

돈분의 퇴비화에 있어서 종이류 폐기물의 적정 배합량에 관한 연구

정문식 · 박석환* · 최경호 · 손현석 · 김성균 · 박지영
서울대학교 보건대학원, 서원대학교 자연과학대학 환경과학과*

A Study on Optimum Mixing Ratio of Paper Wastes as Bulking Agent in Composting of Swine Feces

Moon-Shik Zong, Seok-Hwan Park*, Kyung-Ho Choi, Hyun-Seok Son
Sung-Kyoon Kim, Ji-Young Park

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 performed to find the optimum mixing ratio of paper waste in composting of mixture of swine feces and newspaper. Using the experimental setting of aeration rate which was found in the experiment carried out priorly, and moisture contents reported in other literature, just the initial C:N ratios were differentiated by mixing different amount of newspaper with the same amount of swine feces. This study was carried out by operating 4 experimental composting reactors of bench scale for 3 weeks.

The followings are the conclusions that were derived from this study.

1. During composting reaction, the C:N ratio of each composter was decreased. Degree of decrease was in order of run 3, run 2, run 4, and run 1 of which initial C:N ratio was 30, 25, 35, and 20 respectively. All of the final composts were found to be completed composting reaction.

2. Ash contents of each reactor increased rapidly in order of run 3, run 2, run 4, and run 1. The absolute values of quadratic effect coefficients of each second order regression function was 0.059, 0.038, 0.032, and 0.030 respectively. Ash contents evolution trend had a linear correlation with the C:N ratio trend. ($r=-0.96932$, $p<0.05$)

3. The range of highest temperatures reached during composting was 47.2-53.5°C. Those were not significantly different from one another. Thermophilic temperatures were maintained in the range of 48-108 hours.

4. Contents of heavy metal detected in the final compost were lower than those of Korean and European standards.

5. Concentration range of Nitrogen in the final compost was 1.11-2.27%, and that of phosphorus was 8.40-10.70 mg/kg.

6. The optimum C:N ratio which has been proposed without the consideration of types of bulking agents should be re-examined. Biodegradabilities of each bulking agents was thought to be important factor when determining the optimum initial C:N ratio for composting.

Keywords : Composting, bulking agent, C:N ratio

I. 서 론

퇴비화는 미생물에 의하여 유기물을 분해하는 생물학적 공정으로 미생물의 성장과 유기물 분해를 위

해서 수분, 산소, 기질, 온도, 영양소 등이 필요하다. 효과적인 퇴비화를 위해서는 반응조건이 적절해야 하는데 중요하게 취급되는 반응조건에는 C:N비, 수분함량, 공기량, 공극량, 구조유지성 등이 있다. 이

중에서 가장 중요한 것은 영양소의 균형 즉 탄소와 질소의 균형 잡힌 공급이다. 이 이외에도 인, 황, 칼슘 및 기타 미량원소들이 세포대사에 중요한 역할을 하지만 가장 큰 영향을 미치는 것은 탄소와 질소이다.¹⁾ 따라서 퇴비화를 위한 최적의 C:N비를 찾고자 하는 노력이 진행되어왔고 그 결과 25~30 범위의 값이 가장 좋은 퇴비화효율을 보인다고 알려져 왔다.²⁾ 퇴비화의 대상인 축산분뇨나 음식쓰레기만으로는 적절한 C:N비를 유지하지 못하는 경우가 많은데, 이때 최적 C:N비를 맞추기 위해서 혼합하는 것이 충진재(bulking agent)이다. 그러나 이때 혼합되는 충진재의 생물학적 분해정도가 고려되지 않은 총탄소와 질소의 비에 기준하여 적절한 첨가량이 결정되고 있기 때문에 퇴비화반응을 위해 생물학적으로 요구되는 탄소와 질소의 비를 초과하거나 미달하는 경우가 발생될 수 있다. 이러한 경우에는 반응속도가 저하되거나 악취가 발생할 수 있으므로 문제가 된다. 따라서 퇴비화 반응에 생물학적으로 요구되는 적정량의 충진재를 혼합하는 것이 중요하다.³⁾

본 연구에서는 앞서 수행된 돈분과 폐지류의 퇴비화에서 공기공급량이 퇴비화에 미치는 영향에 대한 연구에 이어, 돈분의 퇴비화를 위해 신문지 등 폐지류를 충진재로 사용했을 때 돈분과 신문지의 최적 배합비를 결정하기 위한 목적으로 수행되었다. 충진재의 생분해도를 결정짓는 요인을 충진재에 존재하는 리그린, 셀룰로스 등 난분해성 유기물질이라고 보고, 충진재로 사용되어온 몇 가지 물질의 난분해성 유기물질의 함량을 살펴보고, 종이류폐기물을 이용하여 돈분을 퇴비화 하는데 있어서 초기 C:N비를 다르게 하여 퇴비화 반응을 진행시켰을 때 어떤 조건에서 가장 나은 효율을 보였는지 살펴으로써 신문지의 생분해성을 감안한 최적 배합비를 찾고자 했다.

II. 실험재료 및 방법

1. 실험재료 및 기구

돈분과 신문지를 퇴비화 하는데 가장 적당한 신문지 혼합량을 찾기 위해, 앞서 수행된 실험에서 발견한 최적의 공기공급량 및 기존의 문헌에서 최적이라 알려진 수분함량을 동일하게 맞추고, 신문지의 공급량만을 다르게 함으로써 초기 C:N비를 다르게 하여 퇴비화 반응을 수행하였다. 이 때 가장 효율이 좋은 반응조건을 찾기 위해 다음과 같은 재료 및 기구로 실험을 수행하였다.

1) 실험재료

Table 1. Physicochemical properties of swine feces and newspaper

	Swine feces	Newspaper
Moisture contents (%)	61.75	8.16
Ash contents (%)	19.00	4.62
Volatile solids (%)	81.00	95.40
Bulk density (g/l)	985.00	66.00
Carbon (%)	45.00	52.99
Nitrogen (%)	2.97	0.14
C/N ratio	15.15	386.51

이 실험에서 퇴비화 대상 물질로 사용한 돈분은 서울대학교 농업생명과학대학의 부속목장 돈사에서 신선분 상태로 채취하였고, 신문지는 서울대학교 보건대학원에서 배출된 일간지 폐기물을 취해 전단기를 이용하여 가로 세로 5 mm 정도로 잘게 잘라 사용하였다. 시료채취 후 실험에 투입되는 동안 돈분은 냉장보관되었다. 이 재료들의 물리화학적 특성은 Table 1과 같다.

2) 실험기구 및 장치

퇴비화 실험에 사용된 장치는 Fig. 1과 같다. 4개의 반응조와 하부의 공기실로 구성되어 있으며 각 반응조의 실용적은 12 l이다. 반응조 바닥으로부터 2.5 cm 높이에 사방 15 mm마다 직경 3 mm의 구멍을 뚫은 두께 10 mm의 지지판을 설치하고 그 아래에 높이 2.5 cm의 공기실을 두었다.

퇴비화 반응조의 외부온도를 일정하게 유지시키기 위해 반응조를 항온장치에 넣고 외부의 온도에 무관하게 20-30°C를 유지하도록 조정하였다. 퇴비화 반응조 각각의 상부에 설치된 뚜껑의 중앙부에 직경 11 mm의 구멍을 내어 유량조절계를 연결시킨 라텍스 튜브를 통해 펌프(Sibata HVC 500 High volume Air Sampler)로 연결시켰다. 한편 퇴비화 반응조에 유입되는 공기는 여름철 실온이 30°C 정도로 거의 일정하게 유지되어 별도의 항온장치를 거치지 않고 그대로 이용되었다.

2. 실험방법

본 실험은 종이류 폐기물을 이용한 돈분의 퇴비화에 있어서 최적 배합비를 찾기 위해 수행된 실험이다. 따라서 배합비 이외의 다른 조건들은 퇴비화에 최적인 조건으로 유지시킨 상태에서 본 실험을 수행했다. 공기공급량은 500 ml/min kg-vs로 맞추고 최초의 수분함량을 60%로 유지시키기 위해 필요한 경우 적정량의 증류수를 첨가하였다. 예비실험을 거쳐

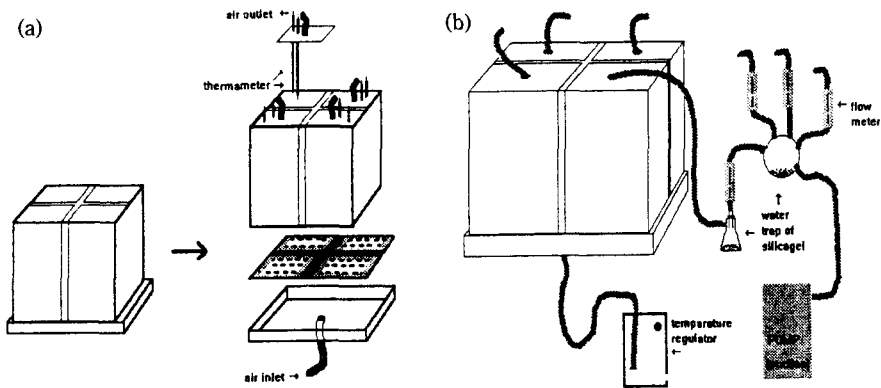


Fig. 1. The Experimental setup of composting reactor.

(a) the structure of composting set, and (b) the structure of reactor and aeration set.

Table 2. Experimental conditions of each run

	Aeration rate (ml/min.kg-vs)	Swine feces(g)	Newspaper(g)	water added initially (ml)	Initial C/N ratio
run 1	500	1788	212	78.8	19.09
run 2	500	1607	393	175.7	24.94
run 3	500	1455	545	256.8	29.94
run 4	500	1327	673	325.7	36.57

측정된 원시료의 탄소와 질소함량으로 각 반응조의 C:N비를 각각 20, 25, 30, 35로 맞추기 위한 배합비를 결정한 다음, 각각의 반응조에 해당하는 배합비로 혼합한 퇴비화 반응 원료를 투입하여 퇴비화반응을 시작하였다. 각각의 반응조에 투입한 양은 2000 g 이었으며, C:N비 35인 4번 반응조의 경우 적정비율로 혼합하자 부피가 너무 커져서 3번 반응조의 부피에 해당하는 양인 1500 g을 취해 4번 반응조에 투입하였다. 각 반응조의 퇴비화반응이 잘 일어나도록 하기 위해 소량의 부식토를 식중(seeding)하고 균질하게 혼합하였다. 이와 같은 배합비로 퇴비원료를 혼합한 후의 수분함량은 최적 수분함량으로 알려진 60%에 훨씬 미치지 못하는 양이었다. 수분함량을 최적조건인 60%로 맞추주기 위하여 적정량의 증류수를 넣어 주었다. Table 2는 본 실험의 조건을 나타낸다.

이와 같은 조건에서 1996년 8월 4일부터 1996년 8월 24일까지 3주간 퇴비화반응 실험을 수행하였다.

반응 일주일까지 매일 오전 9시에 퇴비더미를 1차로 뒤집어 주어 공기가 균등하게 공급되도록 하였으며 이때 온도 측정과 수분 및 회분측정을 병행하였다. 반응 일주일 이후부터 퇴비화 반응이 완만해지

고 안정화되는 기간으로 판단하여, 이때부터 퇴비화 반응 종료 시까지 위와 같은 측정을 매 이틀당 1회씩 실시하였다. 실험 첫 주와 매 일주일마다 총질당 질소(TKN) 함량을 측정하였으며, 최종 생산물에 대해서는 중금속함량과 총인(TP) 함량을 측정하여 퇴비의 안전성과 비효성(肥效性)을 판단하고자 하였다. 정확한 유량이 공급되도록 하기 위해 수시로 bubble meter로 유량보정(calibration)을 하여 유입되는 공기량을 확인 보정하였다.

3. 분석방법

오전 9시 퇴비화 반응조 내의 온도를 측정한 후 퇴비더미를 완전히 뒤집어 균질한 상태로 만들었다. 세 군데 이상에서 채취한 시료를 골고루 섞어 분석에 이용했다.

이 실험에서 측정, 분석한 항목은 각각의 반응조 온도, 회분함량, 수분함량, TKN, TP, C:N비, 중금속함량 등이고, 퇴비화 반응의 결과로 만들어진 퇴비에 대해서는 중금속함량, TKN, 회분함량, TP 함량, 수분함량 등을 측정하였다.

항목별 분석방법은 다음과 같다.

1) 항목별 분석방법

(1) 온도 : 반응이 시작된 1주일 동안은 매일 오전 9시, 오후 3시, 오후 9시에 3회 측정하였고, 1주일 이후부터는 매일 오전 9시에 1회 측정하였다. 측정 위치는 퇴비층 중에서도 고온을 보이는 부위와 상대적으로 저온을 보이는 부분 두 곳이었으며, 퇴비화 반응 전기간에 걸쳐 같은 위치에서 측정되었다.

(2) pH : 토양화학공정시험법⁴⁾에 따라 시료 대 증류수를 1:5로 섞어 잘 교반한 다음 30분 이상 방치하여 이것의 현탁액을 검액으로 삼아 pH 측정기 (Orion Research Co, Expandable ion Analyzer EA 940)를 이용하여 측정하였다.

(3) 회분함량 : 폐기물공정시험법⁵⁾에 따라 전기용광로(Dongyang Scientific Co.)를 이용하여 600°C에서 1시간 동안 회화시키는 방법으로 측정했다.

(4) 수분함량 : 폐기물공정시험법에 따라 110°C로 조절된 오븐(Thelco®, Precision Scientific Co.)을 이용하여 4시간 동안 건조시켜 측정했다.

(5) TOC : 회분의 함량을 구한 다음 아래의 식을 이용하여 계산하였다. 이 방법의 오차범위는 2-10% 이내인 것으로 보고되어 있다.¹⁾

$$\text{Total Organic Carbon} = \frac{100 - \% \text{Ash}}{1.8}$$

(6) TKN(Total Kjeldahl Nitrogen) : H₂SO₄, H₂O₂를 이용하여 전처리한 시료를 Semi-micro Kjeldahl Method에 따라 측정했다.

(7) TP(Total Phosphorus) : H₂SO₄, H₂O₂와 HNO₃를 이용하여 전처리한 시료를 Ascorbic acid Method에 따라 880 nm 파장에서 비색정량하였다.

(8) 중금속 : 질산-과염소산-황산을 이용하여 전처리한 시료를 원자흡광분석법(AAS)으로 분석했다.

III. 실험결과 및 고찰

현장에서 퇴비화 반응을 위해 충전재를 혼합할 때, 최적의 C:N비를 맞추는 것은 어렵다. 이는 탄소

기질의 일부분 즉 셀룰로스나 리그린 등이 생물학적 분해에 저항하고, 분해되기 위해서는 오랜 시간이 필요하기 때문이다.¹⁾ 따라서 여러 가지 다양한 종류의 충전물질에 대해서 통틀어 적용할 수 있는 C:N비를 제시하는 것은 미생물의 분해가능성을 고려할 때 적절하지 않으며, 각각의 충전물질의 생분해도에 따라 적절한 C:N비가 제시되어야 한다.

한편 우리나라의 쓰레기 발생량 통계를 보면, 음식물, 폐지류, 나무류 등의 유기성 폐기물이 차지하는 비중이 커져가고 있다. 1995년 우리나라에서 배출되는 생활폐기물 중 음식물 쓰레기가 차지하는 비중은 31.6%를 차지하며, 폐지류는 23.5%를 차지한다.⁶⁾ 종량제의 실시에 따라 여타 폐기물의 재활용율이 늘어감에 따라 유기성폐기물의 배출정도는 더욱 늘어갈 것으로 생각된다. 미국에서도 폐지류는 도시폐기물의 약 15%를 차지한다. 폐지류를 다른 유기성 폐기물과 함께 퇴비화함으로써 처리하는 방법은 폐지류에 대한 가장 가능성 있는 대안으로 검토되고 있다.⁷⁾

1. C:N비의 변화

퇴비화 반응이 진행됨에 따라 C:N비는 감소한다. 퇴비화 시키는 물질에 따라 차이가 있지만 최종 C:N비를 최초의 C:N비로 나눈 값(final ratio/initial ratio)이 0.75 이하가 되면 퇴비화가 완료되었다고 판단한다.⁸⁾ Table 3과 Fig. 2는 돈분과 신문지를 서로 다른 C:N비로 배합하여 퇴비화 반응을 시켰을 때 시간에 따른 C:N비의 변화추세를 나타낸 것이다.

각 반응조에서 최종 C:N비를 최초 C:N비로 나눈 값은 모두 0.75 이하로 나와 전 반응조에서 퇴비화가 완료되었음을 확인할 수 있었다. C:N비의 감소정도는 run 3, run 2, run 4, run 1 순으로 컸던 것으로 관찰되었으나 run 4와 run 1의 차이는 매우 작았다(< 1%). 기존 문헌에서 최적 C:N비로 보고된 C:N비 25-30 범위에서 가장 퇴비화 효율이 좋았던 것으로 판단할 수 있었다. 이 범위보다 적거나 컸을 때는 퇴비화 반응이 일어나긴 하였으나 분해정도가 크지 않았다.

Table 3. Evolution of C:N ratios depending on various initial C:N ratios

Run	C/N ratio	Time (weeks)				final/initial
		Initial	1st week	2nd week	final	
Run 1	20	19.09	16.17	15.99	12.80	0.67
Run 2	25	24.94	20.47	17.35	14.52	0.58
Run 3	30	29.94	22.37	20.54	14.53	0.49
Run 4	35	36.57	26.83	25.08	24.17	0.66

2. 회분함량 변화

퇴비가 진행된다는 것은 퇴비원료물질 중의 유기 물질이 분해되어 무기화되어 식물이 쉽게 이용할 수 있는 형태로 변화한다는 것을 의미한다. 따라서 퇴비화반응의 완성시점을 회분의 함량 변화를 통해서 보는 연구도 보고된 바 있다.⁹⁾ 초기의 C:N비가 다르므로 각 반응조마다 초기에 함유되어있는 회분의 함량은 다르다. 서로 다른 양의 회분을 가지고 있는 반응조에서 회분의 증가 추세의 정도로서 퇴비화 반응이 상대적으로 얼마나 신속하고 효율적으로 진행되었는

지를 파악하기는 어려울 것으로 사료된다. 그러나 회분함량의 증가 추세를 살펴봄으로써 초기 회분함량의 정도에 따라 회분증가 속도가 어떻게 결정되는지에 대해 관찰하는 것은 가능할 것으로 판단된다.

아래의 Fig. 3은 시간에 따라 각 반응조의 회분함량이 변화한 추세를 나타낸 것이다.

표본에 따른 변이가 관찰되기는 하였으나, 모든 반응조에서 시간이 흐름에 따라 대체적으로 증가하는 추세를 보였고, 이 증가추세는 이차회귀곡선의 양상을 보였다. 회분의 증가추세는 퇴비화 반응 초기에서 더 급격한 양상을 보이며, 그 정도는 이차항의 계수의 절대값에 비례한다. 따라서 이 연구에서는 회분함량의 증가속도를 반영하는 이차회귀식의 이차항계수의 절대값을 퇴비화 반응의 효율을 평가하기 위한 지표로 사용하였다. 초기 C:N비를 각각 20, 25, 30, 35로 했을 때 나타난 이차회귀곡선의 이차항계수의 절대값은 각각 0.030, 0.038, 0.059, 0.032의 값을 보였다. 즉 초기 C:N비가 30일 때 회분함량의 증가속도가 가장 빠르며, 초기 C:N비 25, 35, 20일 때의 회분함량 증가속도가 뒤를 이었다. 이 식만을 볼 때는 초기 C:N비가 30일 때 퇴비화반응이 가장 좋았다고 말할 수 있으나, 이차항계수의 표준편차값을 고려하면 이 값들을 이용하여 퇴비화반응의 우열을 가리기는 어렵다. 그러나 퇴비화 반응의 추세를 살펴는 데는

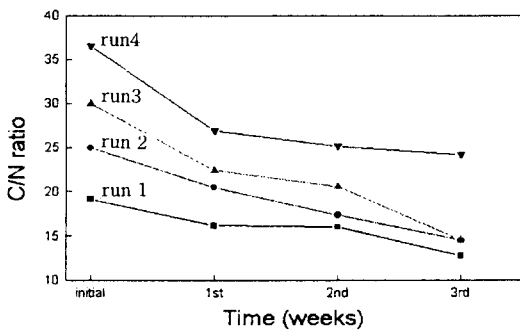


Fig. 2. C:N ratio trends of each composter by various initial C:N ratios. run 1, C:N ratio 20; run 2, C:N ratio 25; run 3, C:N ratio 30; run 4, C:N ratio 35.

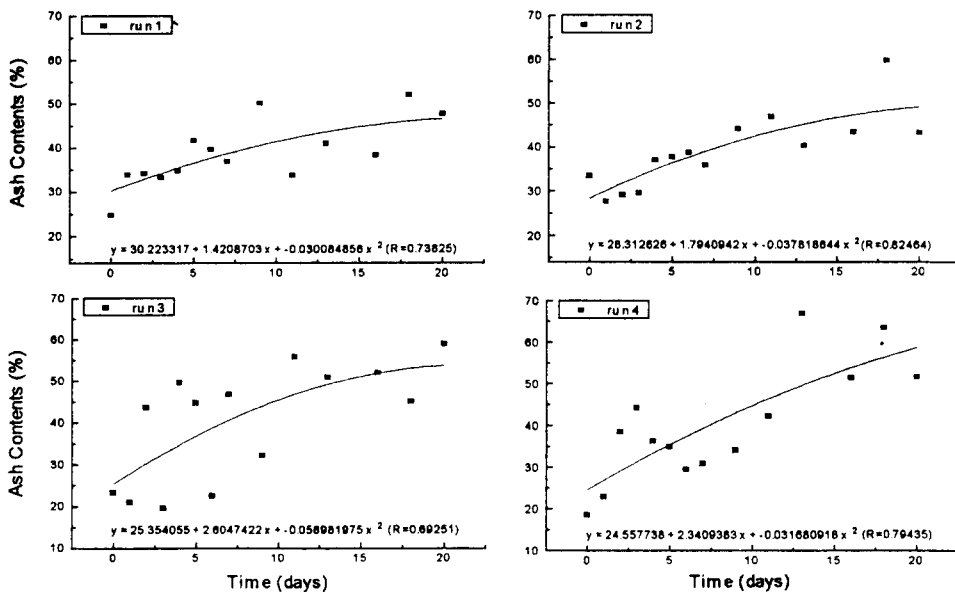


Fig. 3. Ash content trends of each composter by various initial C:N ratio. run1, C:N ratio 20; run2, C:N ratio 25; run3, C:N ratio 30; run4, C:N ratio 35.

도움이 될 것으로 생각된다. 이 그림에서 관찰된 회분함량의 증가추세는 앞서 살핀 C:N비의 감소추세와 일치하는 것이었다. 다음 Fig. 4에서 볼 수 있는 것처럼 회귀식 이차항계수의 절대값과 최초C:N비 대 최종C:N로 비는 강한 음의 상관성을 보였다. ($r=-0.96932$, $p<0.05$)

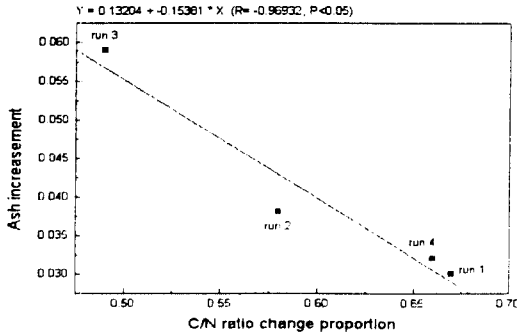


Fig. 4. The linear correlation between ash content increase and C:N ratio change proportion. Ash content increase is expressed by absolute value of quadratic effect coefficient in second order regression function, and C:N ratio change proportion is calculated by dividing initial C:N ratio by final C:N ratio.

3. 온도의 변화

퇴비화 반응이 진행되면 열이 발생하는데 이는 퇴비화 미생물이 유기물을 분해하면서 열을 방출하기 때문이다. 퇴비화가 진행되면서 초기에는 온도가 급격히 상승하다가 시간이 지남에 따라 서서히 하강하는데, 퇴비더미의 온도는 번식하는 미생물의 종류에 영향을 미친다. 이때 나타나는 온도를 그 범위에 따라 호열성 범위와 중온성 범위로 나눌 수 있다. 호열성 범위는 45~50°C 이상의 범위로서 퇴비더미의 온도가 이 범위에 있는 동안 대부분의 유기물들이 안정화되고 온도가 다시 중온성 온도로 떨어진다. 중온성 온도는 25°C~45°C 사이를 말하는데, 이 범위에서도 계속 유기물의 분해가 일어난다. 퇴비더미에 존재하는 유기물질들이 대부분 분해되면 온도가 대기의 온도에 접근하게 되며, 이를 퇴비화반응 종료 시점으로 보는 것이 일반적이다.

초기 C:N비를 다르게 했을 때 관찰된 온도의 변화 추이가 다음의 Fig. 4에 나타나 있다. 일반적으로 퇴비화 반응 초기에는 한동안 중온성 범위의 온도가 관찰되는데 이 실험에서는 그 시간이 매우 짧았고 급속하게 호열성 범위로 증가하였다. 이러한 온도의 급격한 증가는 돈분을 이용한 기계적 공기공급방식의 퇴비화 반응에서 전형적으로 관찰되는 반응이다.^{10,11)}

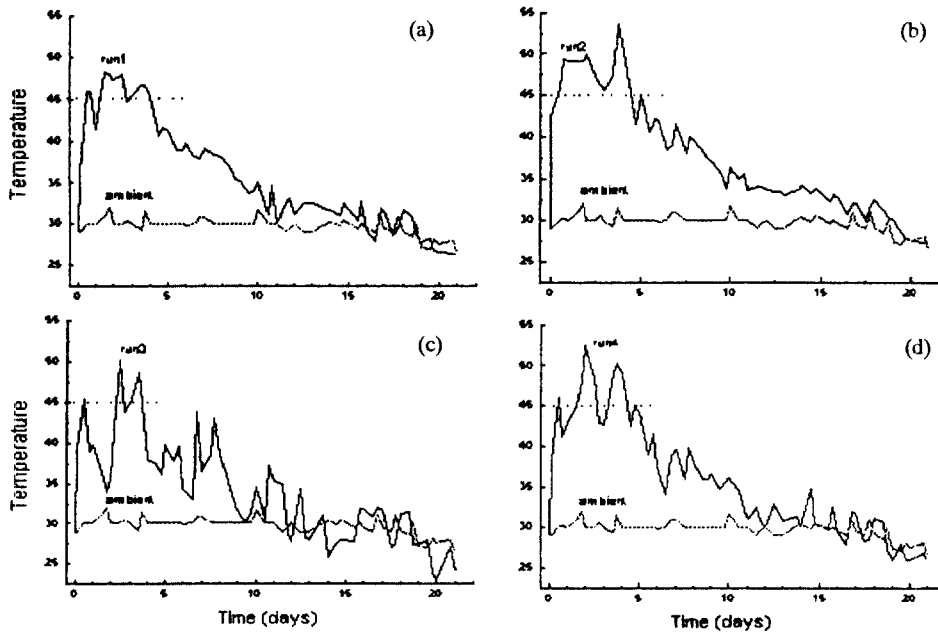


Fig. 5. Temperature trends of each composter by various initial C:N ratios. (a) initial C:N ratio 20, (b) initial C:N ratio 25, (c) initial C:N ratio 30, (d) initial C:N ratio 35

Fig. 5의 (a)는 초기 C:N비가 20인 퇴비화반응조의 온도 변화 추세를 나타낸 것이다. 반응 12 시간만에 호열성 범위의 온도에 도달하여 일시적으로 중온성 범위로 떨어지기도 하였으나 84 시간 동안 호열성 범위를 유지하며 유기물 분해를 계속하였다. 반응 시작 48시간만에 최고온도인 47.2°C에 도달하였고, 호열성 분해가 끝난 후 12일 정도 중온성 범위에서 머무르며 분해를 계속하다가 평균 실온인 30°C에 접근했다.

Fig. 5의 (b)는 초기 C:N비가 25인 퇴비화반응조의 온도 변화 추세를 나타낸 것이다. 반응 12시간만에 호열성 범위의 온도에 도달하여 일시적으로 중온성 범위로 떨어지기도 하였으나 108시간 동안 호열성 범위를 유지하며 유기물 분해를 계속하였다. 반응 시작 90시간만에 최고온도인 53.5°C에 도달하였고, 호열성 분해가 끝난 후 14일 정도 중온성 범위에서 머무르며 분해를 계속하다가 평균 실온인 30°C에 접근했다.

Fig. 5의 (c)는 초기 C:N비가 30인 퇴비화반응조의 온도 변화 추세를 나타낸 것이다. 다른 반응조와 마찬가지로 반응 12시간만에 호열성 범위의 온도에 도달하여 일시적으로 중온성 범위로 떨어지기도 하였으나 78시간 동안 호열성 범위를 유지하며 유기물 분해를 계속하였다. 반응 시작 60시간만에 최고온도인 50.2°C에 도달하였고, 호열성 분해가 끝난 후 10일 정도 중온성 범위에서 머무르며 분해를 계속하다가 평균 실온인 30°C에 접근했다. 이 반응조에서는 온도의 변화가 특히 급격하였고 반응 10일 경에 실온에 근사했다가 다시 중온성 범위에서의 유기물 분해가 계속되다가 반응 14일 경부터 실온에 접근한 것으로 관찰되었다. 네 개의 반응조 중에서도 특히 이 반응조에서의 수분 감소 정도가 가장 급속하여 간헐적으로 수분 함량을 재조정해 준 바, 수분의 재공급에 의한 미생물 활성도의 변화에 의해 반응조의 온도가 영향을 받아 급변한 것으로 보인다.

Fig. 5의 (d)는 초기 C:N비가 35인 퇴비화반응조

의 온도 변화 추세를 나타낸 것이다. 다른 반응조와 마찬가지로 반응 12시간만에 호열성 범위의 온도에 도달하여 일시적으로 중온성 범위로 떨어지기도 하였으나 112시간 동안 호열성 범위를 유지하며 유기물 분해를 계속하였다. 반응 시작 48시간만에 최고온도인 52.4°C에 도달하였고, 호열성 분해가 끝난 후 14일 정도 중온성 범위에서 머무르며 분해를 계속하다가 평균 실온인 30°C에 접근했다.

4. 퇴비의 질-중금속 함량과 비효성

퇴비의 품질을 평가하는데 있어서 유의할 항목은 공중보건학적 안전성과 비효성이다. 공중보건적 측면에서 관심이 되는 것은 퇴비내의 병원성 세균문제와 중금속 함량, 그리고 악취문제를 들 수 있다. 이 중에서 중금속은 미량으로 존재하더라도 토양이나 토양 생산물에 축적하여 문제가 될 수 있다.

이 실험에서 생산된 퇴비에 함유된 중금속의 함량이 Table 4에 제시되어 있다. 이를 Table 5에 정리된 한국과 유럽각국들의 퇴비 중 중금속 기준치¹²⁾와 비교해보면 세 중금속 모두가 가장 엄격한 기준치에도 미치지 못한다는 것을 알 수 있다. 검사한 중금속 중 유해성이 큰 것으로 알려진 Cd과 Pb는 모두 기준치를 크게 밑돌아 적어도 이 두 가지 항목에 있어서 는 퇴비로서 안전함을 확인할 수 있다.

퇴비의 비효성은 유기성 폐기물이 갖고 있는 비료

Table 4. Heavy metal contents of the final compost materials (mg/kg)

Run	Heavy metal		
	Cd	Cu	Pb
Run 1	0.42	149.70	237.55
Run 2	ND	47.30	62.48
Run 3	ND	16.16	204.13
Run 4	0.21	126.67	134.92

Table 5. Maximum pollutant limits of compost in Korea and Europe

	(unit : mg/kg)								
	Korea	Germany	Holland	Denmark	Finland	Sweden	France	Swiss	Scotland
Pb		800-1200	500	2200	1200	300	1000	1000	1500
Cu		1200	600	700	3000	3000	1500	1000	1500
Zn		3000	2000	6000	5000	10000	3000	3000	2500
Cd	5	30	10	30	30	15	15	30	20
Hg	2	25	10	-	25	8	8	10	7.5
Ni		200	100	-	-	500	-	200	600
Cr	50	1200	500	500	1000	1000	2000	1000	2000
As	50								

성분을 소실하지 않고 유지한다는 측면과, 유기성 폐기물이 그대로 방출되었을 때 환경에 미칠 수 있는 오염을 저감한다는 면에서 고려되어야 한다. 우리나라 농림수산부 비료공정규격을 보면 보통비료 중 유기질 비료의 경우 질소, 인산, 칼륨의 총합량이 건조중량 기준으로 5~20%가 되어야 하나 이 기준을 만족하는 퇴비는 없다.¹³⁾

이 실험에서 생산된 퇴비의 비료성분 함량이 Table 6에 있다. 질소(N)의 경우 거의 대부분이 Higgins의 퇴비성분 분류기준⁸⁾ 중 중급비료(15~30 mg/g)에 속했으며 4번 반응조에서 생산된 퇴비만이 하급(1~15 mg/g)에 속했다. 인(P)은 1번 반응조에서 생산된 퇴비가 Higgins의 퇴비성분 분류기준 중 중급(10~20 mg/g)에 속했으며 나머지 세 반응조에서 생산된 퇴비는 모두 하급(5~10 mg/g)에 속했다. 비료의 주요 성분이라고 할 수 있는 질소와 인 함량이 그리 높은 편은 아니지만 일정 정도의 비효성을 가지고 있다고 평가된다. run 1로부터 run 4로 갈수록 퇴비 중 질소와 인의 함량이 낮아지는 것은, 질소와 인의 주요 원천인 돈분의 상대적 함유량이 같은 방향으로 낮아지는데 기인한 것으로, 초기에 함유되어있던 질소와 인의 양에 영향을 받은 것으로 보인다.

5. 충전재의 생분해도와 최적 C:N비

리그닌은 목재의 주요성분으로 phenylpropane 단위로 된 방향족 고분자물질이며 목재의 20-30%를 차지하고 있다. 리그닌은 미생물학적으로 분해가 잘 되지 않는 특성을 가지고 있는데, 이런 것으로는 리그닌 이외에도 셀룰로스(cellulose)와 헤미셀룰로스(hemicellulose)가 있으며, 이 둘은 다당류이다.¹⁴⁾

Table 6. Contents of N and P in the final compost materials

N*				P**			
Run 1	Run 2	Run 3	Run 4	Run 1	Run 2	Run 3	Run 4
2.27	2.17	1.84	1.11	10.70	9.88	9.75	8.40

*%, dry weight base
** mg/g, dry weight base

위의 세가지를 모두 포함하는 것이 조섬유소(crude fiber)이며, 이를 유기물질 중 쉽게 분해가 되지 않는 부분으로 본다.

다음의 Table 7은 본 실험에서 사용된 시료인 돈분과 신문지를 비롯하여, 퇴비화에 흔히 사용되는 충진물질인 톱밥과 볏짚, 그리고 생분해성 유기물질의 한예로 백미의 조섬유소 함량을 정리한 것이다.¹⁵⁾

돈분, 톱밥, 볏짚, 신문지 및 백미 중 함유되어 있는 난분해성 탄소원의 함량을 살펴보기 위하여 조섬유소 함량을 보았을 때, 신문지, 톱밥, 볏짚, 돈분, 백미의 순서로 많은 양의 조섬유소를 함유하고 있었다. 신문지와 톱밥은 거의 비슷한 양의 조섬유소를 함유하고 있고, 볏짚은 신문지 및 톱밥의 절반 정도에 해당하는 조섬유소를 포함하고 있다. 백미는 돈분보다 적은 양의 조섬유소를 함유하고 있어 생분해도가 매우 우수한 물질이라고 볼 수 있다. 신 등³⁾은 생분해성 탄소원인 쌀밥을 퇴비화반응 충진재로 사용하여 C:N비 20.9에서 퇴비화반응의 활성화와 암모니아 가스 발생의 감소효과를 거둔 바 있다.

한편 충진재로 신문지를 사용한 본 실험에서 최적의 효율을 보인 초기 C:N비가 30이었고, 톱밥을 충진재로 사용하는 일반적인 퇴비화반응에서 최적의 효율을 보이는 초기 C:N비가 25~30 사이인 것으로 보고되고 있다. 신 등의 연구³⁾에서 생분해성 탄소원인 쌀밥을 충진재로 사용하여 음식물 쓰레기를 퇴비화한 연구에서는 초기 C:N비를 30으로 조절하여 퇴비화하였을 때 오히려 반응이 저해된 점을 고려하면, 충전재의 생분해도가 최적 퇴비화 효율을 나타내는 초기 C:N비 결정에 있어서 고려되어야 하는 인자임을 알 수 있다.

이런 경향성은 호기적 퇴비화 뿐 아니라 혐기성 분해를 통한 유기성 폐기물의 처리에서도 마찬가지로 보고된다. 혐기조건에서 유기성 폐기물을 처리하는 경우 생물학적으로 분해가능한 부분이 리그닌 함량에 의해 경험적으로 표현될 수 있다는 연구¹⁶⁾도 보고된 바 있다. 호기성 퇴비화의 경우를 혐기성 분해반응과 동일하게 취급할 수는 없으나, 미생물의 분해반응인 퇴비화반응에 있어서 퇴비화원료 중 생물학적으로 분해가능한 부분이 얼마나 되는가는 매우 중요하다.

Table 7. Crude fiber contents of the organic materials used for composting(%)

	Swine feces	Sawdust	Rice straw	Newspaper	Rice
Crude fiber	9.01	58.04	29.06	58.53	1.02

IV. 요약과 결론

돈분의 퇴비화에서 충전재로 신문지를 사용할 때, 이 물질들의 최적 배합비를 찾기 위해, 앞서 수행된 실험에서 밝혀진 최적의 공기공급량과 기존의 문헌에서 보고된 수분함량 조건에서 초기 C:N비를 다르게 한 네 개의 반응조에서 각각 돈분과 신문지를 적절한 배합비로 혼합하여 1996년 8월 4일부터 1996년 8월 20일까지 약 3주간 퇴비화반응을 시켰다. 각 반응조의 퇴비화 효율과 생산된 퇴비의 안전성 및 비효성을 평가한 결과 다음과 같은 결과를 얻었다.

1. 퇴비화 반응이 진행되면서 C:N비는 감소하였는데 C:N비의 감소정도는 run 3(초기C:N비 30), run 2(초기C:N비 25), run 4(초기C:N비 35), run 1(초기C:N비 20) 순으로 컸던 것으로 관찰되었으나 run 4와 run 1의 차이는 매우 작았다(< 1%). 최종 C:N비를 최초 C:N비로 나눈 값은 모두 0.75 이하로 나와 모든 반응조에서 퇴비화가 완료되었음을 확인할 수 있었다.

2. 퇴비화가 진행됨에 따라 회분함량은 이차회귀 방정식에 근사하게 증가하였다. 본 연구에서 퇴비화 반응의 지표로 사용한 이차함수의 이차항계수의 절대값은, 초기 C:N비를 각각 20, 25, 30, 35로 했을 때 각각 0.030, 0.038, 0.059, 0.032의 값을 보였다. 이 결과를 보면 초기 C:N비가 30일 때 퇴비화반응에서 관찰된 이차항계수의 값이 가장 높게 보였다. 여기서 관찰된 회분함량의 증가추세는 앞서 살핀 C:N비의 감소추세와 일치하는 것이었다. ($r=-0.96932$, $p<0.05$)

3. 반응이 진행되면서 온도는 초기에 호열성 범위로 상승했다가 점차 외기온도에 가깝게 접근했는데 반응조간의 뚜렷한 차이는 관찰되지 않았다. 반응 시작 12시간만에 호열성 범위로 상승하여 48-108 시간 동안 이 범위가 지속되었다. 각 반응조에서 도달한 최고온도는 47.2~53.5°C였으며 큰 차이는 없었다.

4. 반응에서 생산된 퇴비의 중금속 중 Cd, Pb, Cu는 한국과 유럽 여러 나라의 기준 중 가장 엄격한 기준치보다도 낮았다.

5. 생산된 퇴비 중에 포함되어 있는 비료성분의 함량을 보았을 때, 건조 중량 기준으로 질소 1.11~2.27%이었고, 인 8.40~10.70 mg/kg이었다.

6. 충전재의 종류에 무관하게 제시되어온 최적 초기 C:N비는 재고되어야 할 것으로 보이며, 충전재의

생분해도는 최적 퇴비화 효율을 위한 초기 C:N비를 결정하는데 있어서 고려되어야 한다.

감사의 글

동 학회지 제22권 제2호 pp.58~68에 게재된 '돈분과 폐지류의 혼합물 퇴비화에 있어서 공기공급량이 퇴비화효율에 미치는 영향'과 이 논문은 1995년도 한국학술진흥재단의 공모과제 연구비에 의하여 연구되었으며 깊은 감사를 드립니다.

참고문헌

- 1) C. Polprasert : Organic Waste Recycling, John Wiley & Sons, 63-104, 1989.
- 2) R. Rynk, et al. : On-Farm Composting Handbook, Northeast Regional Agricultural Engineering Service-54, 6-23, 1992.
- 3) 신항식 외 : 음식쓰레기 퇴비화시 bulking agent의 적정 첨가량 결정에 관한 연구, 유기성폐기물자원화, 2(1), 75-86, 1994.
- 4) 농업기술연구소 : 토양화학분석법-토양, 식물체, 토양 미생물-. 농촌진흥청, 26-29, 1988.
- 5) 환경처 고시 제91-85호 : 수질오염, 폐기물 공정시험 방법, 동화기술, 1993.
- 6) 환경부 : 전국 폐기물 발생 및 처리현황, 환경부, 1996.
- 7) G. Anderson and K. Smith: Mixed paper teams up with biosolids, BioCycle, March, 61, 1994.
- 8) 노재성 외 : 무기계 고품폐기물을 수분조절재와 탄소공급원으로 한 축분의 퇴비화에 관한 연구, 한국폐기물학회지, 11(3), 388-397, 1994.
- 9) B. Godden and M. Penninckx : Agricultural Wastes, 15, 169-178, 1986.
- 10) 최경호 외 : 톱밥, 볏짚, 왕겨 및 신문지를 이용한 돈분의 퇴비화, 한국환경위생학회지, 21(1), 56-67, 1995.
- 11) 정문식 외 : 돈분과 폐지류의 혼합물 퇴비화에 있어서 공기공급량이 퇴비화 효율에 미치는 영향, 한국환경위생학회지, 22(2), 58-68, 1996.
- 12) 장기운, 임재신 : 유기성 폐자원을 이용한 퇴비제품화 요건, 유기성폐기물자원화, 2(1), 121-124, 1994.
- 13) 남궁완, 최정영 : 유기성폐기물 자원화기술, 한국유기성폐기물자원회협회지학회지, 1(1), 41, 1993.
- 14) 박상진 외 (공역) : 일본목재학회編 : 목재과학실험서, 광일문화사, 제1판, 서울, 473-481, 1994.
- 15) 강면희 외 : 신고 가축사양학, 초판, 향문사, 286-311, 1979.
- 16) J. Chandler, et al. : Predicting methane fermentation biodegradability, Biotechnology and Bioengineering Symposium, 10, 93-107, 1980.