

하수슬러지의 혐기성 소화개선을 위한 기계적 전처리

최 흥 복 · 황 경 업 · 신 응 배*

한국과학기술연구원 환경연구센터

* 한양대학교 토목환경공학과

(1996년 1월 9일 접수, 1996년 8월 13일 채택)

A Mechanical Pretreatment for Anaerobic Digestion Improvement of Sewage Sludge

Hong-Bok Choi · Kyung-Yub Hwang · Eung-Bai Shin*

*Environment Research Center, Korea Institute of Science and
Technology, P.O.BOX 131, Cheongryang, Seoul, Korea*

** Department of Civil and Environmental Engineering,
Hanyang University, Seoul, Korea*

ABSTRACT

This research evaluates the effectiveness of sludge pretreatment as it affects the subsequent anaerobic digestion of waste-activated sludge(WAS). The key to this sludge pretreatment process is that bacteria cells in the WAS are ruptured by mechanical jet and smash under pressurized conditions. The protein concentrations in the sludge varied significantly before and after pretreatment, which increased with times of smash and pressure. In batch experiments, efficiencies of volatile solids(VS) removal were 13~ 50% when the WAS pretreated once under 30 bar was fed into an anaerobic digester with 2~26-day retention time. Under the same operating conditions, when intact WAS was fed into the digester, efficiencies of VS removal were 2~ 35%. It was observed that higher digestion efficiencies of sludges could be obtained through a mechanical pretreatment of sludges.

Key Words : Anaerobic digestion, Biodegradation, Waste-activated sludge pretreatment, Cell rupture.

요 약 문

본 연구는 2차슬러지의 전처리가 혐기성 소화에 미치는 영향에 관한 연구로 2차슬러지를 기계적으로 분사 및 충돌시키는 전처리 공법에 대한 연구이었다. 본 전처리공법의 핵심은 2차슬러지를 구성하고 있는 미생물 세포를 파괴하는 것으로 이를 위하여 2차슬러지를 기계적으로 가압하여 분사, 충돌시킨 물리적 힘으로 세포막을 파손하여 세포내부로부터 단백질을 세포외부로 노출시켰다. 실험결과 충돌 전후 시료의 단백질 농도 변화가 뚜렷이 나타났다. 단백질 농도는 분사압력 및 분사횟수가 증가할수록 높아졌다. 전처리한 2차슬러지를 회분식 혐기성소화 실험한 결과 체류시간 2~26일에서 13~50%의 VS(volatile solids)제거효율을 나타냈다. 반면에 같은 운전조건에서 전처리하지 않았을 경우 2~35%의 VS제거효율을 나타내서 하수의 2차슬러지를 전처리할 경우에 월등히 높은 혐기성처리효율을 보이고 있는 것으로 나타났다.

주제어 : 혐기성소화, 생물학적 분해, 체류시간, 2차슬러지 전처리, 세포파괴

1. 서 론

하수슬러지는 하수처리시 발생하는 침전 잔류물을 말하며 하수처리장에 유입되는 생하수내에 존재하는 모래, 음식 찌꺼기 등, 무기성 및 유기성의 침전성 찌꺼기같은 1차슬러지와 생물학적 처리후 발생하는 2차슬러지, 농축조에서 농축후의 혼합슬러지를 총칭하여 정의된다.

우리 나라 하수슬러지 발생량은 1994년 3월 현재 전국의 33개 하수처리장에서 하루에 2,150 톤으로 조사되었으며 처리인구에 대한 하수도 보급율의 증가와 고도처리 도입 등으로 하수슬러지 발생량도 증가하고 있다^{1,2,3)}.

지금까지 하수슬러지는 대부분 1단 또는 2단 혐기성소화공정에 의해서 처리되어 왔으나 이와 같은 처리방법은 긴 체류시간과 낮은 처리효율, 그리고 불안정 등이 문제점으로 지적되어 왔다^{1,9)}. 이러한 문제점의 핵심은 2차슬러지가 대부분 호기성 박테리아 세포로 구성되어 있어 세포막 또는 세포벽에 의해 혐기성소화 기질이 차단될 수밖에 없으며 세포벽 또는 세포막이 와해되기 전까지는 혐기성소화를 위한 양질의 기질이 되지 못하는 데 있다^{11,23)}.

2차슬러지 전처리공정의 필요성은 혐기성공정의 이러한 문제점을 타개하기 위하여 대두되어 왔고

지금까지 대부분 고온에서 열처리후 혐기성소화처리하는 방법이 이용되었다^{4,5)}. 그러나 이 공정은 하수슬러지 가온 및 냉각시 많은 에너지를 소모할 뿐 아니라 악취발생 등 부차적인 문제를 안고 있어 소각 등 다른 처리방법으로 대체되고 있다. 열처리방법 외에 하수슬러지 전처리 방법으로 초음파처리 등 몇가지 방법이 연구된 바 있다⁶⁾.

본 연구에서는 지금까지 2차슬러지 전처리 공정에서 적용되지 않았던 새로운 방법을 시도하였다. 즉, 2차슬러지를 구성하고 있는 미생물을 기계적으로 가압하여 분사, 충돌시키므로써 세포막을 파손하여 효율적인 혐기성소화를 유도하기 위한 일련의 새로운 기술의 개발을 시도하였다. 따라서 본 연구에서는 하수의 2차슬러지 기계적 전처리가 후속 혐기성 소화효율 및 안정화에 미치는 영향에 대한 연구로써 기계적인 전처리 결과에 따른 2차슬러지의 물리화학적 특성변화와 회분식 혐기성 소화실험을 통한 소화효율 등의 실험결과에 대해서 논한다.

2. 실험재료 및 방법

본 연구에서 추구한 2차슬러지 전처리 방법은 고속으로 2차슬러지를 충돌판에 충돌시키므로써 세포가

파괴되게 하는 것을 핵심으로 하고 있으며, 이 방법을 채택한 부대적인 동기로 첫째, 장치가 매우 간단하고, 둘째, 2차슬러지 저장조에서 혐기성 소화조까지의 운반 경로가 추가로 필요하지 않으며 셋째, 단열압축 및 충돌에 의한 온도 상승효과와 입자크기 감소가 혐기성 소화에 도움이 될 수 있어 높은 현장성이 기대되기 때문이었다.

2. 1. 실험장치 및 방법

하수슬러지분사 및 충돌장치는 Fig. 1과 같이 고압 분사의 충격에 견딜 수 있고 반복 분사가 가능하도록 하였으며 평판 모양의 충돌판은 열처리된 철제환봉(ΦD20mm)으로 제작되었고 분사 노즐과 20mm 간격으로 2개 설치되었다. 전처리 순서는 다음과 같다. 먼저 분사시 하수슬러지가 노즐을 잘 통과할 수 있도록 미세망(710μm standard testing sieve, No. 25)으로 하수슬러지에서 모래 등을 제거한다. 모래 등이 제거된 하수슬러지를 Fig. 1의 제1 저장조(1)에 저장한다. 이 하수슬러지는 가압펌프(2)에 의해서 원하는 압력으로 가압되어 압력게이지(3), 중간 T 밸브(4), 노즐(5)을 차례로 통과하여 충돌판(6)에 충돌하면서 1회 분사가 이루어지고 저장조(7)로 이송된다. 반복 분사시는 방향을 전환하여 동일한 방법에 의해서 저장조(1)로 하수슬러지를 분사한다.

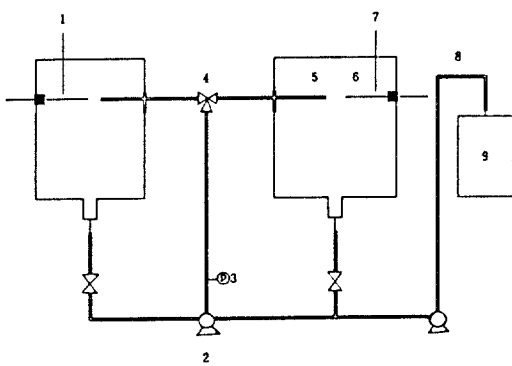


Fig. 1. Configuration of the equipment for sludge pretreatment and bioreactor: 1, sludge storage tank; 2, pressure pump; 3, pressure gauge; 4, T valve; 5, nozzle; 6, smash-flat; 7, storage tank; 8, influent; 9, digester.

전처리시 시료의 박테리아는 분사직전 5~50 bar 상태에서 순간적으로 대기압에 노출되는 동시에 충돌판에 의해 충격을 받게 된다. 이 때 분사노즐(ΦD1.2mm)로부터 충돌판까지 분사되는 속도는 이론적으로 약 30~100m/sec이며 충돌판에 가하는 힘은 약 0.11~1.54kgf 이 된다. 하수슬러지 전처리에 의한 세포파괴 정도는 식 (1)과 같이 세포파괴도로 나타내었다. 식 (1)에서 단백질 농도는 전처리 전후의 하수슬러지 단백질농도이며 최대단백질농도는 아래에 언급된 별도의 장치로 세포를 완전히 파괴했을 때 하수슬러지의 단백질농도이다. 이 때 모든 단백질 농도는 20,000×g에서 20분 동안 원심분리후 상등액을 취하여 분석한 값이다.

$$\text{세포파괴도} = \frac{\text{단백질 농도}}{\text{최대단백질 농도}} \times 100 \text{ ----- (1)}$$

평가의 기준이 되는 최대 단백질 농도는 본 실험에서 2가지 방법에 의해서 측정하였다¹⁵⁾. 첫째는, 세포파괴장치인 Franch press로 파괴하고자 하는 세포를 500 bar의 고압에서 순간적으로 대기압(1 bar)에 노출시켜 세포막 또는 세포벽을 파괴하는 방법과, 둘째는 유리관에 시료의 1%에 해당되는 Alumina Powder를 첨가하여 마찰봉(호모게나이저)으로 20분 동안 2,000 rpm으로 세포를 파괴시키는 물리적인 방법으로 세포를 파괴하는 방법이다. 본 연구에서는 2가지 방법중 높은 단백질 농도(mg/L)를 최대단백질 농도로 규정하였다.

2. 2. 혐기성 생물반응기 작동조건

생물반응기는 용량 1.2 L의 혐기성 회분식반응기로 서울시의 1개 하수처리장 소화조 탈리액 10%와 2차슬러지 90%를 반응기에 유입시켜 35±1℃에서 기질의 추가공급 없이 26일 동안 소화실험을 수행하였다.

실험에는 2차슬러지를 중력농축하여 사용하였으며 농축 전후와 전처리 전후 2차슬러지의 대표적인 TS (Total Solids), VS, COD(Chemical Oxygen Demand), SCOD(Soluble Chemical Oxygen Demand), 단백질 농도, pH, Alkalinity, TOC(Total Organic Carbon)는 Table 1, 2와 같다. VS 제거율(%)은 식

(2)와 같이 유입수와 유출수의 VS차이에 의해서 계산되었다.

$$VS\text{제거율}(\%) = \frac{\text{유입수 VS} - \text{유출수 VS}}{\text{유입수 VS}} \times 100 \quad (2)$$

Table 1. Typical Concentrations of Unthickened and Thickened Waste-Activated Sludge

(unit : mg/L)

Item	Unthickned(mean)	Thickened(mean)
TS	6,010~8,870 (7,810)	15,320~22,740 (17,980)
VS	3,020~5,450 (4,420)	7,550~16,110 (11,990)
COD	5,410~7,110 (6,520)	12,180~18,230 (16,910)

Thickening time : 12.5 hour

VSS after thickening = VS after thickening × 0.7~0.8

Table 2. Typical Concentrations of Before and After Waste-Activated Sludge Pretreatment

(unit : mg/L)

Item	Pretreatment(mean)	
	Before	After
SCOD	100~210 (152)	760~1,250 (990) ^a 910~1,530 (1,250) ^b
STOC	80~130 (90)	560~920 (780) ^a 810~1,220 (1,010) ^b
Protein	63~85 (75)	250~320 (290) ^a 290~380 (320) ^b
Alkalinity	225~238 (229)	270~300 (280) ^a 310~350 (330) ^b
pH	6.3~6.5 (6.4)	6.4~6.7 (6.5) ^a 6.5~7.0 (6.6) ^b

* Pretreated times : once

Pretreated pressure : a : 30bar, b : 50bar

2. 3. 분석

분석대상 시료는 전처리 전후 및 소화 전후의 하수슬러지, 하수처리장 소화조의 탈리액이며 분석항목은 일반적으로 혐기성소화 효율에 영향을 줄 수 있는 하수슬러지 유입온도, pH, alkalinity, 기질성분, particles size, 단백질농도⁷⁾, SCOD, COD, TOC, TS, VS, VSS, 가스량, alkalinity 등^{11,12,13,14)} 을 채택하였다

으며 standard methods⁸⁾에 의해 측정분석하였다. 이외에 전처리 전후해서 나타나는 하수슬러지 입자크기 변화를 관찰하기 위하여 SHIMADZU, SALD-2001으로 입자크기 분포도를 측정하였다.

3. 결과 및 고찰

3. 1. 하수슬러지의 물리화학적 변화

전처리에 의한 2차슬러지의 물리화학적 변화 실험항목은 pH, Alkalinity, 단백질농도, 입자분포도이었다.

(1) pH와 Alkalinity

2차슬러지는 전처리 압력 및 분사횟수에 따라 평균 pH 6.45부터 pH 6.69까지 증가하였다. 전처리 반복 횟수에 따른 pH증가 폭은 1회 전처리시에 특히 높게 나타났으며 전처리 횟수가 증가할수록 증가폭이 낮아졌다. 압력에 따른 변화를 보면, 전처리 압력이 10 bar 압력에서 30 bar 압력까지는 pH 증가 폭이 크게 나타나고 있으나 30 bar 압력 이상에서는 증가폭이 적어지고 있다. 한편 Alkalinity는 전처리 전에 평균 225mg/l에서 전처리후 249mg/l~420mg/l까지 증가하는 것으로 나타났다.

이와 같이 전처리 전후하여 alkalinity 및 pH가 증가하는 것은 슬러지 농축과정에서 발생한 CO₂가 분사과정에서 방출 및 용해되었고 세포파괴에 의한 세포내 단백질의 용출 등 2차슬러지 전체의 물성변화에 의한 것으로 나타났다.

(2) 단백질 농도

Fig. 2는 2차슬러지를 5, 10, 20, 30, 40, 50 bar 압력에서 각각 5회 전처리하였을 때 세포파괴도의 변화를 나타낸 것이다. 전체적으로 보아 세포파괴도는 분사압력이 증가할수록 또한 분사 횟수가 증가할수록 증가하였다. 그러나 전처리 전에 약 14%로 나타난 세포파괴도가 5회 분사시 5 bar 압력에서 약 35%까지 증가하였고, 10 bar 압력에서는 55%까지, 20 bar 압력에서는 75%까지, 30 bar 압력에서는 80%까지, 50 bar 압력에서는 86%까지 증가하여 분사 압력에 대한 세포파괴도의 증가폭은 압력이 높아질

수록 점차 낮아지는 경향을 나타냈다. 또한 같은 압력에서 분사횟수에 대한 세포파괴도의 증가폭도 이와 유사한 경향으로 나타나 최초 1회 분사시 증가폭이 가장 컸고 반복횟수가 증가할수록 증가폭이 점차 낮아졌다.

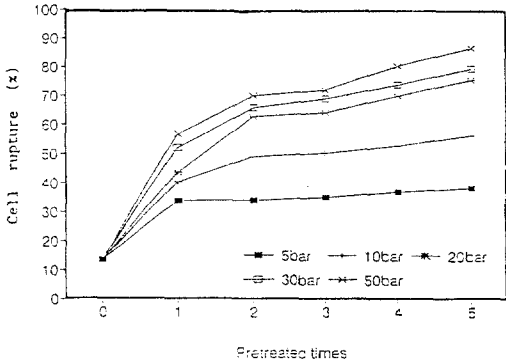


Fig. 2. Cell rupture level(%) at the different pretreatment conditions.

(3) 입도분포

Table 3은 2차슬러지를 10, 30 및 50 bar 압력에서 1회 전처리했을 경우 입자크기의 분포도(%)를 나타낸 것이다. 2차슬러지의 평균 등가입경은 전처리하지 않았을 경우 69 μ m이고, 10, 30, 50 bar 압력에서 1회 전처리할 경우 각각 37, 22, 19 μ m로 나타나 전처리 압력의 증가에 따라 입자의 크기가 보다 미세하게 변화되고 있는 것으로 나타났다. 입경이 큰 입자는 작은 입자에 비해서 비표면적이 작아서 가수분해속도가 낮으며 특히, 고형물의 경우 낮은 가수분해는 혐기성 산발효 단계에서 소화의 제한 요

Table 3. The Particles Size Distribution by Pre treatment Conditions Changes of Waste-activated Sludge

Pretreated conditions	Mean size \pm S.D
(a) unpretreated	69.1 \pm 0.27
(b) once (10bar)	37.0 \pm 0.37
(c) once (30bar)	21.6 \pm 0.40
(d) once (50bar)	18.7 \pm 0.41

인이 되고 있다^{10,17)}. 따라서 본 연구에서는 전처리에 의한 입자크기의 감소가 2차슬러지의 가수분해 등 전체 유기물 제거를 촉진시켜 혐기성소화효율을 증가시키는 데 영향을 미치고 있는 것으로 판단된다.

3. 2. 생물반응기에서 혐기성소화

2차슬러지를 전처리한 경우와 전처리하지 않은 경우에 대한 혐기성 소화에 미치는 영향을 규명하기 위하여 전처리하지 않은 2차슬러지, 30 bar 압력에서 1회 및 50 bar 압력에서 전처리한 2차슬러지, 혼합슬러지로 26일 동안 회분식 혐기성소화실험을 실시하였다. 이러한 실험은 3차례 실시하였으며 그 결과 모두 유사한 현상이 나타났다. 이 때 혐기성소화에 관련된 항목중에서 유기성 고형물 및 부유물의 소화제한 및 촉진에 관련된 유기물 분해속도계수, 소화효율, 가스생성에 따른 VS제거량, SCOD 변화 등을 비교실험하였다^{6,11,12,13,14)}.

(1) SCOD의 변화

Fig. 3은 2차슬러지의 전처리 전후와 혐기성 소화시간 경과에 따라 SCOD 농도 및 변화를 나타낸 것이다. 2차슬러지 전처리전 SCOD는 130mg/L였고 전처리후는 760~1,700mg/L였다. 반면에 총 COD는 전처리와 관계없이 18,100mg/L였다. 이러한 현상은 2차슬러지 전처리에 의해서 호기성 미생물 세포내 SCOD가 세포 외부로 유출된 것으로 가정할 수 있다.

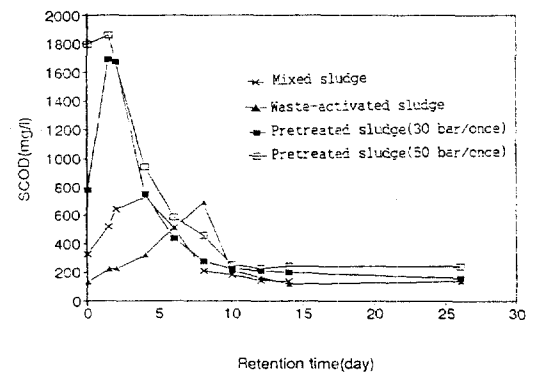


Fig. 3. SCOD changes immediately released upon cell rupture and during batch anaerobic digestion.

혐기성 소화에서 전처리하지 않은 2차슬러지의 경우 소화시간의 경과에 따라 SCOD는 100~690 mg/L이고 소화시간 8일 때 최대값을 나타내고 그 이후부터 감소하는 것으로 나타났다. 전처리한 경우에는 130~2,000mg/L로 나타나서 소화시간 15일 때 최대값을 나타내고 있으며 소화시간 4일 이후부터 급격히 감소하는 것으로 나타났다. 또한, SCOD와 가스발생량의 상관성은 전처리하지 않은 2차슬러지의 경우에 상관성이 없는 것으로 나타난 반면에 전처리를 실시한 경우에는 다소 높은 상관성(결정계수, $R^2=0.83$)을 보이고 있다. 혐기성소화에서 가스발생량은 미생물의 활성의 정도^{6,11,14,18)}를 나타내므로 SCOD 농도도 이와 관련이 높은 것으로 판단된다.

앞에서 언급된 세포파괴법에 의해서 세포를 완전히 파괴(100% 파괴)했을 때 SCOD는 총 COD의 20% (약 3600mg/L)에 해당되는 것으로 나타났으며 이 값은 전처리시 7일간, 전처리하지 않은 2차슬러지의 경우 26일간 소화시 제거되는 VS 농도와 유사한 값으로 나타났다.

(2) 유기물 제거

2차슬러지를 전처리하지 않은 경우와 전처리를 실시한 2차슬러지의 분해속도계수를 실험을 통해서 산출하였다(30 bar 압력에서 1회 전처리한 경우). 유기물 분해속도는 분해 가능한 입자성 물질이 1차 반응식으로 분해된다고 가정하면 아래와 같이 나타낼 수 있다^{6,14)}.

$$r_d = \frac{dF}{dt} = -k F \text{ ----- (3)}$$

여기서 F = 분해가능한 입자성 VSS농도(g/l), k = 분해속도계수이고 식 (3)을 적분하면 다음식 (4)와 같다. $\log F/F_0$ 는 t(체류시간)에 대해서 1차식으로 나타나므로 K는 이식의 직선기울기로부터 구할 수 있다.

$$\log \frac{F}{F_0} = -kt \text{ ----- (4)}$$

생물반응기에서 VSS농도가 분해되는 양상은 Fig. 4, Table 4와 같이 VS제거 양상과 유사하게 나

타하고 있으며 VS제거율이 40~50%에서부터 그 증가폭이 완만하게 증가하므로 이 시점까지를 기준으로 하여 식 (4)에 의거하여 시간에 따른 VSS제거 관계식을 유도하였으며, 이 때 반응식은 1차반응식으로 나타나고 있다. 따라서 식 (4)는 직선의 형태로 나타났으며 직선의 기울기인 k 값은 전처리된 2차슬러지의 경우 0.04 day^{-1} ($F = \text{VSS}, R^2=0.93$)로 나타난 반면에 전처리를 실시하지 않았을 경우 0.01 day^{-1} ($F = \text{VSS}, R^2=0.92$)로 나타나서 전처리를 실시한 경우에 유기물 분해속도 계수가 보다 높게 나타났다. Fig. 3과 관련해서 보면 전처리에 의한 세포파괴가 전체 COD에서 SCOD가 차지하는 비율을 증가시켰으며 SCOD의 증가는 Table 4와 같이 가스발생량 증가 및 미생물의 활성도를 증가시키는 결과를 가져왔다고 볼 수 있다. Table 4는 2차슬러지를 전처리한 경우와 전처리하지 않았을 때 회분식 혐기성소화시간에 따른 SCOD 변화와 가스발생량 및 VS제거의 관계를 나타낸 기초연구로 가스조성에 상관없이 가스발생 총량에 의거하여 분석한 것이다.

Table 4. Measured and Calculated Parameters for Intact and Pretreated WAS Sample during Batch Anaerobic Digestion

() : Pretreated WAS(30bar)

Incubation time (day)	SCOD (mg/L)	Gas (mL)	Cum. gas (mL)
0	131 (780)	0 (0)	0 (0)
1.5	221 (1694)	38 (269)	38 (269)
2	231 (1674)	48 (461)	86 (730)
4	321 (750)	111 (1142)	197 (1872)
6	510 (435)	244 (407)	442 (2278)
8	687 (278)	340 (270)	782 (2548)
10	211 (225)	411 (139)	1193 (2687)
12	165 (211)	534 (97)	1727 (2784)
14	118 (202)	253 (57)	1980 (2841)
26	140 (160)	418 (120)	2399 (2961)

** VS-VSS = 1.102 SCOD ($R^2=0.995$)

유기물은 혐기성소화과정에서 혐기성 미생물에 의해 gas로 전환되는 경우와 미생물 생체량 합성 및 자체 에너지대사 기질로 이용될 수 있다. Table 4에서 가스발생량(mL)을 보면 소화반응 시작부터

소화시간 4일까지 1872/197로 전처리한 경우가 9.5배 높게 나타났으며 전처리한 경우와 전처리하지 않은 경우에 각각 체류시간 4일, 8일에서 가장 높은 가스발생량을 보이고 있다. 그러나 체류시간 26일이 경과한 경우에는 총가스발생량이 2961/2399로 전처리한 경우가 1.2배 높게 나타났다. 따라서 가스발생량 측면에서 보면 2차슬러지를 전처리할 경우 소화초기에 미생물의 활성도가 보다 높게 나타나고 있다고 할 수 있다.

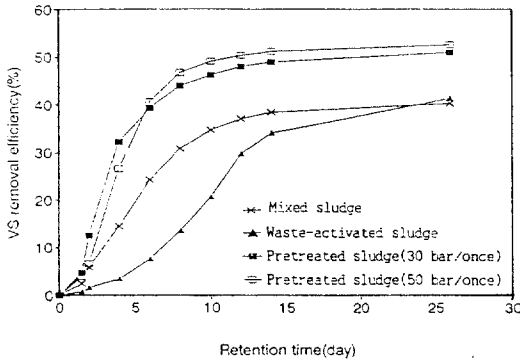


Fig. 4. VS removal efficiency(%) during batch anaerobic digestion of sludges.

VS 제거율은 Fig. 4와 같이 나타났다. VS 제거효율은 전처리한 경우와 전처리하지 않았을 경우에 각각 체류시간 7일, 26일에서 35%로 나타났다. 또한, 전자의 경우 체류시간 2~26일에서 VS 13~50%의 제거율을 보이고 있는 반면에 후자는 같은 조건에서 2~35%의 제거율을 보이고 있다. 이러한 상태에서 계속하여 100일간의 소화시에는 전처리한 경우와 전처리하지 않은 경우에 각각 70%, 61%의 VS 제거효율을 보이고 있다.

4. 결론

미생물세포가 혐기성 소화의 기질로써 소화되기 위해서는 우선적으로 SCOD 형태로 되며 SCOD증가는 호기성 미생물 세포파괴에 의해서 촉진될 수 있다. 따라서 혐기성 소화에서 호기성 세포를 파괴하는 전처리는 혐기성소화의 효율개선을 가져올 수

있다. 이러한 연구를 위해서 본 연구에서는 3단계(2차슬러지 농축, 농축된 슬러지 분사 및 충돌, 혐기성소화 실험)를 거쳐서 다음과 같은 결과를 도출하였다.

- (1) 2차슬러지를 5~50 bar 압력에서 1회에서 5회까지 반복 분사했을 때 세포 파괴도는 전처리전 14%에서 전처리후 86%까지 증가하였다.
- (2) 30 bar 압력에서 1회 분사에 의해서 전처리된 2차슬러지는 소화시간 2~26일에서 13~50%의 VS제거효율을 나타낸 반면에 전처리하지 않았을 경우 2~35%의 VS 제거효율을 나타냈다.
- (3) 전처리와 전처리하지 않은 2차슬러지의 시간에 대한 VSS 분해는 1차반응식에 따르며 이 때 유기물 분해속도계수는 각각 0.04 day⁻¹, 0.01 day⁻¹으로 나타났다.
- (4) 2차슬러지 전처리 결과 슬러지의 COD중 SCOD부분이 상대적으로 증가되었으며 이는 유기물소화 효율 및 가스발생량을 증가시켰다.

참 고 문 헌

1. 한국건설기술연구원, 하수슬러지의 퇴비화에 관한 연구, 1994. 12.
2. 류시영, "국내 하수처리시설 현황과 향후 추진 방향", 월간 첨단환경, 1(3), 58~63, 1993. 8.
3. 환경처, 환경백서, 1994.
4. George V. Crawford. G. V, Tom Alkema, Michael Tue, Michael Thorne, "Anaerobic treatment of thermal conditioning liquors", *J. WPCF*, 54(11), 1458~1464(1982).
5. Roger T. Haug, Thomas J. Lebrun L.D. Tortorici, "Thermal pretreatment of sludges-a field demonstration", *J. WPCF*, 55(1), 23~34 (1983).
6. Tatsuo Shimizu, Kenzo Kudo, and Yoshikazu Nasu, "Anaerobic waste-activated sludge digestion-A bioconversion mechanism and kinetic model", *Biotechnology and Bioengineering*, 41

- (11), 1082~1091(1993).
7. Oliver H. Lowry, et al, "Protein measurement with the folin phenol reagent", *J. Bio. Chem.* **193**, 265~275(1951).
 8. American Public Health Association, Standard methods for the examination of water and wastewater, 18th edition (1992).
 9. 최의소, 폐기물처리의 자원화, 청문각, 1985.
 10. Eastman J. A. Ferguson J. F. "Solubilization of particulate organic carbon during the acid phase of anaerobic digestion", *J. WPCF.* **53**(3), 352~366(1981).
 11. 황경엽외 2, 효율적인 혐기성 발효를 위한 하수슬러지의 전처리기술에 관한 연구, 한국과학기술연구원, BSE 1327-5414-6, 1995.
 12. Peter Fox, Frederick G. "Anaerobic treatment applications and fundamentals: substrate specificity during phase separation", *Water Environment Research.* **66**(5), 716~724(1994).
 13. Peter N. Hobson, Andrew D. Wheatley, Anaerobic digestion modern theory and practice, Elsevier Applied Science(1993).
 14. Spyros G. Pavlostathis and James M. Gossett, "A kinetic model for anaerobic digestion of biological sludge", *Biotechnology and Bioengineering,* **28**, 1519~1530(1986).
 15. Harris and Angal. E. L. K. Protein purification approach, Oxford University Press (1989).
 16. Tchobanoglous. George, Wastewater engineering, treatment, disposal reuse, third edition, Metcalf & Eddy, Inc (1991).
 17. Shin E. B., "Particle size distribution of organics/nutrients in untreated and treated sewage", *Proc.(125~135) of the 1995 Australia-Korea Joint Symposium on Recent Advances in Water Quality management, The university of New South Wales, Sydney, Australia*(1995).
 18. Chung Y. C, and Neethling J. B. "Viability of anaerobic digester sludge", *J. Environmental Engineering,* **116**(2) March/April, 330~341 (1990).