

# 수리동력학적 캐비테이션을 이용한 하수 슬러지의 전처리-II: 소화효율 향상

## Pre-Treatment of Sewage Sludge by Hydrodynamic Cavitation-II: Enhancement of Digestion Efficiency

맹장우 · 이은영 · 배재호<sup>†</sup>  
Jang-Woo Maeng · Eun-Young Lee · Jae-Ho Bae<sup>†</sup>

인하대학교 사회기반시스템공학부  
Civil/Environmental/Geoinformatic Engineering, Inha University

(2009년 12월 16일 접수, 2010년 2월 25일 채택)

**Abstract** : Waste activated sludge from sewage treatment plants mainly consisted of flocs of bacterial cell, and thus hard to be stabilized anaerobically due to rigid cell walls. One of the pretreatment methods to overcome this barrier is the venturi cavitation system (VCS) adopting hydrodynamic cavitation. This research was conducted to investigate the effects of the pretreatment of waste activated sludge by VCS on the anaerobic digestibility. Depending on the pretreatment period with the VCS, methane production, COD removal and VS removal efficiency increased 41%~45%, 36.5%~43.1% and 18.4~24.1%, respectively, compared to the control case. The increase in methane production from digester was 3.3~4.2 times higher than the theoretical methane potential of the increased SCOD after the VCS pre-treatment. This suggests that the VCS pre-treatment not only increases SCOD but also improves the digestibility of solid fractions. The energy mass balance indicated that the energy consumed for sludge pre-treatment could be recovered by the increased methane production after pre-treatment, suggesting the high potential for field application.

**Key words** : Sludge pre-treatment, Cavitation, Hydrodynamic, Methane, Volatile solid

**요약문** : 하수 처리장에서 발생하는 폐활성슬러지는 대부분 미생물로 구성되어 있으며, 단단한 세포벽 때문에 혐기성 소화에 의한 안정화가 힘들다. 이를 극복할 수 있는 다양한 전처리 방법 가운데 하나가 벤츄리를 이용한 수리동력학적 캐비테이션 방법 (venturi cavitation system, VCS)이다. 본 연구에서는 VCS를 사용한 전처리가 폐활성슬러지의 소화효율에 미치는 영향을 조사하였다. VCS로 전처리한 슬러지는 대조군에 비하여 전처리 기간에 따라 메탄 발생량, COD 제거효율, VS 제거효율이 각각 41~45%, 36.5~43.1%, 18.4~24.1%가 증가하였다. 또한 전처리에 의하여 SCOD를 증가시켜 투입하였을 때, 증가된 SCOD의 이론적 메탄가스 발생량보다 약 3.3~4.2배 많은 메탄이 발생한 것으로 나타났다. 이는 VCS에 의한 전처리에 서 슬러지의 가용화 현상에 의하여 소화효율이 향상되었을 뿐 아니라 가용화가 되지 않은 입자상 부분도 소화에 유리한 상태로 개량되었음을 의미한다. 전처리를 위해 투입한 에너지와 메탄가스의 발생 증가분에 대한 에너지 수지를 계산하였을 때 대부분의 조건에서 에너지 회수가 가능하여, VCS 장치의 현장 적용성이 높을 것으로 판단된다.

**주제어** : 슬러지 전처리, 공동화, 수리동력학, 메탄, 휘발성 고형물

## 1. 서론

하수슬러지의 혐기성 소화는 감량화로 인한 슬러지 처리 비용 절감, 악취유발물질 감소, 병원성 세균 사멸, 부산물로 에너지원인 메탄 생성 등의 장점으로 인하여 널리 적용되고 있다. 하수처리장에서 혐기성 소화조로 유입되는 슬러지 중 1차 슬러지는 비교적 생분해도가 높지만 2차 슬러지는 단단한 세포벽으로 쌓여있어 생분해도가 낮다. Chung<sup>1)</sup>은 1차 슬러지로부터 메탄 발생량은 0.52 m<sup>3</sup> CH<sub>4</sub>/kg VS이고 휘발성 고형물(volatile solid, VS) 제거율이 63.4%인데

반하여, 2차 슬러지의 경우 그 값이 각각 0.23 m<sup>3</sup> CH<sub>4</sub>/kg VS, 31.9%이었다고 보고하였고, Kim<sup>2)</sup>은 잉여슬러지의 소화 시 메탄 발생률은 0.27 m<sup>3</sup> CH<sub>4</sub>/kg VS, VS 제거율은 36%로 1차 슬러지에 비하여 매우 낮다고 보고하였다. 2차 슬러지의 생분해도를 향상시키기 위하여 기계적,<sup>3,4)</sup> 열적,<sup>5)</sup> 화학적<sup>6,7)</sup> 방법 등 다양한 방법이 연구되어 왔으며 이중 열처리 방법과 초음파를 이용한 방법이 상용화되어 현장에 적용되고 있다.

열처리 방법인 Cambi<sup>TM</sup> process의 경우 biogas의 증가율이 40~50%, VS 감량율이 40% 정도로 보고되어 있으며,<sup>5)</sup>

<sup>†</sup>Corresponding author : E-mail : jhb@inha.ac.kr T : 032-860-7507 F : 032-865-1425

초음파를 이용한 SONIX™의 경우 biogas의 증가율과 VS 감량율이 40~50% 정도로 보고되어 있다.<sup>4,8)</sup> 한편 본 연구자들이 제시한<sup>9)</sup> 벤츄리 캐비테이션 시스템(venturi cavitation system, VCS)은 간단한 장치구성, 저렴한 운전비용 등이 장점으로 제시되었으나, 아직 전처리로 인한 biogas 증가 및 VS 감량율에 대한 결과는 보고되어 있지 않은 상태이다.

본 연구에서는 VCS를 이용한 2차 슬러지의 전처리가 슬러지의 혐기성 소화에 미치는 영향을 파악하기 위하여 수행하였다. 이를 위하여 전처리한 슬러지와 대조 슬러지에 대하여 소화조 체류시간을 변화시키며 메탄가스 발생량, 총 화학적 산소요구량(total chemical oxygen demand, TCOD) 제거율, VS 제거율 변화를 검토하여 하수슬러지의 전처리 방법으로서 VCS 적용 가능성을 평가하였다.

## 2. 실험재료 및 방법

### 2.1. 대상슬러지

슬러지 전처리는 경기도 부천시에 위치한 북부 수자원 생태공원에서 발생한 농축 잉여슬러지를 이용하였다. 슬러지는 원심 농축기에 의하여 농축되어 하수처리장 내에 운전 중인 혐기성 소화조에 투입되는 것으로 고형물 함량은 2.5~3.5%이다. 슬러지 전처리 장치인 VCS의 특징 및 운영 방법은 맹과 배<sup>10)</sup>에 의해 자세히 기술되었으며, 이를 간단히 요약하면 다음과 같다. VCS는 벤츄리부, 흡입펌프 및 슬러지 저장부로 이루어져 있으며 3개의 벤츄리가 직렬로 연결된 unit를 병렬로 두 개를 연결하였다. 슬러지는 10, 20, 30회 전처리를 하였는데 이때 전처리 횟수는 총 운전시간을 전처리 장치에 포함된 650 L 용적의 저류조의 모든 슬러지가 수리동력학적 캐비테이션의 발생부인 벤츄리부를 1회 통과하는데 걸린 시간으로 나누어 계산하였다.

실험에 이용된 슬러지의 성상은 Table 1에 나타난 바와 같다. 본 연구에서는 대조군인 전처리를 하지 않은 슬러지 및 전처리 횟수를 달리한 슬러지를 투입하여 소화조를 운전

하였다. 평균 TCOD, 총 고형물(total solid, TS), VS는 전처리 전후 동일한 값을 나타내었으며, 전처리에 의하여 용존 화학적 산소요구량(soluble chemical oxygen demand, SCOD)은 증가하였다.

### 2.2. 혐기성 소화조

본 연구에 사용된 혐기성 소화조는 원통형의 아크릴 반응조로서 전체 반응조 용적은 7 L, 유효 용적은 6 L이며, 유입과 유출이 1일 1회 이루어지는 반연속식 완전혼합형 반응조이다. 총 4개의 소화조 중 3개의 소화조의 유입기질로는 VCS로 10, 20, 30회 전처리한 슬러지를 사용하였으며 이를 각각 R10, R20, R30로 명명하였다. 나머지 하나의 대조군 소화조(R0)에는 전처리를 거치지 않은 슬러지를 유입기질로 사용하였다. 고형물 체류시간(solids retention time, SRT)은 15일에서 시작하여 12일, 10일로 감소시켰으며, 각 SRT에서 60일 이상 운전하였다. 발생 가스는 pH 1 이하로 조정된 NaCl 용액이 담긴 가스 포집조에서 포집하였다. 또한 중온 조건을 유지하기 위하여 모든 반응조는 35℃ 항온실에서 운전하였다.

### 2.3. 분석방법

슬러지의 가용화 효율 및 전처리된 슬러지에 대한 소화 효율을 파악하기 위하여 TCOD, SCOD, TS, 및 VS 등을 Standard Methods<sup>11)</sup>에 따라 분석하였다. 또한 소화 가스의 메탄 함량분석은 Alltech-CTR I column(6ft×1/4" outer, 6ft×1/8" inner)이 장착된 GC-TCD (HP 6890 series)를 이용하였으며, 슬러지의 탈수성을 나타내는 CST (capillary suction time)는 capillary suction timer (Trioton Electronics Ltd, type 304M)를 이용하여 분석하였다.

## 3. 실험 결과 및 고찰

### 3.1. 전처리에 의한 소화효율 변화

슬러지의 전처리 횟수와 소화조의 SRT 변화에 따른 메탄 가스 발생량과 함량을 Fig. 1에 나타내었다. 메탄 발생량은 SRT 15일의 경우 전처리 횟수를 10, 20, 30으로 증가시킴에 따라 전처리를 하지 않은 경우에 비하여 각각 13.4%, 29.1%, 41.0% 증가하였다(Fig. 1a). 이는 전처리에 의하여 슬러지가 가용화되고, 그 결과 SCOD가 증가하며 슬러지의 소화성이 개량되었기 때문이다. 각 SRT에서의 대조군과 비

Table 1. Characteristics of concentrated waste activated sludge (unit : mg/L)

	Number of treatment			
	0	10	20	30
TCOD	30,455±2,827	30,749±3,241	30,839±2,864	31,156±2,942
SCOD	200±115	444±165	616±208	740±231
TS	27,954±3,271	28,419±3,225	28,161±3,386	28,337±3,460
VS	20,470±1,908	20,419±2,057	20,704±1,977	20,723±2,332

교한 30회 전처리 시 메탄가스 증가율은 SRT 15일에서 41.0%, SRT 12일에서 44.4%, SRT 10일에서 44.6%로 SRT가 짧아질수록 소화효율은 증가하였는데, 이는 짧은 SRT에서는 전처리를 하지 않은 슬러지의 소화 효율이 감소하였기 때문이다. SRT가 감소함에 따라 반응조 용적 당 메탄의 발생량이 증가한 것은 슬러지의 유입량 증가에 따라 소화조의 유기물 부하(organic loading rate, OLR)가 증가한 결과이다.

소화조의 메탄함량은 Fig. 1b에 나타난 바와 같이 전처리 횟수나 SRT의 변화에 큰 영향을 받지 않았다.

슬러지의 TCOD 제거효율은 메탄가스 발생량과 직접적인 상관관계가 있었다. 전처리 횟수와 소화조의 SRT에 따른 소화조의 일일 TCOD의 제거량과 제거효율을 Fig. 2에 나타내었다. Fig. 2a는 반응조 당 일일 TCOD의 제거량을 나타낸 것으로 메탄가스 발생량과 마찬가지로 SRT가 감소함에 따라서 소화조의 유기물부하가 높아지며 증가하였다.

TCOD의 제거효율은 슬러지의 전처리 횟수가 많아짐에 따라 증가하였다. SRT가 15일인 경우 TCOD의 제거효율은 전처리 횟수 0, 10, 20, 30에서 18.7%, 21.1%, 23.0% 및

25.5%로 이는 대조군과 비교하여 각각 12.6%, 22.8%, 36.0% 향상된 값이다(Fig. 2b). 또한 대조군에 비하여 전처리 횟수가 30인 소화조의 TCOD의 제거율은 SRT 15일인 경우 36.0%, SRT 12일인 경우 40.4%, SRT 10일인 경우 43.1% 향상되었다. 이는 전처리를 하지 않은 슬러지의 경우 높은 유기물 부하에 의해 제거효율이 낮아졌기 때문으로, 슬러지를 전처리하면 짧은 SRT에서도 소화조 운전이 가능함을 제시하고 있다.

Fig. 3은 소화조의 일일 VS의 제거량과 그 제거효율을 나타낸 것이다. 일일 VS의 제거량은 SRT 감소에 따른 유기물 부하의 증가로 인하여 증가하는 것을 알 수 있다(Fig. 3a). 또한 전처리의 반송처리 횟수가 증가함에 따라 제거량도 증가함을 알 수 있다.

VS 제거효율은 SRT 15일에서 전처리를 하지 않은 경우 27.9%, 전처리 횟수 10에서 31.3%, 20에서 32.6%, 30에서 34.6%로 10, 20, 30회 전처리하였을 때 대조군과 비교하여 각각 12.1%, 16.9%, 24.1% 증가하였다(Fig. 3b). 전 등<sup>12)</sup>은 pulse power 전처리를 한 슬러지의 소화실험에서 VS 제거효율이 전처리가 없는 경우 13.8%, 전처리를 한 경우 20.7%

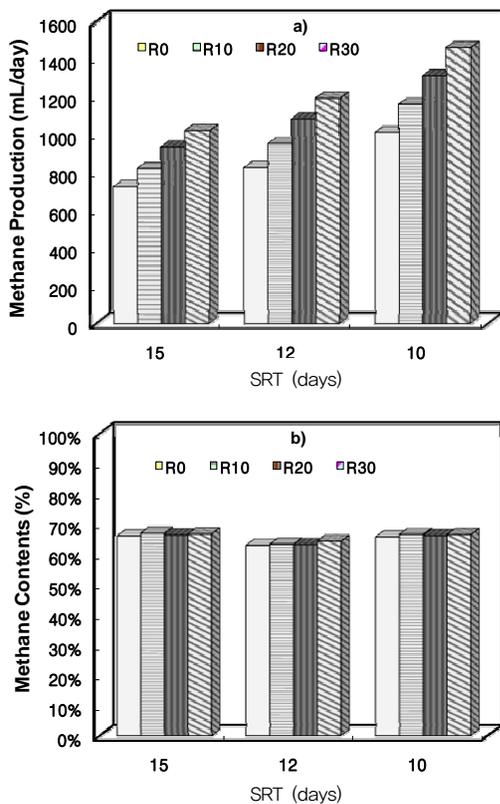


Fig. 1. Methane production at various pre-treatment times and SRTs; a) methane production and b) methane contents.

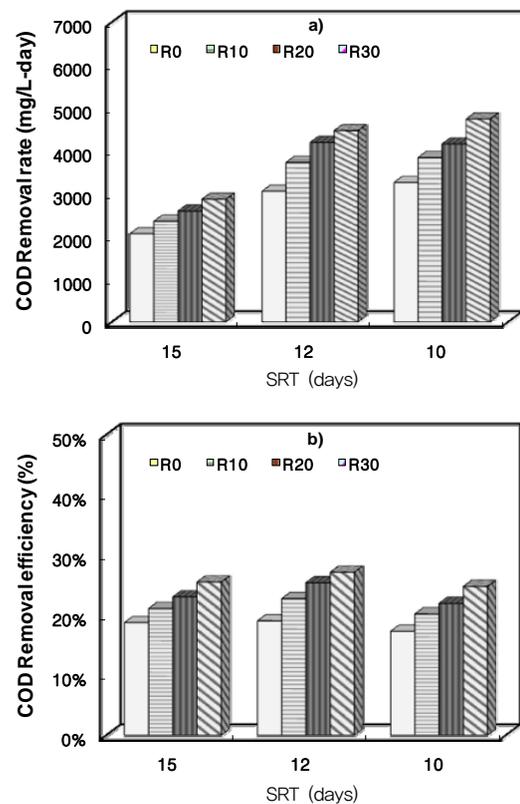


Fig. 2. TCOD removal at various pre-treatment time and SRTs; a) TCOD removal rate and b) TCOD removal efficiency.

로 전처리에 의해 VS 제거효율이 증가한다고 보고하였다. SRT 15일에서 12 및 10일로 감소하였을 때 VS 제거효율은 전처리를 하지 않은 경우 27.9%, 26.8% 및 24.9%이고, 30회 전처리하였을 경우 34.6%, 32.9% 및 29.5%로 SRT 감소에 의해 VS 제거효율이 감소하여 대조군인 R0에 대한 30회 전처리한 R30의 VS 제거효율 증가분은 SRT 15일에서 24.1%, 12일에서 23.2%, 10일에서 18.5%로 감소하였다. 이는 SRT가 15, 10 및 7일로 감소함에 따라 VS 제거효율이 각각 36.2%, 31.0% 및 27.1%로 감소하였던 Kim<sup>2)</sup>의 실험에서도 동일하게 나타난 현상이다. SRT 10일에서 VS 제거효율 증가분이 급격히 감소한 것은 SRT의 감소로 입자성 유기물이 충분히 제거되지 않았음을 시사한다.

Fig. 4는 유입 VS에 대한 메탄가스의 발생량인 methane yield를 나타낸 것으로 SRT 15일의 경우 전처리 횟수가 10, 20, 30인 경우, 대조군과 비교하여 각각 12%, 21.8%, 37.1%의 methane yield가 증가하였다. 각 SRT에 대한 methane yield는 대조군의 경우 SRT 15, 12 및 10일에서 각각 0.130, 0.124 및 0.121 L CH<sub>4</sub>/g VS<sub>fed</sub>를 나타내었으며, 전처리 횟수가 30회인 경우 0.179, 0.173 및 0.168 L CH<sub>4</sub>/g VS<sub>fed</sub>를

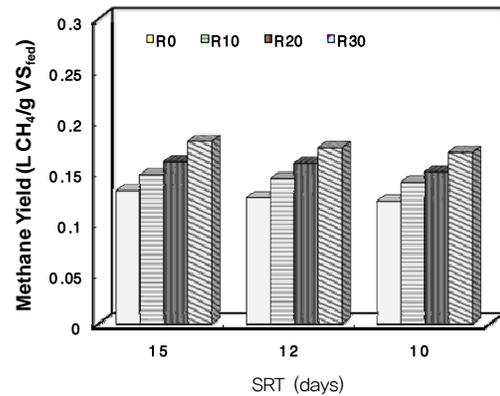


Fig. 4. Comparison of methane yield under different pre-treatment times and SRTs.

나타내어 SRT가 감소함에 따라 methane yield의 감소가 나타났으나 그 차가 미미하였다. Kim<sup>2)</sup>은 전처리를 하지 않은 슬러지 소화조의 SRT가 20일에서 15, 10 및 7일로 감소함에 따라 methane yield가 0.129, 0.114, 0.101 및 0.084 L CH<sub>4</sub>/g VSS<sub>rev</sub>로 감소하였으며, 이는 체류시간의 감소로 인한 유기물 제거율이 둔화되어 소화조 내에 축적된 결과였다고 보고하였다. 본 실험의 결과는 슬러지의 전처리를 통한 유기물 분해성의 증가로 인하여 methane yield가 증가하였고, 이에 따라 낮은 SRT에서 충분한 운전이 가능함을 제시한다.

### 3.2. 전처리로 인한 슬러지의 SCOD 증가와 소화조의 메탄가스 발생량 증가의 관계

소화조의 운전 결과를 바탕으로 전처리를 통해 증가한 SCOD와 메탄가스 발생 증가량과의 관계를 Fig. 5에 나타내었다. 전처리를 통해 소화조에 투입된 SCOD 증가분이 100 mg/d일 때 메탄가스 발생량은 SRT 15일에서 148 mL/d, 12일에서 135 mL/d, 10일에서 117 mL/d이었다. 혐기성 처리에서 100 mg의 COD가 제거되었을 때, 발생할 수 있는 이론적 최대 메탄가스의 양은 35 mL이므로 실제 메탄가스 발생량은 이론값에 비하여 SRT 15, 12 및 10일에서 각각 4.2, 3.9 및 3.3배 많음을 알 수 있다. 이는 전처리에 의하여 증가된 SCOD 성분이 메탄가스로 전환되었을 뿐만 아니라, 슬러지의 고형물 성분도 소화에 유리한 상태로 개량되었음을 의미한다. 이에 대한 원인은 명확하지 않지만 전처리를 통해 floc이 분해되며 슬러지 입자의 크기가 감소하여 미생물과 유기물의 접촉 기회가 높아졌기 때문일 것으로 사료된다. 전처리를 통해 폐활성슬러지의 가용화뿐만 아니라 floc이 분해되는 것은 맹과 배<sup>10)</sup>에 의해서 보고되어 있다. 또한 SRT가

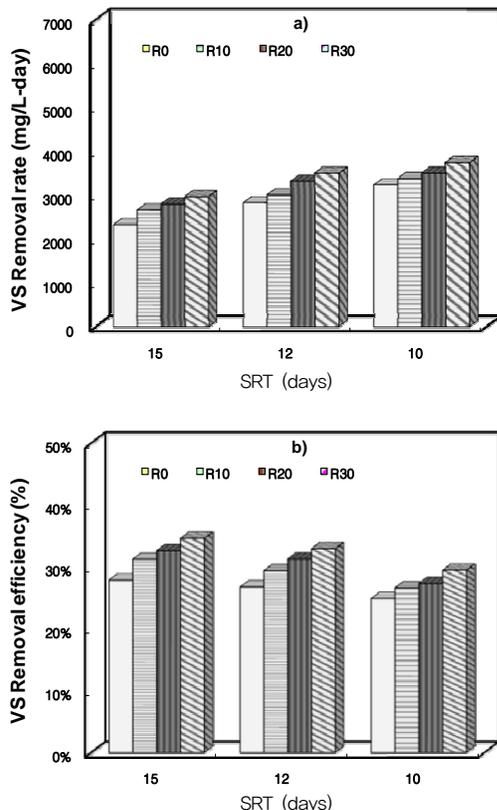


Fig. 3. VS removal at various pre-treatment time and SRTs; a) VS removal rate and b) VS removal efficiency.

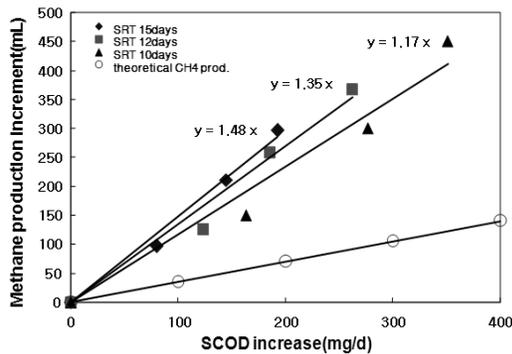


Fig. 5. Relationship between SCOD increase and methane production increment.

감소함에 따라 메탄가스 발생량 증가분이 감소함을 알 수 있었는데(Fig. 5에서 기울기의 감소), 이는 짧은 SRT에서는 입자성 유기물의 분해가 충분하지 않았음을 시사한다.

### 3.3. 전처리에 따른 소화조의 에너지 수치

Table 2는 VCS에 의하여 슬러지를 전처리할 때의 에너지 투입량과 이 슬러지를 소화하였을 경우 메탄가스의 발생증가량에 대한 에너지 수치(energy balance)를 나타낸 것이다. 에너지 수치는 아래 식에 의하여 계산하였다.

$$\text{Energy Balance } (E_b) = \text{Energy Production } (E_p) - \text{Energy Consumption } (E_c) \quad \cdot \cdot \quad (eq.1)$$

$$\text{Energy Production } (E_p) = \text{메탄발생증가량 } (\Delta LCH_4/L \text{ Sludge}) \times \text{메탄발열량} / \text{환산계수} \quad \cdot \cdot \quad (eq.2)$$

$$\text{Energy Consumption } (E_c) = \text{전력소모량} \times \text{운전시간} / \text{회분식전처리회당슬러지량} \quad \cdot \cdot \quad (eq.3)$$

식에서 메탄 발열량은 35,800 J/L CH<sub>4</sub>, 환산계수는 3,600 J/ Wh, 전력소모량은 전력량계에 의하여 실측한 2.2

Table 2. Energy balance

SRT (day)	Reactor No.	Number of Treatment (L/L sludge)	$\Delta CH_4$ prod. (L/L)	Power consump.(W)	EP (Wh/L)	EC (Wh/L)	EB (Wh/L)
15	R2	10	0.24	2,000	2.41	2.46	-0.05
	R3	20	0.50	2,000	5.00	4.92	0.07
	R4	30	0.75	2,000	7.48	7.38	0.10
12	R2	10	0.25	2,000	2.51	2.46	0.05
	R3	20	0.52	2,000	5.13	4.92	0.21
	R4	30	0.75	2,000	7.50	7.38	0.12
10	R2	10	0.25	2,000	2.49	2.46	0.03
	R3	20	0.50	2,000	4.97	4.93	0.04
	R4	30	0.75	2,000	7.47	7.38	0.09

kWh, 슬러지양은 650 L의 계산인자를 사용하여 계산하였다. 계산 결과 SRT 15일의 10회 전처리한 경우를 제외한 모든 조건에서 에너지 수치가 양의 값을 나타내었음을 알 수 있었다. 또한 전처리 횟수가 증가함에 따라 에너지 수치도 증가함을 알 수 있다. 비록 열량으로 계산한 값이지만, 에너지 수치가 양(+)라는 것은 VCS를 이용한 전처리 방법이 에너지 회수에 유리하다는 것을 의미한다. 더불어 슬러지 감량화에 따른 경제적 효과를 고려하면 전처리 공정은 충분한 경제성을 가질 수 있다.

### 3.4. 전처리에 따른 소화조의 경제성 분석 예

소화조의 운전 결과를 바탕으로 전처리 도입에 따른 경제성을 분석하였다. 경제성 분석을 위하여 1일 슬러지 처리량은 고형물 농도 3%인 100 톤, 슬러지 cake의 함수율을 80%로 가정하였으며, SRT 15일, 30회 전처리한 소화조의 운전 결과를 이용하였다. 소화가스는 판매 및 연료, 전력 생산 등의 다양한 방향으로 사용할 수 있으며 이에 따른 연료대체효과로 경제적 이익을 얻을 수 있다. 경제성 분석은 전처리 비용에 필요한 전력비용, 가스 발생 증가분의 활용에 따른 효과, 온실가스 배출권 판매수익 및 슬러지 감소로 인한 처분비용의 감소에 대하여 계산하였다. 이때 각 계산은 국내 전기료, 슬러지 처분비용 등을 이용하였으며, 소화가스 이용효과 및 CERs (Certified Emission Reduction) 비용은 환경부 자료<sup>13)</sup>를 참고하였다. Table 3에 그 계산식과 비용을 나타내었다. 전처리 비용으로 40,073 원/day이 요구되었지만, 가스 발생 증가에 대한 비용으로 판매 시에는 12,500~25,000 원/day이 발생하였다. 여기서 소화가스의 판매 단가를 100~200 원/m<sup>3</sup> biogas로 가정하였는데 소화가스의 판매 단가는 메탄 함량에 따라 가격이 달라지며, 아직 국내에 정제되지 않은 소화가스의 판매가격에 대한 기준이 마련되지 않은 실정이다. 발생한 소화가스를 판매하는 방법 외에도 정제가스로 생산할 경우에는 55,000 원/day, 가온용 연료로 생산할 경우에는 82,500 원/day, 전력으로 대체하여 생산할 경우에는 19,037 원/day의 수익이 발생하였다. 이외에 추가로 가스 발생 증가분에 대한 온실가스 감축량을 CERs 확보를 통한 절감액으로 나타냈을 때는 약 6,116 원/day의 수익이 발생할 것으로 예상되었다. 마지막으로 슬러지 감소에 대한 처분비용의 감소로 38,325 원/day이 발생하였다. 따라서 100 ton/day의 슬러지에 대하여 발생한 소화가스를 판매할 경우 최저 8,132 원/day에서 최대 20,632 원/day의 경제적 이익을 기대할 수 있다.

**Table 3.** Examples of economic analysis of the VCS application

Item	Calculation
Sludge flow-rate	100 m <sup>3</sup> /day (3% TS)
Power consumption	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Unit power consumption × flow-rate</li> <li>= 7.38 kWh/m<sup>3</sup> sludge × 100 m<sup>3</sup> sludge/day</li> <li>= 738 kWh/day at treatment 30 times.</li> </ul>
Pre-treatment cost	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Power consumption × Electricity cost</li> <li>= 738 kWh/day × 54.3 won/kWh</li> <li>= <b>40,073 won/day</b></li> </ul>
Biogas increase rate	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Δ CH<sub>4</sub> production rate × flow-rate ÷ methane composition</li> <li>= 0.75 m<sup>3</sup> CH<sub>4</sub>/m<sup>3</sup> sludge × 100 m<sup>3</sup> sludge/day ÷ 0.6</li> <li>= 125 m<sup>3</sup> biogas/day(60% methane) at SRT 15</li> </ul>
Effect by biogas utilization	<ul style="list-style-type: none"> <li>• biogas cost = 125 m<sup>3</sup>/day × 100~200 won/m<sup>3</sup> = <b>12,500~25,000 won/day</b></li> <li>• refinery biogas production = 125 m<sup>3</sup>/day × 440 won/m<sup>3</sup> = <b>55,000 won/day</b></li> <li>• fuel production for heat = 125 m<sup>3</sup>/day × 660 won/m<sup>3</sup> = <b>82,500 won/day</b></li> <li>• the generation of electric power</li> <li>= 125 m<sup>3</sup>/day × 5,200 kcal/m<sup>3</sup> × 4.184 kJ/kcal × 1kWh/3600kJ × 30% × 84 won/kWh</li> <li>= <b>19,037 won/day</b></li> <li>• total of oil equivalent = 125 m<sup>3</sup>/day × 5,200 kcal/m<sup>3</sup> × 10<sup>-7</sup> = 0.065 TOE/day</li> <li>• greenhouse gas reduction = 0.065 TOE/day × 3,883 tCO<sub>2</sub>/TOE = 0.25 tCO<sub>2</sub>/day</li> <li>• CERs = 0.25 tCO<sub>2</sub>/day × 13.8 EURO/tCO<sub>2</sub> × 1,772.72 won/EURO</li> <li>= <b>6,116 won/day</b></li> </ul>
Cake reduction rate	<ul style="list-style-type: none"> <li>• TS production = 100 m<sup>3</sup> sludge/day × 0.03 ton TS/m<sup>3</sup> = 3 ton TS/day</li> <li>• VS production = 3 ton TS/day × 0.73 ton VS/ton TS = 2.19 ton VS/day</li> <li>• VS reduction(untreated) = 2.19 ton VS/day × 0.279 = 0.61 ton VS<sub>red</sub>/day</li> <li>• VS reduction(30 times treated) = 2.19 ton VS/day × 0.346 = 0.76 ton VS<sub>red</sub>/day</li> <li>• Sludge production(X) ⇒ X / {(TS-VS<sub>rev</sub>) + X} = 80% water content</li> <li>• Sludge production = 11.94 m<sup>3</sup>/day at untreated</li> <li>= 11.21 m<sup>3</sup>/day at 30 times treated</li> <li>• Cake reduction rate = sludge prod. of untreated</li> <li>- sludge prod. of 30 times treatment</li> <li>= 11.94 m<sup>3</sup>/day - 11.21 m<sup>3</sup>/day = 0.73 m<sup>3</sup>/day</li> </ul>
Sludge disposal cost	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Sludge disposal cost = sludge reduction rate × unit sludge disposal cost</li> <li>= 0.73 m<sup>3</sup> cake/day × 52,500 won/m<sup>3</sup> cake</li> <li>= <b>38,325 won/day</b></li> </ul>

#### 4. 결론

수리동력학적 캐비테이션 전처리를 한 슬러지를 대상으로 소화조를 운전하며 전처리가 소화효율에 미치는 영향을 조사하여 다음과 같은 결론을 도출하였다.

- 1) 전처리 한 슬러지 SRT 10~15일에서 소화시킨 결과 대조군에 비해 메탄발생량 및 TCOD 제거효율은 각각 41~45% 및 36.5~43.1% 증가하였으며, VS는 24.1~18.4% 감소하였다.
- 2) 수리동력학적 캐비테이션을 이용한 슬러지의 전처리는 SCOD를 증가시킬 뿐 아니라 고형물도 혐기성 소화에 유리한 상태로 변화시킴으로써 메탄 발생량은 SCOD

증가분의 3.3~4.2배에 달하였다.

- 3) 전처리를 위해 투입한 에너지와 메탄가스의 발생 증가분에 대한 에너지 수지를 계산하였을 때 대부분의 조건에서 에너지 회수가 가능하였다.
- 4) 전처리에 따른 소화효율 향상의 경제성을 분석한 결과 100 ton/day 규모의 시설에 대하여 경제적 이익은 소화가스의 판매단가가 100~200 원/m<sup>3</sup>일 경우 8,132~20,631 원/day의 경제적 이익이 기대되었다.

**KSEE**

#### 사 사

본 연구는 환경부 Eco-STAR Project 수행기관인 수처리

선진화사업단(과제번호: C1-1-005-3-0-2008)의 연구비 지원에 의해 수행되었습니다.

## 참고문헌

1. Chung, Y. J., "Interrelationships among Anaerobic Digestion, Sludge Dewaterability, and particle Characteristics," Ph. D. Thesis, University of Texas at Austin(1985).
2. Kim, N. C. "Study on biogas production and reduction of organic matters of thickened sewage sludge by anaerobic digestion." 한국폐기물학회지, **25**, 50-57(2008).
3. Harrison, S. T. L., "Bacterial cell disruption : A key unit operation in the recovery of intracellular products," *Biotech. Adv.*, **9**, 217-240(1991).
4. Show, K. Y., Mao, T. and Lee, D. J., "Optimisation of sludge disruption by sonication," *Water Res.*, **41**, 4741-4747(2007).
5. Sawayama, S., Inoue, S., Yagishita, T., Ogi, T. and Yokoyama, S. Y., "Thermochemical liquidization anaerobic treatment of dewatered sewage sludge," *J. Ferment. Bioeng.*, **79**, 300-302 (1995).
6. Torres, M. L. and Llorens, M. C. E., "Effect of alkaline pretreatment on anaerobic digestion of solid wastes," *Waste Management*, **28**, 2229-2234(2008).
7. Dytczak, M. A., Londry, K. L., Siegrist, H. and Oleszkiewicz, J. A., "Ozonation reduces sludge production and improves denitrification," *Water Res.*, **41**, 543-550(2007).
8. 서울특별시, "서울특별시 4개 하수처리장 하수슬러지 처리시설 증설 기본계획 요약보고서," pp. 93-103(2006).
9. 맹장우, "수리동력학적 캐비테이션전처리에 의한 하수슬러지의 혐기성 소화효율 향상," 석사학위논문, 인하대학교(2009).
10. 맹장우, 배재호, "수리동력학적 및 초음파 캐비테이션 슬러지 전처리 장치의 비교 연구," 대한환경공학회지, **31**(2), 90-95(2009).
11. APHA, "Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater," 20th ed. American Public Health Association, Washington D.C(1998).
12. 전용우, 최한나, 정윤진, 홍승모, "혐기성 소화효율 향상을 위한 폐활성슬러지의 pulse power 전처리," 대한환경공학회 2003 춘계학술연구발표회 논문집, KAIST, **5**(1-3), 112-119(2003).
13. 환경부, "하수슬러지관리 종합대책,"(2008).