

통합 혐기소화액별 폭기처리에 따른 화학적 성분 변화와 무의 발아효과

변지은¹ · 이홍주² · 류종원³ · 황선구^{3,†}

Changes in Chemical Properties and Effect on Germination of Radish Seed from Aeration of Co-digestate Fertilizers

Ji-Eun Byeon¹, Hong-Ju Lee², Jong-Won Ryoo³, and Sun-Goo Hwang^{3,†}

ABSTRACT This study aimed to determine the minimum period of aeration treatment of co-digestate to develop it as liquid fertilizer and the chemical changes that occur in the aerobic liquefying process. The co-digestates were divided into three types depending on their additives: swine slurry anaerobic digestate (SS AD), swine slurry 70% + cow slurry 30% anaerobic digestate (SS + CS AD), and swine slurry 70% + apple pomace 30% anaerobic digestate (SS + AP AD). The pH of all co-digestates increased rapidly after 3 days of aerobic treatment, but had slightly decreased in SS AD after 9 days and in SS + CS AD and SS + AP AD after 15 days. All co-digestates showed a strongly reduced pH between 27 and 36 days of aeration treatment. SS AD had lower pH value, dissolved oxygen (DO), NH₄-N, and NO₃-N content under aerobic conditions than other co-digestates. To assess the fully decomposed liquid fertilizer, a germination test was performed on the undiluted and diluted co-digestate using the liquid fertilizer germination index (LFGI) method. The relative germination ratio, relative root elongation, and germination index of SS AD were higher than those of the others. When the LFGI method was used for the germination test, all co-digestates showed an appropriate germination index of 70 after 60 days of aeration treatment. Thus, we suggest that the minimum period of aeration treatment for co-digestates might be 60 days to develop the fully decomposed liquid fertilizer.

Keywords : aeration, chemical component, co-digestate, germination index, liquid fertilizer

최근 혐기소화처리는 고품 유기성 폐기물의 처리뿐만 아니라 바이오가스의 생산과 이용을 목적으로 이용되고 있다 (Lee *et al.*, 2007).

우리나라에서 가축분뇨를 이용하여 바이오가스를 생산할 때 수분함량이 97% 내외인 돼지 분뇨 슬러리를 주 대상으로 이용하고 있다(NIAS, 2014). 이 때문에 혐기소화시설의 설비용량이 커지는 문제와 바이오가스의 생산 이후 배출되는 소화액의 처리에 많은 노력이 투입되고 있다(NIAS, 2014). 가축분뇨를 이용하여 혐기소화를 하는 시설에서 혐기소화액을 처리하는 방식으로는 정화처리 방식, 액비화 방식, 하수 처리시설과 연계하여 처리하는 방식 등이 있다 (Jeong *et al.*, 2014). Jeong *et al.* (2014)에 의하면 국내 가

축분뇨 혐기소화 시설은 19개소이며, 그 중 12개소는 액비화 방식을 이용하여 혐기소화액을 처리하고 있다(Jeong *et al.*, 2014).

가축분뇨 혐기소화 시설에서 돼지 분뇨 슬러리를 주로 이용하고 있지만 최근에는 혐기소화 시 가축분뇨와 농업부산물이나 음식물쓰레기 등을 혼합하여 이용하는 통합 혐기소화 연구가 이루어지고 있다. 돈분 슬러리를 이용한 혐기소화와 비교하여 농업가공부산물인 감귤착즙박을 돈분 슬러리, 우분 슬러리와 혼합하였을 때 누적 메탄가스의 발생이 VS (Volatile Solid) kg 기준 1.4배, 투입기질 중량(kg) 기준 2.5배 높았다(Byeon & Ryoo, 2019). 혐기소화에서 음식물쓰레기 40%와 가축분뇨 60%의 비율로 혼합한 경우

¹상지대학교 생명환경과학대학 박사과정 (Ph.D. Student, College of Life and Environment Science, Sangji University, Wonju 26339, Korea)

²상지대학교 생명환경과학대학 석사과정 (M.S. Student, College of Life and Environment Science, Sangji University, Wonju 26339, Korea)

³상지대학교 생명환경과학대학 교수 (Professor, College of Life and Environment Science, Sangji University, Wonju 26339, Korea)

[†]Corresponding author: Sun-Goo Hwang; (Phone) +82-33-730-0512; (E-mail) sghwang9@sangji.ac.kr

<Received 5 June, 2020; Revised 21 September, 2020; Accepted 6 October, 2020>

가스 발생량이 가장 많았으나, 혐기소화액의 염분함량을 고려할 때는 음식물쓰레기의 투입량이 30% 이하가 적당하다고 보고하였다(Park *et al.*, 2011).

작물의 생육에 대한 혐기소화액의 영향 평가에서 돈분 혐기소화액(ADS)을 배추에 사용 시 수확량이 화학비료 처리구를 100% 기준으로 하였을 때 돈분 혐기소화액(ADS) 처리구에서 114% 증수되었다(Jeong *et al.*, 2014). 이때 토양의 중금속함량은 시험 전과 수확 시에 차이가 없었으며, 배추 내의 중금속함량도 식품위생법의 잔류허용기준보다 현저히 낮은 수준이었다(Jeong *et al.*, 2014). 돈분뇨 혐기소화액비를 벼에 사용한 경우 벼의 수량이 혐기소화액 100% 처리구, 혐기소화액 150% 처리구에서 표준시비구(N, P, K 처리구)와 비슷하거나 약간 증수되었다(Lim *et al.*, 2002).

혐기소화 기술은 다양한 원료를 이용하여 바이오가스 에너지를 생산할 수 있을 뿐만 아니라 농지환원 시 화학비료를 대신하여 이용이 가능하다(Kim *et al.*, 2015). 하지만, 혐기소화 시 투입 시료의 종류에 따라 발생한 혐기소화액의 성상이 차이가 있기 때문에 적절한 비료규격을 표준화하기에 어려움이 발생하며, 또한, 안정적인 농지 환원 유도를 위해서는 혐기소화액의 후처리를 통하여 무악취 부숙액비 생산기술 도입이 필요하다(Kim *et al.*, 2015).

폭기처리의 목적은 슬러리에 용존산소량을 높여 유기물 분해를 촉진하고, 냄새 제거 및 고형분의 침전과 스컴 형성을 억제하는 데 있다(Kim, 2020). 폭기량이 너무 적은 경우 호기성 미생물 활동이 약해지기 때문에 유기물 부숙에 의한 발열이 적으며, 폭기량이 너무 많은 경우 액온의 냉각으로 유기물의 분해속도가 지연되어 액비화 공정에 오랜 시간이 소요되기 때문에 동력비용의 증가를 야기한다(Kim, 2020). 반면에 폭기량이 적당할 경우 손실되는 열보다 발열량이 많아 액온이 상승하게 된다(Kim, 2020). 호기성 액비화는 폭기 기간에 질소성분의 손실이 크다는 단점이 있지만 호기성 액비화 제조공정에서 유기물 대부분이 분해되어 세분화 또는 액상상태를 유지하고 점도도 낮아져 살포에 용이하고, 단기간에 악취를 제거한 액비를 제조할 수 있으며, 온도 상승으로 인해 병원성 미생물, 대장균 등 사멸이 가능하다는 장점이 있다(Kim, 2003; Lee, 2012).

농업인 대부분이 직접 액비를 제조하는 경우 부숙 정도를 기간, 색, 향기 등 경험적으로 판단하고 있으므로 액비 제조의 표준화 공정에 대한 정확한 지표를 확보하는데 어려움이 발생하게 된다(Han, 2009). 부숙도 판정법에는 현장 또는 실험실에서 실시하는 방법과 생물을 이용한 판정법이 있으며, 현장 부숙도 판정법에는 외관의 퇴적 상태를 평점으로 표시하는 평점법과 냄새로 판정하는 취기평가법

등이 있고 실험실 부숙도 판정법에는 pH, 전기전도도(EC)의 변화로부터 부숙도를 판별하는 방법, 탄소율(C/N비)로 판정하는 방법, 원형크로마토그래피로 판정하는 방법, 양이온 교환능(Cation Exchange Capacity; CEC)으로 판정하는 방법이 있다(Han, 2009). 생물을 이용한 부숙도 판정법에는 무, 오이, 배추 등 식물의 종자를 이용해 판정하는 유식물(어린 식물)의 시험법과 화분관의 생장상태부터 식물 뿌리에 대한 반응성을 추정하는 방법인 화분(꽃가루)관 생장 시험법이 있다(Han, 2009). 이외에도 농촌진흥청고시(제 2019-11호 비료의 품질검사방법 및 시료채취기준)의 이화학적 검사방법 등에 의하면 2010년에 신설된 퇴비 부숙도 판정에는 콤팩(CoMMe-100)과 솔비타(Solvita)를 이용하는 기계적 부숙도 측정법과 종자발아법이 있다.

본 시험은 농작물에 사용하기 위한 부숙액비를 생산하기 위해 혐기소화액의 폭기처리 기간 동안 화학적 성분의 변화를 알아보고 생물을 이용한 종자발아법을 사용하여 적절한 폭기 기간을 판별하고자 시행하였다.

재료 및 방법

공시 혐기소화액

본 시험에 사용된 돈분 혐기소화액(Swine Slurry Anaerobic Digestate; SS AD), 돈·우분 혼합 혐기소화액(Swine Slurry 70% + Cow Slurry 30% Anaerobic Digestate; SS + CS AD), 돈분 사과착즙박 혼합 혐기소화액(Swine Slurry 70% + Apple Pomace 30% Anaerobic Digestate; SS + AP AD)은 중온조건(38 ~ 40°C)에서 교반이 10분 가동 20분 중단되도록 하고 HRT (Hydraulic Retention Time)를 40일로 설정한 혐기소화조에서 생산되었다.

시험방법

본 시험은 4월 5일부터 6월 4일까지 강원도 원주에 소재한 S대학교의 유리온실에서 상온조건으로 실시하였다. 기상청에 따르면 4월 평균 기온은 11.9°C, 5월 평균 기온은 19.2°C, 6월 평균 기온은 22.1°C이였으며, 유리온실 안 시험을 실시한 곳의 온도는 측정 결과 외부 온도보다 평균 4°C 높았다. 200 L PE통에 혐기소화액을 처리구 당 150 L 씩 투입하였으며, 처리구는 돈분 혐기소화액(SS AD) 처리구, 돈·우분 혼합 혐기소화액(SS + CS AD) 처리구, 돈분 사과착즙박 혼합 혐기소화액(SS + AP AD) 처리구이다. 폭기처리를 위해 브로워에 분배기와 에어호스를 연결한 후 유량계를 사용하여 처리구 당 설정한 공기량인 1 m³/당 0.1 m³/air/min의 동일한 공기량을 투입하였다. 또한, 타이머를

이용하여 30분 동안 공기가 유입되고 15분 동안 공기 유입이 중단되도록 설정하였다.

액비의 화학적 부숙도 평가

폭기처리 기간에 따른 화학적 성분 변화를 알아보기 위하여 폭기처리의 0일차, 3일차, 9일차, 15일차, 21일차, 27일차, 36일차, 45일차, 48일차에 pH, 전기전도도(EC), 용존산소(DO)를 측정하였다. 측정은 시료 100 mL를 채취하여 pH는 pH meter (FEP20-K, Mettler-Toledo AG, Switzerland), 전기전도도(Electrical Conductivity; EC)는 전기전도도(EC) meter (Pro 30, YSI, U.S.A), 용존산소(Dissolved Oxygen; DO)는 용존산소(DO) meter (Pro 20i, YSI, U.S.A)로 측정하였다. 총질소량(Total nitrogen; T-N), 암모늄태 질소(Ammonium nitrogen; NH₄-N), 질산태 질소(Nitrate nitrogen; NO₃-N)를 폭기처리 0일차, 12일차, 24일차, 36일차, 48일차, 60일차에 측정하였다. 농촌진흥청고시(제 2019-11호) 비료의 품질검사방법 및 시료채취기준에 의하여 총질소량(T-N)은 황산법을 이용하여 분석하였으며, 암모늄태 질소(NH₄-N)은 증류법, 질산태 질소(NO₃-N)은 데바루다합금법을 이용하여 분석하였다.

액비에 대한 생물학적 평가

폭기처리기간 동안 혐기소화액 처리구별 부숙여부를 판단하기 위해 두 가지 방법으로 종자발아실험을 실시하였다. 첫 번째는 환경부고시(제 2018-115호) 퇴비액비화기준 중 부숙도 기준 등에 관한 고시에 의하여 채취한 시료를 전처리하지 않은 원액으로 시험하는 방법, 두 번째는 Halder *et al.* (2016)이 제시한 액비발아지표(LFGI)를 이용하여 시험하는 방법을 이용하였다.

환경부고시(제 2018-115호) 퇴비액비화기준 중 부숙도 기준 등에 관한 고시에 의한 종자발아시험은 시료를 전처리하지 않고 원액상태 그대로 이용하여 발아 시험하는 방법으로서 발아지수 70이상일 때 부숙완료로 판정한다.

액비발아지표(LFGI)의 경우 종자발아시험 전 전처리가 필요하며, 전처리 방법은 시료의 총 고형물(Total Solid; TS) 값을 이용해 Halder *et al.* (2016)이 제시한 표에 따라 액을 희석한 후 설정한 조건(70°C, 50 rpm)에 맞는 항온수조에 2시간동안 가동을 한 다음 희석한 액을 여과지에 여과하는 것으로 발아지수가 70이상일 때 부숙 완료로 판정한다.

종자발아시험

종자발아 시험에는 농우바이오(Nongwoo bio, Suwon, Korea)의 서호무(*Raphanus sativus* cv. Seoho)를 사용하였다. 종

자발아시험 시 90 mm 크기의 페트리디쉬(Petri Dish, SPL Life Sciences)를 사용하였으며, 페트리디쉬에 시료를 투입하기 전 NO₂. 90 mm 여과지(Filter Paper, Advantec) 2매를 깔았다. 처리구별 혐기소화액을 페트리디쉬 당 5 mL를 투입하였으며, 대조구는 증류수 5 mL를 투입하였다. 투입 후 각 페트리디쉬에 서호무(*Raphanus sativus* cv. Seoho) 종자 30립씩 5반복으로 치상을 하였으며, 수분증발을 막기 위해 파라필름(Parafilm M, Bemis)으로 밀봉하였다. 발아 환경은 120시간동안 온도 25±1°C, 습도 85±1%의 압조건에서 실시하였다. 120시간이 지난 후 발아율과 뿌리길이를 측정하였으며, 이를 통해 상대발아율(Relative germination ratio; GR), 상대뿌리신장률(Relative root elongation; RE), 발아지수(Germination index; GI)를 다음의 산출식을 이용하여 계산하였다.

- 상대발아율(Relative germination ratio; GR)
= (처리구의 발아율/ 대조구 발아율 × 100)
- 상대뿌리신장률(Relative root elongation; RE)
= (처리구의 뿌리길이/ 대조구의 뿌리길이 × 100)
- 발아지수(Germination index; GI)
= (상대발아율(GR) × 상대뿌리신장률(RE)/ 100)

통계처리

측정값은 R package Agricolae을 이용하여 Duncan의 다중범위검정법(Duncan's new multiple rage test)을 통해 평균제곱오차를 고려하여 평균값을 5% 유의수준에서 비교하였다.

결과 및 고찰

공시 혐기소화액의 화학적 성분

공시 혐기소화액에 대한 화학적 성분은 Table 1과 같다. 돈분 혐기소화액(SS AD)은 총질소량(Total nitrogen; T-N)이 0.43%였고 돈·우분 혼합 혐기소화액(SS + CS AD)도 0.44%로 큰 차이가 없었다. 그러나 돈분 사과착즙박 혼합 혐기소화액(SS + AP AD)은 0.40%로 혐기소화액 중 총질소량(T-N)이 가장 낮았다. 암모늄태 질소(Ammonium nitrogen; NH₄-N)는 총질소량(T-N)과 같이 돈·우분 혼합 혐기소화액(SS + CS AD)에서 4076.91 mg/kg으로 가장 높았으며, 돈분 사과착즙박 혼합 혐기소화액(SS + AP AD)에서 3530.52 mg/kg으로 가장 낮았다. 질산태 질소(Nitrate nitrogen; NO₃-N)는 돈분 사과착즙박 혼합 혐기소화액(SS + AP AD)이 48.33 mg/kg으로 가장 높았으며, 돈분 혐기소화액(SS AD)이 41.18

Table 1. Chemical properties of co-digestates.

Analysis item (Unit)	Co-digestates		
	Swine slurry anaerobic digestate	Swine slurry + Cow slurry anaerobic digestate	Swine slurry + Apple pomace anaerobic digestate
Total nitrogen [T-N] (%)	0.43	0.44	0.40
Total phosphorus [T-P] (%)	0.024	0.019	0.021
Total potassium [T-K] (%)	0.30	0.29	0.29
As (mg/kg)	-	-	-
Cd (mg/kg)	-	-	-
Cr (mg/kg)	-	-	-
Cu (mg/kg)	2.32	-	0.56
Mg (mg/kg)	9.71	10.62	9.70
Ni (mg/kg)	-	-	-
Zn (mg/kg)	27.47	5.54	13.81
Ammonium nitrogen [NH ₄ -N] (mg/kg)	3,968.83	4,076.91	3,530.52
Nitrate nitrogen [NO ₃ -N] (mg/kg)	41.18	42.33	48.33

-: Non-detection.

mg/kg으로 가장 낮았다. 총인량(Total phosphorus; T-P)은 돈분 혐기소화액(SS AD)이 0.024%로 혐기소화액 중 가장 높았으며, 돈·우분 혼합 혐기소화액(SS + CS AD)이 0.019%로 가장 낮았다. 총칼리량(Total potassium; T-K)은 모든 혐기소화액에서 0.29 ~ 0.30%로 유사한 수치를 나타냈으며, 비소(Arsenic; As), 카드뮴(Cadmium; Cd), 크로뮴(Chromium; Cr), 니켈(Nickel; Ni)은 모든 혐기소화액에서 불검출되었다. 구리(Copper; Cu)는 돈·우분 혼합 혐기소화액(SS + CS AD)에서는 불검출이 되었지만 돈분 혐기소화액(SS AD)에서는 2.32 mg/kg로 검출되어 혐기소화액 중 가장 높았다. 마그네슘(Magnesium; Mg)은 돈분 혐기소화액(SS AD)에서 9.71 mg/kg, 돈분 사과착즙박 혼합 혐기소화액(SS + AP AD)에서 9.70 mg/kg으로 비슷한 수치를 보였으나 돈·우분 혼합 혐기소화액(SS + CS AD)은 10.62 mg/kg으로 혐기소화액 중 마그네슘(Mg)의 함량이 가장 높았다. 아연(Zinc; Zn)은 돈분 혐기소화액(SS AD)에서 27.47 mg/kg로 검출되었으며, 돈·우분 혼합 혐기소화액(SS + CS AD)에서는 5.54 mg/kg, 돈분 사과착즙박 혼합 혐기소화액(SS + AP AD)에서는 13.81 mg/kg으로 검출되어 돈분 혐기소화액(SS AD)이 상대적으로 높은 수치를 보였다.

폭기처리 기간 동안 pH, 전기전도도(EC), 용존산소(DO)의 변화

혐기소화액 폭기처리 시 pH, 전기전도도(Electrical Con-

ductivity; EC), 용존산소(Dissolved Oxygen; DO)의 변화는 Fig. 1과 같다. 모든 혐기소화액의 폭기처리 3일차에서 폭기처리 전(0일차)과 비교하여 pH가 급격히 높아졌으며, 그 후에도 지속적으로 높아져 9일차에 돈분 혐기소화액(SS AD)은 pH 9.56, 돈·우분 혼합 혐기소화액(SS + CS AD)은 pH 9.46, 돈분 사과착즙박 혼합 혐기소화액(SS + AP AD)은 pH 9.42을 보였다(Fig. 1A). 폭기 조건에서 pH가 증가되는 원인은 액 중의 CO₂가스에 기인되며, 이는 폭기처리에 의해서 CO₂가스가 액 중에 용해되지 못하고 제거되는 점과 혐기소화에 비하여 상대적으로 유기산 생산량이 낮은데 영향을 받은 것으로 판단된다는 보고가 있다(Jung *et al.*, 1998). 돈분 혐기소화액(SS AD)은 폭기처리 9일 이후 낮아지기 시작하여 폭기처리 48일에 pH 8.80로 나타났다. 폭기처리 15일에 돈·우분 혼합 혐기소화액(SS + CS AD)은 pH 9.51, 돈분 사과착즙박 혼합 혐기소화액(SS + AP AD)은 pH 9.48로 가장 높은 수치를 보였으며, 그 후 낮아지기 시작하였다. 폭기처리 36일차 이후 48일까지 돈·우분 혼합 혐기소화액(SS + CS AD)은 pH 9.02에서 pH 9.09, 돈분 사과착즙박 혼합 혐기소화액(SS + AP AD)은 pH 9.05에서 pH 9.11로 비슷한 수치를 보였다. 이와 유사하게도 Jeong *et al.* (2013)의 연구에서 폭기를 실시한 시험구는 초기에 pH가 높아지다가 기간이 경과함에 따라 낮아지는 경향을 보였다(Jeong *et al.*, 2013). pH가 감소하는 것은 알칼리도가 소진되는 시점부터는 생성되는 수소이온이 모두 pH 감소에 기여하기

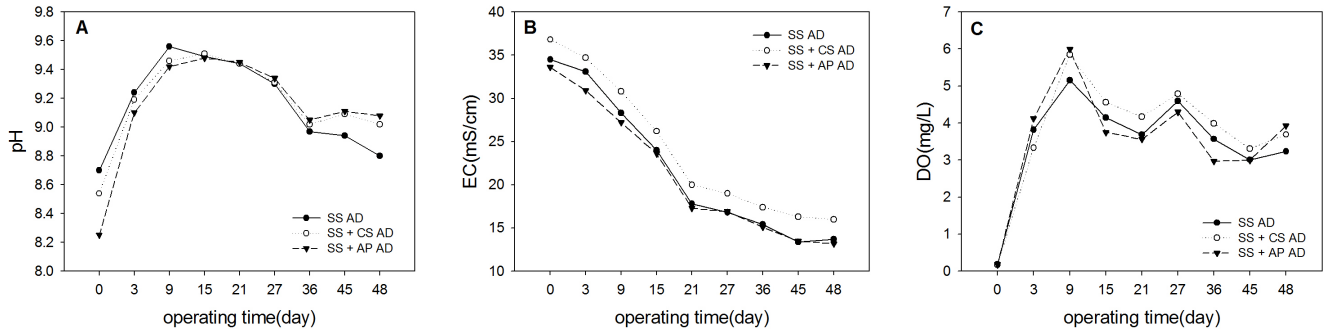


Fig. 1. Changes in (A) pH, (B) electrical conductivity, and (C) dissolved oxygen of co-digestates during the aeration treatments (days). The symbols represent the different digestates; swine slurry (SS), cow slurry (CS), apple pomace (AP), and anaerobic digestate (AD).

때문이다(Hwang, 2009).

폭기처리 48일차에 돈분 혐기소화액(SS AD)은 pH 8.80, 돈·우분 혼합 혐기소화액(SS + CS AD)은 pH 9.02, 돈분 사과착즙박 혼합 혐기소화액(SS + AP AD)은 pH 9.08로 측정되어 액비 부숙도 평가지표(ME, 2008)에 의하면 돈분 혐기소화액(SS AD)은 완숙으로 판정되었지만 돈·우분 혼합 혐기소화액(SS + CS AD)과 돈분 사과착즙박 혼합 혐기소화액(SS + AP AD)은 48일차에 완숙으로 판정하기에는 pH가 약간 높았다.

전기전도도(EC)는 폭기처리 전(0일차) 돈·우분 혼합 혐기소화액(SS + CS AD)이 36.8 mS/cm로 혐기소화액 중 가장 높았으며, 돈분 사과착즙박 혼합 혐기소화액(SS + AP AD)이 33.6 mS/cm로 가장 낮았다(Fig. 1B). 폭기처리 시작 후 48일의 폭기처리 기간 동안 전기전도도(EC)는 모든 혐기소화액 처리구에서 낮아졌으며 처리 전과 유사하게 돈·우분 혼합 혐기소화액(SS + CS AD)은 가장 높은 수치(16.0 mS/cm)를 보였고 돈분 혐기소화액(SS AD)은 13.7 mS/cm, 돈분 사과착즙박 혼합 혐기소화액(SS + AP AD)은 13.2 mS/cm의 비슷한 수치를 나타내었다. 이전 연구에서 폭기처리 후 폭기처리 전보다 부숙이 진행됨에 따라 전기전도도(EC)가 감소하는 경향을 나타냈다(Kim *et al.*, 2015; Han, 2008). 액비 부숙도 평가지표(ME, 2008)에 따르면 EC가 21 ds/m 이상이면 미숙, 16 ~ 20 ds/m이면 중간, 15 ds/m 이하이면 완숙이라 하였다. 따라서 폭기처리 48일차에 돈분 혐기소화액(SS AD)과 돈분 사과착즙박 혼합 혐기소화액(SS + AP AD)은 완숙으로 판정되었지만 돈·우분 혼합 혐기소화액(SS + CS AD)은 중간으로 판정되었다. 전기전도도(EC)가 높을 경우 염류집적과 이에 따른 발아불량 등의 원인이 될 수 있으며, 지나치게 염분이 많을 경우는 식물에 해로울 가능성이 높다(Yong, 1996; Ko *et al.*, 2008). 특히

축산폐기물은 유기물 함량과 염류농도가 다른 부산물에 비해 높으므로 전기전도도(EC) 값은 시용량 결정과 속성도 평가에서 중요한 요인이 될 수 있다(Yong, 1996).

용존산소(DO)는 폭기처리 9일차에 폭기 처리 전(0.17 ~ 0.18 mg/L)과 비교하여 돈분 혐기소화액(SS AD)은 5.15 mg/L, 돈·우분 혼합 혐기소화액(SS + CS AD)은 5.85 mg/L, 돈분 사과착즙박 혼합 혐기소화액(SS + AP AD)은 5.99 mg/L로 급격히 증가하였다(Fig. 1C). 하지만 용존산소(DO)는 폭기처리 기간 동안 증가와 감소를 반복하였으며, 폭기처리 48일차에 돈분 혐기소화액(SS AD)은 3.24 mg/L, 돈·우분 혼합 혐기소화액(SS + CS AD)은 3.69 mg/L, 돈분 사과착즙박 혼합 혐기소화액(SS + AP AD)은 3.93 mg/L로 폭기처리 9일차보다 그 수치가 감소하였다. Lee (2007)의 연구에 의하면 호기-혐기 단계로 설계된 처리구에서 호기 단계에는 폭기 초기 20분 이내에 용존산소(DO)가 급격히 증가하여 1시간 후 안정되기 시작하였으나 호기 단계 완료 후 유입수의 유기물로 인해 비폭기 7분 정도의 시간 경과 후 용존산소(DO)가 감소하였는데 이것은 산소 조건에서 무산소 조건이 형성됨을 알 수 있었다고 하였다(Lee, 2007). 본 시험에서 간헐적 폭기처리로 인해 산소 조건과 무산소 조건이 반복되면서 용존산소(DO)가 증가와 감소를 반복한 것으로 판단된다.

총질소량(T-N), 암모늄태 질소(NH₄-N), 질산태 질소(NO₃-N)의 변화

혐기소화액 폭기처리 시 총질소량(Total nitrogen; T-N), 암모늄태 질소(Ammonium nitrogen; NH₄-N), 질산태 질소(Nitrate nitrogen; NO₃-N)의 변화는 Fig. 2와 같다. 총질소량(T-N)은 폭기처리 전(0일차) 돈·우분 혼합 혐기소화액(SS + CS AD)은 0.44%, 돈분 혐기소화액(SS AD)은 0.43%로

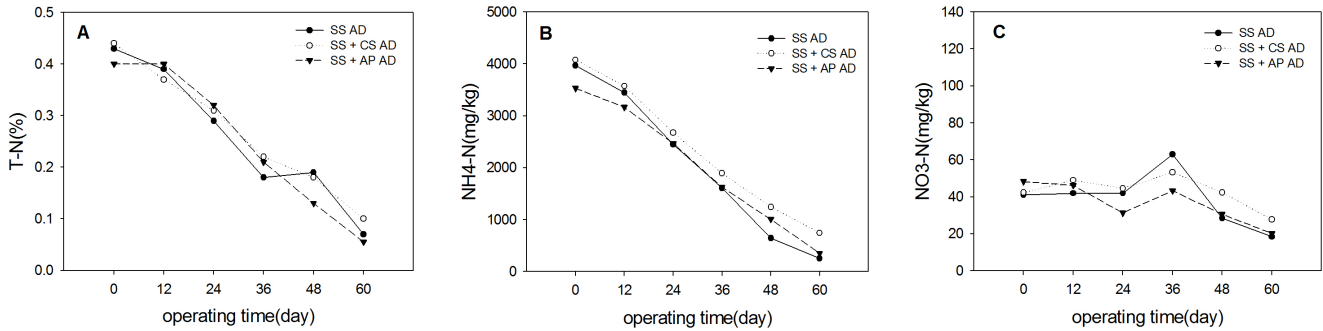


Fig. 2. Changes in (A) total nitrogen, (B) NH₄-N, and (C) NO₃-N of co-digestates during the aeration treatments (days). The symbols represent the different digestates: swine slurry (SS), cow slurry (CS), apple pomace (AP), and anaerobic digestate (AD).

유사한 수치를 보였지만 돈분 사과착즙박 혼합 혐기소화액 (SS + AP AD)은 0.40%로 두 혐기소화액보다 낮았다(Fig. 2A). 60일차에 돈분 혐기소화액(SS AD)은 0.07%, 돈·우분 혼합 혐기소화액(SS + CS AD)은 0.10%, 돈분 사과착즙박 혼합 혐기소화액(SS + AP AD)은 0.06%로 혐기소화액이 폭기처리가 진행될수록 총질소량(T-N)이 감소하였다. 이와 유사하게 Han *et al.* (2015)의 연구에서 고액분리 후 0.7 L/min 폭기하였을 때 총질소량(T-N)이 거의 감소하지 않고 고액분리한 시료와 고액분리를 하지 않은 시료를 3.5 L/min으로 폭기하였을 때는 폭기처리가 진행될수록 총질소량(T-N)이 감소하였는데 이는 폭기량에 따른 암모니아의 탈기현상에 기인된 결과라 하였다(Han *et al.*, 2015).

암모늄태 질소(NH₄-N)는 폭기처리 전 돈·우분 혼합 혐기소화액(SS + CS AD)이 4076.9 mg/kg으로 혐기소화액 중 가장 높았으며, 돈분 사과착즙박 혼합 혐기소화액(SS + AP AD)이 3530.5 mg/kg으로 가장 낮았다(Fig. 2B). 암모늄태 질소(NH₄-N)도 총질소량(T-N)과 같이 모든 혐기소화액에서 폭기처리가 진행될수록 감소하였으며, 혐기소화액 중 폭기처리 전보다 돈분 혐기소화액의 암모늄태 질소(NH₄-N)가 가장 많이 감소하였다. 이는 폭기조에서 공기공급량을 3.0 m³/hr/ton를 설정하여 폭기하였을 때 폭기가 진행될수록 암모늄태 질소(NH₄-N)가 감소한다는 결과와 비슷한 경향을 보였다(Heo, 2010). 돈·우분 혼합 혐기소화액(SS + CS AD)는 다른 혐기소화액에 비하여 폭기처리 전 뿐만 아니라 폭기처리 후 상대적으로 높은 암모늄태 질소(NH₄-N) 수치를 보였다. 전기전도도(EC)와 암모늄태 질소(NH₄-N)는 고도의 상관관계가 있다는 연구결과가 있다(Song *et al.*, 2006).

질산태 질소(NO₃-N)는 돈분 혐기소화액(SS AD)의 경우에는 폭기처리 전 41.2 mg/kg에서 24일차까지 유지하는 경향을 보였으며, 돈·우분 혼합 혐기소화액(SS + CS AD)의

경우에는 폭기처리 전(0일차) 42.3 mg/kg에서 12일차에 49.0 mg/kg으로 증가한 후 24일차에 44.6 mg/kg으로 감소하였다(Fig. 2C). 돈분 사과착즙박 혼합 혐기소화액(SS + AP AD)의 경우에는 폭기처리 전 48.3 mg/kg이었으나 폭기처리 후 감소하기 시작하여 24일차에 31.3 mg/kg으로 나타났다. 모든 혐기소화액은 24일차보다 36일차에 질산태 질소가 증가하였다. pH 수치가 폭기처리 27일과 36일 사이에서 감소하는 폭이 다소 큰 것으로 보아 폭기처리 36일차의 증가한 질산태 질소(NO₃-N)의 양은 pH 감소가 영향을 준 것으로 보인다. 또한, 폭기처리 이후 36일을 제외한 나머지 시기에서 돈·우분 혼합 혐기소화액(SS + CS AD)은 상대적으로 높은 질산태 질소(NO₃-N) 수치를 보였다.

상대발아율

폭기처리 기간 동안 각 혐기소화액에 대한 서호무(*Raphanus sativus* cv. Seoho)의 종자발아시험을 하였을 때 전처리 여부에 따른 상대발아율의 변화는 Table 2와 같다. 환경부고시(제 2018-115호) 퇴비액비화기준 중 부숙도 기준 등에 관한 고시에 의해 원액을 이용하였을 때 돈분 혐기소화액(SS AD)이 42일차부터 상대발아율(0.7%)이 나타났으며, 54일차에 돈분 혐기소화액(SS AD)이 76.4%로 상대발아율이 가장 높았다. 60일차에도 91.8%로 혐기소화액 중 상대발아율이 유의적으로 가장 높은 종자발아율을 보였다.

Halder *et al.* (2016)이 제시한 액비발아지표(LFGI)법을 이용하였을 때 희석된 돈분 혐기소화액(SS AD)은 18일차부터 상대발아율(1.3%)이 나타나기 시작하였으나 30일차까지는 돈·우분 혼합 혐기소화액(SS + CS AD), 돈분 사과착즙박 혼합 혐기소화액(SS + AP AD)과 유의한 차이가 없었다. 36일차에는 돈분 혐기소화액(SS AD)이 79.7%로 혐기소화액 중 상대발아율이 가장 높았으나 42일차부터는

Table 2. Relative germination ratio (GR) on co-digestates during the aeration treatments (days).

		0	6	12	18	24	30	36	42	48	54	60
Undiluted solution	SS AD	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.7±1.49a	35.2±40.26a	76.4±15.59a	91.8±9.52a
	SS + CS AD	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0a	0.0a	0.0b	0.7±1.49c
	SS + AP AD	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0a	0.0a	14.1±24.48b	69.7±18.66b
Diluted solution	SS AD	0.0	0.0	0.0	1.3±3.00a	13.4±26.39a	4.0±5.52a	79.7±28.47a	66.3±22.12a	100.5±0.41a	97.8±3.64a	99.2±2.68a
	SS + CS AD	0.0	0.0	0.0	0.0a	0.0a	20.9±36.49a	40.2±29.41b	26.8±15.41b	81.1±15.43b	91.8±5.87b	93.8±5.06b
	SS + AP AD	0.0	0.0	0.0	0.0a	0.0a	0.0a	13.4±21.06b	43.5±19.84ab	97.8±2.68a	98.5±2.82a	98.5±2.82ab

Swine slurry (SS), cow slurry (CS), apple pomace (AP), and anaerobic digestate (AD).

The diluted solution was generated by using the liquid fertilizer germination index (LFGI) method.

Results are the mean ± SD of 5 independent experiments. Letters indicate a statistically significant difference between co-digestates within the same day of each solution according to Duncan's multiple-range test (DMRT) at P ≤ 0.05. Means with the same letter are not significantly different.

Table 3. Relative root elongation (RE) on co-digestates during the aeration treatments (days).

		0	6	12	18	24	30	36	42	48	54	60
Undiluted solution	SS AD	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	2.28±5.10a	7.80±9.49a	9.96±7.30a	44.07±15.01a
	SS + CS AD	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0a	0.0a	0.0b	0.39±0.87c
	SS + AP AD	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0a	0.0a	4.48±7.59ab	23.34±4.08b
Diluted solution	SS AD	0.0	0.0	0.0	0.0	4.86±9.69a	1.45±2.22a	39.56±25.90a	42.00±8.25a	61.18±6.78a	62.88±4.94a	91.30±9.26a
	SS + CS AD	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0a	11.62±25.97a	18.86±13.29ab	17.81±15.04b	34.66±3.69c	39.35±6.62c	76.18±1.77b
	SS + AP AD	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0a	0.0a	5.46±8.36b	38.55±7.59a	43.09±5.83b	52.15±5.68b	75.22±13.66b

Swine slurry (SS), cow slurry (CS), apple pomace (AP), and anaerobic digestate (AD).

The diluted solution was generated by using the liquid fertilizer germination index (LFGI) method.

Results are the mean ± SD of 5 independent experiments. Letters indicate a statistically significant difference between co-digestates within the same day of each solution according to Duncan's multiple-range test (DMRT) at P ≤ 0.05. Means with the same letter are not significantly different.

돈분 사과착즙박 혼합 혐기소화액(SS + AP AD)과 유의한 차이가 없었다. 혐기소화액의 원액을 통해 측정된 결과와 유사하게 돈·우분 혼합 혐기소화액(SS + CS AD)은 48일차와 54일차에 혐기소화액 중 상대발아율이 가장 낮았다. 60일차에는 돈분 혐기소화액(SS AD)이 99.2%로 돈분 사과착즙박 혼합 혐기소화액(SS + AP AD)과 비교하여 유의한 차이가 없었다.

본 시험에서 대조구의 발아율이 99%이상으로 나타나 종자발아율과 상대발아율이 큰 차이를 보이지 않았다. ME (2008) 제시한 액비부숙도 평가지표(ME, 2008)에 의하면 종자발아율이 50이하이면 미숙, 50 ~ 70이면 중간, 70이상이면 완숙이라 판정한다. 종자발아율로 부숙여부를 판정할 때 원수를 이용하였을 때는 돈분 혐기소화액(SS AD)만 폭기처리 54일차부터 완숙으로 판정되었고 돈·우분 혼합 혐기소화액(SS + CS AD)은 미숙, 돈분 사과착즙박 혼합 혐기소화액(SS + AP AD)은 중간으로 판정되었다. 그러나 액비발아지표(LFGI)법을 이용하였을 때는 모든 혐기소화액이 폭기처리 48일차부터 완숙으로 판정되었다.

상대뿌리신장률

폭기처리 기간 동안 전처리 여부에 따른 서호무(*Raphanus sativus* cv. Seoho)의 상대뿌리신장률은 Table 3과 같다. 혐기소화액을 환경부고시(제 2018-115호) 퇴비액비화기준 중 부숙도 기준 등에 관한 고시에 의해 원액으로 이용하였을 때 폭기처리 48일차까지 모든 혐기소화액의 상대뿌리신장률은 유의한 차이가 없었다. 폭기처리 60일차에 돈분 혐기소화액(SS AD)이 44.07%로 상대뿌리신장률이 가장 높았으며, 돈·우분 혼합 혐기소화액(SS + CS AD)은 0.39%로 가장 낮았다.

Halder *et al.* (2016)이 제시한 액비발아지표(LFGI)법을 이용하였을 때 모든 혐기소화액이 30일의 폭기처리 동안 유의한 차이를 보이지 않았다(Table 3). 폭기처리 42일차에 돈분 혐기소화액(SS AD)은 42.0%의 상대적으로 높은 상대뿌리신장률을 보였으며 돈분 사과착즙박 혼합 혐기소화액(SS + AP AD)의 38.55%와 유의한 차이를 보이지 않았다. 돈분 혐기소화액(SS AD)은 폭기처리 48일차(61.18%)와 54일차(62.88%)에서 다른 혐기소화액에 비해 유의적으로 높은 상대뿌리신장률을 보였다. 폭기처리 60일차에 돈·우분

혼합 혐기소화액(SS + CS AD)의 상대뿌리신장률(76.18%)은 돈분 사과착즙박 혼합 혐기소화액(SS + AP AD)의 75.22%와 유의한 차이를 보이지 않았으나 돈분 혐기소화액(SS AD)의 91.30%보다는 상대적으로 낮은 수치를 보였다.

상대발아율보다 상대뿌리신장률의 수치가 낮는데 이것은 발아와 뿌리발육 모두 어떤 독성물질의 영향을 받지만 대개 뿌리발육은 발아보다 더 민감하기 때문이다(Ko *et al.*, 2008).

발아지수

폭기처리 기간 동안 각 혐기소화액에 대한 서호무(*Raphanus sativus* cv. Seoho) 종자의 발아지수 변화는 Table 4와 같다. 환경부고시(제 2018-115호) 퇴비액비화기준 중 부숙도 기준 등에 관한 고시에 의해 원액을 이용하였을 때 48일차까지 모든 혐기소화액의 발아지수가 유의한 차이가 없었다. 폭기처리 54일차에서 돈분 혐기소화액(SS AD)의 발아지수(8.41%)가 혐기소화액 중 가장 높았으며, 돈·우분 혼합 혐기소화액(SS + CS AD)과 돈분 사과착즙박 혐기소화액(SS + AP AD)은 유의한 차이가 없었다. 하지만, 60일차에는 돈분 사과착즙박 혼합 혐기소화액(SS + AP AD)의 발아지수(16.7%)는 돈·우분 혼합 혐기소화액(SS + CS AD)의 수치(0.01%)보다 유의하게 높았으며, 돈분 혐기소화액(SS AD)은 가장 높은 수치(41.25%)를 보였다. Ko *et al.* (2008)의 연구에 의하면 퇴비화과정에서 초기에는 발아지수가 32 ~ 41을 나타내었으며, 후기 발아지수가 121 ~ 125를 나타내었다(Ko *et al.*, 2008). 이것은 초기에 발아지수가 낮은 것은 상당한 양의 암모니아 및 독성 화합물을 생성했기 때문이며, 반복적으로 호기과정이 지나면 물질들은 제거되거나 비식물독성 화합물로 전환된다고 하였다(Ko *et al.*, 2008).

Halder *et al.* (2016)이 제시한 액비발아지표(LFGI)법을 이

용하였을 때 돈분 혐기소화액(SS AD)이 폭기처리 24일차에 발아지수(2.7%)가 나타났으나 30일차까지는 돈·우분 혼합 혐기소화액(SS + CS AD), 돈분 사과착즙박 혼합 혐기소화액(SS + AP AD)과 유의한 차이가 없었다. 돈분 혐기소화액(SS AD)은 폭기처리 36일차에서 60일차까지 36.26%에서 90.34%의 상대적으로 높은 발아지수를 보였다. 폭기처리 60일차에서 돈·우분 혼합 혐기소화액(SS + CS AD)의 발아지수(71.44%)는 돈분 사과착즙박 혼합 혐기소화액(SS + AP AD)의 수치(74.05%)와 유의한 차이를 보이지 않았다.

환경부고시(제 2018-115호) 퇴비액비화기준 중 부숙도 기준 등에 관한 고시에 의하면 원액으로 종자발아시험 시 발아지수가 70이상일 때 부숙 완료로 판정하지만 본 시험에서는 60일의 폭기처리 동안 모든 혐기소화액에서 발아지수가 50이하로 나타나 판정에 어려움이 있었다. 하지만, Halder *et al.* (2016)이 제시한 액비발아지표(LFGI)법에 의하면 종자발아시험 시 발아지수가 70이상일 때 부숙 완료로 판정하기 때문에 본 시험에서 액비발아지표(LFGI)법을 이용하여 종자발아시험을 하였을 때 원액으로 시험했을 때와 달리 모든 혐기소화액이 폭기처리 60일차에 발아지수가 70이상 나타나 부숙 완료로 판정되었다.

Lee & Eue (1999)의 연구에 의하면 배추 종자를 이용하여 종자발아시험을 하였을 때 50 ppm이상의 암모늄태 질소농도에서 발아지수가 급격히 감소하는 결과를 보였으며, 발아지수 50과 80에 대한 암모늄태 질소의 농도를 계산하면 각각 148 ppm, 65 ppm이라고 하였다(Lee & Eue, 1999). 본 시험에서 원액을 이용하여 종자발아시험을 실시하였을 때 암모늄태 질소가 높은 혐기소화액이 발아지수가 낮았으며, 모든 혐기소화액의 발아지수가 50이하를 나타낸 이유는 발아지수 80에 대한 암모늄태 질소의 농도인 65 ppm보

Table 4. Germination index (GI) on co-digestates during the aeration treatments (days).

		0	6	12	18	24	30	36	42	48	54	60
Undiluted solution	SS AD	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.08±0.17a	4.66±6.48a	8.41±6.68a	41.25±17.36a
	SS + CS AD	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0a	0.0a	0.0b	0.01±0.03c
	SS + AP AD	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0a	0.0a	2.12±4.55b	16.72±6.92b
Diluted solution	SS AD	0.0	0.0	0.0	0.0	2.70±5.94a	0.15±0.22a	36.26±28.36a	26.58±6.71a	61.50±6.94a	61.47±4.92a	90.34±6.72a
	SS + CS AD	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0a	9.79±21.89a	10.57±11.00b	6.00±7.26b	28.40±7.10c	36.17±6.56c	71.44±4.01b
	SS + AP AD	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0a	0.0a	2.11±4.41b	17.00±8.95a	42.16±5.86b	51.37±5.85b	74.05±13.54b

Swine slurry (SS), cow slurry (CS), apple pomace (AP), and anaerobic digestate (AD).

The diluted solution was generated by using the liquid fertilizer germination index (LFGI) method.

Results are the mean ± SD of 5 independent experiments. Letters indicate a statistically significant difference between co-digestates within the same day of each solution according to Duncan's multiple-range test (DMRT) at P ≤ 0.05. Means with the same letter are not significantly different.

다 높았을 뿐만 아니라 발아지수 50에 대한 암모늄태 질소의 농도인 148 ppm보다도 높았기 때문에 판단된다.

적 요

본 시험은 혐기소화액의 폭기처리 기간에 대한 화학적 성분의 변화와 혐기소화액을 액비로 이용하기 위한 최소한의 부숙완료 시기를 알아보기 위해 실시하였다. 혐기소화액은 돈분 혐기소화액(SS AD), 돈·우분 혼합 혐기소화액(SS + CS AD), 돈분 사과착즙박 혼합 혐기소화액(SS + AP AD)을 이용하였으며, 공기량은 1 m³당 0.1 m³/air/min를 30분 유입, 15분 중단되도록 설정하였다.

1. pH는 모든 혐기소화액 처리구에서 폭기처리 3일차에 폭기처리 전보다 급격히 높아졌으며, 돈분 혐기소화액(SS AD)은 9일차 후 돈·우분 혼합 혐기소화액(SS + CS AD), 돈분 사과착즙박 혼합 혐기소화액(SS + AP AD)은 15일 후 서서히 감소하기 시작하여 27일과 36일 사이에서 상대적으로 급격히 낮아졌다. 27일과 36일 사이의 급격히 낮아진 pH는 부숙기간 동안 발생한 질산태 질소의 변화에 기인한 것으로 보인다.
2. 전기전도도(EC)는 모든 혐기소화액이 폭기처리가 진행될수록 감소하였으며, 48일차에 돈·우분 혼합 혐기소화액이 16.0 mS/cm로 가장 높았다.
3. 용존산소(DO)는 모든 혐기소화액이 폭기처리 전보다 폭기처리 시작 후 급격히 증가하였으나 그 후에는 증가와 감소를 반복하였다. 48일차에 돈분 사과착즙박 혼합 혐기소화액(SS + AP AD)가 3.93 mg/L로 혐기소화액 중 용존산소가 가장 높았지만 돈분 혐기소화액(SS AD), 돈·우분 혼합 혐기소화액(SS + CS AD)도 각각 3.24 mg/L, 3.69 mg/L로 나타나 큰 차이가 없었다.
4. 총질소량(T-N)과 암모늄태 질소(NH₄-N)는 폭기처리가 진행될수록 모든 혐기소화액에서 지속적으로 감소하였다. 질산태 질소(NO₃-N)는 돈분 혐기소화액(SS AD)의 경우 24일차까지 유지하는 경향을 보인 후 36일차에 급격히 증가하였으나 다시 급격히 감소하였고 돈·우분 혼합 혐기소화액(SS + CS AD)은 36일차까지 증가와 감소를 반복하다가 그 후부터 지속적으로 감소하였으며, 돈분 사과착즙박 혼합 혐기소화액(SS + AP AD)은 폭기처리 후 24일차까지 감소하였으나 36일차에 증가한 후 다시 감소하였다.
5. 환경부고시(제 2018-115호) 퇴비액비화기준 중 부숙도 기준 등에 관한 고시에 의한 원액을 이용한 방법과

Halder *et al.* (2016)이 제시한 액비발아지표(LFGI)법을 이용하여 서호무(*Raphanus sativus* cv. Seoho) 종자발아시험을 실시하였을 때 돈분 혐기소화액(SS AD)은 상대발아율, 뿌리신장률, 발아지수에서 다른 혐기소화액에 비하여 높은 수치를 보였지만, 돈·우분 혼합 혐기소화액(SS + CS AD)은 비교적 낮은 수치를 보였다. 이와 같은 현상은 다른 혐기소화액과 비교하여 돈·우분 혼합 혐기소화액(SS + CS AD)은 암모늄태 질소(NH₄-N)가 상대적으로 높았기 때문에 보인다. Lee & Eue (1999)의 연구에 의하면 배추 종자를 이용하여 종자발아시험을 하였을 때 암모늄태 질소의 농도에 의해 발아지수가 영향을 받았다(Lee & Eue, 1999).

6. pH가 약알칼리성을 띠면서 EC와 암모늄태 질소가 낮아지면 발아지수가 높아지는 경향을 보였다.
7. 서호무(*Raphanus sativus* cv. Seoho) 종자의 발아지수를 통한 부숙도 완료 평가에서 환경부고시(제 2018-115호) 퇴비액비화기준 중 부숙도 기준 등에 관한 고시에 의한 원액을 사용한 방법은 폭기처리 기간에 모든 혐기소화액에서 적절한 수치를 보이지 않았으나 Halder *et al.* (2016)이 제시한 액비발아지표(LFGI)법을 적용할 경우 60일의 폭기처리에서 70 이상의 적절한 발아지수를 관찰하였다.

혐기소화액 후처리 방법으로 폭기처리를 실시할 경우 최소 60일 이상 진행되어야 부숙완료로 판정될 것으로 보인다.

사 사

본 연구는 농촌진흥청 연구과제인 가축분뇨와 농업분야 재활용 자원을 이용한 통합혐기소화 및 혐기소화액 처리기술 개발(PJ012851022019) 과제에 의해 이루어졌으며, 이에 감사드립니다.

인용문헌(REFERENCES)

- Byeon, J. E. and J. W. Ryoo. 2019. Biogas production by anaerobic co-digestion of livestock manure slurry with fruits pomace. *Journal of the Korea Organic Resources Recycling Association* 27(3) : 5-13.
- Halder, J. N., S. R. Kim, T. W. Rang, M. Yabe, and M. G. Lee. 2016. Establishing a method to evaluate the maturity of liquid fertilizer by Liquid Fertilizer Germination Index (LFGI). *Journal of the Faculty of Agriculture, Kyushu University* 61(2) : 417-426.
- Han, C. B. 2009. The Changes of Component of Piggery Slurry during Fermentation Periods. M.S. dissertation, Kong Ju

- National University.
- Han, S. K., H. S. Jung, H. W. Song, and D. H. Ahn. 2015. A study on the characteristic of liquid fertilizer of anaerobic digestion waste water as affected by aeration rate and solid-liquid separation. *Journal of Korea Society of waste Management* 32(6) : 547-552.
- Heo, M. Y. 2010. The effect of aeration on the slurry quality and microbial communities in liquid swine manure during the digestion. M.S. dissertation, Chonnam National University.
- Hwang, E. J. 2009. Organic matter degradation and nitrification characteristics in aerobic digestion of sewage sludge. *Journal of Korean Society of Environmental Engineers* 31(10) : 865-872.
- Jeong, C. S., J. G. Bak, A. S. Roh, W. G. Cho, S. S. Lee, and Y. H. Moon. 2014. Effect on the growth of chinese cabbage and chemical composition of the liquid piggery slurry digested anaerobically in biogas plant. *Journal of Animal Environmental Science* 20(3) : 125-132.
- Jeong, K. H., M. A. Khan, M. G. Lee, J. G. Kim, D. W. Han, and J. H. Kwag. 2013. Effect of aeration on fertilization and sludge accumulation of pig slurry. *Journal of Animal Environmental Science* 19(1) : 47-54.
- Jeong, K. H., J. G. Kim, D. W. Han, and J. H. Kwag. 2014. Status of anaerobic digestion facility for pig-slurry in Korea. *Journal of animal environmental science* 20(1) : 27-34.
- Jung, K. Y., N. J. Cho, and Y. G. Jeong. 1998. Comparison of liquid composting efficiency using liquid pig manure in different condition. *Korean Journal of Environmental Agriculture* 17(4) : 301-305.
- Kim, H. J. 2020. Evaluation of water evaporation during liquid composting process of centralized animal manure treatment plant. M.S. dissertation, Chungnam National University.
- Kim, S. R., H. J. Kim, H. J. Nizel, J. H. Rhee, M. C. Shin, T. H. Kim, and M. G. Lee. 2015. Application of the Thermophilic Aerobic Oxidation (TAO) system to anaerobic digestate stabilization in Korea. *Journal of Animal Environmental Science* 21(1) : 21-28.
- Kim, W. J. 2003. A study on the liquid fertilizer using of swine slurry. M.S. dissertation, Hanbat National University.
- Ko, H. J., K. Y. Kim, H. T. Kim, C. N. Kim, and M. Umeda. 2008. Evaluation of maturity parameters and heavy metal contents in composts made from animal manure. *Waste Management* 28(5) : 813-820.
- Lee, J. P., S. C. Park, and J. S. Lee. 2007. Study on the biogas production from livestock manure. *Korean Society for New and Renewable Energy 2007 Spring Conference* : 575-578.
- Lee, J. S. 2012. Resource Recovery from Livestock Wastewater by Autothermal Anaerobic-Aerobic Digestion Process. Ph.D. dissertation, Kyungsung University.
- Lee, J. W. 2007. Development of Livestock Wastewater Treatment Process and Its Evaluation of Removal Efficiency. Ph.D. dissertation, Mokpo National University.
- Lee, M. K. and U. K. Eue. 1999. Factors on germination index - The salt and organic acids concentrations-. *Journal of Environmental Science* 5(1) : 25-30.
- Lim, D. K., W. K. Park, S. I. Kwon, J. J. Nam, and S. B. Lee. 2002. Application amount of anaerobic digestion waste water from methane fermentation of pig manure on rice. *Korean Journal of Environmental Agriculture* 21(4) : 248-254.
- National Institute of Animal Science (NIAS). 2014. Development of low cost biogas production system utilizing livestock manure. Research Report. Suwon, Korea : 10.
- Ministry of Environment (ME). 2008. A Study on the Improvement of Regulations, such as the Mitigation of Agricultural Land Securing Required for Liquid Spreading. Sejong, Korea : 28.
- Park, W. K., N. B. Park, J. D. Shin, S. G. Hong, S. I. Kwon, and K. K. Kang. 2011. Study on characteristics of biogas production and liquid fertilizer with anaerobic co digestion of livestock manure and food waste. *Korean Journal of soil science and fertilizer* 44(5) : 895-902.
- Song, S. T., M. C. Kim, and K. J. Hwang. 2006. Determination of nutrient contents of liquid pig manure and the correlation of components as fertilizer in Western JeJu Area. *Journal of the Korean Society of Grassland Science* 26(1) : 15-24.
- Yong, S. H. 1996. Assessment of Maturity and Quality of the Animal Waste By-Product Fertilizer. M.S. dissertation, Kangwon National University.