

돈분과 폐지류의 혼합물 퇴비화에 있어서 공기공급량이 퇴비화 효율에 미치는 영향

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

Effect of Aeration Rate on Composting of Mixture of Swine Feces and Newspaper

Moon-Shik Zong, Seok-Hwan Park*, Kyung-Ho Choi, Won-Ho Yang,
Ju-Won Kang, 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 evaluate the effect of aeration rate on composting of mixture of swine feces and newspaper. This study was accomplished by operating 4 experimental composting reactors of bench scale for 3 weeks.

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

1. As the aeration rate increased from 200 to 500 ml/min · kg_{vs}, the efficiency of composting was increased. But the aeration rate more than 500 ml/min · kg_{vs} did not influence effectively.
2. The range of the highest temperatures of reactors was 51.8~55°C. Those were not significantly different one another.
3. Increasing rates of ash content namely, reaction rates of composting were proportionally increased by increasing aeration rate from 200 to 1500 ml/min · kg_{vs}.
4. Contents of heavy metal in the final compost were lower than those of Korean and European standards.
5. Concentration range of T-N in the final composts was 1.71~2.18 mg/kg, and that of T-P was 1.57~7.49 mg/kg.

Keywords : composting, swine feces, newspaper, aeration, effect

I. 서 론

현재 우리나라에서는 축산농가의 영세성 등을 감안하여 축산분뇨 정화시설의 설치자금을 지원하고, 설치 및 유지관리가 용이한 톱밥을 이용한 퇴비화 방법 등을 보급하고 있으며, 또한 신고대상이하의 소규모 축산농가에서 배출되는 축산폐수를 공동으로 처리할 수 있도록 1991년부터 국고지원사업으로 축산폐수처리시설 설치사업을 추진하여 1994년 말 현재 3개의 시설이 가동되고 있으며, 1997년까지 총 83개소를 설치할 계획이다.¹⁾

퇴비화를 올바르게 진행시키기 위해서는 몇 가지 운영 인자(operating parameter)가 충족되어야 한

다. 즉, C/N 비, 공기공급량, 수분함량, 퇴비원료 혼합물의 통기성 및 구조유지성 등이 그것인데, 이들 인자들의 적정값들은 이미 제안되고 있고 계속 연구가 진행 중에 있다. 이 중 우리의 관심을 끄는 항목은 C/N 비와 공기공급량이다. C/N 비란 퇴비화 대상 물질의 탄소와 질소의 원소함량의 비(比: ratio)이다. 분뇨를 포함하여 많은 물질들의 C/N 비는 미생물의 균형 있는 영양소로서는 부적당하게 되어 있기 때문에 이 비를 적당한 수준으로 맞추어줄 필요가 있다. C/N 비가 20보다 적어지면 질소성분의 안정화 없이 유용 가능한 탄소의 소모가 일어나 결과적으로 암모니아 또는 질산화물(nitrous oxide)이 발생하면서 악취가 발생한다. 한편, C/N 비가 40 이

상인 경우 미생물들이 과잉의 탄소를 소모시키는데 시간이 더 필요하기 때문에 퇴비화 진행시간이 지체되는 현상이 일어난다. 그래서 C/N 비는 20~40사이의 값이 추천되고 있으며, 25~30 사이의 값이 이상적이다.²⁾ 이렇게 C/N 비를 맞추어 주기 위해 보통 충전재(bulking agent)로서 톱밥, 왕겨, 볏짚 등을 많이 사용하고 있다. 그러나 상기 충전재들은 그 수요가 퇴비화 이외에도 많고, 운송, 저장 등의 문제가 현장 적용시에 발생한다. 한편, 날로 증대되고 있는 종이류 폐기물 중 큰 비중을 차지하는 신문지는 저렴한 가격에, 어디서나 구하기 쉽고, 높은 C/N 비, 뛰어난 수분흡수력 등을 지니고 있어 충전재로서의 가치를 지니고 있다고 할 수 있다.

한편 지류(紙類)의 생산 및 사용량의 증가로 고지(古紙)의 발생량도 증가하고 있으며, 전체 지류 생산의 70%가 고지에 의존하고 있기 때문에 고지의 사용량은 증대되고 있다.³⁾ 그러나 우리나라의 고지 회수율이 점차 개선되고 있기는 하나 아직도 약 50%에 머물고 있는 실정이다. 종이류 폐기물을 퇴비화에 이용한다면 회수되지 않고 있는 고지를 이용할 수도 있다는 점에서 긍정적이라고 할 수 있다.

실제로 최경호 등은 톱밥, 볏짚, 왕겨 및 신문지를 충전재(bulking agent)로 사용하였을 때의 퇴비화 효율을 실험적으로 보여 주었다.⁴⁾ 퇴비화 반응조에 돈분(豚糞)과 각 충전재를 C/N 비와 수분함량을 일정하게 맞추어 주고 퇴비화를 진행시켰을 때의 온도 변화와 회분함량의 변화 및 C/N 비 등을 관찰항목으로 한 실험의 결과는 신문지를 퇴비화 충전재로 사용하는 경우, 다른 충전재에 비해 그 효율이 크게 떨어지지 않음을 확인할 수 있었다.

또한 NRAE의 문헌에는 신문지가 다음과 같은 특징을 지니고 있다고 했다.²⁾ 즉, 신문지는 저렴하고, 탄소함량이 많고, 분해성(degradability)은 중간 정도이

며, 수분흡수성은 좋으나 구조유지성과 공극 확보성(porosity)은 떨어지며, 검은 잉크는 일반적으로 비독성(non-toxic)이나 칼라잉크와 코팅 종이를 많이 사용하면 중금속이나 다른 오염물질에 오염될 가능성이 있으며, 혼합물의 구조(structure)에 따라서 충전재로 적당히 넣어주는 것이 좋은 것으로 알려져 있다.

이상과 같은 사실에 바탕을 두고, 본 실험에서는 종이류 폐기물의 상당부분을 차지하고 있는 신문지를 돈분의 퇴비화 충전재로 사용할 때의 효율 및 이때의 적정 운영 조건을 찾고자 한다. 즉, 신문지를 썼을 때의 적정 공기공급량 및 최적의 혼합비(C/N 비) 등을 결정하는 것이다. 최근 들어 C/N 비의 역할을 충전재의 첨가율을 간접적으로 나타내는 지표로 국한하고, 생분해성 C/N 비와는 구별해야 한다는 연구결과가 많이 나오고 있다. 즉, 충전재가 퇴비화 과정 중 탄소원을 공급하는 역할보다는 통기성^{5),6)}을 향상시키는 역할을 담당하는 경향이 크며, 충전재의 생분해성이 각각 달라 지금까지 사용해 왔던 절대적인 탄소량(총탄소량)을 감안해 결정한 C/N 비는 미생물에게 이용될 수 있는 탄소량을 적절히 반영해 주지 못한다는 것이다.⁷⁾

본 논문에서는 최종적인 최적 배합비를 결정하기에 앞서, 우선적으로 돈분과 신문지의 퇴비화에 있어서 최적의 통기성을 결정하기 위한 실험을 수행한 결과를 보고하고자 한다.

II. 실험재료 및 방법

1. 실험재료 및 기구

돈분과 신문지를 퇴비화하는데 가장 적당한 공기공급량을 찾기 위해, 기존의 문헌에서 최적이라 알려진 C/N비(total C percentage over Kjeldahl nitrogen percentage)와 수분함량 등을 찾아 조건을

Table 1. Physicochemical properties of swine feces and newspaper

| | Swine feces | Newspaper |
|----------------------|-------------|------------|
| pH | 6.94 | 7.83 |
| Moisture contents(%) | 71.10 | 6.94 |
| Ash contents(%) | 18.03 | 4.37 |
| Volatile solids(%) | 82.0 | 95.7 |
| Bulk density(g/l) | 840.0 | 66.0 |
| Carbon(%) | 45.54 | 53.13 |
| Nitrogen(%) | 3.83 | 0.11 |
| C/N ratio | 11.89 : 1 | 501.23 : 1 |

동일하게 맞춰주고 공기공급량을 다르게 하여 퇴비화를 진행시킬 때 가장 높은 효율을 보인 공기공급량을 찾기 위기 위해 다음과 같은 재료 및 기구로 실험을 수행하였다.

1) 실험재료

이 실험에서 퇴비화 대상 물질로 사용한 돈분은 서울대학교 농업생명과학대학의 부속목장 돈사에서 신선분(新鮮糞) 상태로 채취하였고 신문지는 서울대학교 보건대학원에서 배출된 일간지를 취해 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.

반응조 하부의 공기실 바닥에도 같은 크기의 구멍을 뚫어 공기를 유입시켰는데, 이때 반응조로 들어오는 공기를 유입시키기 전에 적절히 가온하여, 유입되는 공기온도에 의해 반응조의 퇴비화 반응이 영향을 받지 않도록 조절하였다.

공기 유출부와 유량조절계 사이에 수분제거장치를 설치하여, 혹시 있을 지도 모를 수분에 의한 유량조절계에의 방해작용을 방지했다.

2. 실험방법

퇴비화에는 여러 환경조건들이 작용한다. 가장 중요한 조건인 수분함량과 C/N비를 최적의 범위로 조절하기 위하여 적절한 배합비로 퇴비 원료물질들을 혼합했다. 퇴비화에 최적인 범위는 C/N비 25~30, 수분함량 50~60 %, pH 6.5~8.5로 알려져 있다.²⁾ Table 2에 퇴비화반응에 좋은 조건들이 정리되어 있다.

본 실험은 종이류 폐기물을 이용한 돈분의 퇴비화에 있어서 적정 공기공급량을 알아보기 위한 실험이다. 따라서 공기공급량 이외의 다른 조건들은 퇴비화에 최적인 조건으로 유지시킨 상태에서 본 실험을 수행했다.

C/N비가 대략 30이 되도록 퇴비화를 위한 돈분과 신문지의 배합비를 결정하였으며 적정 수분함량이 55 %에 이르도록 하기 위하여 필요할 경우 수분을 조절하였다. 어느 정도의 공기량에서 퇴비화 효율이 가장 우수한가를 알아보기 위해 각 반응조마다 공급하는 공기량을 다르게 조절했다.

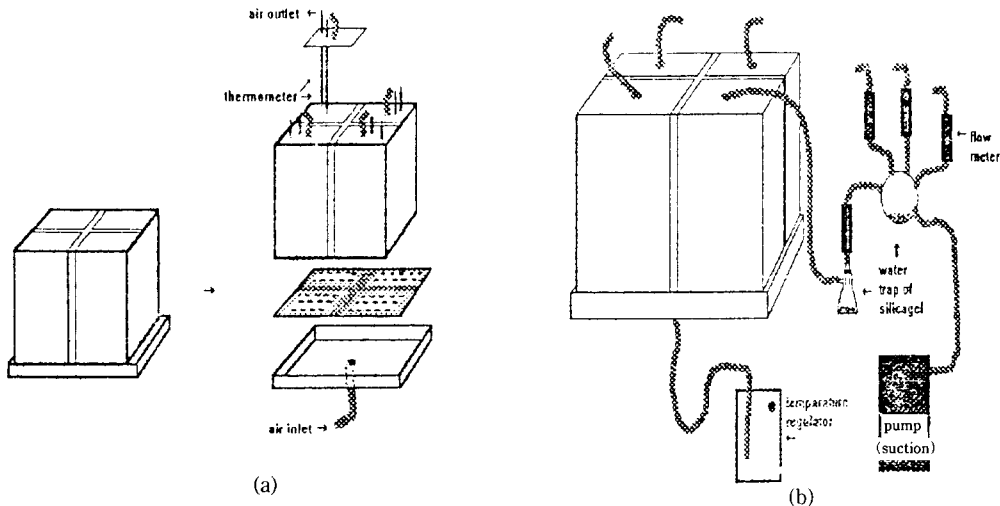


Fig. 1. The experimental setup of composting reactor.

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

Table 2. Recommended conditions for rapid composting

| Condition | Reasonable range ^a | Preferred range |
|-----------------------|-------------------------------|-----------------------|
| C/N ratio | 20:1~40:1 | 25:1~30:1 |
| Moisture content | 40~65% | 50~60% |
| Oxygen concentrations | Greater than 5% | Much greater than 5% |
| Particle size(cm) | 0.32~1.27 | Variable ^b |
| pH | 5.5~9.0 | 6.5~8.0 |
| Temperature(°C) | 43~66 | 54~60 |

^a These recommendations are for rapid composting. Conditions outside these ranges can also yield successful results.

^b Depends on the specific materials, pile size, and/or weather conditions.

Table 3. Experimental conditions of each run

| Condition Run | Aeration rate(ml/min · kg_vS) | Moisture content(%) | C/N ratio | Initial pH |
|------------------|-------------------------------|---------------------|-----------|------------|
| 1 | 200 | 53.75 | 32.09 | 7.31 |
| 2 | 500 | 54.23 | 30.42 | 7.49 |
| 3 | 1000 | 54.77 | 31.20 | 7.84 |
| 4 | 1500 | 51.92 | 29.11 | 7.76 |

소량의 부식토를 식중(seeding)하고 균질하게 혼합한 후 4등분하여 각각 퇴비화 반응조에 넣었다. 각 반응조에 투입된 퇴비 원료물질의 양은 1.5 kg이고 부피는 8.1 l였다.

아래의 Table 3은 본 실험의 조건을 나타낸다.

각 반응조마다 정해진 유량의 공기를 공급하면서 온도, 회분함량, 수분함량을 측정하였으며 최초의 퇴비화 원료와 최종부산물의 C/N 비와 TP 함량을 조사하였다. 매일 아침 9시 1회씩 퇴비더미를 뒤집어 주어 퇴비 더미에 공기공급이 균등하게 이루어지도록 하였다.

다른 조건들은 동일하게 조정하고 공기공급량을만 다르게 하여 1996년 1월 18일부터 1996년 2월 8일까지 3주간 퇴비화반응 실험을 수행하였다.

정확한 유량이 공급되도록 하기 위해 수시로 bubble meter를 이용한 calibration을 통해 유입되는 공기량을 확인 보정하였다.

3. 분석방법

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

이 실험에서 측정, 분석한 항목은 각각의 반응

조 온도, 회분함량, 수분함량, TKN, TP, C/N비, 중금속함량 등이고 퇴비화반응 전의 시료와 반응의 결과로 만들어진 퇴비에 대해서는 중금속함량, TKN, 회분함량, TP 함량, 수분함량, 밀도 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 고온부위를 반영하는 곳과 상대적으로 낮은 온도부위를 반영하는 부위 등 모두 두 곳으로 정했고 퇴비화 반응 전기간에 걸쳐 같은 위치에서 측정되었다.

② pH : 토양화학공정시험법⁹⁾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 이용해 측정하였다.

③ 회분함량 : 폐기물공정시험법⁹⁾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.¹⁰⁾

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

⑥ TKN (Total Kjeldahl Nitrogen) : H_2SO_4 , H_2O_2 를 이용하여 전처리한 시료를 semi-micro kjeldahl method에 따라 측정했다.

⑦ TP(Total Phosphorus) : H_2SO_4 , H_2O_2 와 HNO_3 를 이용하여 전처리한 시료를 ascorbic acid method에 따라 880 nm 파장에서 비색정량하였다.

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

2) 결과분석 및 통계처리

이 연구에서 측정된 실험결과는 SAS 6.03 및 Origin 3.0을 이용하여 퇴비화 효율을 계산하고 통계처리를 수행하였다.

III. 실험결과 및 고찰

이 연구는 돈분을 퇴비화하는데 충전재로 신문지를 사용했을 때 최적의 공기공급량은 어느 수준인지를 파악하려는 목적을 가지고 수행되었다. 공기공급량 이외의 다른 환경을 모두 동일하게 한 4개의 퇴비화반응조를 이용하여 3주 동안 퇴비화시킨 다음, 각 반응조의 퇴비화 효율과 최종 퇴비의 안전성을 평가하였다.

호기성퇴비화 공정에서 적절한 수준의 공기를 공급하는 것은 매우 중요하다. 호기성퇴비화 공정에는 호기성 세균들이 유기성 폐기물을 안정화시키도록 하기 위해 적절한 양의 산소를 공급해 주어야 하는 것이다. 퇴비화물질에 산소를 공급해주어야 하는 목적은 (1)

유기성물질의 분해를 위한 산소요구량 때문이고, (2) 수분이 많은 기질로부터 수분을 제거하여 건조한 상태로 만들기 위한 목적 때문이며, (3) 유기물의 분해 과정에서 생긴 과도한 열을 제거하여 이후의 분해과정에 적합한 온도를 확보하도록 하기 위함이다.¹¹⁾ 그런데 너무 과도한 공기가 공급되면 퇴비더미로부터의 열손실이 커질 수도 있고 비용(費用)이 올라가므로 바람직하지 않으며, 반대로 너무 적은 공기를 공급하면 퇴비더미 내부에서 혐기성 반응이 일어나게 되므로 좋지 않다. 따라서 적절한 수준의 공기공급량을 결정하여 공급하는 것이 좋다.

농촌지역에서 배출되는 유기성 물질을 퇴비화하는데 있어서 적용할 수 있는 퇴비화완성도 지표에 대한 연구는 그 동안 많이 진행되었다. Godden 등은 우분(牛糞)을 퇴비화할 때 퇴비의 완성도를 측정할 수 있는 생물학적 화학적 지표 결정에 대한 연구를 통해, C/N비, 회분 함량, 그리고 alkaline phosphatase 활성을 유용한 지표로 언급하였다.¹²⁾

본 연구에서 퇴비화효율을 측정하기 위해 사용한 지표는 (1) C/N비의 변화, (2) 퇴비층의 온도변화, (3) 회분함량 변화였으며, 아울러 생산된 최종퇴비

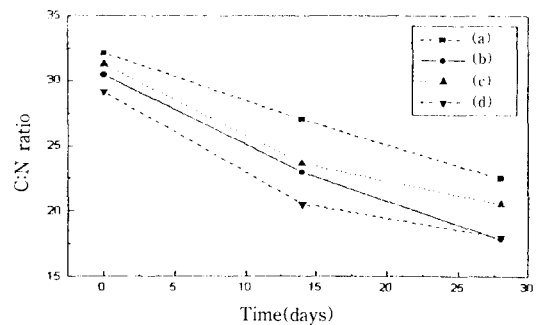


Fig. 2. C/N ratio trends of each composter by various aeration rate.

(a) 200 ml/min · kg_vs, (b) 500 ml/min · kg_vs, (c) 1000 ml/min · kg_vs (d) 1500 ml/min · kg_vs.

Table 4. Evolution of C/N ratios depending on various aeration rates

| Run | Aeration rate (ml/min · kg_vs) | Composting days(week) | | | Final : Initial |
|-----|-----------------------------------|-----------------------|---------|-------|-----------------|
| | | Initial | 2 weeks | Final | |
| 1 | 200 | 32.09 | 26.97 | 22.47 | 0.70 |
| 2 | 500 | 30.42 | 22.97 | 17.87 | 0.58 |
| 3 | 1000 | 31.20 | 23.63 | 18.98 | 0.61 |
| 4 | 1500 | 29.11 | 20.54 | 18.00 | 0.62 |

의 안전성과 비료로서의 가치를 평가하기 위해 퇴비의 중금속 함량과 비효성을 파악하였다.

1. C/N비의 변화

퇴비화 반응이 일어남에 따라 C/N비는 감소한다. 일반적으로 퇴비화하는 물질의 종류에 따라 차이가 있지만 최종 C/N비를 최초 C/N비로 나눈 값이 0.75 정도가 되면 퇴비화가 완료되었다고 판단한다.¹⁰⁾

Fig. 2와 Table 4는 공급한 공기량의 차이에 따른 C/N비의 변화추이를 나타낸 것이다.

각 반응조에서 최종 C/N비를 최초 C/N비로 나눈 값은 공기공급량이 500, 1000, 1500, 200 ml/min · kg_{vs}의 순으로 좋은 효율을 보여 각각 0.58, 0.61, 0.62, 0.70의 값을 가졌다. 또한 모든 값이 0.75 이하이므로 전 반응조에서 퇴비화가 완료되었다는 것을 알 수 있다.

공기공급량을 200 ml/min · kg_{vs}으로 조정된 1번 반응기를 제외하고 나머지 2~4번 반응기는 거의 비슷한 최종:최초비를 보였다. 즉 200 ml/min · kg_{vs}의 유속으로 공기를 공급해 준 퇴비화 반응조에서도 최종:최초비가 0.70으로서 퇴비화반응이 완료되었다고 판단할 수 있으나, 각각 500, 1000, 1500 ml/min · kg_{vs}의 유속으로 공기를 공급한 나머지 퇴비화 반응조의 C/N비 감소 정도와 비교해 볼 때, 이 값은 상당한 차이

를 보였다. 각각 500, 1000, 1500 ml/min · kg_{vs}의 유속으로 공기를 공급한 반응조에서의 퇴비화 효율은 서로 큰 차이를 보이지는 않았다. 즉 500 ml/min · kg_{vs} 이상의 유속에서 공기공급량은 퇴비화 효율에 큰 영향을 미치지 않으며, 이보다 적은 유속에서는 유속이 증가할수록 퇴비화 효율이 상승하는 것으로 나타났다.

2. 온도의 변화

온도는 퇴비화 반응의 진행양상을 파악하고 퇴비생산이 완료되는 시점을 파악할 수 있는 지표 중 매우 간단하며 중요한 것이다. 퇴비화가 진행되면서 열이 발생하여 퇴비더미의 온도가 상승하는데 그 이유는 퇴비화미생물이 유기물을 분해하면서 열을 방출하기 때문이다.

퇴비화가 진행됨에 따라 초기에는 온도가 급격히 상승하다가 시간이 지나고 분해시킬 유기물의 양이 감소함에 따라 온도는 서서히 하강하여 실온에 가까워지는데, 공기를 공급해도 실온에 근사하게 접근하면 퇴비화반응이 완료되었다고 보는 것이 일반적이다.

퇴비더미의 온도에 따라 퇴비더미에서 유기물의 분해에 관여하는 미생물의 종류도 달라지는데, 나타나는 온도를 기준으로 구분하면 25~45°C를 중온성 범위, 그 이상을 호열성 범위라고 한다. 퇴비화 반응

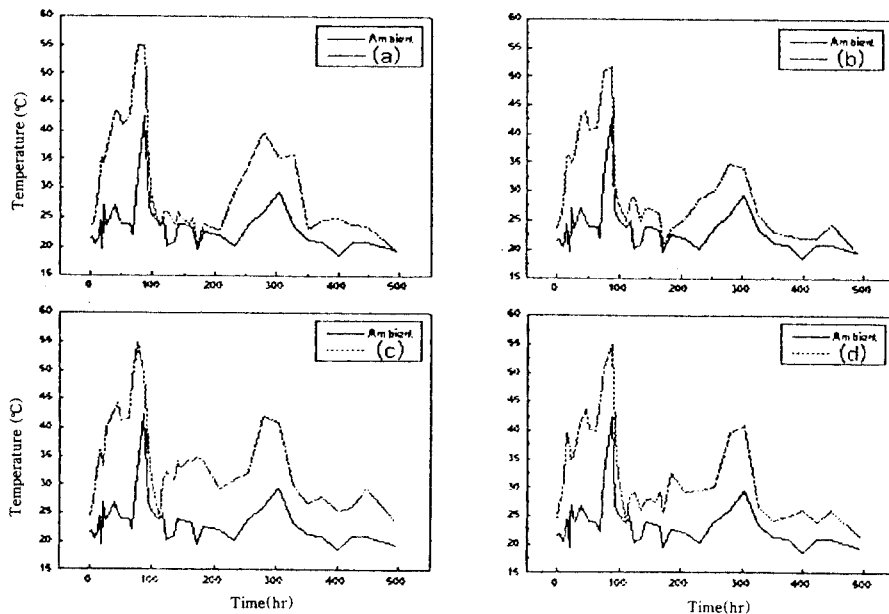


Fig. 3. Temperature trends of each composter by various aeration rate.

(a) 200 ml/min · kg_{vs}, (b) 500 ml/min · kg_{vs}, (c) 1000 ml/min · kg_{vs} (d) 1500 ml/min · kg_{vs}.

이 시작되면 제일 먼저 중온성 범위의 온도가 나타나고, 이어서 온도가 급격히 상승하여 50°C 이상에 이르는 호열성 범위가 나타난다. 이 단계에서 대부분의 유기물질들이 분해되어 안정화된다. 대부분의 유기물질들이 안정화되면 온도가 다시 중온성 범위의 온도로 떨어져 나머지 유기물질들의 분해가 계속되다가 분해가 거의 종료되면 최종적으로는 실온과 비슷한 온도가 유지된다.

공기공급량을 다르게 했을 때 관찰된 온도의 변화 추이가 Fig. 3에 나타나 있다. 퇴비화반응의 전형적인 온도 변화 양상에 의하면 반응 초기에 일정 시간 동안은 중온성 범위가 나타나는 것으로 되어 있으며 시간이 지남에 따라 호열성 범위의 온도가 나타난다. 이 실험에서는 반응 시작 69 시간만에 호열성 범위 온도에 도달하여 18시간 동안 호열성 범위의 온도가 지속되다가 중온성 범위의 온도를 나타냈다. Fig. 3의 (a)에서 보는 바와 같이 200 ml/min · kg_{vs}

의 공기를 공급한 경우 반응시작 69시간만에 호열성 온도 범위에 도달하여 18시간 동안 호열성 미생물에 의한 유기물 분해가 계속되었다. 이 때 도달한 최고 온도는 55°C였고 최고온도는 12시간 동안 지속되었다. 이후 중온성 범위에 도달하였다가 한 때 약간 온도가 증가하는 경향을 보였으나 점차 실온에 가깝게 접근하였다.

Fig. 3의 (b)는 500 ml/min · kg_{vs}의 공기를 공급한 경우이다. 반응 시작 69시간만에 호열성 온도 범위에 도달하여 18시간 동안 이 온도 범위를 유지하였다. 여기서 도달한 최고온도는 51.8°C로서 (a)의 경우보다는 약간 낮았다.

Fig. 3(c)와 (d)는 1000 ml/min.kg_{vs}와 1500 ml/min · kg_{vs}의 공기를 공급한 경우이다. 반응 시작 69시간만에 호열성 온도 범위에 도달하여 18시간 동안 이 온도 범위를 유지하였다. 여기서 도달한 최고온도는 55°C로 모두 동일했다.

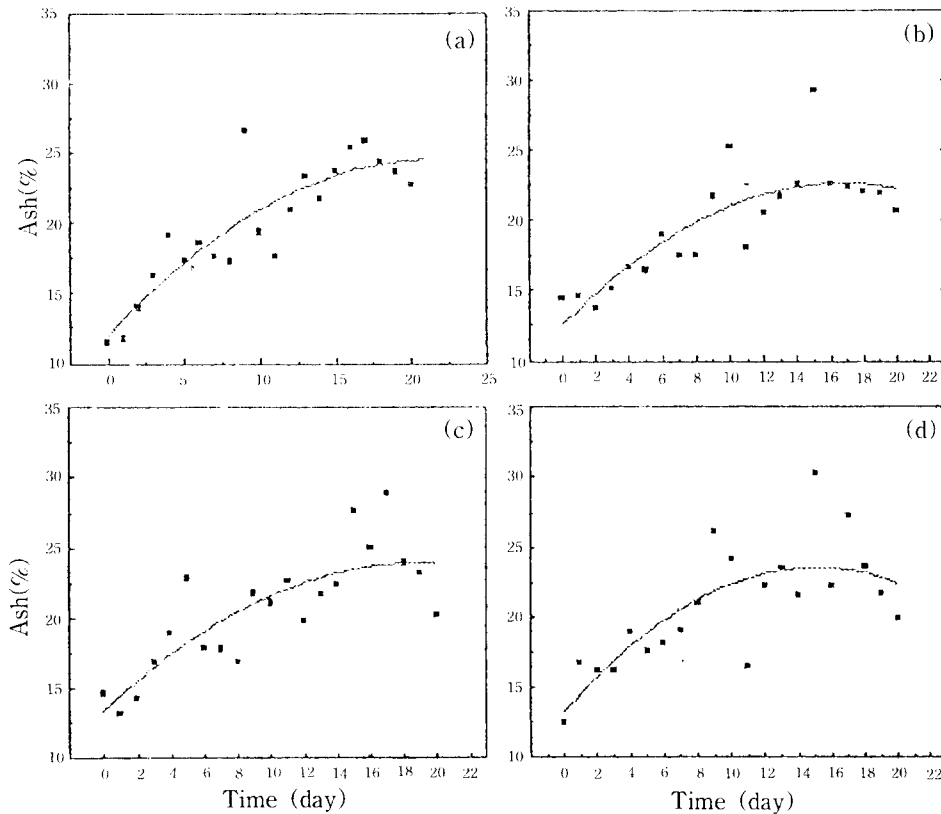


Fig. 4. Ash content trends of each composter by various aeration rate.

(a) 200 ml/min · kg_{vs}, (b) 500 ml/min · kg_{vs}, (c) 1000 ml/min · kg_{vs} (d) 1500 ml/min · kg_{vs}.

네 개의 반응조 모두에서 호열성 범위를 보인 뒤 중온성 범위를 거쳐 실온으로 접근하였으나 반응 10일째에 잠시 온도의 감소 추세가 정체되며 약간 상승하는 경향을 보이다가 다시 실온으로 근사했다.

공기공급량에 따라 반응조의 평균온도는 공기공급량 각각 200, 500, 1000, 1500 ml/min · kg_{vs}에서 각각 31.08, 30.71, 34.09, 32.73°C였으며 외기의 평균온도는 23.63°C였다. 공기공급량의 변화가 각 반응조에서 유의한 온도차이를 보이지는 않았으나 ($p>0.1$) 공기공급량이 1000 ml/min · kg_{vs}과 1500 ml/min · kg_{vs}에서 나머지 두 반응조보다 더 높은 온도가 관찰되었다.

3. 회분함량 변화

퇴비가 진행된다는 것은 퇴비원료 중의 유기물질이 분해되어 무기화 됨으로서 식물이 쉽게 흡수할 수 있는 형태가 된다는 것을 의미한다. 그러므로 일반적으로 퇴비가 완료된 물질은 토양에 적용해도 발효반응이 더 이상 일어나지 않는다. 퇴비의 완성 정도를 측정할 수 있는 접근방법으로 회분의 함량변화는 여러 문헌에서 제시되었다.¹²⁾

각 퇴비화 반응기에 투입한 유기물질 1 kg_{vs} 당 각각 200, 500, 1000, 1500 ml/min · kg_{vs}의 공기를 연속적으로 공급하며 퇴비화반응을 시킨 결과 회분함량은 다음 Fig. 4와 같이 변화하였다. 그림에서 확인할 수 있는 것처럼 회분함량의 변화 추이는 단순선형이 아닌 이차함수식의 형태로 변화하고 있다.

회분 함량이 증가했다는 것은 퇴비물질 중의 유기물질이 더 많이 분해되었다는 것을 의미한다. 따라서 회분함량이 급속히 증가했다는 것은 퇴비물질 중 유기물질이 더 빠른 속도로 무기화되었다는 의미이다. 이 연구에서는 회분함량의 증가속도를 퇴비화 반응의 효율을 평가하기 위한 지표로 사용하였다.

이차함수식의 이차항의 계수의 크기를 퇴비화 반응의 진행속도를 판단하기 위한 지표로 삼았다.

공기공급량을 각각 200, 500, 1000, 1500 ml/min · kg_{vs}로 했을 때 매일 측정된 회분의 함량에 대해 최소자승법을 이용하여 이차회귀식을 구하였을 때, 이차항 계수의 절대값은 각각 0.027, 0.036, 0.029, 0.046이 나왔으며, 이때의 상관계수 값은 각각 0.89, 0.83, 0.82, 0.77이었다. 이 결과를 볼 때 1000 ml/min.kg_{vs}의 공기를 공급한 반응조를 제외하면 공기공급량이 증가함에 따라 퇴비화 반응의 속도가 빨라지는 양상을 보였다. 회귀식에 적합하게 들어맞지 않는 측정치들은 시료의 비균질성에 기인하는 것으로 시료의 반복측정에도 극복될 수 없었다. 공기공급량 1000 ml/min · kg_{vs}에서 가장 낮은 이차항 계수값이 나왔으나, 앞서 살펴본 C/N비의 감소 추세를 비추어 볼 때, 이 값이 퇴비화 반응의 본질적인 차이를 나타낸다고 보다는 대표 시료를 채취하지 못했거나, 매일 매일 공기공급량을 보정했음에도 불구하고 정확한 양의 공기공급이 이루어지지 못했기 때문으로 생각된다. 회분 함량의 증가추세는 크게 보아서 앞서 살핀 C/N비의 감소추세와 어느 정도 일치하는 것으로 판단되었다.

4. 중금속 함량과 비효성(肥效性)

퇴비화제품의 사용을 위해서는 1) 재배작물에 적합한 양분이 균형화된 퇴비로서, 2) 작물의 생육장애를 주지 말아야 하고, 중금속 및 유해 유기화합물이 적어야 하며, 난분해성 혐잡물이 없어야 한다. 3) 또한 미부숙된 퇴비화제품을 토양에 시비하였을 경우 근권토양의 혐기상태, 질소기아, 토양의 이상환원에 의한 작물의 생육저하 등의 장애를 가져올 수 있으므로 정확한 부숙도를 판정하여 완숙퇴비를 생산해야 한다.

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 | 12000 | 500 | 500 | 1000 | 1000 | 200 | 1000 | 2000 |
| As | 50 | | | | | | | | |

우리 나라 비료 공정규격상 퇴비 중 중금속 함량 규제치를 외국의 경우와 비교하면 Table 5와 같다.¹³⁾

나라별로 퇴비의 중금속 함량에 대한 규제치가 상이하나 우리나라의 그것과 비교해보면 우리나라의 기준이 상대적으로 매우 엄격함을 알 수 있다. 퇴비

원료가 나라마다 특색이 있고 토양환경이 다르기 때문에 선진국의 기준을 그대로 따르는 것은 문제가 있다고 할 것이다. 각종의 유기성 폐기물 자원이 퇴비의 원료로서 토양에 이용되기 시작한 현 시점에서 지나치게 엄격한 퇴비 비료의 중금속 허용농도에 대한 기준이 현실성 있게 재고되어야 함은 물론, 퇴비의 중금속 함량 분석방법의 표준화에 대한 다각적인 연구도 필요하다 할 것이다. Table 5,6과 Fig. 5에서 보는 바와 같이 본 실험에서 측정된 중금속 항목에 대한 우리나라와 유럽의 기준을 비교했을 때, 가장 엄격한 기준보다도 낮은 값을 나타내고 있다. 따라서 이런 중금속 항목에 대해서는 비교적 안전하다고 생각할 수 있다.

특히 Pb 등 중금속 오염이 심할 것으로 예상되었던 신문지의 경우에도 중금속 농도가 그리 크지 않았으며, Cu와 Ni은 오히려 신문지가 가장 낮은 농도를 나타내었다.

한편, 퇴비의 비효성은 유기성 폐기물이 가지고 있는 비료성분을 소실하지 않고 유지한다는 측면에서 그 의미를 찾아야 한다. 즉 퇴비는 화학비료처럼

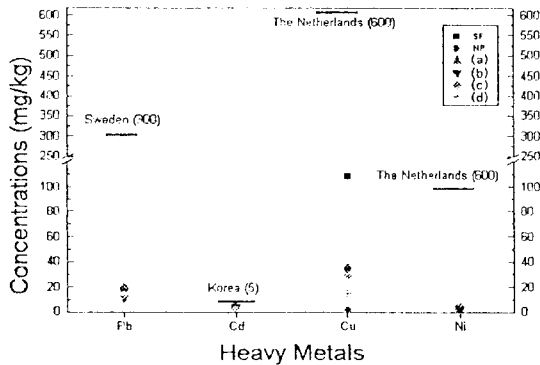


Fig. 5. Heavy metal contents of the final compost and the comparison of those values to the most stringent permissible limits.

Table 6. Heavy metal contents of the final compost materials (mg/kg)

| Heavy metal | Pb | Cd | Cu | Ni |
|-------------|-------|------|--------|------|
| Swine Feces | 18.18 | 3.65 | 108.25 | 3.03 |
| Newspaper | 18.09 | 3.20 | 1.40 | 1.64 |
| Run 1 | 20.12 | 3.35 | 35.90 | 3.61 |
| Run 2 | 11.26 | 3.80 | 33.60 | 2.50 |
| Run 3 | 12.25 | 2.45 | 29.85 | 4.74 |
| Run 4 | 20.99 | 3.10 | 14.70 | 4.91 |

Table 7. Contents of N and P in composts (mg/g, dry weight base)

| Time | N | | | | P | | | |
|-----------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| | Run 1 | Run 2 | Run 3 | Run 4 | Run 1 | Run 2 | Run 3 | Run 4 |
| Beginning | 1.25 | 1.47 | 1.52 | 1.67 | 2.43 | 1.79 | 2.68 | 2.53 |
| End | 1.71 | 2.18 | 2.07 | 2.14 | 4.93 | 3.14 | 7.49 | 1.57 |

Table 8. The Higgins's classification for compost (unit : %)

| Component | T-N | T-P | K |
|-----------|---------|---------|-----------|
| Grade | | | |
| Low | 0.1~1.5 | 0.5~1.0 | 0.02~0.25 |
| Middle | 1.5~3.0 | 1.0~2.0 | 0.15~0.3 |
| High | 3.0~ | 2.0~ | 0.3~ |

비효과가 크지는 않다는 것이다.

우리 나라의 비료는 크게 두 가지로 구분된다. 일반적인 비료와 부산물비료가 그것이다. 부산물비료는 농림수산부고시 제93-29호 비료공정규격이 규정하고 있는데 그 가운데 퇴비, 구비, 부숙겨, 부숙왕겨, 톱밥, 부엽토 등 11개 항목으로 구성되어 있다. 이중 퇴비가 제품품목허가를 받기 위해서는 (1) 유기물이 25% 이상을 차지할 것, (2) 유기물 對 질소의 비(C/N비)가 50 이하일 것, 그리고 (3) 유해성분이 일정수준(비소 : 50 ppm, 카드뮴 : 5 ppm, 수은 : 2 ppm, 납 : 50 ppm) 이하일 것 등의 조건을 만족해야 한다.¹³⁾

이 실험의 초기와 실험 종료 후의 퇴비에서 분석된 비료성분의 함량이 Table 7에 제시되어 있다. 이 결과를 Table 8의 Higgins의 퇴비성분 분류기준 중 질소와 인의 값과 비교해보면 질소의 경우에는 모든 반응조에서 분류기준 하급(0.1~1.5%)에 속했으나, 인의 경우엔 일부만 제외하고 모두 분류기준 하급(0.5~1%)에도 미치지 못했다.

퇴비화 반응 이전보다 이후의 질소와 인 함량이 더 높았는데, 이는 퇴비화 반응 중 유기탄소 등이 미생물들에 의해 분해되어 CO₂ 등으로 소실되었기 때문으로 생각된다.

퇴비화 반응을 시킨 이후의 생산물의 비효성이 이처럼 우수하지 않다는 점 때문에 퇴비화가 가진 장점들이 퇴색되어서는 안된다. 돈분이나 신문지 등 유기성 폐기물들을 퇴비화시키는 의미는, 퇴비화반응을 시키지 않고 그대로 자연에 방출했을 경우 하천의 부영양화의 원인물질이 되어 심각한 환경오염 원인이 될 수 있는 질소, 인 등의 영양물질을 안정하고 이로운 물질로 변화시켜 토양에 환원시키는 역할을 한다는 측면에서 퇴비화와 퇴비의 비효성이 갖는 의미를 찾아야 할 것으로 생각된다.

IV. 요약 및 결론

본 연구는 신문지를 돈분의 퇴비화공정에 충전재로 사용했을 때 적절한 배합비를 결정하기 위한 궁극적 목적을 가지고 있으며, 이 논문은 일차적으로 신문지와 돈분의 퇴비화에서 최적의 공기공급량을 찾고자 하는 목적을 가지고 있다.

공기공급량 이외의 다른 환경을 모두 동일하게 한 4개의 퇴비화 반응조를 이용하여 3주 동안 퇴비화시킨 다음, 각 반응조의 퇴비화 효율과 최종 퇴비의 안

전성을 평가한 결과 다음과 같은 결과를 얻었다.

1. 반응이 진행되면서 C/N비는 감소했는데 감소 정도는 공기공급량 200, 1500, 1000, 500 ml/min · kg_{vs} 순이었다. 각 반응조에서 최종 C/N비를 최초 C/N비로 나눈 값은 공기공급량이 각각 200, 500, 1000, 1500 ml/min · kg_{vs}에서 각각 0.70, 0.58, 0.61, 0.62의 값을 보였다. 모든 반응조에서 0.75 이하의 값이 나와 퇴비화 반응이 완료되었다는 것을 알 수 있다. 500 ml/min · kg_{vs} 이상의 유속은 퇴비화 효율에 큰 영향을 미치지 않는 것으로 판단된다.

2. 반응이 진행되면서 온도는 초기에 상승했다가 점차 실온에 가깝게 변화하였는데, 공기공급량 각각 200, 500, 1000, 1500 ml/min · kg_{vs}에서 모두 호열성 온도에 도달한 시간은 반응시작 69시간 이었고 이 범위는 18시간 동안 지속되었다. 각 반응조에서 도달한 최고온도는 51.8~55°C였으며 큰 차이는 없었다.

3. 퇴비화가 진행됨에 따라 회분 함량은 이차함수의 증가곡선을 따랐으며, 본 연구에서 퇴비화 반응 속도의 지표로 사용한 이차함수의 이차항 계수의 절대값은, 공기공급량이 각각 200, 500, 1000, 1500 ml/min · kg_{vs}인 반응조에서 각각 0.027, 0.036, 0.029, 0.046이 나왔다. 이 결과를 볼 때 1000 ml/min · kg_{vs}의 공기를 공급한 반응조를 제외하면 공기공급량이 증가함에 따라 퇴비화 반응의 속도가 빨라지는 양상을 보였다.

4. 최종 퇴비 중에서 측정된 중금속 함량은 우리나라와 유럽 여러 나라의 기준과 비교했을 때 가장 엄격한 값보다도 낮았다.

5. 최종 퇴비 중에 포함되어 있는 비료성분의 함량은 건조중량을 기준으로 질소 1.71~2.18 mg/kg, 인 1.57~7.49 mg/kg였다.

참고문헌

- 1) 환경부 : 환경백서, 1995.
- 2) R. Rynk, et al.: On-Farm Composting Handbook, Northeast Regional Agricultural Engineering Service-54, 6~23, 1992.
- 3) 신동소: 고지(告紙) 리사이클링, 초판, 서울대학교 출판부, 5, 1995.
- 4) 최경호, 박석환, 정문식: 톱밥, 볏짚, 왕겨 및 신문지를 이용한 돈분의 퇴비화, 한국환경위생학회지, 21(1), 56~67, 1995.
- 5) P. Bach, M. Shoda, H. Kubota: Composting Reaction Rate of Sewage Sludge in an Autothermal

- Packed Bed Reactor. *J. Ferment. Technol.*, 63(3), 271~278, 1985.
- 6) 신항식, 황응주, 정연구: 음식물쓰레기 퇴비화시 bulking agent의 적정 첨가량 결정에 관한 연구. *한국유기성폐기물자원화협의회학회지*, 2(1), 75~86, 1994.
 - 7) G. Tchobanoglous, H. Theisen, S. Vigil: *Integrated Solid Waste Management Engineering Principles and Management Issues*, McGraw Hill, New York, 686, 1993.
 - 8) 농업기술연구소: 토양화학분석법-토양, 식물체, 토양 미생물, 농촌진흥청, 26~29, 1988.
 - 9) 환경처 고시 제91-85호: 수질오염, 폐기물 공정시험 방법, 동화기술, 1993.
 - 10) 노재성, 강 호, 홍성수, 이상운, 이범재: 무기계 고품 폐기물을 수분조절재와 탄소공급원으로 한 축분의 퇴비화에 관한 연구. *한국폐기물학회지*, 11(3), 388~397, 1994.
 - 11) R. Haug: *The Practical Handbook of Composting Engineering*, Lewis Publishers, 261, 1993.
 - 12) B. Godden, M. Penninckx: *Agricultural Wastes* 15, 169~178, 1986.
 - 13) 장기운, 임재신: 유기성 폐자원을 이용한 퇴비제품화 요건, *한국유기성폐기물자원화협의회학회지*, 2(1), 121~134, 1994.