

# 수리동력학적 및 초음파 캐비테이션 슬러지 전처리 장치의 비교 연구

맹장우 · 배재호<sup>†</sup>

인하대학교 사회기반시스템공학부

(2009년 1월 2일 접수, 2009년 2월 13일 채택)

## Comparisons of Sludge Pre-Treatment Systems : Hydrodynamic vs Ultrasonic Cavitation

Jang-Woo Maeng · Jae-Ho Bae<sup>†</sup>

Civil/Environmental/Geoinformatic Engineering, Inha University

**ABSTRACT** : Sludge pre-treatment utilizing cavitation is one of the commercialized methods at present. Cavitation can be generated by two different methods, sonotrode and hydrodynamic principle, and there has been no direct comparison between the two methods. In this study, solubilization efficiency, changes in sludge size distribution, and the methane production potential after pre-treatment by the two methods were compared. The maximum solubilization efficiency per unit energy input with the two methods was similar, and was 302 mg  $\Delta$ SCOD/g TS at the energy input of 0.18 kWh/L. Break-up of sludge flocs were dominant during the early period of pre-treatment, while cell disintegration continued through the pre-treatment with the increase in the number of particles with less than 1  $\mu$ m. BMP test results indicated that the methane potential increased up to 24.3% without differences between the two pre-treatments, and the increase in methane potential did not proportional to energy input. Although the energy efficiency of the two methods was quite similar, hydrodynamic methods might be a better choice for field application considering the operation and maintenance cost, and its potential improvement in energy efficiency.

**Key Words** : Sludge Pre-treatment, Cavitation, Hydrodynamic, Ultrasonic, Methane, Solubilization

**요약** : 슬러지 전처리 방법으로 상용화되어 있는 cavitation을 이용한 방법은 서로 다른 원리, 초음파발생기(sonotrode)와 수리동역학을 이용하고 있지만 이들 방법의 효율을 비교한 연구는 없었다. 본 연구에서는 이 두 전처리 방법에서 슬러지 가용화 효율, 전처리 후 입경변화, 전처리 전후의 메탄 생성량 변화를 평가하였다. 두 방법에 있어서 단위 에너지 투입량 당 가용화 효율은 유사하였으며, 최대 가용화 효율은 0.18 kWh/L에서 302 mg  $\Delta$ SCOD/g TS이었다. 전처리 초기에는 슬러지의 floc 해체가 주로 일어났고, 전처리가 진행됨에 따라 1  $\mu$ m 이하의 입자가 증가하여 셀이 파괴되는 것을 확인할 수 있었다. BMP 시험 결과 슬러지의 메탄가스 발생량은 전처리 방법별 차이는 없이 최대 24.3%까지 증가하였으나, 투입 에너지에 비례하여 증가하지는 않았다. 비록 두 방법의 에너지 효율을 유사하지만 운영 및 유지비와 향후 에너지효율 개선 잠재력 면에서 볼 때 수리동력학적 원리를 이용하는 방법이 현장 적용에 유리하다고 판단된다.

**주제어** : 슬러지 전처리, 공동화, 수리동역학, 초음파, 메탄, 가용화

### 1. 서론

하수슬러지의 혐기성 소화공정은 슬러지의 부피를 줄이고 에너지원인 메탄가스를 생산하는 장점을 가지고 있지만 입자성 유기물의 낮은 분해속도로 인하여 긴 처리 시간이 요구되며 유기물의 제거효율 또한 높지 않다. 이를 극복하기 위한 하수 슬러지의 전처리 방법으로 열적처리 방법,<sup>1)</sup> 기계적인 방법,<sup>2,3)</sup> 화학적인 방법<sup>4)</sup> 및 생물학적 방법<sup>5,6)</sup> 등이 제시되어 있다. 이들 방법 중에서 열적처리 및 cavitation을 이용하는 방법이 현재 가장 널리 상용화되어 있다.

Cavitation을 이용한 방법 중 초음파 분해(ultrasonic disinte-

gration, UD)는 초음파에 의해 유체 내에서 발생한 cavitation에 수반된 강한 전단력과 국지적 고온, 고압을 이용하여 슬러지의 생분해도를 높이는 방법이다. 이 방법의 슬러지 가용화 효율은 입증되었으나 초음파 발생전극(sonotrode)의 잦은 교체 등 높은 유지관리 비용이 문제로 지적되어 왔다.<sup>7~9)</sup> Cavitation을 이용한 또 다른 전처리 방법인 수리동력학적 분해(hydrodynamic disintegration, HD) 방법은 유체가 오리피스나 벤츨리 등과 같이 단면적이 급속히 감소하는 물체를 통과할 때 유속이 높아지며 압력이 감소하면서 cavitation이 발생되었다가 단면이 넓어지는 부분에서 소멸되는 원리를 이용한다.<sup>10)</sup> 이 방법은 독일 Biogest사의 Crown disintegration system (CDS)으로 장치가 간단하다는 장점이 있지만, 낮은 가용화 효율 등으로 인하여 현장에서 널리 적용되고 있지는 않다. 동일한 cavitation을 이용하지만 발

<sup>†</sup> Corresponding author

E-mail: jnb@inha.ac.kr

Tel: 032-860-7507

Fax: 032-865-1425

생방법에 따라 서로 다른 장단점을 지닌 UD와 HD의 효율을 직접 비교한 연구는 이제까지 수행된 바가 없다.

본 연구는 UD와 HD의 효율을 비교하기 위하여 수행하였다. 비교를 위하여 단위 에너지 투입량 당 슬러지 가용화 효율, 전처리 후 입경 변화 및 메탄생성량을 평가하였다.

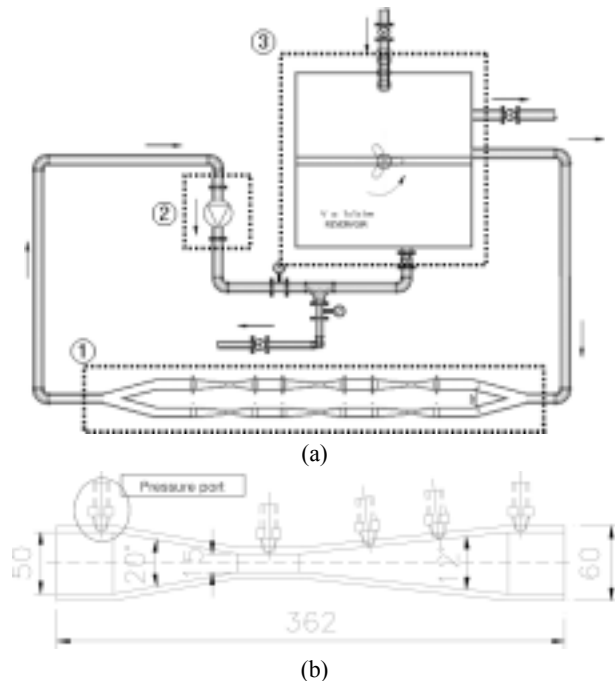
## 2. 실험재료 및 방법

### 2.1. 대상슬러지

본 연구의 전처리 대상 슬러지는 경기도 부천시의 북부 수자원 생태공원에서 발생한 폐활성슬러지이며, 현장에서 혐기성 소화조 투입을 위하여 2.5~3.5% 정도로 원심농축되었다. 슬러지의 총 고형물 농도(total solid, TS)는 30,300 mg/L이고, 휘발성 고형물 농도(volatilie solid, VS)는 20,470 mg/L, 총 화학적 산소요구량(total chemical oxygen demand, TCOD)은 35,000 mg/L, 용존성 화학적 산소요구량(soluble chemical oxygen demand, SCOD)은 190 mg/L 이었다.

### 2.2. HD를 이용한 벤츄리 캐비테이션 시스템(venturi cavitation system, VCS)의 구성

본 연구에 이용된 VCS의 구성은 Fig. 1에 나타내었으며, 이에 대한 자세한 설명은 맹<sup>11)</sup>에 의해 제시되어 있다. VCS는 크게 캐비테이션의 발생부분인 벤츄리부 ①, 슬러지 이송을 위한 흡입펌프 ②, 그리고 슬러지 저류조 ③으로 이루어져 있다(Fig. 1(a)). 벤츄리는 슬러지가 통과할 때 발생하는 캐비테이션의 형상을 관찰하기 위하여 투명한 재질의 아크릴을 이용하였고, 유입·유출부의 관 직경 50 mm, 목



① venturi, ② pump, ③ reservoir

Fig. 1. Configuration of venturi cavitation system; a) overall configuration, and b) venturi shape.

부분은 직경 15~19 mm, 벤츄리 유입부에서 목 부분으로 축소각 20°, 목 부분의 확대각을 12° 로 하였다(Fig. 1(b)). 벤츄리부는 병렬로 2단을 설치하였으며, 각 단은 목 직경이 다른 벤츄리를 3개씩 조합하여 캐비테이션의 발생 영역의 크기가 최대가 되도록 설계하였다. 펌프의 운전방식은 흡입방식으로 하여 압력손실을 최소화 하였다. 실험은 VCS를 연속 운전하여 SCOD가 더 이상 증가하지 않았을 때까지 수행하였다. 실험기간 동안 전처리 횟수(시료가 벤츄리부를 통과한 횟수) 100회 단위로 시료를 채취하였다.

### 2.3. UD를 이용한 초음파 캐비테이션 시스템(ultra-sonic cavitation system, UCS)의 구성

본 연구에서 이용된 UCS는 Fig. 2에 나타내었다. 그림에서 (a)는 슬러지의 초음파 처리에 사용된 초음파 발생장치로 Sonics & Materials 社의 VCX-600 모델을 사용하였다. 슬러지의 전처리를 위한 초음파는 전극(Fig. 2(b))으로부터 발생된다. 본 실험에서는 전극 말단 봉 지름이 25 mm인 초음파 전극을 사용하였고, 이 전극의 출력은 38 W로 하였다. 또한 슬러지의 침전을 방지하고, 균일한 혼합을 위하여 자석식 교반기를 이용하여 교반을 행하였다. 전처리는 1 L의 용기에 600 mL 슬러지를 담은 후 배치 방식으로 SCOD가 더 이상 증가하지 않았을 때까지 수행하였으며, 0.5시간 단위로 시료를 채취하였다.

### 2.4. BMP(Biochemical Methane Potential) 시험

Owen 등<sup>12)</sup>에 의해 소개된 BMP 시험은 메탄 발생 잠재력과 발생속도를 측정하는 실험으로 본 연구에서 VCS 및 UCS 전처리 슬러지의 메탄 발생능을 비교하였다. 실험은 280 mL의 serum 용기를 이용하였으며, 사용된 영양배지의 조성은 Owen 등<sup>12)</sup>이 제시한 것과 동일하였으며, 시험은 35°C에서 수행하였다. 시료는 2 g COD로 맞추어 주입하였고, 영양배지와 식중 슬러지를 주입하여 총 150 mL가 되도록 하였다. 식중 슬러지는 본 연구실에서 운전 중인 실험실 규모 소화조에서 채취한 소화슬러지를 이용하

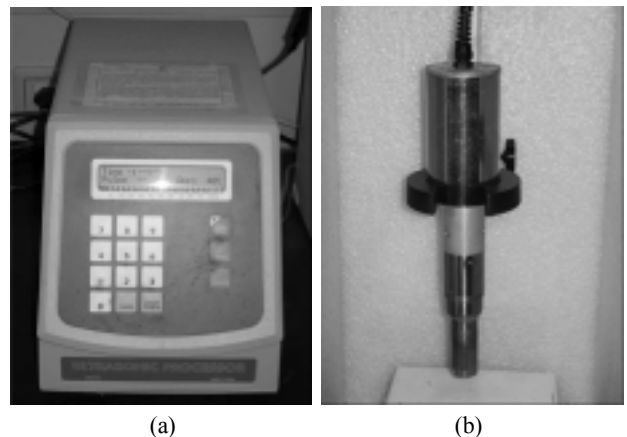


Fig. 2. Configuration of ultrasonic cavitation system; a) ultrasonic processor, and b) sonotrode.

**Table 1.** SCOD changes at different energy input levels with VCS and UCS

Energy consumption (kWh/L)	0	0.018	0.036	0.054	0.072	0.090	0.11	0.13	0.14	0.16	0.18	0.20	0.22
VCS (mg/L)	190	1,232	2,274	3,974	5,232	6,507	7,494	8,228	8,722	9,261	9,337	9,358	9,379
UCS (mg/L)	190			3,258		5,962			7,980		9,432		9,572

였다. 또한 시료의 순수한 메탄 발생량을 측정하기 위하여 식중 슬러지와 영양 배지만 주입한 blank를 준비하여 계산과정에서 식중슬러지에 의한 메탄 발생량을 보정하였다. BMP test에 사용된 슬러지는 대조군과 VCS의 경우 200, 500 및 1000회, UCS의 경우 1시간 및 2시간 처리한 슬러지이며, 이때 슬러지 당 에너지 투입량은 VCS의 경우 각각 0.036, 0.09, 0.18 kWh/L, UCS의 경우 각각 0.09, 0.18 kWh/L이었다.

2.5. 분석방법

TCOD, SCOD, TS, VS 등은 Standard Methods<sup>13)</sup>에 따라 분석하였다. 전처리 전후의 슬러지 입도 분포는 Lazer particle size analyzer(Malvern社의 입도분석기 Mastersizer 2000)를 이용하여 분석을 하였으며, 가스의 메탄 조성분석에는 GC-TCDD를 이용하였다.

3. 실험 결과 및 고찰

3.1. VCS와 UCS의 가용화 효율 비교

VCS와 UCS의 전처리 시 에너지 투입량에 따른 SCOD 변화량은 Table 1에 나타내었다. 초기 SCOD가 190 mg/L인 슬러지에 0.22 kWh/L의 에너지를 투입하여 전처리한 결과 SCOD는 VCS의 경우 9,379 mg/L, UCS는 9,572 mg/L로 증가하였다.

초음파를 이용한 슬러지 전처리 결과는 여러 연구자에 의해 보고되어 있다. Kampas<sup>14)</sup>는 lab sonicator를 이용한 실험결과 에너지 투입량 0.662 kWh/L에서 SCOD가 초기 120~230 mg/L에서 최종 3,325~6700 mg/L이었으며, 현장 규모 Sonix<sup>TM</sup>에서는 0.016 kWh/L에서 초기 1,072~1,198 mg/L, 최종 1,745~14,320 mg/L이었다고 보고하였다. 본 연구의 UCS와 비교할 때 실험실 규모의 경우 3배의 에너지 투입량에서 SCOD 증가율이 1/3~2/3 수준으로 낮았다. 반면, Sonix<sup>TM</sup>에서는 낮은 에너지 투입량에서도 SCOD 증가율이 높았는 바, 이는 규모 증대로 인한 에너지 효율 향상에 기인한 것으로 판단된다. 또한 고 등<sup>15)</sup>은 0.139 kWh에서 SCOD가 초기 407 mg/L에서 최종 3,020 mg/L 증가하였으며, Mao 등<sup>18)</sup>은 0.009 kWh/L에서 SCOD 증가분이 480~850 mg/L라고 보고하였다. 이상의 결과로부터 본 연구의 UCS의 효율은 기존 초음파 전처리 실험의 결과와 유사한 수준임을 알 수 있다.

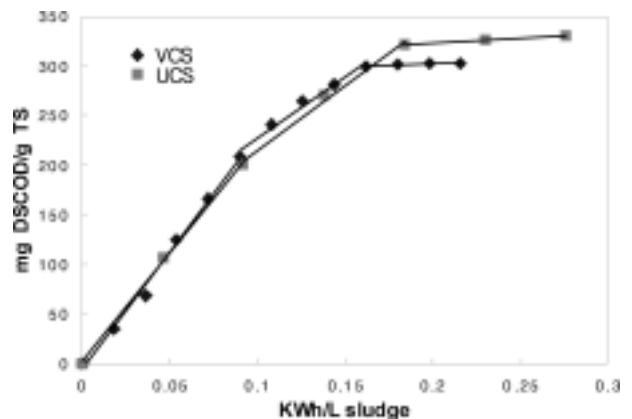
본 연구의 VCS와 비교할 만한 실험결과는 극히 제한적이다. Kampas<sup>14)</sup>는 현장 규모 시설을 이용한 실험 결과, CDS의 경우 에너지 투입량 0.0026 kWh/L에서 SCOD가 초기

310 mg/L에서 710 mg/L로 증가하였다고 보고하였다. 본 연구의 VCS에서 0.02 kWh/L의 에너지 투입량에서 ΔSCOD가 1,042 mg/L인데 반해, CDS가 1/10의 에너지 투입량에서 ΔSCOD 증가율은 약 40%이었다. 이 같은 CDS의 결과는 본 연구의 VCS보다 에너지 효율적으로 보이지만, 이는 두 시설의 규모의 차이에서 기인하는 것으로 판단된다.

Fig. 3에 VCS와 UCS 방식의 에너지 투입량에 대한 가용화 효율을 나타내었다. 가용화 효율은 전처리후에 투입 TS당 증가한 용해성 COD(mg ΔSCOD/g TS)로 정의하였으며, 두 장치의 시간당 처리량이 다르기 때문에 슬러지 1 L 당 전처리에 사용된 에너지 투입량으로 환산하여 나타내었다. 에너지 투입량 당 가용화 효율은 두 방식에서 거의 유사하였다. 또한 가용화 효율은 0.9 kWh/L까지는 에너지 투입량에 비례하여 증가하였고, 이때 그 값은 VCS 및 UCS에서 각각 208 및 201 mg ΔSCOD/g TS이었다. 투입 에너지 0.09에서 0.18 kWh/L까지는 가용화 효율의 증가율이 감소하였으며, 그 이상의 에너지를 투입하여도 가용화 효율은 더 이상 증가하지 않았다. 최대 가용화 효율은 0.18 kWh/L에서 VCS 및 UCS 각각 302 및 321 mg ΔSCOD/g TS로 두 방법 간의 차이는 크지 않았다. 이를 종합하면 두 전처리 방식의 가용화 효율은 큰 차이가 없으며, cavitation에 의한 최대 가용화 효율은 약 310 mg ΔSCOD/g TS임을 알 수 있다.

3.2. VCS와 UCS 전처리 슬러지의 입경분포

슬러지의 입경분포의 변화로부터 전처리에 의한 혐기성 분해도 양상을 파악할 수 있다. 예를 들어 입경 1 μm 이하의 입자의 증가는 전처리에 의해 파괴된 슬러지의 양을, 입경 10 μm~1,000 μm 입자의 감소는 floc의 해체를 나



**Fig. 3.** Comparisons of solubilization efficiencies between VCS and UCS.

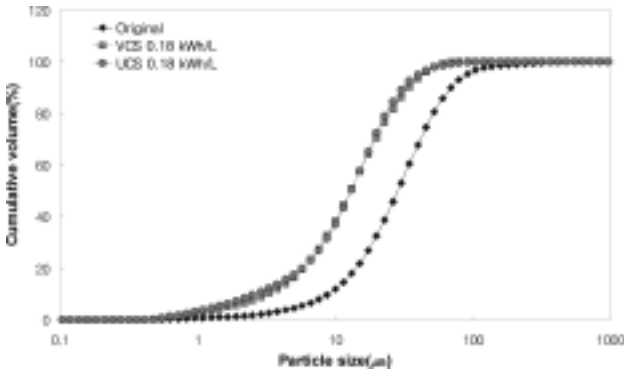


Fig. 4. Particle size distribution before and after treatment with VCS and UCS.

타내는 지표로 사용할 수 있다. Fig. 4는 전처리 전후의 입경분포를 나타낸 것으로 분석에 사용된 슬러지는 VCS의 경우 각각 50, 500 및 1000 회, UCS의 경우 2시간 처리한 슬러지이며, 이때 슬러지 당 에너지 투입량은 VCS의 경우 각각 0.009, 0.09, 0.18 kWh/L, UCS의 경우 0.18 kWh/L이었다. 누적부피로 나타낸 입경분포에 의하면 동일 에너지 투입량에서 VCS와 UCS 방법 사이의 입경분포는 큰 차이를 나타내지 않았다. 이는 동일 에너지 투입량에서 가용화 효율이 같았던 점과 일치하였다.

VCS를 이용한 전처리 과정에서 시간경과에 따른 입경 변화는 Fig. 5에 나타낸 바와 같다. 일반적으로 슬러지의 입경은 전처리 시간이 증가함에 따라 작아지지만, 처리 초기에는 주로 floc의 파괴가 일어나지만 시간 경과에 따라 에너지 투입량이 증가하면서 cell의 파괴가 일어나는 것을 알 수 있었다. 예를 들어 VCS로 0.009 kWh/L의 에너지를 투입하여 전처리를 한 슬러지와 원수를 비교하면 입경 100 μm~1,000 μm에 해당하는 입자가 크게 감소하였음을 알 수 있었다(Fig. 5 ①). 이는 전처리 초기에 슬러지의 플록 해체되어 발생한 현상이다. 따라서 저에너지 투입으로도 플록이 활발히 해체됨을 알 수 있다. 에너지 투입량이 0.09 kWh/L로 증가하자 입자 직경의 중앙값이 초기 32 μm에서 14.2 μm로 감소하였고(Fig. 5 ②), 1 μm 이하의 작은 입자들도 증가하였다(Fig. 5 ③). 이와 같이 1 μm 이하의 입자가 증가한 것은 cavitation에 의하여 cell이 파괴되었기 때

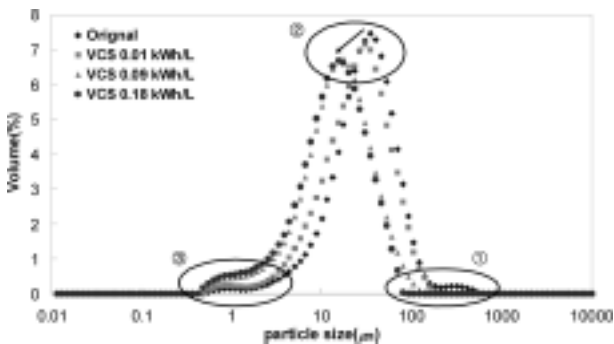


Fig. 5. Particle size distribution during the treatment with VCS.

문에 나타난 현상이다. 이후 에너지 투입량이 0.18 kWh/L 증가한 경우에는 입자 직경의 중앙값이 13.2 μm로 0.09 kWh/L의 경우와 비교하여 큰 차이는 없었으나, 1 μm 이하의 작은 입자들은 증가하였다(Fig. 5 ③). 전처리 과정에서 에너지 투입량이 증가하여도 입자 직경의 중앙값이 약 10 μm에서 크게 변하지 않았던 것은 CDS를 이용한 실험에서도 동일하게 나타난 현상이다.<sup>14)</sup>

### 3.3. VCS 및 UCS 전처리 슬러지의 BMP

BMP test를 수행한 결과(Fig. 6), 동일 에너지를 투입한 경우 VCS 및 UCS 전처리 슬러지의 메탄가스 발생량 및 발생 속도는 큰 차이가 없었다. 이는 가용화 효율 및 입자 분포 변화의 결과와 일치한다. VCS의 경우, 에너지의 투입량이 증가함에 따라 메탄가스 발생량이 증가함을 알 수 있는데, 이는 전처리를 통해 슬러지의 혐기성 소화성이 개선되었기 때문이다. VCS의 에너지 투입량이 0.036, 0.09, 0.18 kWh/L인 경우 메탄가스 발생량은 360 mL, 395 mL, 413 mL로 원수의 330 mL보다 메탄 발생량이 8.2%, 19%, 24.3% 증가하였다.

VCS 전처리의 경우 에너지 투입량이 증가함에 따라 메탄발생 증가의 기울기가 감소함을 알 수 있다(Fig. 7). 예를 들어 0.036 kWh/L의 2.5배인 0.09 kWh/L에서 메탄발생량이 10.8% 증가하였으나, 에너지 투입량이 5배인 0.18 kWh/L에서는 16.1% 증가하는데 그쳤다. 이는 지나친 전처리는 오히려 에너지 소모량만 증가시킬 수 있다는 것을 시사한

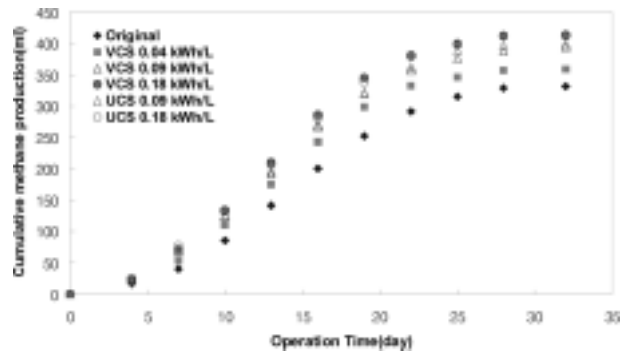


Fig. 6. BMP test results with VCS and UCS pre-treated sludges.

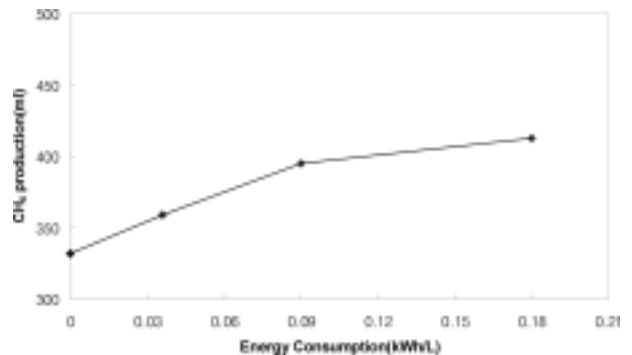


Fig. 7. Methane production potential at various energy input with VCS.

다. 실제로 슬러지 전처리는 메탄회수율을 증가시킬 뿐만 아니라 슬러지 감량화에도 목적이 있으며, 실제 경제적 효과는 감량화에 의한 효과가 더 크다. 따라서 투입에너지와 메탄 생성 증가량을 고려할 때 과도한 전처리 보다는 필요에 맞는 적정 에너지 투입량을 산정하여 사용할 필요가 있다.

### 3.4. VCS 및 UCS의 적용성

VCS와 UCS는 동일한 cavitation을 이용한 슬러지 전처리 시스템이지만 cavitation의 발생원리가 다르므로, 현장 적용에 있어 고려할 점 역시 다르다. 장치의 구성면에서 살펴보면 VCS는 venturi와 pump로 구성되어 설계 및 설치가 간단하다. Venturi의 경우 제작 및 교체가 용이하고, 설치비용 또한 저렴하다. 한편, UCS는 고가의 sonotrode가 핵심 장치로, 가격이 높을 뿐만 아니라 슬러지와 충돌로 인한 마모 등으로 인하여 수시로 교체하여야 한다. 더욱이 유량이 증가할 경우 필요한 sonotrode이 수가 많아지므로 설치 및 유지관리비가 높아지게 된다.

Cavitation과 슬러지의 접촉 면에서도 VCS가 UCS보다는 유리할 것으로 판단된다. VCS는 venturi 통과 시에 형성되는 난류로 인하여 별도의 교반시설이 필요하지 않다. 반면 UCS에서는 sonotrode에서 발생하는 초음파와 슬러지의 접촉을 향상시키기 위해서는 적절한 교반을 포함한 설계가 요구된다. 더욱이 VCS에서 슬러지 저류조를 사용하지 않고 in-line에서 반송하며 처리할 경우 저류조에서 손실되는 에너지를 줄일 수 있으므로 에너지 효율이 크게 향상될 수 있을 것으로 기대된다.

앞서 제시한 결과에 의하면 동일 에너지 input에서 VCS와 UCS의 가용화 효율은 큰 차이가 없었으며, 이는 두 방법 모두 동일한 cavitation을 사용하기 때문이다. 따라서 설치 및 운영의 편리성을 고려할 때 VCS가 UCS보다는 현장 적용성이 높을 것으로 판단된다.

## 4. 결 론

Cavitation의 발생 원리가 다른 VCS와 UCS를 이용하여 슬러지를 전처리하였을 때 가용화 효율, 입경분포 및 BMP 결과를 비교하여 다음과 같은 결론을 얻었다.

1) 에너지 투입량 당 최대 가용화 효율은 VCS 및 UCS 유사하였으며, 그 값은 302~321 mg  $\Delta$ SCOD/g TS이었다. 가용화 효율은 0.9 kWh/L까지는 에너지 투입량에 비례하여 증가하였고, 이후 0.18 kWh/L까지 증가율이 다소 감소하였으며, 그 이상에서는 더 이상 증가하지 않았다.

2) 전처리 초기에 에너지 투입량이 적은 경우에는 슬러지의 플록 해체현상이 뚜렷하여 최대 분포 입자의 직경이 100  $\mu$ m에서 50  $\mu$ m로 감소하였으며, 에너지 투입량 증가에 따라 그 값은 10  $\mu$ m까지 감소하였으나 더 이상의 변화는 없었다. 전처리기간 동안 셀의 파괴에 의하여 입

경 1  $\mu$ m 이하의 슬러지는 꾸준히 증가하였다.

3) VCS 및 UCS로 전처리한 슬러지의 메탄발생량은 유사하였다. VCS의 경우 에너지 투입량이 0.036, 0.09, 0.18 kWh/L인 경우 메탄 발생량은 각각 360, 395, 413 mL로 전처리전보다 각각 8.2%, 19%, 24.3% 증가하였다.

4) 장치의 구성, 유지관리 면에서 볼 때 VCS가 UCS에 비하여 적용성이 높은 것으로 판단되었다.

## 사 사

이 논문은 인하대학교의 지원에 의하여 연구되었음.

## 참 고 문 헌

1. Sawayama, S., Inoue, S., Yagishita, T., Ogi, T., and Yokoyama, S. Y., "Thermochemical liquidization and anaerobic treatment of dewatered sewage sludge," *J. Ferment. Bioeng.*, **79**(3), 300~302(1995).
2. Lehne, G., Müller, A., and Schwedes, J., "Mechanical disintegration of sewage sludge," *Water Sci. Technol.*, **43**(1), 19~26(2001).
3. Müller, J., "Pretreatment processes for the recycling and reuse of sewage sludge," *Water Sci. Technol.*, **42**(9), 167~174(2000).
4. Torres, M. Lopez and Llorens, Ma. del C. Espinosa, "Effect of alkaline pretreatment on anaerobic digestion of solid wastes," *Waste Management*, **28**, 2229~2234(2008).
5. McCue, T., Shah, R., Vassiliev, I., Liu, Y. H., Eremektar, F. G., Chen, Y., and Randall, A. A., "Evaluation of influent prefermentation as a unit process upon biological nutrient removal," *Water Sci. Technol.*, **47**(11), 9~15 (2003).
6. Moser-Engeler, R., Udert, K. M., Wild, D., and Siegrist, H., "Products from primary sludge fermentation and their suitability for nutrient removal," *Water Sci. Technol.*, **38**(1), 265~273(1998).
7. Chu, C. P., Chang, B. V., Liao, G. S., Jean, D. S., and Lee, D. J., "Observations on change in ultrasonically treated waste-activated sludge," *Water Res.*, **35**, 1038~1046(2001).
8. Mao, T. and Show, K.-Y., "Performance of high-rate sludge digesters fed with sonicated sludge," *Water Sci. Technol.*, **54**(9), 27~33(2006).
9. Tiehm, A., Nickel, K., and Neis, U., "The use of ultrasound to accelerate the anaerobic digestion of sewage sludge," *Water Sci. Technol.*, **36**(11), 121~128(1997).
10. Gogate, P. R., Pandit, A. B., "A review and assessment of hydrodynamic cavitation as a technology for the future," *Ultrasonics Sonochemistry*, **12**(1-2), 21~27(2005).
11. 맹장우, "수리동력학적 캐비테이션전처리에 의한 하수슬

- 러지의 혐기성 소화효율 향상,” 석사학위논문, 인하대학교(2009).
12. Owen, W. F., Stuckey, D. C., Healy Jr., J. B., Young, L. Y., and McCarty, P. L., “Bioassay for monitoring biochemical methane potential and anaerobic toxicity,” *Water Res.*, **13**, 485~492(1979).
  13. APHA, “Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater,” 20th ed. American Public Health Association, Washington D.C.(1998).
  14. Kampas, P., “Sidestream treatment for improved BNR performances,” Ph. D. Thesis, Cranfield University(2006).
  15. 고현웅, 정병길, 정연화, 김형석, 장성호, 성낙창, “회분식 초음파 전처리를 이용한 하수슬러지의 분해에 관한 연구,” 유기성폐자원학회지, **12**(4), 121~129(2005).