



ORIGINAL PAPER

원저

Vermicomposting에 의한 음식물 쓰레기의 처리

이주삼[†], 김만중, 김남천*연세대학교 응용과학부, 서울보건대학 환경관리과*
(2005년 7월 8일 접수, 2005년 8월 12일 채택)

Treatment of Food Wastes by Vermicomposting

Ju Sam Lee[†], Man Joong Kim, Nam Chun Kim*

Division of Applied Science, Yonsei University, Dept. of Environment Engineering, Seoul Health College*

ABSTRACT

The effects of the processing mixture of food wastes and various organic wastes when vermicomposted on earthworm(*Eisenia foefida*) growth, the cast production amounts and the chemical properties of casts were evaluated. The substrates used in this experiments were cow manure, pig manure sludge, fermented pig manure with sawdust, nightsoil sludge, and sewage sludge and were respectively mixed with food wastes at a ratios of 50:50(v/v). The control consisted of food wastes alone without other wastes. All of earthworm died in the food wastes 100%, therefore the process of food wastes alone by vermicomposting was impossible in this experiment. Worm cast produced sufficiently contained quantities of available phosphorus, exchangeable potassium, exchangeable magnesium, and cation exchange capacity. The increase of earthworm's biomass occurred on the mixtures of food wastes and cow manure, fermented pig manure with sawdust. Dry weight of worm cast was the highest on the mixtures of food wastes and fermented pig manure with sawdust and the proportion of cast weight after vermicomposting was significantly the highest on the mixtures of food wastes and cow manure ($p \leq 0.05$). Also, the mixtures of food wastes and cow manure, and fermented pig manure with sawdust showed a positive values of conversion rate and conversion efficiency rate of organic matter to earthworm tissue than that of other treatments.

These results suggested that cow manure and fermented pig manure with sawdust are adequate to process with food wastes by vermicomposting.

[†]Corresponding author (Vermilee@hanmail.net)

Keywords : Vermicomposting, Food wastes, Worm cast, Conversion rate, Conversion efficiency

초 록

본 실험은 음식물 쓰레기와 다른 유기성 자원의 혼합처리가 지렁이(*Eisenia foetida*)의 생육과 분변토 생산량, 분변토의 화학적 특성에 미치는 영향을 조사하여 지렁이에 의한 음식물쓰레기의 처리 가능성을 조사하였다.

음식물 쓰레기 100%, 음식물 쓰레기와 우분, 돈분 슬러지, 톱밥발효 돈분, 인분 슬러지, 하수 슬러지를 각각 50:50으로 혼합 처리하였을 때, 음식물쓰레기 100% 처리구에서는 지렁이가 생존하지 못하여 지렁이에 의한 퇴비화가 불가능하였다.

지렁이에 의한 퇴비화 과정에서 최종산물로 생산되는 분변토는 모든 처리구에서 유효인산 함량, 양분 보전능(CEC), 친환성 칼륨 및 마그네슘이 함량이 식물체의 생육에 필요한 양분요구량 이상 함유되었다.

분변토 생산량은 음식물 쓰레기와 톱밥발효 돈분의 혼합 처리구에서 가장 많았고, 분변토 비율은 음식물 쓰레기와 우분의 혼합 처리구에서 유의하게 높았다.

또한 지렁이 체 조직으로의 유기물 전환율과 전환효율은 음식물 쓰레기와 우분, 음식물 쓰레기와 톱밥발효 돈분 처리구에서 높은 값을 나타내어, 음식물 쓰레기와 가축 분을 혼합 처리하는 것이 지렁이에 의한 퇴비화에 가장 알맞은 먹이조건인 것으로 판단되었다.

핵심용어 : 지렁이에 의한 퇴비화, 음식물 쓰레기, 분변토, 전환율, 전환효율

1. 서론

우리나라는 지난 반세기 동안 급속한 산업화와 함께 국민경제의 눈부신 발전에 힘입어 국민의 소득수준은 향상되었고 자원의 소비량의 지속적인 증가에 따라서 폐기물의 발생량도 급격히 증가되었다. 일반적으로 폐기물은 무기성 자원과 유기성 자원으로 구분할 수 있는데, 유기성 자원은 중금속 등과 같은 유해한 성분이 다량으로 함유된 것을 제외하면 대부분 가축사료나 부산물 퇴비 또는 토양 개량제 등과 같은 유용한 자원으로 재활용이 가능하다¹³⁾. 현재 퇴비자원으로 재활용이 가능한 유기성 자원은 음식물 쓰레기, 가축분뇨, 인분뇨, 하수 슬러지, 그리고 사업장 일반 폐기물 중에서 유해성분 함량이 낮은 유기성 슬러지 등을 들 수 있다. 그 중에서 음식물 쓰레기는 수분함량이 높아 수거가 불편하고 불순물의 분리에 어려움이 많으며 쉽게

분해 되어 악취가 발생하는 등 취급과 처리에 문제점이 많아서 사회 문제화 된지도 오래이다.

음식물 쓰레기의 발생량은 2002년도 말 현재 일일 11,397톤으로 전체 생활 폐기물의 32.3%를 차지하고 있으며, 처리방법으로는 매립, 소각, 재활용이 각각 41.5%, 14.5%, 44.0%로서, 재활용율의 급격한 증가추세를 보이고 있다¹⁵⁾. 그러나 2005년도부터 음식물 쓰레기의 직, 매립이 금지됨에 따라 현재 매립되고 있는 음식물 쓰레기를 어떻게 처리할 것인가? 라는 방법론이 지자체와 국가의 어려운 해결과제가 되고 있다.

최근 다량으로 발생되고 있는 유기성 자원의 재활용 방법 중에서 지렁이에 의한 퇴비화는 유기성 자원을 호기성 조건에서 급속히 안정화 시켜 퇴비화 하는 생물학적 처리기술의 하나로서 세계 각국에서 다양한 방법으로 폭 넓게 활용되고 있다^{8, 9, 10, 21, 22, 28, 29, 32, 36)}.

지렁이에 의한 퇴비화는 환경오염원이 되는 다양한 유기성 자원의 처리→분변토와 지렁이의 대량 생산→분변토와 지렁이의 효율적 이용→경제적이며 안전한 농산물의 생산이라고 하는 물질순환의 연결고리를 이어주는 유용한 방법이다⁸⁾. 즉, 유기성 자원을 먹이로 하였을 때 지렁이 장내에서 이루어지는 양분증강(NEP)과 장 관련과정(GAP)을 거쳐 양분과 미생물이 풍부한 분변토를 생산할 수 있다¹⁸⁾. 분변토는 일반 퇴비에 비하여 킬레이트 원소들과 식물생장촉진물질이 풍부하고³⁸⁾, 미생물과 안정화된 부식기질을 다량 함유하고 있어²⁵⁾, 토양 개량제와 육묘용 상토로서 유용하다고 알려져 있다^{11, 19)}.

대부분의 유기성 자원은 지렁이에 의한 퇴비화로 대량처리가 가능하지만^{10, 12, 17, 20, 35)}, 퇴비화 효율을 높이기 위해서는 지렁이의 생육에 알맞은 환경을 만들기 위한 전처리가 필요하다²¹⁾.

유기성 자원 중에서 음식물 쓰레기는 초기 발생 시 pH 4-6, 수분함량 75-90%, 유기물 함량 75-85%, 전 질소함량 2-5%, 탄질을 9-16, 염분함량 5% 이내의 범위를 나타낸다^{1, 2, 6, 14)}. 따라서 음식물 쓰레기는 수분함량이 높아서 혐기적 조건이 되기 쉽고, 염분함량이 높아서 톱밥, 왕겨 등과 같은 부형재의 투입과 다른 유기성 자원과의 혼합처리를 통하여 발효에 알맞은 수분함량과 양분 조절 및 염분농도의 희석이 요구된다.

현재 우리나라에서 음식물 쓰레기 외에 다량으로 배출되는 유기성 자원 중에는 가축 분, 인분 슬러지, 하수 슬러지가 있으며, 음식물 쓰레기와의 혼합처리가 가능하다고 판단된다.

가축분뇨 발생량은 2003년도 말 현재 3,312만 톤이 발생하여 유기성 자원 중에서 가장 많은 발생량을 나타내고 있는데, 축종별로는 돼지 42.7%, 한우 23.8%, 젓소 20.4%, 닭 13.1이며, 돈 분뇨의 재활용율이 가장 낮다⁴⁾. 돈분은 풍부한 양분을 함유하고 있어 잘 발효될 경우 지렁이 생육에 좋은 먹이가 될 수 있지만²⁰⁾, 물리적 성상이 분뇨와 세정수가 혼합되어 있는 액상이 일반적이므로 고액 분리 또는 수분조절을 위한 팽화제의 첨가가 필요하며, 암모니아와 무기염 함량이 높고 중금속인 구

리함량이 높을 가능성이 있다^{21, 40)}. 우분은 적절한 탄질율과 양분을 함유하고 있고 유해물질이 거의 함유되지 않아서 가축 분 중에서 지렁이의 먹이로 가장 알맞고⁹⁾, 인분 슬러지는 질소함량이 높고, 분해 되기 쉬운 유기물 함량이 높으며, 안전성이 높아 지렁이의 먹이로 알맞지만¹⁰⁾, 위생문제 때문에 단독으로는 재활용되지 않고 생활하수와 혼합 처리하고 있어 먹이로서의 안전성에 문제가 있다고 생각된다.

하수 슬러지는 단백질, 섬유질, 지방 등을 다량으로 함유하고 있고, 질소와 인의 함량이 높으며, 중금속을 포함한 여러 가지 무기물을 함유하고 있는데²⁶⁾, 생 슬러지와 물리적 개선을 위한 고분자 화합물의 다량사용은 미생물에 의한 발효를 지연시키고, 지렁이 생육에 치명적인 장애가 될 수 있다²⁴⁾.

따라서 본 실험에서는 음식물 쓰레기와 우분, 돈분 슬러지, 톱밥발효 돈분, 인분 슬러지 및 하수 슬러지를 혼합처리 하였을 때, 지렁이의 생육특성, 분변토 생산량, 분변토의 화학적 특성 및 지렁이 체 조직으로의 유기물 전환율, 전환효율에 미치는 영향을 조사하여, 지렁이에 의한 음식물 쓰레기의 퇴비화 처리 가능성을 검토하였다.

2. 실험재료 및 방법

2.1 음식물 쓰레기와 유기성 자원의 혼합 처리

2.1.1 공시 유기성 자원과 지렁이

지렁이의 먹이로 부속된 음식물 쓰레기와 우분, 돈분 슬러지, 톱밥발효 돈분, 인분 슬러지, 하수 슬러지를 사용하였다. 음식물 쓰레기는 경기도 남양주시 덕소에 소재하는 군 부대의 잔반과 연세대학교 원주 캠퍼스의 학생식당 잔반을 혼합한 것을 사용하였다. 우분은 원주시 소재 축산농가에서 채취한 한우 분을 사용하였고, 돈분 슬러지는 경기도 양평군 축분처리장의 것을 사용하였다. 톱밥발효 돈분은 충북 음성군의 양돈농가에서 구입한 것으로 돈분에 톱밥 50%를 혼합하여 발효시킨 것을 사

용하였고, 인분 슬러지는 서울 중랑천 분뇨처리장에서, 그리고 하수 슬러지는 경기도 성남시 하수처리장(분당)에서 채취한 것을 사용하였다.

음식물 쓰레기와 유기성 자원의 혼합비율은 50:50(v/v)으로 하여 2개월간 발효시킨 후, 사육 상자(16×16×18cm)당 500g(건물 중)을 3.1cm 높이로 충전 하였고, 대조구에는 음식물 쓰레기 500g을 충전 하였다. 사육 상자의 밑바닥에는 피난 층으로 분립 120g(건물 중)을 수평이 되도록 펴고, 지렁이 분립과 먹이의 혼합을 방지하고 지렁이의 통과를 쉽게 하기 위하여 두께 1mm, 입경 3mm의 플라스틱 망을 깔았다.

공시 지렁이는 우리나라에 자생하는 줄 지렁이(*Eisenia foetida*)를 사용하였다. 사육밀도는 사육 상자 당 20마리(생체 중 평균 $250.4 \pm 0.05\text{mg}$)를 방사하여 4주간 사육하였고 처리 당 3반복 하였다. 사육기간 중 실내온도는 $20 \pm 5^\circ\text{C}$, 수분조건은 $65 \pm 5\%$ 를 유지시켰다.

또한 지렁이에 의한 먹이 중의 유기물 감소량을 측정하기 위하여 대조구로 지렁이 무처리구를 만들어 처리구와 함께 4주간 방치하였다.

2.1.2 공시한 유기성 자원의 일반성분과 중금속 분석

pH는 pH meter(Orion, Model 420A)로 측정하였고, 전기전도도(EC)는 EC meter(Takemura, Model CM-53)로 측정하였다.

총 고형분 함량(TS)은 건조기에서 105°C , 24시간 건조한 후 측정된 건물 중으로 구하였고, 휘발성 고형분 함량(VS)은 건물을 550°C 의 전기로에서 3시간 태운 후 남은 조회분량(FS)을 총 고형분 함량에서 뺀 값으로 구하였다.

전질소 함량(TN)은 kjeldahl 분석장치(Selecta, Model PRO-NITRO II)를 사용하여 질소를 분석하였고, 탄질율은 총 탄소함량과 전질소함량의 비율(농과원, 1996)로 구하였다.

공시한 유기성 자원의 중금속 함량은 비소(As), 카드뮴(Cd), 크롬(Cr), 구리(Cu), 납(Pb), 수은(Hg)의 6가지를 분석하였다. 분석방법은 비소, 카드뮴, 구리, 납은 EPA Method 3050B를 사용하

여 전 처리 후 ICP-MS(Varian, Model Ultramass 700)를 사용하여 분석하였고, 수은은 EPA Method 4741B를 사용하여 전 처리 후 수은 분석기를 사용하여 분석하였다.

2.1.3 지렁이의 생육특성 조사

지렁이의 생육특성은 생존율, 증체량, 난포 수, 분변토 생산량, 잔식량, 분변토 비율, 체 조직으로의 유기물 전환율과 전환효율을 조사하였다.

생존율은 처음 방사한 지렁이 개체수로부터 실험 종료 후 개체수를 뺀 값의 백분율로 하였다. 증체율은 실험종료 시의 평균 생체 중에서 실험 개시시의 평균 생체 중을 뺀 후 사육기간(28일×24시간)으로 나눈 값으로 하였다. 난포 수는 각각의 개체를 조사하였고, 분변토 생산량과 잔식량은 건조기에서 105°C , 24시간 건조한 후 입경 2.0mm 체로 분리하여 고형물 입자가 2.0mm 이하인 것을 분변토 생산량, 2.0mm 이상의 입자를 잔식량을 하여 각각의 건물 중을 구하였다.

사육기간 동안의 유기물 감소율, 무기화율, 지렁이 체 조직으로의 유기물 전환율과 전환효율은 다음 식에 의하여 구하였다(식 1).

2.1.4 분립의 화학적 특성 조사

pH는 pH meter(Orion, Model 420A)를 사용하여 측정하였고, 유기물 함량은 건물을 550°C 의 전기로에서 3시간 태운 후 총 고형분 함량에서 조회분량을 뺀 값으로 구하였다. 전 질소함량은 kjeldahl 분석 장치(Selecta, Model PRO-NITRO II)를 사용하여 분석하였고, 유효인산함량은 Lancaster 법에 준하여 토양분석 분광광도계(Hanson Technology, Model KA-P)를 사용하여 측정하였다. 치환성 양이온(K^+ , Ca^{++} , Mg^{++})과 양분 보전능(CEC)은 토양분석 분광광도계를 사용하여 측정하였다. 전기전도도(EC)는 EC meter(Takemura, Model CM-53)로 측정하였다.

2.2 실험설계 및 통계처리

실험은 완전임의 배치법(complete randomized design)으로 한 3반복으로 수행되었다.

[식1]

$$\text{Reduction rate} = \frac{\text{volatile solids content at final time}(mg)}{\text{volatile solids content}(mg)} \times 100$$

$$\text{Mineralization rate}(\%) = \frac{\text{volatile solids content reduced by earthworm}(mg)}{\text{volatile solids content}(mg)} \times 100$$

$$\text{Conversion rate}(\%) = \frac{\text{mean dry weight of worm tissue at final time}(mg)}{\text{volatile solids content}(mg)} \times 100$$

$$\text{Conversion efficiency}(\%) = \frac{\text{increased dry weight of worm tissue at final time}(mg)}{\text{volatile solids content reduced by earthworm}(mg)} \times 100$$

측정된 자료는 SAS(Statistical Analysis System)를 이용하여 생육특성에 대한 처리간의 최소 유의차(LSD)를 검정하였다(SAS Institute, 1999).

3. 결과

3.1 음식물 쓰레기와 유기성 자원의 혼합 재료의 이화학적 특성

실험 전 음식물 쓰레기와 유기성 자원의 혼합재료의 이화학적 특성은 [Table 1]과 같다.

pH는 모든 처리구에서 6.3-7.5의 범위를 나타내어 약산성 내지는 약 알칼리성을 나타내었다. 총

고형분 함량(TS)은 FW+PM 처리구가 43.1%로 가장 높았고, FW+CM 처리구가 29.6%로 가장 낮았다. 휘발성 고형분 함량(VS)은 FW+SS 처리구가 73.8%로 가장 높았지만, 다른 처리구 모두 50% 이상의 값을 나타내었다. 고정 고형분 함량(FS)은 FW+PM 처리구가 50%로 가장 높았고, FW+SS 처리구는 26.2%에 불과하였다. 전 질소 함량(TN)은 FW+SS 처리구가 4.42%로 가장 높았고, FW+PM 처리구는 1.85%를 나타내었다. 탄질 율(C/N ratio)은 FW+CM 처리구가 19.5, FW+PM 처리구는 15.7이었고, FW+SS 처리구에서 가장 낮은 3.4을 나타내었다. 전기전도도(EC)는 음식물 쓰레기 100%(FW 처리구)에서 가

[Table 1] The Physicochemical Characteristics of the Mixtures of Food Wastes and Various Organic Wastes Before Vermicomposting

Treatment	pH	TS(%)	VS(%)	FS(%)	TN(%)	C/N ratio	EC(mS/cm)
FW+CM	7.5	29.6	59.8	40.2	2.45	19.5	13.1
FW+PS	6.6	33.5	60.0	40.0	3.97	6.6	16.6
FW+PM	7.0	43.1	50.0	50.0	1.85	15.7	8.0
FW+NS	6.4	37.5	69.2	30.8	3.61	5.0	10.2
FW+SS	6.3	34.3	73.8	26.2	4.42	3.4	18.5
FW	6.7	38.9	55.4	44.6	2.92	8.9	60.0

FW : food wastes, CM: cow manure, PS: pig manure sludge, PM: fermented pig manure with sawdust, NS: nightsoil sludge and SS: sewage sludge
 TS : total solids, VS: volatile solids(TS-FS), FS: fixed solids(TS-VS), TN: total nitrogen. C/N ratio: carbon/nitrogen ratio and EC: electrolytic conductivity

장 높은 60을 나타낸 반면에 FW+PM 처리구는 8.0으로 가장 낮았다.

3.2 음식물 쓰레기와 유기성 자원의 중금속 함량

지렁이 먹이로서의 안전성을 평가하기 위하여 vermicomposting 전의 음식물 쓰레기와 유기성 자원의 중금속 함량을 분석한 결과는 [Table 2]와 같다.

비소함량(As)은 음식물 쓰레기(FW)에서 0.255 ppm으로 가장 낮았고, 인분 슬러지(NS)와 하수 슬러지(SS)는 각각 2.771과 2.887ppm이었다. 카드뮴함량(Cd)은 모든 유기성 자원에서 0.114-1.652ppm의 범위를 나타내었고, 크롬함량(Cr)은 0.573-26.419ppm의 범위를 나타내어 변이의 폭이 넓었다. 구리함량(Cu)은 돈분 슬러지(PS)가 806.4ppm으로 규제치인 300ppm보다 약 2.7배 높았고, 인분 슬러지(NS)와 하수 슬러지(SS)도 각각 286.2ppm과 286.0ppm을 나타내어 규제치에 가까운 값을 나타내었다.

납 함량(Pb)은 모든 유기성 자원에서 0.733-57.310을 나타내어 규제치인 150ppm 미만이었으며, 수은 함량(Hg)은 음식물 쓰레기에서는 검출되지 않았으나, 우분, 돈분 슬러지, 톱밥발효 돈분에서는 0.1ppm 미만, 인분 슬러지(NS)에서는 2.12ppm을 나타내어 규제치인 2ppm을 초과하였고 하수 슬러지는 1.643ppm으로 높은 함량을

나타내었다.

3.3 음식물 쓰레기와 유기성 자원의 혼합 처리가 지렁이의 생육과 분변토 생산량에 미치는 영향

음식물 쓰레기와 여러 가지 유기성 자원을 혼합 처리하여 지렁이 먹이로 이용하였을 때 지렁이의 생육과 분변토 생산량에 미치는 영향을 조사한 결과는 [Table 3]과 같다.

지렁이의 생존율(SR)은 FW+PM에서 가장 높은 51.7%, 다음으로 FW+CM이 45%로 비교적 높은 생존율을 나타낸 반면에 음식물 쓰레기 100% 처리구(FW)에서는 생존율이 인정되지 않았다. 실험 종료 후 개체당 평균 생체중(FW₂)은 FW+CM 처리구에서 401.8mg으로 가장 무거웠지만, FW+PM 처리구의 305mg 과는 유의한 차이가 인정되지 않았다. 그러나 FW+PS, FW+NS, FW+SS 처리구에서는 실험 개시시의 개체 당 평균 생체중(FW₁)보다 오히려 감소되어 생육장해가 인정되었다. 따라서 증체속도(IR)는 FW+CM 처리구가 0.23mg으로 가장 높았고 다음으로 FW+PM의 0.08mg이었지만, 다른 처리구에서는 감소되었다. 난포 수(NC)는 증체율이 가장 높았던 FW+CM 처리구에서 13.3개로 가장 많았으나 다른 처리구와는 유의한 차이가 인정되지 않았다. 분변토 생산량(CW)은 FW+PM 처리구가 73.5g을 나타내어 다른 처리구보다 유의하게 많았으며, 분

[Table2] The Heavy Metal Contents of Various Organic Wastes Before Vermicomposting

Organic wastes	As(ppm)	Cd(ppm)	Cr(ppm)	Cu(ppm)	Pb(ppm)	Hg(ppm)
FW	0.255	0.114	0.951	4.852	1.526	ND
CM	1.742	0.280	18.034	10.645	8.245	0.040
PS	0.466	0.511	0.573	806.398	0.733	0.038
PM	1.257	1.173	25.875	161.042	39.485	0.101
NS	2.771	1.652	26.419	286.174	57.310	2.121
SS	2.887	1.297	22.575	286.045	24.082	1.643
KSL ¹⁾	50	5	300	300	150	2

FW : food wastes, CM: cow manure, PS: pig manure sludge, PM: fermented pig manure with sawdust, NS: night soil and SS: sewage sludge

¹⁾KSL: Korean standard limits, ND: not detected

[Table 3] The Values on the Measured Growth Characteristics of the Earthworm in Mixtures of Food Wastes and Organic Wastes After Vermicomposting

Treatment	SR(%)	FW ₁ (mg)	FW ₂ (mg)	IR(mg/hr)	NC	CW(g)	RM(g)	CW(%)
FW+CM	45.0	249.6	401.8	0.23	13.3	66.8	143.1	31.8
FW+PS	21.7	251.5	226.8	-0.04	0.0	65.5	163.3	28.6
FW+PM	51.7	251.3	305.0	0.08	0.7	73.5	197.7	27.1
FW+NS	18.3	249.3	168.1	-0.12	2.7	65.5	179.4	26.7
FW+SS	38.3	250.4	236.7	-0.02	0.3	66.0	166.2	28.4
FW	0.0	250.6	0.0	0.00	0.0	64.8	196.2	24.8
LSD(p≤0.05)	NS	NS	138.9	0.25	NS	6.7	6.9	2.7

NS : non-significant, SR: survival rate, FW₁: mean fresh weight of adult worm at initial time, FW₂: mean fresh weight of adult worm at final time, IR: increasing rate of adult worm($(FW_2 - FW_1) / (t_2 - t_1)$), NC: number of cocoons, CW: dry weight of worm casts(g. <2.0mm), CW(%): ratios of worm casts and RM: dry weight of residual matters(g. >2.0mm)

변토 비율에서는 FW+CM 처리구가 31.8%로 다른 처리구보다 유의하게 높았다.

잔식량(RM)은 생존율이 인정되지 않았던 음식물 쓰레기 100% 처리구(FW)와 FW+PM 처리구가 다른 처리구에 비하여 유의하게 많았고, FW+CM 처리구가 유의하게 적었다.

3.3 지렁이의 건물증가량, 유기물 감소율, 무기화율, 체 조직으로의 유기물 전환율 및 전환 효율

실험기간 중 지렁이의 건물 증가량, 먹이 중의 유기물 감소량, 무기화율, 체 조직으로의 유기물 전환율 및 전환효율을 나타낸 것이 [Table 4]이다.

지렁이의 건물 증가량(IW)은 FW+CM 처리구가 15.39mg으로 FW+PM 처리구의 2.67mg 보다 약 6.5배 증가되었지만, FW+NS 처리구에서는 -19.95mg이나 감소되었다. 실험기간 중의 유기물 감소율(RD)과 무기화율(MR)은 FW+CM 처리구가 다른 처리구보다 유의하게 높았다. 지렁이 체 조직으로의 유기물 전환율(CR)과 전환효율

[Table 4] The Values of Increased dry Weight of Earthworm(IW), Reduction Rate of Organic Matter, Mineralization Rate, and Conversion Rate(CR) and Conversion Efficiency(CE) of Organic Matter to Earthworm Tissue in Mixtures of Food Wastes and Various Organic Wastes During the Experimental Periods

Treatment	IW(mg)	RD(%)	MR(%)	CR(%)	CE(%)
FW+CM	15.39	16.40	10.82	1.48	2.84
FW+PS	-3.08	6.50	4.77	-0.11	-0.41
FW+PM	2.67	9.88	4.10	0.57	2.28
FW+NS	-19.95	8.83	7.47	-0.23	-0.61
FW+SS	-3.83	9.64	7.84	-0.09	-0.03
LSD(p≤0.05)	27.47	0.96	0.96	NS	NS

NS : non-significant difference at the 5% level

IW : increased dry weight of earthworm($DW_2 - DW_1$), RD : reduction rate of organic matter during the experimental period, MR : mineralization rate of organic matter during the experimental periods, CR : conversion rate of organic matter to earthworm tissue and CE : conversion efficiency of organic matter to earthworm tissue

(CE)은 FW+CM과 FW+PM 처리구에서는 증가되었지만(+ 값), 다른 처리구에서는 감소되었다.

3.4 지렁이 분변토의 화학적 특성

각각 다른 유기성 자원과 혼합한 음식물 쓰레기를 먹이로 하였을 때, 지렁이 분변토의 화학적 조성을 분석한 결과는 [Table 5]와 같다.

지렁이 분변토의 pH는 모든 처리구에서 6.6-7.8의 범위를 나타내어 실험 전의 pH 값보다 높아졌지만, 전기전도도(EC)는 FW+NS 처리구를 제외한 모든 처리구에서 감소되었다. 유기물함량(OM)은 모든 처리구에서 35.5-50.1%의 범위를 나타내었는데, FM+CM 처리구는 실험전보다 무려 38.8% 감소되었다. 전 질소함량(TN)은 FW+PS와 FW+SS 처리구에서 각각 2.53%와 2.38%로 높았지만, 다른 처리구에서는 1.87-1.03% 수준이었다.

탄질 율(C/N)은 FW+PM 처리구가 가장 높은 36.4를 나타내었고, FW+PS와 FW+SS처리구에서는 각각 11.4와 11.3으로 가장 낮았다. 유효인산함량은 FW+PM 처리구가 662ppm을 나타내어 가장 낮았지만 그 밖의 처리구에서는 1,265-1,562ppm의 범위를 나타내었다.

양분보전능(CEC)은 FW+CM 처리구의 41.86, FW+PS 처리구의 37.89, FW+PM 처리구의 29.02 순으로 높았고, FW+NS는 가장 낮은

17.28을 나타내었다. 치환성 양이온 함량은 FW+NS 처리구에서 칼슘, FW+PS 처리구에서 칼리, FW+CM 처리구에서 마그네슘 함량이 높았다.

4. 고찰

음식물 쓰레기와 혼합처리가 가능한 유기성 자원은 다양하지만 생물에게 유해한 중금속 등을 함유하고 있는 경우가 많아서 자원화의 걸림돌이 되고 있다.

중금속이 함유된 유기성 자원을 재활용하기 위해서는 생물에 대한 생물적해효과가 인정되지 않아야 하고, 최종산물인 분립의 중금속 농도가 허용규제치보다 낮아서 친환경 농자재로 폭 넓게 활용될 수 있어야 한다는 조건이 필요하다.

음식물 쓰레기와 유기성 자원을 혼합, 발효시켜 지렁이에 의하여 퇴비화 할 경우, 이화학성의 개선과 함께 유해 중금속 함량을 희석시켜 지렁이의 생육이 가능한 먹이로의 전환이 가능하고, 중금속의 생물적 농축을 통하여 분변토 중의 중금속 함량을 허용한계치 이하로 낮출 수 있어 다양한 유기성 자원의 처리가 가능하다고 판단된다^{5, 30, 34}).

본 실험에서 공시한 유기성 자원 중의 중금속 함량을 보면[Table 2], 인분 슬러지의 수은함량은 2.121ppm, 돈분 슬러지의 구리함량은 806.4ppm을 나타내어 부산물 퇴비 중의 수은의 허용규제치

[Table 5] Chemical Properties of Worm Casts in Mixtures of Food Wastes and Various Organic Wastes After Vermicomposting

Treatment	pH	EC (mS/cm)	OM (%)	TN (%)	C/N ratio	Av. P ₂ O ₅ (mg/kg)	CEC (cmol ⁺ /kg)	Exchangeable Ca ⁺⁺	cations (cmol ⁺ /kg)	
									K ⁺	Mg ⁺⁺
FW+CM	7.8	8.9	36.6	1.41	26.0	1265.3	41.86	1.80	14.40	7.00
FW+PS	7.2	12.8	50.1	2.53	11.4	1562.0	37.89	6.50	23.30	4.73
FW+PM	7.3	7.0	35.5	1.03	36.4	662.0	29.02	3.90	5.60	6.90
FW+NS	6.6	11.0	48.2	1.87	16.4	1274.0	17.28	8.90	8.40	4.53
FW+SS	7.2	14.0	53.4	2.38	11.3	1421.0	18.88	6.30	9.30	4.63

EC : electrolytic conductivity, OM : organic matter, TN : total nitrogen, C/N carbon/nitrogen ratio, Av. P₂O₅ : available phosphorus and CEC: cation exchange capacity

인 2.0ppm과 구리(Cu)의 허용규제치인 300ppm을 초과하였고³⁾, 인분 슬러지와 하수 슬러지의 구리함량도 허용 규제치와 거의 같은 높은 수준으로 함유되었다(Fig. 2). 특히 돈분 중에 구리함량이 높은 것은 폐지의 증체량과 사료이용효율의 개선을 목적으로 첨가되는 구리가 요구량을 훨씬 초과된 수준으로 급여되어 체내에서 충분히 이용되지 못한 상태에서 배설물로 이행되었기 때문이다¹⁹⁾. 먹이 중의 지나친 구리함량은 지렁이의 생육을 저해시키고³⁹⁾, 증식효율을 저하시키며³³⁾, 체내로의 생물적 농축이 이루어지고³⁴⁾, 토양의 이화학적 성을 변화시키는데 영향을 미친다¹⁶⁾.

본 실험에서 FW+PS, FW+PM, FW+NS, FW+SS 처리구에서 증체속도와 난포수가 적었던 것은 돈분 슬러지, 톱밥발효 돈분, 인분 슬러지, 하수 슬러지에서 증금속 함량이 높았고, C/N율이 지나치게 낮았으며, 전기전도도(EC)의 값이 높아서 지렁이의 생육저해와 함께 증식효율의 저하를 초래하였기 때문이라고 판단된다(Table 1, 2, 3).

특히 음식물 쓰레기 100% 처리구(FW)에서 생존율이 인정되지 않았던 것은 전기전도도가 지나치게 높은 값(60)을 나타내었기 때문으로 생각된다(Table 1). 이와 관련하여 Kaplan 등(1980)은 먹이의 전기전도도가 1.5-3 mS/cm의 범위일 때, *Eisenia foetida* 종에서 생체중의 증가가 인정되었다고 하였고, Rivero-Hernandes(1991)는 전기전도도에 대한 지렁이의 내성은 0.75-15mS/cm의 범위라고 하였다. 또한 전기전도도 값에 영향을 미치는 염분농도는 *Eisenia foetida* 종이 생존 가능한 0.5% 미만인 것을 고려하면²¹⁾, 음식물 쓰레기의 단독 처리보다는 다른 유기성 자원과의 혼합 처리를 통하여 지렁이의 생육에 알맞은 먹이조건이 필요하다는 것을 의미한다. 본 실험의 결과, FW+CM과 FW+PM 처리구에서 개체 당 평균 생체 중(FW₂), 증체속도, 지렁이 체 조직으로의 유기물 전환율 및 전환효율이 높아져(Table 3, 4), 가축 분이 다른 유기성 자원보다 음식물 쓰레기와의 혼합처리에 알맞은 유기성 자원이었다고 생각된다. 가축 분 중에서도 FW+CM 처리구는 생존율, 평균 생체 중, 증체속도 및 난포 수(Table 3), 분변토

비율, 체 조직으로의 유기물 전환율 및 전환효율이 FW+PM 처리구보다 높아져(Table 4), 음식물 쓰레기와의 혼합처리 시에는 우분이 톱밥발효 돈분보다 우수하다는 것이 입증되었다(Table 3, 4). 이(1995)도 우분의 적절한 탄질을 조건(25)에서 지렁이의 생육이 촉진되며 분변토 생산량도 증가한다고 하였다. 그러나 Edwards(1988)는 여러 가지 가축 분을 지렁이 먹이로 이용하였을 때 돈분, 우분의 순으로 지렁이의 평균 개체중이 증가되었다고 하였고, Gunadi 등(2002)도 지렁이의 증체량과 증체속도는 돈분이 우분보다 훨씬 높다고 하였다. 본 실험에서 FW+PM처리구가 FM+CM 처리구보다 생존율, 증체량, 증식효율(난포수) 낮았던 것은 수분조절을 위한 톱밥의 혼합비율이 높아서 총 고형분(TS)과 고정 고형분 함량(FS)이 높았던 반면에 휘발성 고형분 함량(VS)이 낮아져(Table 1), 체 조직으로의 유기물 전환율 및 전환효율이 낮아졌기 때문이라고 생각된다(Table 4).

그러나 분변토 생산량은 FW+PM 처리구가 다른 처리구보다 유의하게 많았는데(Table 3), 이는 먹이조건이 좋을 경우, 체 조직으로의 유기물 전환율과 전환효율이 높아서 증체속도와 증식효율이 높아지지만, 먹이조건이 나쁠 경우에는 분변토 생산량이 증가된다는 이 등(1992)과 이(1995)의 연구결과와도 일치한다고 생각된다. 따라서 최종산물인 분변토의 화학성에서도 FW+CM 처리구가 FW+PM처리구보다 전 질소함량, 유효인산함량 및 CEC가 높았고, C/N율이 낮아서 토양개량제로서의 유용성도 높을 것으로 추정되었다.

따라서 음식물 쓰레기를 다른 유기성 자원과 혼합 처리할 경우, 첫째로 증금속 등과 같은 유해성분의 함량이 지렁이의 생존율과 최종산물인 분변토의 안전성에 미치는 영향을 고려할 필요가 있고, 둘째로 휘발성 고형분 함량(VS)이 높다고 인정되는 유기성 자원과의 혼합처리를 통하여 체 조직으로의 유기물 전환효율을 증가시켜, 증체속도, 증식효율을 높여야 하며, 셋째로 최종산물인 분변토가 친환경 농자재로서 안전하게 이용될 수 있는 이화학적 특성의 유지를 위한 먹이의 적정 혼합비율의 추정이 필요하다고 생각된다.

5. 결론

본 실험은 음식물쓰레기와 다른 유기성 자원의 혼합처리가 지렁이(*Eisenia foetida*)의 생육과 분변토 생산량, 분변토의 화학적 특성에 미치는 영향을 조사하여 지렁이에 의한 음식물 쓰레기의 퇴비화 가능성을 검토하였다.

본 실험에 공시한 돈분 슬러지는 구리함량, 인분 슬러지는 수은함량이 높아서 부산물 퇴비의 중금속 허용규제치보다 높아서 안정성이 결여되었다.

음식물 쓰레기 100% 처리구에서는 전기전도도 값이 60으로 지나치게 높아서 지렁이의 생존율이 인정되지 않았다.

모든 처리구에서 분립의 유효인산함량, 양분보전능, 치환성 양이온 함량이 증가되었다.

음식물쓰레기와 가축 분(우분과 돈분)과의 혼합 처리구에서 지렁이의 증체량, 증체속도, 체 조직으로의 유기물 전환율 및 전환효율이 높았다.

분변토 생산량은 음식물 쓰레기와 톱밥발효 돈분의 혼합 처리구에서 많았고, 분변토 비율은 우분과의 혼합 처리구에서 유의하게 높았다.

음식물 쓰레기와 가축 분을 혼합 처리하는 것이 지렁이에 의한 퇴비화에 효율적이었지만,

우분과의 혼합처리가 먹이로서의 안전성과 생산효율이 더 높았다.

사사

본 연구는 2001년도 연세대학교 매지 학술연구소의 연구비에 의하여 수행되었다.

This study was conducted by the grant of Maegi Institute of Academic Research, Yonsei University in fiscal year 2001

참고문헌

1. 김필주, 장기운, 민경훈. “음식물찌꺼기 고속 발효기에 의해 처리된 퇴비의 안전성 검토”, 한국유기성폐자원학회지, 3(1), pp. 35~42 (1995).

2. 농업과학기술원. “음식물쓰레기 퇴비화 기술개발”, 농촌진흥청 대형과제(‘97~’98), p. 152 (1999).
3. 농촌진흥청. “비료공정규격 개정”, 농촌진흥청 고시, 제 2002-29호 (2002).
4. 농촌진흥청. “2003년도 가축분뇨 발생량 현황”, (2004).
5. 박보라. 이주삼. “Vermicomposting에 의한 카드뮴(Cd)의 생물적 농축”, 한국유기성폐자원학회지, 5(2), pp. 39~45 (1997).
6. 신항식. 황응주. 정연구. “음식물 쓰레기 퇴비화시 bulking agent의 적정 첨가량 결정에 관한 연구”, 한국유기성폐자원학회지, 2(1), pp. 75~86 (1994).
7. 이용세. 이주삼, 조익환, 전하준, 이영옥, 김민. “Vermicomposting에 의한 농산부산물의 처리”, 한국유기농업학회지, 8(4), pp. 101~109 (1999).
8. 이주삼. 조익환. 정재춘. “제지 sludge와 우분의 혼합비율이 붉은 지렁이의 생육과 분립의 화학적 조성에 미치는 영향”, 한국폐기물학회지, 9(2), pp. 19~26 (1992).
9. 이주삼. “Vermicomposting에 의한 우분의 처리” -먹이의 탄질율과 사육밀도가 지렁이의 생육과 분립생산에 미치는 영향-, 한국축산시설환경학회지, 1(1), pp. 65~75 (1995).
10. 이주삼. 이무춘. “Vermicomposting에 의한 분뇨 슬러지의 처리”, 한국유기성폐자원학회지, 4(2), pp. 35~45 (1996).
11. 이주삼. 이필원. “지렁이의 생육과 분립생산을 위한 인과 칼슘의 최적수준의 추정”, 한국유기성폐자원학회지, 10(4), pp. 96~102 (2002).
12. 이필원. 이주삼. “Plant growth media로서 지렁이 분립이 orchardgrass의 생육에 미치는 영향”, 한국유기농업학회지, 7(2), pp. 179~188 (1999).
13. 임동규. 권순익. 이상범. 고문환. “국내 유기성 폐자원 현황, 특성 및 농업적 활용 전망”, 농촌진흥청 UNDP 친환경 농업사업단, 농

- 업과학기술원 공동주최 국제학술세미나, pp. 51~108 (2003).
14. 전병관. 허당. “음식물쓰레기의 퇴비화에 관한 기초적 연구”, 한국유기성폐자원학회지 4(2), pp. 19~25 (1996).
 15. 환경부. “2002년도 전국 폐기물 발생 및 처리현황”, (2003).
 16. Bernal, M. P., Roig, A., Lax, A. and Navarro, A. F., “Effects of the application of pig slurry on some physico-chemical and physical properties of calcareous soils”, *Biores. Technol.*, 42, pp. 233~239 (1992).
 17. Butt, K. R., “Utilization of solid paper mill sludge and spent brewery yeast as a feed for soil-dwelling earthworms” *Biores. Technol.*, 44, pp. 105~107 (1993).
 18. Devliegher, W. and Vertraete, E., “The effect of *Lumbricus terrestris* on soil in relation to plant growth: Effect of nutrient-enrichment processes(NEP) and gut-associated processes(GAP)” *Soil Biol. & Biochem.*, 29(3/4), pp. 341~346 (1997).
 19. Cromwell, G. L., Stahly, T. S. and Monegue, H. J., “Effect of source and level of copper on performance and liver copper stores in weanling pigs” *J. of Anim. Sci.*, 67, pp. 2996~3002 (1989).
 20. Edwards, C. A., Burrows, I., Flectche, K. E. and Jones, B. A., “The use of earthworms for composting farm wastes” In *Composting of Agricultural and Other Wastes*, (ed.) by J. K. R. Grasser. Elsevier, Amsterdam, pp. 229~242 (1985).
 21. Edwards, C. A. “Breakdown of animal, vegetable and industrial organic wastes by earthworms” In *Earthworm in Waste and Environmental Management*(eds.) by C. A. Edwards and E. F. Nehauser. SPB Academic Publishing, The Netherlands, pp. 21~31 (1988).
 22. Edwards, C. A. and Bohlen, P. J., “Biology and ecology of earthworms” Chapman and Hall, 2-6 Boundary Row, London SE1 8HN, UK, (1996).
 23. Edwards, C., “Breakdown of animal, vegetable and industrial organic wastes by earthworms” In *Earthworm in waste and environmental management* ed. by C. A. Edwards and E. F. Neuhauser, SPB Academic Publishing, The Hague, The Netherlands pp. 21~31 (1988).
 24. Edwards, C. A. “The use of earthworms in the breakdown and management of organic wastes” In *Earthworm Ecology*(ed.) by C. A. Edwards. pp. CRC Press LLC, Florida, 327-354 (1998).
 25. Ferruzi, C., “*Manual de Lombricultura*” Ed. Mundiprensa, Madrid (1986).
 26. Friedmann, A. A., “Fundamental research needs from the engineer’s point of view” In *Utilization of Soil Organisms in Sludge Management* (ed.) by R. Hartenstein, Natl. Tech. Inf. Services, PB 286932. Springfield, Virginia, pp. 9~25 (1978).
 27. Gunadi, B., Edwards, C. A. and Blount, V. C., “The influence of different moisture levels on the growth, fecundity and survival of *Eisenia foetida*(Savigny) in cattle and pig manure solids. *European J. of Soil Biol.*, 39, pp. 19~24 (2002).

28. Hand, P., Hayes, W. A., Frankland, J. C. and Satchell, J. E., "The vermicomposting of cow slurry" *Pedobiologia*, 31, pp. 199~209 (1988).
29. Harris, G. D., Platt, W. L. and Price, B. C., "Vermicomposting in a rural community" *BioCycle*, 31, pp. 48~51 (1990)
30. Hartenstein, R., Neuhauser, E. F. and Narahara, A., "Effects of the heavy metal and other elemental additives to activated sludge on growth of *Eisenia foetida*" *J. of Environ. Qual.*, 10, pp. 372~376 (1981).
31. Kaplan, D. L., Hartenstein, E. F., Neuhauser and Malecki, M. R., "Physicochemical requirements in the environment of the earthworm *Eisenia foetida*" *Soil Biol. & Biochem.*, 12(4), pp. 347~352 (1980).
32. Logsdon, G., "Worldwide progress in vermicomposting" *BioCycle*, 35, pp. 63~65 (1994).^oC
33. Malecki, M. R., Neuhauser, E. F. and Loher, R. C., "The effect of metals on the growth and reproduction of *Eisenia foetida*(*Oligochaeta*, *Lumbricidae*). *Pedobiologia*, 24, pp. 129~137 (1982).
34. Morgan, J. E. and Morgan, A. J., "Earthworms as biological monitors of the Cadmium, Copper, Lead and Zinc in metalliferous soils" *Environmental Pollution*, 54, pp. 123~138 (1988).
35. Neuhauser, E. F., Loehr, R. C. and Malecki, M. R. "The potential of earthworm for managing sewage sludge" In *Earthworm and Waste Management*. (eds.) by C. A. Edwards and E. F. Neuhauser., SPB Academic Publishing, The Netherlands, pp. 9~20 (1988).
36. Raymond, C. L., Martin, Jr, J. H. and Neuhauser, E. F., "Stabilization of liquid municipal sludge using earthworms" In *Earthworms in Waste and Environmental Management*(eds.) by C. A. Edwards and E. F. Neuhauser. SPB Academic Publishing, The Netherlands, pp. 95~110 (1988).
37. Rivero-Hernandez, R., "Influence of pH on the production of *Eisenia foetida*" *Advan. Aliment. Anim.*, 31(5), pp. 215~217 (1991).
38. Tomati, U., Grapelli, A. and Galli, E., "The presence of growth regulators in earthworm-worked wastes" In *On Earthworm*, (eds.) by A. M. Bonvicini Pagliai & P. Omodeo., Selected Symposia and Monographs U.Z.I., 2, Mucchi, Modena, pp. 423~435 (1987).
39. van Rhee, J. A., "Copper contamination effects on earthworms by disposal of pig waste in pastures" In *Progress in Soil Aology*(ed.) by J. Vanek, Proc. 5th Intl. Cooloq. Soil Zool., Pragues, pp. 451~457 (1975).
40. Wong, S. H. and Griffiths, D. A., "Vermicomposting in the management of pig waste in Hong Kong" *World J. of Micro. Biotech.*, 7(6), pp. 593~595 (1991). ☐