유기성폐기물자원화
제 2 권 제 1 호, 3-18, 1994

Journal of KOWREC
Vol. 2, No. 1, 3-18,.1994

효율적 퇴비화를 위한 온도제어 공기공급방식의 적용에 관한 연구

*김병태, **김정욱

*대진대학교 환경공학과
**서울대학교 환경대학원

A Study on the Application of Temperature Feedback Aeration Method for Composting of Municipal Solid Wastes

Byung-Tae Kim* and Jung-Wk kim

* Department of Environmental Engineering, Daejin University Graduate School of Environmental Studies, Seoul National University

ABSTRACT

Municipal solid wastes in Korea have physical and chemical properties suitable for composting, but composting has had little practical use in solid waste disposal until now because of a lack of understanding of process control. For practical use of composting, process control must be capable of maintaining good product quality while large quantities are composted in a short period of time. Ventilation control to maintain optimum temperature(Temperature Feedback Aeration Method) is reported to be convenient to operate. The purpose of this study is to analyze process efficiency and optimum temperature in the temperature feedback aeration method for composting of municipal solid wastes.

The results of this study show that degradation and drying of substrate in the temperature feedback aeration method are higher than those in the constant aeration method. And the optimum temperature range for composting of solid wastes appears to be 50～54℃.

초 록

우리나라 도시고형폐기물은 퇴비화에 적합한 조건을 갖추고 있으나, 퇴비화 공정개발이 미약하여 폐기물 퇴비화를 실용화하지 못하고 있다. 폐기물 퇴비화의 실용화를 위하여는 최종퇴비의 질을 높이면서도 대량의 폐기물을 단기간에 처리할 수 있도록 공정제어를 하여야 한다. 이를 위하여 최적온도를 지속적으로 유지하도록 공기공급량을 제어하는 방식(온도제어 공기공급방식)이 있다.

본 연구에서는 우리나라 도시고형폐기물에 온도제어 공기공급방식을 적용하여 퇴비화 과정중의 공정효율과 최적온도를 분석하고자 하였다.

실험결과, 온도제어 공기공급방식이 일정공기공급방식에 비하여 짧은 기간에 분해효율과 건조효과가 높은 것으로 나타났다. 또한 우리나라 도시고형폐기물 퇴비화의 최적온도는 50~54℃로 평가되었다.

1. 서 론

우리나라 도시고형폐기물은 퇴비화에 적합한 조건을 갖추고 있으나, 퇴비화 공정개발이 미약하여 폐기물 퇴비화를 실용화하지 못하고 있다. 퇴비화는 반건조 고형유기물이 다양한 호기성 미생물에 의해 분해되는 과정에서 유기폐기물이 안정한 퇴비로 변하는 공정으로, 퇴비화처리의 목표는 첫째 유기폐기물의 안정화(stabilization), 둘째 병원균의 사멸(pathogen kill), 세째 최종산물의 취급이 용이하도록 건조화(drying)시키는 데 있다(Finstein, 1980). 짧은 기간에 많은 양의 폐기물을 처리할 수 있는 경제성이 있으며 퇴비화 목표를 동시에 달성하기 위하여는 퇴비화요소(composting elements)를 제어하여 분해속도를 빠르게 진행시켜야 한다. 또한 퇴비화의 공정제어효과는 퇴비화 매체종류에 따라 달라진다.

안정화와 병원균 사멸은 퇴비화의 최고온도를 유지함으로써 달성할 수 있다. 그러나 이는 최종 퇴비의 균질성을 보장할 수 없고 오랜 시간이 소모된다. 따라서 짧은 기간에 분해율을 높이기 위하여 미생물성장에 적합한 최적온도를 유지하는 방법이 제시되었다. 이를 위한 공정제어수단으로 공기공급량 제어방식이 있다. 공기공급량 제어방식은 최적온도를 지속적으로 유지하도록 온도에 따라 공기공급량을 조절하는 방법으로, 운전이 간단하고 제어효과를 판단하기 쉬운 장점이 있다. 이 방식의 제어효과는 기존의 기질분해율 위주의 분석보다는 미생물의 대사과정에 관련되는 기질, 물, 열수지간의 상호관련성으로 분석하는 방법이 정확하다.

본 연구에서는 온도제어 공기공급방식을 고형폐기물에 적용하여 공정단계별 기질수지, 물수지, 열수지의 변화과정을 일정공기 공급방식과 비교하여 제어효과와 최적온도를 분석하였다. 이러한 연구결과는 도시고형폐기물의 퇴비화 뿐만 아니라 슬러지를 포함한 다른 유기질 퇴비화에도 유용하게 이용될 수 있을 것이다.

2. 온도제어 공기공급방식의 적용목표

공기공급량 조절방식에는 일정공기량을 연속적으로 주입하는 일정공기공급방식(Constant Aeration Method)과 유입공기량을 온도에 따라 조절하는 온도제어 공기공급방식(Temperature Feedback Aeration Method)이 있다.

일정공기공급방식은 미생물 대사활동에 필요한 이론공기량만을 공급함으로써 유출열손실을 최소화하여 최고온도에 도달함을 목표로 한다. 이 방식은 최고온도에서 병원균 사멸이 용이하고 조작이 간단하다는 장점이 있다. 그러나 퇴비화 최적온도를 초과하게 되어 반응률이 낮아지는 단점이 있다. 이에 비하여 온도제어 공기공급방식은 제어온도에 따라 유입공기량을 조절하여 퇴비화 최적온도에서의 반응률을 높이고자 한다. 최적온도 유지를 위하여 유입공기량을 조절하는 제어방식은 Rutgers Process라는 명칭으로 Finstein(1980)이 제시하였다. 이 방식의 초기에는 일정공기공급방식과 같이 이론공기량으로 최적온도에 도달한다. 최적온도 이상에서는 공기량을 과잉공급하여 열손실을 높임으로써 생물학적 최적온도를 지속적으로 유지한다. 이 과정에서 과잉공급된 공기의 유출시 일정공기공급방식에 비하여 수분제거량이 많아지

므로 매체를 건조시키는 효과도 있다. 최적온도 이하로 온도가 내려가면 다시 공기공급량을 줄여서 최적온도를 유지하게 된다.

3. 실험장치 및 방법

3.1 실험장치

반응조는 투명아크릴 재질의 원통형 이중반응조로 제작하였다. 시료가 담겨지는 내부반응조는 두께 5mm, 직경 33cm, 높이 45cm이며, 내부반응조벽에서의 열손실을 줄이기 위한 외부반응조는 두께 5mm, 직경 44cm, 높이 60cm이다. 내부반응조의 시료하단 1/4지점에 온도센서를 설치하여 제어박스로 연결하고 반응조온도에 따라 유입공기량이 자동으로 조절되도록 하였다. 반응조 옆면에는 시료채취구를 설치하였다.

3.2 실험 및 분석방법

시료는 서울시 서초구 삼호아파트단지 폐기물을 수거하여 퇴비화성 물질을 선별하였다. 여기에 종이와 톱밥의 보조재를 첨가하고 전처리하여 C/N비 19.9, 수분함량 64.7%, pH 7로 조절하였다. 수분함량, pH, C/N비가 미리 조절된 시료를 두개의 반응조에 16kg씩 넣었다. 공기공급률은 일정공기공급방식의 반응조에는 7L/min으로 연속주입하고, 온도제어공기공급방식의 반응조에는 50℃를 제어온도로 하여 50℃ 이하에서는 7L/min을, 50℃ 이상에서는 최대 26.4L/min을 주입하였다. 분석시료 채취 후 반응조를 매일 1회 회전시켜 시료가 균질하게 섞이도록 하였다.

시료성분중 수분함량, 작열감량, 킬달질소, pH, TOC의 측정은 농촌진흥청 토양화학분석법(농업기술연구소, 1988)을 이용하였다. 탄수화물은 항온추출법(Yoshida , 1979)으로 추출 후 비

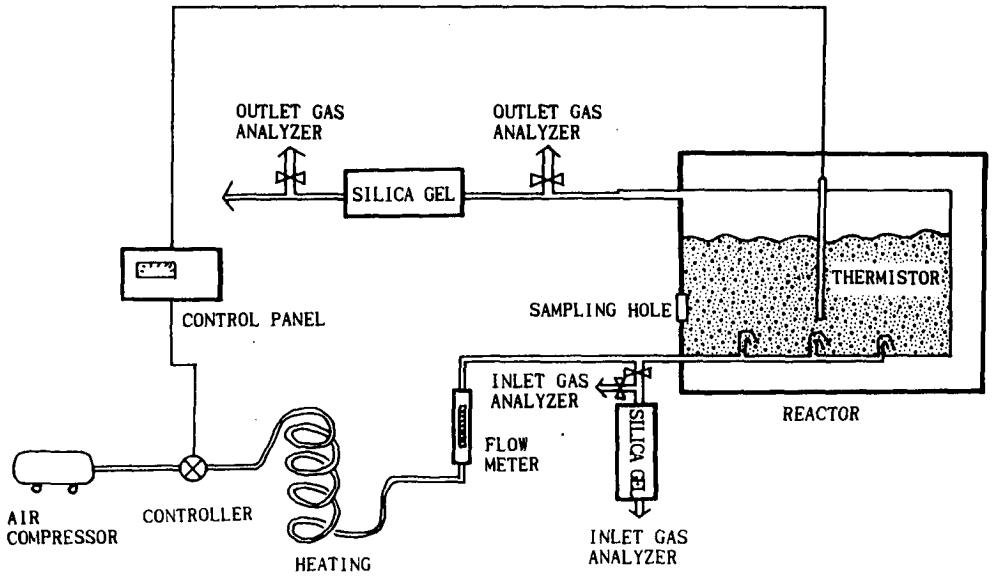

Fig. 1 Schematic diagram of experimental apparatus

색법(Dubois, 1956)으로 분석하였으며, 지질은 일본약학회의 위생시험법주해(1980)를 이용하였다. 단백질은 질소량에 일정계수(0.625)를 곱한 값으로 계산하였다(Plat, 1984; Regan, 1973).

유입공기와 유출공기의 O_2 농도, CO_2 농도, 온도, 습도, 유량은 6시간 간격으로 측정하였으나 온도 변화가 심할 경우에는 확인시마다 측정하였다.

4. 결과 및 논의

4.1 온도변화

온도제어 공기공급방식(Temperature Feedback Aeration Method, TFAM)과 일정공기 공급방식(Constant Aeration Method, CAM)에 따른 측정시간별 온도변화는 〈Fig. 2〉와 같다.

본 연구에서는 제어온도인 50℃를 기준으로 실험초기에서 최고온도까지를 초기온도상승대(initial heating stage), 최고온도에서 50℃까지를 고온대(thermophilic stage), 50℃에서 40℃까지를 고온대에서 중온대로의 전이온도대(transition stage), 40℃ 이하를 중온대(mesophilic stage)로 구분하였으며, 각 온도대의 기준온도에서 ±1℃를 고려하여 온도대를 설정하였다.

본 연구의 온도곡선은 초기 1일과 2일의 고온대에서 최고 피크와 45℃ 부근에서 완만한 피크가 나타나고 있으며, 반응초기의 중온대 단계는 생략되고 있으며 이는 회분식 반응조퇴비화의 온도곡선의 특성과 일치한다. (Sikora, 1983; Plat, 1984)

시료분석 결과와의 비교가 용이하도록 각 온도대를 24시간 단위로 구분한 지속일수는 〈Table 1〉과 같다. 실험초기부터 고온대까지의 양 공기공급방식의 지속일수는 4일간으로 같으나, 전이온도대는 일정공기공급방식이 5일간으로 온도제어공기공

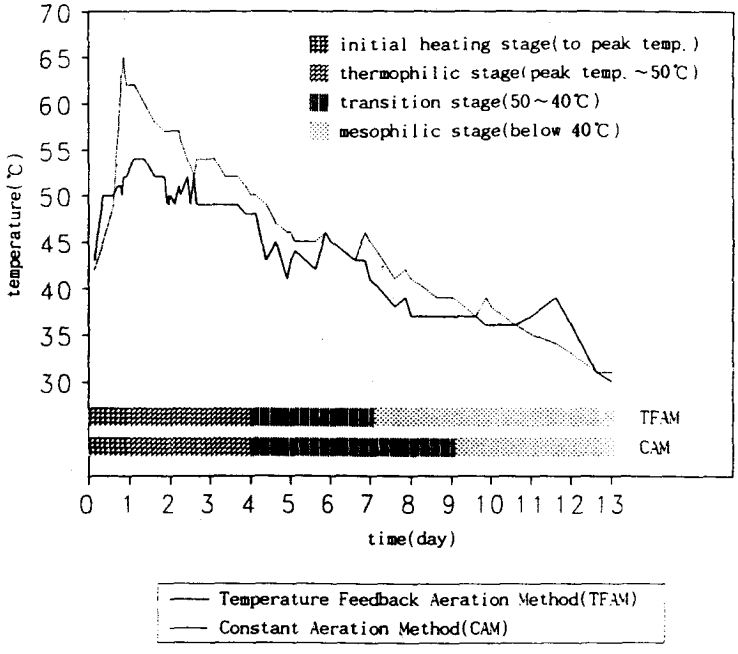

Fig. 2 Variation of temperature during composting

Table. 1 Period of temperature stages

(unit : day)

temperature stage	period	
	temp. feedback aeration method	constant aeration method
initial heating stage	1	1
thermophilic stage	3	3
transition stage	3	5
mesophilic stage	6	4

급방식에 비하여 2일이 길다.

4.2 물질수지(Material Balance)

4.2.1 기질분해

4.2.1.1 기질분해량

본 연구에서 기질은 총시료, 건조시료, 휘발성 물질로 분류하고, 휘발성 물질은 탄수화물, 지질, 단백질, 기타유기질의 유기성분으로 나누어 분석하였다.

공기공급방식에 따른 시간별 잔류기질의 조성비는 〈Fig. 3〉~〈Fig. 5〉와 같다.

〈Fig. 5〉 Decomposition of organic components in the constant aeration method

실험종료 후의 기질감소율은 온도제어 공기공급방식과 일정공기공급방식별로 총시료는 49.4%, 34.4%, 건조시료는 29.3%, 25.3%, 휘발성 물

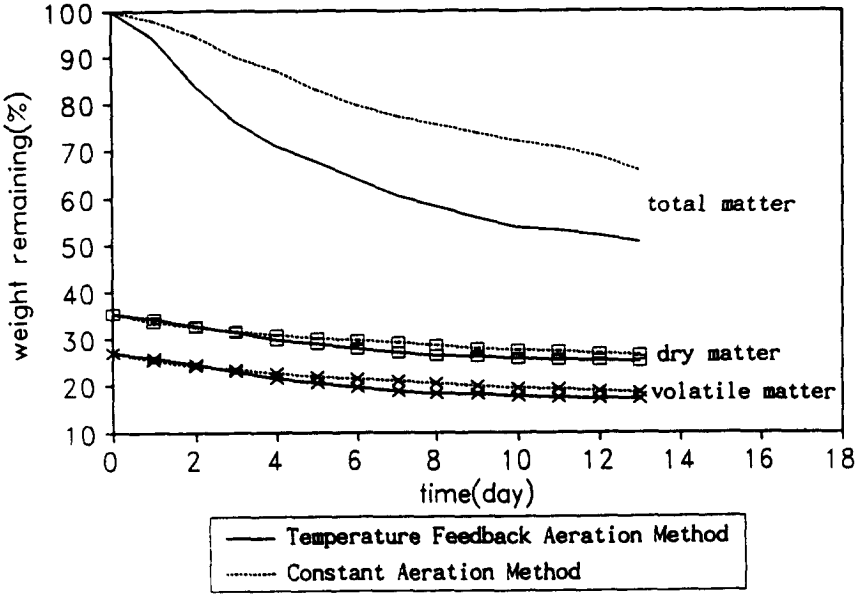

Fig. 3 Decomposition of total, dry and volatile matter during composting

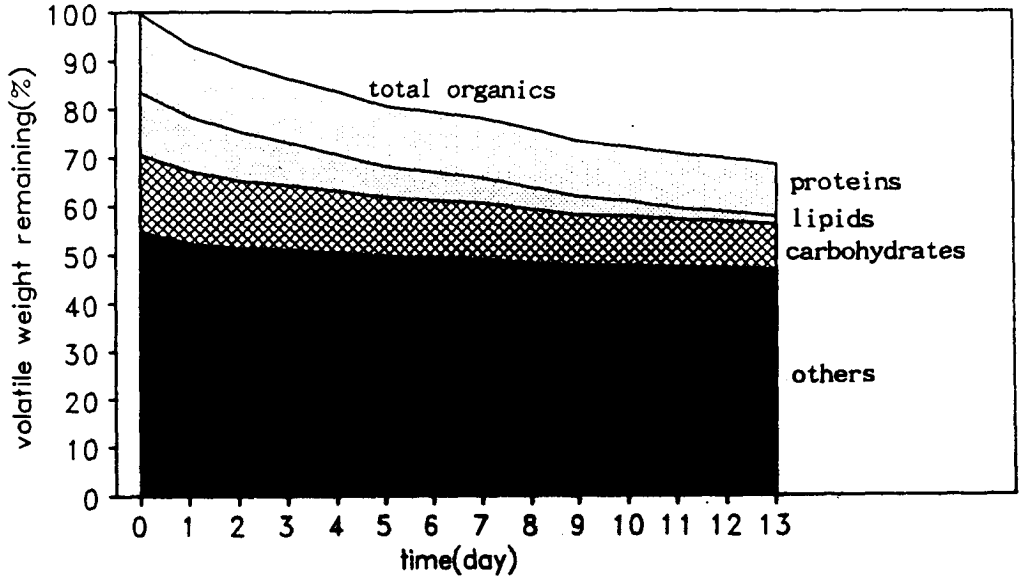

Fig. 4 Decomposition of organic components in the temperature feedback aeration method

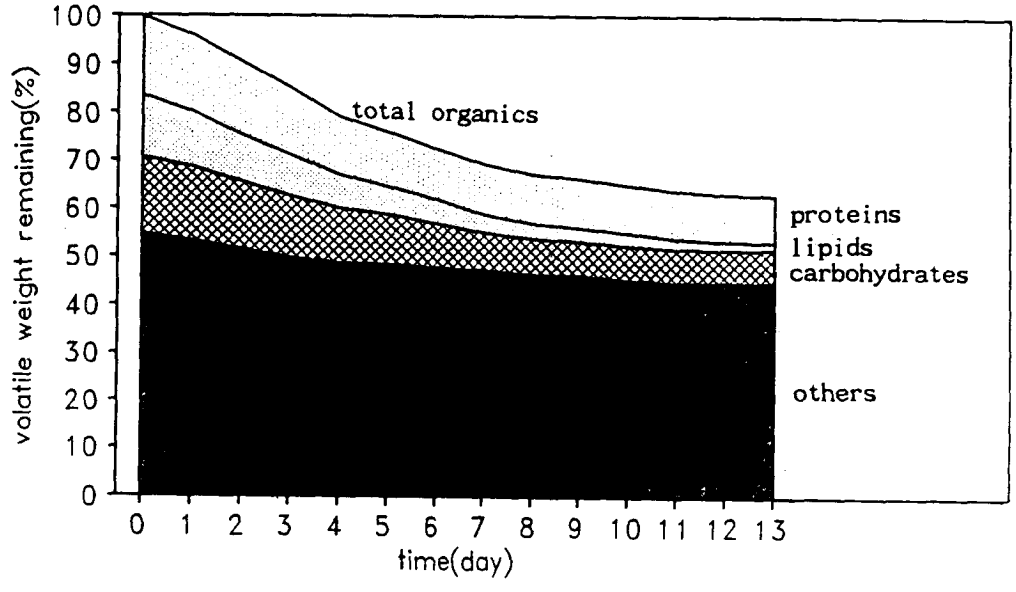

Fig. 5 Decomposition of organic components in the constant aeration method

질은 36.9 %, 31.2%로, 온도제어 공기공급방식의 감소율이 높다. 이는 Miller(1984)의 실험에서 휘발성 물질이 최적조건에서는 40%, 약간 부적합한 조건에서는 30 % 정도 감소한 결과와 거의 유사하다. 양 방식의 총시료가 건조시료보다 높게 감소하는 것은 기질감소와 함께 수분증발에, 건조시료가 휘발성 물질보다 낮게 감소하는 것은 건조시료내의 비분해성 물질에 기인한다고 판단된다.

성분별로는 양 방식이 지질, 탄수화물, 단백질, 기타유기질의 순으로 낮아지고 있다. 특히 양 방식 모두 지질은 86% 이상 감소하였으며, 이는 Plat (1984)와 Sayag(1987)의 연구에서 유기물질의 40~50%, 지질의 80% 이상이 감소한 결과와 유사하다. 기타유기질의 낮은 감소량은 본 연구의 시료에서 과일 · 채소류가 77%를 차지하고 있어 기타유기질중 셀룰로오스와 같이 분해가 어려운 유기질에 기인한다고 여겨진다.

각 온도대의 감소량을 온도대별 일평균 감소량으로 나타내면 〈Fig. 6,7〉과 같다.

총시료는 양 방식 모두 고온대에서 최대감소율이 나타나며, 초기온도상승대에서부터 전이온도대까지 온도제어 공기공급방식의 감소율이 높다. 건조시료와 휘발성 물질의 최대감소율은 온도제어 공기공급방식은 고온대에서, 일정공기공급방식은 초기온도상승대에서 나타나며, 고온대 이후에는 온도제어 공기공급방식의 감소율이 높다.

4.2.1.2 기질분해계수

시간에 대한 잔류기질량이 1차 반응이면 잔류기질량은 다음 식으로 나타낼 수 있다.

$$S_t = S_o \cdot \mathrm{Exp}(-k \cdot t) \quad \cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots (1)$$

S_t : 잔류기질량(M)

S_o : 초기기질량(M)

k : 기질분해계수(T^{-1})

t : 시간 (T)

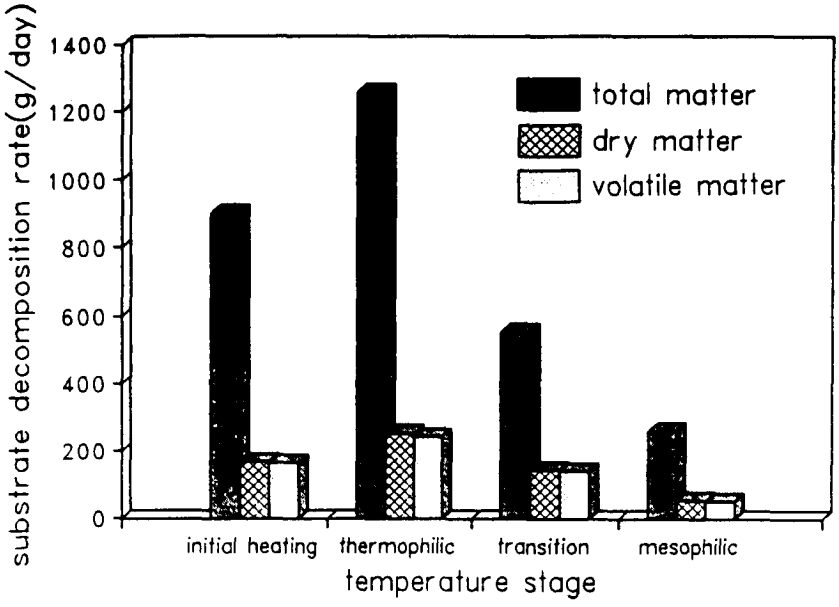

Fig. 6 Substrate decomposition rate with temperature stages in the temperature feedback aeration method

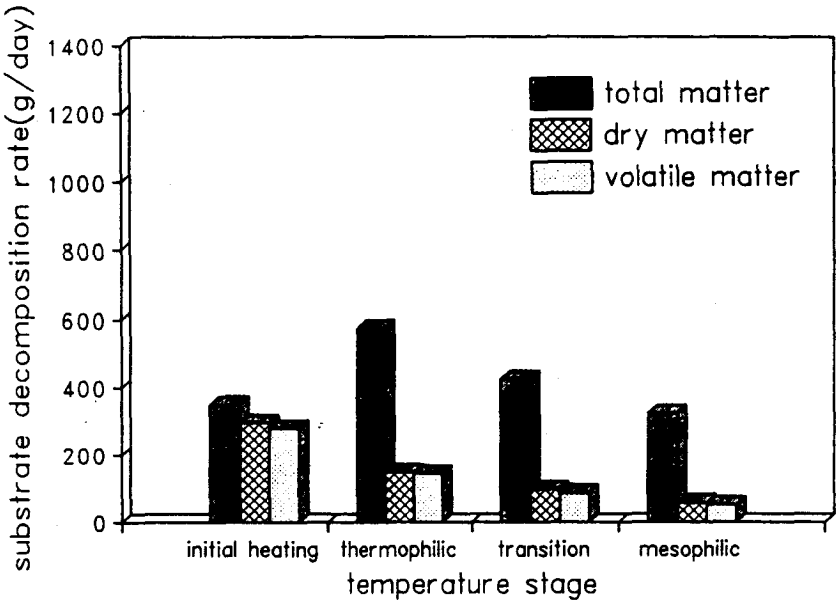

Fig. 7 Substrate decomposition rate with temperature stages in the constant aeration method

시간에 대한 잔류기질량은 온도대 구간별로 1차 반응을 가정할 수 있으며, 각 기질에 대한 온도대별 1차 기질분해계수의 산정 결과는 〈Table 2〉에 표기하였다.

온도제어 공기공급방식은 고온대가 최고분해온도대로 최고분해대 전후의 온도대 분해계수는 서로 비슷하고 높으나, 일정공기공급방식에서는 초기온도상승대의 최고분해계수 이후 급격히 감소하여 온도제어공기공급방식보다 낮아지고 있다. 따라서 최고분해온도대의 기간이 온도제어공기공급방식은 3일이나 일정공기공급방식은 1일로서, 온도제어공기공급방식의 총분해량이 많아진 것으로 판단된다.

유기성분별 분해계수변화는 유기성분 종류에 따라 다르게 나타나나, 전체적으로 온도제어공기공급방식은 고온대와 전이온도대에서 분해가 활발하다. 그러나 일정공기공급방식은 지질을 제외한 모든 유기성분의 분해계수가 초기온도상승대만 높고, 고온대는 온도제어공기공급방식의 전이온도대와 비슷하거나 이보다 낮다. 따라서 도시고형폐기물과 같이 다양한 성분이 혼합된 기질의 퇴비화는 각 온도대별로 유기성분 분해가 큰 온도제어공기공급방식이 적합하다고 판단된다.

4.2.2 물수지(Water Balance)

4.2.2.1 물수지의 비교

퇴비화공정에서의 물수지는 다음 식으로 나타낼 수 있다.

반응조내 수분량 =
시료내 수분량 + 대사수분량 —
(유출수분량 - 유입수분량)

$$W_w = So(tot)\cdot w' + Pw - (OW - IW) \quad \cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots (2)$$

W_w : 반응조내 수분량(gH_2O)
$So(tot)$: 초기 총시료무게(g)
w' : 수분함량(습량기준)

Pw : 대사수분량(gH_2O)
Iw : 유입수분량(gH_2O)
Ow : 유출수분량(gH_2O)

식(2)에 의한 반응조에서의 공기공급방식별 누가 수분량 변화는 〈Fig. 8,9〉와 같다.

〈Fig. 8,9〉에서 반응조내 수분변화는 유입과 대사수분보다는 유출수분에 많은 영향을 받고 있다. 이러한 영향은 온도제어 공기공급방식의 공기공급이 많은 1~4일에 크게 나타난다.

유입수분은 공기공급량에 의하여 결정되므로 온도제어 공기공급방식은 1~4일동안에 164.9~54.3g H_2O/day가 유입되며, 이후는 일정공기공급방식과 동일하다. 일정공기공급방식은 일정량의 공기가 공급되나, 유입공기의 상대습도에 따라 일별 55.2~39.1g H_2O/day의 수분이 유입된다.

대사수분은 양 방식이 고온대까지의 4일간이 다른 기간에 비하여 높다. 대사수분율은 초기 1일은 일정공기공급방식이, 2일부터 6일까지는 온도제어공기공급방식이 높으며, 7일 이후부터는 양 방식이 비슷하다.

유출수분은 다른 수분에 비하여 가장 큰 변화를 보이고 있다. 공기유출이 많은 온도제어 공기공급방식의 초기 4일동안은 일정공기공급방식에 비하여 213%나 많으며, 특히 2일에는 1,871.7g H_2O/day의 최대수분이 유출되고 있다. 일정공기공급방식도 5일까지 유출수분이 증가하나 온도제어 공기공급방식에 비하여는 낮다. 5일 이후의 유출수분은 양 방식이 비슷하게 감소한다.

4.2.2.2 시료의 수분함량

〈Fig. 8,9〉의 유출수분량에서 유입수분량과 대사수분량을 빼면 수분감소량을 구할 수 있다.

수분총감소량은 온도제어 공기공급방식이 6,250.4g H_2O, 일정공기공급방식이 3,626.1g H_2O로 온도제어공기공급방식이 172%나 많으며

Table. 2 Substrate decomposition rate constants

(unit : day-1)

	dry matter		volatile matter		organic components								others	
					carbohydrates		lipids		proteins					
	TFAM	CAM	TFAM	CAM	TFAM	CAM	TFAM	CAM	TFAM	CAM	TFAM	CAM	TFAM	CAM
initial heating stage	0.030	0.054	0.039	0.067	0.046	0.078	0.094	0.129	0.030	0.087	0.028	0.044		
thermophilic stage	0.052	0.027	0.068	0.035	0.107	0.044	0.164	0.161	0.116	0.040	0.029	0.010		
transition stage	0.033	0.019	0.045	0.024	0.135	0.034	0.205	0.137	0.047	0.023	0.012	0.010		
mesophilic stage	0.011	0.012	0.015	0.015	0.020	0.029	0.148	0.183	0.008	0.016	0.008	0.004		

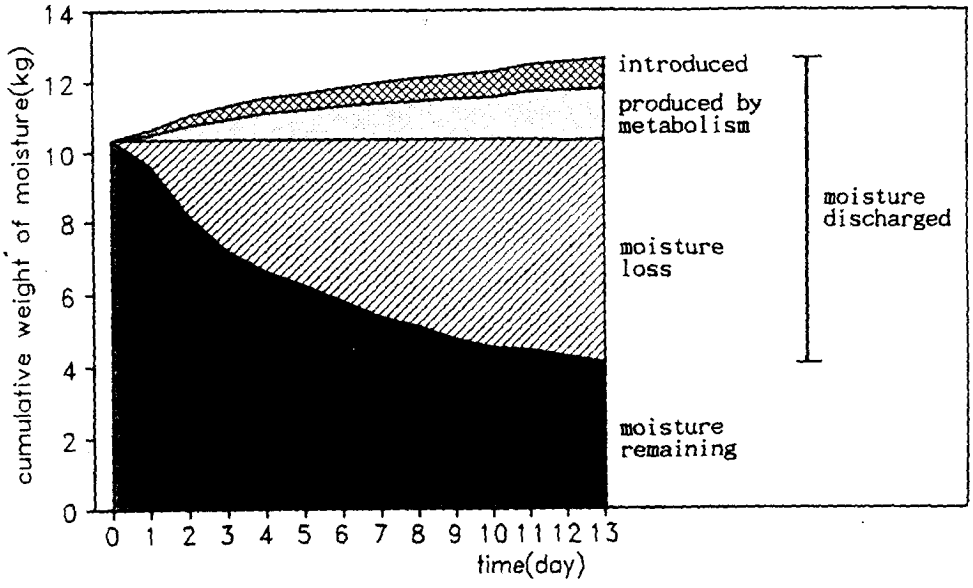

Fig. 8 Variation of total moisture in the temperature feedback aeration method

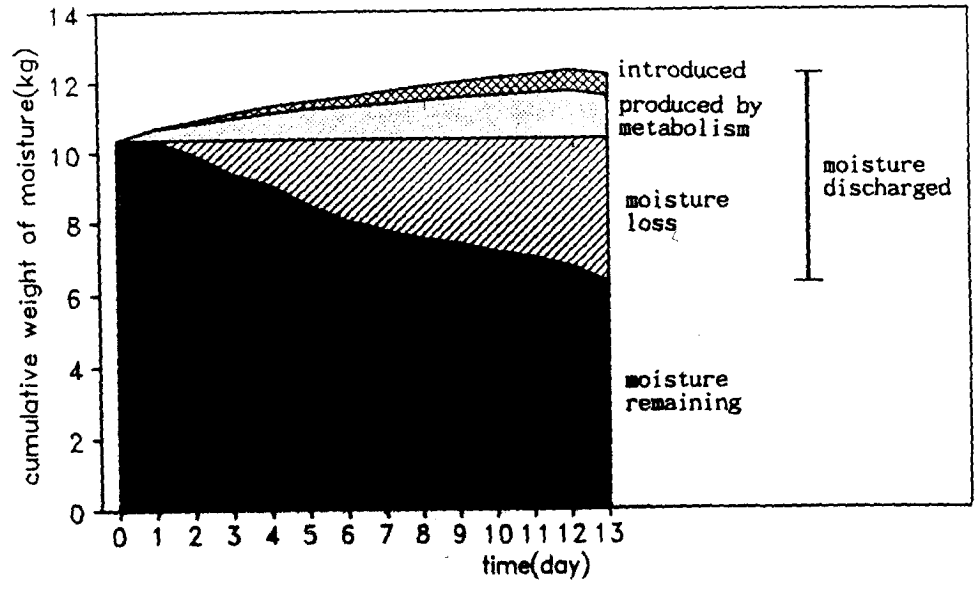

Fig. 9 Variation of total moisture in the constant aeration method

이는 유입건조공기비율인 133%를 초과한다.

온도대별 수분감소량은 온도제어 공기공급방식이 고온대에서 최대치가 나타나며, 전이온도대를 제외하고는 일정공기공급방식에 비하여 높다. 특히 고온대 감소량은 일정공기공급방식에 비하여 234%나 많아, 양 방식의 수분총감소량 차이의 65.9%를 차지하고 있다. 고온대와 전이온도대의 감소량은 각 공기공급방식의 수분총감소량에 대하여 온도제어 공기공급방식은 68.1%, 일정공기공급방식은 80.9%에 달하고 있어, 이 온도대에서 수분변화가 심하게 나타나고 있다. 이러한 수분변화로 인하여 최종수분량은 온도제어 공기공급방식과 일정공기공급방식이 초기수분량의 60.4%, 39.3%가 감소하여 최종수분함량은 50.7%, 59.8%로 나타났다.

4.3 열수지(Heat Balance)

4.3.1 열수지 분석

퇴비화공정에서 온도는 열발생과 열손실간의 상호작용의 결과이므로, 온도가 직접적으로 발생열량을 의미하지는 않는다. 따라서 공정제어로 인한 퇴비화 분해과정을 파악하기 위하여는 열수지(heat balance)분석이 더욱 정확하다.

유기물질분해시 발생하는 대사열은 반응조로의 전도, 유출공기의 수분증발, 대류 등의 손실열과 퇴비화매체에의 저장열로 구분된다.

따라서 퇴비화과정의 열수지는 다음과 같은 식으로 나타낼 수 있다.

$$Qm = Qs + Qe \quad \cdots\cdots (3)$$

Qm : 열발생률(cal/hr)
Qs : 열저장률(cal/hr)
Qe : 열손실률(cal/hr)

여기에서 대사에 의한 열발생률은 미생물에 의하여 소모되는 산소량과 거의 비례하므로(Liu, 1987), 다음과 같이 계산될 수있다.

$$Qm = Qo \cdot Go \cdot (Zo_2 - Z'o_2) \quad \cdots\cdots (4)$$

Qo : 산소소모량당 열발생량 (3,312.5cal/g O_2; Bach, 1987)
Go : 건조공기유입률(gAir/hr)
Zo_2 : 유입건조공기내 산소중량비(gO_2/g Air)
$Z'o_2$: 유출건조공기내 산소중량비(gO_2/g Air)

손실열은 유출공기의 대류열손실과 증발열손실, 반응조의 전도열손실로 나누어지므로 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$Qe = Q_a + Q_v + Q_c \quad \cdots\cdots (5)$$

Q_a : 유출공기의 대류 열손실률(cal/hr)
Q_v : 유출공기의 증발 열손실률(cal/hr)
Q_c : 반응조의 전도 열손실률(cal/hr)

$$Q_a = Ca \cdot Go \cdot (Tr - Ta) \quad \cdots\cdots (6)$$

Ca : 건조공기비열 (0.2406cal/g Air · ℃)
Go : 건조공기유출률(g Air/hr)
Tr : 반응조온도 (℃)
Ta : 유입공기온도 (℃)

$$Q_v = Cv \cdot Go \cdot (wo - wi) \quad \cdots\cdots (7)$$

Cv : 수분증발열 (539cal/gH_2O)
Go : 건조공기유출률(gAir/hr)
wo : 유출건조공기내 수분중량비(gH_2O/g Air)
wi : 유입건조공기내 수분중량비(gH_2O/g Air)

$$Q_c = U \cdot A \cdot (Tr - Ta) \quad \cdots\cdots (8)$$

U : 표면열전도계수 (1.71kcal/h · m^2 · ℃)
A : 반응조표면적 (m^2)
Tr : 반응조온도 (℃)
Ta : 유입공기온도 (℃)

퇴비화매체로의 저장열은 대사열과 손실열의 차로서 구할 수 있다. 또한 저장열은 퇴비화매체를 구성하는 건조시료와 수분에 저장되므로 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$Q_s = (S_{DM} \cdot Cs + W_w \cdot C_w) \cdot \frac{\partial T}{\partial t} \quad \cdots\cdots (9)$$

S_{DM} : 건조시료량 (g)

Cs : 건조시료비열 (0.29cal/g · ℃ (Bach, 1987))

W_w : 반응조내 수분량 (gH_2O)

C_w : 물비열 ($1cal/gH_2O \cdot ℃$)

t : 반응시간(hr.)

$\frac{\partial T}{\partial t}$: temperature gradient

이 식에서

$$\frac{\partial T}{\partial t} = \frac{Qs}{(S_{DM} \cdot Cs + W_w \cdot C_w)} \quad \cdots\cdots (10)$$

로 나타낼 수 있다.

4.3.2 열수지 변화

총대사열은 온도제어공기공급방식이 11,901kcal, 일정공기공급방식이 11,359kcal로 큰 차이는 없다. 일별 열발생률은 온도제어 공기공급방식의 2~4일간이 일정공기공급방식보다 높으며 이후부터는 유사하다. 최대대사열은 온도제어공기공급방식이 2일, 일정공기공급방식이 1일에 발생하여 양 방식 모두 실험초기에 나타나며, 온도제어 공기공급방식이 150%나 높다.

온도대별로는 총대사열에 대하여 고온대에서 온도제어 공기공급방식은 45.6 %, 일정공기공급방식은 36.6%를 차지한다. 여기에 초기온도상승대를 포함하면 각각 60.4%, 53.2%로, 4일동안에 대사열이 집중적으로 발생한다. 전이온도대까지 포함하면 83.3%, 86.2%에 달하여, 전이온도대에서 대사활동이 거의 완료되어 가고 있음을 알 수 있다.

온도제어 공기공급방식과 일정공기공급방식의 총손실열은 각각 13,628 kcal, 13,315kcal로 서로 비슷하며, 양 방식이 총대사열을 14.5~17.2% 초과하고 있다.

총손실열 중 반응조의 전도열손실이 가장 많아, 온도제어 공기공급방식은 63.9%, 일정공기공급방식은 74.3%를 차지하며, 수분증발 열손실은 각각 30.6%, 21.5%, 대류열손실은 5.5%, 4.2%의 순으로 낮아진다. 이는 Bach (1987)의 실험에서 전도열손실 62.1%, 증발열손실 34.6%, 대류열손실 3.3%인 결과와 유사하다.

이러한 열수지결과는 각 공기공급방식의 기본원리와 일치하고 있으며, 온도제어 공기공급방식이 제어온도를 유지하기 위하여 공기를 과잉공급하는 초기 4일동안 높은 대사열과 손실열을 나타낸 반면, 일정공기공급방식에서는 열손실을 최소화함으로써 초기 1일에는 온도제어 공기공급방식보다 대사열이 높았으나 이후에는 계속 감소하고 있다.

4.4 도시고형폐기물 퇴비화의 적정온도 선정

4.4.1 퇴비화 반응률의 비교

대사가스와 기질을 이용한 퇴비화 반응률은 기질에 대한 CO_2 배출률과 O_2 소모율로서 나타낼 수 있으며 이의 산정식은 다음과 같다.

기질당 CO_2 배출률 (r_{CO2}) =

$$\frac{Go \cdot (Z'_{CO2} - Z_{CO2})}{S} \quad \cdots\cdots (11)$$

S : 기질중량(g)

Z_{CO2} : 유입건조공기내 CO_2 중량비 (g CO_2/g Air)

Z'_{CO2} : 유출건조공기에 대한 CO_2 중량비 (g CO_2/g Air)

기질당 O_2 소모율 ($-r_{O2}$) =

$$\frac{Go \cdot (Z_{O2} - Z'_{O2})}{S} \quad \cdots\cdots (12)$$

Z_{O2} : 유입건조공기내 O_2 중량비 (g O_2/g Air)

Z'_{O2} : 유출건조공기에 대한 O_2 중량비 (g O_2/g Air)

공기공급방식별로 건조시료와 휘발성 물질의 CO_2 배출률(r_{CO2}), O_2 소모율($-r_{O2}$)을 계산한 결과는 〈Fig. 10, 11〉과 같다.

양 공기공급방식의 r_{CO2}와 $-r_{O2}$는 휘발성 물질이 건조시료보다 높으며, 또한 실험초기에 최고치가 나타나며 이는 CO_2 배출량과 O_2 소모량의 최대시기와 일치한다.

최고치 발생 후의 r_{CO2}와 $-r_{O2}$ 변화패턴에서, 온도제어공기공급방식은 2~4일, 5~7일과 8~13일사이의 변화폭이 작고 각 기간사이의 감소차가 커서 구별이 명확하며, 이는 온도대구분과 일치한다. 반면에 일정공기 공급방식은 최고치 이후 완만하게 감소하여 온도대간의 구별이 명확하지 않고, 온도제어 공기공급방식에 비하여 7일 후부터 높아진다. 이 시점은 온도제어 공기공급방식에서는 전이온도대가 끝나는 기간이며, 일정공기공급방식은 전이온도대의 중간기간에 해당된다. 따라서 온도제어 공기공급방식에서는 고온분해가 끝나 분해가 하강단계에 들어가고, 일정공기 공급방식에서는 전이온도대분해가 진행되고 있으므로 이 기간에서부터 일정공기 공급방식의 r_{CO2}와 $-r_{O2}$가 높아진다고 판단된다. 이는 7일까지의 휘발성 물질감소율이 온도제어 공기공급방식은 82.3%, 일정공기공급방식은 70.5%인 점에서도 나타난다.

4.4.2 이산화탄소배출률과 산소소모율에 미치는 온도의 영향

셀룰로오스 함유폐기물을 대상으로한 Regan(1973)의 연구에서 휘발성 물질에 대한 최적 r_{CO2}, $-r_{O2}$의 범위를 각각 0.16~0.20g CO_2/g VM · day, 0.12~0.14g O_2/g VM · day로 제시하고 있다. 이 범위를 본 연구에 적용

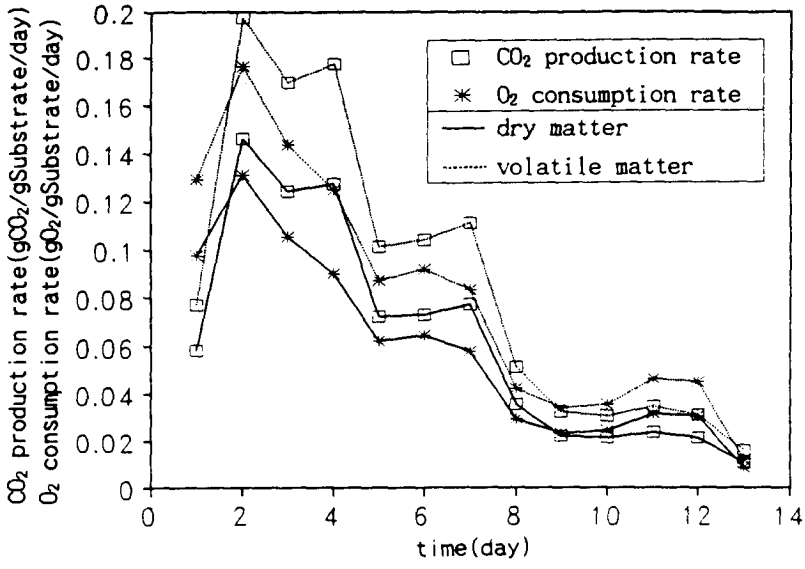

Fig. 10 Variations of CO_2 production and O_2 consumption rates in the temperature feedback aeration method

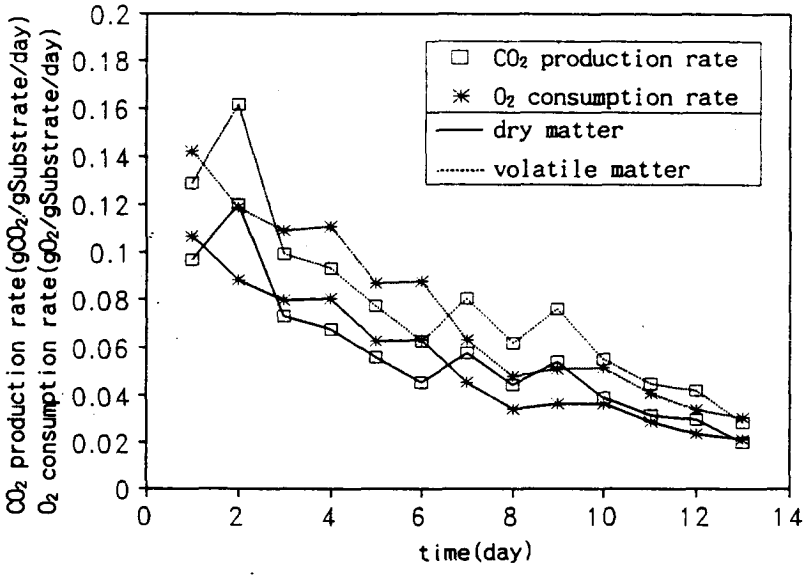

Fig. 11 Variations of CO_2 production and O_2 consumption rates in the constant aeration method

하면 r_{CO2}(VM)은 온도제어 공기공급방식에서는 고온대의 3일간, 일정공기 공급방식은 같은 온도대의 1일간이 해당되며, $-r_{O2}$(VM)은 각각 실험초기의 4일간과 2일간이 해당된다. r_{CO2}(VM)과 $-r_{O2}$(VM)의 최적범위가 동시에 적용되는 기간은 양 방식의 고온대로, 온도제어 공기공급방식은 고온대의 3일간이 모두 포함되나, 일정공기 공급방식은 고온대의 초기 1일만이 포함된다. 따라서 최적 r_{CO2}(VM), $-r_{O2}$(VM)을 동시에 충족하는 기간은 온도제어 공기공급방식이 길고, 양 방식이 동시에 해당되는 기간은 고온대의 초기 1일이다. 여기에서 고온대의 초기 1일의 온도제어 공기공급방식 온도범위가 50~54℃인 점을 고려하면, 우리나라의 도시고형폐기물 퇴비화에서는 고온대중에서도 50~54℃가 적정조건이라 판단된다. 퇴비화 최적온도는 매체종류에 따라 다르며, 이러한 최적 범위는 슬러지퇴비화 최적온도인 60℃(Nakasaki, 1987)보다는 낮다. 이는 우리나라 도시고형폐기물에 셀룰로오스함량이 높은 채소·과일류가 많이 포함되므로 슬러지에 비하여 분해가 용이한 물질이 줄어들며, 진균(fungi)에 의한 셀룰로오스분해는 40~50℃에서 활발하므로 슬러지의 최적온도보다 낮게 나타난다고 여겨진다. 분해가 어려운 리그닌(lignin)성분의 종이류가 많이 섞여 있는 도시고형폐기물 퇴비화에서 55℃ 이상에서는 분해율이 급속히 저하된다는 결과(Wilson, 1989)와 일치하고 있다.

최적온도 선정과정을 정리하면 〈Table 3〉과 같다.

Table. 3 Optimum temperature range in composting domestic solid wastes

method	recommended range of reaction rate (gGas/day·gVM)	days satisfying the recommended range of reaction rate	days satisfying two recommended ranges of reaction rate simultaneously	optimum temperature range
temp. feedbacck aeration method	r_{CO2} : 0.16~0.20	r_{CO2} : 2, 3, 4	2, 3, 4	50~54℃
		$-r_{O2}$: 1, 2, 3, 4		
constant aeration method	$-r_{O2}$: 0.12~0.14	r_{CO2} : 2	2	57~62℃
		$-r_{O2}$; 1, 2		

5. 결 론

본 연구는 서울시 고형폐기물을 대상으로 퇴비화 공정요소중에서 공기공급제어가 기질분해율, 물질수지, 열수지에 미치는 효과를 일정공기공급방식과 비교 분석하였다.

이러한 연구의 결과는 다음과 같다.

1) 온도변화

온도제어 공기공급방식과 일정공기 공급방식의 최고온도는 26.5시간의 54℃, 20.5시간의 65℃로, 양 방식의 고온대는 3일, 전이온도대는 각각 3일, 5일이며 중온대는 6일, 4일로 나타난다.

2) 물질수지

기질분해율은 온도제어 공기공급방식이 일정공기공급방식에 비하여 높다. 온도대별 일평균 최고분해율은 총시료는 양 방식이 고온대에서, 건조시료와 휘발성 물질은 온도제어 공기공급방식이 고온대, 일정공기 공급방식이 초기온도상승대에서 나타난다. 탄수화물, 단백질과 기타유기질은 온도제어공기공급방식의 분해율이 높으며, 지질은 양 방식 모두 86% 이상의 높은 분해율을 보이고 있다.

기질분해계수에서 온도제어 공기공급방식은 고온대가 최고분해대이며, 최고분해대 전후의 초기 온도상승대와 전이온도대는 서로 비슷하고 높은 분해계수를 나타낸다. 일정공기 공급방식에서는 초기온도상승대 이후 급격히 감소하여 온도제어 공기공급방식에 비하여 낮아진다.

3) 물수지

반응조내 수분량은 증발유출량의 영향을 많이 받으며, 온도제어 공기공급방식은 초기수분량의 60.4%가, 일정공기 공급방식은 39.3%가 감소하였다. 이에 따라 최종시료의 수분함량은 온도제어공기공급방식이 14%, 일정공기 공급방식이 4.9%가 감소하여 온도제어 공기공급방식의 건조효과가 높았다.

4) 열수지

대사열은 온도제어 공기공급방식이 일정공기 공급방식에 비하여 104.8%가 많으며 손실열은 양 방식이 대사열을 14.5, 17.2% 초과하고 있다. 손실열은 전도열손실, 수분의 증발열손실, 공기의 대류열손실 순으로 낮아진다. 이러한 분석결과는 온도제어 공기공급방식이 대사열을 최대로 유지하면서 손실열을 크게하고, 일정공기 공급방식이 손실열을 줄이면서 대사열을 최대로 유지하는 기본원리와 일치하고 있다. 그러나 일정공기 공급방식에서 열손실 최소화로 인한 온도상승이 미생물의 성장제한인자로 작용하여 2일부터 대사열이 감소한다.

5) 이산화탄소배출량, 산소소모량, 최적온도

CO_2 배출량과 O_2 소모량은 초기부터 크게 증가하여 고온대의 최고치 이후 전이온도대와 중온대 순으로 낮아지는 경향이다.

CO_2 배출률과 O_2 소모율의 최적조건을 동시에 포함하는 온도대는 고온대이며, 온도제어 공기공급방식은 3일간, 일정공기공급방식은 1일간이 해당된다. 이에 따른 우리나라 도시고형폐기물 퇴비화의 최적온도는 50~54℃로 평가된다.

참 고 문 헌

1) 농업기술연구소(1988), 〔토양화학분석법〕, 농촌진흥청.

2) 日本藥學會(1980), 〔衛生試驗法注解〕, 金原出版株式會社.

3) Bach, P. D., et al. (1987), "Thermal balance in composting operations", J. Ferment. Technol., 65(2), pp. 199-209.

4) Dubois, M., et al. (1956), "Colorimetric method for determination of sugars and related substance", Anal. Chem., 28(3), pp. 350-356.

5) Finstein, M. S., et al. (1980), Sludge Composting and Utilization : Rational Approach to Process Control, C-340-678-01-1, U. S. EPA.

6) Liu, Ming-Huei Phillip(1987), "Mathematical simulation of Rutgers composting strategy", Ph. D. Thesis, Rutgers University, New Brunswick, N. J.

7) Miller, F. C. (1984), "Thermodynamic and matric water potential analysis in field and laboratory scale composting ecosystem", Ph. D. Thesis, Rutgers University, New Brunswick, N. J.

8) Nakasaki, K., et al. (1987), "A new composting model and assessment of optimum operation for effective drying of composting material", J. Ferment. Technol., 65(4), pp. 441-447.

9) Plat, J. Y., D. Sayag and L. Andre(1984), "High-rate composting of wool industry wastes", Biocycle, 25(2), pp. 39-42.

10) Regan, R., et al. (1973), Cellulose Degradation in Composting, EPA-R3-73-029, U. S. EPA, Washington D. C.

11) Sayag, D. and L. Andre(1987), "Integrated waste management options", Biocycle, 28(6), pp. 56-58.

12) Sikora, L. J., M. A. Ramirez and T. A. Troeschel(1983), "Laboratory composter for simulation studies", J. Environ. Qual., 12(2), pp. 219-224.

13) Willson, G. B. (1989), "Combining raw materials for composting", Biocycle, 30(8), pp. 82-85.

14) Yoshida, T. and H. Kubota(1979), "Gel chromatography of water extract from compost", J. Ferment. Technol., 57(6), pp. 582-584.