

## 호기성소화에서 가용화가 슬러지 감량화에 미치는 영향

# Sludge Reduction by Mechanical Solubilization in the Aerobic Digestion

윤상현 · 장현섭 · 황선진\*

Sang Hyun Youn · Hyun-sup Jang · Sun-jin Hwang\*

경희대학교 환경응용화학대학 및 환경연구센터

(2006년 9월 6일 논문 접수: 2006년 10월 12일 최종 수정논문 채택)

### Abstract

The purpose of this study was to investigate the effects of mechanical(ball-mill) solubilization of excess sludge especially focused on the TSS(total suspended solid) reduction during the conventional aerobic digestion of sewage sludges including primary and/or excess sludge. HRT was examined at the 10 days and 20 days.

According to the results of this study, TSS removal efficiency of solubilized excess sludge was almost two times higher than that of non-solubilized excess sludge. And as the proportion of the primary sludge increased, TSS removal efficiency became worse because primary sludge rarely contained microbial cells which could be easily solubilized physically.

It was also proved that by the application of proper solubilization techniques to the excess sludge, HRT for the aerobic digestion could be lessened(above 50%) dramatically keeping the same or better digestion performance.

The fact that between primary and excess sludges, only the excess sludge is quite effective in the sludge solubilization and in it's reduction says that excess sludge releasing sources are key-point in the sludge cake reduction field as a source control.

**Key words:** sludge reduction, solubilization, aerobic digestion, ball mill

**주제어:** 슬러지 감량화, 가용화, 호기성 소화, 볼-밀

## 1. 서 론

최근 하수도 보급 및 하수처리시설의 증가로 인해 국내 하수슬러지 발생량은 크게 증가하여 2005년 현

재 7,025톤/일에 달하고 있다(환경부, 2006). 이렇게 발생된 하수슬러지는 매립이나 해양투기에 의존하여 처리하여 왔으나, 2003년 국내에서 직매립이 금지되었고, 2011년부터 런던협약에 의해 해양투기 역시 전면금지 될 것으로 예고되어 슬러지 처리가 시급한 현

\*Corresponding author Tel: +82-31-201-2697, FAX: +82-31-203-4589, E-mail: sjhwang@khu.ac.kr (Hwang, S.J.)

안으로 대두되고 있다.

최근 연구되는 슬러지 처리방법은 신기술의 개발과 기존의 처리방법 개선을 통한 효율증대로 구분할 수 있다. 슬러지 감량화를 위한 신기술의 예로서는 고급산화공정(AOP: Advanced Oxidation Process), 효소처리, 고온고압 처리 등이 있으며, 이러한 방법은 처리시간이 짧고, 처리효율이 높은 장점이 있는 반면 처리비용이 고가이며, 현장적용이 어렵다는 단점이 있다. 기존 시스템을 개선하는 방법은 슬러지를 가용화하여 혐기성 소화 및 호기성 소화의 생분해 효율을 향상시키는 방법이 있는데, 이들은 개선비용이 저렴하며 현장적용이 용이하다는 장점이 있다(Barhenbtuch, 2003; Finn 등, 1992).

한편, 호기성 소화는 혐기성 소화에 비해 처리 소요시간이 짧아 시설비가 적고, 유지관리가 쉬울 뿐 아니라 악취발생이 없다는 장점이 있으나, 포기에 필요한 동력비의 증가와 난분해성 물질을 처리하기 위해 긴 HRT가 소요되는 문제점이 있다. 이러한 문제점을 해결하기 위해 슬러지를 가용화시키는 전처리 방법에 관한 연구가 활발히 진행되고 있다.

전처리 기술로는 초음파 처리(Tiehm 등, 2001), 오존처리, 알칼리 처리(Chiu 등, 1997), 효소 처리(Thomas 등, 1993), 기계적 처리(Müller 등, 1998; Kopp 등, 1997), 알칼리와 초음파의 병합처리(권 등, 2003) 등 다양한 방법이 있으며 각각 장단점을 가지고 있다. 이 중 기계적 처리는 하수슬러지 내 유기성 물질의 대부분을 차지하고 있는 미생물의 세포벽을 물리적인 힘을 가하여 파괴함으로써 미생물 내부의 이분해성 물질을 용출시켜 생분해도를 향상시키는 방법이다. 이러한 방법은 처리 후 바람직하지 않은 부산물이 발생하지 않고, 짧은 시간에도 높은 처리효율을 나타낼 수 있는 장점이 있어 많은 연구에 적용되고 있다(Müller 등, 1998; Kopp 등, 1997).

본 연구에서는 하수슬러지(잉여슬러지) 가용화 방법으로서 기계적 처리를 적용하여, 잉여슬러지의 가용화가 호기성 소화에 의한 하수슬러지의 생분해도

향상, 즉 생물학적 감량화 효율에 미치는 영향의 평가를 통하여 향후 부각될 가능성이 높은 하수슬러지 발생원 저감(source control)의 가능성을 검토해 보고자 하였다.

## 2. 실험방법 및 재료

### 2.1. 대상시료

본 연구에서는 B시 하수처리장의 원심농축 잉여슬러지와 생슬러지를 이용하였으며, 그 특성은 Table 1과 같다. 슬러지의 TS는 잉여슬러지와 생슬러지 모두 3%로 조절하였으며, VS는 TS 대비 각각 77%, 64%로 측정되었다. 잉여슬러지에 포함된 유기물이 생슬러지 보다 많은 점으로 보아 잉여슬러지가 생슬러지 보다 가용화에 유리할 것으로 예상된다. 그러나 용존성 유기물(SCOD)은 생슬러지가 잉여슬러지 보다 높아 생물학적 기질 이용면에서 다소 유리한 성상을 갖고 있는 등 대상시료는 일반적인 하수슬러지의 특성을 나타냄을 알 수 있다.

### 2.2. 기계적 전처리

본 연구에서는 ball mill(Attrition mill, Daehwa Co., Korea)을 이용하여 기계적 전처리를 실시하였으며, 사용된 ball mill의 사양 및 처리조건은 Table 2와 같다. Ball mill에 의한 슬러지 가용화 평가지표는 Müller 등(1998)에 의해 제시된 degree of disintegration 개념을 적용하였으며, 해당하는 식을 식 (1)에 나타내었다. 가용화율은 현실적으로 가용화가 가능한 최대 SCOD 농도(SCOD<sub>Max</sub>)와 기계적 처리에 의하여 증가된 SCOD 농도의 비율로써 평가하였으며, 호기성 소화시에는 잉여슬러지를 가용화도(DD<sub>COD</sub>) 30%로 전처리하여 투입기질로 사용하였다.

$$DD_{COD}(\%) = \frac{SCOD_t - SCOD_0}{SCOD_{Max} - SCOD_0} \times 100 \quad \text{식 (1)}$$

Table 1. Characteristics of excess sludge and raw sludge

Sludge	TS (%)	VS (% of TS)	TSS (g/L)	VSS (g/L)	TCOD (mg/L)	SCOD (mg/L)
Excess sludge	3	77	28.2	22.7	32100	260
Raw sludge	3	64	26.4	15.2	33400	2200

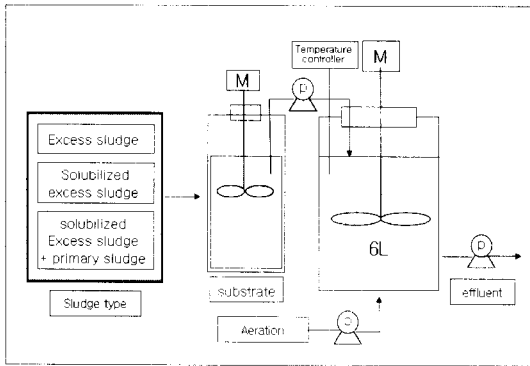


Fig. 1. The schematic diagram of aerobic digester used in the experiment.

여기서, DD = Degree of disintegration

SCOD<sub>0</sub> = 초기 SCOD

SCOD<sub>t</sub> = t 시간 동안 전처리 후 증가된 SCOD

SCOD<sub>Max</sub> = 최대 SCOD

### 2.3. 호기성 소화

본 실험에서는 Fig. 1에 나타난 바와 같이 아크릴을 이용하여 직경 20cm, 높이 35cm의 원통형 호기성 소화조를 제작하여 사용하였고, 유입량과 유출량은 정량펌프를 이용하여 조정하였다. 또한, 온도와 pH는 호기성 소화의 최적조건(30°C, pH 7.5±0.5)으로 유지

Table 2. Operating condition of ball mill used in this study

Parameter	Capacity
Electric power	3kWh
Rotational speed	600rpm
Working volume	1000ml
Ball size	1mm
Ball percentage	70% (v/v)

Table 3. Operating condition of aerobic digestion reactor

Condition	AD		PAD		PADM
DD <sub>COD</sub> (%)	0				30
sludge variety	excess sludge		solubilized excess sludge		solubilized excess sludge + primary sludge as a ratio of 1:1 (v/v)
HRT (day)	10	20	10	20	10
Working volume			6 L		
pH			7.5 ± 0.5		
Temperature			30 ± 0.5°C		

AD: Aerobic digestion. PAD: Pretreatment aerobic digestion. PADM: Pretreatment aerobic digestion mixing sludge.

하였으며 (Bernard and Gray, 1999), 동일한 조건인 네 개의 반응조를 제작하여 호기성 소화운전을 실시하였다.

연속식 호기성 소화시 유입 슬러지의 고형물 농도 (TS)는 기계적 처리와 호기성 소화에 가장 적합한 농도로 기초실험에서 정한 3%로 운전하였으며, 가용화 슬러지를 기질로 사용하는 호기성 소화의 경우 저류조 유입 전 기계적 전처리를 통한 가용화도를 30%로 조절하여 투입하였다. 본 실험에 사용한 유입 슬러지의 성상 및 반응조 기본사양은 Table 3에 나타나 있다.

가용화와 기질의 변화, HRT 등 각각의 운전조건 변화에 따른 소화특성을 비교하기 위해 가용화시키지 않은 잉여슬러지를 사용한 호기성 반응조(AD)를 대조군으로 운전하였으며, 가용화한 잉여슬러지를 사용한 호기성 반응조(PAD), 가용화 잉여슬러지에 생슬러지를 혼합한 호기성 반응조(PADM)로 구분하여 평가를 실시하였다. 또한, Table 4에 나타난 바와 같이 호기성 소화의 HRT는 10일과 20일의 경우로 나누어 운전하였다.

### 2.4. 분석방법

슬러지의 가용화도를 평가하기 위한 지표인 COD 농도는 spectro-photometer(HS-3100, Humas, Korea)을 사용하여 분석하였으며, TS, VS, TSS, VSS는 standard method에 따라 분석하였다.

호기성 소화효율은 Ganczarczyk(1984)가 제시한 식 (2)와 같은 1차 생화학 반응식을 이용하여 각 조건별 반응 상수값(k<sub>d</sub>)을 구하여 이들을 서로 비교 및 평가하는 방식으로 진행되었다.

**Table 4.** Characteristics of seed and feed sludge

	sludge variety	TS (mg/L)	VS (mg/L)	TSS (mg/L)	VSS (mg/L)	TCOD (mg/L)	SCOD (mg/L)	pH
seeding sludge	excess sludge	30,000	22,000	22,000	18,000	28,000	400	6.3
feeding sludge	solubilization	30,000	22,000	20,000	17,000	28,000	9,000	6.3
	excess sludge							
	mixing sludge (excess+primary sludge)	30,000	21,000	20,000	16,000	28,000	4,000	6.5

$$\frac{dM}{dt} = -k_d M \quad \text{식 (2)}$$

$\frac{dM}{dt}$  = 생분해 가능한 고형물(M)의 단위시간당 변화율  $MT^{-1}$

$k_d$  = 반응 상수,  $T^{-1}$

M = 시간 t에서 호기성 소화조에 남아 있는 생분해 가능한 고형물의 질량, M

### 3. 결과 및 고찰

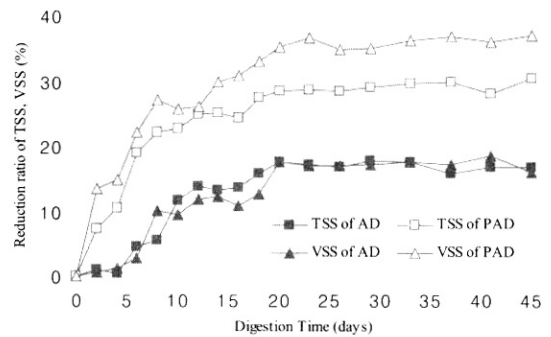
#### 3.1. 가용화가 호기성 소화에 미치는 영향

슬러지 가용화가 호기성 소화의 생분해도에 미치는 영향을 평가하기 위하여 가용화 처리한 잉여슬러지와 가용화 처리를 하지 않은 잉여슬러지를 대상으로 연속식 호기성 소화를 실시하였으며, 반응시간에 따른 TSS, VSS 제거효율의 변화를 Fig. 2에 나타내었다.

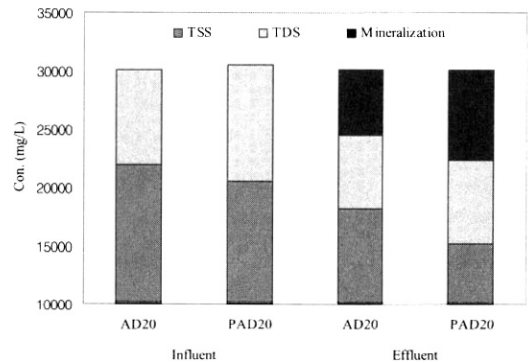
반응조는 반응개시 후 20일부터 모두 안정화 단계에 접어들었으며, 가용화 처리된 PAD와 가용화 처리를 하지 않은 AD의 TSS 제거율은 각각 30%, 18%를 나타내 가용화 처리를 한 PAD가 약 2배 높은 TSS 처리효율을 보였다. 또한 VSS도 35%, 25% 내외의 제거율을 보여 가용화에 의해 PAD에서 약 1.5배 높은 VSS 제거율을 나타내었다.

이러한 차이는 기계적 처리로 인해 잉여슬러지내에 다량 존재하는 미생물의 세포내 가용성 물질(cell debris)이 용출되어 미생물에 의해 빠르게 소비되는 기작(Finn 등, 1992)과 기계적 처리에 의해 슬러지 입자의 입경이 작아져 미생물과 기질의 생물학적 접촉효율이 향상되어 생물학적 기질소비 속도가 증가하는 기작에 의한 것으로 사료된다(장, 2005).

Fig. 3에는 호기성 소화과정에서 부유성 고형물과 용존성 고형물의 mass balance를 나타내었다. PAD 반



**Fig. 2.** Reduction ratio of TSS, VSS at the aerobic digestion(AD) and pretreated aerobic digestion(PAD).



**Fig. 3.** Mass balances for aerobic digestion AD20 and PAD20 on TSS, TDS and mineralization.

응조는 기계적 처리에 의해 TDS가 약 20% 증가하였으며, 호기성소화 운전 중 TSS 및 TDS 소비가 AD보다 약 1.5배 빠르게 진행된 것을 알 수 있다.

반응속도 상수인  $k_d$  값을 비교한 결과, PAD에서의  $k_d$ 는 TSS( $k_{d(TSS)}$ ) 및 VSS( $k_{d(VSS)}$ ) 대하여 각각  $0.149 \text{ day}^{-1}$ 과  $0.194 \text{ day}^{-1}$ 로 AD의 값들( $k_{d(TSS)} = 0.073 \text{ day}^{-1}$ ,  $k_{d(VSS)} = 0.076 \text{ day}^{-1}$ ) 보다 TSS( $k_{d(TSS)}$ ) 2배, VSS( $k_{d(VSS)}$ )는 약 3배 높은  $k_d$  값을 갖는 것으로 나타났다.

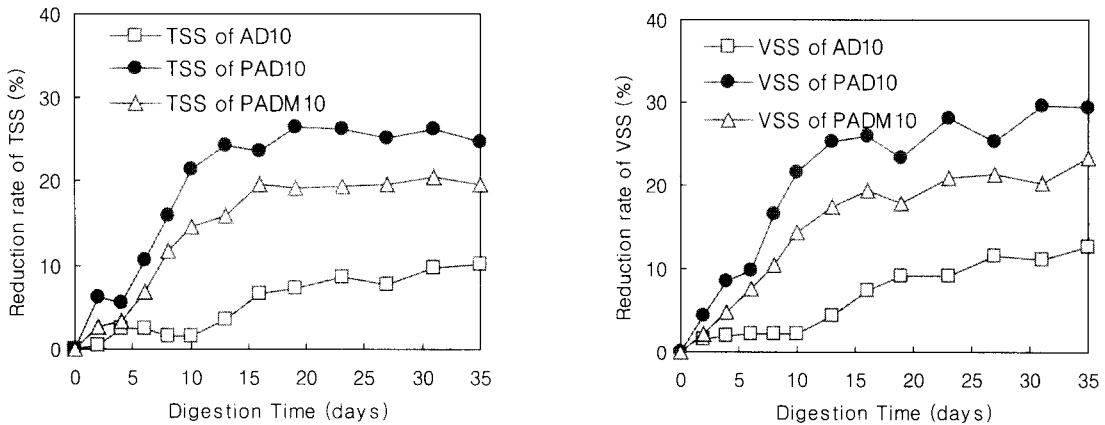


Fig. 4. Reduction ratio of TSS, VSS according to the sludge type and characteristics.

이러한 결과는 기계적 처리 의한 미생물의 활성 및 기질 분해율이 증가함을 알 수 있으며 이로 인해 가용화가 적용된 호기성 소화에서 고형물 처리효율이 증가한 것으로 판단된다.

### 3.2. 슬러지의 종류 및 성상의 영향

유입 슬러지 종류 및 성상변화에 따른 연속식 호기성 소화 결과를 Fig. 4에 나타내었다. 그 결과 TSS 및 VSS 제거효율은 가용화 처리를 한 PAD가 각각 27%, 30%로 가장 높았으며, 생슬러지를 혼합한 PADM의 처리효율은 PAD의 약 75% 수준으로 낮아짐을 알 수 있다. 이러한 결과가 얻어지는 이유는 Table 1의 SCOD 결과(잉여슬러지 260mg/L, 생슬러지 2,200mg/L)에서 알 수 있는 바와 같이 1차 침전지에서 발생하는 생슬러지에는 잉여슬러지에 비해 용존성 물질(SCOD)이 많이 포함되어 있으나, 생분해도가 낮은 고형물이 다량 포함되어 있어, 잉여슬러지에 비해 휘발성 고형물(VS)의 비율이 낮은 특징이 있다. 이러한 특성으로 인해 호기성 소화조 내 미생물에 의한 고형물 분해가 어려워 TSS 및 VSS의 제거효율이 저하된 것으로 사료된다. 이는 Koers와 Mavinic (1977)의 연구에서 호기성 소화시 생슬러지 혼합은 난분해성 물질의 증가와 분해대상 유기물의 부족으로 인해 HRT 증가 및 휘발성 고형물의 제거효율 악화를 유발한다는 결과와 맥을 같이 한다고 할 수 있다.

그러나 생슬러지를 혼합한 PADM의 처리효율이 가용화시키지 않은 잉여슬러지를 유입수로 사용한 AD보다 약 2배 높은 TSS 및 VSS 제거효율을 나타내

었다. 이는 HRT가 10일로 짧은 반응시간 동안 가용화 처리를 하지 않은 AD에서는 잉여슬러지 내 다량의 미생물 세포벽에 의해 고형물 분해가 힘들었던 반면, 가용화 잉여슬러지와 생슬러지를 혼합한 PADM은 생슬러지 여액내에 존재하는 이분해성 물질과 잉여슬러지 가용화에 의해 세포벽 파괴로 용출된 이분해성 물질이 더해져 반응조 내 농도가 크게 증가되었고 그로 인해 짧은 HRT에서도 미생물 기질소비 속도가 증가하여 높은 처리효율이 나타난 것으로 판단된다.

이러한 결과는 Table 5에 나타낸 각 호기성 반응조의  $k_d$  값의 비교에서도 알 수 있는데, TSS( $k_{d(TSS)}$ ) 및 VSS( $k_{d(VSS)}$ )  $k_d$  값은  $0.164\text{day}^{-1}$ ,  $0.176\text{day}^{-1}$ 로 미생물 활성이 가장 높았으며, PADM의 TSS( $k_{d(TSS)}$ ) 및 VSS( $k_{d(VSS)}$ )  $k_d$  값은 각각  $0.114\text{day}^{-1}$ ,  $0.124\text{day}^{-1}$ 로 PAD의  $k_d$  값과 유사하게 측정되어 PADM 역시 높은 미생물 활성이 유지된 것을 알 수 있었다. 그러나 가용화처리를 하지 않은 AD는 TSS( $k_{d(TSS)}$ ) 및 VSS( $k_{d(VSS)}$ )  $k_d$  값이  $0.026\text{day}^{-1}$ ,  $0.025\text{day}^{-1}$ 로 매우 낮아 미생물의 활성이 저하가 일어났다. 이를 통해 가용화 잉여슬러지에 생슬러지 혼합하여도 급격한 효율 저하를 유발하지 않으며 이분해성 물질의 증가로 가

Table 5. Reaction coefficient( $k_d$ ) of reactor by sludge type and characteristics

	AD10	PAD10	PADM10
TSS $k_d(\text{day}^{-1})$	0.026	0.164	0.114
VSS $k_d(\text{day}^{-1})$	0.025	0.176	0.124

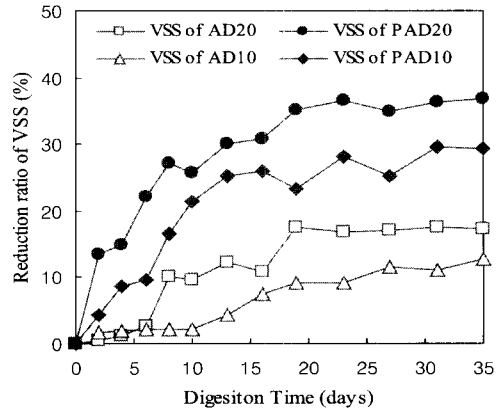
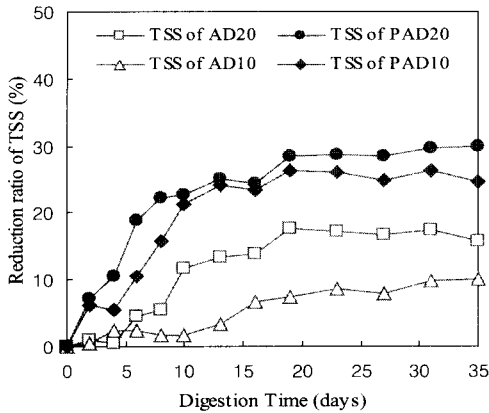


Fig. 5. Effects of HRT on the reduction ratio of TSS and VSS.

용화 처리를 하지 않은 호기성소화 보다 높은 처리효율을 나타내는 것을 알 수 있었다.

이러한 결과는 향후 현장 적용시 잉여슬러지와 생슬러지를 혼합한 기질을 처리함에 있어 가용화가 호기성 소화효율의 향상 및 안정적인 소화효율을 유지하는 해결책이 될 수 있음을 시사한다.

### 3.3. 가용화 및 HRT의 영향

Fig. 5는 HRT 변화에 따른 연속식 호기성 소화의 TSS 및 VSS 제거효율을 나타내고 있다.

가용화 처리를 실시한 호기성 소화조(PAD<sub>10</sub>, PAD<sub>20</sub>)가 가용화 처리를 하지 않은 소화조(AD<sub>10</sub>, AD<sub>20</sub>)보다 2~3배 높은 TSS 및 VSS 제거효율을 보였으며, 가용화를 실시하지 않은 AD 반응조는 HRT가 반으로 줄어들때 따라 처리효율도 약 50%로 악화되었다. 그러나 가용화 처리를 한 PAD 반응조의 경우는 HRT가 반으로 줄었음에도 불구하고 TSS, VSS 제거효율이 각각 24% 및 28%로 HRT 20일의 약 80% 수준을 나타내어, HRT에 변화에 대해 덜 민감한 것으로 나타났다.

Table 6는 모든 호기성 소화조가 정상상태에 도달한 이후 같은 시점에서 얻어진 TSS( $k_{d(TSS)}$ ) 및 VSS( $k_{d(VSS)}$ )에 대한 반응계수( $k_d$ ) 값을 계산한 결과이다. 표로부터 알 수 있듯이, 예상한 대로 가용화 전처리를 하고 HRT 20일로 운전한 PAD<sub>20</sub>의 TSS( $k_{d(TSS)}$ ) 및 VSS( $k_{d(VSS)}$ )가 각각  $0.150\text{day}^{-1}$  및  $0.195\text{day}^{-1}$ 로 가장 높은  $k_d$  값을 나타내고 있다. 또한, 가용화 전처리를 하지 않고 HRT 20일로 운전한 AD<sub>20</sub>의  $k_d$  값 보다

Table 6. Reaction coefficient( $k_d$ ) of each reactor

	AD10	AD20	PAD10	PAD20
TSS $k_d(\text{day}^{-1})$	0.026	0.074	0.164	0.150
VSS $k_d(\text{day}^{-1})$	0.025	0.076	0.176	0.195

가용화 전처리를 하고 HRT 10일로 운전한 PAD<sub>10</sub>의  $k_d$  값이 2배 이상 높은 값을 나타냄으로서, 가용화 전처리를 실시하면 HRT를 반으로 줄더라도 미생물에 의한 고형물 제거가 더 빠르게 일어남을 알 수 있다. 이는 최(1981)가 연구한 호기성 소화의 평균 TSS( $k_{d(TSS)}$ )  $k_d$  값인  $0.070\text{day}^{-1}$  (19~24°C) 보다 약 3배 높은 값으로, 기존 호기성소화 보다 미생물 활성도 및 기질 분해도가 크게 증가되었음을 알 수 있다.

기존 가용화처리는 생물학적 처리 중 혐기성 소화시 가스발생 및 효율향상의 목적으로 주로 사용되어 왔으며(Müller, 2001; Chiu, 1997 등) 호기성소화에 적용된 사례는 거의 전무하였다. 그러나 본 연구를 통해 가용화처리가 호기성소화에 적용된 경우에도 처리효율의 급격한 증가와 HRT 변화에 따른 처리효율을 안정적으로 유지시키는 것을 알 수 있었다. 이러한 결과는 기존 호기성소화의 문제점으로 지적된 운전조건 변화에 따른 효율저하를 줄여 기존 호기성소화 보다 안정적이고 높은 처리효율의 호기성 소화가능하며, 또한 기존보다 절반 수준의 HRT에서도 더 높은 처리효율이 가능할 것으로 판단된다.

따라서 가용화 전처리를 실시한 호기성 소화는 현장에 적용될 경우 호기성 소화조 용량을 대폭 감소시키고, 짧은 HRT에서도 처리효율을 증대시켜 소화설

비의 compact화가 가능할 것으로 예상된다. 또한 처리효율 증대로 슬러지 인체 발생량을 기존 대비 약 60% 수준으로 대폭 저감시켜 슬러지 처리비용 대폭 절감이 가능할 것으로 예상된다.

#### 4. 결 론

하수슬러지 감량화를 위한 호기성 소화처리에 가용화 전처리가 미치는 영향을 평가한 결과, 다음과 같은 결론을 도출하였다.

1) 본 연구에서는 TS 3% 슬러지를 가용화 처리한 잉여 슬러지와 가용화하지 않은 잉여 슬러지를 기질로 주입하여 연속식 호기성 소화를 진행한 결과, 동일 HRT에서 가용화에 의해 고형물 제거효율이 약 2배 증가하였으며, 이는 기계적 처리에 의해 세포벽이 파괴되어 cell debris 용출과 floc의 size가 감소에 따른 미생물의 생분해능이 향상되었기 때문으로 판단된다.

2) 슬러지 가용화 방법은 호기성 소화의 HRT를 20일에서 10일로 감소시켜도 슬러지 감량화 효율을 유지하거나 가용화 하지 않은 호기성 소화 보다 더 높은 제거효율을 나타내 HRT변화에 덜 민감한 것을 알 수 있었으며, 반응상수  $k_d$  값을 비교한 결과 가용화 슬러지를 사용한 호기성 소화에서 약 2~3배 높은 값을 나타내, 미생물에 의한 고형물 분해가 활발히 일어남을 확인할 수 있었다.

3) 슬러지 혼합에 따른 영향은 생슬러지와 가용화 잉여슬러지를 혼합한 호기성 소화가 가용화 잉여슬러지만을 기질로 사용한 호기성소화 효율 보다 다소 낮게 나타나 생슬러지 혼합이 호기성 효율을 저하시키는 것으로 나타났다. 그러나 가용화처리를 하지 않은 호기성소화와 비교한 결과, 약 2배 높은 고형물 제거효율을 나타내어 가용화가 생슬러지 혼합에 따른 급격한 처리효율 저하를 방지하고 안정적인 호기성 소화가 가능함을 알 수 있었다.

4) 가용화 방법을 호기성소화에 적용할 경우 미생물의 활성 및 분해효율을 증가시켜 운전조건 변화에 따른 효율저하를 줄일 수 있으며 기존 호기성소화 보다 안정적이고 더 높은 처리효율의 호기성 소화가 가능하여 소화조 용량을 대폭 감소시킬 것으로 판단된다. 이러한 결과는 가용화 호기성소화의 실제 현장적

용시 소화설비의 compact화 및 슬러지 발생량 저감에 따른 처리비용 절감에 크게 기여할 것으로 예상된다.

#### 감사의 글

본 연구는 2005년 경기지역환경기술개발센터의 지원에 의한 것이며, 이에 감사드립니다.

#### 참고문헌

1. 권재현, 김봉준, 김민규, 염익태, 김형수 (2003) 전처리 방법에 따른 하수슬러지 가용화 비교연구, *상하수도학회지*, 17(4), pp.567-573.
2. 장광연 (2005) 기계적 전처리를 적용한 하수슬러지의 혐기성 소화효율 향상 및 감량화에 대한 연구, *경희대학교 석사학위논문*
3. 정연규, 안규홍, 박준홍 (1994) 초기고형물농도가 호기성소화의 Kinetics에 미치는 영향에 관한 연구, *상하수도학회지*, 2(1), pp.25-23.
4. 초광명 (1981) 여과막활성 슬러지 공법에 의한 슬러지의 호기성소화에 관한 연구, *대한환경공학회지*, 3(1), pp.48-54.
5. 최홍복, 황경엽, 신용배 (1996) 하수슬러지의 혐기성 소화개선을 위한 기계적 전처리, *대한환경공학회지*, 18(9), pp.1095-1102.
6. 환경부 (2006) *2005 하수도통계*.
7. C. Bougrier, C. Albasi, J.P.Delgenes, H.Carrere (2006) Effect of ultrasonic, thermal and ozone pre-treatments on waste activated sludge solubilisation and anaerobic biodegradability, *Chemical Engineering and processing*, 45, pp.711-718.
8. Chiu, TC., Cahng, CN., Lim, JG., and Huang, SJ. (1997) Alkaline and ultrasonic pretreatment of sludge before anaerobic digestion, *Wat. Sci. Tech.*, 38, pp 425-433.
9. D.A Kores, and D.s. Mavinic, (1977) Aerobic digestion of waste activated sludge at low temperature, *JWPCF*, 49, pp.460-468.
10. H. Yasui,, K. Nakamura, S. Shakuma, M. Iwasaki, and Y. Sakai (1997) A full-scale operation of a novel activated sludge process without excess sludge production, *Wat. Sci. Technol.*, 36(11) pp.163-170.
11. In Wook Nah, Yun Whan Kang, Kyung-Yub Hwang and Woon-Ki Song (2000) Mechanical pretreatment of waste activated sludge for anaerobic digestion process, *Wat. Res.* 34(8), pp.2362-2368.
12. J. Kopp, J.A. Mller, N. Dichtl and J. Schwedes (1997) Anaerobic digestion and dewatering characteristics of

- mechanically disintegrated excess sludge, *Wat. Sci. Tech.* **36**(11), pp.129-136.
13. J.A. Miller (2001) Prospects and problems of sludge pre-treatment processes, *Wat. Sci. Tech.* **44**(10), pp.121-128.
  14. J.A. Miller, G. Lehne, J. Schwedes, S. Battenberg, R. Naveke, J. Kopp, N. Dichtl, A. Scheminski, R. Krull and D.C. Hempel (1998) Disintegration of sewage sludges and influence on anaerobic digestion, *Wat. Sci. Tech.* **38**(8-9), pp.125-433.
  15. J. Ganczarczyk, By Jerzy, (1984) Activated sludge process: Theory and practice Water Research, Volume 18, Issue 11, pp.1468.
  16. M. Barhenbtuch and O. Kopplow (2003) Enzymatic, mechanical and thermal pre-treatment of surplus sludge, *Advances in Environmental Research.* **7**, pp.715-720.
  17. Ravisankar Arunachalam, Hemant K. Shah, Lu-Kwang Ju (2005) Monitoring aerobic sludge digestion by online scanning fluorometry, *Water Research* **39**, pp. 1205-1214.
  18. R.K. Finn, P. Prave, M. Schlingmann, W. Crueger, K. Esser, R. Thauer and T. Wagner (1992) *Biotechnology focus 3: fundamentals, applications, information.* pp.195-196.
  19. Sakai, Y., Aoyagi, T., Shiota, N., Akashi, A., and Hasegawa, S. (2000) Complete decomposition of biological waste sludge by thermophilic aerobic bacteria, *Wat. Sci. Technol.*, **42**(9) pp.81-88.
  20. S. Bernard, N.F.Gray (1999) Aerobic digestion of pharmaceutical and domestic wastewater sludges at ambient temperature, *Wat. Res.* **34**(3), pp.725-734.
  21. T. John, Novak, E. Mary, Sadler, sudhir N. Murthy (2003) Mechanisms of floc destruction during anaerobic and aerobic digestion and the effect on conditioning and dewatering of biosolids, *water research* **37**, pp.3136-3144.