

발아지수를 이용한 혼합 혐기소화액의 부숙도 평가 및 폭기기간 설정

변지은^a, 이홍주^b, 황선구^c, 임태진^c, 류종원^{c†}

Maturity Evaluation and Determination of Aeration Time Using Germination Index of Co-Digestates

Ji-Eun Byeon^a, Hong-Ju Lee^b, Sun-Goo Hwang^c, Tae-Jin Rhim^c, Jong-Won Ryoo^{c†}

(Received: May 20, 2019 / Revised: Jan. 1, 2020 / Accepted: Jan. 3, 2020)

ABSTRACT: This study was conducted to evaluate the effect of optimal aeration time of livestock manure slurry with fruits pomace on germination index. Six co-digestates of livestock manure slurry with fruits was aerated with 0.1 m³ air/m³ · min for 54 days. The maturity of digestates was evaluated using the germination method. The germination index(GI) of co-digestate of SS + CS + MP was more than 70 at the 30th day of aeration. The GI of co-digestate of SS + CS was more than 70 at the 36th day of aeration. The GI of digestate of swine manure slurry alone was 70 at the 54th day of aeration. The co-digestate of SS + MP caused to shorten 24 days of aeration period to reach GI of 70, compared to swine manure digestate. These results suggest that the germination index of seed could be used to establish the optimal aeration time for co-digestate of liquid fertilizer.

Keywords: Livestock manure, Fruits pomace, Co-digestate, Aeration time, Germination index

초 록: 본 연구는 가축분뇨 슬러리와 과일착즙박 혼합 혐기소화액의 폭기기간이 발아지수에 미치는 영향을 구명하여 혐기소화액 종류별 적정 폭기기간 설정에 활용하고자 수행하였다. 6개 혐기소화액은 폭기처리 기간 중 공기의량을 0.1 m³ air/min.m³ 주입하고, 52일 동안 폭기하였다. 혐기소화액의 부숙도를 평가하기 위하여 무 종자를 이용하였다. 돈분 + 우분 + 감귤착즙박 혼합 혐기소화액은 처리구 중 가장 빨리 폭기처리 30일에 발아지수(GI)가 70 이상을 나타내었다. 돈분 + 우분 혼합혐기소화액은 폭기처리 36일에 발아지수(GI)가 70 이상을 나타내었다. 돈분 슬러리 100 % 단독 혐기소화액의 발아지수(GI)는 가장 늦은 폭기처리 54일에 70에 도달하였다. 돈분슬러리 + 과일착즙박 혼합소화액이 돈분 단독 혐기소화액 보다 발아지수 70 도달 폭기기간이 24일 단축되었다. 혐기소화액의 호기성 액비 처리에서 종자 발아지수는 적정 폭기기간 설정에 활용이 가능 할 것으로 보인다.

주제어: 가축분뇨, 과일착즙박, 혼합소화, 폭기기간, 발아지수

^a 상지대학교 생명환경과학대학 박사과정(Ph.D. Student, College of Life and Environment Science, SangJi University)

^b 상지대학교 생명환경과학대학 석사과정(M. S. Student, College of Life and Environment Science, SangJi University)

^c 상지대학교 생명환경과학대학 교수(Professor, College of Life and Environment Science, SangJi University)

† Corresponding author(e-mail: jwryoo@sangji.ac.kr)

1. 서론

혐기소화액의 농경지 시용은 다량, 미량요소 공급 효과, 토양의 물리, 화학 개선효과, 토양 생물상의 활성유지 증진 등의 유익한 효과를 있어서, 비료로 활용될 수 있는 우수한 자원이다. Lim et al.(2002)의 연구결과 벼재배 시 벼의 수량은 돈분 혐기소화액 70% + 화학비료 30%구와 돈분 혐기소화액 100%구가 표준시비구보다 약간 증수되었다고 보고하였다.¹⁾

혐기소화액(Digestate)은 혐기소화조 후처리 없이 직접 농경지에 시용할 수 있다. 그러나 바이오가스 잔여물인 혐기소화액을 호기성 액비화 처리 없이 농경지에 직접 살포할 경우 약해(phytotoxicity), 점도, 악취로 작물 시용에 적합하지 않을 경우도 있다. 혐기소화액(Digestate)의 호기성 후처리는 액비 품질을 높이고 농작물 시용시 안정성을 높이기 위하여 실시한다. 따라서 호기성(aerobic degradation) 후처리를 통하여 작물의 비료로서 적용성을 높이는 것이 필요하다. 안정화된 혐기소화액비의 생산을 위하여 액비의 부숙도와 안정성 평가를 하여 부숙도 지표 설정이 필요한 실정이다.

호기적 액비화는 악취 제거에 뛰어나고 온도 상승으로 인해 위생해충 사멸이 가능할 뿐만 아니라 혐기소화액 내의 미분해 되어 존재하는 유기성고형물을 분해시켜 준다. 혐기소화액을 직접 농경지에 살포하는 것 보다 고액분리하여 혐기성소화액의 건물함량을 낮출 경우 이송을 수월하게 하고 악취 저감 및 엽면 살포(topdressing)시 식물체의 피해(burn)를 방지할 수 있다.^{2,3)}

종자발아법은 퇴비에 의하여 작물에 나타나는 생리적 약해작용(phytotoxicity)을 평가할 수 있는 일반적인 기술이다.⁴⁾ 종자발아법은 Warman⁵⁾, Gariglio et al.⁶⁾에 의하여 퇴비의 부숙도 평가에 이용되었다. 액비화 처리 후 부숙정도를 알아보기 위하여 부숙도 판정을 하게 되는데 부숙도의 판정은 퇴비 또는 액비가 토양에 시비되었을 때, 식물의 발아와 생육에 장애를 주지 않는 부숙 단계를 물리화학적, 생화학적, 식물독성학적 시험 등을 통하여 규명하는 것이다.⁷⁾ 부숙도 판정 방법으로는 여러 가지가 있는데 그 중 종자발아시험은 식물의 종자를 이용하여 발

아율과 생육량을 조사한 후 판별하는 방법으로 치상 후 발아율과 뿌리길이를 측정한다.⁸⁾ 퇴비의 경우 발아율과 뿌리길이를 측정 후 상대발아율과 상대 뿌리신장률을 산출하여 발아지수를 구한다. 퇴비의 종자발아법에 의하면 발아지수 70 이상일 때 부숙 완료로 판정한다고 정해져 있다. 그러나 현재까지 액비의 종자발아법 규정이 없어 종자발아시험으로 부숙정도를 판정할 수 있는 없으나 최근 가축분뇨 액비의 부숙도를 종자발아법으로 평가하는 연구가 보고되었다.⁹⁾ 혐기발효 공정을 통하여 바이오가스를 생산한 후 남은 혐기소화액은 다양한 원료를 사용하므로 폭기기간이 상이할 것으로 판단되어 적정 폭기기간 설정이 필요하다. 그러나 혼합 혐기소화액의 액비화 기간에 대한 관련 연구결과가 미흡한 실정이다.

본 연구는 혼합혐기소화액의 폭기처리 기간에 따른 종자발아지수를 비교 검토하여 다양한 혼합 혐기소화액의 적정 폭기기간 설정과 액비부숙도 평가 자료로서 활용하고자 한다.

2. 재료 및 방법

2.1. 혐기소화액 액비화 시험 공시시료

혐기소화액의 호기성 액비화 시험에 사용한 공시시료는 경기도 이천에 소재한 농가에서 채취해온 돈분 슬러리와 경기도 여주에 소재한 농가에서 채취해온 우분 슬러리를 사용하였다. 과실착즙박은 충청북도 충주에 소재한 식품가공공장에서 채취한 사과 착즙박과 제주특별자치도 개발공사에서 채취해온 감귤착즙박을 혼합 혐기소화 재료로 사용하였다. 돈분슬러리 단독 혹은 가축분뇨와 과실 착즙박을 혼합하여 혐기소화시킨 혼합 혐기소화액을 호기성 액비화 시험 시료로 사용하였다.

본 시험에 사용한 원료별 고형물 함량 중 총고형물(TS)의 함량은 우분 슬러리가 22.5%로 가장 높았으며, 돈분 슬러리가 8.3%로 가장 낮았으며, 사과 및 감귤착즙박은 각각 13.2, 11%를 나타내었다. 돈분 100% 단독 처리 혐기소화액, 돈분 70%와 우분

30 %(v/v) 혼합혐기소화액, 돈분 70 %와 과실착즙박 (사과 및 감귤착즙박) 30 %(v/v) 혼합 혐기소화액 등 6개 처리구를 두었다(Table 1).

2.2. 혐기소화액의 폭기 시험 장치 및 시험방법

혐기성소화액의 호기성 액비생산을 위하여 air-pump 를 이용하였으며 폭기처리 기간 중 공기량은 유량계를 이용하여 모든 처리구에 동일하게 0.1 m³ air/min.m³를 연속으로 공급하였다. 또한 유량계에 에어호스를 이용하여 air-stone(직경 2.5 cm)을 연결한 후 사용하였다. 시험은 컨테이너에서 20 L 원형 PE통에 처리구 별 혐기소화액을 10 L씩 채우고 폭기시험을 실시하였으며, 컨테이너에서 실내온도 30 °C를 유지하였다.

2.3. 혐기소화액 화학적 특성 분석

본 시험에서 혐기소화액의 BOD, TN(Total Nitrogen) 및 TP(Total Phosphorus)는 수질오염공정시험법¹¹⁾에 따라 TN는 킬달중류법¹⁰⁾을 TP는 UV spectrometer (Shimadzu, Japan)를 이용하였다. pH는 pH meter(FEP20-K, Mettler-Toledo AG)로 측정하였다. EC는 EC meter (S230-K, Mettler-Toledo AG)로 측정하였다.

2.4. 종자발아시험에 의한 발아지수 조사

종자발아시험은 혐기소화액 처리구별로 폭기처리 하였을 때 부숙 정도를 확인하기 위하여 실시하였으며, 폭기 후 6일 간격으로 시료를 채취하였다. 종자발아시험은 무 종자(*Raphanus sativus L.*)를 사용하였고, 무 종자의 품종은 서호골드무(농우바이오

종묘)를 사용하였다. 종자발아시험은 시료 채취 후 바로 실시하였으며, 페트리디쉬에 90 mm 여과지(filter paper) 2매를 깔았다. 폭기처리한 혐기소화액 3배 희석액을 페트리디쉬 당 5 mL씩 넣어주었으며, 대조구는 증류수 5 mL 넣어주었다. 그 후 페트리디쉬 당 30립씩 3반복으로 치상하였으며, 수분증발을 막기 위해 파라필름으로 밀봉하였다. 종자발아시험은 120 시간 동안 실시하였으며, 생장상의 온도는 25±1 °C, 습도는 85±1 °C의 암조건 처리를 하였다. 치상 후 120시간이 지난 후 발아율과 뿌리길이를 측정하였으며, 무 종자의 발아는 유근이 1 mm 이상 나온 것을 발아한 것으로 판정하였다. 조사항목으로는 상대발아율, 상대뿌리신장률, 발아지수를 조사하였다. 상대발아율(GR), 상대뿌리신장률(RE)은 아래 공식을 이용하여 산출하였다. 발아지수는 발아율과 뿌리신장률을 곱한 값(%)으로 계산된다.

- Relative germination ratio (GR, %) = (처리구의 발아율/control 발아율) × 100
- Relative root elongation(RE, %) = (처리구의 뿌리길이/ control 뿌리길이) × 100
- Germination index(GI) = GR × RE / 100

2.5. 통계 분석

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

Table 1. Treatments of Co-Digestate Liquefying

Treatments	Contents of treatments
SS (100 %) AD	Anaerobic digestate of swine manure slurry 100 %
SS (70 %) + CS (30 %) AD	Anaerobic digestate of swine manure slurry 70 % + cow manure slurry 30 %(v/v)
SS (70 %) + AP (30 %) AD	Anaerobic digestate of swine manure slurry 70 % + Apple pomace 30 %(v/v)
SS (70 %) + MP (30 %) AD	Anaerobic digestate of swine manure slurry 70 % + mandarin pomace 30 %(v/v)
SS (35 %) + CS (35 %) + AP (30 %) AD	Anaerobic digestate of swine manure slurry 35 % + cow manure slurry 35 % + apple pomace 30 %(v/v)
SS (35 %) + CS (35 %) + MP (30 %) AD	Anaerobic digestate of swine manure slurry 35 % + cow manure slurry 35 % + mandarin pomace 30 %(v/v)

3. 결과 및 고찰

3.1. 혼합 혐기소화액의 화학적 성분

혼합 혐기소화액의 화학적 특성은 Table 2와 같다. 먼저 pH를 살펴보면 모든 혐기소화액이 8.0~8.2로 알칼리성을 나타내었다. 혐기소화액의 BOD₅의 농도는 8,600~10,850 mg/L로 확인되었고, COD_{mn}는 7,240~13,200 mg/L를 나타내었다. T-N은 0.40~0.56%로 나타났으며, NH₄-N은 3,588~4,841 mg/L로 나타났고, NO₃-N은 19.4~72.8 mg/L로 나타났다. 가축분뇨와 과실착즙박 혼합 혐기소화액의 BOD, COD, T-N, NH₄-N의 함량은 돈분 단독 혐기소화액 보다 낮았으나, NO₃-N은 돈분 단독 혐기소화액 보다 높았다. T-P는 돈분 단독 혐기소화액이 0.066%로 과실착즙박 혼합 혐기소화액보다 높았으며, EC는 과실착즙박 혼합 혐기소화액에서 30.3~32.0mS/cm로 큰 차이를 나타내지 않았으나 돈분 단독 혐기소화액과 돈우분 혼합 혐기소화액에서는 34.7~37.0mS/cm로 나타나 과실착즙박 혼합 혐기소화액보다 EC가 높았다.

3.2. 폭기기간에 따른 pH, EC, NH₄-N의 변화

폭기처리 기간 동안 pH, EC, NH₄-N 변화는 Fig. 1와 같다. 모든 혐기소화액은 폭기처리 전 pH 8 초반에서 폭기처리가 시작된 후 pH 9 초반으로 증가하여 폭기처리 36일차까지 유지하였다. Kim et al.(2015)의 연구에 의하면 혐기소화액의 고온 호기산화(Thermophilic Aerobic Oxidation, TAO) 반응기 처리 시 초기 pH 8.1 부근에서 처리 시간이 경과함에 따라 pH 9.8정도로 증가 하였다고 보고하였다.¹²⁾ 그러나 본 시험에서는 폭기처리 36일차 이후 다시 pH가 감소하기 시작하였으며, 돈우분 혼합 혐기소화액(SS + CS)이 혐기소화액 중 pH의 감소폭이 가장 컸다. 본 연구와 같이 Heo(2010)의 연구에서도 폭기처리 초기에는 pH가 증가한 후 5주차부터 감소하기 시작하였는데 이는 초기 CO₂의 휘산으로 인해 pH가 증가하다가 질산화 과정이 일어나면서 H⁺ 발생으로 pH가 감소하는 것으로 판단된다고 보고하였다.¹³⁾

혐기소화액 폭기처리 전 혐기소화액의 EC는 30.3~37.0 mS/cm로 나타났지만 폭기처리 기간이 경과함에 따라 EC가 감소하여 폭기처리 54일차에 모든 혐기소

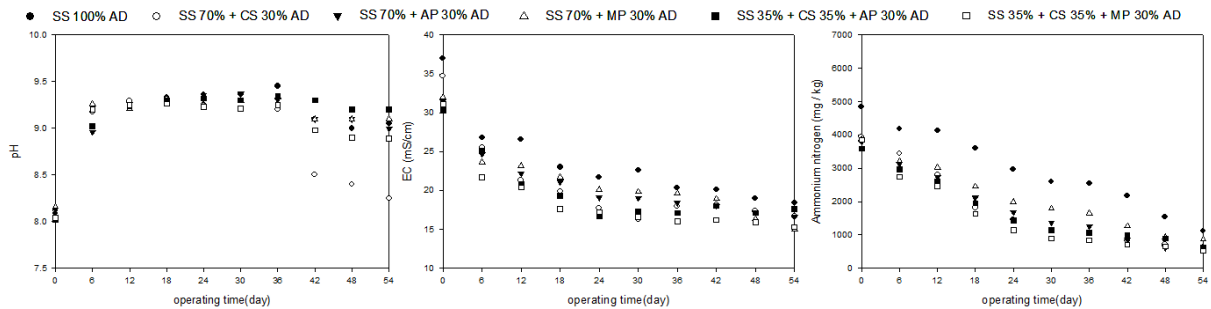


Fig. 1. Change of pH, EC, NH₄-N during aeration. Symbols represent the different treatments of digestates.

Table 2. Chemical Properties of Co-Digestate in this Experiment

Treatments	pH	BOD ₅ (mg/L)	COD _{mn} (mg/L)	T-N (%)	NH ₄ -N (mg/L)	NO ₃ -N (mg/L)	T-P (%)	EC (mS/cm)
SS	8.1	10,850	13,200	0.56	4,841	19.4	0.066	37.0
SS + CS	8.1	9,910	7,240	0.49	3,945	32.4	0.048	34.7
SS + AP	8.1	8,540	8,020	0.46	3,799	25.9	0.053	31.4
SS + MP	8.2	9,380	8,320	0.56	3,861	72.8	0.060	32.0
SS + CS + AP	8.0	9,380	13,020	0.40	3,588	38.9	0.036	30.3
SS + CS + MP	8.0	8,600	8,600	0.47	3,849	35.7	0.037	31.1

화액의 EC는 15.0~18.4 mS/cm로 낮아졌다. 폭기처리 54일차에 감귤착즙박이 혼합된 혐기소화액의 EC가 15.0 mS/cm으로 가장 낮았다. 본 시험과 같이 Kim et al.(2015)의 연구에 의하면 혐기소화액의 고온 호기산화(Thermophilic Aerobic Oxidation, TAO)반응기 처리 시 EC의 변화가 초기 29.8 mS/cm에서 12.0 mS/cm로 감소하였다고 보고하였다.¹²⁾

모든 혐기소화액의 암모늄태 질소 함량은 폭기처리 기간이 경과함에 따라 낮아졌다. 폭기처리 54일차에 암모늄태 질소 함량은 돈우분 감귤착즙박 혼합 혐기소화액(SS + CS + MP)이 518.4 mg/L으로 혐기소화액 중 가장 낮았다. 돈분 단독 혐기소화액(SS) 처리구는 폭기전 4,841.8 mg/L에서 1,120.8 mg/L로 낮아졌다. Heo(2010)의 연구에 의하면 돈분노 슬러리를 폭기처리하였을 때 폭기처리기간이 경과함에 따라 암모니아태 질소가 감소하였다고 보고하였다.¹³⁾

3.3. 혼합 혐기소화액 폭기 일수에 따른 상대발아율

폭기처리 기간 동안 혼합 혐기소화액의 상대발아율은 Table 3와 같다. 폭기처리 18일차에는 상대발아율이 돈우분 혼합 혐기소화액(SS + CS)이 33.3 %, 돈분과 사과박 혼합 혐기소화액(SS + AP)이 34.4 %로 나타나 유의성의 차이가 없었다. 돈우분 사과착즙박 혼합 혐기소화액(SS + CS + AP)은 7.8 %로 나타났으나 돈분 단독 혐기소화액(SS), 돈분과 감귤착즙박 혼합 혐기소화액(SS + MP)과는 유의성의 차이가 없었다.

폭기처리 24일차에도 돈분 + 우분 + 감귤착즙박

혼합 혐기소화액(SS + CS + MP)이 처리구 중 상대발아율이 100 %로 가장 높았으며, 돈분 + 우분 혼합 혐기소화액(SS + CS)은 97.6%로 높았으나, 돈분 단독 혐기소화액(SS)은 무 중자가 아직 발아하지 않아 처리구 중 상대발아율이 가장 낮았다. 폭기 36일차에는 돈분 단독 혐기소화액(SS)이 63.3 %로 상대발아율이 나타났으나 나머지 처리구들보다 발아율이 낮았다. 42일차에도 돈분 단독 혐기소화액(SS)이 상대발아율이 가장 낮았으며, 48일차와 54일차에는 모든 처리구의 상대발아율이 유의성의 차이가 없었다.

돈우분 감귤착즙박 혼합 혐기소화액(SS + CS + MP)은 폭기 18일차부터 54일차까지 상대발아율이 98 % 이상으로 나타났으나 돈분 단독 혐기소화액(SS)은 폭기처리 48일차부터 98 %이상으로 나타나기 시작하였기 때문에 상대발아율이 98 %이상 되기까지 폭기일수가 가장 길었다. 즉 상대발아율은 돈우분 감귤착즙박 혼합 혐기소화액(SS + CS + MP)이 돈분 단독 혐기소화액(SS)보다 최대 30일 단축되었다.

3.4. 혼합 혐기소화액 폭기 일수에 따른 상대뿌리신장률

혐기소화액의 폭기처리 기간별 상대뿌리신장률은 Table 4와 같다. 상대뿌리신장률은 폭기처리 18, 24 30일차에 돈우분 감귤착즙박 혼합 혐기소화액(SS + CS + MP)이 각각 44.3 %, 57.0 %, 76.5 %로 처리구 중 가장 높았다. 폭기처리 36일차에는 돈우분 혼합 혐기소화액(SS + CS)이 81.3 %로 처리구 중 가장 높았으나 돈우분 사과착즙박 혼합 혐기소화액(SS + CS + AP), 돈우분 감귤착즙박 혼합 혐기소화

Table 3. Relative Germination ratio During Aeration of Digestates(%)

Treatments	Aeration days										
	0	6	12	18	24	30	36	42	48	54	
SS	0.0	0.0 ^{a†}	0.0 ^b	0.0 ^c	0.0 ^c	0.0 ^d	63.3±8.8 ^b	85.6±1.9 ^b	100 ^a	100 ^a	
SS + CS	0.0	0.0 ^a	0.0 ^b	33.3±3.3 ^b	95.6±5.0 ^a	96.7 ^{ab}	100.0 ^a	100.0 ^a	100 ^a	100 ^a	
SS + AP	0.0	0.0 ^a	2.2±3.8 ^b	34.4±10.1 ^b	82.2±6.9 ^b	92.2±5.0 ^b	98.9±1.9 ^a	98.9±1.9 ^a	100 ^a	100 ^a	
SS + MP	0.0	0.0 ^a	0.0 ^b	0.0 ^c	30.0±6.6 ^d	50.0±3.3 ^c	98.9±1.9 ^a	98.9±1.9 ^a	100 ^a	100 ^a	
SS + CS + AP	0.0	0.0 ^a	0.0 ^b	7.8±7.7 ^c	63.3±8.8 ^c	98.9±1.9 ^a	100.0 ^a	100.0 ^a	100 ^a	100 ^a	
SS + CS + MP	0.0	2.2±3.8 ^a	16.4±3.0 ^a	100.0 ^a	98.9±1.9 ^a	100.0 ^a	98.9±1.9 ^a	98.9±1.9 ^a	100 ^a	100 ^a	

Results are the mean ± SD of 3 independent experiments.

[†] means separation within columns by Duncan's new multiple range test at 5% level of significance.

Table 4. Relative Root Elongation During Aeration of Digestates (%)

Treatments	Aeration days										
	0	6	12	18	24	30	36	42	48	54	
SS	0.0	0.0 ^{a†}	0.0 ^b	0.0 ^c	0.0 ^d	0.0 ^c	34.1±2.4 ^b	39.3±7.0 ^d	50.3±6.3 ^d	79.1±1.1 ^c	
SS + CS	0.0	0.0 ^a	0.0 ^b	14.0±12.8 ^{bc}	46.3±8.2 ^{ab}	71.2±27.4 ^a	81.3±7.7 ^a	98.9±10.6 ^a	98.7 ^a	98.2±2.7 ^a	
SS + AP	0.0	0.0 ^a	0.8±1.4 ^b	16.8±12.7 ^b	24.5±6.2 ^c	49.8±12.3 ^{ab}	64.0±10.0 ^a	75.9±6.9 ^b	89.7±2.9 ^b	96.0±1.3 ^{ab}	
SS + MP	0.0	0.0 ^a	0.0 ^b	0.0 ^c	5.4±5.0 ^d	24.2±5.0 ^{bc}	44.6±8.8 ^b	59.6±9.5 ^c	76.3±4.0 ^c	91.1±4.2 ^b	
SS + CS + AP	0.0	0.0 ^a	0.0 ^b	5.3±7.1 ^{bc}	38.0±11.5 ^b	62.1±19.4 ^a	68.1±15.9 ^a	78.8±6.5 ^b	90.6±4.6 ^b	92.9±5.0 ^{ab}	
SS + CS + MP	0.0	1.1±1.8 ^a	2.2±0.4 ^a	44.3±4.5 ^a	57.0±5.1 ^a	76.5±26.5 ^a	75.4±9.8 ^a	88.3±8.6 ^{ab}	92.4±0.8 ^{ab}	94.6±2.3 ^{ab}	

Results are the mean ± SD of 3 independent experiments.

[†] means separation within columns by Duncan's new multiple range test at 5% level of significance.

Table 5. Germination Index During Aeration of Digestates

Treatments	Aeration days										
	0	6	12	18	24	30	36	42	48	54	
SS	0.0	0.0	0.0 ^{b†}	0.0 ^b	0.0 ^d	0.0 ^b	21.5±2.3 ^c	33.6±5.6 ^d	50.3±6.3 ^d	79.1±1.0 ^b	
SS + CS	0.0	0.0	0.0 ^b	4.6±4.3 ^b	44.5±9.7 ^b	68.8±26.5 ^a	81.3±7.7 ^a	98.9±10.6 ^a	98.7±0.1 ^a	98.2±2.7 ^a	
SS + AP	0.0	0.0	0.1±0.1 ^b	6.6±6.1 ^b	20.2±5.8 ^c	45.8±11.2 ^a	63.4±10.9 ^a	75.0±5.4 ^b	89.7±2.8 ^b	96.0±1.3 ^{ab}	
SS + MP	0.0	0.0	0.0 ^b	0.0 ^b	1.8±1.9 ^d	12.2±3.2 ^b	44.2±8.9 ^b	58.9±8.7 ^c	76.3±3.9 ^c	91.1±4.2 ^b	
SS + CS + AP	0.0	0.0	0.0 ^b	0.8±1.2 ^b	24.7±10.2 ^c	61.1±18.0 ^a	68.1±15.9 ^a	78.8±6.5 ^b	90.6±4.6 ^b	92.9±5.0 ^{ab}	
SS + CS + MP	0.0	0.0	0.4±0.1 ^a	44.3±4.5 ^a	56.3±4.0 ^a	76.5±26.5 ^a	74.5±8.6 ^a	87.2±7.4 ^{ab}	92.4±0.7 ^{ab}	94.6±2.3 ^{ab}	

Results are the mean ± SD of 3 independent experiments.

[†] means separation within columns by Duncan's new multiple range test at 5% level of significance.

액(SS + CS + MP)과 유의성의 차이가 없었다. 42일 차에도 돈우분 혼합 혐기소화액(SS + CS)의 상대발아율이 처리구 중 가장 높았으나 돈우분 감귤착즙박 혼합 혐기소화액(SS + CS + MP)과 유의성의 차이가 없었다. 폭기처리 54일차에도 돈우분 혼합 혐기소화액(SS + CS)이 98.2 %로 처리구 중 가장 높았으나 돈분과 사과착즙박 혼합 혐기소화액(SS + AP), 돈우분 사과착즙박 혼합 혐기소화액(SS + CS + AP), 돈우분 감귤착즙박 혼합 혐기소화액(SS + CS + MP)과 유의성의 차이가 없었으며, 돈분 단독 혐기소화액(SS)은 79.1 %로 처리구 중 상대뿌리신장률이 가장 낮았다.

3.5. 혐기소화액 폭기처리에 따른 무 종자 발아지수(GI)

혐기소화액의 폭기처리에 따른 부숙정도 평가를 위하여 폭기처리 후 6일 간격으로 채취하여 조사한

발아지수(GI, germination index)는 Table 5에 나타내었다. 발아 기간 중 발아와 함께 뿌리신장에 미치는 영향을 고려한 평가방법이 될 수 있는 발아 지수를 이용하였다. 퇴비의 경우 발아지수가 70 이하는 식물종자의 발아와 식물생장에 나쁜 영향을 미치는 것으로 알려져 있다.¹⁴⁾

폭기처리 18일차에 돈분 + 우분 + 감귤착즙박 혼합 혐기소화액(SS + CS + MP)이 44.3로 처리구 중 발아지수가 가장 높았으며, 24일차에도 56.3으로 처리구 중 발아지수가 가장 높았다. 30일차에 돈우분 감귤착즙박 혼합 혐기소화액(SS + CS + MP), 돈우분 혼합 혐기소화액(SS + CS), 돈우분 사과착즙박 혼합 혐기소화액(SS + CS + AP)이 발아지수 70에 도달하여 부숙 상태를 나타내었다. 폭기 36일차에는 돈우분 혼합 혐기소화액(SS + CS)이 81.3으로 처리구 중 발아지수가 가장 높았으나 돈분과 사과착즙박 혼합 혐기소화액(SS + AP), 돈우분 사과착즙박

혼합 혐기소화액(SS + CS + AP), 돈우분 감귤착즙박 혼합 혐기소화액(SS + CS + MP)과 유의성의 차이가 없었다. 돈분 혐기소화액(SS)은 21.5로 처리구 중 발아지수가 가장 낮았다. 폭기 42일차와 48일차에는 돈우분 혼합 혐기소화액(SS + CS)이 각각 98.9, 98.7로 발아지수가 가장 높았지만 다른 처리구와 유의한 차이가 없었다. 폭기 54일차에도 모든 처리구가 발아지수 70 이상을 나타내었으며 처리구 사이에 유의한 차이가 없었다.

돈우분 감귤착즙박 혼합 혐기소화액(SS + CS + MP)은 폭기처리 30일차에 가장 빨리 발아지수 70에 도달하였으나 돈분 단독 혐기소화액(SS)이 폭기 54일차에 가장 늦게 발아지수 70을 나타내었다. 돈우분 과실착즙박 혼합 혐기소화액은 폭기 후 처리구 별로 각각 30일차와 42일차에 발아지수 70에 도달하여 돈분 단독 혐기소화액(SS)보다 발아지수 70 도달 일수가 최대 24일 단축되었다.

3.6. 혼합혐기소화액의 부숙에 요구하는 폭기처리 기간 비교

돈분 단독 혐기소화액(SS)은 폭기처리 48일차에 발아율과 상대발아율이 90 %이상을 나타내었으며, 54일차에 발아지수가 70에 도달하였다(Table 6). 돈우분 혼합 혐기소화액(SS + CS)은 폭기처리 24일차에 발아율과 상대발아율이 90 %이상 나타내었고, 36일차에 상대뿌리신장률은 80 %이상 나타내었으며, 발아지수는 70이상 나타났다. 돈분과 사과착즙박 혼합 혐기소화액(SS + AP)과 돈우분 사과착즙박 혼합 혐기소화액(SS + CS + AP)은 폭기처리 30일차

부터 발아율과 상대발아율이 90 %이상 나타났고, 48일차에 상대뿌리신장률이 80 %이상 나타났으며, 발아지수는 70이상 나타났다. 돈분과 감귤착즙박 혼합 혐기소화액(SS + MP)은 발아율과 상대발아율이 36일차에 90 %이상 나타났으며, 48일차에 상대뿌리신장률이 80 %이상 나타났지만 발아지수는 42일차에 70이상 나타났다. 돈우분 감귤착즙박 혼합 혐기소화액(SS + CS + MP)이 폭기처리 18일차부터 발아율 및 상대발아율 90 %이상이었으며, 발아지수 70 도달일수가 30일로 가장 빨리 부숙상태에 도달하였다. 돈우분 감귤착즙박 혼합 혐기소화액(SS + CS + MP)을 액비화하였을 때 발아지수 70 도달 일수가 돈분 단독 혐기소화액(SS)보다 폭기기간이 24일 단축이 가능할 것으로 보인다.

4. 결론

본 연구는 가축분뇨와 과실착즙박 혼합 혐기소화액의 폭기기간에 따른 발아지수를 조사하여 혼합 혐기소화액의 적정 폭기기간 설정에 활용하고자 수행하였다. 돈분 100 % 단독 혐기소화액, 돈분 70 % + 우분 30 % 혼합 혐기소화액, 돈분 70 % + 사과착즙박 30 % 혼합 혐기소화액, 돈분 70 % + 감귤착즙박 30 % 혼합 혐기소화액, 돈분 35 % + 우분 35 % + 사과착즙박 30 % 혼합 혐기소화액, 돈분 35 % + 우분 35 % + 감귤착즙박 30 % 혼합 혐기소화액을 공시재료로 사용하였다. 폭기처리 기간 중 공기량은 유량계를 이용하여 모든 처리구에 동일하게 0.1 m³

Table 6. Comparison of Aeration Days Required for Maturity of Different Co-Digestates

Treatments	Period to reach seed germination 90% (days)	Period to reach relative seed germination 90% (days)	Period to reach root elongation 5 cm (days)	Period to reach relative root elongation 80% (days)	Period to reach GI 70 (days)
SS	48	48	54	-	54
SS + CS	24	24	30	36	36
SS + AP	30	30	42	48	42
SS + MP	36	36	48	54	48
SS + CS + AP	30	30	42	48	42
SS + CS + MP	18	18	30	42	30

air/min.m³ 주입하고, 54일 동안 연속폭기를 하였다. 혐기소화액은 폭기 후 6일 간격으로 시료를 채취하여 3배 희석액으로 발아시험을 실시한 후 발아지수 (GI) 조사하였다.

1. 통합혐기소화액을 폭기처리하였을 때 폭기 처리기간이 경과함에 따라 pH는 증가하다가 감소하는 경향을 보였으며, EC, 암모니움태 질소는 감소하였다.
2. 돈분 단독 혐기소화액(SS)은 폭기처리 54일차에 발아지수가 70이상을 나타내어 처리구 중 부숙기간이 가장 길었다.
3. 돈우분 감귤착즙박 혼합 혐기소화액(SS + CS + MP)은 폭기처리 30일차에 가장 빨리 발아지수 (GI) 70을 나타내어 처리구 중 부숙기간이 가장 짧았다. 돈분과 과실착즙박 혼합 혐기소화액이 돈분 단독 혐기소화액(SS)보다 액비화할 때 폭기기간이 24일간 단축되었다.

사 사

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

References

1. Lim, D. K., Park, W. K., Kwon, S. I., Nam, J. J., Park, B. K. and Kim, S. H., "Application level of anaerobic digestion waste water from methane fermentation of pig manure on Rice", Korean journal of environmental agriculture, 21(4), pp. 255~260. (2002).
2. Lee, J. S., "Resource recovery from livestock wastewater by autothermal anaerobic-aerobic digestion process", Kyungshung University. (2012).
3. Van der Meer, H. G., "Optimising Manure Management for GHG Outcomes", Green house gas and animal agriculture, 2008, pp. 38~45. (2008).
4. Kapanen, A. and Itavaara, M., "Ecotoxicity tests for compost applications", Ecotoxicology and Environmental Safety, 49, pp. 1~16. (2001).
5. Warman, P. R., "Evaluation of seed germination and growth test for assessing compost maturity", Compost Science & Utilization, 7(3), pp. 33~37. (1999).
6. Gariglio, N. F., Buyatti, M. A., Pilatti, R. A., Gonzales Russia, D. E. and Acosta, M., R., "Use of a germination bioassay to test compost maturity of Willow (*Salix sp.*) Sawdust", New Zealand Journal of Crop and Horticultural Science, 30, pp. 135~139. (2002).
7. Paik, C. H., "Studies on correlation between germination index and CO₂ emission for evaluation of the maturity of compost products", Kon-kuk University. (1998).
8. Han, S. M., "Production of liquid fertilizer from livestock wastewater by the anaerobic-autothermal aerobic process", Kyungshung University. (2012).
9. Halder, J. N., Kim, S. R., Rang, T. W., Yabe, M. and Lee, M. G., "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), pp. 417~426. (2016).
10. Kjeldahl, J., "Neue Methode zur Bestimmung des Stickstoffs in organischen Körpern", Zeitschrift für analytische Chemie, 22(1), pp. 366~83. (1883).
11. Korea Standard Method (KSM). Standard methods for the measurement of water in Korea, Korea Standard Method. [Korean Literature]. (2011).
12. Kim, S. R., Kim, H. J., Halder, J. N., Rhee, J. H., Shin, M. C., Kim, T. H. and Lee, M. G., "Application of the thermophilic aerobic oxidation (TAO) system to anaerobic digestate stabilization in Korea", Journal of Animal Environmental Science, 21(1), pp. 21~28. (2015).
13. Heo, M. Y., "The effect of aeration on the slurry quality and microbial communities in liquid swine manure during the digestion", Master degree thesis of Chonnam National University. (2010).

14. Morel, J. L., Colin, F., Germon, J. C., Godin, P. and Juste, C., "Methods for the evaluation of the maturity of municipal refuse compost", In composting of agriculture and other wastes, ed., JKR Gasser, Elsevier Applied Science, London, pp. 56-72. (1985).