

송풍량이 음식물쓰레기 발효건조에 미치는 영향

유정숙, 윤영만[†]

한경대학교 바이오가스연구센터

Effects of Air-flow Rate on Bio-drying of Food waste

Jung-Suk Yoo, Young-Man Yoon[†]

Biogas Research Center, Hankyong National University

(Received: Apr. 11, 2018 / Revised: Jun. 5, 2018 / Accepted: Jun. 7, 2018)

ABSTRACT: This study was carried out for 20 days in a bio-drying batch reactor under the blowing conditions of 0.75, 1.00, 1.25, and 1.50 L/min · kg in order to optimize the operating conditions for the bio-drying of food wastes. The decomposition rate of organic matter during the bio-drying operation period was analyzed using modified Gompertz model. The maximum organic degradation (P) was 2.31, 2.52, 2.27 and 1.88 kg at air flow rates of 0.75, 1.00, 1.25 and 1.50 L/min · kg, and the maximum organic degradation rate was 0.33, 0.45, 0.28, and 0.18 kg/day at 1.00, 1.25 and 1.50 L/min · kg, respectively, showing excellent organic decomposition efficiency at a air flow rate of 1.00 L/min · kg. The lag growth phase time (λ) of the bio-drying reactor was 2.10, 1.48, 1.15, and 1.06 days at 0.75, 1.00, 1.25 and 1.50 L/min · kg, respectively. The water removal rate in the operation of bio-drying reactor of food waste increased with the increase of air flow rate from the early stage of bio-drying to the middle stage, and the highest water removal rate was observed at the air flow rate of 1.00 L/min · kg at the end of bio-drying. The optimum air flow rate condition of bio-drying reactor was 1.00 L/min · kg.

Keywords: Food waste, Bio-drying, Organic decomposition, Air flow rate

초 록: 본 연구는 음식물쓰레기의 발효건조를 위한 최적 운전조건을 도출하기 위하여 0.75, 1.00, 1.25, 1.50 L/min · kg의 송풍조건에서 발효건조 회분식 반응기를 20일간 운전하였으며, Modified Gompertz 모델을 이용하여 발효건조 기간 중 반응기내에서의 유기물 분해반응속도를 분석하였다. 유기물 분해 반응속도 분석에서 최대 유기물 분해량 (P)은 송풍량 0.75, 1.00, 1.25, 1.50 L/min · kg에서 각각 2.31, 2.52, 2.27, 1.88 kg이었으며, 최대 유기물 분해속도 (R_m)는 송풍량 0.75, 1.00, 1.25, 1.50 L/min · kg에서 각각 0.33, 0.45, 0.28, 0.18 kg/day를 보여 송풍량 1.00 L/min · kg에서 우수한 유기물 분해효율을 보였다. 발효건조 반응기의 지체성장시간 (λ)은 송풍량 0.75, 1.00, 1.25, 1.50 L/min · kg에서 각각 2.10, 1.48, 1.15, 1.06 일로 나타나 0.75 L/min · kg의 적은 송풍조건에서 가장 긴 지체성장시간을 보여 송풍량의 증가는 지체성장시간을 단축시키는 것으로 나타났다. 음식물쓰레기 발효건조 반응기의 운전에서 수분 제거율은 발효건조 반응기 운전 초기에서 중기로 갈수록 송풍량 증가와 함께 증가하다가 발효건조 반응기 운전 말기에는 송풍량 1.00 L/min · kg에서 가장 높은 수분 제거율을 보여 발효건조의 최적 송풍조건은 1.00 L/min · kg으로 나타났다.

주제어: 음식물쓰레기, 발효건조, 유기물 분해, 송풍량

[†] Corresponding author(e-mail : yyman@hknu.ac.kr)

1. 서론

우리나라는 정책적으로 2013년 음식물쓰레기의 매립을 금지하고, 최근에는 「자원순환기본법」을 제정하면서 발생된 폐기물은 순환이용하거나 적정하게 처분하여 천연자원과 에너지 소비를 최소화하는 자연순환사회로의 전환을 위해 노력하고 있다. 우리나라 음식물쓰레기 발생량은 2015년 기준 14,220 톤/일로 약 90.4%가 재활용되고 있으며, 이중 약 41.6%가 사료화, 32.0%가 퇴비화, 약 16.8%가 바이오가스화 등으로 재활용되고 있다¹⁾. 음식물쓰레기의 퇴비화는 호기성의 생물학적 처리과정을 통해 유기물을 안정화시켜 농업생산 등에 이용하는 토양 개량제를 생산하는 방법으로 음식물쓰레기의 재활용 방법으로 널리 활용되고 있다. 안정적인 음식물쓰레기의 퇴비화를 위해서는 초기 수분함량이 55%에서 70% 범위로 조정되어야 하며, 초기 수분함량이 과다한 경우 호기성 조건이 불량하여 미생물의 활성이 떨어지는 문제가 발생하거나 침출수의 유출로 인하여 2차적인 환경문제를 야기하는 문제가 발생한다^{2,3,4)}. 따라서 음식물쓰레기의 초기 수분함량을 조절하기 위하여 톱밥 등의 수분조절재가 이용되고 있으며, 수분조절재는 음식물쓰레기의 퇴비화 과정 초기에 생성되는 각종 유기산에 대하여 완충제 역할을 수행하여 퇴비화 과정 중 적정한 pH(6-8)를 유지시킨다²⁾. 또한 수분조절재는 음식물쓰레기의 퇴비화 과정에서 퇴비단에 균일한 공극률과 통기성을 제공하여 미생물의 활성을 증가시키고 미생물 반응열에 의한 수분의 증발에 용이한 환경을 조성한다⁵⁾. 실제 음식물쓰레기 퇴비화를 위한 상용화 시설에서는 다량의 퇴비단을 적층하여 운전함에 따라 퇴비단의 물리적 압밀의 문제가 발생한다. 하부 퇴비단의 압밀화는 통기성을 불량하게 하고, 이로 인해 호기성 미생물의 활성 저하, 악취 및 침출수 발생 등의 문제를 일으킨다. 따라서 음식물쓰레기 퇴비화 시설에서는 이러한 문제를 경감시키기 위하여 송풍을 통한 공기공급과 기계적 교반을 실시하고 있다. 그러나 퇴비단 압밀에 의한 호기성 미생물의 활성 저하와 악취 및 침출수 유출의 문제가 지속적으로 발생하고 있는 실정이다. 따라서 최근에

는 효율적인 음식물쓰레기의 감량화 및 퇴비화를 위하여 발효건조 (Bio-drying) 기술에 대한 관심이 증가하고 있다⁶⁾.

발효건조 (Bio-drying) 기술은 유기물 중의 탄수화물, 지방, 단백질 등의 분해과정에서 발생하는 호기성 미생물의 반응열을 이용하여 수분을 증발·제거하는 기술이다⁷⁾. 발효건조 기술은 기본적으로 수분 증발을 위한 에너지를 원료 중의 유기물 분해를 통해 얻는다는 점에서 퇴비화 기술과 유사한 원리를 가지고 있으나, 공정의 효율 측면에서 교반 및 송풍량 제어를 통해 미생물의 반응열을 극대화 시키고, 증발수분의 배출을 원활히 하여 음식물쓰레기의 발효 및 건조 효율을 증가시키는 특성이 있다. 이러한 음식물쓰레기의 발효 및 건조효율의 증가는 퇴비화 반응기의 체류시간을 줄이고, 유기물의 분해 효율을 증가시켜 초기투자비 및 운전비 등 경제성을 크게 향상시키는 장점이 있다⁷⁾. 발효건조 과정에서 발효단의 온도는 미생물의 활성화 수준에 따라 중온 (Mesophilic), 고온 (Thermophilic), 냉각(Cooling) 상태로 단계적으로 전이되고, 이 과정에서 발생하는 미생물 반응열은 수분의 증발에 이용된다⁸⁾. 따라서 발효건조 과정에서 미생물의 활성화와 유기물의 분해 효율은 발효건조 효율을 평가하는 중요한 인자이다. 음식물쓰레기의 발효건조 과정에서의 물리화학성의 변화⁹⁾, 수분조절재, 송풍량, 온도가 발효건조 효율에 미치는 영향^{10,11,12,13)}, 발효건조에서의 미생물 성장의 변화¹⁴⁾ 등에 관한 연구가 보고되고 있다. 그러나 발효건조 과정에서의 유기물의 분해 효율은 매우 중요한 설계 및 운전 인자임에도 불구하고, 연구 사례가 미미한 상황이다. 일반적으로 기존의 연구자들이 보고하는 발효건조 과정에서 이화학성 분석의 결과는 음식물쓰레기와 수분조절재 혼합물의 정성적 특성에 대한 정보만을 나타낼 뿐, 발효건조 과정에서의 유기물 분해 속도를 파악하는 데는 한계가 있다. 특히, 발효건조 과정에서는 수분의 증발과 유기물의 분해가 동시에 일어남에 따라 발효건조 과정 중 유기물의 분해효율을 평가하기 위해서는 발효건조 반응기의 물질수지 분석을 통한 접근이 필요하다. 따라서 본 연구에서는 음식물쓰레기의 발효건조를 위한 최적의 운전조건을 파악하기 위하여 발효건조

반응기의 물질수지를 분석을 통해 송풍량에 따른 유기물 분해 효율을 평가하였다.

2. 재료 및 방법

2.1. 공시시료

본 연구에서는 경기도 용인시 백암면에 위치하는 음식물쓰레기 사료화 시설의 협잡물 제거 후 파쇄 단계를 거친 음식물쓰레기 탈수 케이크를 채취하여 사용하였다. 채취한 음식물쓰레기 탈수 케이크의 수분함량은 약 73%였으며, 톱밥을 수분조절제로 혼합하여 수분함량이 70%가 되도록 조절하여 발효건조 시험에 공시하였다. 본 연구에 사용한 음식물쓰레기, 톱밥, 수분 조절 후 혼합물의 고형물 함량 특성은 Table 1과 같다.

2.2. 발효건조 반응기 운전

음식물쓰레기 발효건조를 위하여 송풍량의 제어가 가능하도록 단열 재질의 총용적 69.8 L (가로 57 cm × 세로 36 cm × 높이 34 cm)의 회분식 발효건조 반응기를 Fig. 1과 같이 고안하였다. 발효건조 반응기의 운전은 수분함량 70%로 조정된 음식물쓰레기와 톱

밥의 혼합물 21.5 kg을 발효건조 반응기에 투입하였고, 투입 혼합물의 중량을 기준으로 각각 0.75, 1.00, 1.25, 1.50 L/min · kg로 송풍량을 제어하였다. 발효건조 반응기는 각각의 송풍량에 대하여 실내에서 20일간 운전하였으며, 운전기간 중 각각의 발효건조 반응기에서 일일 500 g씩 시료를 채취하여 분석에 사용하였다. 발효건조 반응기의 운전은 실내에서 진행하였으며, 운전기간 중 온도는 21.0~25.9℃, 상대습도는 20~23%의 범위에서 유지되었다.

2.3. 수분 및 유기물 제거량 분석

발효건조 과정에서의 수분 제거량과 유기물 (VS; Volatile solid) 분해량의 산출을 위하여 발효건조 반응기의 수분 및 유기물의 물질수지를 분석하였다. 발효건조 반응기의 수분 및 유기물 물질수지는 발효건조 반응기 운전일수의 경과에 따른 송풍과 유기물 분해열에 의한 수분 증발량, 유기물 분해량을 고려하였으며, 또한 분석시료의 채취에 의한 시료 유출량을 고려하였다. 발효건조 경과 일수에 따른 발효건조 반응기의 수분 제거량은 (식 1)과 (식 2)와 같다.

$$\begin{aligned}
 & \text{Mass of } W_t \\
 & = WC_{t-\text{measured}} \times \left(M_0 - \sum_{t=0}^n E_{t-1} + \sum_{t=0}^n S_{t-1} \right) \quad (\text{식 1})
 \end{aligned}$$

Table 1. Proximate analysis of food waste, saw dust, and mixture

Parameters	Bulk density	Moisture	Total solid	Volatile solid	Fixed solid
	(kg/L)	(% in f.b. ¹⁾ , w/w)		(% in d.b. ²⁾ , w/w)	
Food waste	0.91	73.76	26.24	79.52	20.48
Saw dust	0.58	39.43	60.57	99.34	0.66
Mixture	0.78	71.00	29.00	86.03	13.97

1) Fresh basis, 2) Dry basis.

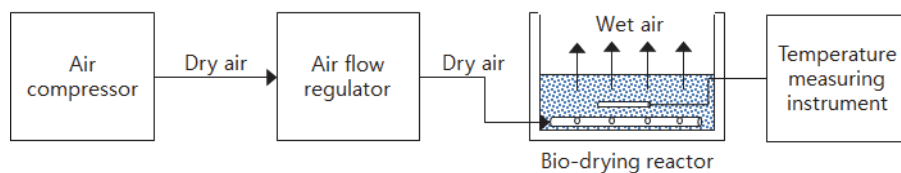


Fig. 1. Design of bio-drying reactor.

(식 1)에서 t 는 반응기의 운전기간 (day), $Mass\ of\ W_t$ 는 t 일에서의 수분량 (g), $WC_{t-measured}$ 는 t 일에 측정된 수분 함량 (% w/w), M_0 는 반응기에 투입한 음식물쓰레기와 톱밥 혼합물량 (kg), E_{t-1} 는 $t-1$ 일에서의 수분증발량 (kg), S_{t-1} 는 $t-1$ 일에서의 시료 채취량 (kg)이다.

$$W-removed_t = Mass\ of\ W_0 - Mass\ of\ W_t \quad (\text{식 } 2)$$

(식 2)에서 $W-removed_t$ 는 t 일까지의 누적 수분 제거량 (kg)이며, $Mass\ of\ W_0$ 는 반응기에 투입한 음식물쓰레기와 톱밥 혼합물의 수분량 (kg)이다. 발효건조 경과 일수에 따른 발효건조 반응기의 유기물 분해량은 (식 3)과 (식 4)와 같다.

$$\begin{aligned} & Mass\ of\ VS_t \\ & = VS_{t-measured} \times \left(M_0 - \sum_{t=0}^n E_t + \sum_{t=0}^n S_{t-1} \right) \quad (\text{식 } 3) \end{aligned}$$

(식 3)에서 t 는 반응기의 운전기간 (day), $Mass\ of\ VS_t$ 는 t 일에서의 VS량 (g), $VS_{t-measured}$ 는 t 일에 측정된 VS 함량 (% w/w), M_0 는 반응기에 투입한 음식물쓰레기와 톱밥 혼합물량 (kg), E_t 는 t 일에서의 수분증발량 (kg), S_{t-1} 는 $t-1$ 일에서의 시료 채취량 (kg)이다.

$$\begin{aligned} & VS-removed_t \\ & = Mass\ of\ VS_0 - Mass\ of\ VS_t \quad (\text{식 } 4) \end{aligned}$$

(식 4)에서 $VS-removed_t$ 는 t 일에 분해 유기물량 (kg)이며, $Mass\ of\ VS_0$ 는 반응기에 투입한 음식물쓰레기와 톱밥 혼합물의 유기물량 (kg)이다.

2.4. 유기물 분해 반응속도 분석

발효건조 기간 중 (식 3)과 (식 4)를 이용하여 누적 유기물 분해 곡선을 구하였으며, 누적 유기물 분해량 곡선은 Modified Gompertz 모델 (식 5)를 적용하여 SigmaPlot (SigmaPlot Version 10.0, Systat Software Inc., San Jose, California, USA)으로 최적화하였다(Lay et al., 1998). Modified Gompertz 모델 (식 5)에서 M

은 누적 유기물 분해량(Cumulative organic degradation, kg), t 는 발효건조 기간(days), P 는 최종유기물 분해량(Maximum organic degradation, kg), e 는 $\exp(1)$, R_m 은 최대 유기물 분해속도(Maximum organic degradation rate, kg/day), λ 는 지체성장시간(Lag growth phase time, days)을 나타낸다.

$$M = P \times \exp\left[-\exp\left(\frac{R_m}{P}(\lambda - t)e + 1\right)\right] \quad (\text{식 } 5)$$

2.5. 분석

발효건조 기간 중 각각의 발효건조 퇴비단의 무게를 1일 1회 전자저울(CAS DB-1H, CAS, Korea)을 이용하여 측정하였다. 또한 시료의 채취는 발효건조 퇴비단의 무게를 측정한 후 채취하였으며, 채취한 시료는 표준분석법 (APHA, 1998)에 따라 총고형물(TS; Total solid)과 휘발성 고형물(VS; Volatile solid)을 3회 반복으로 분석하였다.

3. 결과 및 고찰

3.1. 발효건조 반응기 운전

송풍량을 달리하여 20일간 운전한 음식물쓰레기의 회분식 발효건조 반응기에서 수분함량과 유기물 함량의 변화는 Table 2와 같다. 송풍량을 달리한 각각의 회분식 발효건조 반응기에 투입한 음식물쓰레기와 톱밥 혼합물의 초기 수분함량은 71.16~72.49% (평균 71.77%, 표준편차 0.61%)의 범위를 보였으며, 유기물 (VS)함량은 23.67~24.25%의 범위(평균 24.40%, 표준편차 0.62%)를 보였다. 따라서 송풍량 0.75, 1.00, 1.25, 1.50 L/min · kg에서 운전한 각각의 회분식 발효건조 반응기는 유사한 투입원료 조건에서 운전을 시작하였다. 운전 20일 후 송풍량 0.75, 1.00, 1.25, 1.50 L/min · kg에서 운전한 발효건조 반응기의 수분함량은 각각 11.10, 7.16, 6.88, 7.47%로 감소하였으며, 유기물 함량은 각각 67.78, 78.03, 77.59, 76.67%로 증가하였다. 전체 발효건조 반응기의 운전 기간 중 유기물의 분해에도 불구하고 운전일수

Table 2. Changes of moisture and volatile solid content during the bio-drying of food waste in the various air flow-rates

Treatment		Air flow rate (L/min · kg)							
		0.75		1.00		1.25		1.50	
Parameters		MC ¹⁾	VS	MC	VS	MC	VS	MC	VS
Unit		(% in f.b. ²⁾ , w/w)							
Operation time (days)	0	71.16	23.67	71.39	25.16	72.04	24.51	72.49	24.25
	5	61.54	32.00	65.25	28.16	62.26	32.93	64.92	30.25
	10	42.12	48.91	36.18	52.29	35.30	55.49	37.19	52.82
	15	29.13	56.74	13.56	72.12	11.83	71.55	8.97	72.17
	20	11.10	67.78	7.16	78.03	6.88	77.59	7.47	76.67

1) Moisture content, 2) Fresh basis.

가 경과함에 따라 유기물 함량이 증가하였으며, 이는 발효건조에 따른 수분함량의 감소로 원물 중의 유기물 함량이 높게 평가된 것이다. 이러한 현상은 Kwag 등에 의한 돈분 퇴비화 연구에서도 나타난 바 있으며, 음식물쓰레기의 퇴비화 연구에서 유기물의 함량을 측정하는 이화학적 특성 분석만으로는 유기물의 분해특성을 파악하는데 어려움이 있음을 시사한다¹³⁾.

3.2. 수분 제거율 및 유기물 분해율

발효건조 과정에서 각각의 반응기에서 수분 제거량과 유기물 분해량을 파악하기 위하여 발효건조 반응기의 물질수지를 분석하였으며, 발효건조 반응기의 운전 일수의 경과에 따른 수분 제거량과 유기물 분해량은 Table 3과 같다. 수분제거율은 운전일수 5일 경과 시 송풍량 0.75, 1.00, 1.25, 1.50 L/min · kg에서 각각 44.84, 48.80, 50.88, 45.62%로 송풍량 1.25 L/min · kg의 발효건조 반응기에서 가장 높았다. 운전일수 10일 경과 시에는 각각의 송풍량에 대하여 각각 81.31, 85.28, 85.35, 85.46%였으며, 운전일수 15일 경과 시에는 각각 90.33, 96.23, 96.65, 97.53%로 나타나 송풍량이 증가할수록 수분 제거 효율이 증가하는 것으로 나타났다. 그러나 운전일수 20일 경과 시에는 각각의 송풍량에서 각각 97.12, 98.31, 98.27, 98.10%로 나타나 최종 발효건조 음식물 퇴비의 수분 제거율은 송풍량 1.00 L/min · kg에서 가장 높았다. 또한 유기물 분해율은 운전일수 5일 경과 시 송풍량 0.75, 1.00, 1.25, 1.50 L/min · kg에서 각각

13.76, 37.34, 23.72, 17.45%로 송풍량 1.00 L/min · kg에서 가장 높았으며 송풍량이 1.00에서 1.50 L/min · kg으로 증가할수록 유기물 분해율이 감소하였다. 운전일수 10일 경과 시에는 각각의 송풍량에 대하여 각각 43.23, 39.75, 34.73, 31.65%로 송풍량 0.75 L/min · kg에서 급격한 유기물 분해율의 증가가 나타났으며, 송풍량이 0.75에서 1.50 L/min · kg으로 증가할수록 유기물 분해율이 감소하였다. 운전일수 15일 경과 시에는 각각의 송풍량에서 각각 43.23, 43.07, 40.04, 33.37%로 송풍량 0.75 L/min · kg에서 가장 높은 유기물 분해율을 보였으며, 송풍량의 증가와 함께 유기물 분해율은 감소하는 경향을 보여 운전일수 10일 경과 시와 유사한 경향을 나타내었다. 운전일수 20일 경과 시에는 각각의 송풍량에서 각각 46.77, 47.69, 42.51, 35.87%로 나타나 최종 유기물 분해율은 송풍량 1.00 L/min · kg에서 가장 높았으며, 송풍량 1.00 L/min · kg 이후 유기물 분해율이 급격히 감소하였다. 따라서 음식물쓰레기 발효건조 반응기의 운전에서 수분 제거율은 발효건조 반응기 운전 초기에서 중기로 갈수록 송풍량 증가와 함께 증가하다가 발효건조 반응기 운전 말기에는 송풍량 1.00 L/min · kg에서 가장 높은 수분 제거율을 나타냈으며, 유기물 분해율은 송풍량이 0.75에서 1.00 L/min · kg으로 증가하는 경우 약 0.92%의 유기물 분해율 증가가 나타났으며, 송풍량 1.00에서 1.50 L/min · kg으로 증가하는 경우 유기물 분해율이 뚜렷이 감소하였다. Jung 등은 음식물쓰레기 퇴비화에서 송풍량을 0.4에서 18 L/min · kg까지 증가시킨 경우 유기물과 수분의 함량 변화를 분석하였으며, 송풍량의 증가는 뚜렷한

Table 3. Changes of cumulative total weight, moisture and volatile solid removal during the bio-drying of food waste in the various air-flow rates

Treatment		Air flow rate (L/min · kg)							
		0.75		1.00		1.25		1.50	
Parameter		Cumulative reduction of total weight							
Unit		(kg)	(%) ¹⁾	(kg)	(%)	(kg)	(%)	(kg)	(%)
Operation time (days)	5	7.56	35.16	9.51	44.23	9.13	42.47	8.02	37.30
	10	14.64	68.09	15.24	70.88	15.05	70.00	14.97	69.63
	15	16.02	74.51	17.10	79.53	17.08	79.44	16.94	78.79
	20	17.24	80.19	17.67	82.19	17.46	81.21	17.16	79.81
Parameter		Cumulative moisture removal							
Unit		(kg)	(%)	(kg)	(%)	(kg)	(%)	(kg)	(%)
Operation time (days)	5	6.86	44.84	7.49	48.80	7.88	50.88	7.11	45.62
	10	12.44	81.31	13.09	85.28	13.22	85.35	13.32	85.46
	15	13.82	90.33	14.77	96.23	14.97	96.65	15.20	97.53
	20	14.86	97.12	15.09	98.31	15.22	98.27	15.29	98.10
Parameter		Cumulative volatile solid removal							
Unit		(kg)	(%)	(kg)	(%)	(kg)	(%)	(kg)	(%)
Operation time (days)	5	0.70	13.76	2.02	37.34	1.25	23.72	0.91	17.45
	10	2.20	43.23	2.15	39.75	1.83	34.73	1.65	31.65
	15	2.20	43.23	2.33	43.07	2.11	40.04	1.74	33.37
	20	2.38	46.77	2.58	47.69	2.24	42.51	1.87	35.87

1) % in fresh basis (w/w)

수분함량의 감소를 나타내는 반면, 유기물의 함량은 증가하는 결과를 보고한 바 있어 본 연구의 결과와 유사한 경향을 나타내었다¹⁵⁾. 발효건조 과정에서는 수분의 제거 기작은 송풍에 따른 물리적 수분 제거 기작과 유기물 분해에 따른 생물학적 반응열에 의한 수분 제거 기작이 동시에 작용한다⁷⁾. 일반적으로 송풍량에 따른 물리적 수분제거 기작만을 고려하는 경우 송풍량이 클수록 수분의 제거율은 증가하나, 본 연구에서 송풍량 1.00 L/min · kg에서의 수분 제거율이 가장 높게 나타나 송풍량에 따른 유기물의 분해율이 수분 제거 효율에 큰 영향을 미치는 것으로 판단된다¹¹⁾. 음식물쓰레기 발효건조 반응기의 총 무게 감량(수분 제거량 + 유기물 분해량)은 운전일수 5일에서 송풍량 0.75, 1.00, 1.25, 1.50 L/min · kg에 대하여 각각 35.16, 44.23, 42.47, 37.30%로 나타났으며, 운전일수 10일에서는 68.09, 70.88, 70.00, 69.63%, 운전일수 15일에서는 74.51, 79.53, 79.44, 78.79%, 운전일수 20일에서는 80.19, 82.19, 81.21, 79.81%로 나

타나 송풍량 1.00 L/min · kg에서 음식물쓰레기의 총 무게 감량이 가장 큰 것으로 나타났다.

3.3. 유기물 분해 반응 속도 분석

송풍량을 달리하여 운전한 음식물쓰레기 발효건조 반응기의 물질수지 분석을 통해 얻은 누적 유기물 분해곡선에 Modified Gompertz 모델(식 5)을 적용하여 유기물 분해 반응속도를 분석하였다. 누적 유기물 분해 반응속도 곡선은 Fig. 1과 같다. 음식물쓰레기 발효건조에서 유기물 분해 속도는 운전일수 5일 경과 시에 급격히 증가하여, 운전일수 10일 경과 시에는 분해속도가 급격히 감소하여 대부분의 유기물이 10일 이내에 분해되는 것으로 나타났다. 누적 유기물 분해곡선에 Modified Gompertz 모델을 최적화하여 얻은 주요 반응속도 인자는 Table 4와 같다. 최대 유기물 분해량(P)은 송풍량 0.75, 1.00, 1.25, 1.50 L/min · kg에서 각각 2.31, 2.52, 2.27, 1.88 kg으

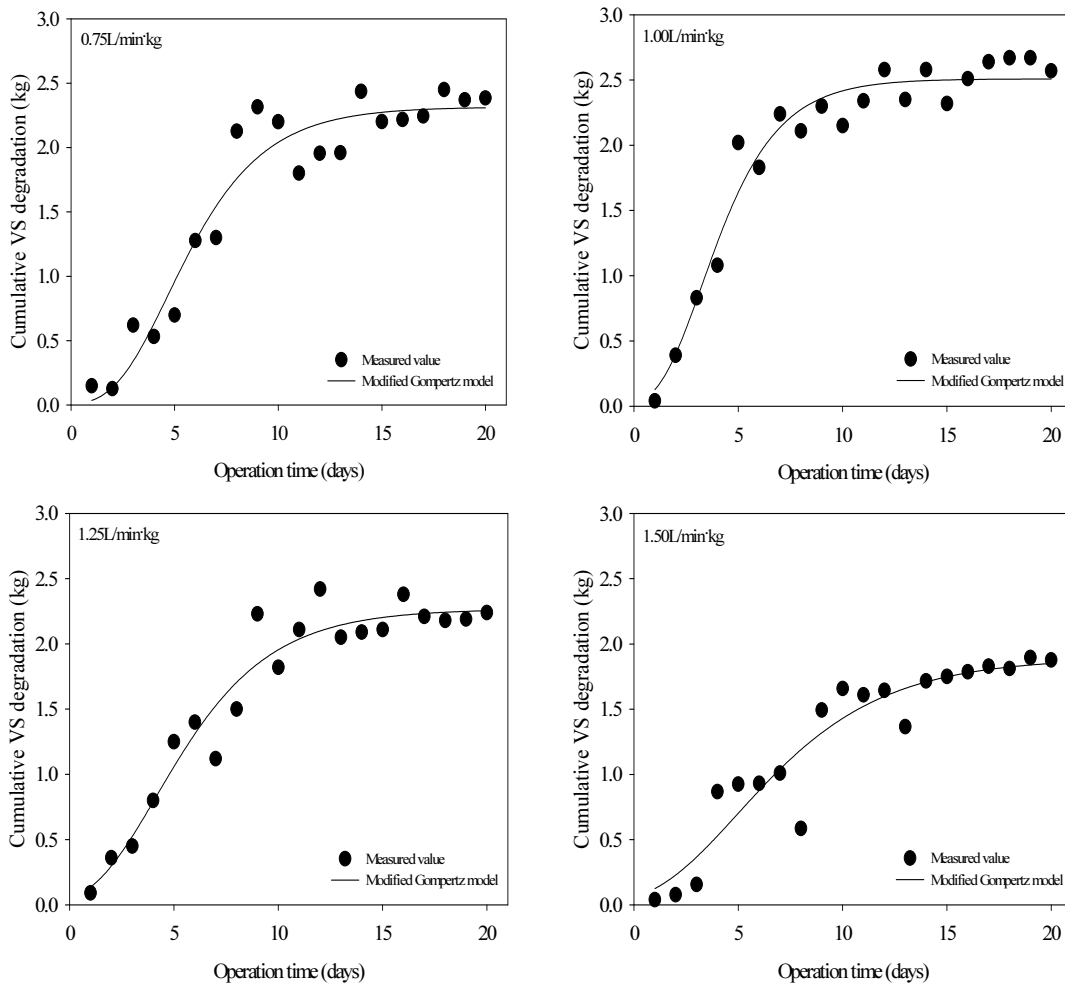


Fig. 1. Cumulative organic degradation curves in the various air-flow rates.

Table 4. Parameters obtained by model optimization from the cumulative organic degradation curve in bio-drying of food waste

Air flow rate (L/min · kg)	P ¹⁾ (kg)	R _m ²⁾ (kg/day)	λ ³⁾ (days)	Organic reduction ratio (% in f.b. ⁴⁾ , w/w)
0.75	2.31	0.33	2.10	45.48
1.00	2.51	0.45	1.19	46.37
1.25	2.27	0.27	1.11	43.02
1.50	1.89	0.18	1.00	36.33

1) Maximum organic degradation, 2) Maximum organic degradation rate, 3) Lag growth phase time, 4) % in fresh basis (w/w)

로 송풍량 1.0 L/min · kg에서 가장 많은 유기물 분해량을 보였으며, 최대 유기물 분해속도 (R_m)는 0.33, 0.45, 0.28, 0.18 kg/day를 보여 송풍량 1.00 L/min · kg에서 가장 높았다. 송풍량 변화에 따른 발효건조 반응기의 지체성장시간 (λ)은 각각의 송풍량에서 각

각 2.10, 1.48, 1.15, 1.06 일로 나타나 0.75 L/min · kg의 적은 송풍조건에서 가장 긴 지체성장시간을 보였으며, 송풍량의 증가는 지체성장시간을 단축시키는 것으로 나타났다.

4. 결론

본 연구는 음식물쓰레기의 발효조건을 위한 최적 운전조건을 도출하기 위하여 0.75, 1.00, 1.25, 1.50 L/min · kg의 송풍조건에서 발효건조 회분식 반응기를 20일간 운전하였다. 각각의 송풍조건에서 음식물쓰레기의 발효건조의 효율은 물질수지 분석을 통해 반응기내 수분 제거 및 유기물 분해량을 분석하였으며, Modified Gompertz 모델을 유기물의 분해반응속도를 분석하였다. 유기물 분해 반응속도 분석에서 최대 유기물 분해량(P)은 송풍량 0.75, 1.00, 1.25, 1.50 L/min · kg에서 각각 2.31, 2.52, 2.27, 1.88 kg으로 송풍량 1.0 L/min · kg에서 가장 많은 유기물 분해량을 보였으며, 최대 유기물 분해속도 (R_m)는 각각 0.33, 0.45, 0.28, 0.18 kg/day를 보여 송풍량 1.00 L/min · kg에서 가장 높았다. 송풍량 변화에 따른 발효건조 반응기의 지체 성장시간 (λ)은 각각의 송풍량 0.75, 1.00, 1.25, 1.50 L/min · kg에서 각각 2.10, 1.48, 1.15, 1.06 일로 나타나 0.75 L/min · kg의 적은 송풍조건에서 가장 긴 지체 성장시간을 보였으며, 송풍량의 증가는 지체성장시간을 단축시키는 것으로 나타났다. 또한 음식물쓰레기 발효건조 반응기의 운전에서 수분 제거율은 발효건조 반응기 운전 초기에서 중기로 갈수록 송풍량 증가와 함께 증가하다가 발효건조 반응기 운전 말기에는 송풍량 1.00 L/min · kg에서 가장 높은 수분 제거율을 보여 발효건조의 최적 송풍조건은 1.00 L/min · kg으로 나타났다. 그러나 발효건조에서 기계적 송풍량의 증가는 전력 소비량 증가의 주요한 원인으로 발효건조 공정의 경제성을 향상시키기 위해서는 송풍설비 용량을 최소화하는 것이 합리적이다. 따라서 음식물쓰레기의 발효건조 공정의 설계 및 설치에 있어서 송풍시설의 용량과 발효건조 효율을 비교하여 경제성 있는 송풍조건에 대한 추가적인 연구가 요구된다.

사 사

본 연구는 환경부 「환경정책기반공공기술개발사업」의 연구비지원(과제번호 : 2015001900001)에 의해 수행되었습니다.

References

1. Ministry of Environment, "The reuse and reduction of food waste", (2017).
2. Haug, R. T., "The practical handbook of compost engineering", CRC Publishers, Ltd., Boca Raton, Florida, USA. (1993).
3. Morin, S., Barrington, S., Adhikari, B. and Gregoire, B., "The development of an urban composter", In: Proceedings from the September 2004 Technical Meeting, Composting Council of Canada, Toronto, Ontario. (2004).
4. Chang, K. W., Lee, I. B. and Lim, J. S., "Changes of physico-chemical properties during the composting of korean food waste", J. of KOWREC, 3(1), pp. 3~11. (1995).
5. Pace, M. G., Miller, B. E. and Farrell-Poe, K. L., "The Composting Process". Utah State University Extension, Logan, Utah, USA. (1995).
6. Won, J. S., Lee, S. M., Ra, J. D., Seo, G. T. and Jang, C. M., "Evaluation of a module-type drying apparatus for the composting of food waste", J. of Korea Society of Waste Management, 32(2), pp. 200~206. (2015).
7. Park, J. R., Bae, S. J., Lee, H. H., Hong, S. C., Jang, S. H. and Lee, D. H., "Recent trends in bio-drying technology and physico-chemical characteristics of residue from SRF production facilities", J. of Korea Society of Waste Management, 32(5), pp. 415~428. (2015).
8. Cai, L., Chen, T. B., Gao, D., Zheng, G. D., Liu, H. T. and Pan, T. H., "Influence of forced air volume on water evaporation during sewage sludge bio-drying", Water Res. 47(13), pp. 4767~4773. (2013).
9. Seo, J. Y., Park, J. W. and Lee, Y. H., "Effects of operating temperatures on decomposition and physico-chemical properties of food wastes", J. of KOWREC, 8(1), pp. 97~102. (2000).
10. Adhikari, B. K., Barrington, S., Martinez, J. and

- King, S., "Effectiveness of three bulking agents for food waste composting", *Waste Management*, 29, pp. 197-203. (2009).
11. Zhang, D. Q., He, P. J., Jin, T. F. and Shao, L. M., "Bio-drying of municipal solid waste with high water content by aeration procedures regulation and inoculation", *Bioresource Technology*, 99, pp. 8796-8802. (2008).
12. Kim, J. D., Park, J. S., In, B. H. and Kim, D., Namkoong, W., "Evaluation of pilot-scale in-vessel composting for food waste treatment", *Journal of Hazardous Materials*, 154, pp. 272-277. (2008).
13. Kwag, J. H., Kim, J. H., Jeong, K. H., Cho, S. H., Ahn, H. K., Choi, D. Y., Jeong, M. S., Lee, S. C., Kang, H. S. and Ra, C. S., "A study on the characteristics using pig manure under aerobic air flow rate during composting", *J. Lives. Hous. & Env.*, 17(2), pp. 131-138. (2011).
14. Cai, L., Chen, T. B., Gao, D. and Yu, J., "Bacterial communities and their association with the bio-drying of sewage sludge", *Water Research*, 90, pp. 44-51. (2016).
15. Jung, J. H. and An, J. H., "The influence of air feed rate on the composting process of food waste", *J. of KSEE*, 23(6), pp. 1013-1021. (2001).