

톱밥, 벗짚, 왕겨 및 新聞紙를 利用한 豚糞의 堆肥化

최경호 · 박석환* · 정문식

서울대학교 보건대학원 환경보건학과

*서원대학교 자연과학대학 환경과학과

Composting of Swine Feces Using Sawdust, Rice Straw Rice Hull or Newspaper as a Bulking Material

Kyung Ho Choi, Suak Hwan Park and Moonshik Zong

Department of Environmental Health, School of Public Health Seoul National University

*Department of Environmental Science, College of Natural Science, Seowon University

ABSTRACT

This study was carried out to observe how composting reaction proceed in the optimum composting condition and to understand the characteristics of final compost, when swine feces was amended with different bulking material. Sawdust, rice straw, and rice hull were selected as bulking materials and each of these was mixed with swine feces to obtain the optimum range of moisture contents and C:N ratio. To grasp the influence of newspaper on composting reaction when it flew into the composting site intentionally or accidentally, another composting reaction using newspaper as a bulking material was studied.

In this experiment, raw material mixes containing the same amount of organic materials were put into 4 composting reactors and composted in the same environmental condition for 3 weeks; from Aug. 1, 1994 to Aug. 22, 1994.

The followings are the main results of this study.

1. The maximum temperatures reached at during composting reaction were 53.8°C, 51.9°C, 52.7°C, and 52.1°C in the reactor using sawdust, rice straw, rice hull, and newspaper as a bulking material respectively. Thermophilic temperatures were maintained for 72, 108, 108, and 111 hours in each reactor. Mean temperatures of reactors using sawdust, rice straw, rice hull, or newspaper as a bulking materials were 39.7°C, 39.5°C, 41.3°C, and 40.3°C, but no significant difference between these mean temperatures was observed($p>0.05$). Each composter showed significant difference from room temperature($p<0.01$), and the mean difference between them was 9.4°C.
2. Ash contents of each reactor increased rapidly in order of rice straw, rice hull, newspaper, and sawdust according to the pattern of second order function. This rate of increase seemed to result from structural characteristics of a bulking material. The absolute values of second order coefficient of these regression functions were 0.0199, 0.0159, 0.0157, and 0.0144 in each reactor using rice straw, rice hull, newspaper, or sawdust as a bulking material.
3. C : N ratio decreased as the reaction proceeded. Degree of decrease was in order of rice straw, rice hull, newspaper, and sawdust. This sequence was consistent with the increase rate of ash content. The ratios of initial C : N ratio to final C : N ratio were 0.45, 0.53, 0.64, and 0.75 in each reactor using rice straw, rice hull, newspaper, and sawdust as a bulking material respectively. From this ratios, it was possible to infer that all the composting reactions were completed.
4. Fertilizer content containing in the final compost was 1.61~2.20% of N, and 0.35~0.54% of P in dry weight base. According to the classification standard for compost constituent by Higgins, all composts had the intermediate grade of N, but below the low grade of P

excepting the newspaper amended compost(fall into the range of the low grade).

5. Heavy metal contents contained in the composts were analyzed. In case of Cd, the range of 0.58~1.11 $\mu\text{g/g}$ was observed, and in case of Pb, the range of 24.76~39.53 $\mu\text{g/g}$ was observed(in wet weight base). These values are below the permissible heavy metal level for compost of foreign countries.

Keywords : Composting, swine feces, sawdust, rice straw, rice hull, newspaper.

I. 緒 論

우리나라 축산업은 우리 국민의 식생활 양상이 육류, 유류 중심으로 변화함에 따라 급속한 양적 성장을 해왔다. 1984년 이후의 우리나라의 축산 현황을 보면, 돼지의 경우가 가장 두드러진 성장을 보여 92년 현재 사육두수는 1984년의 1.85배에 달하는 546만두이다. 닭과 쇠소의 경우는 각각 1.58배와 1.52배, 그리고 고기소의 경우는 오히려 감소한 0.87배로 각각 7300만두, 51만두, 그리고 202만두가 사육되고 있다.¹⁾ 이에 따라 분뇨의 배출량도 증가하고 있으나 그 대부분이 적절한 처리를 거치지 않고 자연계에 노출되고 있어 축산분뇨의 처리가 문제로 되고 있다.

축산분뇨의 물리화학적 특성을 볼 때, BOD와 COD 등 오염물질 부하 수준이 매우 크다. 수질에 미치는 오염의 발생량을 보면 그 부하수준을 짐작할 수 있는데, 축산분뇨의 배출량은 전체 오염원 총량의 0.6%에 그쳐 적은 편이나 오염 기여도 축면에서 보면 19.9%나 차지한다.²⁾ 이에 따라 관계당국에서는 이미 1981년부터 가축분뇨에 의한 환경오염방지제도를 시행하여 이로 인한 환경 오염을 막기 위해 애써왔다. 그러나 전업화가 많이 이루어진 양계의 경우는 상당 부분이 법적 규제를 받고 있으나, 돼지와 소는 사육농가의 영세성에 인해 적지 않은 부분이 규제대상에서 제외되어 있어 그로 인한 오염이 심각히 우려되는 형편이다.³⁾ 특히 UR 타결 이후에도 비교적 국제경쟁력이 있는 축산 분야 중 하나로 알려진 양돈은 양적 성장을 계속하고 있고, 사육두수를 감안한 축종별 오염물질 배출총량도 51.7%로 소의 34.1%, 닭의 14.2%보다 매우 많아서 양돈 폐기물의 효과적인 처리방안의 개발이 요구되고 있다.⁴⁾

퇴비화는 미생물의 활동의 결과로 분뇨, 슬러지, 낙엽 그리고 음식폐기물 등의 유기물질을 퇴비로 전환시키는 생물학적 과정이다. 이 방법은 농촌에서 적용하기 매우 좋은 방법인데 그 이유는 축산분뇨를 주로 배출하는 축산농가들이 농촌지역에 밀집되어 있고 농촌에서 배출되는 농축산부산물이나 폐기물

중에서 유기물질이 차지하는 비중이 크며, 퇴비화 산물인 퇴비를 사용하기에 가장 적합한 장소가 농촌이기 때문이다.

퇴비화를 시키기 위해서는 몇 가지 환경요인이 갖추어져야 하는데, 중요한 요인들에는 C:N 비, 수분함량, 공기량, 공극량, 구조유지성 등이 있다. 이것들 중 C:N 비와 수분함량을 적절하게 조절하는 일이 특히 중요한 것으로 알려져 있다.

돈분은 수분함량이 크고, 탄소 성분(C)의 양이 적기 때문에 이를 퇴비화하기 위해서는 수분함량을 낮추면서 탄소 성분을 적당한 수준으로 보강해주는 물질을 넣어야 하는데, 이런 목적으로 돈분 등 퇴비화 원료물질에 섞는 물질을 충진재(bulking material)라고 한다. 퇴비를 만드는데 충진재로 톱밥, 벗짚, 낙엽, 나무조각, 나무껍질, 신문지, 마분지, 농작물의 껍질, 식품가공물의 찌꺼기, 도축장 폐기물 등 거의 모든 유기물질을 사용할 수 있다고 알려져 있다. 따라서 퇴비화를 실시하는 곳에서 이용이 용이한 유기물질을 선택하는 것이 바람직하다.

여러 유기물 중에서 우리나라에서 퇴비화에 많이 사용해 온 충진재는 톱밥이다. 그러나 톱밥에 대한 수요가 많아 그 가격이 상승하게 되어 구매가 어려워지는 추세이며, 그것에 대한 대체물질로서 잘 제작되는 벗짚이나 종이류의 활용가능성이 제기되고 있다.⁵⁾ 그외에도 잡초나 왕겨 등을 이용한 퇴비화반응이 연구된 바 있다.⁶⁾ 한편 우리나라의 농촌지역에서 배출되는 농산부산물은 벗짚, 왕겨 및 곡류의 찌꺼기 등으로 이루어지는데 벗짚과 왕겨가 82%나 차지한다. 특히 벗짚은 62%를 차지하는데 쓰임새도 많아서 사료, 부사료 등으로 사용되고 있다. 이에 반해 왕겨는 최근 왕겨탄 제조업의 성업으로 일부는 고체연료화되고 있기는 하나 대부분이 소각폐기되고 있는 형편이다.⁷⁾

한편 우리나라 군단위 지역에서의 생활폐기물의 조성을 보면 1993년 현재 음식, 채소류와 종이류 그리고 나무류가 각각 28.9%, 14.7%, 4.2%를 차지해, 퇴비화가 가능한 물질은 모두 47.8%나 된다.⁸⁾ 그런데 우리나라의 군단위 지역에서 재활용하는 생활폐기물의 비율은 우리나라 전체의 재활용율인 13.0%

에 크게 못미치는 6.9%에 그치는 것으로 나타나 군단위 지역의 재활용율이 전반적으로 낮음을 알 수 있다.⁸⁾ 종이류 중 신문지는 인쇄시 잉크와 활자로 인해 중금속이나 유기용제류가 오염될 가능성이 제기되고 있어 퇴비화 가능성 물질로서 부적절한 것으로 인식되고 있으나, 농가에서 많이 배출되는 유기성 폐기물의 하나인 신문지가 퇴비에 원료물질로 유입될 가능성을 배제할 수는 없어, 퇴비화 반응에 신문지가 불순물로 유입된 경우 신문지가 퇴비화 미생물의 활성과 토양의 중금속 축적 정도에 미치는 영향에 대한 연구가 요청된다.

이 연구에서는 ① 논분을 퇴비화를 하는데 있어서 충진재를 텁밥과 벗짚, 왕겨로 다르게 했을 때, 최적의 환경 조건에서 퇴비화 반응이 각각 어떤 양상을 보이며 어떻게 진행되는지 관찰하고, ② 각 퇴비화 반응에서 만들어진 퇴비의 특성을 파악해 보았다.

또한 농촌 생활폐기물의 상당부분을 차지하는 종이류가 퇴비화 충진재로 사용되거나 불순물로 유입되었을 때, 퇴비화 미생물의 활성과 토양에 어떤 영향을 가져오는지 알아보기 위하여 신문지를 충진재로 사용한 퇴비화 반응 실험을 함께 수행하여 반응의 양상과 최종산물의 특성을 관찰해 보았다.

II. 연구방법

1. 실험재료와 장치

1) 실험재료

이 실험에 사용한 실험재료 중 논분과 벗짚은 서울대학교 농업생명과학대학의 부속목장에서 채취하였고, 텁밥과 왕겨는 각각 인근의 목공소와 정미소에서 채취하였다. 신문지는 서울대학교 보건대학원에서 배출된 일간지 폐기물을 취해 사용했다. 이

재료들의 물리화학적 특성은 Table 1과 같다.

2) 실험장치

퇴비화 실험에 사용된 실험장치는 Fig. 1과 같다. 5 mm 두께의 아크릴판으로 제작된 실험장치는 네 개의 반응조와 하부의 공기실로 구성되어 있다. 각 반응조의 실용적(實容積)은 12 l이며, 반응조 바닥으로부터 2.5 cm 높이에 사방 15 mm마다 직경 3 mm의 구멍을 뚫은 10 mm 두께의 퇴비지지판을 설치하고 그 아래에 높이 2.5 cm의 공기실을 두었다.

소형의 퇴비반응조는 바깥 온도의 영향을 받기 쉬우므로 두께 2 cm의 스티로폼을 이용하여 단열시켰고, 각각의 반응조 사이에도 두께 4 cm의 스티로폼을 대어 반응조들끼리 온도 영향을 주고 받는 것을 차단시켰다.

퇴비화 반응조의 상부에 직경 11 mm의 구멍을 내고 이곳을 통해 펌프를 이용, 공기를 흡입하여 반응조 아래의 공기실로 유입된 공기가 퇴비층을

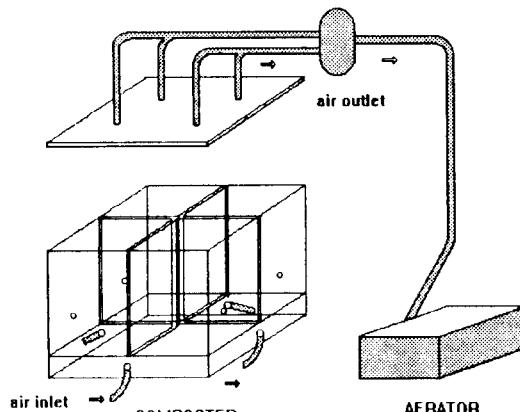


Fig. 1. The experimental setup of composting system.

Table 1. Physicochemical properties of swine feces, sawdust, rice straw, rice hull and newspaper used as raw materials

Raw Materials Properties	Swine feces	Sawdust	Rice straw	Rice hull	Newspaper
pH	7.7	4.0	5.8	6.5	5.1
Moisture contents (%)	69.7	9.8	9.3	14.6	7.5
Ash contents (%)	17.7	6.1	14.9	13.9	15.3
Volatile solids (%)	82.3	93.9	85.1	86.1	84.7
Bulk density (g/l)	839.5	221.6	20.0	144.6	22.0
Carbon (%)	45.7	52.1	47.3	47.8	47.0
Nitrogen (%)	2.5	0.2	1.2	0.4	0.3
C : N ratio	18.3	274.5	39.4	129.3	162.2

* dry weight base.

지나며 미생물들에게 산소를 공급할 수 있도록 설치했다. 반응조의 바닥으로부터 상부 5 cm 지점에 온도계가 들어갈 수 있는 구멍을 만들어 퇴비층 내부의 온도를 측정하였다.

공기를 주입하기 위해 Barnant Company의 MasterFlex[®] 펌프를 사용하였으며 각 반응조의 공기주입량은 100 ml/min·m³ 이상이 되도록 조절했다.

그림 1과 같이 공기압축기를 퇴비화 반응조의 윗부분에 설치하여 펌프가 형성한 음압에 의해 반응조 하부의 공기실로 유입된 공기가 퇴비층을 거쳐 이동하면서 미생물들에게 산소를 공급하도록 장치했다.

2. 실험방법

퇴비화에는 여러 환경조건들이 작용한다. 가장 중요한 조건인 수분함량과 C:N 비(Carbon Nitrogen Ratio)를 최적의 범위로 맞추어 주기 위해 적정한 배합비로 퇴비 원료물질들을 혼합했다. 퇴비화에 적절한 환경적 인자들의 값은 Table 2에 제시되어 있다.⁹⁾

퇴비화를 위한 각 유기물질과 돈분의 배합비는 적정 C:N 비 범위인 1:25와 1:30 사이 중 대략 1:28이 되도록 결정하였으며 적정 수분함량인 60%에 이르도록 조절하였다. 각 반응조의 구성과 물리화학적인 성질은 Table 3과 같다. 이때 퇴비화 배합물질의 총량은 1.8 kg이 되도록 하였으며 원하는

수분 함량을 얻기 위해 필요한 경우 약간의 물을 넣었다.

퇴비화 반응을 가속화시키기 위해 미생물의 식종(seeding)이 필요한데, 이를 위해 일정량의 부식토를 각각의 반응조에 균질하게 혼합했다. 각 반응조마다 일정한 양의 공기를 연속적으로 공급하면서 온도, 회분함량, 수분함량을 측정하였으며 최초의 퇴비화 원료와 최종부산물의 C:N 비와 TP(Total Phosphorus) 함량을 조사하였다. 매일 1회씩 퇴비더미를 뒤집어 퇴비층을 지나는 산소가 균등하게 공급되고 모든 부분에서 골고루 퇴비화 반응이 일어나도록 했다. 이처럼 투입되는 유기물질의 종류를 제외한 모든 조건을 비슷한 수준으로 조절한 퇴비화 반응장치를 이용하여 1994년 8월 1일부터 8월 22일까지 3주 동안 퇴비화 반응을 시켰다.

퇴비화 원료물질 중 하나로 사용한 신문지에 대해서는 중금속 오염의 가능성을 살펴 이것이 퇴비화 미생물의 활성을 저해할 가능성을 알아보았다. 최종 퇴비화 산물에 대해서는 Pb와 Cd 등 유해 중금속 함량을 분석하여 이를 외국의 퇴비 중금속 함량 기준치와 비교함으로써 최종산물의 안전성을 평가했다.

3. 분석방법

매일 오전 9시 퇴비화 반응조 내의 온도를 측정한 후, 퇴비더미를 완전히 뒤집어 균질한 상태로 만든 다음 세 군데 이상에서 채취한 시료를 골고루 섞어 분석했다. 이 실험에서 측정·분석한 항목은 각 반응조의 퇴비시료의 온도, 회분함량, 수분함량, TOC (Total Organic Carbon), TKN(Total Kjeldahl Nitrogen), TP(Total Phosphorus), C:N 비, 중금속 함량 등이고 퇴비화반응 전의 원료시료에 대해서는 수분함량, 밀도, pH, 회분함량, TOC, TKN 등을 측정하였다. 항목별 분석방법은 아래와 같다.

1) 항목별 분석방법

1. 온도 : 반응 개시 1주일 동안을 매일 오전 9

Table 2. Desired characteristics of raw material mixes

Characteristics	Range	Reasonable range	Preferred range
C:N ratio	1:20~1:40	1:25~1:30	
Moisture contents (%)	40~65	50~60	
pH	55~59	6.5~8.5	
Bulk Density (g/l)	<652	—	

Table 3. Composition and physicochemical characteristics of each composting reactor

No. of reactor	Material	Bulking agent	Recipe (kg)		C:N ratio	Moisture contents (%)
			Material	Bulking agent		
1		Sawdust	1.53	0.27	1:29.02	60.7
2		Rice straw	1.46	0.34	1:27.30	57.6
3		Rice hull	1.46	0.34	1:29.95	61.7
4		Newspaper	1.49	0.31	1:28.08	61.3

시부터 매 6시간마다 3회 측정하였고, 반응 1주일 이후부터는 매일 오전 9시에 1회 측정하였다. 측정 위치는 반응조 하부로부터 5 cm 지점을 선택하여 반응조 외벽으로부터 5 cm 떨어진 위치와 반응조의 중심부 두 곳을 선택했다.

- (2) 밀도 : 알고있는 부피의 용기에 시료를 채운 다음 그 무게를 측정하여 시료만의 무게를 구한 다음, 용기의 부피로 나누어 구하였다. 시료를 용기에 채울 때, 너무 조밀하거나 성기게 채우지 않고 퇴비더미와 같은 정도의 성김으로 채웠다.
- (3) pH : 토양화학정시험법에 따라 시료대 증류수를 1:5(w:v)로 섞어 잘 교반한 다음 30분 이상 방치하여 이것의 혼탁액을 검액(檢液)으로 삼아 측정하였다.
- (4) 회분함량 : 폐기물공정시험법에 따라 용광로(Hoskins Electric Furnace)를 이용하여 측정하였다.
- (5) 수분함량 : 폐기물공정시험법에 따라 110°C로 맞춘 오븐(Thelico^R, Precison Scientific Co.)를 이용하여 측정했다.
- (6) TOC(Total Organic Carbon) 함량 : 회분의 함량을 구한 다음 아래의 식을 이용하여 구하였다.¹⁰⁾

$$\text{TOC} = \frac{100 - \% \text{ Ash}}{1.8} (\%)$$

- (7) TKN(Total Kjeldahl Nitrogen) : H₂SO₄, H₂O₂를 이용하여 전처리한 시료를 Semi-micro-Kjeldahl Method에 따라 측정했다.
- (8) TP(Total Phosphorus) : H₂SO₄, H₂O₂와 HNO₃를 이용하여 전처리한 시료를 Ascorbic acid Method에 의해 비색정량했다.
- (9) Pb, Cd : 질산-과염소산 화학법을 이용한 원자흡광분석법(AAS)으로 측정했다.
- 2) 결과분석 및 통계처리
 - 이 연구에서 측정한 실험결과는 SAS 및 Origin 3.0을 이용하여 퇴비화효율을 계산하고 통계처리를 했다.

III. 실험결과 및 고찰

1. 퇴비화 반응의 이론적 고찰

1) 퇴비화

퇴비화는 유기물질을 생물학적으로 분해하고 안

Proteins	Compost
Amino acids	New Cells
Carbohydrates	CO ₂
Lipids + O ₂ + Nutrients + Microorganisms	→ H ₂ O
Cellulose	NO ₂
Lignin	SO ₄ ²⁻
Ash	Heat

Fig. 2. The equation form of aerobic composting.

정화시켜, 환경에 악영향을 초래하지 않으면서도 토양에 사용할 수 있으며 오랜 동안 저장해도 안정한 상태를 유지하는 물질인 퇴비를 만드는 과정이다. 이 과정에서 산소가 필요한지 아닌지에 따라 호기성 퇴비화와 힘기성 퇴비화로 구분되는데, 열에너지 더 많이 발생시킴으로써 더 빠른 분해속도를 낼 수 있는 호기성 퇴비화가, 폐기물을 매립할 때 발생하는 악취를 제거하고 지하수 오염, 병원성 미생물의 전파 등을 억제할 수 있으며 전체 폐기물의 부피를 상당부분 감소시킬 수 있어 신호되는 것으로 알려져 있다. 이에 따라 외국에서는 퇴비화를 환경오염이 적고 효과적인 유기성 폐기물 처리 방안으로 인식하여 이 기술에 대해 집중적인 관심을 기울여 왔다. Fig. 2는 호기성 퇴비화의 결과로 퇴비가 생산되는 과정을 도시한 것이다.¹¹⁾

퇴비화는 새로운 개념이나 기술이 아니다. 단위 순환계에서 자연과 조화를 이루며 생활하던 고대부터 퇴비화는 그 지역에서 발생한 유기성 폐기물을 자연에 환원하여 다시 인간이 이용할 수 있도록 하는 역할을 해왔다. 그러나 과학적인 퇴비화가 시작된 것은 인도에서 Indore법이 시작된 20세기에 이르러 시이다.

한국농촌경제연구원의 조사연구에 의하면, 축산농가에서 사육하는 축종별로 발생하는 가축 분뇨의 자원화실태를 살펴본 결과 자원화를 하고 있는 농가가 85.2%인데 그 중 퇴비화를 이용하고 있는 농가가 무려 82%를 차지하고 있는 것으로 나타나¹²⁾ 현재까지도 퇴비화는 많은 농가에서 유기성폐기물의 자원화 방법으로 유용하게 사용되고 있음을 알 수 있다. 한편 우리나라의 경우 가축의 분뇨를 축산폐수로 분류하여 환경오염물질로 정하고 있을 뿐, 아직 이것의 자원으로서의 가치를 인식하고 있지는 않다. 그러나 실제 가축의 분뇨에는 살물의 성장에 필수적인 많은 영양소들이 포함되어 있다. 전조중량을 기준으로 토양 3대 영양소의 함량을 볼 때, 소의 경우 N, P와 K가 각 4.7, 2.4, 5.9 kg/m³ 포함되어 있고, 돼지분은 이보다 많아서 6.7, 5.8, 3.7 kg/m³을

포함하고 있다.⁵⁾

축산분뇨 속의 영양물질들은 복잡한 유기물 형태로 포함되어 있기 때문에 작물이 쉽게 섭취하기가 어렵다. 이러한 복잡한 유기물을 작물이 이용하려면 이 유기물이 NO_3^- 와 PO_4^{3-} 등 적당한 무기물 형태로 전환되어야 하는데 이 과정이 퇴비화이다.¹²⁾ 퇴비화를 통하여 축산분뇨는 작물에 필수적인 영양소를 제공함은 물론, 훌륭한 토양개량제로 작용하여 화학비료의 과다한 사용에 의해 손상된 토양의 비옥도를 복원함으로써 자연생태계를 보전하는데 이바지할 수 있으며, 토양의 이화학적인 성질을 개선하여 보수력(補水力), 보비력(補肥力), 통기성(通氣性) 등을 증대시키는 효과도 가져온다.⁵⁾

퇴비화의 이점(利點)은 영양분을 회수하여 자원을 재활용하며 그 산물인 퇴비가 뛰어난 토양개량제로 기능한다는 점 이외에도 폐기물을 안정화할 수 있고 병원성세균을 불활화할 수 있다는 점을 들 수 있다.

2) 퇴비화 조건

효과적인 퇴비화를 위한 몇 가지 환경적 인자들이 있는데 그것들은 ① 수분함량, ② C:N 비, ③ 공기주입량과 퇴비더미의 구조유지성 등이다. 수분은 미생물이 화학반응을 일으키고 영양분을 전달하는데 중요한 매질 역할을 하나, 너무 많은 양의 수분이 있을 경우엔 퇴비화물질의 공극을 메워 혐기성 상태를 만들게 되어 미생물의 활성을 떨어뜨린다. 따라서 미생물이 요구하는 수준의 산소를 공급하면서도 매질역할을 할 수 있는 정도의 수분을 유지하는 것이 중요해진다.¹⁰⁾ 일반적으로 수분함량이 45~60% 정도가 되면 퇴비화에 적당한 것으로 알려져 있으며 이 이상에서는 혐기성 상태가 되어 유기성 배기물의 호기적 분해가 어렵다. 또한 이 이하의 수분함량에서는 미생물의 활동에 지장을 주며 특히 15% 이하가 되면 미생물의 활동이 정지되는 것으로 알려져 있다.

퇴비화에 관여하는 미생물은 일차영양소로서 C와 N, 그리고 K를 필요로 한다. 그중에서 특히 중요한 것이 C와 N인데, C는 미생물의 에너지원과 성장영양소로서 사용되고 N은 미생물의 단백질원과 재생산에 필요한 영양소로서 사용된다. 따라서 퇴비화를 일으키는 미생물에게 적합한 양의 C와 N을 공급하는 것이 매우 중요하다. 축산분뇨의 경우 N의 함량이 요구되는 함량에 비해 높고 C의 함량은 반대로 낮다. 따라서 적절적인 퇴비화를 위해 시는 C를 외부에서 공급하는 것이 필요하다. 퇴비화 원료물질의 최적 C:N 비는 1:25~1:30 사이로 보고되고 있는데 이보다 높은 경우에는 질소결핍 상태가 되어 미생물이 과잉의 탄소를 분해하는데 소요하는 시간이

필요하게 되어 퇴비화 반응에 걸리는 시간이 늘어나게 되며, 이보다 낮은 경우에는 질소가 암모니아 상태로 소실되어 악취가 발생할 가능성이 커지고 반응이 더디어지게 된다.¹³⁾

공기주입은 퇴비화에 반드시 필요한 것인데 그 이유는 퇴비더미 안의 미생물들이 유기물을 분해하여 무기물 형태로 안정화시키는데 산소를 요구하기 때문이다. 적절한 양의 공기를 주입하기 위해 과거에는 퇴비더미를 정기적으로 뒤엎어 주는(turn-over) 방법 등을 사용해 왔고 지금도 일부 사용하고 있으나 대규모 퇴비화 기계장치를 운영하는 시설에서는 거의 기계적인 공기주입 장치를 이용하고 있다. 적절한 공기주입량에 대해서는 여러가지 이론이 있으나 100 ml/m³·min 이상에서는 퇴비화 효율에 큰 차이를 보이지 않는 것으로 보고된 바 있다.¹⁴⁾ 적정 수준의 공기를 공급하기 위해서는 퇴비 더미의 구조유지성이 중요하다. 퇴비의 원료물질 사이에 빈 공간이 적당히 확보되어 있어야 그 사이로 공기가 흐를 수 있기 때문이다. 충진재를 축분에 적절히 섞음으로써 퇴비더미의 통기성을 확보할 수 있다.

3) 퇴비의 완성도 파악의 지표

퇴비화 과정의 속도도와 완성정도를 파악하기 위한 기준이 많이 있는데 일반적으로 퇴비화가 완료된 산물은 유기물질의 함량이 적어서 토양에 뿌려졌을 때, 더이상의 발효가 진행되지 않으며 병원균이 불활화되어 있다. Haug에 의해 퇴비 안정화의 정도를 파악할 수 있는 몇 가지 접근법이 제시된 바 있는데 그 내용은 다음과 같다.¹²⁾

* 온도의 감소

* 휘발성물질의 함량, COD, 탄소함량, C:N 비 등 유기물질 양의 감소 또는 회분의 증가

* NO_3^- 같은 특성 성분이 나타나고 NH_3 등이 없어짐

* 최종 산물에서 별레가 끓지 않고 고온 충란이 사라짐

* 힘오감을 주는 냄새가 사라짐

* actinomycetes의 성장으로 인해 백색 또는 회색이 퇴비더미에 출현

노재성 등¹⁰⁾은 퇴비의 속도를 파악하기 위해 온도의 감소, CO_2 발생량 변화와 C:N 비의 변화를 조사한 바 있으며 Polprasert 등¹⁵⁾은 퇴비화 원료물질의 퇴비화 속도를 파악하기 위한 지표로서 유기성 탄소가 반응시간에 따라 감소하는 백분율을 계산하여 사용한 바 있다.

2. 퇴비 충진재의 종류에 따른 온도 변화

온도는 퇴비화 반응의 진행 양상을 이해하고 퇴비가 완성된 시점을 파악할 수 있는 중요한 지표가 된다. 온도의 변화는 퇴비화 미생물이 유기물을 분해할 때 발생하는 열에 의한 것이다.

퇴비화가 진행되면서 초기에는 온도가 급격히 상승하다가 시간이 지남에 따라 서서히 하강하는데, 퇴비더미의 온도는 번식하는 미생물의 종류에 영향을 끼친다. 이때 나타나는 온도를 그 범위에 따라 구분할 수 있는데 퇴비화 과정에서 관찰되는 범위는 중온성 범위와 호열성 범위이다. 중온성 범위는 25°C에서 45°C 사이를 말하는데 퇴비화 진행 단계의 초기와 호열성 범위 이후 등 두 차례에 걸쳐 나타나는 온도 범위이다. 퇴비화 반응이 진행되면서 온도는 급격히 상승하여 50°C 이상에 이르기도 하는데 이 범위가 호열성 온도 범위이다. 이 단계에서 대부분의 유기질들이 안정화되고 온도가 다시 중온성 온도로 떨어지며 유기물의 분해가 계속되다가 대부분의 유기물이 분해되면 최종적으로는 바깥 온도와 같게 된다.

톱밥과 벗짚, 왕겨, 그리고 신문지를 각각 돈분의 퇴비화 충진재로 사용했을 때, 관찰된 온도의 변화 추이가 Fig. 3에 나타나 있다. 퇴비화 반응의 전형적인 온도 변화 패턴에 의하면 반응 초기에 일정 시간 동안 중온성 온도 범위가 관찰되는 것으로 알려져 있으나 이 실험에서는 그 기간이 매우 짧았다. 그 이유는 C:N 비와 수분 함량, 공기 주입량 등의 조건이 좋았고 바깥의 온도도 평균 30°C 이상으로 세반 퇴비화 조건이 매우 양호했기 때문으로 생각된다.

Fig. 3의 (a)에서 보는 바와 같이 톱밥을 충진재로 사용한 1번 반응조의 경우 반응을 시작한지 4시간 만에 호열성 온도 범위에 도달하여 72시간 동안 호열성 미생물에 의한 유기물 분해가 계속되었다. 반응 개시 27시간만에 최고 온도인 53.8°C에 도달했으며 호열성 분해가 끝난 후 10일 정도 동안 완만한 온도 감소를 보이다가 실온에 균사하는 경향을 보았다.

Fig. 3의 (b)에서 보이는 것처럼 벗짚을 충진재로 사용한 2번 반응조도 반응 개시 4시간 만에 호열성 온도 범위에 도달하였는데, 그 이후 108시간 동안 호열성 미생물에 의한 유기물 분해를 계속했다. 벗짚을 충진재로 사용한 퇴비화 반응조 내부의 최고 온도는 51.9°C였고, 이는 반응 75시간 만에 도달한 온도이다. 호열성 분해가 종료된 다음, 비교적 일정한 비율로 온도가 감소하다가 35°C 정도에서 온도의

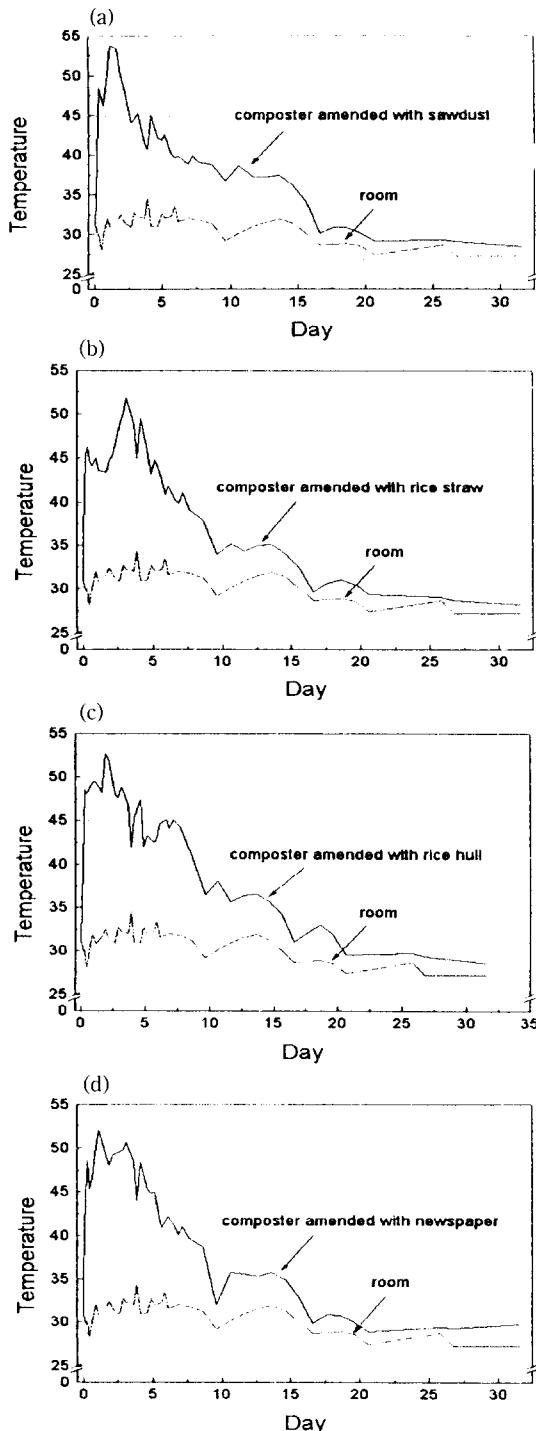


Fig. 3. Temperature trends of each composter using (a) sawdust, (b) rice straw, (c) rice hull, and (d) newspaper respectively as a bulking material.

감소 추세가 약간 정체되고 이 온도가 유지되는 양상을 보였다.

Fig. 3의 (c)에서 관찰되는 것처럼 왕겨를 충진재로 사용한 3번 반응조는 2번 반응조와 거의 비슷한

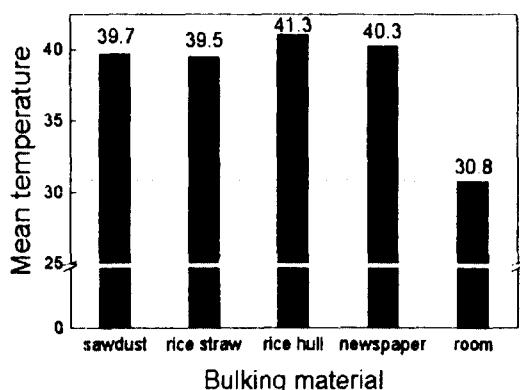


Fig. 4. Mean temperatures of each composter using different bulking materials.

기간 동안에 호열성 분해과정을 거쳤다. 즉, 반응개시 4시간부터 111시간까지 108시간 동안 호열성 온도 범위를 유지했다. 왕겨를 충진재로 사용한 퇴비화 반응조의 내부 최고온도는 52.7°C였고, 이는 반응 45시간만에 도달한 온도이다. 호열성 분해가 끝난 후에도 2일 가량 동안 40°C 이상의 온도를 보이며 분해를 계속했고, 그 이후 완만한 온도 감소를 거쳐 실온에 접근해 갔다.

Fig. 3의 (d)는 신문지를 충진재로 사용한 경우의 온도 변화 양상을 나타낸 것이다. 신문지를 충진재로 사용한 4번 반응조는 가장 긴 호열성 분해 기간을 소요했으나 그 정도는 그리 크지 않았다. 반응 4시간만에 호열성 온도에 도달하여 반응 27시간에 최고온도인 52.1°C를 거쳐 반응 123시간까지 111시간 동안 호열성 분해를 계속했다. 이후 완만한 온도 감소를 보이면서 좋은 성 미생물에 의한 분해과정을 거쳐 실온에 접근해 갔다.

Fig. 4는 첨가된 충진재에 따른 각 반응조의 평균 온도를 나타낸 것이다. 평균 실온 30.8°C에서 퇴비화

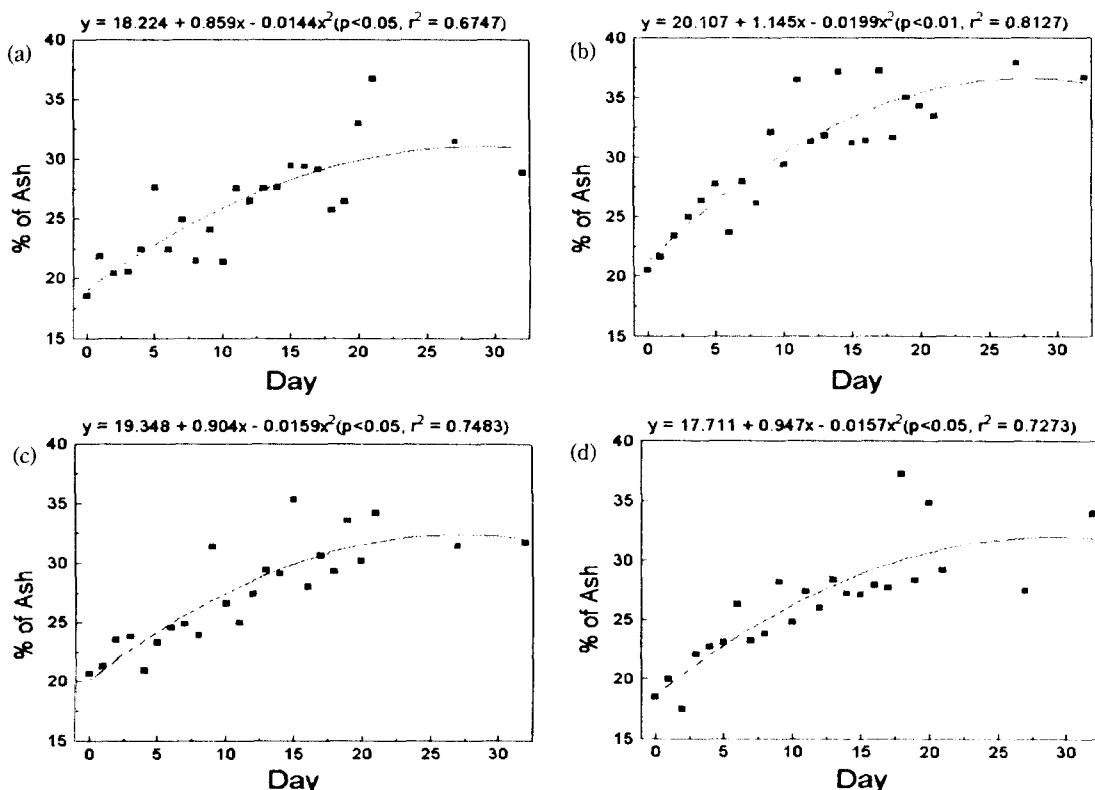


Fig. 5. Ash content trends of each composter using (a) sawdust, (b) rice straw, (c) rice hull, and (d) newspaper respectively as a bulking material.

반응을 시킨 결과 톱밥, 벗짚, 왕겨, 신문지에서 관찰된 평균 온도는 각각 39.7°C , 39.5°C , 41.3°C , 40.3°C 였다. 각 반응조들의 평균온도는 서로 큰 차이가 없었으나($p>0.05$) 각 반응조들은 실온과는 평균 9.4°C 의 차이를 보였다($p<0.01$).

3. 퇴비 충진재의 종류에 따른 회분의 함량 변화

퇴비화가 진행된다는 것은 퇴비원료 중의 유기물질이 분해되어 무기화된다는 것을 의미한다. 그러므로 일반적으로 퇴비화가 이루어진 물질은 도양에 뿐만 아니라 더이상의 발효반응이 일어나지 않을 정도로 낮은 유기물 함량을 보인다. 퇴비의 완성 정도를 측정할 수 있는 접근방법의 하나로 회분의 함량이 제기된 바 있다.¹²⁾

톱밥과 벗짚, 왕겨, 그리고 신문지를 각각 돈분의 퇴비화 충진재로 사용했을 때, 관찰되는 회분함량의 변화 양상이 Fig. 5에 나타나 있다. 회분함량의 변화 추이는 단순선형이 아닌 이차함수식의 형태로 변화하고 있음을 알 수 있다. 회분함량이 증가하는 정도는 유기물질이 분해되는 속도에 의해 영향을 받으므로, 회분함량의 증가속도는 퇴비화 반응의 효율을 평가할 수 있는 지표가 될 수 있다. 각각의 회분함량 증가곡선의 중회귀방정식을 구한 결과가 Fig. 5에 제시되어 있다. 퇴비화 반응효율의 지표가 될 수 있는 회귀방정식의 이차항 계수의 절대값은 벗짚을 충진재로 사용한 경우에 가장 높은 0.0199 ($p=0.0036$)를 보였으며, 왕겨, 신문지, 톱밥을 충진재로 사용했을 경우에 각각 0.0159 ($p=0.0116$), 0.0157 ($p=0.0277$), 0.0144 ($p=0.0455$)의 순서를 보였으며 이를 회귀식의 결정계수 r^2 는 각각 0.8127, 0.7483, 0.7273, 0.6747이었다.

4. 퇴비 충진재의 종류에 따른 C:N 비의 변화

퇴비화 반응이 일어남에 따라 유기물질인 탄소의 양은 줄고 질소의 경우는 비교적 일정하게 유지되므로 C:N 비는 점차로 작아지게 된다. C:N 비는 퇴비화하는 물질의 종류에 따라 차이를 있지만 최

종적으로 측정한 C:N 비가 최초의 C:N 비의 0.75 정도가 되면 퇴비화가 완료된 것으로 판단할 수 있다.¹⁰⁾ Table 4와 Fig. 6은 돈분에 배합한 충진재의 종류에 따른 C:N 비의 변화 추이를 나타낸 것이다. 충진재로 벗짚, 왕겨, 그리고 신문지를 사용한 반응조에서 최초 C:N 비에 대한 최종 C:N 비의 값은 각각 0.45, 0.53, 0.64로 완숙된 것으로 나타났으나 충진재로 톱밥을 사용한 반응조의 값은 0.75로, 부속이 어느 정도는 진행되어 퇴비화가 완료되었다고 판단할 수는 있으나 다른 충진재에 비해서 상대적으로 덜 부숙된 것으로 나타났다.

Table 4와 Fig. 6에서 볼 수 있는 것처럼 C:N 비의 감소량이 가장 많은 것은 벗짚을 충진재로 사용한 2번 반응조이다. 이는 벗짚의 생분해성이 우수하고, 2~3 cm로 잘게 자른 벗짚이 다른 충진재들과 비교할 때 퇴비 더미의 통기성 개선 효과가 가장 좋았기 때문에 그에 따라 퇴비화 반응이 향상되었기 때문이라고 볼 수 있다.

왕겨와 신문지를 충진재로 사용한 경우에 관찰된 C:N 비의 감소 추세가 비슷한 것도 퇴비 속에서 수분에 의해 뭉쳐진 신문지 조각과 왕겨가 퇴비화

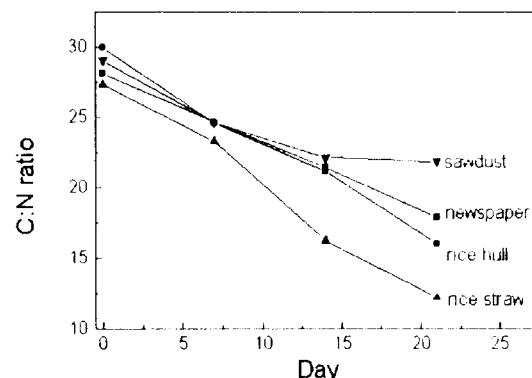


Fig. 6. C:N ratio trends of each composter using sawdust, rice straw, rice hull, and newspaper respectively as a bulking material.

Table 4. Evolution of C:N ratios depending on various bulking materials

No. of composter	Bulking material	Composting Days				The rate final : initial
		0	7	14	21	
1	Sawdust	1 : 29.02	1 : 24.61	1 : 22.11	1 : 21.83	0.75
2	Rice straw	1 : 27.30	1 : 23.30	1 : 16.20	1 : 12.19	0.45
3	Rice hull	1 : 29.95	1 : 24.58	1 : 21.08	1 : 16.01	0.53
4	Newspaper	1 : 28.08	1 : 24.62	1 : 21.43	1 : 17.86	0.64

Table 5. Contents of N and P in compost

Time	N				P				(% dry weight base)
	No. 1	No. 2	No. 3	No. 4	No. 1	No. 2	No. 3	No. 4	
Beginning	1.56	1.62	1.47	1.61	0.39	0.30	0.33	0.32	
End	1.61	3.03	2.28	2.20	0.40	0.44	0.35	0.54	

Table 6. Heavy metal contents of final compost

Reactor No. Heavy metal	No. 1	No. 2	No. 3	No. 4
Cd	0.84*(1.41)**	1.11(1.77)	0.58(1.02)	0.89(1.41)
Pb	32.59(54.98)	39.53(63.06)	24.76(43.76)	35.08(55.30)

* wet weight base, ** dry weight base.

미의 통기구조를 유지하는데 기여한 정도가 비슷하여 같은 정도로 퇴비 더미의 통기성을 개선시켰기 때문으로 생각된다. 이에 비해 비세하게 파쇄된 상태로 실험에 사용된 톱밥은 미생물과의 접촉면적이 넓음에도 불구하고 공기가 원활하게 이동하는 데에는 저해요인으로 작용하였기 때문에 퇴비화 반응이 뒤쳐진 것으로 생각된다.

이 결과는 Fig. 5에 보이는 바와 같이 회분 함량의 증가양상에서 관찰된 퇴비화 효율 정도와도 일치하는 것이다.

5. 퇴비 충진재의 종류에 따른 퇴비의 품질 비교

퇴비의 품질을 평가할 경우 관심을 끄는 부분은 비효성과 공중보건적 안전성이다. 퇴비의 비효성은 유기성 폐기물이 가지고 있는 비료성분을 소실하지 않고 유지한다는 측면에서 찾아져야 한다. 즉 퇴비는 화학비료처럼 높은 비료 가치를 가지고 있지 않다는 것이다. 우리나라의 농림수산부 비료공정규격을 보면 보통비료 중 유기질 비료의 경우 질소, 인산, 칼륨의 총함량이 전조중량 기준으로 5~20%가 되어야 하나 둘 이런 조건을 만족하는 퇴비는 없다.¹⁶⁾

이 실험의 초기와 실험 종료 후의 퇴비에서 분석된 비료 성분의 함량이 Table 5에 제시되어 있다.

이 결과를 Higgins의 퇴비성분 분류기준 중 질소와 인의 값과 비교해 보면 질소의 경우에는 충진물질의 종류에 관계없이 모두 분류기준 중급(1.5~3%)에 속하나, 인의 경우에는 신문지를 충진물질로 넣어 만든 퇴비를 제외하면 모두 분류기준 하급(0.5~1%)에도 미치지 못했다.¹⁰⁾

퇴비화 반응 이전의 함량들보다 높은 값이 퇴비화 종료 후에 나타났는데 이는 퇴비화 반응 중 유기탄소 등이 미생물들에 의해 분해되어 CO₂ 등으로 소실되었기 때문으로 생각된다. 퇴비화 반응을 시키지 않고 그대로 자연계에 방출했을 경우 부영양화의 원인 물질이 되어 심각한 환경오염의 원인이 될 수 있는 질소, 인 등의 영양물질을 토양에 환원할 수 있게 하는 역할을 한다는 측면에서 퇴비의 비효성이 갖는 의미를 찾아야 할 것으로 생각된다.

보건적 측면에서 관심사가 되는 것은 퇴비내의 병원성 세균 수와 중금속 함량 그리고 악취문제 등을 들 수 있다. 호기성 퇴비화가 양호하게 일어날 경우 50°C 이상의 범위까지 퇴비더미의 온도가 올라가게 되는데, 이 과정에서 사람에게 해를 끼치는 병원성 세균은 어느정도 사멸한다. 그러나 중금속의 경우는 미량으로만 존재하더라도 토양이나 토양에서 자란 작물을 먹고 생활하는 인간의 체내에 계속 축적하여 문제를 일으킬 수 있다. 따라서 퇴비의 원료로서 유입되는 유기성 충진물질에 함유되어 있을지도 모르는 중금속에 대한 철저한 관리가 필요하다. 그런데 퇴비에 대해 중금속의 오염 정도 평가를 어렵게 만드는 한 요인은 이 물질들이 환경 곳곳에 존재하고 있다는 사실이다. 이 실험에서 주정한 중금속 항목인 Cd과 Pb의 경우, 토양 중에 바탕값으로 존재하는 농도범위는 Cd은 0.01~7 ppm이고 Pb은 2.6~25 ppm에 이르는 것으로 알려져 있다.¹⁷⁾

이 실험에서 충진재의 종류를 다르게 사용하여 퇴비를 만들었을 때, 결과산물인 퇴비에 나타난 중금속 함량은 Table 6에 있다.

퇴비 중 중금속에 대한 기준은 나라마다 다른 바,

네델란드는 단기적으로 함유되어도 좋은 기준과 장기적으로 함유되어도 좋은 기준으로 나누어 규제하고 있고 스위스의 경우에는 그 구분 없이 하나의 기준을 만들어 규제하고 있다. Cd와 Pb에 대해 네델란드의 단기 규제 기준은 각각 3 $\mu\text{g/g}$ 과 600 $\mu\text{g/g}$ 이고 장기 규제 기준은 2 $\mu\text{g/g}$ 과 200 $\mu\text{g/g}$ 이다. 스위스는 이들에 대해 각각 3 $\mu\text{g/g}$ 과 150 $\mu\text{g/g}$ 으로 함유허용 기준을 정하여 규제하고 있다. 네델란드의 기준은 퇴비 중 중금속 함량에 대한 전조중량기준 임정 허용치¹⁸⁾이며, 스위스의 기준은 “순악화(net degradation)가 없을 것”이라는 조건을 만족하는 기준으로 정해진 것¹⁹⁾이다.

이 실험에서 나타난 퇴비 중 중금속 함량과 위에서 언급한 외국의 기준을 비교해 보았을 때 Cd과 Pb 모두 양국의 기준치보다 매우 낮은 값을 보여 적어도 이 두 가지 중금속 항목에 있어서는 퇴비로서 안전함을 알 수 있다. 특히 Pb가 오염되어 있을 것으로 예상했던 신문지를 충진물질로 넣었던 4번 반응조에서 관찰된 Pb의 함량이 다른 반응조들의 그것과 큰 차이를 보이지 않았으며 이는 Cd의 경우도 마찬가지였다. 그러나 제작과정에서 많은 화학물질이 사용되는 신문지를 퇴비화 반응의 첨가 충진재로 사용하기 위해서는 신문지에 오염되어 있을 가능성 이 있는 여러 오염물질들에 대한 자세한 분석과 연구가 요청된다.

IV. 요약 및 결론

돈분을 퇴비화하는데 있어서 충진재를 톱밥, 벗짚 및 왕겨로 했을 때, 최적의 퇴비화 조건에서 퇴비화 반응이 각각 어떤 양상을 보이며 진행되는지 관찰하고 각 퇴비화 반응의 산물인 퇴비가 갖는 특성을 파악하기 위해 본 실험을 수행하였다. 또한 농촌 생활폐기물의 상당 부분을 차지하고 있는 종이류 중 신문지를 충진물질로서 퇴비 원료에 유입되었을 때, 퇴비화 반응에 미치는 영향을 파악하기 위해 신문지를 충진물질로 사용한 퇴비화 반응 실험을 함께 수행했다.

이 실험에서는 각 반응조가 동일한 양의 유기물질을 포함하도록 돈분에 톱밥, 벗짚, 왕겨 및 신문지 중 한 가지의 충진물질을 적절히 섞기 위해 이 시료들의 물리화학적인 특성을 파악하기 위한 예비실험을 실시하였다. 예비실험에서 최적의 C:N 비(1:25~1:30)와 수분함량(55~60%)을 맞추기 위한 배합비를 결정한 다음, 이것들을 용적 12L의 반응조 4개에 각각 넣은 다음 동일한 조건에서 1994년 8월

1일부터 8월 22일까지 3 주간 퇴비화 반응을 시켰다. 그 결과 아래와 같은 결과를 얻었다.

(1) 충진물질로 톱밥, 벗짚, 왕겨, 신문지를 사용한 반응조에서 퇴비화 반응 과정에서 도달한 최고온도는 각각 53.8°C, 51.9°C, 52.7°C, 52.1°C였으며, 호열성 온도가 지속된 시간은 각각 72, 108, 108, 111시간이었다. 각 반응조의 평균온도는 톱밥, 벗짚, 왕겨, 신문지를 충진물질로 사용한 반응조에서 각각 39.7°C, 39.5°C, 41.3°C, 40.3°C였는데, 각 반응조들 간의 평균온도에는 서로 큰 차이가 없었고($p>0.05$) 각 반응조는 평균 실온(室溫) 30.8°C와 평균 9.4°C의 온도차를 보였다($p<0.01$).

(2) 퇴비화가 진행됨에 따라 회분의 함량은 이차 함수의 증가곡선을 따라 증가하였으며 회분함량의 증가속도는 벗짚, 왕겨, 신문지, 톱밥의 순이었다. 이 속도는 충진물질이 퇴비 더미의 통기성 형성 정도에 기여하는 정도에 따른 것으로 생각된다. 여기에서 퇴비화 반응속도의 지표로 사용한 이차회귀곡선의 이차항 계수의 절대값은 벗짚, 왕겨, 신문지, 톱밥을 충진재로 사용한 반응조에서 각각 0.0199, 0.0159, 0.0157, 0.0144이었다.

(3) 퇴비화가 진행됨에 따라 C:N 비는 감소했는데 감소 정도는 벗짚, 왕겨, 신문지, 톱밥의 순이었으며, 이는 회분의 증가속도에서 관찰된 순서와 일치하는 것이었다. 최초 C:N 비에 대한 최종 C:N 비의 값은 벗짚, 왕겨, 신문지, 톱밥이 각각 0.45, 0.53, 0.64, 0.75를 나타내 퇴비 생산이 완료되었음을 알 수 있었다.

(4) 최종 퇴비 중에 포함되어 있는 비료성분의 함량은 전조중량 기준으로 질소 성분의 경우 1.61~2.20%였고 인 성분의 경우는 0.35~0.54%로서 Higgins의 퇴비성분 분류기준 중 질소 성분의 경우에는 모든 퇴비에서 분류기준 중급(1.5~3%)에 속했으나, 인 성분의 경우에는 신문지를 충진물질로 넣어 만든 퇴비만이 하급(0.5~1%)에 속하고 그외에는 모두 분류기준 하급에도 미치지 못했다.

(5) 퇴비 중에 포함되어 있는 중금속은 습윤중량 기준으로 Cd의 경우 0.58~1.11 $\mu\text{g/g}$ 이었고 Pb는 24.76~39.53 $\mu\text{g/g}$ 으로서 외국의 퇴비 중 중금속 허용기준보다 매우 낮은 값이었다.

참고문헌

- 1) 통계청 : “통계연보”, pp. 134-135, 1993.
- 2) 이갑일 : “축산정책자원의 가축분뇨 처리대책”, 가축분뇨 처리방안 모색 심포지엄 자료집, p. 5,

1994.

- 3) 정 용 : “농촌 소규모 오수처리 시설을 이용한 축산폐수의 효율적 처리 방안에 관한 연구”, 한국환경과학연구협의회, p. 14, 1991.
- 4) 김철호 : “축산분뇨의 발생현황과 처리방안”, 유기성폐기물자원화, 제2권, 제1호, pp. 31-40, 1994.
- 5) 한국유기성폐기물자원화협의회 : “유기성 폐기물의 뇌비화 기술”, 동화 기술, 서울, pp. 34-36, 1994.
- 6) 김석구 : “연탄회를 이용한 분뇨의 퇴비화에 관한 연구”, 서울대학교 도시계획학 석사학위논문, 1988.
- 7) 김수생, 신항식 : “유기성 폐기물의 자원화와 폐기물관리”, 유기성폐기물 자원화, 제1권, 제1호, p. 11, 1992.
- 8) 환경처 : “전국 폐기물 발생 및 처리현황(93)”, pp. 44-88, 1994.
- 9) R. Rynk : “On-Farm Composting Handbook”, NRAES, pp. 7-9, 1992.
- 10) 노재성, 강 호, 홍성수, 이상운, 이범재 : “무기계 고형폐기물을 수분조절재와 탄소공급원으로 한 축분의 퇴비화에 관한 연구”, 한국폐기물학회지, 제11권, 제3호, pp. 389-397, 1994.
- 11) G. Tchobanoglous, H. Theisen, S. Vigil : “Integrated Solid Waste Management”, McGraw Hill, p. 302, 1993.
- 12) C. Polprasert : “Organic Waste Recycling”, John Wiley & Sons, pp.63-102, 1989.
- 13) G. Wilson : “Combining raw materials for composting”, BioCycle, p. 82, August, 1989.
- 14) 강창민, 김병태, 김정옥 : “농수산 폐기물의 적정운전조건에 관한 연구”, 한국폐기물학회지, 제4권, 제1호, pp. 27-35, 1987.
- 15) C. Polprasert, S. Wangsuphachart, S. Muttamara : “Composting nightsoil and water hyacinth in the Tropics”, Compost Science/Land Utilization, Vol. 21, pp. 25-27, 1980.
- 16) 남궁완, 최정영 : “유기성폐기물 자원화기술”, 한국유기성폐기물자원화협의회학회지, 제1권, 제1호, p. 41, 1993.
- 17) 이영화, 정문호 : “금속과 사람”, 제1판, 신광출판사, pp. 317-346, 1993.
- 18) J. Lustenhouwer : “Characterization of compost with respect to its content of heavy metals”, de Universite van Amsterdam, p. 9, 1991.
- 19) 정재춘 : “유기성 폐기물의 퇴비화 활성화 방안”, 생활쓰레기의 퇴비화기술, 한국유기성폐기물자원화협의회 기술강좌, p. 121, 1994.