

# 알칼리 전처리에 의한 슬러지 호기성 소화 및 액비 특성 변화

황 응 주

대구대학교 환경공학과

(2007년 8월 27일 접수, 2008년 1월 9일 채택)

## Effect of Alkaline Pretreatment on Sludge Aerobic Digestion and Fertilizer Value

Eung-Ju Hwang

Department of Environmental Engineering, Daegu University

**ABSTRACT :** In order to meet the stringent requirement of sludge disposal and to find ecological alternative, aerobic digestion coupled with alkaline pretreatment was studied. The treated sludge was tested for the potential of liquid fertilizer. In the aerobic digestion, it was obvious that the performance of digester B(fed with the sludge pretreated by NaOH) was better than that of digester A(fed with raw sludge) in terms of COD and SS removal. SS and VSS removal rates in digester B were 66% and 69%, respectively. At 5 days, TSS removal rate reached 47% in the digester B, which was 71% of final TSS removal rate. It revealed that the pretreatment process can shorten the retention time of aerobic digestion. 94.1% of TCOD in the raw sludge was reduced by alkaline pretreatment and aerobic digestion. Final SCOD was in the range of 220~230 mg/L implying the sludge was stabilized. Nitrification and pH drop were observed in the aerobic digestion. Final nitrate concentrations in digester A and B were 445.4 and 223.1 mg/L and final pH in digester B was 3.0. Biological assays reported that leaf size of cucumber seedling increased with nitrate concentration and sludge to soil ratio. The sludge treated by alkaline and aerobic digestion promoted the growth of seedling leaf and stem remarkably compared to raw sludge. In contrast, the aerobically digested sludge without pretreatment improved leaf growth and inhibited stem growth.

**Key Words :** Sludge, Alkaline Pretreatment, Aerobic Digestion, Liquid Fertilizer, Nitrate, Nitrification

**요약 :** 슬러지 직매립 금지와 런던협약에 따른 해양투기의 금지로 인해 하수슬러지의 처리 대안 연구가 다방면으로 진행되고 있으며 본 연구에서도 슬러지를 안정화시켜 액비로 재활용하는 기술에 대한 실험연구가 수행되었다. 슬러지 가용화를 위해 알칼리 전처리를 도입하였고 전처리된 슬러지를 호기성 소화조의 기질로 투입하여 유기물 및 질소화합물의 성장 변화를 관찰하였다. 또한 pot test를 통해 처리된 슬러지의 액비 이용 가능성을 평가하였다. 그 결과 알칼리 전처리된 슬러지를 호기성 소화조의 기질로 투입할 경우 전처리되지 않은 슬러지를 투입할 경우에 비해 SS 분해율은 57%에서 66%로 VSS 분해율은 59%에서 69%로 증가하였으며, 슬러지를 전처리할 경우 소화조의 체류시간 감소가 예측되었다. 알칼리 전처리와 호기성 소화를 통해 TCOD의 94.1%가 감소되었고, 최종 SCOD는 220~230 mg/L로 낮아 유기물이 안정화됨을 나타내었다. 소화조에서 질산화와 이로 인한 pH 저하 현상이 발견되었으며 전처리하지 않은 경우(445.4 mgN/L)가 전처리한 경우(223.1 mgN/L)보다 높은 질산농도와 낮은 pH값(최저 3.0)을 보였다. 슬러지를 액비로 이용할 경우 오이 묘목 잎의 성장은 소화 처리된 슬러지, 전처리 및 소화된 슬러지, 처리되지 않은 슬러지, 증류수의 순으로 높았으며 질산성 질소의 농도, 슬러지 투입량은 잎의 성장과 정지 상관성을 보였다. 전처리와 소화를 병행할 경우 처리하지 않은 슬러지보다 잎과 줄기의 생육 모두를 향상시켰으나, 소화만을 거친 슬러지는 처리하지 않은 슬러지보다 잎의 성장은 크게 향상시키고 줄기의 성장은 다소 저하시켰다.

**주제어 :** 슬러지, 알칼리 전처리, 호기성 소화, 액비, 질산성 질소, 질산화

### 1. 서론

2005년 국내 하수슬러지 발생량은 255만7천여톤으로 이중 78.0%가 해양 투기되었고 소각 11.2%, 재활용 4.8%, 육상매립 1.7%의 순으로 처리되었다.<sup>1)</sup> 2003년부터 슬러지의 직매립이 금지되었고 2012년부터는 런던협약에 의해 해양투기도 완전 금지될 예정으로 새로운 슬러지 처분방식의 도입이 필요한 상황이다.<sup>2)</sup> 슬러지의 소각은 비용과

대기오염 물질의 발생 가능성으로 인해 그리 매력적인 대안이 될 수 없으며 따라서 현재 다양한 방식의 슬러지 처리 대안 연구가 진행되고 있다. 현재 고려되고 있는 몇가지 슬러지 처분방식을 열거하면 건조 후 소각 또는 재활용,<sup>3)</sup> 퇴비화,<sup>4)</sup> 탄화,<sup>5)</sup> 고품화<sup>6)</sup> 등을 들 수 있다. 한편 슬러지의 혐기성 소화는 전통적인 슬러지 처리 방식으로 대체 에너지인 메탄을 폐기물로부터 생산한다는 장점이 있어 오랜기간 적용되어 오고 있으나 소화율이 낮고 체류시간이 길게 요구되는 등의 단점으로 하수처리장에 설치된 소화조의 대부분이 적절히 운전되지 못하고 있는 실정이다.<sup>5)</sup> 또한 혐기성 소화 후에도 역시 슬러지의 최종 처분이 필

† Corresponding author

E-mail: ejhwang@daegu.ac.kr

Tel: 053-850-6694

Fax: 053-850-6699

요하므로 엄밀한 의미에서 중간처리에 불과하다고 할 수 도 있다.

적절한 안정화과정을 거친 후 슬러지를 토양에 재순환시킴으로써 유기물과 영양분을 활용하는 방안은 합리적이고 궁극적인 슬러지 처분 방안이라 할 수 있는 바 이와 관련한 많은 연구가 진행되고 있다.<sup>7~10)</sup> 슬러지의 토양재순환을 위한 대표적인 방법으로 퇴비화를 들 수 있으나<sup>11)</sup> 다량의 수분조절재가 필요하다는 단점을 갖고 있기도 하다. 반면 호기성 소화 기술은 수분조절이 필요하지 않은 액상의 공정으로서 처리 후 슬러지를 일종의 액상비료로 활용 가능하므로 슬러지 최종처분을 위한 이상적인 방법의 하나라 할 수 있다.

최근에 슬러지의 감량화를 위한 물리화학적 전처리 방식에 대한 연구 및 기술개발이 활발히 진행되고 있는바 이러한 기술을 활용하여 고형물 형태의 슬러지를 용존성의 유기물로 전환시킨 후 호기성 소화 공정에 투입할 경우 소화효율 향상과 소화슬러지의 획기적인 감량이 가능하다. 슬러지의 소화효율을 증가시키기 위해 1990년대 중반부터 본격적으로 물리화학적 전처리 방식에 대한 국내외 연구가 진행되었다. 슬러지의 가용화를 위해 열적처리가 시도되었고<sup>12)</sup> 산, 알칼리에 의한 화학적 전처리,<sup>13)</sup> 열적처리와 화학적처리를 병행하는 공정<sup>14~17)</sup>도 시도되었다. 2000년대 들어와서는 ultrasound,<sup>18~20)</sup> microwave,<sup>21)</sup> pulse power,<sup>22)</sup> ozone,<sup>23)</sup> 고속충돌에 의한 전처리<sup>24,25)</sup> 및 여러 전처리 공정의 조합<sup>26)</sup>에 따른 슬러지 소화효율 변화에 대한 연구가 시도되었다. 그러나 이러한 연구들은 주로 전처리에 의한 혐기성 소화효율의 변화에 초점을 맞춘 연구들로서 전처리가 호기성 소화공정과 소화된 슬러지의 특성에 미치는 영향 연구는 미흡한 상황이다.

따라서 본 연구에서는 알칼리 전처리된 슬러지를 회분식 호기성 소화조에서 처리하면서 소화효율의 변화를 관찰하였으며, 전처리와 호기성 소화가 슬러지를 액비로 이용할 때의 비료효과에 미치는 영향을 pot test를 통해 살펴보았다.

## 2. 실험방법

본 실험에서 사용된 하수슬러지는 K하수처리장의 혐기성 소화조 유출 슬러지로서 소화조에는 농축 1,2차 슬러지와 분뇨가 유입되어 소화조를 거친 후에도 높은 SS와 유기물 함량을 갖고 있었다(Table 1). 알칼리 전처리에는 1 L Pyrex 비이커가 사용되었으며 슬러지 초기 TSS는 1%로 조정되었고 40 meq/L의 농도로 NaOH를 가하였다. 자석교반기로 반응물을 연속적으로 교반하였으며 반응온도는 수욕상(water bath)에서 40℃가 되도록 유지하였다. 총 330분의 반응시간이 지난 후 시료의 SS, VSS, TCOD, SCOD를 분석하여 처리 전의 시료와 비교하였다. 알칼리 전처리 후의 시료는 처리 전 시료에 비하여 pH와 SCOD가 각각 10.34와 4,419 mg/L로 높고 고형물의 농도와 TCOD는 낮았다.

유효부피 5 L의 회분식 소화조(Fig. 1)에 활성슬러지공정 반응라인에서 채취된 활성슬러지 2.5 L를 투입하여 호기성 소화를 위한 식종물질로 이용하였다. 두개의 반응기 시스템을 실험에 사용하였으며 반응조 A는 전처리되지 않은 슬러지 2.5 L를 기질로 투입하였고 반응조 B는 알칼리 전처리된 슬러지 2.5 L를 기질로 공급하여 실험을 수행하였다. 반응조 하부에 설치된 산기관을 통하여 공기를 공급하였고 별도의 교반장치 없이 공기 공급에 의해 반응물이 교반되도록 하였다. 소화조의 운전기간은 40일이었으며 운전기간 동안 유기물 농도의 변화를 관찰하였고 필요에 따라 질산성 질소, 유기산 농도를 측정하였다.

처리를 하지 않은 슬러지 원액(RS, raw sludge), 알칼리 전처리 없이 호기성 소화 공정만 거친 슬러지 시료(DS, digested sludge), 알칼리 전처리 후 40일간의 소화 과정을 거친 슬러지 시료(PDS, pretreated and digested sludge), 증류수 등 4개의 시료를 이용하여 작물재배 시험(pot test)을 실시하였다. 슬러지 또는 증류수를 유기물 성분이 없는 원예토(pure soilless potting media)와 증량비 1:1로 혼합하고 증류수로 수분을 포화시킨 후 플라스틱 화분에 채워 넣었다. 오이씨 10개를 각 화분에 채워진 슬러지-원예토 혼합물의 표면에 올려놓은 후 혼합물을 1 cm 정도 추가하였다. 이렇게 준비된 화분을 온도가 27℃로 유지되고 하루 14시간 동안 빛이 공급되는 생육상으로 옮겨 배양하였으며, 매일 발아율을 측정하고 적정량의 수분을 공급하였다. 배양 16일 후 성장한 잎의 최대 지름 평균치와 줄기의 길이 평균치를 측정하였다. 슬러지와 원예토 혼합비율 1:1은 적정 혼합율 결정을 위한 별도의 실험에서 도출되었다. 또한 질산성 질소의 농도가 작물생장에 미치는 영향을 파악하기 위하여 180 g의 potting media에 별도의 유기물 공급 없이 KNO<sub>3</sub> 형태의 질산성 질소만을 각각 13.4, 26.7,

Table 1. Basic properties of sludge

	pH	TCOD (mg/L)	SCOD (mg/L)	TSS (mg/L)	VSS (mg/L)
Activated sludge(seed)	7.40	6,118	176	4,960	3,490
Raw sludge(feed)	6.91	33,843	1,994	21,050	18,700
Pretreated sludge(feed)	10.34	18,509	4,419	9,000	8,150

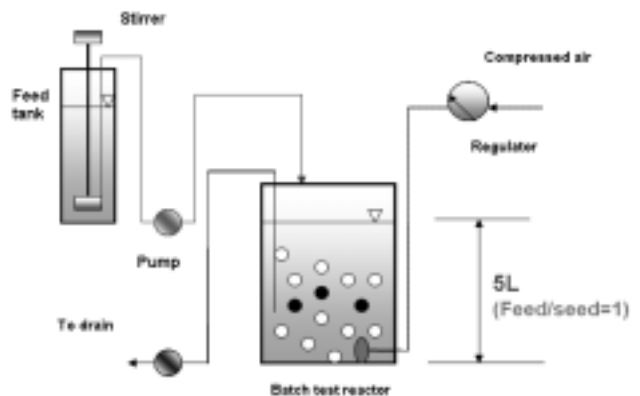


Fig. 1. Schematic diagram of batch aerobic digester system.

40.2, 80.2 mgNO<sub>3</sub>-N 혼합하여 pot test를 실시하였다. 모든 pot test는 정확성을 기하기 위해 동일 시료에 대해 3회 반복 시험하여 평균치를 취하였다. 한편 TSS, VSS, TCOD, SCOD, NO<sub>3</sub>-N 등은 Standard Method<sup>27)</sup>에 의하여 측정하였고, 유기산 농도는 FID GC로 측정하였다.

### 3. 실험결과 및 고찰

전처리되지 않은 슬러지를 기질로 투입한 반응기 A와 알칼리 전처리된 슬러지를 기질로 투입한 반응기 B의 40일 운전기간 동안 SS, VSS, TCOD, SCOD의 변화를 Fig. 2~5에 나타내었다. 반응기 A의 SS는 초기 13,700 mg/L에서 서서히 감소하여 40일 후 6,000 mg/L로 약 57% 감소하였다. 반면 반응기 B에서는 전처리에 의해 슬러지 SS 농도가 감소하여 초기 약 7,000 mg/L의 농도를 보이다 40일 후 2,200 mg/L로 66%의 감소율을 기록하였다. 특이할만한 사실은 반응기 B에서 초기 5일간의 SS 분해율이 47%로서 최종 분해율의 71%가 초기 5일만에 달성되었다는 것이다. 반면 반응기 A에서는 같은 기간 SS 분해율이 10%에도 미치지 못하여 알칼리 전처리의 효과가 호기성 소화 초기의 반응효율에 큰 영향을 미치고 있음을 알 수 있다. 따라서 적절한 전처리를 통해 슬러지 호기성 소화조의 체류시간을 크게 감소시킬 수 있을 것으로 판단된다. 이와 같이 알칼리 전처리에 의해 SS의 분해도가 증가한 것은 세포벽 파손으로 인해 세포의 분해도가 증가하고 알칼리 가수분해에 의해 SS 입자의 크기가 작아졌기 때문으로 판단되었다. 이와 관련하여 Neyens 등<sup>28)</sup>은 슬러지에 투입된 알칼리는 비누화 반응(saponification)을 통해 미생물 세포벽 및 세포막의 지질 성분을 제거하여 세포내 물질이 외부로 방출되게 한다고 하였다. 본 연구에서 얻어진 SS 분해율을 Table 2와 같이 타 문헌에서 보고된 수치와 비교한 결과 전처리를 하지 않을 경우 타 문헌에 비해 분해율이 낮은 반면 전처리를 할 경우 혐기성소화슬러지임에도 불구하고 단 5일만에 타 문헌과 유사한 정도

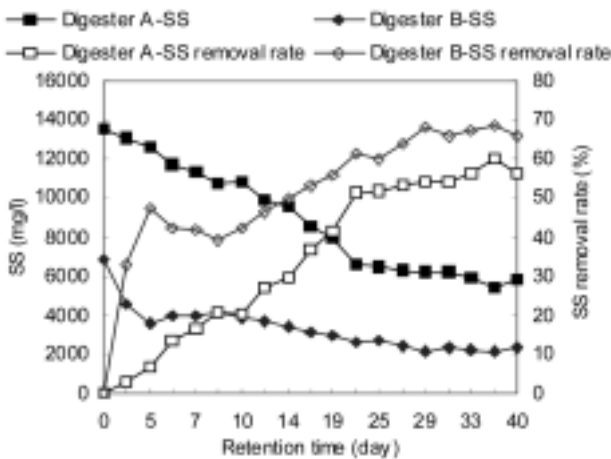


Fig. 2. Concentrations and removal rates of SS in the digesters.

Table 2. Comparison of SS removal rates in several researches

Sludge type	Reaction time(day)	SS removal rate(%)	Reference
Waste activated sludge	20	59	29
Waste activated sludge + aerobically digested sludge	11	11-49	30
Waste activated sludge	21	73	31
Waste activated sludge	19	43-51	32
Anaerobically digested sludge	5	8-47	This study
	40	57-66	This study

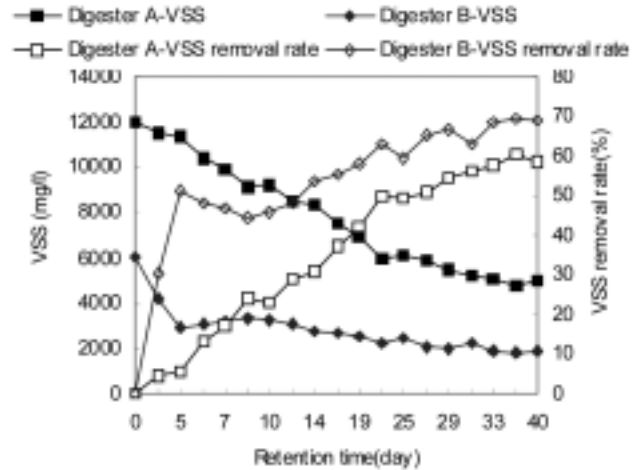


Fig. 3. Concentrations and removal rates of VSS in the digesters.

의 SS 분해율을 얻을 수 있음을 확인할 수 있었다. 한편 Fig. 3의 VSS는 SS와 유사한 경향을 보였으나 SS 보다는 다소 높은 분해율(반응기 A: 59%, 반응기 B: 69%)을 기록하였다.

반응기내의 TCOD는 A의 경우 초기 19,000 mg/L에서 40일 후 6,100 mg/L로 약 67% 감소하였고 B의 경우는 초기 9,500 mg/L에서 40일 후 2,000 mg/L로 79% 감소하였다(Fig. 4). Table 1에서 전처리하지 않은 슬러지가 33,843 mg/L의 TCOD를 갖고 있는 것을 감안하면 반응기 B의 최종 TCOD 2,000 mg/L는 알칼리 전처리와 호기성 소화를 통해 94.1%의 유기물 농도를 감소시켰음을 의미한다. 한편 SCOD는 Fig. 5에서와 같이 반응기 A와 B에서 각각 초기 1,200, 2,600 mg/L, 40일 후 220, 230 mg/L의 농도를 관찰할 수 있었으며 분해율은 각각 82%, 91%로 나타났다. 이로부터 알칼리 전처리에 의해 형성된 SCOD는 쉽게 분해될 수 있는 물질인 것을 알 수 있었다. 또한 두 반응기 모두 최종 SCOD가 220~230 mg/L로 낮고 반응 후 반부에 그 수치에 큰 변화가 없는 것으로부터 미루어 볼 때 최종적으로 분해속도가 느린 용존 유기물만 남은 상태의 산출물을 호기성 소화로부터 얻을 수 있다고 결론지을 수 있다. 이와 같이 안정화된 슬러지는 토양에 살포시 토양 산소의 소비가 크지 않으면서 유기물을 공급할 수 있을 것으로 기대된다.

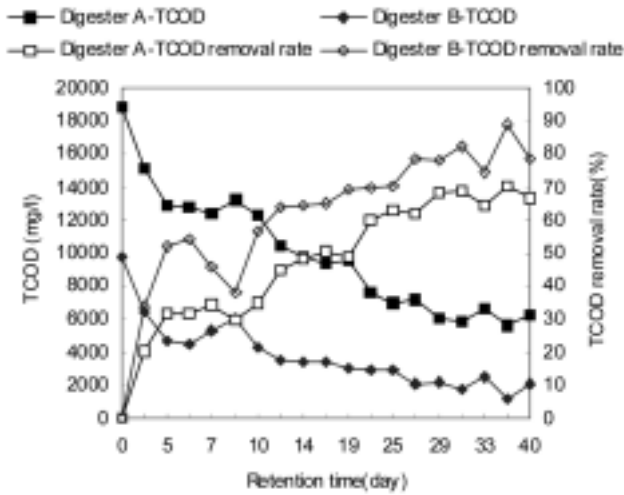


Fig. 4. Concentrations and removal rates of TCOD in the digesters.

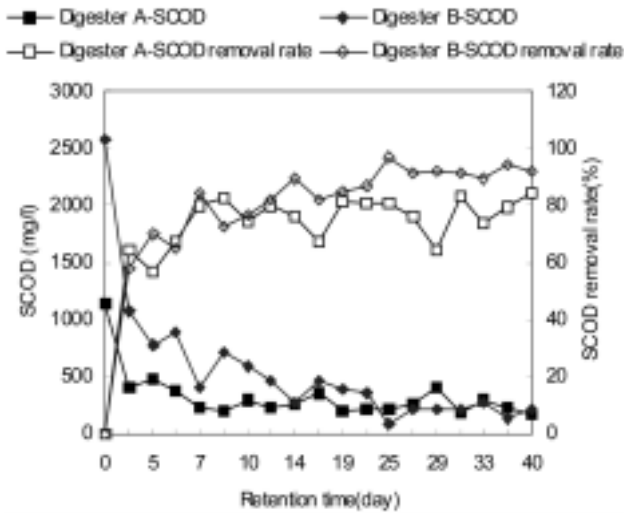


Fig. 5. Concentrations and removal rates of SCOD in the digesters.

두 반응조에서의 pH 변화를 Fig. 6에 나타내었다. 반응조 B는 알칼리 전처리의 영향으로 초기 pH 9.7로 시작하여 4일 경과 후 8.4로 감소하였으며 이후 8.0 이상의 약 알칼리 조건으로 유지되었다. 반면 반응조 A에서는 초기 pH가 7.5로 시작되어 반응 40일 3.0까지 지속적으로 하락하였다. 외부에서 산의 공급이 없는 가운데 pH가 감소한 것은 특기할 만한 사실로서 그 원인을 찾기 위해 유기산과 질산성 질소의 농도를 측정하였다. 그 결과 유기산 농도는 반응조 A와 B 사이에 큰 차이 없이 낮은 농도인 것으로 관찰되었다(Table 3). 반면 질산성 질소농도는 반응조 A에서 445.4 mg/L, 반응조 B에서 223.1 mg/L로 두배 가까운 차이를 갖는 것으로 나타났다(Table 4). 초기 시료의 알칼리도 측정 자료가 없어 정확한 판단은 어려우나 질산화에 따른 수소이온의 생성이 반응조 A에서의 pH 감소 원인으로 추측된다. 참고로 Anderson과 Marvinic<sup>33)</sup>의 슬러지 호기성 소화 연구에서도 질산화(nitrification)로 인

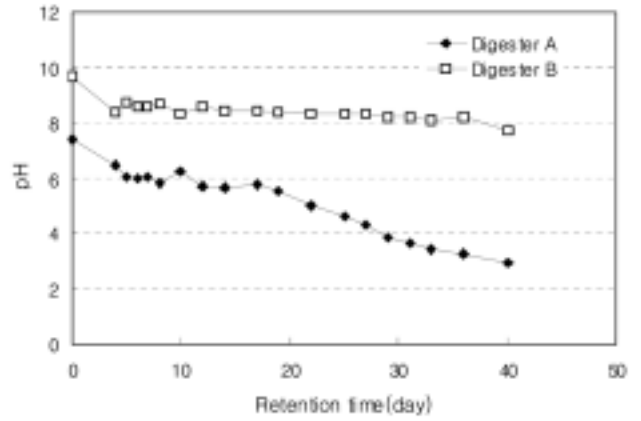


Fig. 6. pH profiles in the digesters.

Table 3. Concentrations of organic acid at 40days of reaction time

Organic acid(mg/L)	Digester A	Digester B
Acetic acid	41.8	38.1
Propionic acid	0	18.2
Butyric acid	0	0
i-Valeric acid	0	0
n-Valeric acid	0	0

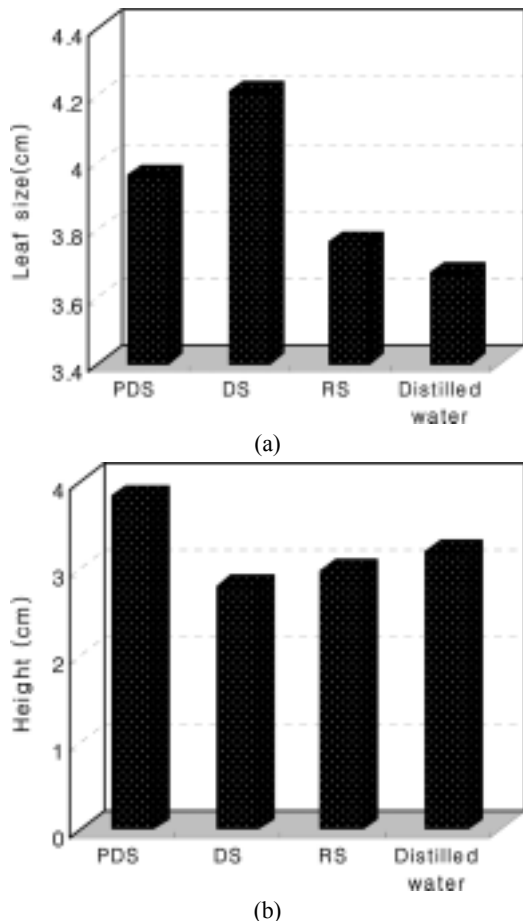
Table 4. Concentrations of NO<sub>3</sub>-N at 36 and 40 days of reaction time

Reaction time(day)	NO <sub>3</sub> -N concentration	
	Digester A	Digester B
36	429.2	222.5
40	445.4	223.1

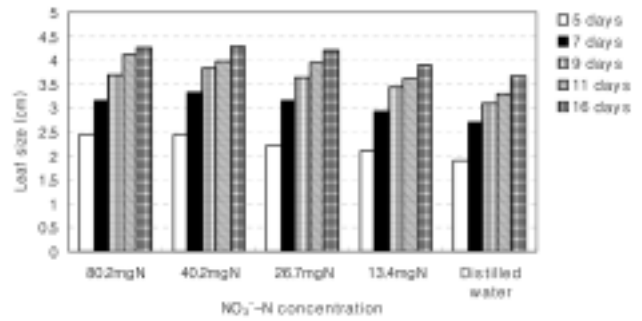
해 pH가 3.5까지 저하된 결과가 보고되기도 하였다. 이같이 슬러지의 호기성 소화에서 발견되는 질산화 현상은 Bhargava와 Datar<sup>34)</sup>에 의해서도 보고된 바 있다. 또한 본 연구에서 형성된 질산 농도는 타 문헌<sup>35)</sup>에서 보고된 아질산성 질소(최대 약 50 mgN/L) 및 질산성 질소 생성량(최대 약 100 mgN/L)보다 높았다. 일반적으로 탄소성 BOD 농도가 충분히 높은 시스템에서는 autotrophic nitrifier가 heterotrophic bacteria와의 경쟁에서 이길 수 없다. 따라서 질산화 미생물이 활성화되기 위해서는 유기물 부하가 낮은 조건이 되어야 한다. 반응조 B에서는 용존상의 기질 농도가 높았으며 이 때문에 질산화 미생물이 활성화되지 못하여 질산생성과 pH 감소가 적었던 것으로 사료된다. 이는 Matsuda 등<sup>36)</sup>이 질산화가 진행되기 위해서는 우선 활성슬러지의 생분해성 유기물이 대부분 제거되어야 함을 보고한 사실과 부합된다 할 수 있다.

처리 후 슬러지를 액비로 이용했을 때 작물 생장에 미치는 영향을 파악하기 위해 pot 시험을 실시하였다. Fig. 7(a)에 표시한 바와 같이 생육 16일 후 오이 묘목의 잎 크기는 증류수, 처리되지 않은 슬러지(RS), 알칼리 전처리 및 호기성 소화 처리된 슬러지(PDS), 호기성 소화 처리된 슬

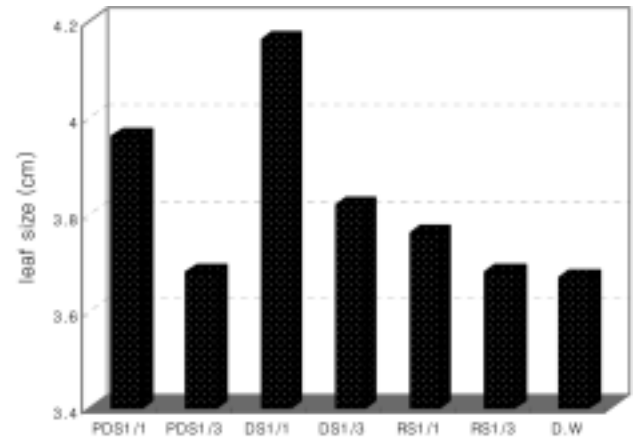
리지(DS)의 순으로 증가하는 것으로 나타났다. 이는 호기성 소화에 의해 유기물이 안정화되고 그 과정에서 질산성 질소의 농도가 증가하여 작물 생육이 향상된 것으로 판단된다. 특히 잎의 크기가 증가하는 경향은 정확하게 질산성 질소 농도의 증가 경향(DS > PDS > RS > 증류수)과 일치함을 알 수 있다. 질산성 질소의 농도가 작물에 미치는 영향을 파악하기 위해 Fig. 8과 같이 질산성 질소의 투입량을 변화시켜 가며 pot 시험을 실시한 결과 역시 질산성 질소 농도가 높을수록 잎의 성장에 유리함을 재확인할 수 있었다. 한편 슬러지의 투입량이 많을수록 잎의 성장이 활성화됨을 관찰할 수 있었다(Fig. 9). 반면 Fig. 7(b)의 줄기 성장에 있어서는 질산성 질소의 농도와 무관하게 PDS가 가장 높고 증류수, RS, DS가 차례로 그 뒤를 이었다. 안정화된 유기물 또는 질산성 질소의 공급은 우선적으로 오이 묘목 잎의 성장을 촉진하나 RS, DS의 경우 잎의 성장이 활성화되면서 상대적으로 줄기의 성장은 위축되는 방향으로 작물이 반응한 것으로 해석된다. 그러나 PDS의 경우는 잎의 성장과 줄기의 성장이 모두 활성화되는 결과를 보였다. 이러한 상반된 현상의 이유는 명확하



**Fig. 7.** The effect of pretreatment and aerobic digestion on (a) leaf size and (b) height of cucumber seedling. Note: PDS-sludge pretreated by NaOH and aerobically digested; DS-sludge after aerobic digestion without pretreatment; RS=raw sludge without any treatment



**Fig. 8.** The effect of NO<sub>3</sub>-N concentration on leaf size of cucumber seedling.



**Fig. 9.** The effect of mixing ratio of sludge to potting media on leaf size of cucumber seedling(1/1, 1/3: sludge/potting media).

지 않으며 이에 대한 추가 연구가 필요하다 하겠다. 다만 전처리와 호기성 소화를 병행할 경우 처리를 하지 않은 슬러지를 이용할 때보다 잎과 줄기의 생육을 향상시킬 수 있음은 본 연구에서 확인할 수 있었다. 또한 호기성 소화만을 거친 슬러지는 처리되지 않은 슬러지를 이용할 때보다 잎의 성장은 크게 향상시키나 줄기의 성장은 오히려 저하시킨다는 사실도 확인할 수 있었다.

#### 4. 결론

하수 슬러지 처리 대안을 모색하기 위해 알칼리 전처리된 슬러지를 회분식 호기성 소화조에서 처리하면서 소화효율의 변화를 관찰하였으며, 전처리와 호기성 소화가 슬러지를 액비로 이용할 때의 비효에 미치는 영향을 pot test를 통해 살펴본 결과 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다.

1) 알칼리 전처리된 슬러지를 호기성 소화조의 기질로 투입할 경우 전처리되지 않은 슬러지를 투입할 경우에 비해 SS 분해율은 57%에서 66%로 증가하였고 VSS 분해율은 59%에서 69%로 증가하였으며, 슬러지를 전처리할 경우 최종 분해율의 71%가 초기 5일만에 달성되어 호기성 소화조의 체류시간을 크게 감소시킬 수 있을 것으로 예측되었다.

2) 알칼리 전처리와 호기성 소화를 통해 TCOD의 94.1%를 감소시킬 수 있었으며, 최종 SCOD는 220~230 mg/L로 낮아 유기물이 안정화된 슬러지를 얻을 수 있었다.

3) 호기성 소화공정에서 질산화와 이로 인한 pH 저하 현상이 발견되었으며 전처리를 하지 않은 경우(445.4 mgN/L)가 전처리를 한 경우(223.1 mgN/L)보다 높은 질산농도와 낮은 pH값(최저 3.0)을 보였다. 본 연구에서 얻어진 질산성 질소의 농도는 타 문헌과 비교할 때 최소 2배 이상 높았다.

4) 슬러지를 오이 묘목 성장을 위한 액비로 이용할 경우 잎의 성장은 호기성 소화 처리된 슬러지, 알칼리 전처리 및 호기성 소화된 슬러지, 처리되지 않은 슬러지, 증류수의 순으로 높았으며 질산성 질소의 농도와 잎의 성장은 정의 상관성을 보였다. 또한 슬러지 투입량이 증가할수록 잎의 성장도 활성화되었다.

5) 전처리와 호기성 소화를 병행할 경우 처리하지 않은 슬러지를 이용할 때보다 잎과 줄기의 생육을 향상시킬 수 있었으나, 호기성 소화만을 거친 슬러지는 처리하지 않은 슬러지 이용의 경우보다 잎의 성장은 크게 향상시키고 줄기의 성장은 저하시켰다.

## 사 사

이 논문은 한국과학재단 특정기초연구사업(R01-2004-000-10737-0)에 의해 지원되었으며 이에 깊은 감사를 드립니다.

## 참 고 문 헌

1. 2005 하수도 통계, 환경부, pp. 12(2006).
2. 신충식, "유기성오니 처리 종합대책(안)," 특별 기획 Symposium: 해양투기 금지에 따른 유기성오니(하수오니) 종합 대책 및 기술 동향, 한국폐기물학회, 대전, pp. 1~17 (2006).
3. 정홍렬, "하수슬러지 건조/소각 기술 및 운용사례," 특별 Symposium 논문집: 국내 하수 Sludge 자원화 및 처리 기술현황, 한국폐기물학회, 부산, pp. 135~177(2004).
4. 정경철, "하수슬러지의 부숙화 기술 및 운용사례," 특별 Symposium 논문집: 국내 하수 Sludge 자원화 및 처리 기술현황, 한국폐기물학회, 부산, pp. 113~133(2004).
5. 배재근, 김병태, 조창호, 유기성오니 처리체계 개선에 관한 연구, 수도권매립지관리공사, pp. 262~377, 432~456(2005).
6. 최문영, "하수슬러지의 고화처리 기술 및 운용사례," 특별 Symposium 논문집: 국내 하수 Sludge 자원화 및 처리 기술현황, 한국폐기물학회, 부산, pp. 81~112(2004).
7. Smith, S.R., *Agricultural Recycling of Sewage Sludge and the Environment*. CAB International, UK(1996).
8. Viraraghavan, T. and Ionescu, M., "Land application of phosphorus-laden sludge: a feasibility analysis," *J. Environ. Manage.*, **64**(2), 171~177(2002).
9. Petersen, S. O., Henriksen, K., Mortensen, G. K., Krogh, P. H., Brandt, K. K., Sørensen, J., Madsen, T., Petersen, J., and Grøn, C., "Recycling of sewage sludge and household compost to arable land: fate and effects of organic contaminants, and impact on soil fertility," *Soil and Tillage Research*, **72**(2), 139~152(2003).
10. Singh, R.P. and Agrawal, M., "Potential benefits and risks of land application of sewage sludge," *Waste Management*, in press(2007).
11. Haug, R., *Practical Handbook of Compost Engineering*, Lewis Publishers, pp. 717(1993).
12. Ward, A., Stensel, H. D., Ferguson, J. F., Ma, G., and Hummel, S., "Effect of autothermal treatment on anaerobic digestion in the dual digestion process," *Water Sci. Technol.*, **38**(8-9), 435~442(1998).
13. Lin, J. G., Ma, Y. S., Chao, A. C., and Huang, C. L., "BMP test on chemically pretreated sludge," *Bioresour. Technol.*, **68**(2), 187~192(1999).
14. Tanaka, S., Kobayashi, T., Kamiyama, K., Lolita, M., and Bildan, N. S., "Effects of thermochemical pretreatment on the anaerobic digestion of waste activated sludge," *Water Sci. Technol.*, **35**(8), 209~215(1997).
15. Kim, J., Park, C., Kim, T. H., Lee, M., Kim, S., Kim, S. W., and Lee, J., "Effects of various pretreatments for enhanced anaerobic digestion with waste activated sludge," *J. Bioscience and Bioengineering*, **95**(3), 271~275(2003).
16. Vlyssides, A. G. and Karlis, P. K., "Thermal-alkaline solubilization of waste activated sludge as a pre-treatment stage for anaerobic digestion," *Bioresour. Technol.*, **91**(2), 201~206(2004).
17. Park, C., Lee, C., Kim, S., Chen, Y., and Chase, H. A., "Upgrading of anaerobic digestion by incorporating two different hydrolysis processes," *J. Bioscience and Bioengineering*, **100**(2), 164~167(2005).
18. 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).
19. Tiehm, A., Nickel, K., Zellhorn, M., and Neis, U., "Ultrasonic waste activated sludge disintegration for improving anaerobic stabilization," *Water Res.*, **35**(8), 2003~2009(2001).
20. Wang, Q., Kuninobu, M., Kakimoto, K., Ogawa, H. I., and Kato, Y., "Upgrading of anaerobic digestion of waste activated sludge by ultrasonic pretreatment," *Bioresour. Technol.*, **68**(3), 309~313(1999).
21. Eskicioglu, C., Kennedy, K. J., and Droste, R. L., "Characterization of soluble organic matter of waste activated sludge before and after thermal pretreatment," *Water Res.*, **40**(20), 3725~3736(2006).
22. Choi, H., Jeong, S. W., and Chung, Y., "Enhanced an-

- aerobic gas production of waste activated sludge pretreated by pulse power technique," *Bioresource Technol.*, **97**(2), 198~203(2006).
23. Weemaes, M., Grootaerd, H., Simoens, F., and Verstraete, W., "Anaerobic digestion of ozonized biosolids," *Water Res.*, **34**(8), 2330~2336(2000).
  24. Choi, H. B., Hwang, K. Y., and Shin, E. B., "Effects on anaerobic digestion of sewage sludge pretreatment," *Water Sci. Technol.*, **35**(10), 207~211(1997).
  25. Nah, I. W., Kang, Y. W., Hwang, K. Y., and Song, W. K., "Mechanical pretreatment of waste activated sludge for anaerobic digestion process," *Water Res.*, **34**(8), 2362~2368(2000).
  26. Chiu, Y. C., Chang, C. N., Lin, J. G., and Huang, S. J., "Alkaline and ultrasonic pretreatment of sludge before anaerobic digestion," *Water Sci. Technol.*, **36**(11), 155~162(1997).
  27. Standard Methods for the Examination of water and Wastewater, 20th edn, American Public Health Association/American Water Works Association/Water Environment Federation, Washington DC, USA(1998).
  28. Neyen, E., Baeyens, J., and Creemers, C., "Alkaline thermal sludge hydrolysis," *J. of Hazard. Materials*, **B97**, 295~314(2003).
  29. Mason, C. A., Hamer, G., Fleischmann, Th., and Lang, C., "Bioparticulate solubilization and biodegradation in semi-continuous aerobic thermophilic digestion," *Water Air & Soil Pollution*, **34**(4), 399~407(1987).
  30. Khalili, N. R., Chaib, E., Parulekar, S. J., and Nykiel, D., "Performance enhancement of batch aerobic digesters vai addition of digested sludge," *J. Hazard. Mater.*, **B76**, 91~102(2000).
  31. Oviedo, M. D. C., Ramirez, J. A. L., Marquez, D. S., Alonso, J. M. Q., "Evolution of an activated sludge system under starvation conditions," *Chem. Eng. J.*, **94**, 139~146(2003).
  32. Estrada, I. B., Gomez, E., Aller, A., Moran, A., "Microbial monitoring of the influence of the stabilization degree of sludge when applied to soil," *Bioresour. Technol.*, **97**(11), 1308~1315(2006).
  33. Anderson, B. C. and Mavinic, D. S., "Behaviour and control of nutrients in the enhanced aerobic digestion process: pilot scale studies," *Environ. Technol.*, **14**, 301~318(1993).
  34. Bhargava, D. S. and Datar, M. T., "Ananalysis of nitrification during the aerobic digestion of secondary sludges," *Environ. Pollut.*, **58**(1), 57~72(1989).
  35. Genc, N., Yonsel, S., Dagasan, L., and Onar, A. N., "Investigation of organic nitrogen and carbon removal in the aerobic digestion of various sludges," *Environ. Monit. Assess.*, **80**, 97~106(2002).
  36. Matsuda, A., Ide, T., and Fujii, S., "Behaviour of nitrogen and phosphrous during batch aerobic digestion of waste activated sludge - continuous aeration and intermittent aeration by control of DO," *Water Res.*, **22**(12), 1495~1501(1988).