

회분식 퇴비화 시스템에서 제어변수의 시뮬레이션

Simulation of Control Variables of Bin Composting System

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

1. 서론

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 적은 물질로 변화하면서 동시에 이산화탄소, 물 및 암모니아를 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℃ 이상으로 상승한다. 발효온도가 올라가면 호열성 미생물이 활동하면서 발효가 지속된다. 퇴비 속에 존재한 병원균, 유해기생충 등을 사멸시키기 위해서는 55-60℃의 발효온도를 3일 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, 수분함량, 걸보기밀도 등을 들 수 있다(MacGregor, 1981). 공기 속에 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)는 퇴비화 반응조 각층의 온도를 계측하여 발효율을 예측하였다. 본 연구는 회분식 퇴비화시스템에서 설계 및 운전 제어변수가

* 순천대학교 농과대학 농업기계공학과

퇴비화 분해성능에 미치는 효과를 분석하기 위하여 컴퓨터 시뮬레이션 모델을 개발하고 이 모델의 유효성을 검증하였으며, 또한 이 모델을 이용하여 공기량의 변화가 퇴비화 온도에 미치는 영향을 분석하였다.

2. 재료 및 방법

가. 수학적 모델 및 시뮬레이션 프로그램

다양한 요인이 복합적으로 유기물의 분해속도에 영향을 미치고 있으므로 분해성능을 정확히 예측하기는 매우 어렵다. 분해성능을 예측모델을 개발하기 위한 가정은 다음과 같다.

- 1) 퇴비재료는 유기물, 미생물, 수분 및 무기물로 구성되어 있다.
- 2) 퇴비의 재료는 전체적으로 균일하게 혼합되어 있다.

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 발생하는 열은 퇴비내의 수분을 증발시키고 미생물의 활동조건을 변화시켜 분해속도에 영향을 미칠뿐만 아니라 퇴비속에 들어 있는 병원균을 사멸시키는 역할을 수행한다.

시뮬레이션 모델식은 퇴비구성요소의 물질수지식과 퇴비내부의 열수지식으로 다음 식 (1)-(4)과 같이 구성된다(藤田賢二, 1993).

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

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

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

$$C_c M \frac{dT}{dt} = -h_1 \left(\frac{dS}{dt} + \frac{dX}{dt} \right) + h_2 \frac{dW}{dt} - (T - T_a)(q C_a + kA) \quad (4)$$

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 통기

량, 실내온도 등의 운전·환경에 관한 상수가 있다.

시뮬레이션의 검증을 위해서 파일럿 규모의 퇴비화 시스템을 제작하여 옥돈분과 톱밥의 혼합재료를 사용하여 퇴비화 시험을 수행하였다. 퇴비화 시스템의 반응조(그림 1)는 원통형이며 외부는 단열재로 둘러싸아 열의 유출을 억제하였다. 퇴비화 온도의 측정은 퇴비재료 내의 상, 중, 하 3개 지점에 K-형 열전대를 설치하여 15분 간격으로 측정하였다.

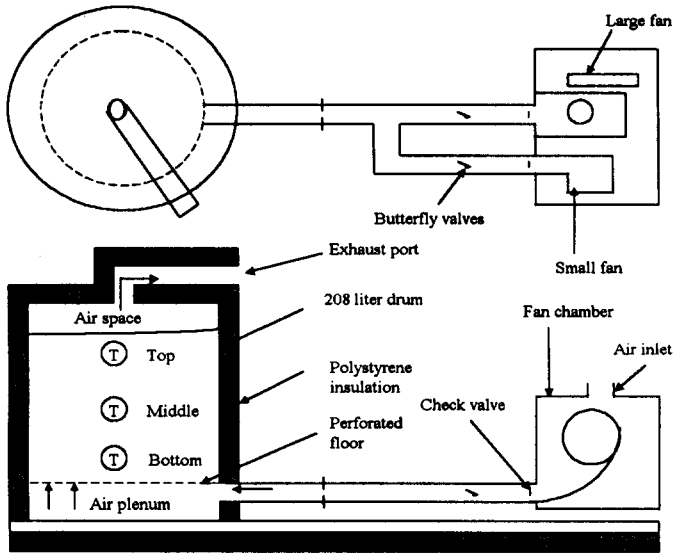


Fig. 1 General layout of bin type composting system

시뮬레이션 수행에 필요한 재료의 성분, 시스템 설계상수 및 운전·환경상수는 실측값을 사용하였으며 실측되지 않은 기타 값은 문헌을 참고하여 입력하였다. 통기량과 실내온도는 퇴비화 과정에서 지속적으로 변화하므로 퇴비화 전과정의 평균값을 사용하였다. 표 1은 시뮬레이션에 이용된 주요 상수값을 나타내고 있다.

3. 결과 및 고찰

가. 시뮬레이션모델 검증

측정 및 문헌을 통한 시뮬레이션 상수를 입력하여 21일간의 퇴비화 과정의 퇴비재료 온도 변화를 시뮬레이션한 결과를 측정값과 비교하였다. 시뮬레이션에서 시간 증분값은 6분으로 하여 계산하였으며 1일 간격으로 출력하였다. 측정값은 퇴비재료 내의 3개소의 값을 평균하여 1일 간격으로 출력한 값을 이용하였다. 그림 2는 예측값과 실측값을 비교한 것이다. 그림에서와 같이 시뮬레이션에 의한 온도변화는 실측값보다 퇴비화 4-19일 사이에 약간 높은 값을 유지하였으나 21일째에는 오히려 감소하면서 안정화과정으로 진입하는 결과를 보였다.

이와같이 시뮬레이션에 의한 예측은 실측값과 약간의 편차를 가지고 있지만 퇴비화과정에서 유기물 분해성능의 개략적인 평가에는 활용할 수 있으리라고 판단되었다.

Table 1. Values of simulation constants

Name	Symbol	Value	Remark
Composition of Composting materials in weight base			
- Total	M	100%	Measured
- Organic matter	S	38%	
- Microbe	X	1%	
- Moisture	W	56.7%	
- Ash	U	4.3%	
Specific increasing speed	μ	0.1	Ref. 3)
Thermal value of organic matter	h_1	17600kJ/kg · DM	"
Air flowrate	q	0.1 m ³ /h/kg · DM	Measured
Room temperature	T _a	12°C	"
Size of composter	Dia. × Height	57cm × 81.5cm (207L)	"

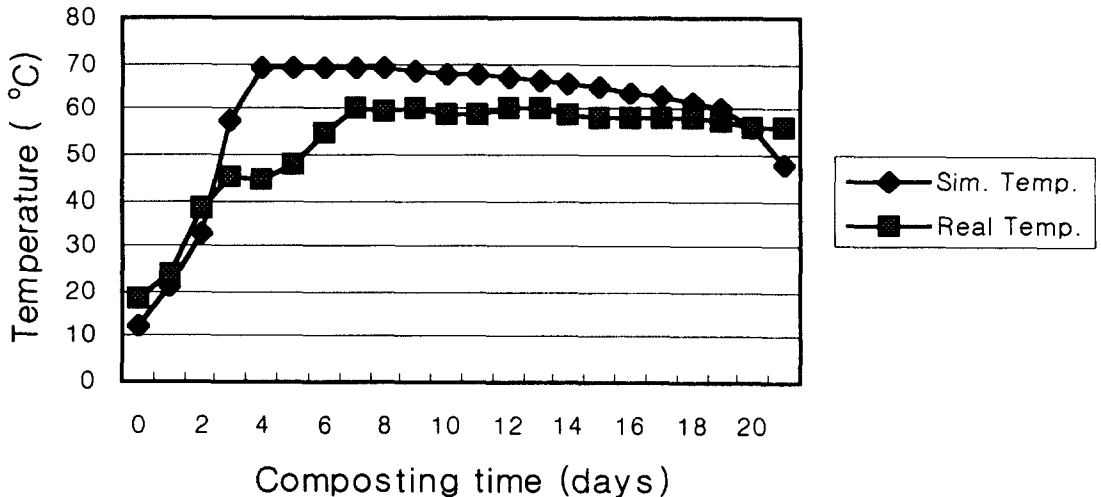


Fig. 2. Comparison of actual temperature of compost with the simulation value.

나. 통기량이 퇴비화 온도변화에 미치는 영향

통기량은 호기성 퇴비화 과정에서 매우 중요한 제어변수이다. 일반적으로 통기량이 적으면 미생물에게 필요한 산소공급이 부족하여 유기물 분해속도가 떨어지고 반면에 통기량이 너무 많으면 외기의 낮은 공기가 퇴비를 냉각시키는 결과를 초래하여 퇴비온도를 떨어뜨리면서 호열성 미생물의 활동을 불가능하게 한다.

통기량을 3개의 수준으로 변화하여 퇴비화 온도의 변화를 시뮬레이션하였다. 그림 3에서와 같이 통기량 $0.1\text{m}^3/\text{h}/\text{kg} \cdot \text{DM}$ 에서는 통기량이 부족한 상태를 나타내며 분해기간이 길어지는 현상이 나타났으며, 통기량 $0.3\text{m}^3/\text{h}/\text{kg} \cdot \text{DM}$ 에서는 분해도 빠르면서 병원균 사멸에 필요한 60°C 정도의 온도가 7일간 유지되어 비교적 양호한 퇴비화 과정으로 나타났으며, 통기량 $0.5\text{m}^3/\text{h}/\text{kg} \cdot \text{DM}$ 에서는 통기량이 너무 많아 병원균 사멸에 필요한 3일 이상의 $55\text{--}60^\circ\text{C}$ 고온유지가 이루어지지 않고 분해가 끝난 것으로 나타났다.

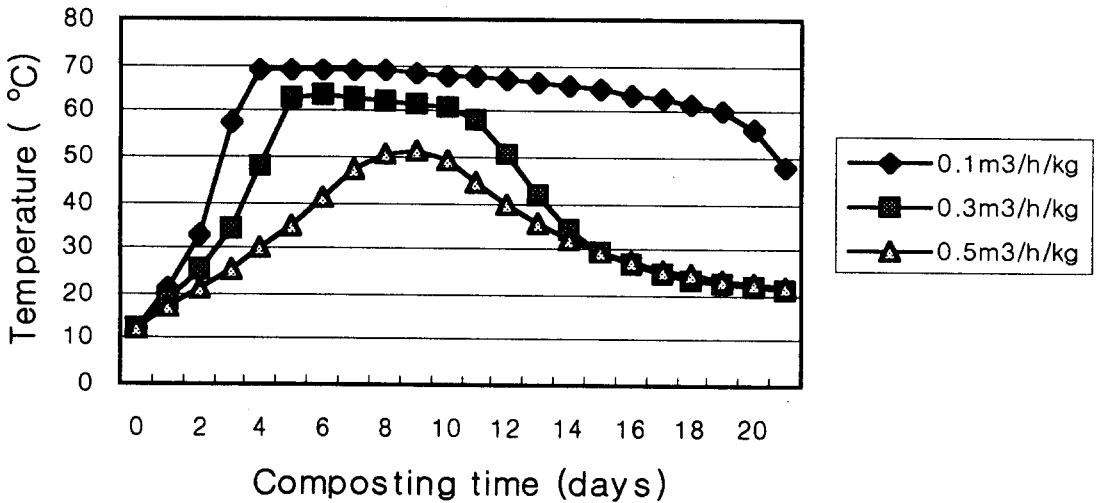


Fig. 3. Simulation result of compost temperature according to the air flow rate.

4. 요약 및 결론

퇴비화 성능은 퇴비재료의 성분, 함수율, 산도, 탄질비 등의 재료조건, 반응조의 구조 및 주위환경 등의 설계조건, 통기량 등의 운전조건에 의하여 영향을 받는다. 이러한 제반 조건의 변화에 따른 퇴비화 성능을 예측하기 위한 시뮬레이션모델을 개발하였다. 퇴비화 과정중 유기물 분해성능을 판단할 지표로서 퇴비재료의 온도를 일반적으로 이용하고 있다.

시뮬레이션 모델의 검정을 위해서 파이로트 규모의 퇴비화 시스템을 제작하여 퇴비화 온도를 측정하였으며, 퇴비화 성능지표로서 퇴비화 온도를 시뮬레이션하여 실측값과 비교하였다. 시뮬레이션 모델은 실측치와 약간의 차이는 있었으나 개략적인 퇴비화 경향을 분석하는

데 이용할 수 있을 것으로 판단되었다.

통기량을 3개의 수준에서 변화시켜 퇴비화 온도를 시뮬레이션한 결과 퇴비화 적정환경조건인 $0.3\text{m}^3/\text{h}/\text{kg} \cdot \text{DM}$ 에서 가장 양호한 퇴비화 성능을 나타내었다.

Nomenclature

M : 퇴비재료 총중량(kg)

X : 미생물중량(kg)

S : 유기물중량(kg)

W : 수분중량(kg)

T, T_a : 퇴비재료온도, 실내온도($^{\circ}\text{C}$)

μ : 比増殖速度(-)

k_c : Contois 정수(-)

t : 시간(h)

λ : 증기포화율(-)

j : 포화수증기량(kg/Nm^3)

w : 함수율(-)

C_c, C_a 퇴비재료 비열, 공기비열($\text{kcal}/\text{kg}/^{\circ}\text{C}$)

h_1 : 유기물단위건물중량당 발생열량($\text{kcal}/\text{kg} \cdot \text{DM}$)

h_2 : 물의 증발잠열(kcal/kg)

k : 발효조의 열관류계수($\text{kcal}/\text{m}^2/\text{h}/^{\circ}\text{C}$)

A : 발효조 표면적(m^2)

5. 참고문헌

1. 홍지형. 1998. 파일럿 규모 빈 퇴비화 시스템에서 연속 및 간헐통기 돈분퇴비의 안정도 평가. 한국농공학회지 40(5):100-108
2. MacGregor, S. T, Miller, F.C., Psarianos, K.M. and Finstein, M.S. 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 p196.
4. 木村俊範, 清水浩. 1989. 家畜ふんの 堆肥化に 關する 基礎的 研究. 日本農業機械學會誌 51(1): 63-70.
5. 清水浩, 吳星五, 佐藤勝彦. 1989. Heat and mass transfer in the aerobic fermentation and drying process of organic materials in packed bed. 農業施設 20(2):19-26