

초고온 호기성 퇴비화의 물리·화학적 인자 평가

Physicochemical Effect on Ultra Thermophilic Aerobic Composting Process

박 세 용¹⁾ · 유 의 상²⁾ · 정 대 혁³⁾ · 이 진⁴⁾ · 김 문 일[†]

Park, Seyong · Yoo, Euisang · Chung, Daihyuck · Lee, Jin · Kim, Moonil

ABSTRACT : This study was conducted to evaluate physicochemical parameters; temperature, pH, C/N ratio, water content, organic contents and volume in a pilot-scale(capacity : 100m³) ultra thermophilic aerobic composting. There were three types input: municipal wasted sludge, livestock manure and slurry, and food waste produced in Jung-Eb city. Each target material was carried out by the first fermentation(organic waste + seed culture) and the second one(organic waste + seed culture + recycle compost), respectively. During composting, only with supply of air and mixing, the temperature increased 90~105°C after every mixing in both periods. The changes of pH, O₂, CO₂ and NH₃ represented typical organic decomposition pattern by microorganisms. Also, all other physicochemical parameters of ultra thermophilic aerobic composting process showed similar or better performance than these of general aerobic composting. Heavy metal concentration of fermented compost adapted to compost fertilizer regulation standard in the heavy metal and hazardous analysis.

Keywords : Ultra thermophilic Aerobic Composting, Physicochemical Parameter, Fermentation, Seed Culture

요 지 : 본 연구는 정읍시에서 배출되는 하수슬러지, 축산 분뇨, 음식물 쓰레기를 대상으로 Pilot-scale(100m³) 초고온 호기성 퇴비화 공정에서의 온도, pH, C/N비, 함수율, 유기물 함량, 그리고 부피 등 물리·화학적 영양 인자를 평가하였다. 각각의 대상 물질은 1차 발효(유기성 폐기물+종균)와 2차 발효(유기성 폐기물+종균+반송 퇴비)로 나누어 수행하였다. 퇴비화가 진행됨에 따라 교반과 송풍만으로 열공급 없이 온도는 1,2차 발효에서 최고온도 90~105°C가 되었다. pH, O₂, CO₂, NH₃, 농도 변화는 전형적인 미생물에 의한 유기물 분해 양상을 보여주었으며, 다른 모든 물리·화학적 인자들은 일반 호기성 퇴비화의 성능 이상을 보여주었다. 발효가 완료된 후 퇴비의 중금속 농도는 퇴비 비료 규격 기준 농도에 적합한 것으로 나타났다.

주요어 : 초고온 호기성 퇴비화 공정, 물리·화학적 인자, 발효, 종균

1. 서 론

하·폐수처리시설이 증설됨에 따라 유기성 폐기물의 발생량이 증가하고 있으며, 대부분 해양 배출로 처리하고 있다. 그러나 런던 협약으로 인해 2012년부터 해양투기가 전면 금지됨에 따라 대안 마련이 요구된다(환경부 2006). 유기성 폐기물의 육상 처리의 방법은 소각, 건조, 매립 등의 방법과 자원화할 수 있는 퇴비화 기술을 들 수 있다. 하지만 이 방법들은 몇 가지 문제점들이 야기되고 있다. 소각방법은 다이옥신과 같은 2차 오염의 우려가 있으며, 음식물쓰레기는 높은 함수율을 포함하고 있어 소각 시 많은 문제점을 야기시키고 있다(황의영 등, 1995). 유기성 폐기물의 매립은 음식물쓰레기의 높은 함수율로 인한 악취와 침출수 발생으로 인하여 2005년에 시행된 음식물쓰레기 직매립 방법이 금지

되었으며, 이로 인하여 음식물쓰레기를 가열, 발효, 건조 등으로 수분 함량 40% 미만으로 처리된 슬러지만이 매립이 가능한 실정이 되었다(김기주 등, 2002). 또한 환경부는 폐기물 관리법으로 온실가스 발생 억제 및 재활용 촉진을 위하여 유기성 슬러지의 직·매립을 금지하였다. 유기성 폐기물을 자원화하기 위한 방법으로 퇴비화 기술이 많이 연구되어 왔으나, 이 역시 퇴비화 과정에서 발생하는 악취로 인하여 민원이 잦아지고 결국 퇴비화 시설이 폐쇄되는 경우가 많았다(한국토지공사, 1998). 우리나라에서 쓰이고 있는 퇴비화는 비 연속식 처리로 퇴비 원료(유기성 폐기물)의 제한적 처리와 퇴비화 활성에 요구되는 시간이 길어 부지요구가 높은 문제, 불안정한 최종 생성물, 감량화 실패, 장시간 온도 조절 및 공기 주입으로 인한 에너지 소비증가로 상용화에 어려움이 있다(이현희 등 2003; 배재근, 2001). 따라서

1) 정회원, 한양대학교 건설환경공학과 박사과정

2) 비회원, 한국생산기술연구원 책임연구원

3) 비회원, (주) 클럽스 대표이사

4) 비회원, 한양대학교 건설환경공학과 석사

† 정회원, 한양대학교 건설환경공학과 부교수(E-mail : moonilkim@hanyang.ac.kr)

우리나라에서 배출되는 음식물 쓰레기는 염분 농도와 수분 함량이 높은 점을 감안하여, 그에 맞는 퇴비화 기술이 개발되어야 하며, 퇴비화 과정에서 최대의 문제점인 악취 발생을 억제하는 기술이 요구되고 있다(안상선, 2005; 정준오 등, 2001).

초고온 미생물을 이용한 퇴비화 공법은 100°C 이상의 초고온에서 활성화하여 유기성 폐기물을 호기성 조건에서 자연적으로 발효·분해하는 친환경적인 공법이다. 초고온에서 발효·분해되기 때문에 잡균, 잡종균 등이 사멸되며 머리카락 등의 이물질까지 제거된다(박세용 등, 2009). 호기성 퇴비화 과정에서 가장 문제 시 되는 악취 발생이 적으며, 유독성 유기 화합물이 제거된다(박세용 등, 2009). 또한 초기 발효부터 완속처리까지의 기간이 45~50일로 짧으며, 호기성 발효로서 악취가 적어 기본적인 탈취장치가 필요하지 않다. 발효 부산물을 발효 배지로 100% recycle이 가능하며, 톱밥, 왕겨 등 별도의 수분 조절제가 불필요하기 때문에 운영비 및 유지관리를 절감할 수 있어 유기성 폐기물 처리에 대한 안정적이며 환경을 보호하는 해결 방안이라 할 수 있다(박세용 등, 2009). 현재까지 국내에서 초고온 미생물을 이용한 퇴비화 공법은 거의 전무하다. 일본의 가고시마에서는 100~110톤/일의 하수슬러지를 초고온 발효하여 퇴비화로 사용하고 있으며, 나가타현에서는 실증 실험을 위해 100톤 규모의 초고온 발효조를 설치하여 실증실험을 하였다.

따라서 본 연구에서는 정읍시 하수종말처리장에 호기성 퇴비화 Pilot plant를 설치하여 정읍시에서 배출되는 하수

슬러지 음식물쓰레기, 축산분뇨를 대상으로 초고온 호기성 퇴비화 과정을 통해 각 유기성폐기물의 퇴비화 진행에 따른 온도변화, 발효 가스분석, pH, C/N비, 수분 함량, 고형물 유기물 변화, 부피 및 무게 변화, 중금속 분석 그리고 혼합 및 교반과 같은 반응인자들을 도출하여 운전 변수를 확보하고자 하였으며, 또한 각 유기 폐기물의 퇴비화 진행에 따른 시료와 발효 종료된 퇴비의 중금속 및 유해 인자 분석을 통하여 퇴비의 발효 메커니즘(mechanism) 및 안정성을 검증하고, 초고온 퇴비화 기술의 정립과 data base 확보를 목적으로 하였다.

2. 연구방법 및 내용

2.1 Pilot plant 운전

본 연구에서는 정읍시 하수종말처리장에 초고온 호기성 퇴비화 Pilot plant를 설치하여 하수슬러지, 음식물쓰레기, 축산분뇨를 처리하여 호기성 퇴비화에 영향을 주는 물리·화학적 인자를 고찰하였다. Pilot plant 용량은 일일 100톤/조이며 발효 조 규격은 폭 5m × 길이 8m × 높이 3m, 유기물을 혼합하는 폭 8m × 길이 20m의 작업공간으로 구성되어 있다.

표 1은 초고온 호기성 퇴비화에 사용된 유기성 폐기물의 초기성상을 나타낸 것으로 음식물쓰레기의 유기물 함량이 가장 높게 나타났다. 유기성 폐기물의 Pilot plant를 이용한

표 1. 초고온 호기성 퇴비화 공정의 물리적 특성

Matter	Item	Moisture (%)	Combustible Components (%)	Ash Content (%)	Organic (%)	pH	C/N Ratio
Seed Bacteria		18.9	40.0	41.1	47.3	7.9	8.3
Sewage Sludge		82.6	12.6	4.8	72.3	7.6	5.8
Manure Livestock Slurry		84.5	10.3	5.2	66.4	7.4	5.7
Food waste		76.7	21.7	1.6	93.2	5.1	18.0

표 2. 1차 원료 유기성폐기물과 종균 혼합량

유기성폐기물	원료(ton)	종균(ton)	혼합(ton)
하수슬러지	25	35	60
축산분뇨슬러지	18	28	46
음식물쓰레기	15	29	44

표 3. 2차 원료 유기성폐기물, 반송퇴비와 종균 혼합량

유기성폐기물	원료(ton)	반송퇴비(ton)	종균(ton)	혼합(ton)
하수슬러지	25.0	42.4	3.0	70.3
축산분뇨슬러지	15.0	33.5	1.0	49.4
음식물쓰레기	16.0	31.5	1.0	48.4

호기성 퇴비화는 100°C 이상의 초고온 호기성 퇴비화가 진행되는 동안의 온도 변화, 발효 가스분석, pH, C/N비, 수분 함량, 유기물 함량 변화, 부피 및 무게 감량, 증균속을 분석하였다. Pilot plant를 이용한 유기성 폐기물의 초고온 퇴비화는 일본 'S'사에서 초고온 호기성 퇴비화 공법으로 생산된 비료를 종균으로 혼합하여 운전하였다. 종균은 *Bacillus* 와 *Pseudomonas*가 9~11%, β -proteobacteria가 4.7%, Bacteroidetes가 50.0%로 구성되어 Bacteroidetes가 가장 우점하였다. 고온 미생물 수는 0.63×10^{11} cell/g 이었다(신지혜 등, 2009). 유기성 폐기물의 Pilot plant를 이용한 호기성 퇴비화는 1차 발효(유기성 폐기물+종균)와 2차 발효(유기성 폐기물+종균+만송 퇴비)로 수행하였다(표 2, 표 3).

교반의 시기는 발효 온도의 변화에 따라 결정되었으며, 최고 온도유지 후 온도 감소 시점에서 교반 하였다. 페이로터를 이용하여 발효조 안의 퇴비를 비어 있는 발효조로 옮기는 작업으로 퇴비 내 유기물의 균일 혼합과 입자를 고르게 만들고 수분을 날리며, 퇴비단내의 산소 농도는 15~20%이었으며, 전체에 산소전달을 용이하게 만들어 호기성퇴비화의 중요한 작업으로써 교반의 정도와 횟수에 따라 발효진행의 중요한 영향인자로 작용하였다(박세용 등, 2009).

2.2 분석방법

시료 채취는 유기물과 종균의 혼합과 교반 시 채취하였으며, 온도 측정용 길이 1.5m, 지름 10mm, Max 150°C의 온도계를 퇴비단 상층부 전, 중, 후 부분 3개 장소를 정해 1m 정도 깊이로 측정하였다. 온도계 설치는 혼합 및 교반 직후 상층부 3지점에 설치하였으며, 하루 3번 09, 12, 17시에 측정하였다.

발효 가스측정은 연속 가스측정기(Landfill Gas Monitoring System LM Sxi Infra-Red)를 이용하여 CO₂, NH₃, O₂, 온도를 매 시간 2회(30분 1회)로 연속 측정하였다. 휴대용 가스 측정기(Tube Pump for Gas Detect)는 진공식 기체채취기로써, 실린더 내부를 피스톤에 의해 감압상태로 하여 검지관을 통해서 시료가스를 흡인하는 것으로 기밀성이 높은 구조로 되어 있다. 초기의 흡인 속도는 빠르고 시간이 지날수록 점점 늦어지게 되는 특징을 가지고 있다. 이러한 현상은 선명한 착색층을 실현하는 가장 뛰어난 방법이다. CO₂ 및 암모니아(NH₃)는 발효단 상층부에 일정 측정 point를 잡고 하루 3번 측정하였다. pH는 현탁액을 만들어 이 상등액을 이용하여 측정하였으며, C/N비는 알루미늄 cap에 약 1~2mg 채취하여 E/A meter(CE Instruments : EA1110, EA 1112)를 이용하여 900°C 오븐에서 시료를 태워 발생하는 가스를 검출기(Detector)를 통해 측정하여 정량하였다.

수분 및 고형물 중 유기물 분석은 다음과 같은 식에 의해 계산하였다.

$$\text{수분(\%)} = \frac{(W2 - W3)}{(W2 - W1)} \times 100 \quad (1)$$

$$\text{고형물(\%)} = \frac{(W3 - W1)}{(W2 - W1)} \times 100 \quad (2)$$

$$\text{가열감량(\%)} = \frac{(W2 - W3)}{(W2 - W1)} \times 100 \quad (3)$$

$$\text{휘발성고형물(\%)} = \text{가열감량(\%)} - \text{수분(\%)} \quad (4)$$

$$\text{유기물함량(\%)} = \frac{\text{휘발성고형물(\%)}}{\text{고형물(\%)}} \times 100 \quad (5)$$

여기서, W1 : 증발접시를 105~110°C에서 1시간 건조 후 무게 측정

W2 : W1에 시료를 취하여 증발 접시와 시료 무게 측정

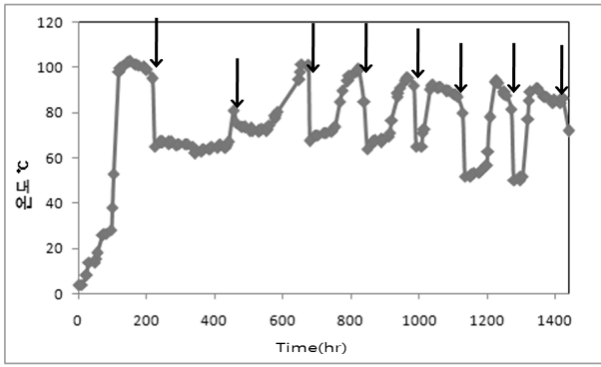
W3 : W2에 25% 질산암모늄 용액으로 시료를 적신 후 가열하여 탄화시켜 무게 측정

무게는 55L의 원통에 물을 가득 담아 원통과 물의 무게 55kg을 측정하고 혼합 및 교반 시 시료를 일정량씩 모아 원통에 담아 무게를 측정하여 원통과 물의 무게로 나눈 결과를 비중으로 하고 부피에 비중을 곱해 구하였다. 마지막으로 증균속은 발효 완료품을 Ball Mill을 사용하여 시료를 분말형태로 만든 후 분말시료를 약 0.5g 정도 달아 Microwave 용 Teflon Vessel에 넣고 HNO₃ 9mL 및 HCl 3mL 주입 후 H₂O₂를 1mL를 첨가했다. 시료를 장치시키고 기기조건에 따라 시료를 전처리 한 후에 유도결합플라즈마 발광광도법(ICP : Inductively Coupled Plasma - Atomic Emission Spectrometer, Perkin Elmer Ltd., USA)을 이용하여 계산하였다.

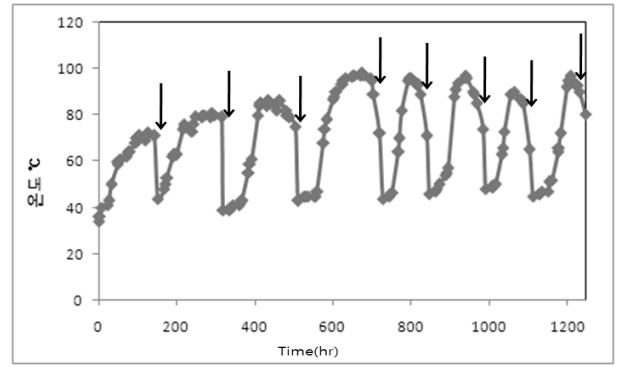
3. 실험 결과 및 고찰

3.1 온도변화

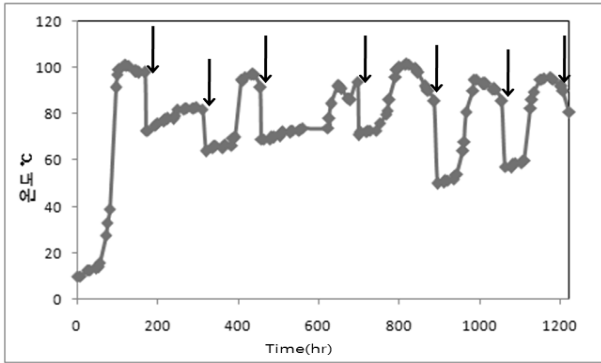
Plant 1차 운전에서 각 유기성폐기물에 따른 온도 변화는 발효가 진행됨에 따라 온도가 상승하고 최고온도 도달 후 서서히 감소하는 전형적인 퇴비화 온도변화 곡선을 나타내고 있다. 이와 같은 온도 주기를 발효 단계로 보고, 최고온도에서 온도가 떨어지는 시점에서 교반을 하였다. 교반은 혼합된 유기성폐기물과 초고온 미생물을 뒤집기를 통하여 교반을 하였으며, 교반 후 온도는 약 60~70°C 정도를 2~3일 유지하고 난 후 온도가 올라 약 100°C 정도의 초고온을 1~2일 유지하였다. 이러한 과정을 하수슬러지 8회, 축산분



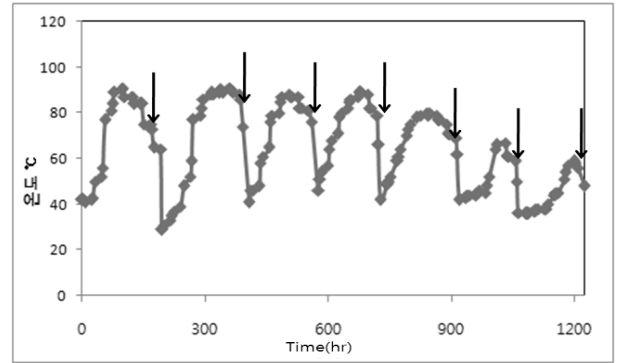
(a) 하수슬러지



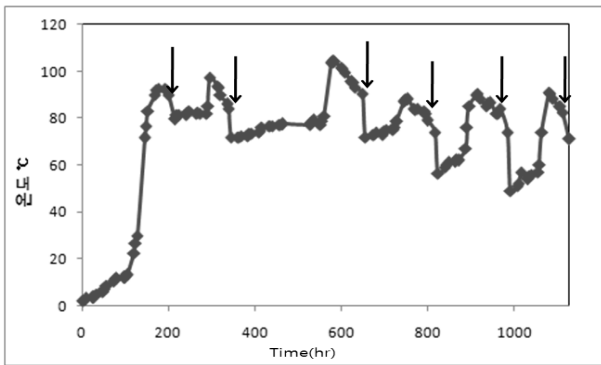
(a) 하수슬러지



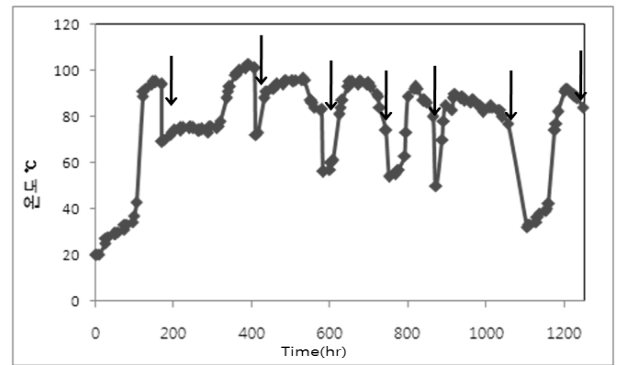
(b) 축산분뇨슬러지



(b) 축산분뇨슬러지



(c) 음식물쓰레기



(c) 음식물쓰레기

그림 1. 1차 발효 plant 온도 변화(↓: 교반 시기)

그림 2. 2차 발효 plant 온도 변화(↓: 교반 시기)

노슬러지 7회, 음식물쓰레기 6회를 반복하였다.

그림 1은 발효 1차 Plant의 온도 변화를 나타낸 그래프이며, 그림 2는 발효 2차 Plant의 온도 변화를 나타낸다. 하수슬러지는 중균과 혼합 후 1차 교반 직전 최대 온도 103°C의 초고온을 보였으며, 발효가 진행됨에 따라 교반 주기의 최대 온도는 약간 떨어졌으나 대체적으로 90~100°C의 초고온을 각 교반 주기 마다 보였다. 2차 발효 운전은 1차 완료품의 반응으로 발효를 진행하였다. 1차와는 다른 반응 중균을 사용하였기 때문에 하수슬러지와 혼합 과정에 문제가 있었고, 모인 수분이 하층부로 이동하여 하단의 퇴비의 공극(空隙)을 미세하게 만들어 cake 형태로 변해 송풍관으로부터

터 공기의 전달이 용이하지 못했다. 그에 따라, 초기 발효 온도가 낮았으나, 교반이 진행될수록 온도가 상승하여 4차 발효 주기에 98°C 까지 상승하였고, 전체적인 온도 경향은 1차와 차이가 없었다. 특별한 열 공급 없이도 반복적으로 초고온에 도달하여 초고온 미생물의 존재를 간접적으로 보여주며 반응중균의 활용에 문제가 없다고 판단된다.

3.2 발효가스 분석

그림 3은 1차 하수슬러지 발효 주기 중 O₂ 농도와 CO₂ 농도의 상관관계를 실시간 측정으로 나타낸 그래프이다. 산소는 호기성 미생물의 호흡과 퇴비화 물질 내에 존재하는

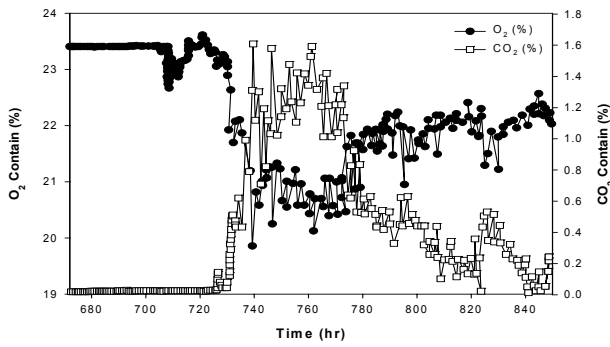
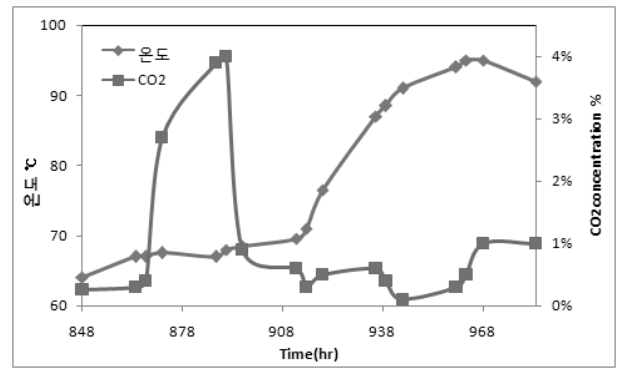


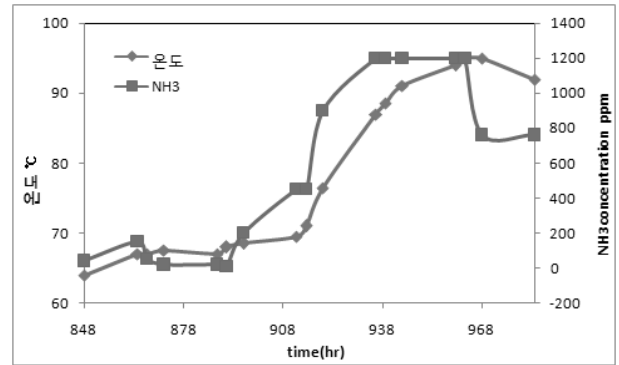
그림 3. 1차 하수슬러지 발효 plant O₂와 CO₂ 변화

다양한 유기물의 산화를 위해 필수적이다. 미생물은 에너지원으로 탄소를 산화하며 이때 산소는 소모되고 대표적으로 이산화탄소가 생성된다. 이와 같이 미생물의 유기물 분해에 필수적인 퇴비단내의 산소 농도는 15~20%가 적절하며 만약 산소의 농도가 5% 이하로 떨어진다면 혐기성 상태로 진행된다고 알려져 있다. CO₂ 발생은 반응초기 공기공급량에 관계없이 빠르게 증가하였다가 일시적으로 감소한 후 다시 증가하는 경향을 보이고 있는데 이는 중온성 단계에서 고온성단계로의 전환과정에서 일시적으로 기질 분해에 관여하는 미생물의 전이에 따른 적응과정에서 기질의 분해가 저하된 것에 기인하는 것으로 판단된다. 원료의 낮은 C/N비로 인한 질소원의 손실은 NH₃(Gas) 형태로 발생되었다. 이러한 경향은 단백질을 가수분해하여 아미노산을 얻는데 호기성 조건에서 박테리아가 아미노산들의 아미노기를 이탈시켜 탄소원자 하나가 적어진 포화 유기산(Saturated acid), 하이드록시 카복실산(Hydroxy carboxylic acid)을 생성한다. 그 부산물로 이산화탄소(CO₂)와 암모니아(NH₃), 또는 암모니아(NH₃)만을 발생시킨다.

그림 4는 1차 운전 동안 하수슬러지 1회 주기의 온도, CO₂, NH₃ 가스의 변화를 나타낸 그래프이다. 온도변화 그래프를 고정하고 CO₂, NH₃를 대입하여 상관관계를 알아볼 수 있었다. CO₂는 온도가 상승하기 전 급격히 상승 후 바로 떨어졌으며, 그 후 온도가 증가하는 경향을 보였다. CO₂의 발생은 호기성 미생물에 의해 유기물 발효가 일어날 때 발생하는 것으로 퇴비 발효 단 하루에서 발효가 진행되기 시작하여 발효 단 전체로 이어져 나간다. 온도는 퇴비 단 상층부에서 1m 깊이로 꽃아져 있어 발효가 진행 시 바로 배출되는 CO₂보다 전체적인 온도는 늦게 상승하는 것처럼 보이게 된다. NH₃는 퇴비화 진행 시 온도의 곡선과 비슷한 형태를 보였으며 온도가 가장 가파르게 상승하는 지점에서 가장 높은 농도의 NH₃가 배출되었다. 이 결과는 NH₃는 발효 진행 시 온도의 영향을 받는 특성을 보여주는 것이다. 2차 발효의 경우는 1차 운전 경향과 퇴비 단 전체 온도의 상승속도



(a) 온도에 따른 CO₂ 변화



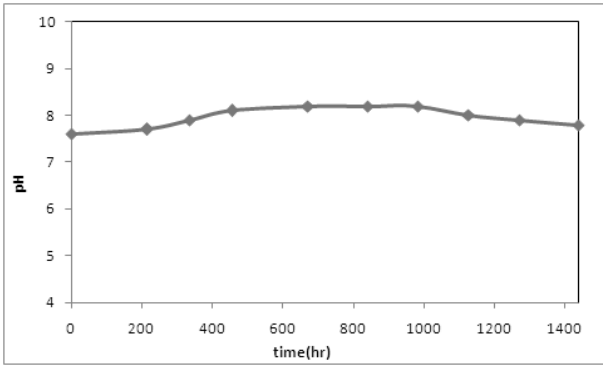
(b) 온도에 따른 NH₃ 변화

그림 4. 1차 하수슬러지 발효 plant 온도에 따른 CO₂와 NH₃ 변화

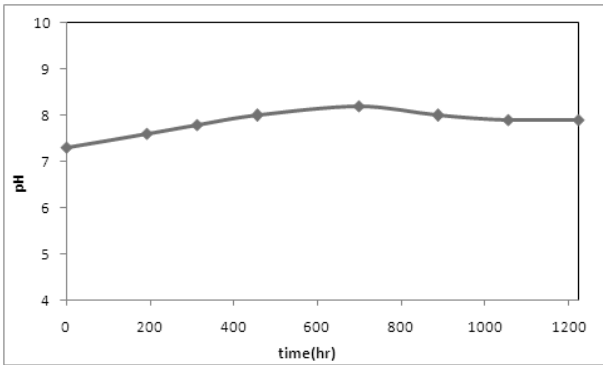
가 빨라 온도의 영향을 받은 NH₃의 발생량이 온도 상승 후 증가하는 형태를 보인 것을 제외하면 차이가 없었으며, 전체적 발효 주기의 경향은 호기성 퇴비화의 모습을 보였다.

3.3 pH

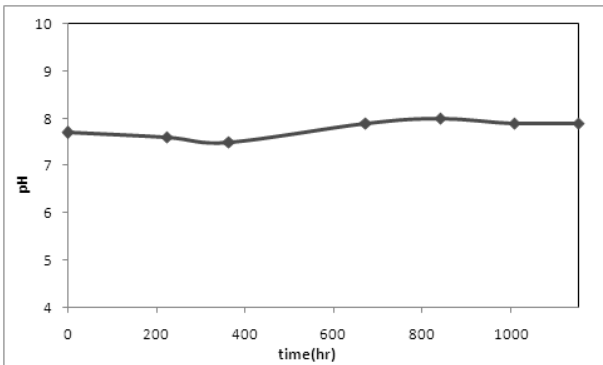
그림 5는 1차 각 유기성폐기물에 대한 발효기간 중 pH의 변화를 나타내고 있으며 2차도 유사한 경향을 보였다. 초기 각 유기성폐기물의 평균 pH는 하수슬러지 7.1, 축산분뇨슬러지 7.0, 음식물쓰레기 4.9였고, 음식물쓰레기의 경우 원료 자체가 낮은 pH를 보였지만 중균과 혼합 시 평균 pH는 하수슬러지 pH 7.5, 축산분뇨슬러지 pH 7.5, 음식물쓰레기 pH 7.6로 퇴비화에 적절한 pH를 가졌다. pH의 상승 시기는 퇴비화 진행과 비교할 때 반응물의 퇴비화 진행이 최대에 도달하는 시기와 대체로 일치했고, 퇴비화가 끝나는 시점에 약간 떨어졌으며 대체적인 pH 거동은 호기성 퇴비화의 전형적인 결과를 보였다. 발효 최종 pH는 하수슬러지 pH 7.8, 축산분뇨슬러지 pH 8.0, 음식물쓰레기 pH 8.1의 결과를 보였다. 퇴비화 시설의 pH 허용기준은 5~9로써 본 공법의 발효 종료 후의 pH는 만족스러운 결과를 보여주었다.



(a) 하수슬러지

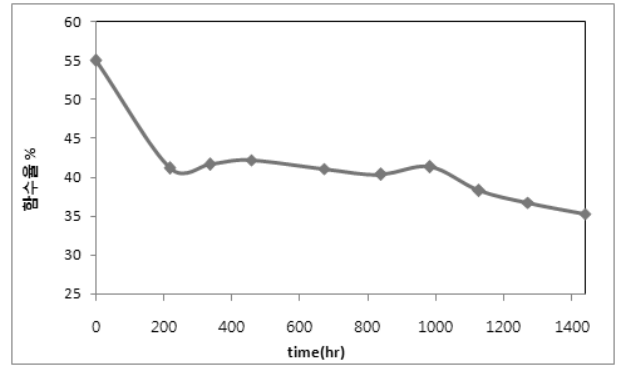


(b) 축산분뇨슬러지

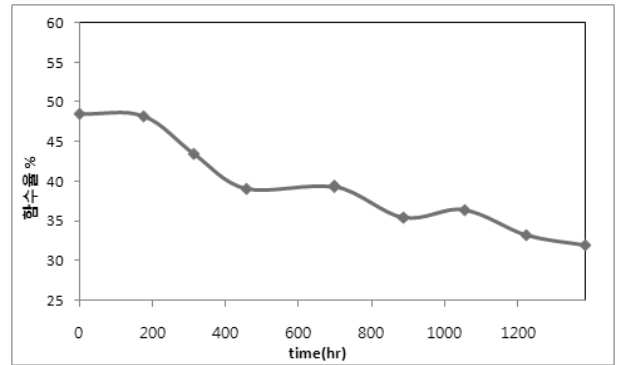


(c) 음식물쓰레기

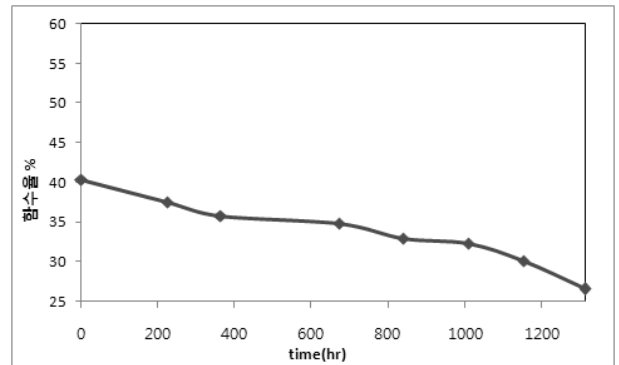
그림 5. 1차 발효 plant pH 변화



(a) 하수슬러지



(b) 축산분뇨슬러지



(c) 음식물쓰레기

그림 6. 1차 퇴비화 기간 중 함수율 변화

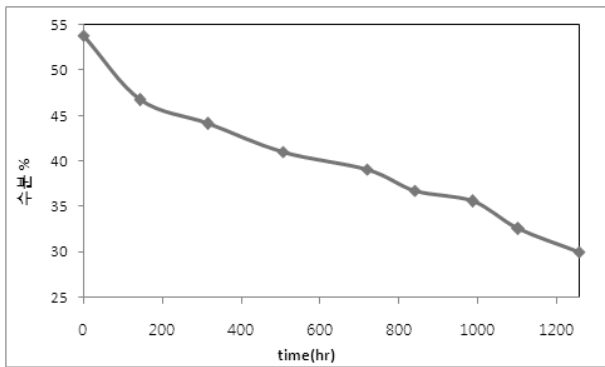
3.4 C/N 비

질소의 비가 낮을 경우에 반응이 급속하게 진행이 되어 안정화는 빨리 진행이 되나 유기물의 분해는 늦어진다. 생물체는 질소보다 약 25배의 탄소를 필요로 하여 적정 퇴비화 C/N비는 25~35로 알려져 있다(손혁석 등, 1996). 일반적으로는 하수슬러지는 평균 C/N비가 8정도 이며 높을 경우 11까지 나타난다. 또한 권혁영 등(2000)의 연구에 의하면 밀폐형 ATAD(Auto Thermal Aerobic Digestion) 시스템에 의한 유기성 폐기물 처리에서 C/N비는 평균 7~8로써 본 실험의 하수슬러지, 축산분뇨슬러지 C/N비의 5.8 과 5.7 보다 높게 분석이 되었다. 일반적인 기타 퇴비공정에서 보

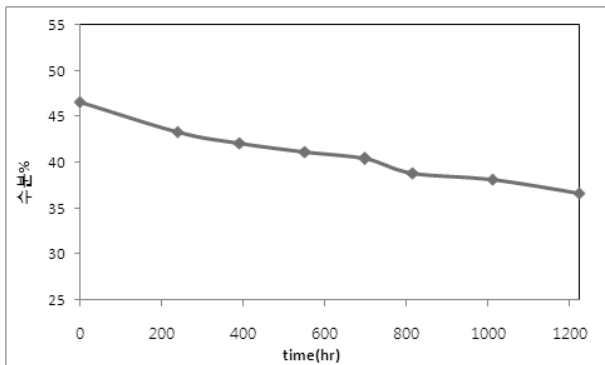
여주는 C/N비를 고려한다면 탄소원의 보강이 필요하다 생각할 수 있으나, 본 퇴비화 Plant의 전체적인 결과를 종합해 보면 유기물을 안정화시켜, 토양 내에서 급속한 분해가 일어나지 않으며 영양원을 제공할 수 있는 유기성폐기물의 안정화 조치가 충분히 이루어지고 있다고 판단된다. 결과적으로 초고온 호기성 퇴비화 시스템에서는 도시형 폐기물 및 하수슬러지 등 낮은 C/N비의 유기성폐기물의 감량화 및 안정화가 빠른 시간에 적절히 이루어진다고 하겠다.

3.5 수분함량

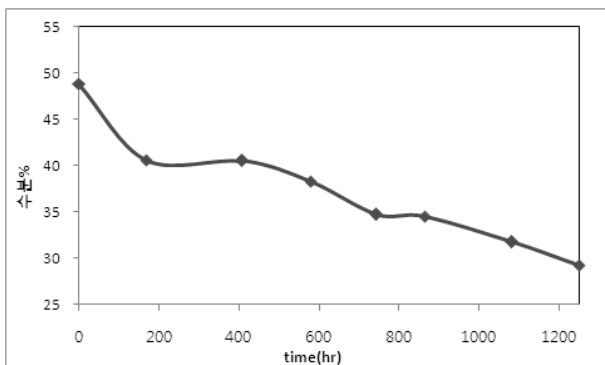
그림 6은 1차 퇴비화 기간 중 각 발효 plant의 교반 직후



(a) 하수슬러지



(b) 축산분뇨슬러지



(c) 음식물쓰레기

그림 7. 2차 퇴비화 기간 중 함수율 변화

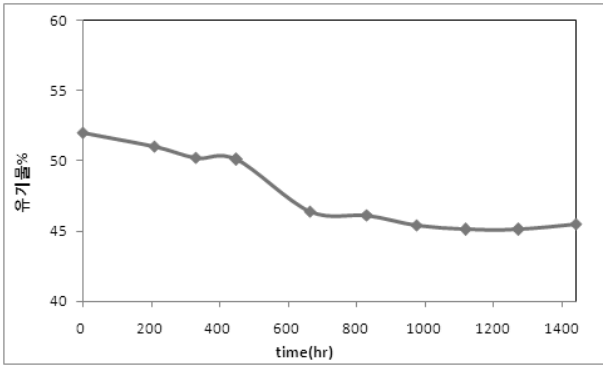
함수율을 측정하여 변화를 나타낸 그래프이다. 초기 원료의 함수율은 중균 19.0%, 하수슬러지 82.6%, 축산분뇨슬러지 84.5%, 음식물쓰레기 76.7%였다. 중균과 혼합하여 하수슬러지 45.5%, 축산분뇨슬러지 44.6%, 음식물쓰레기 38.7%로 함수율을 조절하였다. 발효 종료 후 하수슬러지 함수율은 33.0%로 초기 하수슬러지의 함수율 82.6%에서 64.4%의 수분감소율을 가졌으며, 축산분뇨슬러지 함수율은 84.5%에서 31.9%로 64.6% 수분 감소율, 음식물쓰레기 함수율은 76.7%에서 25.0%로 79.4% 감소하여 수분의 감소율은 음식물쓰레기가 가장 높았다. 그림 7은 2차 퇴비화 기간 중 각 발효 plant의 교반 직후 함수율을 측정하여 변화를 나타낸 그래

프이다. 2차 발효는 반송중균을 원료와 혼합하였다. 반송중균의 자체 함수율이 높아 유기성폐기물 원료 대비 중균의 양이 1차에 비해 많이 소모되었다. 하지만 발효가 진행되는 동안 함수율은 전형적인 감소경향을 나타내었다. 초기 원료의 함수율은 하수슬러지 85.7%, 축산분뇨슬러지 84.0%, 음식물쓰레기 85.3%이었다. 각 반송중균의 함수율은 하수슬러지 33.0%, 축산분뇨슬러지 31.9%, 음식물쓰레기 25.0%로 원료와 혼합하여 하수슬러지 51.2%, 축산분뇨슬러지 47.5%, 음식물쓰레기 44.8%로 함수율을 조절하였다. 2차 발효 시 함수율은 하수슬러지 31.0%, 축산분뇨슬러지 35.5%, 음식물쓰레기 29.2%로 종료되었다. 각각 함수율 감소 정도는 하수슬러지 96.8%, 축산분뇨슬러지 85.4%, 음식물쓰레기 86.6%로 나타났다. 1차에 비해 2차의 수분 제거율이 높은 것은 중균의 낮은 함수율로 인해 중균이 수분을 머금고 있는 현상으로 보여 제거율이 낮은 것으로 나타났으며, 2차의 경우 반송배지의 함수율이 최종 발효 함수율과 비슷하기 때문에 제거된 수분이 원료에서 온 것으로 볼 수 있어 발효에 의한 높은 수분제거율을 볼 수 있었다. 1차와 2차 발효 종료 후 2차 축산분뇨슬러지를 제외하고 수분 허용 기준인 35% 이하를 만족하였으며, 공법을 적용한 후 약 1,000 시간부터 허용 기준 이하의 수분 함량을 나타냈다.

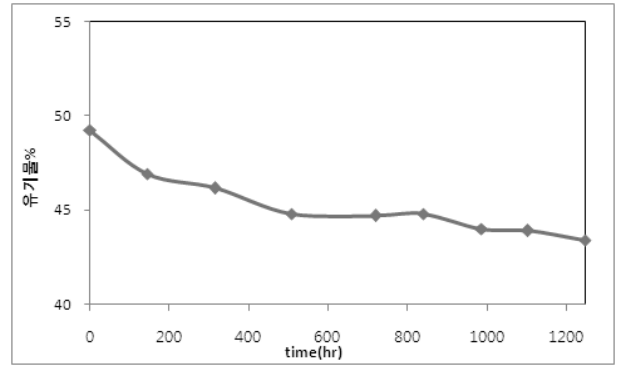
기존의 공법은 유기 폐기물과 퇴비화 균 외 통기제, 수분 조절제를 투입함으로써 감량화 및 비용측면에서 단점을 가지고 있다. 본 퇴비 plant는 발효 종료 중균을 혼합하여 퇴비화 하는 공정으로 중균이 통기제 기능을 하고 있다. 중균 자체 성질은 흙과 비슷하여, 수분을 흡수하는 율이 톱밥이나 기타 통기제에 비해 낮아 중균 양이 늘 수 있으나, 중균은 재사용되며, 100℃ 이상의 초고온 발효라는 이점은 중균이 적정함수율 측면에서 가질 수 있는 한계를 보완하는 이점으로 작용 감량화 및 비용면에서 본 발효 plant 운전이 더 경제적이라 하겠다.

3.6 고형물 중 유기물 함량의 변화

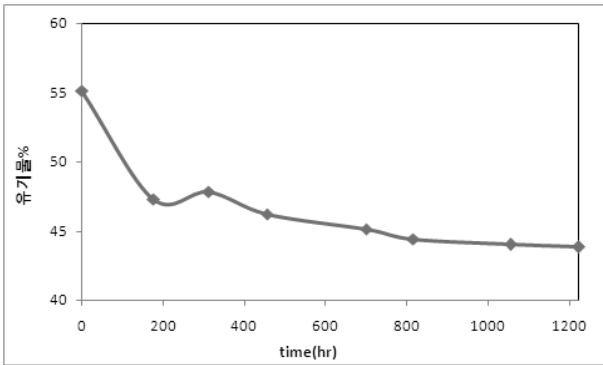
1차 발효 plant 고형물 중 유기물 함량의 변화는 그림 8에 나타내었다. 원료 유기물 함량은 하수슬러지 72.3%, 축산분뇨슬러지 86.4%, 음식물쓰레기 93.2%였다. 중균과 혼합 시 하수슬러지 57.8%, 축산분뇨슬러지 54.9%, 음식물쓰레기 63.0%로 조절하여, 발효를 진행하여 종료 후 유기물 함량 하수슬러지 45.5%, 축산분뇨슬러지 43.8%, 음식물쓰레기 45.0%를 얻었다. 축산분뇨슬러지, 음식물쓰레기 유기물 거동은 초기 분해가 빠르게 일어나는 경향을 보였다. 하수슬러지보다 분해가 쉬운 유기물로 구성되었으므로 초기 발효가 활발했다는 증거이다. 축산분뇨슬러지도 하수슬러지와



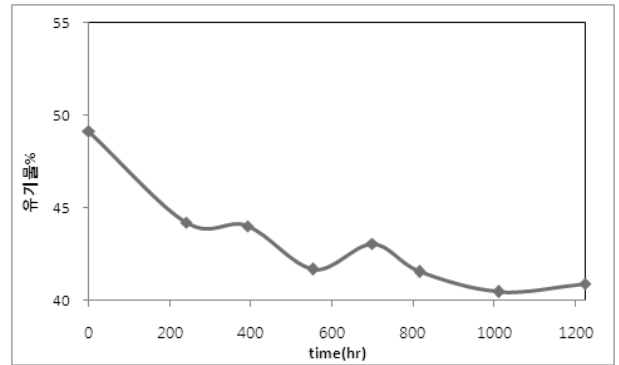
(a) 하수슬러지



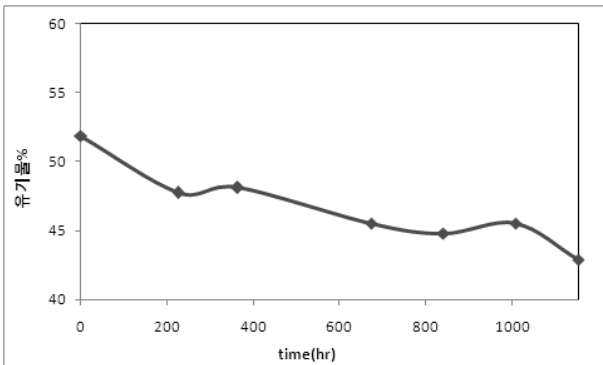
(a) 하수슬러지



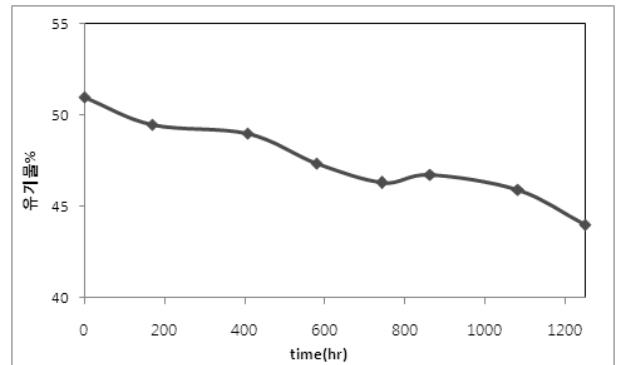
(b) 축산분뇨슬러지



(b) 축산분뇨슬러지



(c) 음식물쓰레기



(c) 음식물쓰레기

그림 8. 1차 퇴비화 기간 중 고형물 중 유기물 함량 변화

그림 9. 2차 퇴비화 기간 중 고형물 중 유기물 함량 변화

같이 고분자 응집제를 사용하여 후기로 갈수록 유기물 분해 곡선이 완만해졌다. 김기주 등(2002)의 연구에 의하면 호기성 퇴비화 공정에서 유기물 함량이 약 18% 감소된 것으로 본 연구의 초고온 호기성 퇴비화 공정에 비해 감소량이 적은 것을 알 수 있었다. 그림 9에 2차 발효 plant 고형물 유기물 함량의 변화를 나타내었다. 종균, 반송종균과 원료를 혼합하여, 초기 하수슬러지의 유기물 함량은 55.2%로 발효를 시작하여 44.5%로 종료되었고, 축산분뇨슬러지는 50.8%에서 46.0%로, 음식물쓰레기는 61.0%에서 45.6%로 종료하였다. 이것은 종균 또는 반송종균과 혼합한 후부터의 유기물 감소율로써 원료만의 유기물 감소율은 매우 높다고 판단된다. 2

차 하수슬러지는 전반적으로 완만하지만 꾸준히 분해되는 유기물 변화곡선을 나타냈고, 발효 후기 기울기가 1차 발효 후기 기울기에 비해 구간 기울기 변화가 커서 발효 진행이 더 활발하게 일어난 것으로 보였다. 1차와 2차 발효종료 후 유기물 함량은 허용기준인 50% 이하를 모두 만족 하였으며, 반응이 시작한 후 약 100 시간 후 부터 허용기준인 50% 이하의 유기물 함량을 나타냈다.

3.7 부피 및 무게 변화

1차 발효 plant 각 시료의 비중은 종균이 0.72, 하수슬러지 혼합물이 0.89, 하수슬러지 발효 종료 후 0.80, 축산분뇨

슬러지 혼합물이 0.91, 축산분뇨슬러지 발효 종료 후 0.78, 음식물쓰레기 혼합물이 0.87, 음식물쓰레기 발효 종료 후 0.75를 나타내었다. 하수슬러지 초기 혼합 용적 67.4m³에서 발효 종료 후 53.0m³으로, 축산분뇨슬러지 50.5m³에서 43.0m³으로, 음식물쓰레기는 50.6m³에서 42.0m³으로 감소되었다. 시료만의 부피 감소율은 각각 하수슬러지 76.6%, 축산분뇨슬러지 64.6%, 음식물쓰레기 83.3%로 계산되었다. 시료만의 무게 감소율은 하수슬러지 70.4%, 축산분뇨슬러지 69.2%, 음식물쓰레기 83.3%의 감소율을 보였다. 2차 발효 plant. 하수슬러지는 용적 74.0m³에서 56.3 m³으로 감소하였고, 시료만의 부피 감소율은 81.8%, 무게 감소율 86.0%로 계산되었다. 축산분뇨슬러지 부피는 51.7m³에서 42.0m³으로 감소하였고, 시료만의 부피 감소율은 88.9%, 무게 감소율 85.3%로 계산되었다. 음식물쓰레기 부피는 53.9m³에서 43.3m³으로 감소하였고, 시료만의 부피 감소율은 87.6%, 무게 감소율 92.5%로 계산 되었다. 세 시료 중에서는 음식물쓰레기의 감소율이 상대적으로 높았으며, 발효 종료된 퇴비 완성품은 계속적으로 시료와 혼합되어 순환되기 때문에 세 가지 시료 모두 시료만의 부피와 무게 감소율은 매우 높다고 판단된다.

3.8 중금속 및 유해물질 분석

표 4는 퇴비발효 기간 중 사용된 원료, 종균, 원료 종균 혼합 및 발효종료품의 중금속 측정 결과이다. 원료에서 구리 575mg/kg, 아연 1,749mg/kg으로 일반적인 유기성폐기물의 농도보다 상당히 높게 나타났다. 원료와 종균의 혼합으로 희석에 의한 농도의 감소가 발생하였으나, 이러한 희석효과를 배제하고도 발효 종료 시 중금속 농도의 감소가 일부 더 발생하는 것으로 계산되었다. 본 발효기법은 밀폐된 작업공간에서 일어나고 미생물을 이용한 생물학적 기술로써, 중금속 양의 감소에 대해서는 본 연구에서는 설명하기가 어렵다. 이를 위해서는 향후 더 정밀한 측정과 메카니즘 연구가 필요할 것으로 사료된다. 발효가 완료된 후 퇴비의 중금속 농도는 퇴비 비료 규격 기준 농도에 적합한 것으로 나타났다.

4. 결 론

본 연구는 정읍시 하수종말처리장에 초고온 호기성 퇴비화 Pilot plant를 설치하여 정읍시에서 배출되는 하수 슬러지, 음식물쓰레기, 축산분뇨의 퇴비화 과정에서 물리·화학적 인자에 관해 평가를 한 것으로써 다음과 같은 결론을 도출하였다.

- (1) 온도 변화는 1차와 2차에서 약 90~100℃의 초고온을 각 교반 주기 마다 보여 전체적인 온도 경향은 초고온을 유지하였고, 각 교반 주기별 O₂, CO₂, NH₃, 농도 변화는 전형적인 미생물에 의한 유기물 분해 양상을 보여 주었다. 또한 특별한 열 공급 없이도 반복적으로 초고온에 도달하여 초고온 미생물의 존재를 간접적으로 보여 주며 반송종균의 활용에도 문제가 없다고 판단된다.
- (2) pH 거동은 호기성 퇴비화의 전형적인 결과를 보였다. C/N비의 경우 본 공법을 이용할 경우 도시형 폐기물 및 하수슬러지 등 낮은 C/N비의 유기성폐기물의 감량화 및 안정화가 빠른 시간에 적절히 이루어질 수 있다고 판단된다. 또한 수분함량은 기존의 공법은 유기 폐기물과 퇴비화 균 의 통기제, 수분 조절제를 투여함으로써 감량화 및 비용측면에서 단점을 가지고 있었다. 하지만 본 공법을 사용할 경우 종균이 통기제 기능을 함으로써 기존 공법의 한계를 보완하는 이점으로 작용하여 감량화 및 비용면에서 본 공법의 운전이 일반적인 공법보다 더 경제적이라 판단된다.
- (3) 고형물 중 유기물 함량의 변화에서는 1차 발효(종균+원료) 진행 종료 후 제거된 유기물함량은 하수슬러지 12.3%, 축산분뇨슬러지 11.1%, 음식물쓰레기 18.0%였다. 2차 발효(종균+반송종균+원료) 진행 종료 후 제거된 유기물 함량은 10.7%, 4.8%, 15.3% 였다. 이것은 종균 또는 반송종균과 혼합한 후부터의 유기물 감소율로써 원료만의 유기물 감소율은 매우 높다고 판단된다. 1차 발효가 2

표 4. 발효기간 중 중금속 측정 결과

(Unit: mg/kg)

측정 항목	퇴비기준	원료	종균	혼 합	발효종료
As	50	불검출	불검출	불검출	불검출
Cd	5	불검출	불검출	불검출	불검출
Hg	2	불검출	불검출	불검출	불검출
Pb	150	13	14	12	16
Cr	300	48	24	33	27
Cu	300	575	115	209	179
Ni	50	24	12	18	14
Zn	900	1749	318	701	455

차 발효보다 제거율은 높았지만, 2차 발효 후기 기올기가 1차 발효 후기 기올기에 비해 구간 기올기 변화가 커서 발효 진행이 더 활발히 일어난 것으로 판단된다.

- (4) 부피 및 무게 변화는 1차 발효에 비해 2차 발효에서 응적, 시료만의 부피, 시료만의 무게 감소율이 더 높았다. 하수슬러지, 축산분뇨슬러지, 음식물쓰레기 중에서 음식물쓰레기의 감소율이 상대적으로 높았고, 세 시료 모두 계속적으로 반송중균과 혼합되기 때문에 시료만의 부피와 무게 감소율은 매우 높았다.
- (5) 중금속 및 유해물질 분석에서는 발효가 완료된 후 퇴비의 중금속 농도는 퇴비 비료 규격 기준 농도에 적합한 것으로 나타났다. 이는 원료와 중균의 희석에 의한 농도 감소와 발효 종료 시 중금속 농도의 감소로 판단이 되나, 중금속 양의 감소에 대해서는 향후 더 정밀한 측정과 메카니즘 연구가 필요할 것으로 사료된다.
- (6) 본 공법은 초고온 호기성 퇴비화 공법으로 초고온 미생물이 활성화되기 까지 온도를 95℃ 이상으로 유지하는 것이 중요하며, 초고온에 도달하였을 때 교반이 이루어진다는, 물리적·화학적 인자의 퇴비 허용기준을 충분히 만족할 것으로 판단된다.

이상과 같은 초고온 호기성 퇴비화 공법의 물리화학적 인자를 Pilot plant 실험을 통하여 평가한 결과, 매우 간단한 시스템 적용으로 초고온에서 높은 유기물, 부피, 및 무게 감량, 높은 C/N비의 유기성 폐기물의 안전한 처리 효과를 얻을 수 있고, 최종 퇴비 제품은 중금속 함량 등에 있어 퇴비 비료 규격 기준을 충분히 만족시킬 수 있음을 확인하였다.

감사의 글

본 연구는 (주) 클립스의 연구비 지원으로 수행되었으며 이에 깊은 감사를 드립니다.

참고 문헌

1. 권혁영, 지영환, 송한조, 김성중(2000), 밀폐형 ATAD system 을 이용한 하수슬러지/음식물쓰레기 통합처리 공정 설계, *J. of KOWREC*, Vol. 8, No. 4, pp. 129~137.
2. 김기주, 공성호, 강혜련(2002), 호기성 퇴비화 공정을 중심으로 음식물쓰레기에 대한 숙성퇴비의 적성성 연구, *Bulletin Environmental Sciences*, Vol. 23, pp. 39~46.
3. 박세용, 정대혁, 유의상, 김문일(2009), 초고온 호기성 퇴비화 공정의 복합 악취 및 악취 물질 평가, *한국지반환경공학회 논문집*, Vol. 10, No. 5, pp. 33~39.
4. 배재근(2001), 유기성폐기물의 자원화 기술의 현황과 전망, *2001년 학술발표회논문집*, 대한위생학회, pp. 3~20.
5. 손혁석, 정문식(1996), 퇴비화를 이용한 하수처리에 있어서 적정 수분함량과 C : N 비에 관한 연구, *1996년 학술발표회논문집*, 한국보건교육 건강증진학회, pp. 259~259.
6. 신지혜, 이진우, 남지현, 박세용, 이동훈(2009), 음식물 쓰레기 퇴비화 과정에 따른 세균군집 구조의 변화, *한국미생물학회는 논문집*, Vol. 45, No. 2, pp. 148~154.
7. 안상선(2005), 음식물류 폐기물의 사료화 및 퇴비화 등 자원화 지원정책에 관한 연구, *한국지하수도양환경학회지*, Vol 10, No. 3, pp 52~63.
8. 이현희, 배재근(2003), 생활폐기물의 호기성처리를 통한 유기물 분해안정화에 관한연구, *유기성자원화학회논문집*, Vol. 11, No. 4, pp. 79~89.
9. 정준오, 안정희(2001), 공기공급량이 음식물폐기물의 퇴비화 반응에 미치는 영향, *대한환경공학회지*, Vol. 23, No. 6, pp. 1013~1021.
10. 한국토지공사(1998), *음식물쓰레기 퇴비화 및 사료화시설 조사 자료* Study Group Clean '98, pp. 1~3.
11. 환경부(2006), *유기성오니 처리 종합 대책*, 한국개발연구원 경제정보 센터, pp. 9.
12. 황의영, 황선숙, 남궁환(1995), 공정조절인자가 분뇨슬러지 퇴비화에 미치는 영향, *Journal of Korean Solid Wastes Engineering Society*, Vol. 12 No. 5, pp. 588~594.

(접수일: 2010. 5. 25 심사일: 2010. 6. 8 심사완료일: 2010. 10. 12)