



# 혐기성 소화조의 에너지 효율 향상을 위한 수직 왕복형 교반기 적용에 관한 연구

## A Study on the Effect of Energy Saving with Newly Implemented Vertical Circulating Tray Mixer in Anaerobic digester

주윤식<sup>1</sup>·손건태<sup>2</sup>·배영준<sup>1</sup>·박정수<sup>1</sup>·이승환<sup>2\*</sup>

Yoon-Sik Joo<sup>1</sup>·Guntae Son<sup>2</sup>·Youngjun Bae<sup>1</sup>·Jungsoo Park<sup>1</sup>·Seunghwan Lee<sup>2\*</sup>

<sup>1</sup>주식회사 우진 기술연구소, <sup>2</sup>금오공과대학교 환경공학과

<sup>1</sup>Technology R&D Center, Woojin Co., Ltd.

<sup>2</sup>Department of Environmental Engineering, Kumoh National Institute of Technology.

### ABSTRACT

Relatively low efficiency in anaerobic digestion process is mainly caused by unproper mixing method. In this study, tray motion type agitator was applied in actual anaerobic digestion tank in order to improve the digestion efficiency, equalize the flow velocity distribution and energy saving. The impeller of tray motion type agitator was reciprocated vertically. Gas lift type agitator and tray motion type agitator appears almost same mixing efficiency include digestion rates. However, tray motion type agitator have shown that lower energy consumption compared to the conventional gas lift type agitator. Implementation of tray motion type agitator in the anaerobic digestion tanks contributed to the stabilization of mixing environment, efficiency and energy efficiency of the tank.

**Key words:** Anaerobic digestion, Energy saving, Digestion efficiency, Sludge, Tray motion type agitator

**주제어:** 혐기성 소화, 에너지 소비 절감, 소화 효율, 슬러지, 수직왕복형 교반기

## 1. 서 론

2014년말 기준으로 국내에서 가동중인 공공하수처리시설은 500 m<sup>3</sup>/일 이상이 총 597개소이고, 총 시설용량은 24,751,820 m<sup>3</sup>/일이며, 연간 3,654,237 m<sup>3</sup>의 하수 슬러지가 발생된다(Ministry of Environment, 2014). 또한 전국 597개의 하수처리시설 중 62개소에 하수슬러지 소화조가 설치되어 있으며, 시설용량은 1,351,196 m<sup>3</sup>이다.

현재 대부분의 혐기성 소화조는 가수분해-산생성-메탄생성의 3단계로 이루어지고 있으며, 일반적으로 낮은 슬러지 생산량, 낮은 영양염류 요구도, 메탄가스

생성 등 호기성 소화에 비해 많은 장점을 지니고 있다(Kim et al, 2002; Kim et al., 2004). 그러나 현재 국내의 소화조는 선진국에 비하여 소화조의 소화효율이 낮게 나타나는데, 그 이유는 낮은 유기물 농도의 투입, 소화조 내의 낮은 교반 효율, 잉여슬러지의 고분자성 유기물의 난분해 등이 있다(Owen et al., 1979; Malina and Pohland., 1992; Shelton and Tiedje., 1984).

따라서 혐기성 소화조의 소화율을 높이기 위해서는 소화조 내부의 적절한 혼합이 필요하며, 적절한 교반은 소화재 내의 슬러지를 균일한 상태로 유지시켜 소화효율을 촉진시키게 된다. 만약 교반이 적절하지 않을 경우 가스발생량의 저하, 상등수 수질 악화, pH 저하, 소화조 내 온도 저하와 같이 소화효율을 감소시키는 문제를 유발하므로 적절한 교반은 중요한 설계인자라고 할 수 있다.

Received 5 September 2016, revised 24 January 2017, accepted 25 January 2017

\*Corresponding author: Seunghwan Lee (E-mail: dlee@kumoh.ac.kr)

pp. 001-006  
pp. 007-012  
pp. 013-019  
pp. 021-028  
pp. 029-037  
pp. 039-050  
pp. 051-062  
pp. 063-072  
pp. 073-081  
pp. 083-091  
pp. 093-101  
pp. 103-114

기존에 혐기성 소화조에 교반에 대한 많은 연구가 진행되어 왔다. 축산폐수 처리의 혐기성 소화에 간헐적인 교반을 권장하여 메탄 발생율을 높이는 연구가 있었다(Mills., 1979; Ben-Hasson et al, 1985). 그러나 너무 강한 교반은 오히려 슬러지 플럭의 구조를 파괴하여 미생물간의 공생관계(syntrophic relationship)를 방해하기도 한다(Dolfing., 1992). 그러나 혐기성 소화조 공정에 교반이 필요하다는 많은 연구 결과가 도출되었음에도 불구하고 교반방식에 대한 체계적인 연구는 전무한 실정이다.

따라서 본 연구에서는 혐기성 소화조에 교반방식이 다른 교반기를 실증 규모로 설치하여 교반방식에 따른 소화조의 소화효율을 비교·분석하였다. 또한 소화조의 소화효율과 함께 실제 소화조 내부에서의 슬러지 유동을 분석하여 실제 교반이 어떻게 진행되는지는 규명하였다. 그리고 본 연구에서는 기존 하수처리장의 혐기성 소화조를 활용한다는 측면에서 반응조 형상이나 온도, pH와 같은 운전인자를 변화시키지 않고, 교반기만 교체하여 교반 방식에 따른 혐기성 소화율과 교반특성 등을 검토하였다.

## 2. 실험 방법 및 재료

### 2.1 혐기성 소화조 운영 현황

D광역시 환경시설공단에서 가동 중인 소화조 현황은 Table 1과 같다. Table 1의 모든 소화조는 실린더형으로 이단소화조로 구성되어 있으며, 가스리프트식 교반방식을 적용하고 있다. 일반적으로 혐기성 소화조에는 가스리프트식 교반기가 많이 사용되는데, 이는 가스리프트식 방식의 원리가 극히 간단하고 조 내에서 발생한 가스의 일부를 가스 압축기로서 가압하여 다시 소화조로 보내기 때문이다. 그러나 가스식 교반방식은 다른 교반방식에 비해 소비동력이 높으며, 유지관리가 어렵우며, 교반강도도 낮다는 단점이 있다(KWWA., 2005). 실제로 D광역시의 혐기성 소화조

의 가스리프트식 교반방식에서 가스송풍기 가동에 따른 에너지가 과다 소요되고 있으며 오일교환 등 유지보수에 많은 비용과 노동력이 투입되고 있는 실정이다. 또한 슬러지 입자에 의해 산기장치의 폐쇄이 발생하여 토출압력 증가와 교반력의 저하로 소화조 상하부 온도차 발생 등 슬러지 퇴적영역이 발생하기도 하였다. 따라서 본 연구에서는 D광역시 하수처리장 네 곳의 소화조 중 A처리장의 혐기성 소화조를 대상으로 기존 가스리프트식 교반기의 문제점을 해결하기 위한 연구를 진행하였다.

### 2.2 교반방식 개선

본 연구에서는 기계식 교반을 이용하여 혐기조에 적용된 교반기술을 최적화하고자 하였다. 일반적으로 기계식 교반기는 크게 회전식 교반과 수직왕복형 교반으로 나누어진다. 일반적으로 회전식 교반방법은 임펠러의 회전운동을 통한 교반으로 수직왕복형 교반에 비하여 슬러지의 혼합을 위해 배플(baffle)을 설치하여야 하기 때문에 높은 초기 시설비와 동력비를 나타내며, 교반기의 중량이 높아진다는 단점이 있다. 그에 비하여 본 연구에 사용된 교반기는 수직왕복형 교반기로 모터의 회전 캠을 사용하여, 교반기 축의 운동을 수직왕복운동형으로 전환시키며, 교반기 하부의 임펠러를 통해 교반이 이루어지는 장치이다. 따라서 회전식 교반기에 비해 경량화가 가능하고, 소비동력이 적으며, 유지관리가 용이하다. Fig. 1에 본 연구에 사용된 수직왕복형 교반기의 임펠러를 나타내었다. 임펠러는 도넛 형태의 원형으로 이루어져 있으며, 임펠러가 상승 또는 하강 시 유체는 임펠러 내부로 상하류의 흐름을 생성한다. 또한 상, 하부평면이 이를 다시 밀어줌으로써 유체의 흐름이 발생한다.

수직왕복형 교반기는 수직방향으로의 운동을 하기 때문에 기존 교반기 구동부와 다른 구동부가 사용되어야 한다. 본 연구에서는 스코치 요우크 기구를 이용한 수직 왕복형의 교반기를 운전하였다. 스코치 요우크 기구는 왕복

**Table 1.** The present conditions of anaerobic digestion processes in D city

STP	Type	Capacity (m <sup>3</sup> )	Specification (m)	Mixing method	No of agitator	Power consumption
A	Cylindrical/2 step	39,400	Φ26.4 * H12.0	Gas lift	3	165 kWh
B	Cylindrical/2 step	41,200	Φ27.0 * H12.0	Gas lift	3	165 kWh
C	Cylindrical/2 step	26,400	Φ20.5 * H10.0	Gas lift	2	60 kWh
D	Cylindrical/2 step	21,700	Φ24.0 * H12.0	Gas lift	2	74 kWh



슬라이더 크랭크 기구 (reciprocation slider crank)를 응용, 변형 시킨 것이다. 스코치 요우크 기구 (scotch yoke mechanism)는 무한히 긴 연결봉을 갖는 슬라이더 크랭크 기구와 같은 것이다. 그림 2에서 보면 링크 2가 일정한 각속도로 회전하면 링크 4는 단진동을 하게 된다. 결과적으로 슬라이더는 단진동을 하게 된다. 스코치 요우크 기구는 단진동을 발생시키는 진동시험장치로 사용된다. 단진동은 후크의 법칙 (Hooke's law)에 의한 힘 이외에 다른 힘을 받지 않는 진동으로 단순조화진동 (간단히 단진동) 또는 자유진도 (free oscillation)이라고 한다. 후크의

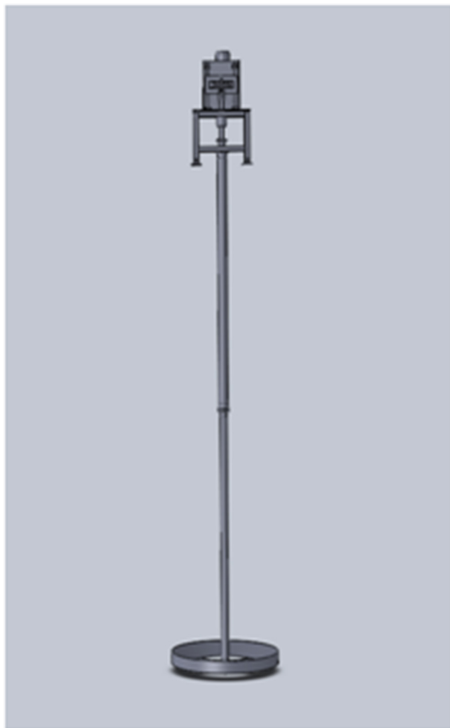


Fig. 1. Impeller of tray motion type agitator.

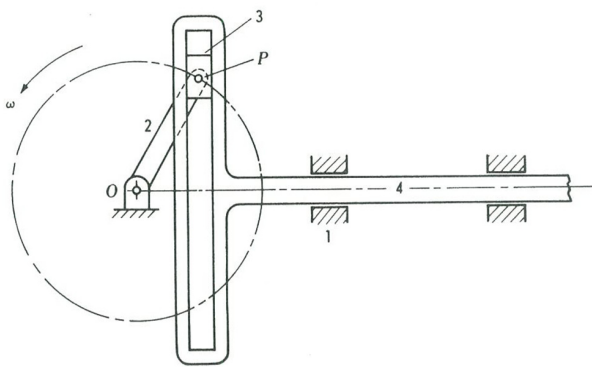


Fig. 2. Scotch yoke mechanism

법칙은 용수철과 같이 탄성이 있는 물체가 외력에 의해 늘어나거나 줄어드는 등 변형되었을 때 자신의 원래 모습으로 돌아오려고 반항하는 복원력의 크기와 변형 정도의 관계를 나타내는 물리 법칙이다. 후크의 법칙은 보통 일직선상에서 주기적이며, 사인 모양의 운동을 보여준다. 이 운동은 경우에 따라 서로 다른 진동수, 주기, 진폭, 위상을 가지게 된다. 여기서 진동수와 주기는 계의 구성에 따라 바뀌게 되며, 진폭과 위상은 초기 조건에 따라 바뀌게 된다.

스코치 요우크 기구의 운동방정식은 왕복 운동속도로 왕복 운동가속도로 나타낼 수 있다. 기구의 각이  $\theta$  일 때 왕복 운동속도와 왕복 운동가속도는 아래의 식 1과 2로 구할 수 있다.

$$v = b(\sin\theta + \frac{nsin2\theta}{2\sqrt{1-n^2sin^2\theta}})\omega [mm] \quad (1)$$

$$a = b(\cos\theta + \frac{ncos2\theta + n^3sin4\theta}{(1-n^2sin^2\theta)^{3/2}})\omega [mm/s^2] \quad (2)$$

여기서,  $b$ 는 크랭크 길이 (mm),  $c$ 는 커넥팅 로드 길이 (mm),  $a$ 는 가속도,  $n$ 은 크랭크와 커넥팅 로드 길이의 비율 ( $n=b/c$ )를 의미한다.

### 2.3 교반기 동력 선정

물체에 회전을 일으키는 힘을 토크 (torque)라고 하며, 회전수  $N$  (rpm), 회전반경  $R$  (m)의 교반기 구동부에서 중량  $W$  (kg)의 부하를 상하로 움직일 경우 다음의 관계식이 성립한다 (식 3).

$$T = R \times W(kg \cdot m) \quad (3)$$

만약, 회전반경 0.2 m, 회전수 32 rpm (약 1.06 cycle/2 sec)으로 구동하며, 중량을 1,000 kg으로 가정할 경우,  $T$ 는 200 kg·m로 나타나며, 계산된 토크를 이용하여 동력을 계산할 수 있다 (식.4).

$$kW = \frac{2\pi \times T \times N}{102 \times 60} = \frac{TN}{974} \quad (4)$$

따라서 식 4를 통해 적용동력이 6.57 kW로 계산되었으며, 본 연구조건에서의 임펠러를 비롯한 교반기의 무게 (약 1,675 kg)를 적용할 경우 약 11 kW로 동력이 산출된다.

pp. 001-006  
pp. 007-012  
pp. 013-019  
pp. 021-028  
pp. 029-037  
pp. 039-050  
pp. 051-062  
pp. 063-072  
pp. 073-081  
pp. 083-091  
pp. 093-101  
pp. 103-114

또한 실제 교반기 운전에서 소비되는 동력을 분석하기 위하여 전력분석계를 이용하여 1 시간의 교반과정에서의 적산되는 전력량을 측정하였다. 전력분석계는 Yokogawa(일본)의 WT500 전력분석계를 이용하였다. 전력측정은 교반기에 전기를 공급하는 전기실에서 각 교반기에 대한 소비전력을 측정하였으며, 전력계 전원을 켜 후 각 단자에 전압과 전류를 측정할 수 있게 연결하여 측정하였다.

## 2.4 실험항목

### 2.4.1 소화조 교반상태 및 효율

소화조 내부의 교반상태와 소화효율을 살펴보기 위하여 소화조 내부에 임의의 지점에 채수기를 이용하여 슬러지를 채취하여 농도를 분석하였다. 슬러지 샘플링 위치를 Fig. 3에 나타내었다. 채취지점 A에서는 소화조 상부, 채취지점 B는 소화조 중부, 채취지점 C는 소화조 하부, 채취지점 D는 소화조 최하부, 채취지점 E는 소화조 측면부에서의 슬러지를 샘플링 하였다.

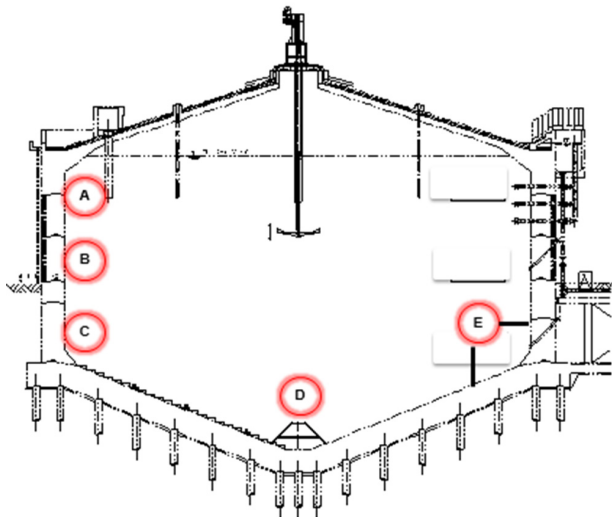


Fig. 3. Sludge sampling points in digestion tank.

### 2.4.2 슬러지 소화 특성

소화조 내부의 소화 특성을 보기 위하여 슬러지 농도(TS)와 슬러지의 온도를 측정하였다. 슬러지 농도는 폐기물공정시험법과 수질오염공정시험법에 따라 측정하였으며(Ministry of Environment., 2015, 2016), 슬러지의 농도 편차는 소화조 내부 상/중/하/최하부/측면

에서 채수한 슬러지를 분석하였으며, 일반적으로 10% 이내에서 완전교반으로 평가할 수 있으며, 슬러지의 온도도  $\pm 1^{\circ}\text{C}$ 의 범위에서 완전교반으로 평가할 수 있다(KWWA., 2005).

## 3. 실험결과

### 3.1 소화조 교반상태 비교

기존 가스리프트식 교반기와 수직왕복형 교반기의 교반상태를 비교하기 위하여 온도, TS, VS 등 다양한 항목들에 대하여 측정 지점별로 측정된 값을 Table 2에 나타내었다. 본 실험에 사용된 슬러지는 슬러지 저류조에서 동일한 분배라인을 통해 각각의 소화조로 유입되었으며, 각 조의 유입된 슬러지의 성상은 동일하다(Table 3). Table 2를 통해 소화조 내부 5개 지점에 대한 TS 농도와 온도를 측정된 결과, 지점별 농도 편차는 하수도시설기준에서 정한 10% 이내에 나타났고, 온도 편차 또한  $\pm 1^{\circ}\text{C}$  이내로 만족함으로써 두 교반공정의 교반이 원활하게 이루어지고 있는 것으로 확인되었다. 이는 수직왕복형 교반기가 수직으로 교반할 때 수직방향으로 발생하는 교반력이 가스리프트식 교반기에 비하여 강하기 때문에 조 바닥 부분에서의 슬러지 교반이 충분히 일어나는 것으로 보인다. 또한 수직방향으로의 교반력을 통해 소화조 공간을 최대로 사용하고 있는 것으로 나타났다. Fig. 4에는 수직왕복형 교반기와 가스리프트식 교반기의 교반 메커니즘을 나타내고 있다.

가스리프트식 교반기가 적용된 소화조에서의 TS 편차는 224로 수직왕복형 교반기가 적용된 소화조의 TS 편차 124에 비해 약 2배 가량 높은 편차를 나타내었으며, 온도의 경우 가스리프트식 교반기가 적용된 소화조에서 수직왕복형 교반기가 적용된 소화조에 비해 약 0.1 정도 낮은 편차값을 나타내었다. 또한 VS의 농도로 본 소화율에서 수직왕복형 교반기가 적용된 소화조에서 1% 정도 높은 소화율을 나타내고 있으나 그 차이는 미미하다. 따라서 측정 항목별로 우세한 교반방법이 나타나고 있으나, 위에서 기술한 바와 같이 모든 항목에서 하수도시설기준에 따른 완전한 혼합 조건을 충족하고, 편차의 차이가 미미하기 때문에 전체적인 교반효율에는 큰 차이가 없는 것으로 나타났다.



**Table 2.** Sludge appearances in digestion tank with different mixing methods (a) tray motion type and (b) gas lift type

(a) Tray motion type

Sampling point	TS	VS	Proportion(%)	Temperature(°C)
	Concentration(mg/L)			
A	22,268	14,905	66.9	31.1
B	22,247	14,934	67.1	31.5
C	22,384	14,947	66.8	31.4
<b>D</b>	<b>22,456</b>	<b>15,104</b>	<b>67.3</b>	<b>31.3</b>
E	22,542	15,086	66.9	31.2
Average	22,379	14,995	67.0	31.3
Standard deviation	124.8	92.6		0.2

(b) Gas lift type

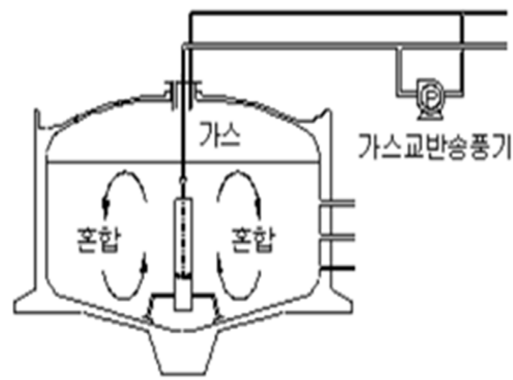
Sampling point	TS	VS	Proportion(%)	Temperature(°C)
	Concentration(mg/L)			
A	22,036	14,949	67.8	31.5
B	22,034	14,926	67.7	31.7
C	22,486	15,376	68.4	31.5
<b>D</b>	<b>21,893</b>	<b>14,833</b>	<b>67.8</b>	<b>31.4</b>
E	22,056	14,937	67.7	31.5
Average	22,101	15,004	67.9	31.5
Standard deviation	224.8	212.9		0.1

**Table 3.** Characteristics of sludge in D STP

Year	Influent sludge (m <sup>3</sup> /d)	Influent			Effluent			Digestion rate (%)
		TS (mg/L)	VS (mg/L)	VS (%)	TS (mg/L)	VS (mg/L)	VS (%)	
2012	438	37,559	27,831	74.1	22,203	13,277	59.8	48.1
2013	581	39,635	30,756	77.6	25,425	16,348	64.3	48.6
2014	431	39,005	27,330	77.7	19,421	12,720	65.5	45.6
<b>2014.12</b>	<b>440</b>	<b>39,005</b>	<b>31,008</b>	<b>79.5</b>	<b>21,993</b>	<b>14,779</b>	<b>67.2</b>	<b>46.7</b>

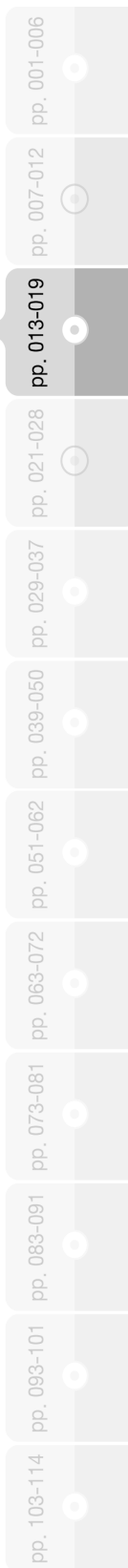


(a) Tray motion type



(b) Rotary type

**Fig. 4.** Comparison of flow directions in digestion tank with different mixing methods.



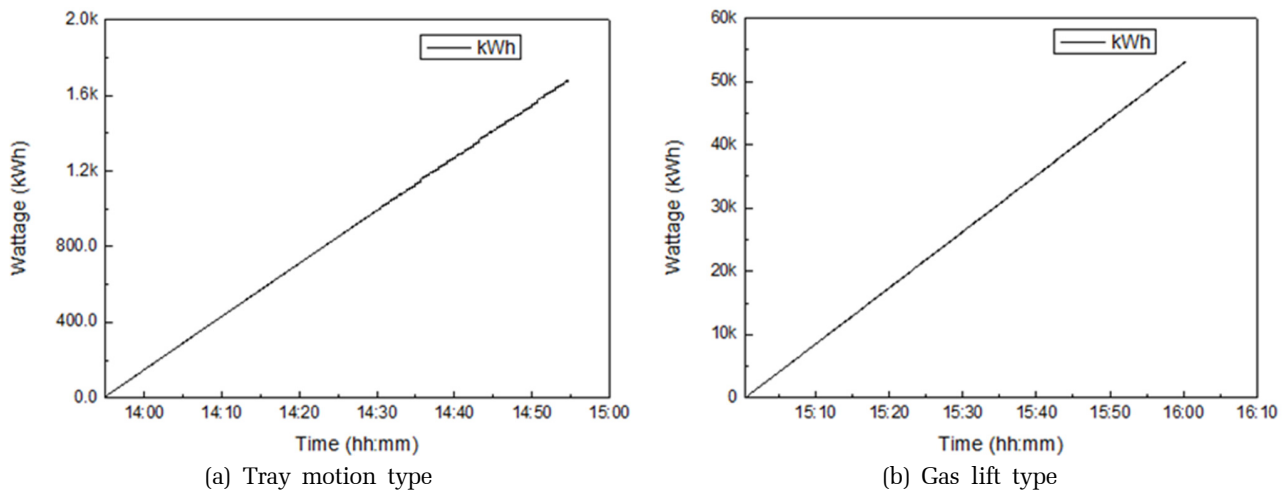


Fig. 5. Comparison of integrated input power in 1 hour operation time a) tray motion type and b) gas lift type.

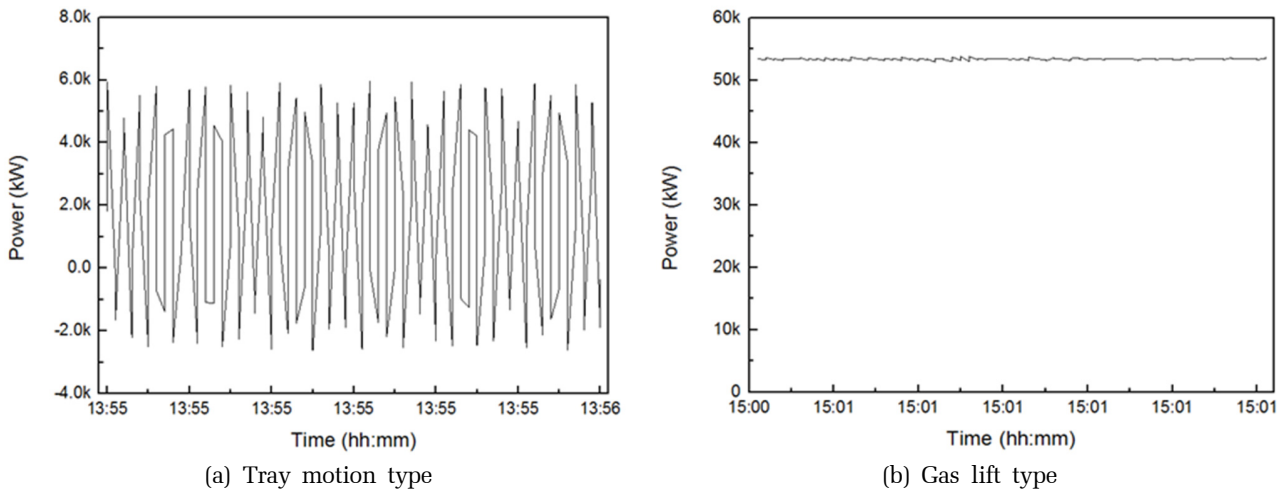


Fig. 6. Comparison of integrated input power in real time a) tray motion type and b) gas lift type.

### 3.2 소비동력

기존 가스리프트식 교반기와 수직왕복형 교반기의 소비동력을 Table 4에 나타내었다. 또한 Fig. 5와 6에 1시간 동안의 누적 전력량과 실시간의 전력량 변화를 나타내었다. 교반기의 소비동력은 전력분석계를 사용하여 측정하였으며, 1시간 동안의 교반 시 적산되는 전력량으로 비교하였다. Table 4에 나타난 바와 같이, 기존 가스리프트식 교반기는 약 44 kWh의 동력을 소비하였으며, 수직왕복형 교반기는 1.6 kWh의 동력을 소비하는 것으로 측정되었다. 기존 가스리프트식 교반기와 수직왕복형 교반기의 소비동력 비교 시, 약 96%의 소비동력이 감소되는 것으로 나타났다. 따라서

Table 4. Power consumption of tray motion agitator and gas lift agitator

	Gas lift type	Tray motion type	Power saving(%)
Power (kWh)	44.15	1.54	96%

이 결과를 통해, 동일한 교반목적을 달성하는데 수직 왕복형 교반기가 더 최적화 된 것으로 나타났다.

## 4. 결 론

본 연구에서는 가스리프트식 교반방식을 적용하고



있는 하수처리장 혐기성 소화조에 수직왕복형 교반기를 대체, 적용함으로써 교반기술의 최적화를 수행하였고, 연구결과 교반기술 최적화의 필요성과 중요성이 입증되었다. 기존 가스리프트식 교반기와 수직왕복형 교반기가 적용된 혐기성 소화조(6,570 m<sup>3</sup>) 내 슬러지 특성(TS, VS, 온도)을 분석한 결과, 두 교반방식 모두에서 TS 농도의 편차가 소화조 전 부분에서 10% 미만으로 나타나 하수도시설기준에서 제시하고 있는 완전교반 조건을 만족하였다. 그러나 가스리프트식 교반기는 44 kWh의 동력이 소비되었고, 그에 비해 수직왕복형 교반기는 1.6 kWh의 동력을 소비함으로써, 약 96%의 소비동력이 절감되는 것으로 나타났다. 따라서 혐기성 소화조 소화공정에서 동일한 교반목적을 달성하고자 할 경우에 가스리프트식 교반기에 비해 수직왕복형 교반기가 소비동력 측면에서 적합한 것을 알 수 있다.

## 사 사

본 연구는 금오공과대학교 교내연구과제 지원(과제 번호 2006-104-168)에 의해 수행되었습니다.

## References

Ministry of Environment (2014), "Statistics of Sewerage". pp. 14-15.  
 Kim. D. Y, Kim. H. J, Chung. T. H (2004) Behaviors of upflow

anaerobic sludge digestion based on HRT and evaluation of SRT as an operating parameter, J. Korean Society of Environmental Engineering, 26(10), pp. 1137-1144.  
 Kim. H. S, Song. Y. C, Sung. N. C (2002) The effect of HRT variation on acidogenic fermentation with municipal primary sludge, Journal of The Organic Resource Recycling Association, 10(3), pp. 68-73.  
 Owen. W. P, Stuckey. D. C, Healy. J. B, Young. L. Y, McCarty. P. L (1979) Bioassay for monitoring biochemical methane potential and anaerobic toxicity, Water Res, 13, pp. 485-492.  
 Malina. J. F and Pohland. F. G (1992) Design of anaerobic processes for the treatment of industrial and municipal wastes, Technomic Publishing, pp. 173-182.  
 Shelton. D. R, Tiedje. J. M (1984) General method for determining anaerobic biodegradation potential, Appl. Environ. Microbiol, 47, pp. 850-857.  
 Mills. P. J (1979) Minimization of energy input requirements of an anaerobic digester, Agric. Wastes, 1(1), pp. 57-59.  
 Ben-Hasson. R. M, Ghaly. A. E, Singh. R. K (1985) Design and evaluation of no-mix energy efficient anaerobic digester, Proceedings, Annual Meeting, Canadian Soc of Agric Engineering, pp. 105-112.  
 Dolfing. J (1992) The energetic consequences of hydrogen gradients in methanogenic ecosystems, FEMS Microbiol. Ecol, 101(3), pp. 183-187.  
 Ministry of Environment (2015), Official test methods of solid wastes, pp. 53-59.  
 Ministry of Environment (2016), Official test methods of water quality, pp. 55-71.  
 Korea Water and Wastewater Works Association (2005), Sewage disposal plants-Environmental aspects, Korea.

pp. 001-006

pp. 007-012

pp. 013-019

pp. 021-028

pp. 029-037

pp. 039-050

pp. 051-062

pp. 063-072

pp. 073-081

pp. 083-091

pp. 093-101

pp. 103-114