

# 수리동력학적 캐비테이션을 이용한 하수 슬러지의 전처리-I: 전처리 시스템의 최적화

## Sludge Pre-Treatment by Hydrodynamic Cavitation-I: Optimization of Pre-Treatment System

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 12월 16일 채택)

**Abstract** : Most of the sludge pre-treatment methods to improve the anaerobic digestibility of sludge are not practiced in the fields with low economical efficiency. The venturi cavitation system (VCS) adopting hydrodynamic cavitation is simple and requires low energy. This research was conducted to investigate the optimum design and operating conditions of the VCS. The experimental results indicated that the optimum number of venturi in series was three, and the suction mode operation of the pump yielded 1.6 times higher pre-treatment efficiency per unit energy consumption than the discharge mode. The combination of venturies with different throat sizes did not affect the pre-treatment efficiency. Also, the parallel installation of the three in series venturi unit yielded 30% higher pre-treatment efficiency per unit energy consumption than the single unit. Under parallel conditions, the solubilization efficiency was 5.6 mg  $\Delta$ SCOD/g TS/kWh, which is higher than the previously reported value.

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

**요약** : 하수 슬러지의 혐기성 소화성을 향상시키기 위한 다양한 전처리 방법이 제시되어 있지만, 대부분 낮은 경제성 등의 문제로 현장 적용에 제한을 받고 있다. 본 연구는 장치의 구성 및 유지관리가 용이한 수리동력학적 캐비테이션 방법을 이용한 venturi cavitation system (VCS)의 전처리 효율을 향상시키기 위한 최적 설계 및 운전조건을 도출하기 위하여 수행하였다. VCS에서 벤츄리의 직렬 연결 개수는 3개일 때 가장 높은 전처리 효율을 나타내었고, 펌프는 흡입방식이 압송방식에 비하여 단위 에너지 투입량 당 1.6배 높은 전처리 효율을 나타내었다. 캐비테이션이 발생하는 조건에서 벤츄리의 목 직경 조합은 전처리 효율에 영향을 주지 않았다. 또한 3개의 벤츄리가 직렬로 연결된 벤츄리를 병렬로 설치할 경우 에너지 투입량 당 전처리 효율이 30% 향상되었다. 병렬 연결 운전조건으로 슬러지를 처리하였을 때, 에너지 소모량 당 가용화 효율은 5.6 mg  $\Delta$  SCOD/g TS/kWh로 기존의 수리동력학적 전처리장치보다 우수하였다.

**주제어** : 슬러지 전처리, 공동화, 수리동력학, 벤츄리, 가용화

## 1. 서론

국내 하수슬러지는 2008년도에 총 280만 톤이 발생하였으며, 하수처리장의 신설과 고도처리를 위한 탄소원 주입 등의 이유로 해마다 증가하고 있는 추세이다. 발생량의 73.4%가 해양배출로 처리되고 있는 실정이지만, 해양오염 방지법 강화에 따라 2012년 이후 해양배출이 금지 될 것으로 예상되어 육상 처리 방안 마련이 시급한 상황이다.<sup>1)</sup> 혐기성 소화 공정은 슬러지 감량화 방안의 하나로 신재생에너지인 메탄을 생산하는 장점이 있지만, 슬러지의 낮은 생분해성과 긴 소화시간 등이 문제로 지적되고 있다. 특히 2차 슬러지의 대부분을 구성하는 미생물은 세포벽에 둘러싸여 있어 생분해도가 낮기 때문에, 이를 해결하기 위한 방안으로 다양한 전처리 방법들이 개발, 제시되고 있다.

잉여슬러지의 소화효율 향상을 위하여 기계적 처리법<sup>2)</sup>과 열처리법,<sup>3)</sup> 캐비테이션(cavitation) 방법,<sup>4)</sup> 산·알칼리,<sup>5)</sup> 오존<sup>6)</sup>을 이용하는 방법 등 다양한 방법이 연구되어 왔다. 이들 방법 중 현재 상용화 되어 적용되고 있는 방법은 열처

리 방법과 초음파를 이용한 방법이다. 그러나 열처리 방법(Cambi<sup>TM</sup> process)의 경우 운전비용(100,000원/DS ton)이 높고, 처리슬러지를 15~20%로 탈수하기 위한 탈수기, 스팀 보일러, 가스발전기 등 많은 부대시설이 필요하며, 열교환기에서의 파울링, 악취 발생 등의 문제점이 보고되어 있다.<sup>3)</sup> 초음파를 이용한 방법(SONIX<sup>TM</sup>)의 경우 초음파 발생기를 사용하여 캐비테이션을 발생, 파괴시키며 이때 수반되는 강한 전단력과 국지적 고온, 고압을 이용하여 슬러지의 생분해도를 높이는 방법이지만, 높은 운전비용(55,000원/DS ton)과 초음파 발생 전극의 잦은 교체가 문제로 지적되어 왔다.<sup>4,7)</sup> 이밖에도 산·알칼리에 의한 전처리는 에너지 요구량이 비교적 낮지만, 전처리 전후에 다량의 화학약품이 요구된다.<sup>5)</sup> 오존 산화의 경우 슬러지 내의 철, 아연의 농도를 높이고 에너지의 요구량이 높다는 단점을 가지고 있다.<sup>8)</sup> 효소 등을 이용한 생물학적 방법은 에너지 소모량이 적지만, 비용이 높은 편이며, 악취를 발생시키고, 특히 안정성이 불확실하다는 점에서 불리하다.

캐비테이션을 이용하는 또 다른 전처리방법은 수리동력

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

학적 캐비테이션(hydrodynamic cavitation, HC) 방법이다. 이 방법은 오리피스나 벤츄리 등과 같이 단면적이 급속히 감소하는 물체에 유체가 통과할 때 축소부와 확대부의 유속에 따른 압력차에 의하여 캐비테이션이 발생하고 파괴되는 과정에서 발생하는 충격파에 의하여 세포벽이 파괴되는 원리를 이용한 것이다.<sup>9)</sup> 독일 Biogest사에서 개발된 Crown disintegration system (CDS)은 HC을 이용하는 방법으로 이 시스템은 homogenizer, progressive cavity pump (PCP), disintegrator 및 control panel로 구성되어 있다. 슬러지는 PCP에서 12 bar로 가압 후 압송하여 homogenizer를 거쳐 disintegration unit으로 유입되어 처리된다. CDS의 경우 biogas의 증가율이 28%, VS 감량율이 20% 정도로 다른 전처리 방법들에 비하여 낮은 소화효율 개선효과를 나타내었으나 운전비용(13,000원/DS ton)이 낮아 열처리나 초음파를 이용한 방식보다 경제성이 높은 것으로 보고되어 있다.<sup>10)</sup> 그러나 CDS는 단일 벤츄리 및 고압펌프의 사용으로 동력비가 많이 소요된다.

본 연구에서 제시된 venturi cavitation system (VCS)은 고압 펌프를 이용하지 않는 장치로, 제시된 CDS의 문제점인 높은 전력비용의 문제를 개선하였다. 실험실 규모로 진행되었던 선행연구에 의하면 대상 슬러지 종류 및 고형물 함량, 벤츄리의 확장각에 따른 최적 가용화 효율을 나타내는 조건을 도출하였으나,<sup>11)</sup> 아직 현장 적용을 위해서는 개선의 여지가 남아 있다.

본 연구는 VCS의 에너지 효율을 개선하기 위하여 수행되었다. 이를 위하여 VCS에서 벤츄리의 연결개수, VCS의 운전방식(흡입/압송), 벤츄리의 목 직경 조합, 펌프의 회전수, 벤츄리의 직/병렬 연결 등의 인자가 가용화 효율에 주는 영향 정도를 파악하여 최적의 효율을 나타내기 위한 운전조건을 도출하기 위하여 수행하였다.

## 2. 실험재료 및 방법

### 2.1. 대상슬러지

실험은 부천시 북부 수자원 생태공원에서 발생한 농축 잉여슬러지를 이용하여 수행하였다. 잉여슬러지는 원심농축기에 의하여 고형물 함량이 약 2.5~3.5% 정도로 농축되어 하수처리장내 운전 중인 혐기성 소화조에 투입되고 있다. 잉여슬러지의 평균 총 화학적 산소요구량(total chemical oxygen demand, TCOD), 용존성 화학적 산소요구량(soluble che-

**Table 1.** Characteristics of concentrated waste activated sludge used in this study

Item	Average concentration (mg/L)
TCOD	30,455±2,827
SCOD	200±115
TS	27,954±3,271
VS	20,470±1,908

mical oxygen demand, SCOD), 총 고형물량(total solid, TS), 휘발성 고형물량(volatil solid, VS)은 Table 1에 나타난 바와 같다.

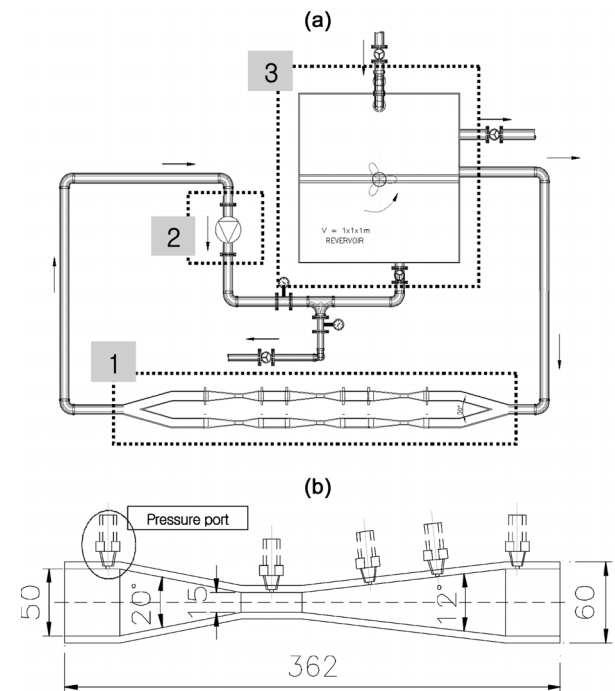
### 2.2. 수리동력학적 캐비테이션 발생장치

연구에 사용된 VCS를 Fig. 1에 나타내었다. VCS는 크게 벤츄리부(Fig. 1①), 이송펌프(Fig. 1②, 2.2 kW), 저류조(Fig. 1③)로 구성되어 있다. Fig. 1(a)는 3개의 직렬 연결한 벤츄리를 병렬로 설치한 경우를 나타내고 있다. 슬러지 저류조에는 기계식 교반기를 설치하여 실험기간 동안 슬러지를 혼합하였다. 또한 제어 판넬을 통해 유량 및 소비 전력을 확인하였다.

VCS에 사용된 벤츄리의 유입·유출부의 관 직경은 50 mm, 목 부분은 직경이 13~19 mm이었다. 벤츄리 유입부에서 목 부분으로 축소되는 각도는 20°, 목 부분을 지나 유출부로 확대되는 각도는 12°로, 이는 Bae 등<sup>11)</sup>이 실험실 규모 VCS에서 산정한 최적 값이었다. 또한 벤츄리의 유입부에 1개, 목 부분에 1개, 유출부에 3개의 압력 포트를 설치하여 운전 중 벤츄리의 각 부분에서 발생하는 압력변화를 관찰하였다(Fig. 1(b)).

### 2.3. 실험조건

VCS의 에너지 효율을 개선하기 위하여 Table 2에 나타난 바와 같이 벤츄리 구성 및 운전 조건을 변화시키며 실험하였다. 벤츄리는 목 부분의 지름에 따라 “D지름” 형태로 구분하였다. 예를 들어 D15는 목 부분의 지름이 15 mm인 벤츄리를 말한다. 또한 “D15-17-19”로 표기되어 있는 것은 직렬로 연결되어 있는 벤츄리 3개의 목 부분 지름이 각각



**Fig. 1.** Experimental apparatus; (a) VCS system and (b) venturi.

Table 2. Conditions of VCS operation

Condition	Number of venturi	Combination of venturi diameter	Pump mode	Pump Hertz
Number of Venturi	Series 1~4 venturies	D15	Suction	60 Hz
		D15-16		
		D15-16-19		
Mode of pump operation	Series 3 venturies	D15-16-17-19	Suction	60 Hz
		D15-17-19	Discharge	
		D13-15-17		
Combination of venturi diameter	Series 3 venturies	D13-17-19	Suction	60 Hz
		D15-16-19		
		D15-17-19		
Hz of pump operation	Series 3 venturies	D15-17-19	Suction	40 Hz
				50 Hz
				60 Hz
parallel combination of venturies	Series 3 venturies	D15-17-19	Suction	60 Hz
	Parallel 3 venturies	D15-17-19 × 2		

15, 17, 19 mm 입을 의미하며, 가장 앞에 표기한 벤츄리의 순서로 슬러지가 통과한다. 펌프의 회전수는 컨트롤 패널에 부착된 펌프에 투입하는 주파수(Hz)를 변화시켜 조절하였다. 펌프의 유량은 운전조건에 따라 6.2~14.5 m<sup>3</sup>/hr의 범위로 운전되었다. 모든 실험에는 650 L의 슬러지를 사용하였으며, 각 운전조건에서의 에너지 투입량은 전력량계를 이용하여 측정하였다.

### 2.4. 분석 방법

VCS로 슬러지 전처리를 하였을 때 가용화 정도를 알아보기 위하여 TCOD, SCOD, TS 및 VS를 *Standard Methods*<sup>12)</sup>에 준하여 분석하였다. 또한 VCS를 운전하는 동안 슬러지의 이송 유량과 벤츄리의 각 부분의 압력 및 전력 사용량을 측정하였다.

## 3. 실험 결과 및 고찰

### 3.1. VCS의 벤츄리 연결 개수의 변화

Fig. 2에는 VCS의 벤츄리의 직렬 연결 개수를 1개에서 4개로 변화시키며 그에 따른 가용화 효율을 나타내었다. 벤츄리는 목 직경이 작은 것에서 큰 것의 순서로 조합하였다. 이는 이 경우 모든 벤츄리에서 캐비테이션이 발생하였지만 역으로 조합한 경우 가장 목 직경이 작은 마지막 벤츄리에서만 캐비테이션이 발생하였기 때문이다. 가용화 효율은 단위 고형물 당 SCOD의 증분(mg ΔSCOD/g TS)으로 나타내었는데 이는 각 실험에서 고형물 농도 차이가 다소 있었기 때문이다. Fig. 2(a)에서 전처리 횟수(number of pre-treatment times)는 총 처리시간을 저류조의 슬러지(650 L)

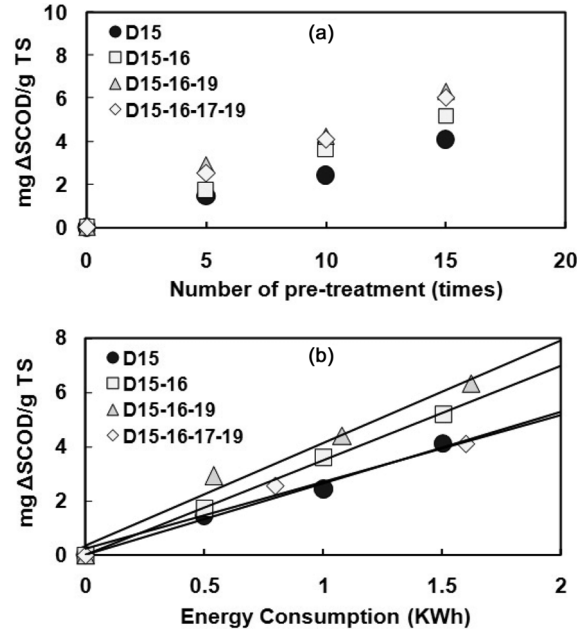


Fig. 2. Effects of the number of venturi in the system.

가 벤츄리를 한번 통과하는데 걸리는 시간(약 5~6분)으로 나눈 값이다.

가용화 효율은 벤츄리 연결 개수가 3개까지 늘어날수록 증가하였으나, 벤츄리 연결 개수에 비례하여 증가하지는 않았다(Fig. 2(a)). 또한 4개의 벤츄리를 연결하였을 때에는, 3개의 벤츄리 연결의 경우에 비하여 가용화 효율이 증가하지 않았다. 이는 벤츄리의 개수가 3개로 늘어날 때까지는 벤츄리 내부에서의 캐비테이션 발생 및 소멸에 따른 에너지 손실량이 증가하였으나 그 이상에서는 그 양이 더 이상 증가하지 않았기 때문인 것으로 판단된다. 실제로 캐비테이션 발생 영역의 크기가 3개의 연결조합에 비하여 4개의 연결조합에서 다소 감소한 것이 육안으로 관찰되었다.

Fig. 2(b)는 에너지 소모량에 따른 가용화 효율 변화를 나타낸 것으로 벤츄리를 1개에서 3개로 연결 개수를 증가시킬 경우 에너지 소모량 당 가용화 효율이 증가하였다. 이는 벤츄리 연결 개수가 증가할 때, 펌프의 운전에 비슷한 에너지를 소모하였으나 캐비테이션 영역을 통과하는 횟수가 증가하였기 때문이다. 각 경우의 기율기로부터 벤츄리의 개수가 1개에서 2개 및 3개로 증가함에 따라 각각 가용화 효율이 32% 및 52% 증가함을 알 수 있었다. 벤츄리를 4개 연결하였을 때 가용화 효율은 증가하지 않고 오히려 1개 연결한 경우와 비슷한 결과를 나타낸 것은 앞서 설명한 바와 같이 캐비테이션의 발생 영역의 부피가 감소하는데 기인한다.

### 3.2. VCS의 흡입/압송 방식 운전

3개의 벤츄리를 직렬로 연결한 후 배관연결과 밸브조작을 변경하여 펌프를 흡입/압송방식으로 운전하여, 운전 방식의 변화가 슬러지 전처리에 미치는 영향을 Fig. 3에 나타내었다. 펌프의 흡입방식에서 압송방식에 비하여 동일 횟수로

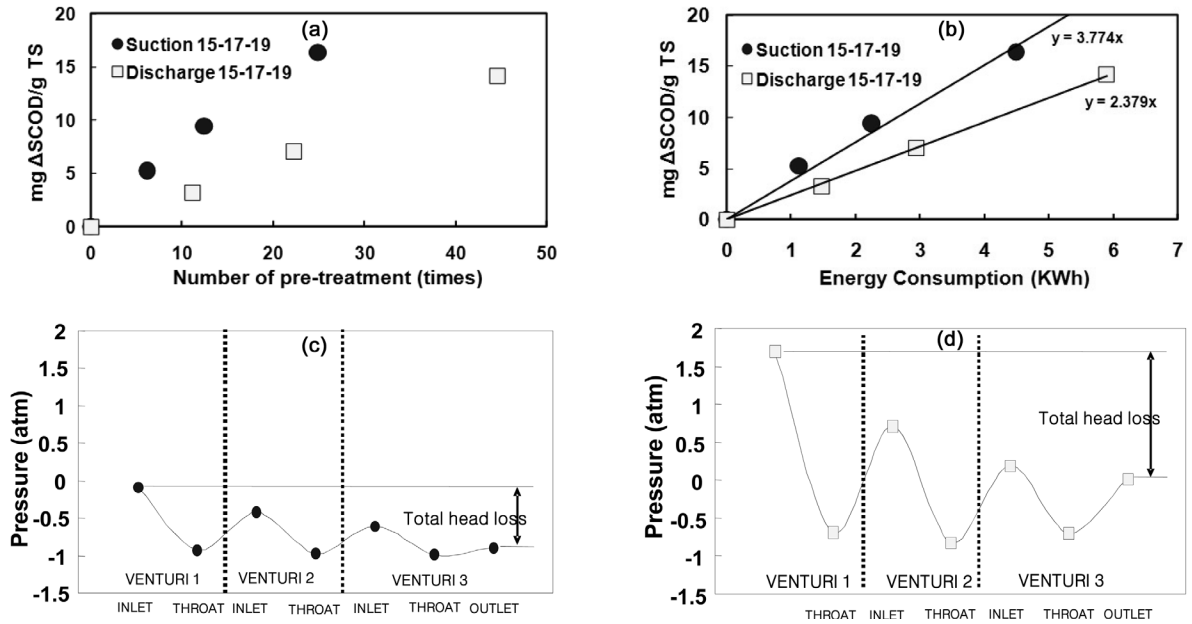


Fig. 3. Comparison between suction and discharge mode of pump operation ; (a) and (b) treatment efficiency, (c) and (d) pressure changes.

처리 시 약 2배의 가용화 효율을 나타내었다(Fig. 3(a)). 또한 에너지 소모량에 따른 가용화 효율도 흡입방식에서 압송방식에 비하여 약 60% 정도 높은 것을 알 수 있었다(Fig. 3(b)).

각 방식별 처리 효율의 차이는 벤추리의 유입부와 목 부분의 압력 분포로 설명할 수 있다. Fig. 3(c) 및 3(d)에 나타난 압력은 계기압으로 대기압을 0으로 하였다. 흡입방식에서는 각 벤추리 목 부분 즉 캐비테이션 발생부분의 압력이 약 -1.0 atm의 압력을 보였으나(Fig. 3(c)), 압송방식에서는 약 -0.7 atm의 압력 분포를 보였다(Fig. 3(d)). 벤추리 목 부분에서 낮은 압력은 캐비테이션 버블의 발생 영역이 크게

형성될 수 있음을 의미하므로 흡입방식에서 높은 슬러지 가용화 효율을 나타낸 것으로 판단된다. 흡입 및 압송방식에서 총 에너지 손실량은 각각 0.9 및 1.7 atm으로 압송방식에서 벤추리를 통과하면서 발생하는 총 에너지 손실량이 큰 것을 알 수 있다. 압송방식에서의 이 같은 높은 에너지 손실량은 캐비테이션 생성 및 소멸에 의한 것이라기보다는 높은 압송 압력으로 인한 유체 내 열손실, 난류, 관 벽과의 마찰 등에 의한 것으로 판단된다.

### 3.3. VCS의 벤추리부의 직경 조합의 변화

벤추리 목 부분의 직경변화가 슬러지의 전처리에 미치는

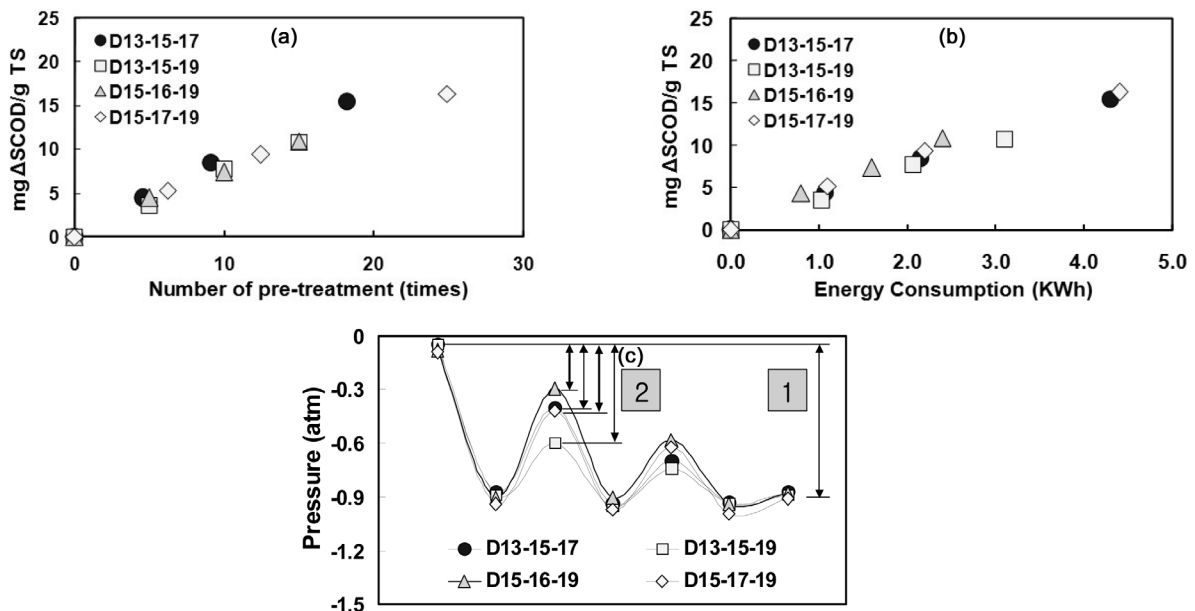


Fig. 4. Treatment efficiencies and pressure changes for the system with different combinations of venturi diameter.

영향은 벤츄리 3개 직렬연결 및 흡입방식 펌프운전 조건에서 비교하였다. 벤츄리의 직경은 3.1에서와 마찬가지로 목부분의 직경이 작은 것에서 큰 것의 순서로 조합하였으며, 사용된 벤츄리의 최소 목 직경은 9 mm이었다. 최소 목 직경을 사용한 벤츄리 조합인 D9-13-15, D10-15-17의 경우 벤츄리부의 가장 마지막 단 유출부에서 압력회복이 일어나지 않고 약 -1 atm 상태로 그대로 펌프에 흡입되었다. 이는 앞 단에 매우 작은 목 직경의 벤츄리를 설치할 경우 유량이 감소하여 펌프에 최소 흡입 유량보다 적은 유량이 흡입되기 때문에 압력의 회복이 일어나지 않기 때문인 것으로 판단된다. 이로부터 실험에 사용되는 벤츄리의 목 부분의 직경은 작은 것에서 큰 순서로 조합되어야 하며, 유입 관경에 따른 최소 목 직경이 존재함을 알 수 있었다.

Fig. 4는 벤츄리의 직경조합의 변화에 대한 가용화 효율을 나타낸 것으로 전처리 횟수(Fig. 4(a)) 및 에너지 소모량(Fig. 4(b))에 따른 직경조합별 가용화 효율 차이는 미미하였다. 이와 같은 결과는 벤츄리 목 직경조합에 따른 각 벤츄리의 압력변화(Fig. 4(c))로 설명될 수 있다. 모든 벤츄리 직경조합에서 최초 유입압력과 최종 유출 압력이 모두 유사하였는바(Fig. 4(c)에서 ①) 이는 중간 과정에서 연결된 벤츄리에서의 압력변화는 조금씩 다르지만(Fig. 4(c)에서 ②) 총 압력 손실이 일정함을 의미한다. 압력 손실이 주로 캐비테이션 발생 및 소멸에 의한 것이므로 가용화 효율 역시 유사한 수준으로 나타난 것으로 판단된다.

### 3.4. VCS의 펌프 회전수의 변화

펌프의 회전수 변화가 전처리에 미치는 영향은 Fig. 5에 나타내었다. 펌프는 흡입방식으로 운전되었고, 회전수는 VCS의 컨트롤 패널에서 펌프의 주파수를 40, 50, 60 Hz로 조

절하였으며, 이때 유량은 8 m<sup>3</sup>/hr로 일정하였다. 주파수를 이보다 더 낮게 조정한 경우에는 3개의 벤츄리 중 1개 내지 2개의 벤츄리에서만 캐비테이션이 발생하였기 때문에 실험에서 제외하였다. 벤츄리는 D15-17-19의 조합을 사용하였다.

주파수가 증가함에 따라 가용화 효율도 증가하는 것을 알 수 있었다(Fig. 5(a)). 그러나 일반적으로 펌프의 주파수 증가는 회전수를 증가시키고 그에 따라 유량 및 소모 에너지가 비례하여 증가한다. 따라서 에너지 소모량과 가용화 효율은 선형적으로 비례하는 것으로 나타나(Fig. 5(b)), 같은 직경의 벤츄리 조합에서 펌프 주파수의 변화는 그로 인해 더 소모된 에너지만큼의 가용화 효율 증가 뿐, 추가적인 증가는 없다고 판단되었다.

### 3.5. 직렬연결 벤츄리의 병렬 설치 효과

VCS의 에너지 소모량 당 가용화 효율을 증가시키는 방안으로 벤츄리의 병렬연결 가능성을 평가하였다. 이를 위하여 VCS의 벤츄리부를 개조하여 직렬로 연결된 벤츄리 장치를 병렬로 설치하여 그 효과를 비교하였다. 각 벤츄리는 같은 직경의 조합을 사용하여 두 열의 벤츄리에서의 유량 차이가 없도록 하였다. 각 열의 벤츄리는 분기점에서 15도 각도로 분기하였다.

VCS의 직렬연결과 직렬연결 벤츄리를 병렬로 설치한 경우 즉 단열과 병렬에서의 가용화 효율을 비교한 결과를 Fig. 6에 나타내었다. 슬러지의 전처리 횟수에 따른 가용화 효율은 단열연결이 병렬의 경우보다 다소 높았으나 큰 차이는 없었다(Fig. 6(a)). 병렬연결 시 슬러지의 SCOD는 초기에 84 mg/L에서 30회 처리 후 534 mg/L로 450 mg/L 증가하였다. 처리 유량은 단열 및 병렬연결 시 각각 8 m<sup>3</sup>/hr

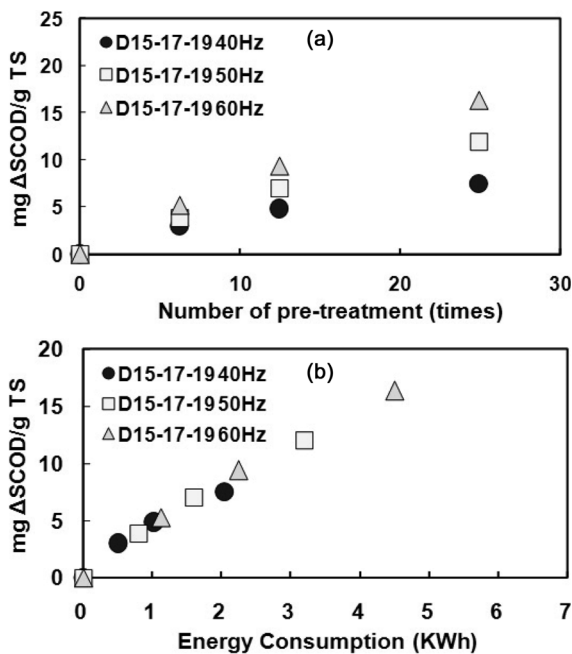


Fig. 5. Treatment efficiencies at various pump speeds.

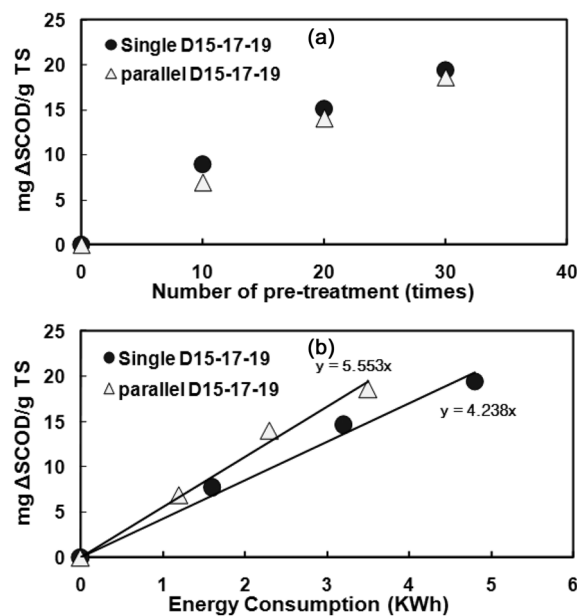


Fig. 6. Treatment efficiencies for single and parallel combination of venturiers.

및 15.5 m<sup>3</sup>/hr로 병렬연결의 경우가 약 2배이었으나 에너지 소모량 당 가용화 효율은 병렬로 연결한 경우가 단열의 경우에 비하여 약 30% 높았다(Fig. 6(b)). 전처리 횟수에 따른 가용화 효율이 유사하고 유량이 2배이었지만 병렬연결에서 에너지 소모량 당 가용화 효율이 30%만 증가한 것은 유량의 증가에 따라 펌프의 소모 전력이 많아졌기 때문이다. 따라서 병렬연결에서 에너지 소모량 당 가용화 효율이 증가한 것은 단위 시간당 처리 유량이 많아짐에 따라 펌프의 최대 운전 용량에 가깝게 근접하여, 낮은 이송 용량의 운전에서 오는 펌프 자체의 손실 에너지가 줄어들었기 때문으로 판단된다. 결과적으로 병렬연결의 경우 동일 펌프에서 처리 유량을 증가시켜 처리시간을 단축시키고 설치 면적이 감소시킬 수 있을 것이다.

### 3.6. 타 전처리 장치와의 비교

본 연구의 병렬연결 조건(3.5)에서 얻은 실험결과와 기존에 보고된 Biogest사 장치(Crown)의 가용화 효율<sup>10)</sup>과 비교한 결과를 Fig. 7에 나타내었다. 대상 슬러지는 약 6%의 SAS (surplus activated sludge)로 에너지 투입량 당 가용화 효율은 약 2.6 mg ΔSCOD/g TS/kWh로 계산되었다. 실규모 초음파 전처리 장치(SONIX™)의 경우도 가용화 효율은 2.9 mg ΔSCOD/g TS/kWh로 추정되었다.<sup>13)</sup> 본 연구에서 제시한 시스템의 가용화 효율은 5.6 mg ΔSCOD/g TS/kWh를 나타내어 Biogest사 및 기존 초음파 방법보다 우수함을 알 수 있었다. 김<sup>14)</sup>은 캐비테이션을 이용하는 가용화 장치로 SS가 2,880 mg/L, SCOD가 16.3 mg/L인 2차 슬러지를 15분간 전처리하였을 때 SCOD가 39.5 mg/L로 증가하였다고 보고하였다. 사용된 전력 등에 대한 자료가 없어 직접적인 비교는 어렵지만, 사용된 펌프(1.5 kW급 2기), 처리조 용량(40 L) 등을 고려할 때 본 연구에서 제시된 시스템보다는 에너지 사용량 당 효율이 낮은 것으로 판단된다.

또한 맹과 배<sup>15)</sup>는 VCS와 초음파를 이용한 전처리 방법을 비교하여 두 방법에 있어서 단위 에너지 소모량 당 가용화 효율은 유사하였으며, 최대 가용화 효율은 0.18 kWh/L에서 302 mg ΔSCOD/g TS라고 보고하였다. 따라서 비록 두 방

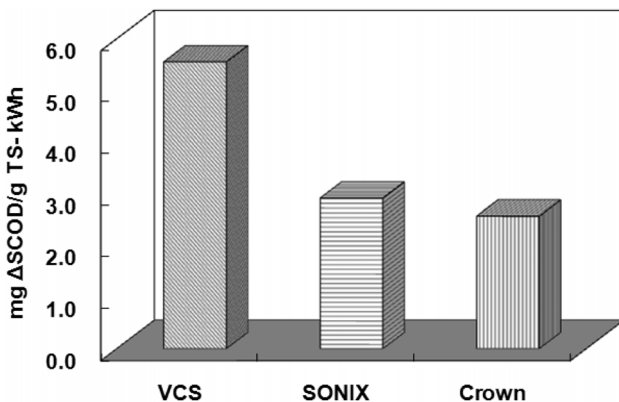


Fig. 7. Comparison of treatment efficiencies with other hydrodynamic cavitation systems.

법의 에너지 효율을 유사하지만 운영 및 유지비와 향후 에너지효율 개선 잠재력 면에서 볼 때 VCS를 이용하는 것이 현장 적용에 유리하다고 제시하였다.

## 4. 결론

벤츄리를 이용한 슬러지 전처리 장치에서 벤츄리의 연결 개수, 펌프의 운전 방법, 벤츄리의 직경조합, 펌프의 회전수, 병렬연결 등의 조건들이 가용화 효율에 미치는 영향에 대하여 조사하여 다음과 같은 결론을 도출하였다.

- 1) 에너지 소모량 당 가용화 효율은 벤츄리의 연결개수가 3개까지는 높아졌으나 4개 연결한 경우는 오히려 낮아졌다.
- 2) 펌프를 흡입방식에서 운전한 결과 압송방식에 비해 에너지 투입량 당 가용화 효율이 1.6배 높았다. 이는 벤츄리의 목 부분에서 평균 압력이 낮은 흡입방식에서 캐비테이션 형성이 유리하였으며, 압송방식에서는 유입부분의 높은 손실로 인하여 캐비테이션의 발생과 무관한 에너지의 소모가 많았기 때문이다.
- 3) 벤츄리 목 부분 직경변화에 따른 가용화 효율의 차는 미미하였는바, 이는 모든 직경 조합에서 가용화 효율에 영향을 미치는 총 손실 압력이 일정하였기 때문이다.
- 4) 펌프의 회전수가 증가함에 따라 가용화 효율이 증가하는 것으로 나타났으나, 회전수에 따른 에너지 소모량 당 가용화 효율의 차이는 없었다.
- 5) 직렬 연결된 벤츄리를 병렬로 설치한 경우가 단열로 설치 한 경우보다 에너지 소모량 당 가용화 효율이 약 30% 높았다. 따라서 병렬연결 할 때 처리유량의 증가로 인하여 처리 시간이 단축되고 설치 면적이 감소하는 부수적 효과를 얻을 수 있다. 병렬 연결 운전조건으로 슬러지를 처리하였을 때, 에너지 소모량 당 가용화 효율은 5.6 mg ΔSCOD/g TS/kWh로 기존의 수리동력학적 전처리장치보다 우수하였다.

## 사 사

본 연구는 환경부 Eco-STAR Project 수행기관인 수처리 선진화사업단(과제번호: C1-1-005-3-0-2008)의 연구비 지원에 의해 수행되었습니다.

KSEE

## 참고문헌

1. 환경부. “하수도 통계-2008,” 13(2009).
2. Harrison, S. T. L., “Bacterial cell disruption : A key unit operation in the recovery of intracellular products,” *Biotech.*

- Adv.*, **9**, 217~240(1991).
3. 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).
  4. Show, K. Y., Mao, T. and Lee, D. J., "Optimisation of sludge disruption by sonication," *Water Res.*, **41**, 4741~4747 (2007).
  5. Torres, M. L. and Llorens, M. C. E., "Effect of alkaline pretreatment on anaerobic digestion of solid wastes," *Waste Management*, **28**, 2229~2234(2008).
  6. 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).
  7. 서울특별시. "서울특별시 4개 하수처리장 하수슬러지 처리시설 증설 기본계획 요약보고서," 93~103(2006).
  8. Chu, C. P., Chang, B. V., Liao, G. S., Jean, D. S. and Lee, D. J., "Observations on changes in ultrasonically treated waste-activated sludge," *Water Res.*, **35**, 1038~1046(2001).
  9. Arrojo, S. and Benito, Y. "A theoretical study of hydrodynamic cavitation," *Ultrason. Sonochem.*, **15**, 203~211(2008).
  10. Kampas, P., "Sidestream treatment for improved BNR performances," One year report, Cranfield University(2005).
  11. Bae, J. H., Nguyen, D. X. and Kim, H. J., "The performance of the sludge pretreatment system with venturi tubes," *Water Sci. Technol.*, **57**, 131~137(2008).
  12. APHA "Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater," 20th ed. American Public Health Association, Washington D.C.(1998).
  13. Kampas, P., "Sidestream treatment for improved BNR process performance," Ph. D. Thesis, Cranfield University (2007).
  14. 김동하, "Cavitation에 의한 슬러지 가용화와 PGA를 이용한 하수고도처리에 관한 연구," 대한상하수도학회지, **22**(4), 449~454(2008).
  15. 맹장우, 배재호, "수리동력학적 및 초음파 캐비테이션 슬러지 전처리 장치의 비교 연구," 대한환경공학회지, **31**(2), 90~95(2009).