

회분식 퇴비화 시스템에서 제어변수가 호기성 분해성능에 미치는 영향

Influence of Control Variables on the Aerobic Biodegradation Performance in Bin Composting System

박 금 주* 홍 지 형*
정희원 정희원
K. J. Park J. H. Hong

ABSTRACT

A theoretical model was developed to evaluate the influence of control variables on the composting performance in a bin composting system. The model was verified using pilot scale composting system.

Simulation of the composting temperature according to air flow rate and composting bin size was conducted using the mathematical model.

High composting temperature above 55°C needed to kill a pathogen was maintained for longer periods as the air flow rate was lower and the bin size was larger. Optimum air flow rate was 0.77L/min/kg-DM for the experimental pilot scale bin system. The size of composting bin should be large enough to maintain the higher composting temperature for required periods.

주요용어 (Key Words): 시뮬레이션(Simulation), 고형퇴비화(Solid Composting), 호기성분해(Aerobic Biodegradation), 돈분(Hog Manure)

1. 서 론

유기성 폐기물의 호기성 퇴비화는 재료 속에 있는 탄수화물, 지방 및 단백질 등의 유기물이 호기성 미생물에 의하여 분해되어 보다 안정한 부식물질(humus)과 난분해성 물질로 변화하는 과정이다. 탄수화물은 산소와 반응하여 최종적으로 물과 이산화탄소로 변화하고 단백질과 지방은 분자량이 작은 물질로 변화하면서 동시에 이산화탄소, 물 및 암모니

아가스를 발생시킨다. 이때 유기물은 분해되면서 열을 발생한다.

퇴비재료 속에는 다양한 미생물이 존재하며, 퇴비 내의 온도에 따라 활동하는 미생물의 종류도 다양하다. 퇴비발효가 정상적으로 이루어지면 발효시작 3~5일 후에 퇴비온도는 50°C 이상으로 상승한다. 발효온도가 올라가면 호열성 미생물이 활동하면서 발효가 지속된다. 퇴비속에 존재한 병원균, 유해기생충 등을 사멸시키기 위해서는 55~60°C의 발효온도를 3

* 순천대학교 농과대학 농업기계공학과

일 이상 지속시켜야 한다. 그러나 발효온도가 65℃ 이상으로 상승하면 암모니아가스가 발생하여 악취가 나므로 50~60℃의 온도에서 주발효를 시키는 것이 이상적이다(홍지형, 1998).

퇴비화 발효온도는 재료의 유기물 분해상태의 양부를 판단하는 척도로서 활용될 수 있다. 퇴비재료의 분해속도에 영향을 주는 인자로서는 공기량(산소공급량), 재료의 탄질비(영양분), 산도, 수분 함량, 겉보기밀도 등을 들 수 있다(MacGregor, 1981). 공기속에 있는 산소는 미생물 활동에 필요한 충분한 양이 되어야 하지만 너무 많이 공급하면 재료를 냉각시키는 역작용을 하기도 한다.

퇴비재료, 퇴비화 시스템 설계조건 및 운전조건이 퇴비화 성능에 미치는 영향을 실험적으로 분석하기 위해서는 시간과 경제적 측면에서 많은 비용이 소요된다. 이러한 제반 조건의 변화에 따른 퇴비화 분해성능을 예측할 수 있는 프로그램을 개발하여 퇴비화 과정을 이론적으로 분석하는 것이 바람직하다. 藤田賢二(1993)는 퇴비화 과정을 이론적으로 해석하고 퇴비화 과정의 기본식을 수립하였으며, 清水浩(1989) 등은 퇴비화 반응조 각층의 온도를 계측하여 발효율을 예측하였다. 본 연구의 목적은 회분식 퇴비화시스템에서 설계 및 운전 제어변수가 퇴비화 성능에 미치는 효과를 분석하는데 있으며, 이를 위하여 컴퓨터 시뮬레이션 모델을 개발하고 파이로트 규모의 퇴비화 장치를 제작하여 이 모델의 유효성을 검증하였으며, 또한 이 모델을 이용하여 공기량과 반응조 크기가 퇴비화 온도에 미치는 영향을 분석하였다.

2. 재료 및 방법

가. 수학적 모델 및 시뮬레이션 프로그램

다양한 요인이 복합적으로 유기물의 분해속도에 영향을 미치고 있으므로 퇴비화 성능을 정확히 예측하기는 매우 어렵다. 따라서 본 연구에서는 모델의 단순화를 위해서 다음과 같은 가정하에서 호기성 분해 반응특성 예측모델을 개발하였다.

1) 퇴비재료는 유기물, 미생물, 수분 및 무기물로 구성되어 있다.

2) 퇴비의 재료는 전체적으로 균일하게 혼합되어 있다.

3) 퇴비화 과정중 반응조내 재료의 온도는 균일하게 변화한다.

시뮬레이션 모델은 원료조건, 반응조 설계조건 및 운전조건이 변화함에 따라서 퇴비화 성능지표가 되는 유기물량의 변화, 퇴비온도변화 등을 예측할 수 있도록 작성하였다. 퇴비화는 미생물이 산소공급을 받아 유기물을 분해시키면서 열을 발생시킨다. 또한 이때 발생되는 열은 퇴비내의 수분을 증발시키고 미생물의 활동조건을 변화시켜 분해속도에 영향을 미칠뿐만 아니라 퇴비속에 들어 있는 병원균을 사멸시키는 역할을 수행한다.

시뮬레이션 모델식은 藤田賢二(1993)가 개발한 식을 일부 수정하여 퇴비 구성요소의 물질수지식과 퇴비내부의 열수지식으로 다음 식(1)~(4)과 같이 수립하였다.

$$\frac{dX}{dt} = \mu \frac{SX}{k_c X + S} \dots\dots\dots (1)$$

$$\frac{dS}{dt} = -\frac{1}{Y} \frac{dX}{dt} \dots\dots\dots (2)$$

$$\frac{dW}{dt} = -\lambda j q w \dots\dots\dots (3)$$

$$C_p M \frac{dT}{dt} = -h_1 \left(\frac{dS}{dt} + \frac{dX}{dt} \right) + h_2 \frac{dW}{dt} - (T - T_a) (qC_a + kA) \dots\dots\dots (4)$$

위의 물질 및 열수지식은 전방차분법에 의하여 해석하였다.

나. 모델상수의 결정

시뮬레이션 모델에 이용된 상수에는 퇴비재료의 중량 구성비, 유기물 발생열량 등의 재료에 관한 상수와 퇴비화 반응조의 구조와 크기 등의 시스템 설계에 관한 상수 그리고 송풍량, 실내온도 등의 운전

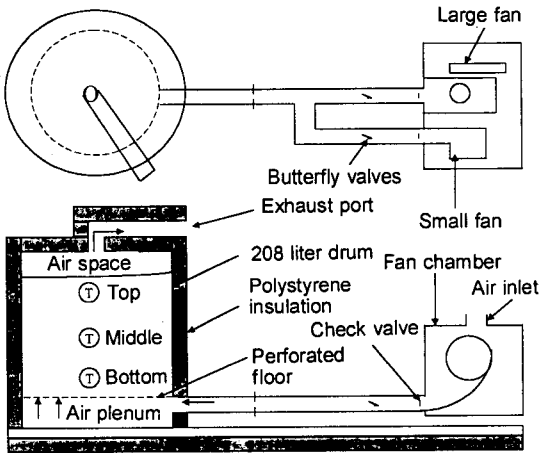


Fig. 1 General layout of experimental bin composting system.

· 환경에 관한 상수가 있다.

시뮬레이션의 검증을 위해서 파일럿 규모의 퇴비화 시스템을 제작하여 육돈분과 톱밥의 혼합재료를 사용하여 퇴비화 시험을 수행하였다. 퇴비화 시스템의 반응조(그림 1)는 원통형이며 외부는 단열재로 둘러싸여 열의 유출을 억제하였다. 퇴비화 온도의 측정에는 퇴비재료 내의 상, 중, 하 3개 지점에 K-형 열전대를 설치하여 15분 간격으로 데이터로거(Digi Kaye, DR3-3C)를 사용하여 측정하였다.

시뮬레이션 수행에 필요한 재료의 초기성분, 반응조의 크기 등의 시스템 설계상수 및 송풍량 및 외기 온도 등의 운전·환경상수는 실측값을 사용하였으며 실측되지 않은 기타 값은 문헌을 참고하여 입력하였다. 시험에 사용된 재료의 초기중량(95kg) 중에서 유리물량이 39%(37.01kg)이었는데 시뮬레이션 모델에서는 이중 38%가 분해성 유기물, 1%가 미생물인 것으로 가정하였다. 송풍량은 유량계를 이용하여 1일 1회, 실내온도는 15분 간격으로 측정하였으며, 그림 2는 퇴비화 기간중 송풍량과 실내온도의 변화를 나타낸 것이다. 송풍량과 실내온도는 퇴비화 과정에서 크게 변화하지 않았으므로 시뮬레이션 모델에서는 분석의 단순화를 위해서 퇴비화 전과정의 평균값을 입력하였다. 표 1은 시뮬레이션에 이용된 주요 상수값을 나타내고 있다.

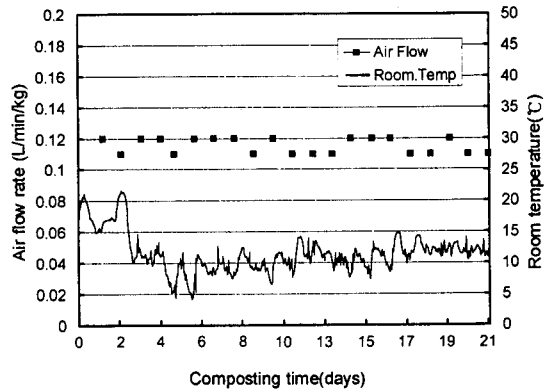


Fig. 2 Air flow rate and room temperature variations during composting process.

3. 결과 및 고찰

가. 시뮬레이션모델 검증

측정 및 문헌을 통한 시뮬레이션 상수를 입력하여 21일간의 퇴비화 과정중 퇴비재료 온도의 변화를 시뮬레이션한 결과를 측정값과 비교하였다. 퇴비재료 내 온도는 상, 중, 하 3개 지점에서 측정하였으며 그림 3에서와 같이 거의 같은 변화경향을 갖는 것으로 나타났다. 시뮬레이션 검증에서 사용된 측정값은 퇴비재료내 3개 지점의 1일 평균값으로 하였다. 시뮬레이션에서 시간 중분값은 1시간을 10등분하여(6분) 계산한 결과와 20등분(3분)한 값 사이에 거의 오차가 없었으므로 6분 간격으로 하였으며 1일 간격으로 출력하여 비교하였다. 그림 4는 예측값과 실측값을 비교한 것이다. 그림에서와 같이 시뮬레이션에 의한 온도변화는 퇴비화 개시후 4~6일 사이에서 실측값보다 약 20°C 높은 값을 나타내었으나 8일째부터는 10°C 정도의 편차로 줄어들었음을 뿐만아니라 변화경향은 동일하게 나타났다. 모델의 단순성 때문에 시뮬레이션 모델의 오차는 초기에 다소 크게 나타났으나, 전 기간동안 실측치와 모델에 의한 예측치 사이의 상관계수(R)는 0.91로 나타나 모델의 유효성은 입증되었다. 이와같이 시뮬레이션에 의한 예측은 퇴비화과정에서 유기물의 호기성 분해성능의 개략적인 평가에는 활용할 수 있으리라고 판단되었다.

Table 1 Values of simulation constants

Name	Symbol	Value	Remark
Initial composition of composting materials in weight base			
- Total	M	100%(95kg)	Measured
- Organic matter	S	38%	
- Microbe	X	1%	
- Moisture	W	56.7%	
- Ash	U	4.3%	
Max. specific increasing speed	μ	0.1	Ref. 3)
Biomass yield	Y	0.5	"
Thermal value of organic matter	h_1	17,600kJ/kg · DM	"
Air flowrate	q	0.24 m ³ /h (0.11 L/min/kg · DM)	Measured
Room temperature	T _a	12°C	"
Size of composter	Dia. × Height	0.57m × 0.815m (207L)	"

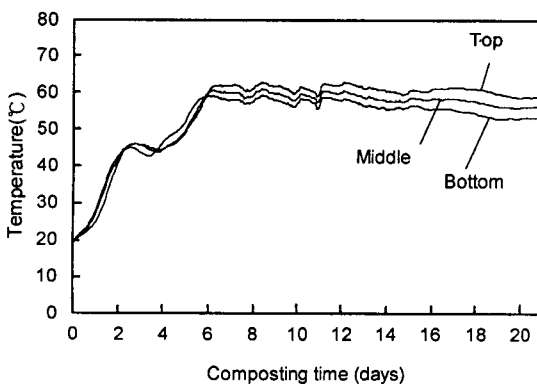


Fig. 3 Changes of temperatures of composting material according to the positions.

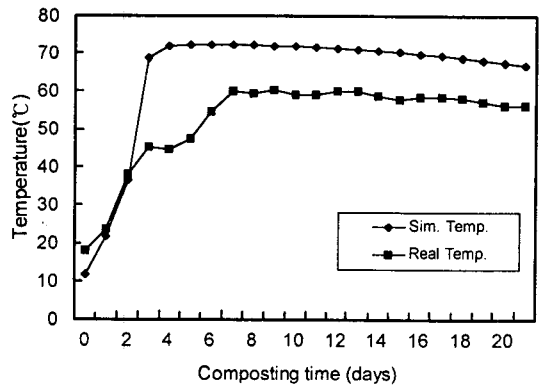


Fig. 4 Comparison of real temperature of compost with that of simulation.

나. 송풍량이 퇴비화 온도변화에 미치는 영향

송풍량은 호기성 퇴비화 과정에서 매우 중요한 제어변수이다. 일반적으로 송풍량이 적으면 미생물에 게 필요한 산소공급이 부족하여 유기물 분해속도가

떨어지고 반면에 송풍량이 너무 많으면 외기의 낮은 공기가 퇴비를 냉각시키는 결과를 초래하여 퇴비온도를 떨어뜨리면서 호열성 미생물의 활동을 불가능하게 한다.

송풍량을 3개의 수준으로 변화하여 퇴비화 온도의 변화를 시뮬레이션하였다. 그림 5에서와 같이 송

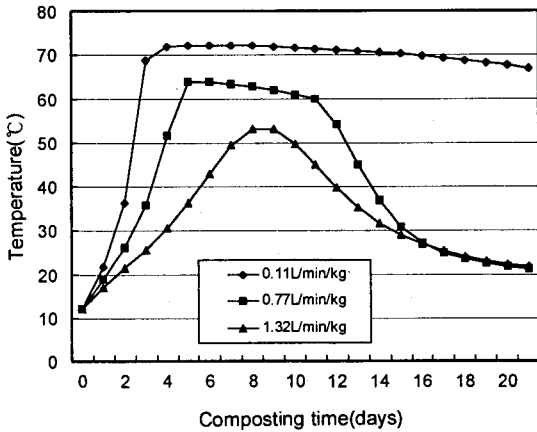


Fig. 5 Simulation result of compost temperature according to the air flow rate.

풍량 0.11L/min/kg · DM에서는 송풍량이 부족한 상태를 나타내며 분해기간이 길어지는 현상이 나타났으며, 송풍량 0.77L/min/kg · DM에서는 15일 정도의 기간에 분해가 빠르게 완료되면서 병원균 사멸에 필요한 60°C 정도의 온도가 7일간 유지되어 비교적 양호한 퇴비화 과정으로 나타났으며, 송풍량 1.32L/min/kg · DM에서는 송풍량이 너무 많아 병원균 사멸에 필요한 3일 이상의 55~60°C 고온유지가 이루어지지 않고 분해가 끝난 것으로 나타났다.

다. 반응조 크기가 퇴비화 온도에 미치는 영향

동일한 송풍량과 재료에서도 반응조의 크기에 따라 퇴비화 온도변화는 달라진다. 따라서 반응조의 크기에 따라 적정 송풍량을 공급해 주어야 한다.

그림 6은 송풍량 1.32L/min/kg · DM에서 퇴비화 반응조의 크기(직경×높이)를 ϕ 0.57m×0.815m (207L), ϕ 1.14m×1.63m(8×207L), ϕ 2.28m×1.63m (32×207L)의 3단계로 변화하여 퇴비화 온도변화를 시뮬레이션한 결과이다. 그림에서와 같이 반응조가 제작된 시험장치 크기(207L)에서는 퇴비화 온도가 병원균 사멸에 필요한 고온유지가 되지 않았으나 반응조 크기가 1,656L(8×207L)로 커짐에 따라 퇴비화 온도가 50~65°C 영역에서 5일간 지속하여 양호

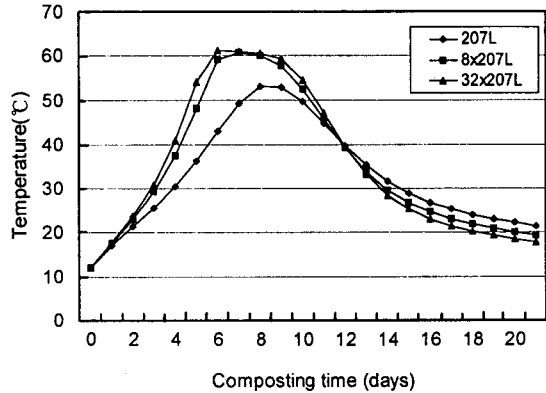


Fig. 6 Simulation result of compost temperature according to the size of composting bin.

한 퇴비화 성능을 나타냈다. 그러나 반응조 크기를 6,624L(32×207L)로 했을 경우에는 1,656L로 했을 경우와 큰 차이를 나타내지 않았으며, 이는 반응조가 일정규모 이상의 크기가 되면 퇴비화 성능이 비슷하게 나타남을 말해주고 있다. 따라서 퇴비재료의 분해와 병원균 사멸에 필요한 충분한 온도를 일정기간 유지하기 위해서는 반응조 규모가 어느 일정 값 이상이 되어야 함을 알 수 있었다.

4. 요약 및 결론

퇴비화 성능은 퇴비재료의 이화학적 성분, 함수율, 산도, 탄질비 등의 재료조건, 반응조의 구조 및 주위환경 등의 설계조건, 송풍량 및 통기방법 등의 운전조건에 의하여 영향을 받는다. 이러한 제반 조건의 변화에 따른 퇴비화 성능을 예측하기 위한 시뮬레이션 모델을 개발하였다.

퇴비화 과정중 유기물 분해성능을 판단할 지표로서 퇴비재료의 온도를 일반적으로 이용하고 있다.

시뮬레이션 모델의 검정을 위해서 파일럿 규모의 퇴비화 시스템을 제작하여 퇴비화 온도를 측정하였으며, 퇴비화 성능지표로서 퇴비화 온도를 시뮬레이션하여 실측값과 비교하였다. 시뮬레이션 모델은 실측치와 약간의 차이는 있었으나 개략적인 퇴비화 경향을 분석하는데 이용할 수 있을 것으로 판단되었

다.

퇴비화 작업시 운전제어 변수인 송풍량과 설계변수인 반응조의 크기가 퇴비화 성능에 미치는 영향을 분석하기 위하여 이들 값의 변화에 따른 퇴비화 온도를 시뮬레이션 하였다.

퇴비화 반응조 크기가 207L인 경우에 송풍량을 3개 수준으로 변화시켜 퇴비화 온도를 시뮬레이션한 결과 0.77L/min/kg · DM에서 가장 양호한 퇴비화 성능을 나타내었다.

송풍량이 1.32L/min/kg · DM인 조건에서 퇴비화 반응조 크기를 3수준으로 변화시켜 퇴비화 온도를 시뮬레이션한 결과 반응조가 커짐에 따라 퇴비화 온도가 더 높게 상승하였으며, 일정규모 이상이 되면 크기의 효과는 점차 감소하는 것으로 나타났다.

Nomenclature

- M : 퇴비재료 총중량(kg)
- X : 미생물 중량(kg)
- S : 유기물 중량(kg)
- W : 수분 중량(kg)
- U : 조회분 중량(kg)
- T, T_a : 퇴비재료온도, 실내온도(°C)
- μ : 最大比増殖速度(-)
- k_c : Contois 정수(-)
- Y : 菌體收率(-)
- t : 시간(h)

- λ : 증기포화열(-)
- j : 포화증기량(kg/m³)
- w : 함수열(-)
- C_c, C_a : 퇴비재료 비열, 공기비열(kJ/kg/°C)
- h₁ : 유기물단위건물중량당 발생열량 (kJ/kg · DM)
- h₂ : 물의 증발잠열(kJ/kg)
- k : 반응조의 열관류계수(kJ/m²/h/°C)
- A : 반응조 표면적(m²)
- q : 송풍량(m³/h)

참 고 문 헌

1. 홍지형. 1998. 파일럿 규모 빈 퇴비화 시스템에서 연속 및 간헐통기 돈분퇴비의 안정도 평가. 한국농공학회지 40(5):100-108
2. MacGregor, S. T., F. C. Miller, K. M. Psarianos and M. S. Finstein. 1981. Composting process control based on interaction between microbial heat output and temperature. Applied and environmental microbiology 41(6):1321-1330.
3. 藤田賢二. 1993. コンポスト化 技術. 技報堂出版 pp. 196.
4. 清水浩, 吳星五, 佐藤勝彦. 1989. 有機物堆積層の發酵乾燥過程における 熱と物質との移動現象に關する研究 農業施設 20(2):19-26.