea, Environmental Technology Research Team, Daewoo Institute of Construction Technology*, Suwon Development Institute, Ajou University**

ABSTRACT

Anaerobic digestion is employed worldwide as the oldest and most important process for sludge stabilization. An additional advantage is the production of methane during anaerobic digestion. However, the waste activated sludge(WAS) has poor anaerobic degradability and less gas production due to the cell wall of bio-solid. In order to improve and enhance stabilization and dewatering of the WAS, a number of pretreatment processes have been developed and investigated. In this research, a pilot-scale study of pulse power pretreatment was performed to improve anaerobic degradability and dewaterability of the WAS. A pilot plant was designed and operated based on a previous laboratory study. Change of the sludge characteristics by pulse power pretreatment was estimated to assess the increasing soluble organics. The increased soluble organics could be used as a good substrate in the anaerobic digestion process. Gas production and methane potential of the anaerobic digestion were estimated as the parameters of anaerobic degradability. For evaluation of the dewaterability of pretreated WAS, capillary suction time(CST) and specific resistance were measured. The efficiency of energy recovery was also estimated by calculating energy balance.

Keywords : waste activated sludge(WAS), pretreatment, pulse power, anaerobic degradability, dewaterability, energy recovery

[†]Corresponding author (hcyoo@catholic.ac.kr)

초 록

슬러지를 안정화시키기 위하여 가장 많이 적용되고 있는 공법은 혐기성 소화공법이라고 할 수 있다. 또한, 혐기성 소화는 유기성분의 효과적인 안정화와 동시에 메탄가스를 발생시켜 에너지로 이용 가능하다는 장점을 가지고 있다. 그러나, 폐활성슬러지의 경우 미생물의 세포벽 때문에 일반적으로 저조한 혐기성 처리효율과 탈수능을 나타내고 있으며, 이러한 문제점을 해결하기 위하여 많은 전처리공정들이 개발되거나 연구되어 왔다. 본 연구에서는 폐활성슬러지의 혐기성 소화효율과 탈수능을 향상시키기 위한 pulse power 전처리 연구를 pilot 규모로 수행하였다. Pilot plant는 기 수행된 실험실 연구결과를 바탕으로 설계 및 운전하였다. 본 연구에서는 pulse power 전처리에 의한 슬러지 특성변화를 평가하였으며, 특히 혐기성 소화시 미생물이 사용하기 용이한 기질의 증가를 의미하는 용존성 유기물질의 증가를 주요항목으로 평가하였다. 혐기성 소화조에서 발생하는 가스발생량과 메탄함량을 측정하여 혐기성 소화능을 평가하였으며, 슬러지 탈수능은 CST 및 비저항값의 측정을 통하여 평가하였다. 또한, 슬러지 처리공정에서의 전체적인 에너지수지를 계산하여 pulse power 전처리에 의한 에너지 회수율 변화를 평가하였다.

핵심용어 : 폐활성슬러지, 전처리, 펄스파워, 혐기성 소화능, 탈수능, 에너지 회수율

1. 서론

우리나라의 경우, 지속적인 하수처리시설 확충으로 인하여 하수도보급율이 꾸준히 증가하고 있으며, 이에따라 하수슬러지 발생량도 1998년 3,756톤/일에서 2003년 6,211톤/일로 5년만에 무려 65% 이상 증가하였다¹⁾. 하수슬러지의 경우 하수처리장 내에서 농축, 안정화, 탈수 등의 처리과정을 거친후 해양투기, 매립, 소각, 퇴비화 등의 방법으로 처분하는 것이 일반적이다. 해양투기의 경우 꾸준한 증가추세를 보여왔지만 런던협약에 의하여 향후 적용이 어려울 전망이며, 매립의 경우 이미 슬러지 직매립이 금지되어 있어, 슬러지 처분방법은 소각, 퇴비화 등으로 제한되고 있는 실정이다. 슬러지 소각이나 퇴비화의 경우 하수처리장 내에서 수행되는 안정화 및 탈수정도에 따라 처분효율이 크게 좌우될 수 있다. 현재, 하수 슬러지를 안정화시키기 위하여 가장 많이 적용되고 있는 공법은 혐기성 소화공법이라고 할 수 있다. 혐기성 소화는 특히 유기성분의 효과적인 안정화와 동시에 메탄가스를 발생시켜 에너지로 이용 가능하다는 장점 때문에 폐유기성 물질의 자원화라는 측면에서 중요한 의미를 가지고 있다.

하수슬러지는 일반적으로 유입하수에 존재하는 찌꺼기 성분인 1차슬러지와 생물학적 처리후 최종 침전지에서 발생하는 2차슬러지로 구분할 수 있다. 2차슬러지의 경우 거의 대부분 미생물 덩어리로 구성되어 있어, 혐기성 소화시 기질로서의 사용이 세포벽에 의하여 차단되므로 안정화 효율이 매우 저조하게 나타나며, 세포벽 내부에 존재하는 내부수가 제거되지 않아 탈수효율도 낮은 문제점을 가지고 있다^{2, 3, 4)}. 따라서, 이러한 2차슬러지의 문제점을 해결하여 혐기성 소화 및 탈수효율을 높이기 위한 전처리 연구가 다양하게 진행되고 있으며, 전처리 방법으로는 물리적 파쇄⁵⁾, 열처리⁶⁾, 산·알카리 처리⁷⁾, 초음파처리⁸⁾, 전자선 조사^{9, 10)}, 방사선 조사¹¹⁾ 등을 이용한 세포벽 파괴가 검토되고 있다.

본 연구에서는 하수슬러지의 혐기성 소화효율 및 탈수능을 개선하기 위한 전처리 방법으로 pulse power를 적용하였다^{2, 3)}. Pulse power란 극히 짧은 시간동안 순간적으로 매우 큰 에너지를 방출시키는 것을 말한다(Fig. 1). 이러한 pulse power는 물 속에서 에너지를 순간적으로 방전시켜 전극간에 안정된 아크방전을 유도하며, 전기에너지가 강한 충격파 형태로 전환되면서 미생물 세포를 효과적으로 파괴할 수 있다^{12, 13)}. 이미 pulse power

를 이용하여 실험실에서 pulse power 반응기 형태 및 운전조건, pulse 반복율 등을 실험인자로 전처리된 하수슬러지의 회분식 혐기성소화에 관한 연구를 수행하여 pulse power 전처리 방법의 우수성이 제시된 바 있으며¹⁴⁾, 본 연구에서는 이러한 실험실 결과를 바탕으로 하수처리장에 pilot plant를 설치·운전하여 실제 현장에서 기술의 적용성을 파악하고자 하였다.

2. 실험장치 및 방법

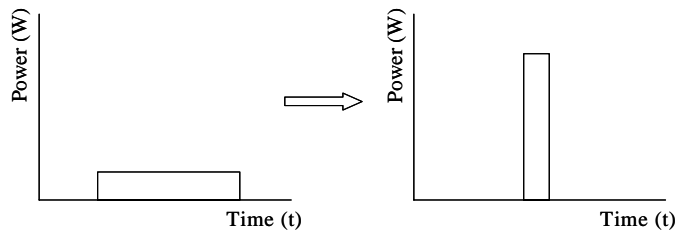
2.1 Pulse power 전처리 시스템

Pulse power 발생시스템은 슬러지 전처리를 위한 반응기에 평균출력 20kW를 공급하도록 제작되었다. 발생하는 pulse 폭은 약 $3\mu\text{s}$ 이고, 최대 pulse 전압이 60kV, 최대 pulse 전류가 3kA인 대출력 pulse를 발생시킬 수 있으며, 65% 이상의 에

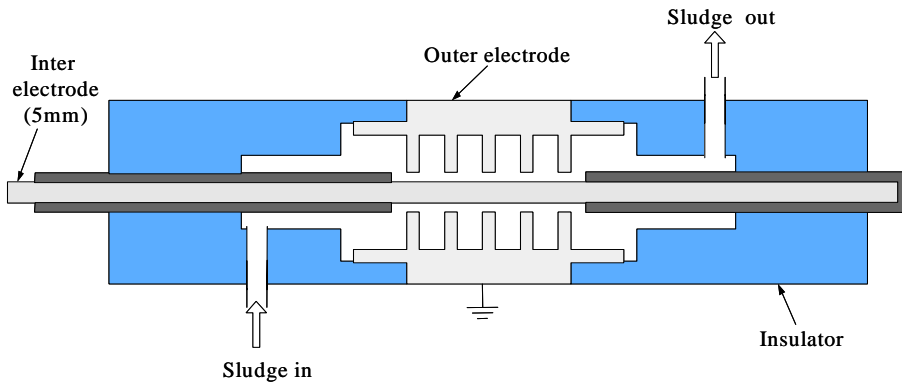
너지 전달 효율로 최대 500Hz에서 6개월 이상 연속 운전(1×10^{10} pulse)이 가능하도록 설계·제작되었다. 또한 본 장치는 pulse당 18J의 에너지를 공급할 수 있도록 제작되었다.

Pulse power가 하수슬러지에 공급되어 반응이 일어나는 반응기는 실험실 연구에서와 동일하게 SUS 재질의 동축링 반응기(coaxial ring reactor)를 사용하였다(Fig. 2)¹⁴⁾. 반응기 내부에 링을 설치하는 이유는 슬러지의 반응기내 체류 시간을 연장시키고 가급적 반응기 내부 전체가 pulse power의 영향권에 포함되도록 하여, 단위 시간당 슬러지에 미치는 pulse power의 영향을 최대한 크게 할 수 있기 때문이다¹²⁾. 본 pilot 규모 연구에서는 실험실 연구에서 도출된 결과를 인용하여 동축반응기의 내부링 개수를 7개로 전처리하였다¹⁴⁾.

또한, pulse poser 발생시스템의 안정성 및 방전



[Fig.1] Principle of pulse power.



[Fig.2] Schematic diagram of the coaxial ring reactor.

효율 등을 고려한 예비실험 결과, pulse 반복율은 110Hz로 결정하였으며, 최대 방전유량은 800~1,000mL/min로 운전하였다. 이 때, pulse power 반응조내 슬러지의 수리학적 체류시간은 1.2~1.5sec.로 나타났다.

2.2 혐기성 소화조 pilot plant

Pilot plant는 경기도 A하수처리장에 설치하였으며, 전체적인 pilot plant의 공정흐름도는 [Fig. 3]에 나타내었다.

Pilot 규모 실험을 위하여 내부혼합 임펠러가 설치된 유효용적 1m³ 크기의 혐기성 소화조를 제작하였으며, 수리학적 체류시간(HRT)은 15일로 운전하였다. 소화조 가온은 외부에 heating plate와 controller를 설치하여 자동으로 35±1℃ 범위에서 유지되도록 하였다. 혐기성 소화조에는 내부 슬러지 채취를 위한 시료채취구를 일정한 높이별로 3개 설치하였으며, 상부의 소화조 가스 배출구에 wet gas meter(Sinagawa W-NK-2B)를 설치하여 매일 가스발생량을 측정하였고, 가스성상은 GC(Shimadzu GC-14A)로 분석하였다.

혐기성 소화조의 초기 운전시 하수처리장에서 채취한 소화슬러지와 J발효공장에서 채취한 주정슬러지를 1:1로 혼합하여 반응조에 주입하여 1주일간 순용시킨 후, 하수슬러지를 유입하였다. 하수슬

러지는 최종침전지에서 발생하는 폐활성슬러지만을 대상으로 하였으며, A하수처리장의 반송슬러지를 pilot plant에서 자체적으로 증력농축하여 사용하였다.

2.3 탈수성 실험

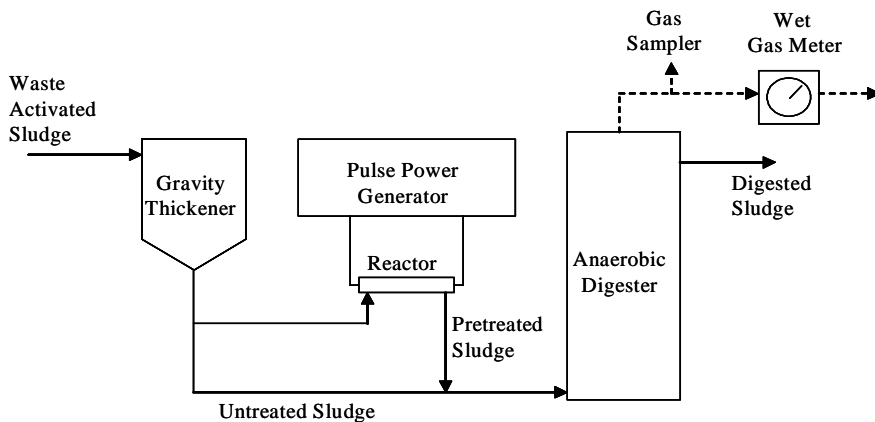
Pulse power 전처리에 의한 슬러지의 탈수성 변화를 평가하기 위하여, Blüchner funnel test에 의한 비저항(specific resistance) 측정과 CST(capillary suction time)를 측정하였다. 비저항과 SCT가 어느정도 상관성이 있다고 알려져 있지만, 비저항의 경우 기계적 가압시 탈수정도를 평가하는데 적합한 지표이고 CST는 자연상태에서 탈수속도를 평가하는데 좀더 적합하므로 본 연구에서는 두가지 지표를 모두 측정하였다.

탈수성 실험을 위하여 폐활성슬러지의 pulse power 전처리 전·후의 비저항과 CST 변화를 평가하였으며, 전처리 유무에 따라 혐기성 소화 후 비저항과 CST를 비교하였다.

3. 결과 및 고찰

3.1 슬러지 특성 변화

Pulse power 전처리 시행 전·후의 폐활성슬러지 특성 변화를 [Table 1]에 나타내었다. 전처리



[Fig. 3] Schematic diagram of sludge treatment process for pilot plant study.

[Table 1] Characteristics of Untreated and Pulse Power Pretreated Activated Sludges

Properties		Untreated activated sludge		Pretreated activated sludge	
		Range	Average	Range	Average
pH		5.5~7.7	6.4	6.1~7.2	6.5
Volatile acid (mg/L)		242~904	651	1,141~1,610	1,302
Solid (mg/L)	TS	21,650~26,910	23,927	16,090~24,440	20,084
	VS	16,970~21,190	19,248	11,300~19,230	16,000
	VS/TS	0.78~0.80	0.79	0.67~0.95	0.81
COD _{Cr} (mg/L)	TCOD	24,450~29,950	28,040	20,150~37,900	26,100
	SCOD	1,740~3,600	2,600	3,790~6,800	5,133
	SCOD/TCOD	0.07~0.10	0.08	0.12~0.30	0.21
Conductivity (μ S/cm)		1,417~2,710	2,064	1,445~4,750	3,385
Alkalinity (mg/L CaCO ₃)		788~2,130	1,539	864~2,810	2,184

를 하지 않은 폐활성슬러지의 경우, VA 농도가 평균 651mg/L, TS 평균 23,927mg/L, TCOD_{Cr} 평균 28,040mg/L로 전형적인 농축 활성슬러지의 값을 나타내고 있다. 또한, SCOD/TCOD 비가 0.08로 매우 낮게 나타나 혐기성 소화시 효율이 저조할 것으로 예상된다. Pulse power로 전처리를 수행한 슬러지는 전처리 전과 비교하여 고형물 관련 항목 및 TCOD에서는 큰 차이를 보이지 않지만, VA와 SCOD 평균치가 각각 1,302mg/L 및 5,133mg/L로 약 2배 가량 증가하였으며, SCOD/TCOD 비가 0.21로 전처리 전에 비하여 크게 증가하였다. 또한, 세포의 파괴로 인하여 세포 내에 존재하는 이온성 물질들이 용출되어 전기전도도가 증가한 것을 볼 수 있다. 특히, pulse power 전처리에 의한 슬러지 특성 변화에서 VA 농도의 증가는 혐기성 소화 효율향상에 직접적인 영향을 줄 수 있을 것으로 기대된다. 폐활성슬러지의 세포벽으로 인하여 가수분해가 지연되는 현상이 소화효율을 감소시킨다고 볼 때, 슬러지 세포벽을 파괴시킬 경우 자연적으로 가수분해가 촉진되는 현상이 일어날 것으로 판단되어 전처리 후 경과 시간에 따른 VA 농도변화를 측정된 결과 [Fig. 4]와 같은 결과를 얻을 수 있었다. VA 농도가 30 mg/L로 매우 낮은 폐활성슬러지를 pulse power로 전처리한 직후 VA 농도는 324mg/L로 약 10배

이상 증가하였으며, 1일간 상온에서 보관한 경우 1,196 mg/L로 급격히 증가하는 양상을 보였고, 그 이후에도 약간씩 증가하는 경향을 나타내고 있다. 이는 전술한 바와 같이, 세포벽의 파괴로 가수분해가 촉진되면서 자연적으로 자체 산발효 반응이 부분적으로 진행되기 때문인 것으로 판단된다. 따라서 현장 적용시 이러한 결과를 감안하여 전처리된 슬러지를 최소한 1일 이상 상온보관 후 혐기성 소화하는 것이 더 높은 효율향상을 기대할 수 있을 것으로 판단된다.

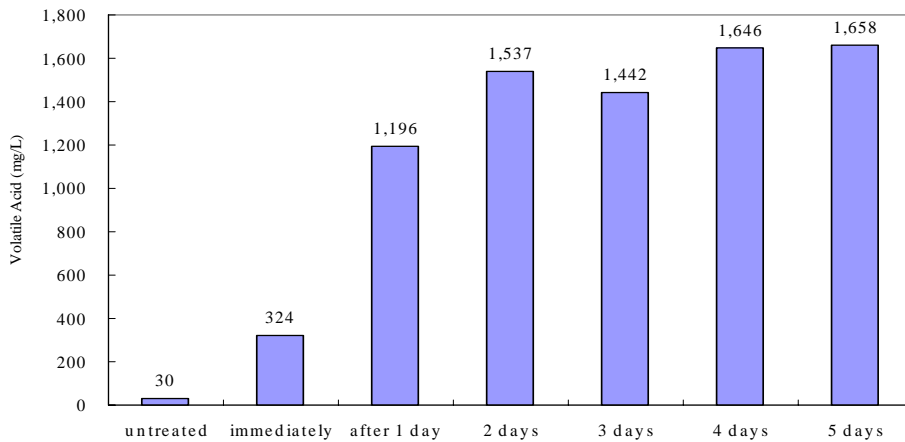
3.2 혐기성 소화시 가스 발생 변화

본 연구에서는 pulse power 전처리를 통한 에너지 회수효율의 증대라는 관점에서 혐기성 소화시 발생하는 가스량 및 메탄조성의 변화를 주로 검토하였다. 전처리하지 않은 폐활성슬러지를 pilot 규모의 혐기성 소화조에 일정기간 동안 우선 주입하여 운전하면서 가스발생량 및 메탄조성을 측정된 후, 동일한 혐기성 소화조에 pulse power로 전처리한 슬러지를 주입하여 가스발생량과 메탄조성의 변화를 검토하였다. [Fig. 5]에는 투입되는 VS 1kg 당 소화가스발생량(GPR, gas production rate) 변화를 나타내었다. 전처리하지 않은 폐활성슬러지를 주입한 경우 평균 0.1m³/kg VS_{added}의 가스가 발생한 반면, pulse power로 전처리한 슬

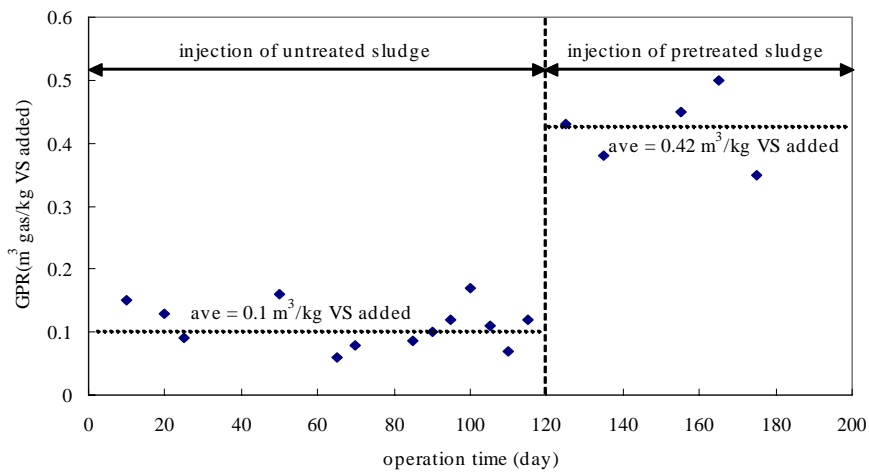
러지의 혐기성 소화에서는 평균 $0.42\text{m}^3/\text{kg VS}_{\text{added}}$ 의 가스가 발생하여 4배 이상 증가한 것으로 나타났다. 실험실 규모의 회분식 혐기성 소화실험 결과에서도 전처리하지 않은 경우 $0.15\text{m}^3/\text{kg VS}_{\text{added}}$, pulse power로 전처리한 경우 $0.37\text{m}^3/\text{kg VS}_{\text{added}}$ 의 가스가 발생한 것으로 나타나¹⁴⁾, 본 연구에서 수행한 연속식 pilot plant 결과

가 실험실 회분식 결과와 크게 다르지 않은 것을 보여주고 있다. 이는 결국 폐활성슬러지의 전처리로 용존성 유기물질인 VA와 SCOD가 증가되어 소화조 효율이 향상되었기 때문일 것이다.

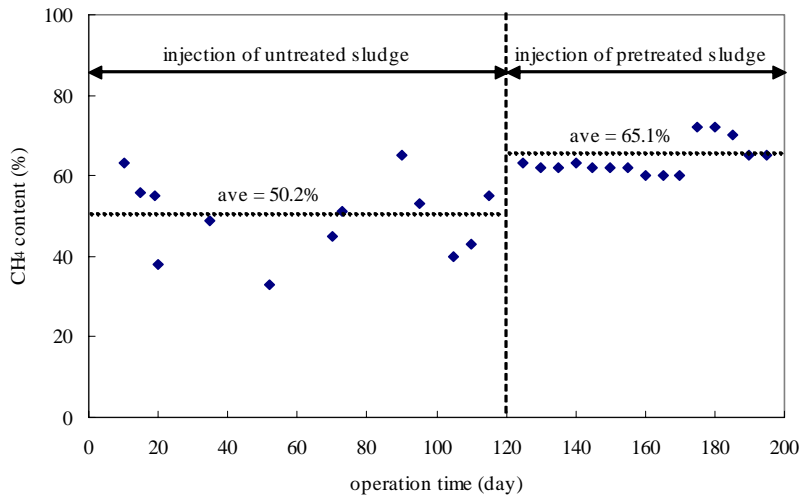
또한, 발생된 소화가스 중 메탄가스의 비율 변화는 [Fig. 6]에 나타난 것과 같다. 전처리없이 폐활성슬러지를 혐기성 소화조에 주입한 경우 발생가



[Fig. 4] Change of VA concentration with storage time after pulse power pretreatment.



[Fig. 5] Effect of pulse power pretreatment on gas production rate during anaerobic digestion.



[Fig. 6] Effect of pulse power pretreatment on methane content during anaerobic digestion.

스 중 메탄가스의 비율은 평균 50% 정도였으며 가스 조성도 매우 불안정하게 변화가 심한 모습을 보여주고 있는 반면, pulse power로 전처리한 슬러지를 투입한 경우에는 메탄가스의 비율이 평균 65%로 크게 증가하였으며 가스 조성도 비교적 안정적인 상태로 발생하는 것으로 나타났다. 이는 혐기성 미생물에 의해서 기질로 사용되기 용이한 VA가 비교적 충분히 공급되어, 혐기성 소화조 내의 생물학적 반응이 안정적으로 유지되기 때문인 것으로 판단된다.

3.3 슬러지 탈수성 변화

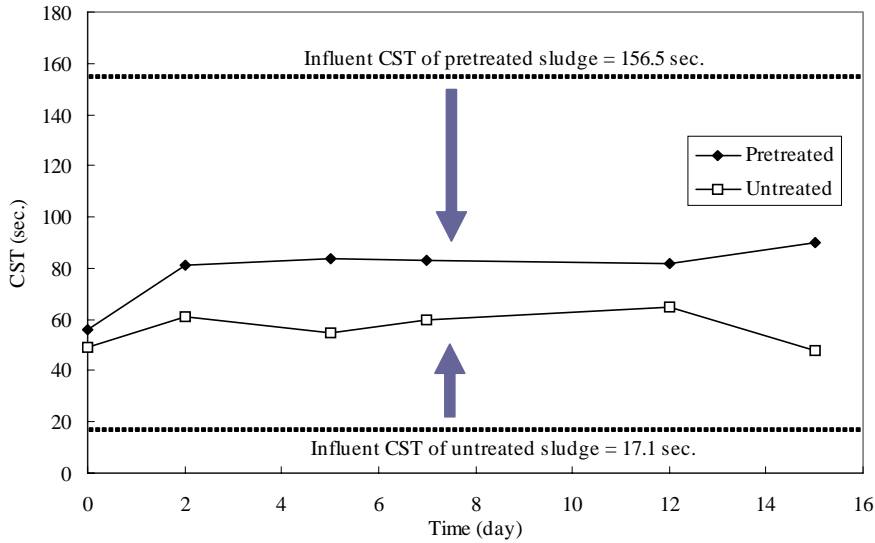
본 연구에서는 우선 pulse power 전처리에 의하여 폐활성슬러지의 탈수성이 어떻게 변화하는지를 알아보기 위하여 전처리 전·후의 CST와 슬러지 비저항값을 측정하였다. [Table 2]에서 보는 것

처럼 pulse power로 슬러지를 전처리한 경우 CST 및 비저항값 모두 증가하여, 탈수성이 악화되는 것으로 나타났다. 이는 pulse power에서 발생하는 강력한 충격파로 인하여 미생물이 파괴되어 입자크기가 감소되며, 슬러지 단위부피당 비표면적이 증가되어 슬러지내 수분이 탈수가 용이한 간극수보다는 입자와의 결합이 좀더 강한 표면결합수의 형태로 더 많이 존재하기 때문인 것으로 판단된다.

[Fig. 7]에는 폐활성슬러지의 pulse power 전처리 유·무에 따라 혐기성 소화조 슬러지의 CST 변화를 나타내었다. 전처리하지 않은 슬러지의 경우 혐기성 소화에 의하여 CST가 증가하여 탈수성이 악화되는 반면, pulse power로 전처리한 슬러지는 CST가 45% 이상 감소하여 탈수성이 크게 향상되는 것으로 나타났다. 슬러지 비저항값의 경

[Table2] Dewaterabilities of Untreated and Pulse Power Pretreated Activated Sludges

Properties		Untreated activated sludge	Pretreated activated sludge
CST(sec.)	Test 1	19.9	61.4
	Test 2	17.1	156.5
Specific resistance(sec. ² /g)		3.86 × 10 ⁹	1.85 × 10 ¹⁰



[Fig. 7] Effect of pulse power pretreatment on capillary suction time of digested sludge.

우에도 CST 결과와 유사한 경향을 보여주고 있으며, 혐기성 소화 후에는 pulse power 전처리한 슬러지의 비저항값이 오히려 낮게 나오는 결과를 나타내었다[Table 3]. 이는 pulse power 전처리로 인하여 폐활성슬러지가 기질로 이용되기 용이한 용존성 형태로 바뀌면서 혐기성 미생물의 성장이 촉진되어 양호한 슬러지 floc이 형성되기 때문인 것으로 보여진다. 또한, 이 결과는 혐기성 공정에서 정상적인 소화과정이 진행된다면 슬러지의 탈수성은 향상된다는 것을 입증하는 것이라고 할 수 있다.

현재, 거의 대부분의 하수처리장에서 슬러지 탈수시 기계식 가압방식을 사용하고 있으며, 탈수능을 향상시키기 위하여 응집제를 사용하고 있으므로, 본 연구에서도 기존 A하수처리장에서 사용하

고 있는 국산 양이온 고분자응집제(K530CF)를 주입하여 전처리 유·무에 따른 혐기성 소화 슬러지의 비저항값을 측정하였다[Table 4]. 전처리되지 않은 슬러지를 혐기성 소화시킨 슬러지에 양이온 고분자응집제를 40mg/L 주입한 경우 슬러지 비저항값이 $1.18 \times 10^9 \text{sec}^2/\text{g}$ 에서 $1.24 \times 10^8 \text{sec}^2/\text{g}$ 으로 감소하면서 탈수능이 향상되는 결과를 나타내었다. 반면, pulse power로 전처리한 슬러지를 혐기성 소화시킨 경우, 소화슬러지에 동량의 양이온 고분자응집제를 주입하였을 때 비저항값의 측정이 불가능하였다. 이는 응집제 주입시 비저항측정을 위한 감압시 탈리액이 순간적으로 빠져나왔기 때문이며, 응집제양을 20mg/L까지 감소시킨 경우에도 동일한 현상이 발생하여 비저항값을 측정할 수 없을 정도로 탈수능이 급격히 향상되는 결과를 나타

[Table3] Specific Resistance Change of Sludges after Anaerobic Digestion(HRT 15days)

Properties		Untreated activated sludge	Pretreated activated sludge
Specific resistance ($\text{sec.}^2/\text{g}$)	before	3.86×10^9	1.85×10^{10}
	after	6.32×10^{10}	1.53×10^{10}

[Table 4] Specific Resistance Change of Digested Sludge by Chemical Conditioning(Dosage of Cation Polymer : 40mg/L)

Properties		Digested sludge	
		Untreated	Pretreated
Specific resistance (sec. ² /g)	non-conditioning	1.18×10 ⁹	1.07×10 ⁹
	conditioning	1.24×10 ⁸	N.D.

내었다. 이러한 결과는 pulse power로 전처리한 경우 혐기성 소화시킨 슬러지의 응집력이 크게 향상되기 때문인 것으로 추정되나 향후 정확한 메카니즘의 규명과 실제 탈수장치를 이용한 탈수실험 등의 추가적인 연구가 필요하다.

3.4 에너지 회수 효율 변화

Pulse power 전처리 도입시 가스발생량(GPR) 및 메탄함량의 증가로 에너지 회수량이 증가하지만, 전처리 설비를 가동하기 위한 추가적인 전력이 소요되므로 전체적인 슬러지 처리 공정의 에너지 회수 효율 변화를 알아보기 위하여 에너지 수지를 비교·평가하였다. 처리시설 가동을 위하여 소요되는 전력량은 실제 pilot plant를 가동하면서 얻은 결과를 기초로 산정하였는데, 혐기성 소화공정만을 운전하는 경우에는 슬러지 1m³ 당 23.3kWh의

전력이 투입되었으며 pulse power 전처리 공정이 추가되는 경우에는 53.5kWh/m³의 전력이 필요하였다. 농축 폐활성슬러지의 총고형물(TS) 농도는 일반적으로 하수처리장 설계시 2~3%를 적용하므로 본 평가에서는 2.5%(25,000mg/L)를 사용하였으며, 휘발성고형물(VS) 함량은 총고형물의 80%로 산정하였다. 또한, 투입 VS당 가스발생량 및 메탄가스 비율 등은 앞에서 제시한 실험결과를 이용하였다.

10m³/d 용량의 슬러지 처리시설에 대한 에너지 수지 결과를 [Table 5]에 나타내었다. 폐활성슬러지를 전처리하지 않고 혐기성 소화만 하는 경우 투입에너지와 생성에너지는 각각 233kWh/d 및 100kWh/d로 슬러지 처리공정을 운영하기 위해서는 전체적으로 133kWh/d의 에너지가 투입되어야 하는 것으로 나타났다. 반면, pulse power로 슬러

[Table 5] Energy Balance of Pulse Power Pretreatment and Anaerobic Digestion (10m³/d Sludge Treatment)

	Anaerobic digestion only (1)	Pulse power + anaerobic digestion (2)	Remark
Energy requirement (E _{in} , kWh/d) ^{a)}	233	535	(1): 23.3kWh/m ³ sludge (2): 53.5kWh/m ³ sludge
VS _{added} (kg/d)	200	200	TS: 25,000 mg/L VS: 80% TS
Gas production (m ³ gas/d)	20	84	(1): 0.1m ³ /kg VS _{added} (2): 0.42m ³ /kg VS _{added}
Methane production (m ³ CH ₄ /d)	10	55	(1): CH ₄ content 50% (2): CH ₄ content 65%
Energy production (E _{out} , kWh/d) ^{b)}	100	548	2.778×10 ⁻⁴ kWh/kJ
Net energy production (E _{net} , kWh/d)	- 133	13	E _{net} = E _{out} - E _{in}

a) Based on the operating data of pilot plant
b) Heating value of CH₄ = 35,846 kJ/m³

지를 전처리하여 혐기성 소화하는 경우에는 투입 에너지와 생성에너지가 각각 535kWh/d 및 548kWh/d로 슬러지 처리공정으로부터 13kWh/d의 에너지를 회수할 수 있는 것으로 평가되었다. Pulse power 전처리를 적용하는 경우, 추가적인 전력소요에 의하여 약 2.3배 에너지가 소모되지만 혐기성 소화효율의 향상으로 에너지 생성이 약 5.5배 증가하여 전체적인 에너지 회수 효율을 크게 증대시키는 것으로 나타났다. 이는 혐기성 소화의 중요한 목적 중 하나인 폐유기성 물질의 자원화라는 측면에서도 pulse power에 의한 폐활성슬러지의 전처리가 매우 유용한 기술임을 시사하는 것이라고 할 수 있다.

4. 결론

본 연구에서는 하수처리장 운영시 폐활성슬러지의 혐기성 소화효율이 저하되는 현상을 개선하기 위하여 전처리공정으로 pulse power 기술을 적용하였으며, 실제 하수처리장에서 pilot plant를 운전하여 다음과 같은 결론을 도출할 수 있었다.

- 1) Pulse power로 전처리를 수행한 슬러지는 전처리 전과 비교하여 VA와 SCOD가 약 2배 가량 증가하였으며, SCOD/TCOD 비가 0.21로 전처리 전의 0.08에 비하여 크게 증가하였다. 또한, pulse power 전처리 후 경과시간에 따른 VA 농도변화를 측정할 결과, 1일간 상온에서 보관한 경우 전처리한 직후에 비하여 약 4배 정도 급격히 증가하는 양상을 보였다. 이는 세포벽의 파괴로 가수분해가 촉진되면서 자연적으로 자체 산발효 반응이 진행되기 때문인 것으로 판단되며, 현장 적용시 이러한 결과를 감안하여 전처리된 슬러지를 최소한 1일 이상 상온보관 후 혐기성 소화하는 것이 더 높은 효율향상을 기대할 수 있을 것으로 나타났다.
- 2) 투입되는 VS 1kg 당 소화가스발생량은 전처리하지 않은 폐활성슬러지를 투입한 경우 평균 $0.1\text{m}^3/\text{kg VS}_{\text{added}}$ 인 반면, pulse power로 전처리한 슬러지의 혐기성 소화에서는 평균 $0.42\text{m}^3/\text{kg VS}_{\text{added}}$ 의 가스가 발생하여 4배

이상 증가한 것으로 나타났다. 또한, 전처리없이 폐활성슬러지를 혐기성 소화조에 투입한 경우 발생가스 중 메탄가스의 비율은 평균 50% 정도였으며 가스 조성도 매우 불안정하게 변화가 심한 모습을 보여주고 있는 반면, pulse power로 전처리한 슬러지를 투입한 경우에는 메탄가스의 비율이 평균 65%로 크게 증가하였으며 가스 조성도 비교적 안정적인 상태로 발생하는 것으로 나타났다.

- 3) Pulse power로 슬러지를 전처리한 경우 CST 및 비저항값 모두 증가하여 탈수성이 악화되는 것으로 나타났다. 그러나 전처리하지 않은 슬러지는 혐기성 소화를 거치면서 탈수성이 악화되는 것으로 나타난 반면, 전처리한 슬러지는 혐기성 소화를 거치면서 탈수성이 회복되는 것으로 나타났다. 특히, 슬러지처리계통에서 흔히 사용되는 양이온 고분자응집제를 투입한 경우 전처리한 소화슬러지는 비저항을 측정할 수 없을 정도로 탈리액이 쉽게 분리되는 것으로 나타나, 응집제를 병행 사용할 경우 탈수능을 크게 향상시킬 것으로 판단되었다.
- 4) $10\text{m}^3/\text{d}$ 용량의 슬러지 처리시설에 대한 에너지 수지를 검토한 결과, 폐활성슬러지를 전처리하지 않고 혐기성 소화만 하는 경우 전체적으로 133kWh/d의 에너지가 투입되어야 하는 것으로 나타난 반면, pulse power로 슬러지를 전처리하여 혐기성 소화하는 경우에는 슬러지 처리공정으로부터 13kWh/d의 에너지를 회수할 수 있는 것으로 평가되었다. Pulse power 전처리를 적용하는 경우, 추가적인 전력소요에 의하여 약 2.3배 에너지가 소모되지만 혐기성 소화효율의 향상으로 에너지 생성이 약 5.5배 증가하여 전체적인 에너지 회수 효율을 크게 증대시키는 것으로 나타났다.

사사

본 연구는 에너지관리공단에서 시행한 대체에너지 개발사업의 일환으로 수행되었으며, 이에 감사드립니다.

참고문헌

1. 환경부, “하수도 통계(2003)”, 환경부 홈페이지(2004)
2. Petel, K. D., “Enhancement of Anaerobic Digestion Processes Using Pulse Power Technology”, Master Thesis, Tulane University Medical Center (1996).
3. Scientific Utilization Inc.(SUI), “An Overview of PulsePower™ Technology”, SUI (1997).
4. Muller, J. A., “Prospects and Problems of Sludge Pre-treatment Processes”, Water Sci Technol, 44(10), pp. 121~128 (2001).
5. 최홍복, 황경엽, 신응배, “하수슬러지의 혐기성 소화개선을 위한 기계적 전처리”, 대한환경공학회지, 18(9), pp. 1095~1102 (1996).
6. Stuckey, D. C. and McCarty, P. L., “The Effect of Thermal Pretreatment on the Anaerobic Biodegradability and Toxicity of Waste Activated Sludge” Water Research, 18(11), pp. 1343~1353 (1984).
7. Chiu, Y. C., Chang, C. N., Lin, J. G., Huang, S. J., “Alkaline and Ultrasonic pretreatment of Sludge before Anaerobic Digestion”, Water Sci Technol, 36(11), pp. 155~162 (1997).
8. 신경숙, 강호, 방기연, “전자선으로 처리한 하수슬러지의 특성연구”, 대한환경공학회지, 22(7), pp. 1225~1232 (2000).
9. 고현웅 외 5인, “회분식 초음파 전처리를 이용한 하수슬러지의 분해에 관한 연구”, 유기물자원화, 12(4), pp. 121~129(2004).
10. 이재광, 유대현, 이면주, “전자선과 물리개량제를 이용한 하수슬러지의 전처리”, 대한환경공학회지, 26(9), pp. 1001~1007 (2004).
11. 강호, 나은경, 이면주, “방사선으로 처리한 하수슬러지의 물리화학적 특성 변화 및 혐기성 최종생분해도 평가”, 대한환경공학회지, 26(5), pp. 558~565 (2004).
12. 강방권, “고전압 물속방전과 슬러지 처리에 관한 연구”, 아주대학교 석사학위논문 (2000).
13. Lee, H. Y., Uhm, H. S., Choi, H. N., Jung, Y. J., Kang, B. K., Yoo, H. C., “Underwater Discharge and Cell Distruction by Shockwaves”, Jour. of the Korean Physical Society, 42, pp. S880~S884 (2003).
14. 전용우, 최한나, 정윤진, 홍승모, “Pulse Power에 의한 폐활성슬러지의 전처리”, 대한환경공학회지, 25(7), pp. 875~882 (2003). 