

공기공급량과 계란 껍질 첨가가 유기성 폐수슬러지 액비 비효효과에 미치는 영향

Effects of Air Supply Rate and Eggshell Addition on Liquid Fertilizer Efficiency of Aerobic Stabilized Organic Wastewater Sludge

천효창 · 황응주 · 김상현[†]

Hyo-Chang Cheon · Eung-Ju Hwang · Sang-Hyoun Kim[†]

대구대학교 환경공학과

Department of Environmental Engineering, Daegu University

(2011년 8월 1일 접수, 2011년 8월 29일 채택)

Abstract : Aerobic digestion of organic sludge generates stabilized slurry which could be used as a nitrogen-rich liquid fertilizer. In this study, the effects of air supply rate and eggshell addition on the sludge fertilizer efficiency were examined. Sludge from a wastewater treatment plant in a food industry was fed to a lab-scale aerobic digester, and the fertilizer efficiency was assessed by the growth of cucumber. Increase of air supply rate up to 200 mL/L/min enhanced the fertilizer efficiency as well as the nitrification efficiency. The addition of eggshell, a potassium-rich leftover, in fertilizer application was also beneficial to the cucumber growth. A proper control of air supply rate and the use of an inexpensive additive would guarantee the quality of sludge liquid fertilizer.

Key Words : Organic Sludge, Aerobic Digestion, Liquid Fertilizer, Fertilizer Efficiency

요약 : 호기성 소화를 통해 안정화된 유기성 슬러지는 질소 비료로서 활용될 수 있는 잠재력이 있다. 본 연구에서는 식품 공장 폐수 처리장에서 발생한 슬러지를 호기성 소화한 후, 소화액의 비효효과를 오이 생장을 통해 평가하였다. 공기 공급량을 200 mL/L/min까지 증가시킬 경우, 질산화와 비효효과가 향상됨을 확인하였다. 또한 일반 비료에 비해 슬러지 내 함유량이 부족한 칼륨 등을 보충하기 위해 음식물 쓰레기의 일종인 계란 껍질 가루를 시비 시 함께 투여하여, 식물 생장이 향상됨을 확인하였다. 본 논문에서 제시하는 적정 공기 공급량과 저가의 첨가제 투여는 슬러지 액비의 품질을 보장하는데 활용될 수 있을 것으로 사료된다.

주제어 : 유기성 슬러지, 호기성 소화, 액비, 비효효과

1. 서론

국내에서 연간 발생하는 폐수슬러지량은 약 622만톤¹⁾으로 이를 처리하는데 소요되는 비용은 폐수처리장 총 운전 비용의 절반 이상을 차지할 만큼 그 비중이 크다. 또한 폐수 슬러지는 수분을 다량 함유하고 있으며, 특히 식품 폐수 슬러지 등에는 유기물 함량이 높아, 적절히 관리하지 않으면 부패되어 악취와 민원을 발생시킨다.²⁾ 국내에서는 그 동안 하·폐수를 처리하면서 나오는 유기성 슬러지의 대부분을 매립과 해양투기 하였다. 1998년 해양투기가 시작되면서 2005년을 기준으로 폐수슬러지 발생량의 38%를 해양투기 하였으며, 43%를 재활용, 15%를 소각, 4%를 육상매립하였다.³⁾ 2000년에 정부는 슬러지 자원화를 유도하기 위해 슬러지 직매립금지를 실시하였으나 정부의 의도와 달리 비용이 저렴한 해양투기로 슬러지를 처리하는 기업이 증가하였다. 그러나 런던협약이 발효됨에 따라 2011년 말부터는 해양투기가 전면 금지될 전망이기에 육상처리를 전제로 한 효율적 이면서 합리적인 처리기반을 구축할 필요성이 있다. 이를 위해서는 각종 유기성 슬러지의 효율적 처리 및 음식물류 폐기물, 농업 부산물 등의 기타 유기성 폐기물을 공동처리

하면서 각종 기초시설과 연계처리를 통한 새로운 처리 체계 방안이 요구된다. 정부에서는 슬러지 재활용비율을 2011년까지 57%로 상향 조정하려고 하며,⁴⁾ 이에 따라 유기물 함량이 높은 슬러지를 퇴비, 토지개량제, 매립지 복토제 등으로 재활용하려는 연구가 활발히 진행 중 이다.⁵⁻⁷⁾

슬러지에는 유기물과 질소, 인 등 토양에 순환시켰을 때 자원으로 활용될 수 있는 성분이 다량 존재한다. 식물생태계에서 질소, 인은 중요 성장 제한 인자로서 질소 성분은 토양에서 잎과 줄기의 성장을 촉진하고 인은 뿌리의 성장을 도와 성숙을 촉진시키며 식물의 병에 대한 저항력을 높여 준다.⁸⁾ 따라서 슬러지를 적절한 유기물 안정화 과정을 거친 후 슬러지를 토양에 살포할 경우 토양의 biomass 생산력을 향상시킬 수 있어 슬러지 처리와 동시에 토양 지력의 향상이라는 일석이조의 효과를 거둘 수 있다.^{9,10)} 본 연구진은 선행 연구를 통해 호기성 소화가 슬러지 내 유기 질소를 작물에 흡수가 용이한 질산성 질소로 전환하여 비효 효과를 높인다는 사실과, 식품 슬러지 등 유입 슬러지에 중금속 등 유해 물질 함량이 낮은 경우 호기성 소화를 통해 생산된 액비가 환경보전적으로 안전함을 보고하였다.^{11,12)} 또한 호기성 소화 효율 향상을 위한 전처리로서 알칼리-기체

[†] Corresponding author E-mail: sanghkim1@daegu.ac.kr Tel: 053-850-6691 Fax: 053-850-6699

가용화 조건을 제시한 바 있다.¹²⁾

슬러지를 퇴비로 사용하는 연구는 많이 진행되었으나 품질을 향상시키는 연구는 아직 미비한 실정이다. 본 연구에서는 슬러지 액비의 비효율과를 향상시키기 위해, 호기성 소화 시 공기 공급량의 변화에 따른 질소화합물 변화 특성과 작물 성장영향을 재배 시험을 통해 고찰하였다. 또한 음식물 쓰레기의 일종인 계란 껍질 가루를 시비 시 함께 투여할 때의 액비 품질 제고 여부도 함께 고찰하였다. 본 연구 결과를 향후 산업단지에 적용을 시킨다면 산업단지내 자원순환형 Business model을 수립할 수 있을 것으로 사료된다.

2. 실험 재료 및 방법

본 연구에서 사용된 실험 장치는 Fig. 1에 나타난 바와 같이 유효 부피 5 L의 소화조를 중심으로 가용화장치, 공기 펌프, 교반기, 연동펌프, 액비 저장조로 구성되었다. 사용된 슬러지는 대구에 소재한 B사의 폐수처리공정 내 포기조 공정에서 채취한 활성 슬러지를 식중균으로, 활성 슬러지의 농축조에서 채취한 농축 슬러지를 가용화하여 기질로 사용하였다. 가용화는 활성 슬러지에 40 meq/L 농도의 NaOH를 주입한 후 1시간동안 7,200 rpm으로 파쇄기를 작동시키면서 수행되어 슬러지 내 고형분을 작은 입자나 용존 상태로 전환시키면서 미생물 대사를 용이하게 하였다.

회분식 호기성 소화는 최적의 질산화를 유도하기 위해 세 가지 공기 공급량(20, 100, 200 mL/L/min) 조건에서 수행되었다. 세 가지 경우 모두 식중균과 기질은 각각 2.5 L씩 투입되었으며 초기 조건은 Table 1과 같다.

호기성 소화 후 생산된 액비의 비효율과를 분석하기 위해 27±3°C, 습도 60±20%의 Growth chamber (Doori Science, DF-95G4M) 내에서 20일간 재배시험을 실시하였다. 재배 작물은 오이묘목이었으며, 토양구성은 마사토 100 g, 질석 50 g, 펄라이트 50 g였다. 각 화분의 오이씨는 10개씩, 1 cm 깊이로 심었으며, 모든 화분에는 24시간 간격으로 물을 주었다.

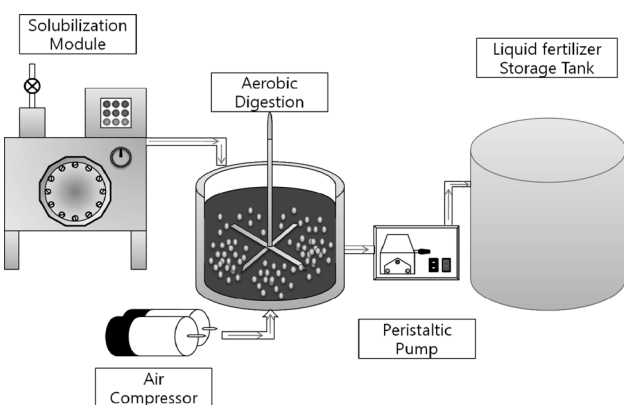


Fig. 1. Schematic diagram of a lab-scale aerobic digester.

Table 1. Initial conditions of the batch aerobic sludge digestion (unit: mg/L)

Seed + Feed (1 : 1 Ratio)	
	Air 20 mL/L/min
	Air 100 mL/L/min
	Air 200 mL/L/min
TCOD	5421
SCOD	558
TSS	5850
VSS	5500
TKN	208
NH ₃ -N	34
NO ₂ -N	0.725
NO ₃ -N	24

슬러지 액비에 부족한 칼륨 성분 등을 보충하기 위한 첨가제의 영향은 계란껍질가루를 이용하여 고찰하였다. 계란 껍질가루를 곱게 빻아 액비에 TS 기준으로 10, 20, 50, 100%의 비율로 첨가하여 비효율과 증대를 모색하였다.

실험 중 Total Kjeldahl Nitrogen (TKN)은 digestion/distillation/titration, Ammonia Nitrogen (NH₃-N)은 distillation/titration, Nitrogen Dioxide (NO₂-N)와 Nitrate Nitrogen (NO₃-N)은 digestion/colorimetric method을 이용하여 측정하였다.¹³⁾ Total Suspended Solids (TSS), Volatile Suspended Solids (VSS), Chemical Oxygen Demand (COD) 분석 역시 Standard Methods¹³⁾를 준용하였다.

3. 결과 및 고찰

3.1. 공기 공급량에 따른 질산화 특성

Fig. 2에 40일간의 회분식 반응 후 각 조건에서의 질소화합물 물질수지를 나타내었다. 초기 조건에 높은 농도로 존재하는 유기성 질소는 소화 과정을 통해 감소하고, 질산성 질소가 증가함을 알 수 있다. 이는 슬러지에 함유된 질소 성분은 대부분 유기성 질소이고, 호기성 소화 과정에서 암모니아성 질소로 무기화 된 후 아질산성 질소를 거쳐 질산성 질소로 산화된다는 보고와 일치한다.¹⁴⁻¹⁷⁾ 또한 유기성 질소 감소량과 질산 증가량이 거의 일치하고 중간 생성물인 암모니아와 아질산염의 증가량이 미미하여 본 회분식 반응에서 호기성 소화가 정상적으로 진행되었음을 보여주었다.

암모니아와 안정화된 퇴비에는 질산성 질소 함량이 높기에 일반적으로 질산성 질소 농도를 액비의 숙성도 지표로 활용한다.¹⁸⁾ 공기공급량을 증가시킴에 따라, 15일이 경과한 후 공기를 많이 공급한 순서로 질산성 질소의 농도 및 질산화율이 높아졌다(Fig. 3). 초기 15일간 반응이 느렸던 이유는 질산화 독립영양세균이 성장속도가 상대적으로 느리기 때문이며,¹⁹⁾ 연속 운전 시에는 5일 이상의 HRT가 유지될 경우 이와 같은 지연 시간은 나타나지 않을 것으로 사료된다.¹¹⁾ 본

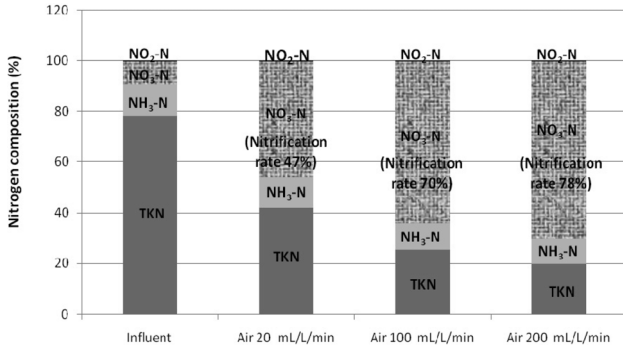


Fig. 2. Mass balance of nitrogen compounds during the batch aerobic sludge digestion.

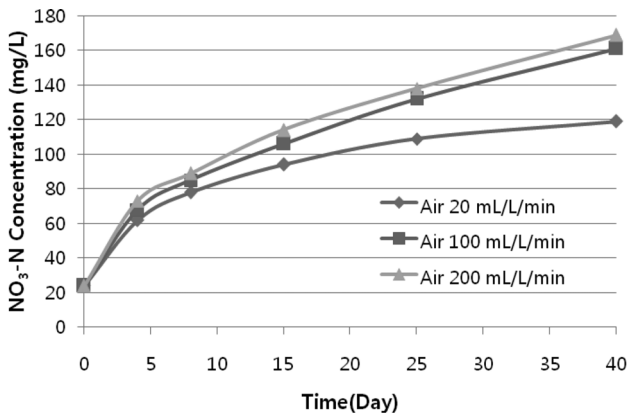


Fig. 3. NO₃-N concentration change profiles at various aeration rates.

연구에서 생산된 액비의 질산성 질소의 농도는 최대 169 mg/L 으며, 이때 주입된 유기성 질소의 78%가 질산성 질소로 전환 되었다.

3.2. 공기 공급량에 따른 슬러지 액비 비효효과

슬러지 호기성 소화액을 액비로 이용하였을 때 작물 성장에 미치는 영향을 파악하기 위해 재배시험을 실시하였다. 회분식 호기성 소화 40일 후 소화액을 액비로 간주하였으며, 그 조성은 Table 2와 같다. Fig. 4, 5에 나타난 바와 같이 20일 동안 오이묘목을 재배한 결과 예상대로 공기공급량과 이에 따른 질산 농도가 가장 높았던 조건에서 생산된 액비의 비효효과가 가장 높았으며 액비를 첨가하지 않은 오이묘목의 성장이 가장 늦었다. 이를 통해 본 연구에서 생산된 액비가 비료로서의 효과가 있으며, 호기성 소화조 연속운전 시 반응조의 공기 공급량을 적절히 조절함을 통해 최대의 비효효과를 나타내는 액비를 생산 할 수 있을 것으로 사료된다.

Table 2. Characteristics of fertilizers at various aeration rates

treatment	TCOD (mg/L)	SCOD (mg/L)	TSS (mg/L)	VSS (mg/L)	TKN (mg/L)	NO ₃ -N (mg/L)
Air 20 mL/L/min	2445	88	2150	1550	109	119
Air 100 mL/L/min	2375	69	1950	1300	64	161
Air 200 mL/L/min	2122	66	1600	1050	48	169

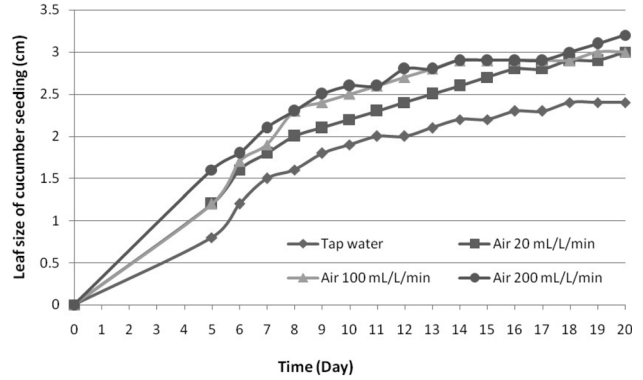


Fig. 4. Leaf growth of cucumber seedlings at various aeration rates.

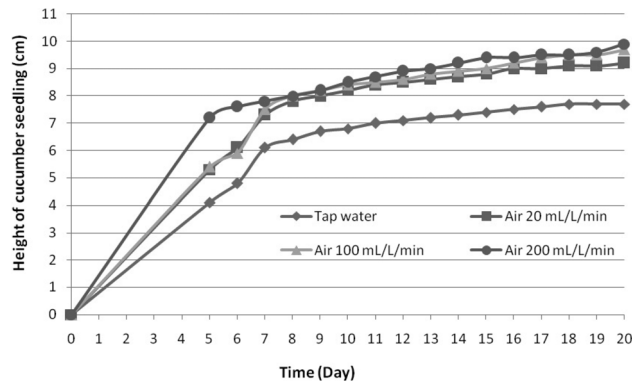


Fig. 5. Height growth of cucumber seedlings at various aeration rates.

3.3. 계란껍질가루 첨가 시 슬러지 액비 비효효과

현행 국내 법령은 가축분뇨발효액을 원료로 사용할 경우에 대한 액상비료(액비)의 성분 기준을 제시하고 있다. 본 연구에서 생산된 액비의 유해성분 기준은 선행연구²⁰⁾를 통해 액비의 기준을 충분히 만족시킨다는 결과를 얻을 수 있었으며 규격함량(질소, 인, 칼륨 전량 합계량 0.3% 이상)도 1.28%로 훨씬 더 높아 액비로 충분히 사용가능하다.

하지만 칼륨의 함량이 0.01%로 낮은 등의 단점이 있으므로, 저가의 첨가제 사용이 용이한 경우에는 단독 시비 보다

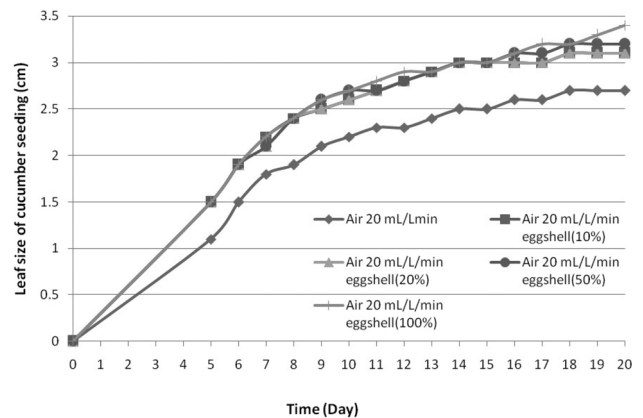


Fig. 6. Leaf growth of cucumber seedlings at various amounts of eggshell addition.

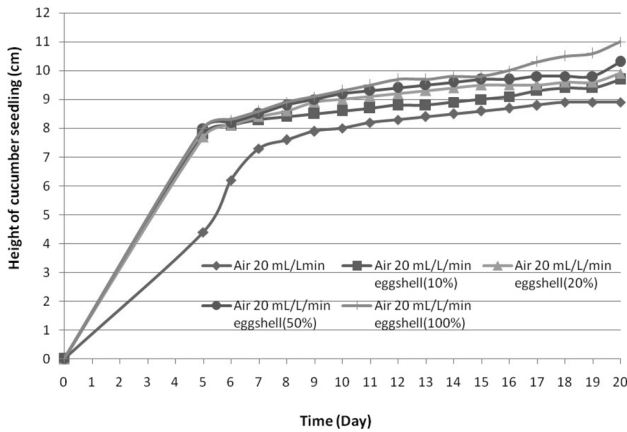


Fig. 7. Height growth of cucumber seedlings at various amounts of eggshell addition.

첨가제와의 혼합이 효과적일 수도 있다. 또한 첨가제가 폐기물/부산물인 경우에는 자원 순환 및 환경오염 제거 효과를 함께 얻을 수 있다. 본 연구에서는 칼륨 함량이 높으며, 칼슘, 마그네슘, 인 성분도 함유한 계란껍질가루²¹⁾를 첨가하여 액비 비효율과 증대를 도모하였다. 그 결과 Fig. 6, 7에 나타난 바와 같이 계란껍질가루를 첨가한 액비의 비효율 효과가 그렇지 않은 액비에 비해 높게 나타났다.

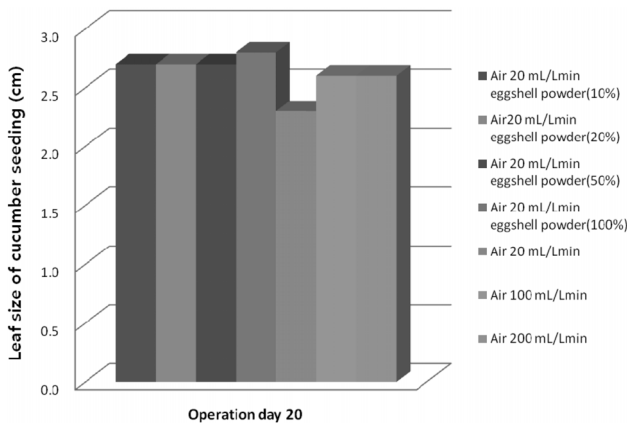


Fig. 8. Leaf sizes of cucumber seedlings after 20 days incubation.

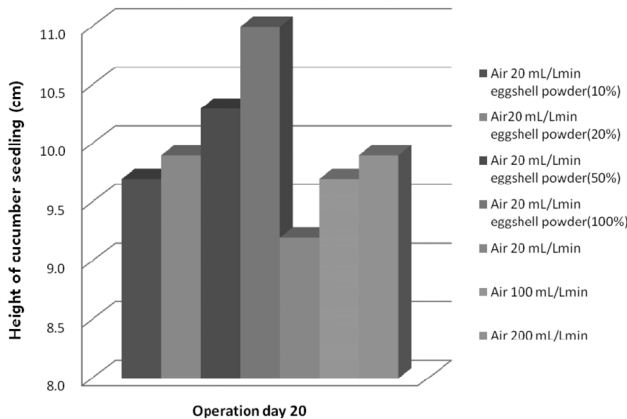


Fig. 9. Heights of cucumber seedlings after 20 days incubation.

공기 공급량 20 mL/L/min 에서 생산된 액비에 계란껍질 가루를 TS 기준으로 10%만 첨가하여도 20일째 기준으로 잎의 크기가 200 mL/L/min 에서 생산된 액비 단독 시비시 보다 0.3 cm 더 자랐으며, 줄기의 길이는 0.8 cm 더 자랐다. 그리고 계란껍질가루를 TS기준으로 100% 첨가한 액비는 잎의 크기와 줄기의 길이가 200 mL/L/min 조건으로 생산된 액비에 비해 각각 0.7, 2.1 cm 더 크게 오이묘목이 자랐다(Fig. 8, 9). 이러한 결과로 칼륨 등이 풍부한 첨가제 투여가 슬러지 액비의 비효율과 증대에 효과가 있다는 사실을 확인할 수 있었다.

4. 결론

식품 산업에서 발생하는 폐활성슬러지를 호기성 소화할 시 공기공급량에 따른 질산화 효율 및 생산된 액비의 비료로서의 비효율과, 첨가제 사용 시 비효율을 고찰하여 다음과 같은 결론을 얻었다.

- 1) 호기성반응조의 공기공급량을 20에서 200 mL/L/min 까지 증가함에 따라 질산화 효율이 31% 향상되었다.
- 2) 호기성 소화로 생산된 슬러지 액비는 작물 성장을 향상시키는 비료로서의 효능이 있었으며, 질산화로 대표되는 호기성 소화 효율의 증대는 비효율과의 증대로 연결되었다.
- 3) 계란껍질가루를 첨가제로 사용한 경우에도 액비 비효율 효과가 증대하였다. 소화 시 공기 공급량 증대와 시비 시 첨가제 사용 모두 슬러지 액비의 상품성을 높이는데 활용될 수 있으며, 실제 적용 시에는 경제성 검토를 통해 각 상황에 맞는 효과적인 방법을 선택할 수 있을 것으로 사료된다.

사사

이 논문은 대구EIP사업단(과제번호: 2010-03-1025)에 의해 지원되었으며 이에 깊은 감사를 드립니다.

KSEE

참고문헌

1. 환경부, “2008 전국 폐기물 발생 및 처리현황,” p. 14(2009).
2. 수도권매립지관리공사, “유기성오니 처리체계 개선에 관한 연구,” (2005).
3. 환경부, “유기성오니 처리 종합대책,” p. 4(2006).
4. 환경부, “린턴협약 ‘96의정서 발효에 따른 하수슬러지관리 종합대책,” (2007).
5. 권순익, 임동규, 성기석, 이신찬, 이정택, “유기성폐기물 퇴비의 농업 활용에의 문제점 및 개선방안,” 유기물자원화, 15(3), 31~49(2007).
6. Abdel-Shafy, H. I., Hegemann, W. and Genschow, E., “Fate

- of heavy metals in the leather tanning industrial wastewater using an anaerobic process,” *Environ. Manag. Health*, **6**(2), 28~33(1995).
7. Zbytniewski, R. and Buszewski, B., “Characterization of organic matter (NOM) derived from sewage sludge compost. Part 2: multivariate techniques in the study of compost maturation,” *Bioresour. Technol.*, **96**, 479~484(2005).
 8. Munson, A. D. and Bernier, P. Y., “Comparing natural and planted black spruce seedling II. Nutrient uptake and efficiency of use,” *J. Forest Res.*, **23**, 2435~2442(1993).
 9. Viraraghavan, T. and Ionescu, M., “Land application of phosphorus-laden sludge: a feasibility analysis,” *J. Environ. Manage.*, **64**(2), 171~177(2002).
 10. Singh, R. P. and Agrawal, M., “Potential benefits and risks of land application of sewage sludge,” *Waste Manage.*, **28**(2), 347~358(2008).
 11. 황응주, “슬러지 호기성 소화공정에서의 유기물 분해 및 질산화 특성,” *대한환경공학회지*, **31**(10), 865~872(2009).
 12. 이영욱, 황진규, 황응주, “슬러지 액비의 비효효과 및 안전성 평가,” *대한환경공학회지*, **30**(3), 314~322(2008).
 13. American Public Health Association/American Water Works Association/Water Environment Federation, *Standard Methods for the Examination of water and Wastewater*, 20th edn, (1998).
 14. Anderson, B. C. and Mavinic, D. S., “Behaviour and control of nutrient in the enhanced aerobic digestion process: pilot scale studies,” *Environ. Technol.*, **14**, 301~318(1993).
 15. Bhargava, D. S. and Datar, M. T., “Analysis of nitrification during the aerobic digestion of secondary sludges,” *Environ. Pollut.*, **58**(1), 57~72(1989).
 16. 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. Monitoring Assessment*, **80**, 97~106(2002).
 17. Matsuda, A., Ide, T. and Fujii, S., “Behaviour of nitrogen and phosphorus during batch aerobic digestion of waste activated sludge-continuous aeration and intermittent aeration by control of DO,” *Water Res.*, **22**(12), 1495~1501(1988).
 18. California Compost Quality Council, *Compost Maturity Index*, pp. 9~11(2001).
 19. Rittmann, B. E. and McCarty, P. L., *Environmental Biotechnology*, McGraw-Hill Korea(한역판), 579~590(2002).
 20. 천효창, 황응주, 호치정, 이정규, 이현욱, “유기성 폐수슬러지를 이용한 액비 생산 시스템,” *한국폐기물자원순환학회*, 2010년도 추계학술연구발표회 논문집, p. 247(2010).
 21. 최종승, 이영욱, 최종명, 안영직, 서정학, “계란껍질에서 추출한 액상갈슘화합물의 사과나무에 대한 수관살포 효과,” *한국원예학회지*, **41**(5), 503~506(2000).