

Reduction of sludge production and recycled nutrients loading by high-rate aerobic digestion(CaviTec II) with inorganic sludge separation and sludge solubilization

무기슬러지 분리와 슬러지 가용화를 적용한 고효율 호기성 소화기술(CaviTec II)에 의한 슬러지 감량 및 반류수 부하 저감

Dong-Woo Lee¹ · Kang-Hyeong Bae² · Kun-Sang Cho² · Sung-Hong Kim^{3*}

이동우¹ · 배강형² · 조건상² · 김성홍^{3*}

¹(주)이피에스솔루션 환경기술연구소 · ²뉴엔텍(주) 환경기술연구소 · ³조선대학교 토목공학과

Abstract : The performance of the new aerobic digestion system combined with inorganic sludge separation unit and sludge solubilization unit, CaviTec II, is evaluated. Anaerobic digester effluent sludge is used for feed sludge of CaviTec II system. By addition of CaviTec II, the amount of cake generated is reduced by 27%, and the soluble nitrogen is reduced by 92%.

Key words : aerobic digestion, sludge solubilization, inorganic sludge separation

주제어 : 호기성 소화, 슬러지 가용화, 무기슬러지 분리

1. 서론

하수슬러지의 해양배출 금지와 육상직매립 금지로 인해 하수슬러지 감량은 절실히 요구되고 있는 시급한 과제이다. 슬러지 감량 기술로 널리 적용되어 있는 혐기성 소화는 부산물로 바이오가스를 생산할 수 있는 장점이 있으나, 슬러지 감량효율에 한계가 있고 고농도의 반류수가 발생하는 단점을 지니고 있다. 특히, 질소와 인의 경우 수처리시설의 유입부하를 10% 이상 증가시켜 수처리 기능 악화를 유발하고 있어 별도의 반류수 처리 시설 도입이 증가하고 있는 추세이다. 그러나, 반류수의 C/N, C/P 비가 매우 낮아 정상적인 고도 처리가 곤란하여 처리에 어려움을 겪고 있는 실정이다.

현재 슬러지 추가감량을 위한 건조시설 도입이

증가되는 추세이나 설치비용과 유지관리비가 고가이며, 고농도 반류수 부하 문제가 여전히 남는 단점이 있다.

본 연구는 무기슬러지 분리와 슬러지 가용화 전처리를 조합한 고효율 호기성 소화기술인 캐비텍 II(CaviTec II) 시스템을 혐기성 소화 후단에 적용했을 때의 슬러지 감량효율과 수처리계통에 가해지는 반류수 부하 저감 능력을 알아보고자 하였다.

2. 문헌 연구

호기성소화 및 호기/무산소 소화에서 고품물 및 질소와 인의 영양염류 변화는 비교적 많이 연구되어 왔으며(Mavinic et al., 1982), 단순 포식 호기성 소화보다는 슬러지의 자기분해시 발생되는 열을 이용하여 소화 효율을 높이는 ATAD 공법(Autothermal Thermophilic Aerobic Digestion)(Kelly et al., 1993), pH 저하를 방지하

• Received 22 November 2013, revised 31 July 2014, accepted 07 August 2014.

* Corresponding author: Tel : 062-230-7079 E-mail : gochamp@Chosun.ac.kr

기 위해 석회와 같은 pH 완충 약품을 주입하는 방법, A/O 공정을 사용하여 pH 저하를 방지하고 탈질까지 유도하는 방법(Hao와 Kim, 1990), 자동 제어를 이용하여 최적의 포기시간을 유지하는 방법(Wareham et al., 1993) 등이 진행되어 오고 있다.

국내에서 진행되어온 호기/무산소 소화관련 연구동향을 보면 간헐포기 소화에서 포기비율에 따른 고형물 제거의 동력학적 해석을 수행하여(Kim와 Chung, 1998), 포기비율 0.75 이하에서는 질산화 저해없이 슬러지로부터 용출하여 가수분해된 유기질소를 모두 질산화시킬 수 있고, 이 과정에서 안정적인 pH를 유지할 수 있음이 보고된 바 있다.

하수 슬러지의 전처리 방법으로 열적처리 방법, 기계적인 방법, 화학적인 방법 및 생물학적 방법 등이 제시되어 있다. 이들 방법 중에서 열적처리 및 캐비테이션(cavitation)을 이용하는 방법이 현재 가장 널리 상용화되어 있다.

캐비테이션을 이용한 방법 중 초음파 캐비테이션 기술(ultrasonic cavitation technology, UCT)은 초음파에 의해 유체 내에서 발생한 캐비테이션에 수반된 강한 전단력과 국지적 고온, 고압을 이용하여 슬러지의 생분해도를 높이는 방법이다. Chang et al(2011)은 초음파로 전처리한 슬러지를 일반 호기성 소화 및 ATAD 방법으로 소화할 때 동일한 SRT 조건에서도 VSS 감소율이 최대 20% 정도 증가함을 보고하였다. 그리고, 혐기성 소화에 초음파를 이용한 슬러지 전처리를 적용한 경우 소화 효율이 42.4% 증가하였고(Neis et al., 2000), 메탄 생산이 최대 75% 증가하였다(Lee et al., 2008). 초음파를 이용한 SONIX™의 바이오가스 증가율과 VS 감량 증가율은 40 ~ 50% 정도로 보고되어 있다(Show et al., 2007).

캐비테이션을 이용한 또 다른 전처리 방법인 수리동력학적 캐비테이션 기술(hydrodynamic cavitation technology, HCT)은 유체가 오리피스나 벤츨리 등과 같이 단면적이 급속히 감

소하는 물체를 통과할 때 유속이 높아지며 압력이 감소하면서 캐비테이션이 발생되었다가 단면이 넓어지는 부분에서 소멸되는 원리를 이용한다(Gogate et al., 2005). Nguyen(2007)은 HCT 전처리 시 소화효율 향상도는 메탄생산 최대 30% 증가, VS 감량을 최대 20% 증가한다고 보고하고 있으며, Maeng et al(2010)은 HCT로 10 ~ 30회 전처리한 슬러지를 혐기소화시킨 결과 메탄 발생량, COD 제거효율, VS 제거효율이 각각 41 ~ 45%, 36.5 ~ 43.1%, 18.4 ~ 24.1%가 증가하였다고 보고하였다.

본 연구에서는 혐기성 소화조에서 발생하는 소화슬러지에 A/O 공정으로 구성된 호기성 소화를 적용하여 추가적인 슬러지 감량 및 반류수 부하 저감을 이루고자 하였다. 무기슬러지 분리장치를 호기성소화 전단에 설치하여 무기성 물질 및 비분해성 물질을 사전에 제거함으로써 호기성 소화효율을 향상시키고자 하였고, HCT와 UCT를 적용했을 때의 호기성 소화효율 변화를 비교하여 최적의 가용화 방식을 찾고자 하였다.

3. 실험 재료 및 방법

실험에 사용된 슬러지는 경기도 소재 N물체 생센터 혐기성 소화슬러지를 사용하였으며 실험 기간 동안의 혐기조 운영현황과 실험에 사용된 슬러지 성상은 다음의 표와 같다.

실험을 위해 무기슬러지 분리장치와 가용화 설비를 겸비한 5 m³ 규모의 파일럿 호기성 소화장치를 설치하였으며 설비 개요는 다음 표 및 그림과 같다. 실험기간 동안 호기조 DO는 1 ~ 3 mg/L로 유지되었으며, 호기조 수온은 29.9 ~ 34.2 °C에서 운전되었다.

파일럿 시설에 적용된 습식 사이클론은 내경 96 mm, 높이 630 mm이고, 사이클론에서의 압력손실은 2 kg/cm²을 적용하였으며 이때 사이클론 처리유량은 평균 3.9 m³/hr로 운전되었다. 사이클론 펌프는 레벨 스위치와 연동되어 일정 수위에 도달하면 자동으로 운전되며 분리된 무기성 슬러지는 MAP 성장조에 축적되도록 하였

Table 1. N-WWTP anaerobic digester operation condition (2013. 8.1 ~ 9.30)

HRT	Influent		VS removal	TS removal
	TS	VS/TS		
27.6 d	3.63%	75.0%	44.7%	26.0%

Table 2. Feed sludge characteristics

Item	Unit	Value range	Average
pH	-	7.24 ~ 8.18	7.69
Temp.	℃	26.5 ~ 30.5	28.3
TS	%	2.03 ~ 2.61	2.29
VS	%	1.16 ~ 1.65	1.42
COD _{Cr}	mg/L	14,600 ~ 23,200	19,650
T-N	mg/L	1,103 ~ 1,573	1,347
NH ₄ -N	mg/L	728 ~ 1,026	831
T-P	mg/L	168 ~ 430	280
PO ₄ -P	mg/L	19.0 ~ 38.4	25.4

Table 3. Pilot plant configuration

Item		Volume(m ³)
Feed tank		5.0
MAP growth tank		0.33
Aerobic digester	anoxic zone	1.0
	oxic zone	3.0
	sedimentation zone	1.0

다. 무기슬러지 인발은 VS 함량이 40% 이하가 될 수 있도록 인발주기를 조정하며 간헐적으로 수행되었다. MAP 성장조에는 유입 PO₄-P 대비 몰비 2 ~ 4배의 MgCl₂를 주입하여 MAP 반응을 통한 인제거를 수행하였다.

슬러지 가용화 전처리 기술로 수리동력학적 캐비테이션 기술(HCT)과 초음파 캐비테이션 기술(UCT)을 선정하였으며 두 기술에 대한 비교 실험을 수행하였다. 가용화는 호기성 소화조 침전슬러지 반송라인에 설치된 20 L 용량의 가용화 탱크에서 설정된 시간주기에 따라 자동으로 수행되었으며 가용화된 슬러지는 소화조 내부에 구성된 무산소조로 반송시켜 탈질반응의 유기원으로 사용될 수 있도록 하였다. HCT에 사용된 펌프 동력은 1.5 kW로 유량 7 m³/h, 유입부 압

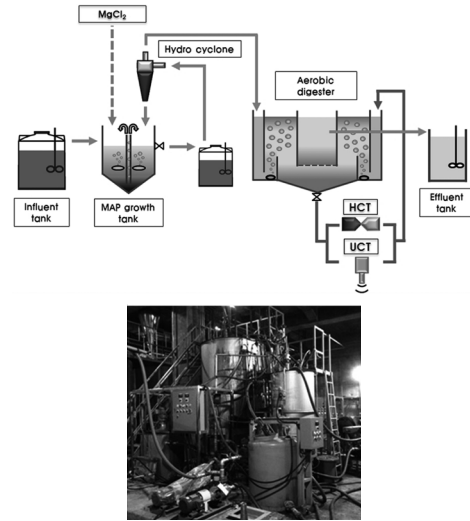


Fig. 1. Pilot plant layout.

Table 4. Operation mode

Mode	Date	HRT(d)	Solubilization method (min/min) ¹⁾	Internal recycle(%)
I	2013.8.11. ~ 8.20	8.4	UCT 4/116	402
II	2013.8.21. ~ 8.30	9.6	None	463
III	2013.8.31. ~ 9.9	9.6	HCT 8/12	485
IV	2013.9.10. ~ 9.18	9.9	UCT 8/352	476
V	2013.9.19. ~ 10.2	6.6	UCT 8/352	474

¹⁾ (number/number) means (on time / off time) of solubilization facility

력 1.5 kg/cm², 벤츨리부 압력 - 650 mmHg로 운전되었다. HCT 8분 가동 시 벤츨리부 통과횟수는 가용화 탱크 20 L기준 47회에 해당된다. UCT에 사용된 초음파 장치는 주파수 20 kHz, 출력 1 kW의 설비를 사용하였다. 운전단계별 운전조건을 다음의 표에 제시하였다. 무산소조 내부반송량은 유입슬러지량 대비 400 ~ 500%로 운전되었으며, 무산소조는 별도의 교반장치 없이 유입 및 내부반송액 공급에서 유발되는 수류에 의해 혼합이 이루어지도록 하였다.

4. 실험 결과 및 고찰

호기성 소화조 전단에 설치된 무기슬러지 분리장치의 인발조건에 따라 분리되는 슬러지의 VS 함량이 달라졌으며 운전 최적화를 통해 운

Table 5. Daily averaged inorganic sludge separation

Mode	Influent sludge			Separated inorganic sludge		
	Flow(L/d)	TS(g/d)	VS/TS(%)	Flow(L/d)	TS(g/d)	VS/TS(%)
I	597	13,179	62.4	29.1	817	58.3
II	519	11,076	60.5	12.9	415	57.7
III	520	11,661	61.7	8.0	662	39.5
IV	504	11,831	62.6	11.3	1,416	39.6
V	760	18,936	62.3	20.0	2,540	38.9

Table 6. COD_{Cr}/VS of sludge

Item	Influent	Effluent	
		Inorganic ¹⁾	Organic ²⁾
COD _{Cr} /VS	1.38	1.00	1.32

¹⁾ Inorganic means separated sludge by hydrocyclone
²⁾ Organic means effluent sludge from aerobic digester

전 mode III 단계 부터는 VS 함량 40% 이하인 무기성 슬러지를 분리 배출할 수 있었다(Table 5 참조). 분리량은 운전 mode V 단계에서 유입 고형물량(TS) 대비 최대 13.4% 인발이 가능하였다. 유입 슬러지의 COD_{Cr}/VS 값은 평균 1.38 인데 반해 분리 배출된 무기성 슬러지의 COD_{Cr}/VS 값은 평균 1.0으로 낮게 조사되었다(Table 6 참조). 즉, 습식 사이클론으로 분리되는 무기성 슬러지에 함유된 유기성분에는 산화 가능한 물질의 양이 상대적으로 낮은 것으로 판단되며, 무기슬러지 분리장치 적용시 무기물질과 비분해성 유기성분의 사전 제거가 가능하여 후속되는 호기성 소화의 처리효율 향상에 기여할 수 있을 것으로 사료된다.

운전기간별 질산화율을 Fig. 2에 제시하였다. 운전 mode I에서는 호기소화조 내액에 대한 초음파 전처리가 질산화에 미치는 영향을 확인하기 위한 실험을 수행한 단계이며, 소화조 내액에 대한 초음파 캐비테이션 처리 유량을 유입유량 대비 40%(소화조 용적대비 4.8%) 이하로 적용한 경우(8월11일 ~ 8월17일)에는 질산화율이 90% 이상으로 높게 유지되었으나, 유입유량 대비 160%(소화조 용적대비 19%)로 증가시키자(8월 18일 ~ 8월20일) 질산화 미생물 성장에 악영향을 미쳐 질산화율이 77%로 감소하였다. 따라

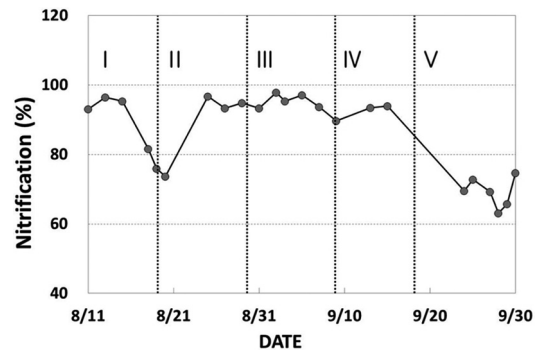


Fig. 2. Variation of nitrification.

서, 안정적인 질산화를 유지하기 위해 유입유량 대비 40%(소화조 용적대비 5%) 미만을 초음파 처리하는 것으로 결정하였으며, 8월 20일 초음파 처리를 중단시키고 이후 3일간의 안정화 기간을 거쳐 질산화 효율이 회복되는 것을 확인한 후 mode II 평가를 위한 분석을 수행하였다. 운전 mode IV 단계에서는 초음파 처리유량을 유입유량 대비 16%(소화조 용적대비 1.6%)로 운전하였으며, 초음파 조사시간은 mode I 대비 2배로 증가시켜 질산화 미생물에 미치는 악영향을 최소화하고 난분해성 물질의 분해를 향상시키고자 하였다. 그리고, 초음파 처리시 무기슬러지 분리장치를 통해 비분해성 물질이 사전 제거되고 생분해가 용이한 물질은 호기소화를 거쳐 이미 제거된 침전조 하부 농축 슬러지에 초음파 설비를 적용함으로써 이분해성 물질 및 비분해성 물질에 소비되는 초음파 에너지 손실을 최소화하고 난분해성 물질의 분해성을 효율적으로 향상시킬 수 있도록 캐비텍 II 시스템을 구성하였다.

운전조건별 VS 제거율을 Table 7에 제시하였다. 가용화 적용에 따른 유기물 제거율 평가 결과, 가용화 시설을 적용하지 않은 경우의 VS 제거율은 체류시간 9.6일에서 21.7%(mode II)였으며, 가용화 시설을 적용한 경우 HCT 및 UCT에서 각각 22.2%(mode III), 24.6%(mode IV)로 향상되었다. 그러나, 유입 슬러지 1 m³ 기준 가용화에 투입된 에너지는 HCT 및 UCT에서 각각 27.7 kWh/m³, 1.06 kWh/m³로 초음파 가용화 방식(UCT)이 매우 효과적이었다. HCT를 혐기성 소화 전단에 적용한 경우 소화효율 및 소화가스 증산이 이루어진 연구보고(Maeng et al., 2010)와는 달리 본 연구에서의 HCT 적용에 따른 유기물 제거효율 향상은 미미하였다. 일반적으로 수리동력학적 캐비테이션 기술(HCT)은 슬러지의 미립자화 및 균질화를 통해 분해속도를 향상시킬 수 있으나 난분해성 물질에 대한 분해능력은 초음파에 비해 상대적으로 작은 것으로 알려져 있다.(Maeng et al., 2009) 본 연구의 경우 혐기성 소화와 호기성 소화를 거치면서 분해가 용이한 성분이 대부분 제거되고 난분

해성 물질 함유율이 증가된 슬러지에 HCT를 적용함에 따라 에너지 투입이 많았음에도 불구하고 처리효율 향상에는 크게 기여하지 못한 것으로 판단된다.

운전 mode IV 단계 수행을 통해 캐비텍 II 시스템의 최적효율을 확인한 후 운전 mode V 단계에서는 운전 mode IV 단계의 조건을 유지한 상태에서 체류시간을 9.9일에서 6.6일로 단축시켰을 때의 처리성능 변화를 확인하기 위한 실험을 수행하였다. 실험결과 체류시간을 33% 단축 시킴에 따라 VS 제거율은 13% 감소하였으며 질산화율은 25% 감소하는 것으로 나타나 체류시간 단축시 유기물 제거 보다는 질산화에 미치는 영향이 더 큰 것으로 확인되었다.

최종적으로 발생하는 탈수케익 발생량을 평가하기 위해 유입 TS량과 각 처리공정별 TS 제거율을 이용하여 각 조합 공정에서의 TS 제거율을 산정하였으며 최종 탈수케익량은 TS량에 케익전환율을 곱하여 산정하였다. 슬러지에 함유된 TS 성분 중 입자성 고형물질 전체가 케익으로 발생된다고 가정하여 케익전환율로 TSS/TS 측정값을 적용하였다. 건조중량 기준 탈수케익 발생량을 산정한 결과(Table 8 참조), 혐기성 소화 단독 처리시 케익 발생량은 유입 TS 대비 63.0%였고, 혐기성 소화 후단에 일반 호기성 소화를 적용하는 경우 51.9%, 혐기성 소화 후단에 캐비텍 II를 적용하는 경우 46.2%로 각각 발생되어 케익 발생량은 혐기성 소화 단독 적용시에 비해 캐비텍 II를 적용하는 경우 27% 저감이 가능하였다.

Table 7. Estimation of VS removal

Mode	Influent (g/d)	Effluent(g/d)			Removal (%)
		Inorganic	Organic	Total	
I	8,220	476	5,939	6,415	22.0
II	6,705	240	5,008	5,248	21.7
III	7,198	261	5,337	5,598	22.2
IV	7,405	560	5,026	5,587	24.6
V	11,790	989	8,297	9,287	21.2

Table 8. Estimation of cake production

Process combination	TS removal (%)	TSS/TS (%)	Cake production ³⁾ (%)
Anaerobic solely	26.0	86.0	63.0
Anaerobic + Aerobic ¹⁾	38.0	83.7	51.9
Anaerobic + CaviTec II ²⁾	42.4	80.2	46.2

1) Conventional aerobic digestion (mode II)
2) Aerobic digestion combined with UCT (mode IV)
3) Ratio of cake production to influent TS based on dry solid

Table 9. Characteristics of recycle water

Process combination	SBOD (mg/L)	SCOD _{Mn} (mg/L)	S-N ¹⁾ (mg/L)	NH ₄ -N (mg/L)	NO ₃ -N (mg/L)
Anaerobic solely	192	211	831	831	-
Anaerobic + Aerobic ¹⁾	36	188	79	44	35
Anaerobic + CaviTec II ²⁾	43	169	63	55	8

1) Sum of NH₄-N and NO₃-N

처리된 슬러지가 탈수공정을 거치는 과정에서 발생하는 반류수 성상을 알아보기 위해 슬러지에 함유된 용존성 물질에 대한 분석을 수행하였으며 그 결과를 Table 9에 제시하였다.

혐기성 소화 단독 적용시 반류수에 함유된 용존성 질소(S-N)는 평균 831 mg/L로 매우 높은 반면 캐비텍 II 적용시 용존성 질소는 63 mg/L로 감소하여 수처리 시설로 반송되는 용존성 질소부하를 92% 저감시킬 수 있었다.

특히, 혐기성 소화 단독 적용시 발생하는 반류수의 SBOD/NH₄-N 비가 0.23으로 고도처리에 요구되는 일반적인 C/N 비 4에 비해 매우 낮아 반류수 처리를 위한 생물학적 고도처리를 후속 공정으로 추가 도입하더라도 탈질 반응을 유도하기 위해서는 상시적인 외부탄소원 투입이 불가피할 것으로 판단된다. 이러한 측면에서 볼 때 슬러지 분해와 질소 제거를 동시에 수행하는 캐비텍 II 기술은 매우 효율적인 시스템으로 평가될 수 있다.

5. 결론

호기성 소화조 전단에 무기슬러지 분리장치를 설치하여 VS 함량 40% 이하인 무기성 슬러지를 분리 배출할 수 있었으며, 이를 통해 무기물질과 비분해성 유기성분의 사전 제거가 가능하여 후속되는 생물학적 처리공정의 처리효율 향상에 기여할 수 있을 것으로 평가된다.

가용화 적용에 따른 유기물 제거율 평가 결과, 가용화 시설을 적용하지 않은 경우의 VS 제거율은 체류시간 9.6일에서 21.7%였으며, 가용화 시설을 적용한 경우 HCT 및 UCT에서 각각 22.2%, 24.6%로 향상되었다.

건조중량 기준 탈수케익 발생량을 산정한 결과 혐기성 소화 단독 처리시 케익 발생량은 유입 TS 대비 63.0%였고, 캐비텍 II를 함께 적용하는 경우 유입 TS 대비 46.2%가 발생되어 27% 추가 저감이 가능하였다.

혐기성 소화 단독 적용시 반류수에 함유된 용

존성 질소 831 mg/L 대비 캐비텍 II 적용시 용존성 질소는 63 mg/L로 감소하여 수처리 시설로 반송되는 용존성 질소부하를 92% 저감시킬 수 있었다.

사 사

본 연구는 차세대에코이노베이션기술개발사업(405-112-046)으로 진행되었습니다.

참고문헌

- Chang T.C., You S.J., Damoda R.A., and Chen Y.Y. (2011) Ultrasound pre-treatment step for performance enhancement in an aerobic sludge digestion process, *Journal of taiwan Institute of Chemical Engineers*, 42, pp.801-808.
- Gogate P.R. and Pandit A.B. (2005) A review and assessment of hydrodynamic cavitation as a technology for the future, *Ultrasonics Sonochemistry*, 12(1-2), pp.21-27.
- Hao O.J. and Kim M.H., (1990) Continuous pre-anoxic and aerobic digestion of waste activated sludge, *ASCE, Env. Eng. Div.*, 116(5), pp.863-879.
- Kelly H.G., Melcer H. and Mavinic D.S. (1993) Autothermal thermophilic aerobic digestion of municipal sludges: A one-year, full-scale demonstration project, *Wat. Env. Res.*, 65(7), pp.849-861.
- Kim S.H. and Chung T.H. (1998) Transformation of Solids in the Intermittent Aerobic Sludge Diaestion, *Journal of Korean Society of Water Quality*, 14(3), pp.271-280(1998).
- Lee C.Y. and Park S.Y. (2008) Improvement of solubilization and anaerobic biodegradability for sewage sludge using ultrasonic Pre-treatment, *Journal of Korea Organic Resource Recycling Association*, 16, pp.83-90.
- Maeng J.W. and Bae J.H. (2009) Comparisons of Sludge Pre-Treatment Systems : Hydrodynamic vs Ultrasonic Cavitation, *Journal of Korean Society of Environmental Engineers, Res*, 31(2), pp.90~95.

- Maeng, J.W. and Bae, J.H. (2010) Pre-Treatment of Sewage Sludge by Hydrodynamic Cavitation-II : Enhancement of Digestion Efficiency, *Journal of Korean Society of Environmental Engineers, Res.*, **32**(3), pp.264-270.
- Mavinic D.S. and Koers D.A. (1982) Fate of nitrogen in aerobic sludge digestion, *J. WPCF.*, **54**(4), pp.352-360.
- Neis U., Tiehm A. and Nickel K. (2000) Enhancement of anaerobic sludge digestion by ultrasonic disintegration, *Water Sci. Technol.*, **42**, pp.73-80.
- Nguyen D.X. (2007) Development of the venturi cavitation system for sludge solubilization to improve anaerobic digestibility. Master's Thesis, INHA University.
- Show K.Y., Mao T. and Lee D.J. (2007) Optimization of sludge disruption by sonication, *Water Res.*, **41**, pp.4741-4747.
- Wareham D.G., Hall K.J. and Mavinic D.S. (1993) Real-time control of aerobic - anoxic sludge digestion using ORP, *ASCE, Env. Eng. Div.*, **119**(1), pp.120-136.