

## Vermicomposting에 의한 분뇨슬러지의 처리

이 주 삼, 이 무 춘\*

연세대학교 생물자원공학과

\*연세대학교 환경학과

## Treatment of Nightsoil Sludge by Vermicomposting

Ju-Sam Lee, Moo-Choon Lee\*

Department of Biological Resources & Technology, Yonsei University

\*Department of Environmental Sciences, Yonsei University

### ABSTRACT

In order to investigate the possibility of treating nightsoil sludge, the growth trend experiments with vermicomposting was performed and the stability of worm castings was evaluated by the analysis of minerals according to growth periods.

Survival rate (SR) of earthworms decreased as earthworms grow up to 7 weeks.

The growth period of the earthworms could be classified into two phases on the basis of the ratios of cast to feed ingested (ID). The growth period of the earthworms up to 3 weeks, the high percentage of dry weight of feed ingested (ID) is mainly utilized to an increase in fresh weight of earthworms, and after the 3 weeks, it is utilized to cast production in this experiment, respectively. The highest values of increasing rate (IR) and biomass of the earthworms (BE) were obtained at 3 weeks and those were 10.59 mg/day and 14.48g, respectively. Between the increasing rate (IR) and biomass of the earthworms (BE), a highly positive correlation coefficient ( $p < 0.001$ ) appeared. The highest values of biomass of the earthworms (BE) and cast production (CW) were obtained at 3 and 7 weeks, respectively.

All the concentrations of minerals except calcium (Ca) in worm castings was lower than the values in nightsoil sludge. It was considered that the major portion of minerals in nightsoil sludge may have been retained in the bodies of earthworms. And these values were lower than the regulated levels in organic fertilizers that the regulation standards.

In conclusion, the worm castings are very stable for the use as soil conditioner or organic fertilizers.

**Key words** : Night soil sludge, Survival rate, Feed ingested, Increasing rate, Biomass cast, Reproductive efficiency

## 초 록

분뇨슬러지에서의 지렁이의 생육과정을 추적하고, 분립의 안전성을 평가하여 Vermicomposting에 의한 효율적인 분뇨슬러지의 처리가능성을 검토하였다. 지렁이의 생존율은 사육기간이 길어짐에 따라서 저하하였는데, 1주에서 99.3%가 7주에서는 52.0%로 감소하였다.

지렁이의 사육기간을 분뇨슬러지 섭취량에 대한 분립생산량의 비율로서 2단계로 구분할 수 있다. 즉, 3주까지는 먹이섭취량이 지렁이의 증체에 이용되었으나, 그 이후의 사육기간에서는 먹이섭취량이 분립생산에 이용되었다. 지렁이의 증체속도와 현존량은 3주에서 각각 10.59 mg/day과 14.48 g으로, 다른 사육기간보다 높은 값을 나타내었다. 또한 증체속도와 현존량과의 관계는 0.1% 수준의 유의한 정상관이 인정되었다. 지렁이의 현존량은 3주에서 가장 높은 값을 나타내었으나, 분립생산량은 3주 이후 7주까지 점차적으로 증가하여 7주에서 최고 값을 나타내었다. 분립의 무기물 함량은 분뇨슬러지보다 낮은 값을 나타내었는데, 분립의 무기물 함량이 낮았던 원인은 지렁이의 사육과정중에서 무기물의 체내축적이 많았기 때문이라고 생각된다. 또한 분립의 무기물 함량(중금속)은 유기질 비료의 허용규제치 이하의 값을 나타내어 안전성이 높았다고 생각된다.

**핵심낱말** : 분뇨슬러지, 생존율, 섭취량, 증체속도, 현존량, 분립, 증식효율

## 1. 서 론

최근 우리나라는 급격한 산업사회로의 발전과 함께 유기성 폐기물의 발생량도 급격히 증가되어, 1995년말 현재 1일 약 28,000톤이 발생되고 있으나(환경부, 1996), 대부분이 재활용되지 못하고 매립처리되고 있는 실정이다.

그 중에서도 인분뇨의 발생은 인구증가와 비례하여 계속적으로 증가하고 있는데, 이의 처리를 위하여 1995년도말 현재 199개의 분뇨처리장이 설치되어 1일 약 23,005 m<sup>3</sup>의 처리능력을 갖추고 있으나, 분뇨발생량의 전량처리에는 부족하여 1997년까지 35개의 분뇨처리장을 확충할 계획으로 있

다(환경부, 1996). 지금까지 분뇨처리의 최종단계에서는 고분자 응집제를 혼합하여 운반과 매립이 편리하도록 물리성을 개선시킨후 매립처리하고 있으나, 일부지역에서는 유기질 비료자원으로 농지에 환원시키고 있다. 그러나 매립처리의 경우 최종 폐기물의 처분을 위한 매립 확보의 어려움과 매립비용의 과다지출 및 불완전한 침출수 처리에 의한 지하수의 오염 위험성이 높다. 또한 분뇨슬러지를 그대로 농지에 환원시킬 경우, 2차 발효에 따른 악취와 병충해의 발생 등 환경과 위생적인 측면에서 심각한 사회적 문제를 야기시킬 수 있다고 생각된다.

이상과 같은 분뇨슬러지의 매립처분이나 농지환원에 의하여 발생하는 문제점을 해결하고 분뇨 슬

러지를 자원으로 재활용하기 위하여 토양생물의 분해와 생산기능을 이용한 폐기물의 처리방법이 Vermicomposting이다(李 등, 1992). Vermicomposting은 유기성 폐기물인 분뇨슬러지를 토양생물인 지렁이의 먹이로 이용하여 처리산물인 분립을 안전한 상태로 대량생산하여 토양으로 환원시킬 수 있어 토양비옥도의 증진을 통한 토양생태계의 보전에 기여하는 생물학적 처리방법이라고 할 수 있다. 즉, 분뇨슬러지(폐기물) --> 지렁이(생물)의 먹이 --> 분립의 생산(토양개량제)이라는 생물학적 재활용 과정을 통하여 유기성 폐기물을 100% 자원화시킬 수 있는 잇점이 있는데, 여기에서 생산되는 지렁이는 동물성 단백질자원으로 이용되며 분립은 양질의 토양개량제로 활용할 수 있고, 부수적인 효과로는 악취와 병충해의 발생을 억제하고 병원성 세균 등을 감소시키므로 안전성이 높은 2차 산물을 얻을 수 있다는 점이다. 따라서 우리나라에서도 최근 들어 여러가지 유기성 폐기물을 Vermicomposting에 의하여 처리하고자 하는 연구들이 지속적으로 수행되고 있다(李 등, 1992; 이, 1995; 조 등, 1996).

그러나 분뇨슬러지의 처리를 위한 효율적인 Vermicomposting의 운용을 위해서는 지렁이 먹이로서의 적합성 여부가 지렁이의 생육결과와 2차 산물인 분립의 안전성으로 평가되어야 한다고 생각된다.

따라서 본 실험에서는 분뇨슬러지내에서의 지렁이의 생육을 추적조사하고, 분뇨슬러지와 분립중의 무기물 함량(중금속 포함)을 분석하여 Vermicomposting에 의한 효율적인 분뇨슬러지의 처리 가능성을 추정함과 동시에 분립의 안전성을 평가하려고 하였다.

## 2. 재료 및 방법

본 실험은 1992년 8월부터 11월까지 연세대학

교 부속 덕소농장에서 실시되었다.

공시 지렁이는 우리나라에서 자생하고 있는 줄무늬 지렁이(*Eisenia foetida*)를 사용하였다. 공시한 분뇨슬러지는 1992년 7월 서울시 분뇨처리장에서 배출된 것을 사용하였다.

지렁이의 사육은 20×20×30 cm의 크기의 사육상자 21개에 분뇨슬러지 1 kg씩 충전한 후 생체중이 거의 같은 지렁이 50마리를 방사하였다. 사육기간은 7주(49일)로 하였고, 1주 간격으로 7회에 걸쳐 생육결과를 추적하였다.

조사내용은 지렁이의 생존율, 증체량, 증식효율(난포수, 산자수)을 1주 간격으로 3반복 조사한 후, 사육상자중의 고형물을 건조기내에서 80°C, 48시간 건조하여, 고형물의 입자가 2 mm 이하인 것은 분립생산량(CW)으로, 2 mm 이상의 것을 잔식량(RM)으로 하였으며, 먹이의 섭취량(ID)은 실험전 먹이의 총 건물중에서 잔식량과 분립량을 뺀 값으로 계산하였다.

공시한 분뇨슬러지의 이화학적 성질을 분석한 결과는 표 1과 같다.

Table 1. Characteristics of the nightsoil sludge used for the experiment.

Moisture	65.7%
Total solids (TS)	34.3%
Volatile solids (VS)	74.8%
Fixed solids (FS)	25.2%
Total Nitrogen (TN)	5.34%
C/N ratio	4.9
pH	6.8

총고형분(TS)은 80°C에서 48시간 건조후 측정된 건물중으로 하였으며, 건물을 550°C의 전기로에서 3시간 태운후 휘발성 고형분(VS)과 고정고형분(FS)의 값을 구하였다. 전질소합량(TN)은 micro-kjeldahl법(AOAC, 1980), C/N ratio는 총탄소합량(TC)과 전질소합량의 비율로 구하였으며, pH는 이온전극법으로 측정하였다.

또한 지렁이 먹이로서 분뇨슬러지의 안전성을 평가하기 위하여 실험전 분뇨슬러지와 실험종료후(7주) 분립중의 무기물 함량은 환경오염공정시험법(환경처, 1992)에 준하여 원자흡광광도계(PS 900ICP)로 분석하였다(표 7).

### 3. 결 과

#### 3.1 지렁이 생육결과에 대한 분산분석

사육기간의 차이에 따른 지렁이의 생육결과를 분산분석한 것이 표 2이다.

생존율(SR), 실험종료시 평균생체중(FW<sub>2</sub>), 증체량(IW), 난포수(NC), 산자수(NY), 난포중(WY), 섭취량(ID), 잔식량(RM), 분립생산량(CW)에서는 1% 수준, 그리고 난포중(WC)에서는 5% 수준의 유의성을 나타내어 사육기간의 차이에 따른 지렁이의 생육결과에서는 유의성이 인정되었다.

#### 3.2 사육기간의 차이에 따른 지렁이의 생육결과

사육기간의 차이에 따른 지렁이의 생육결과를 나타낸 것이 표 3이다.

지렁이의 생존율(SR)은 사육기간이 길어짐에 따라서 유의하게 저하하였다. 즉, 방사후 1주에서의 생존율은 99.3%였으나 7주에서는 52%에 불과하여 전체 개체수의 약 1/2이 감소하였다.

각 사육기간 종료시의 평균생체중(FW<sub>2</sub>)은 3주에서 646.5 mg까지 증가하였으나 4주의 559.1 mg과는 유의차 없었으며, 7주에서는 422.6 mg의 낮은 평균생체중을 나타내었다.

증체량(IW)은 실험종료시의 평균생체중(FW<sub>2</sub>)에서 실험개시시의 평균생체중(FW<sub>1</sub>)을 뺀 값으로 단위기간동안의 증체량이라고 할 수 있는데, 3주와 4주에서 각각 338.5 mg, 252.3 mg이 증체되어 다른 사육기간보다 유의하게 증체되었다. 난포수(NC)는 3주에서 7주까지의 사육기간에서 다른 사육기간보다 유의하게 많았는데, 단위개체당 난포수에서는 7주에서 가장 많았다. 난포중(WC)은

**Table 2.** Analysis of variance for the values on measured characteristics of the earthworm in different growth periods.

S V	df	SR	FW <sub>1</sub>	FW <sub>2</sub>	IW	NC	WC	NY	WY	ID	RM	CW
Treatment	6	780.317**	0.778	18881.51**	18891.06**	17543.56**	2.110*	6258.21**	1.654**	490.74**	3664.56**	1579.66**
Error	14	142.095	0.571	2599.17	2552.30	2791.90	0.531	126.14	0.014	28.49	55.15	92.82

Note. \* and \*\* are significant differences at 5 and 1% level, respectively.

SR: survival rate (%), FW<sub>1</sub>: mean fresh weight (mg) of adult worm at initial time, FW<sub>2</sub>: mean fresh weight of adult worm at final time, IW: increased mean fresh weight (FW<sub>2</sub>-FW<sub>1</sub>), NC: number of cocoons, WC: fresh weight of cocoon (g), NY: number of young worms, WY: fresh weight of young worms (g), ID: dry weight of feed ingested(g), RM: residual matter (g, > 2.0 mm) and CW: dry weight of cast (g, < 2.0 mm).

**Table 3.** The values on the measured characteristics of the earthworm in different growth periods.

Growth period (weeks)	SR(%)	FW <sub>1</sub> (mg)	FW <sub>2</sub> (mg)	IW (mg)	NC	WC (g)	NY	WY (g)	ID (g)	RM (g)	CM (g)
1st	99.3 <sup>a</sup>	307.3 <sup>a</sup>	439.2 <sup>d</sup>	131.8 <sup>d</sup>	9.0 <sup>c</sup>	0.11 <sup>c</sup>	0.0 <sup>c</sup>	0.0 <sup>d</sup>	122.5 <sup>d</sup>	202.9 <sup>a</sup>	17.6 <sup>c</sup>
2nd	90.7 <sup>ab</sup>	308.0 <sup>a</sup>	543.9 <sup>bc</sup>	235.8 <sup>bc</sup>	84.0 <sup>bc</sup>	1.44 <sup>ab</sup>	0.0 <sup>c</sup>	0.0 <sup>d</sup>	129.9 <sup>d</sup>	154.7 <sup>b</sup>	58.3 <sup>b</sup>
3rd	87.3 <sup>ab</sup>	308.0 <sup>a</sup>	646.5 <sup>a</sup>	338.5 <sup>a</sup>	186.7 <sup>a</sup>	2.65 <sup>a</sup>	0.0 <sup>c</sup>	0.0 <sup>d</sup>	144.5 <sup>c</sup>	130.8 <sup>c</sup>	67.7 <sup>ab</sup>
4th	79.3 <sup>abc</sup>	307.8 <sup>a</sup>	559.1 <sup>ab</sup>	251.3 <sup>ab</sup>	210.3 <sup>a</sup>	1.94 <sup>ab</sup>	13.3 <sup>c</sup>	0.1 <sup>d</sup>	143.6 <sup>c</sup>	126.5 <sup>cd</sup>	72.9 <sup>ab</sup>
5th	76.0 <sup>bc</sup>	307.7 <sup>a</sup>	506.5 <sup>bcd</sup>	198.8 <sup>bcd</sup>	211.0 <sup>a</sup>	2.10 <sup>ab</sup>	41.3 <sup>b</sup>	0.5 <sup>c</sup>	147.4 <sup>bc</sup>	116.4 <sup>cd</sup>	79.3 <sup>a</sup>
6th	64.7 <sup>cd</sup>	307.3 <sup>a</sup>	456.1 <sup>cd</sup>	148.8 <sup>cd</sup>	211.3 <sup>a</sup>	1.35 <sup>bc</sup>	93.7 <sup>a</sup>	1.5 <sup>b</sup>	155.1 <sup>ab</sup>	104.5 <sup>c</sup>	83.4 <sup>a</sup>
7th	52.0 <sup>d</sup>	308.0 <sup>a</sup>	422.6 <sup>d</sup>	114.6 <sup>d</sup>	239.7 <sup>a</sup>	0.87 <sup>bc</sup>	105.0 <sup>a</sup>	1.7 <sup>a</sup>	157.9 <sup>a</sup>	104.0 <sup>c</sup>	85.1 <sup>a</sup>

Means with the same letters are not significantly different at 5% level by Duncan's Multiple Range Test.

2주에서 5주까지에서는 유의한 차이가 인정되지 않았으나 3주에서는 2.65 g을 나타내어 가장 무거웠다.

산자수(NY)는 지렁이 방사후 4주부터 출현하기 시작하였는데, 6주와 7주에서 각각 93.7, 105.0개체의 산자수를 나타내어 다른 사육기간보다 유의하게 높았으며, 산자중(WY)도 산자수와 같은 경향을 나타내었다. 섭취량(ID)은 먹이의 총 고형분에서 잔식량(RM)과 분립생산량(CW)을 뺀 값으로, 사육기간이 길어짐에 따라서 증가되었다. 잔식량(RM)은 사육기간이 길어짐에 따라서 감소되어 6~7주에서 가장 낮은 값을 나타내었다. 또한 분립생산량(CW)은 사육기간이 길어짐에 따라서 증가되는 경향을 나타내었으나, 3주에서 7주까지의 사육기간에서는 유의한 차이가 인정되지 않았다.

### 3.3 지렁이 개체당 1일 섭취량, 분립생산량 및 섭취량에 대한 분립생산량의 비율

지렁이 개체당 1일 섭취량과 분립생산량 및 섭취량에 대한 분립생산량의 비율을 나타낸 것이 표 4이다.

지렁이 개체당 1일 섭취량(ID)과 분립생산량(CW)은 사육기간이 경과함에 따라서 증가되었다. 즉, 개체당 1일 섭취량은 1주에서 352.1 mg

**Table 4.** Accumulated dry weight of feed ingested (ID), dry weight of cast (CW) and ratios of cast to feed ingested.

growth period (weeks)	Feed ingested (ID) (mg/worm/day)	Cast Production (CW) (mg/worm/day)	Ratios of cast (%)
1st	352.1	50.6	14.4
2nd	408.7	180.4	44.1
3rd	472.4	221.3	46.8
4th	516.7	262.3	50.8
5th	554.1	298.1	53.8
6th	683.9	367.7	53.8
7th	867.6	467.6	53.9

이었던 것이 7주에서는 867.6 mg으로 증가되었고, 분립생산량(CW)은 1주에서 50.6 mg이었던 것이 7주에서는 467.6 mg으로 증가되었다.

또한 섭취량에 대한 분립생산량의 비율은 1주에서 14.4%로 섭취량의 약 1/7에 불과하였으나, 4주 이후의 사육기간에서 50% 이상을 나타내어 섭취량의 1/2 이상이 분립생산량에 이용되었다.

### 3.4 생육형질간의 상호관계

지렁이의 생육형질간의 상호관계를 나타낸 것이 표 5이다.

생존율(SR)은 생육기간 종료시의 평균생체중(FW<sub>2</sub>)과는 5% 수준의 유의한 정상관, 난포수(NC), 산자수(NY), 산자중(WY), 섭취(ID), 그리고 분립생산량(CW)과는 유의한 부(-)의

**Table 5.** Correlation coefficients among the measured characteristics of the earthworms.

	FW <sub>1</sub>	FW <sub>2</sub>	NC	WC	NY	WY	ID	RM	CW
SR	-0.143	0.722*	-0.821*	-0.024	-0.942***	-0.935***	-0.926***	-0.858**	-0.821*
FW <sub>1</sub>		0.531	0.331	0.504	-0.138	-0.116	0.183	-0.308	0.383
FW <sub>2</sub>			0.246	0.841**	-0.637	-0.644	-0.120	-0.043	0.097
NC				0.561	-0.636	0.249	0.969***	-0.934***	0.952***
WC					-0.209	-0.244	0.352	-0.518	0.557
NY						0.997***	0.852*	-0.711*	0.653
WY							0.806*	-0.683	0.624
ID								-0.960***	0.918***
RM									-0.992***

Note. \*, \*\* and \*\*\* are significant differences at 5, 1 and 0.1% level, respectively.

상관을 나타내었다. 평균생체중(FW<sub>2</sub>)은 난포중(WC)과 1% 수준의 유의한 정상관을 나타내었고, 난포수(NC)는 섭취량(ID)과 분립생산량(CW)과는 0.1% 수준의 유의한 정상관을, 잔식량(RM)과는 유의한 부의 상관을 나타내었다. 산자수(NY)는 산자중(WY), 섭취량(ID)과는 유의한 정상관을 나타내었으나 잔식량(RM)과는 유의한 부의 상관이 인정되었다.

산자중(WY)은 섭취량(ID)과 유의한 정상관을 나타내었고, 섭취량(ID)은 잔식량(RM)과는 유의한 부의 상관을, 분립생산량(CW)과는 유의한 정상관을 나타내었다. 또한 잔식량(RM)은 분립생산량과 0.1% 수준의 유의한 부의 상관이 인정되었다.

### 3.5 생육기간중의 증체속도와 현존량

사육기간중의 증체속도와 현존량의 변화를 나타낸 것이 표 6이다.

**Table 6.** The values on increasing rate (IR) and biomass of the earthworms (BE) in different growth periods.

Growth period (weeks)	IR (mg/day)	BE (g)
1st	5.10	6.54
2nd	8.12	10.70
3rd	10.59	14.48
4th	8.52	9.98
5th	7.12	7.55
6th	5.64	4.81
7th	4.52	2.98

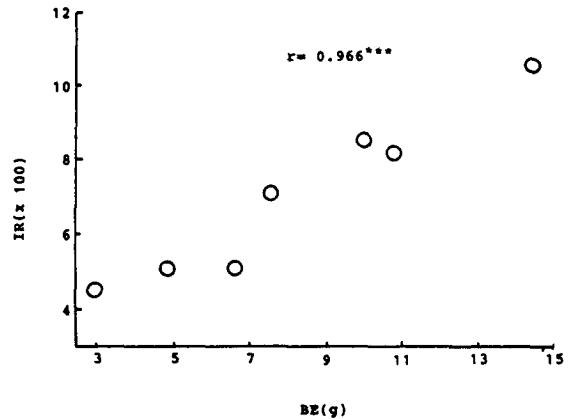
IR :  $(\ln FW_2 - \ln FW_1 / t_2 - t_1) \times 100$

BE : No. of adult worms at initial time  $\times$  SR (%)  $\times$  IW (mg)

증체속도(IR)와 현존량(BE)은 모두 3주까지 증가하였다가 그 이후의 사육시기에서는 저하하였다. 즉, 3주에서의 증체속도는 10.59 mg/day, 현존량은 14.48 g으로 가장 높은 값을 나타내었으나, 7주의 증체속도와 현존량은 각각 4.52 mg/day 와 2.98 g으로 가장 낮은 값을 나타내었다.

### 3.6 증체속도와 현존량과의 관계

생육기간에 따른 증체속도와 현존량과의 관계를 나타낸 것이 그림 1이다.



**Fig. 1.** Relationship between biomass of the earthworms (BE) and increasing rate (IR) in different growth periods.

증체속도와 현존량과의 상호관계에서는 0.1%수준의 유의한 정상관을 나타내어 증체속도가 높아짐에 따라서 현존량이 증가되었다.

### 3.7 현존량과 분립생산량

생육기간에 따른 현존량과 분립생산량의 변화경향을 나타낸 것이 그림 2이다.

현존량(BE)은 3주까지 직선적으로 증가하였으나 그 이상의 사육기간에서는 급속히 저하하였다. 그러나 분립생산량(CW)은 1주에서 2주까지 높은 증가율을 나타낸 반면에, 이후 7주까지는 완만하게 증가하여 사육기간이 길어짐에 따라서 분립생산량이 축적되는 경향을 나타내었다.

### 3.8 분뇨슬러지와 분립의 무기물 함량

분뇨슬러지와 분립의 무기물 함량의 분석결과를 중금속과 일반무기물로 구분하여 나타낸 것이 표 7이다.

분뇨슬러지의 중금속 함량은 납(Pb)이 가장 높

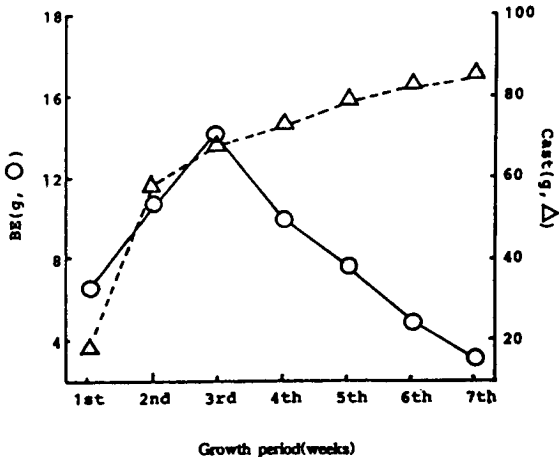


Fig. 2. Changes in biomass of the earthworms (BE) and cast production in different growth periods.

Table 7. Heavy metal and mineral concentrations of the nightsoil sludge and worm casts.

Minerals		Sludge (S)	Cast (C)
Heavy metal (mg/kg)	As	4.1	ND
	Pb	103.0	41.1
	Cd	3.1	1.5
	Cr	19.3	4.4
	Ni	17.1	2.3
Mineral (mg/100g)	Ca	1,355.0	1,511.0 (+)
	Mg	240.8	123.7
	Fe	677.9	164.8
	Al	777.2	11.2
	Zn	113.9	52.8
	Cu	17.5	0.4
	Mn	21.2	9.1

ND : Not detected  
(+) : increased in worm casts

은 103 ppm을 나타내었고 다음으로는 크롬(Cr)이 19.3 ppm, 니켈(Ni)이 17.1 ppm, 비소(As)가 4.1 ppm, 그리고 카드뮴(Cd)의 3.1 ppm 순이었다.

또한 분립에서는 비소(As)만이 정량화할 수 없었으나, 납(Pb)은 41.1 ppm, 카드뮴(Cd)이 1.5

ppm, 크롬(Cr)이 4.4 ppm, 니켈(Ni)이 2.3 ppm으로 분뇨슬러지의 중금속 함량보다 훨씬 낮았다.

분뇨슬러지의 무기물 함량은 칼슘(Ca)이 1,355 mg, 알루미늄(Al)이 777.2 mg, 철(Fe)이 677.9 mg, 마그네슘(Mg)이 240.8 mg, 아연(Zn)이 113.9 mg의 순으로 높았고, 구리(Cu)가 가장 낮은 17.5 mg을 나타내었다. 분립에서는 칼슘(Ca)이 1,511 mg, 철(Fe)이 164.8 mg, 마그네슘(Mg)이 123.7 mg, 아연(Zn)이 52.8 mg, 알루미늄(Al)이 11.2 mg, 망간(Mn)이 9.1 mg, 그리고 구리(Cu)가 0.4 mg을 나타내어 분뇨슬러지의 무기물 함량보다 낮았으나, 칼슘함량(Ca)은 156 ppm이 증가되었다.

#### 4. 고 찰

효율적인 Vermicomposting에 있어서 중요한 것은 지렁이의 생육에 알맞는 먹이량과 적정 사육 밀도의 조건에서 높은 생존율을 유지시켜 증식효율과 증체속도를 높혀 현존량과 분립생산량을 증가시키므로 자원화율을 높히는 일이라고 생각된다(李 등, 1992; 이 등, 1993; 이, 1995). 또한 Vermicomposting의 과정에서 대량으로 생산되는 분립의 안전성을 확보하기 위해서는 유해중금속 함량이 낮은 유기성폐기물을 선정하여 재활용하는 것이 토양생태계의 보전을 위하여 중요하다고 생각된다.

본 실험의 결과 사육기간이 길어짐에 따라서 개체의 생존율은 급격히 저하되었다(표 3). 일반적으로 개체의 생존율의 변화는 단위용적당 먹이량과 지렁이의 중량비에 의한 개체밀도의 변화에 기인하며(Edwards, 1988), 현존량이 최대가 되는 이후의 시기에서 먹이의 부족에 의하여 유발되는 개체간 경쟁의 결과(岡田, 1980)라고 볼 수 있다. 즉, 지렁이 생육에 가장 적당한 먹이량과 중량비는 8~10의 범위이며(Edwards, 1988), 1일 개체

당 먹이의 섭취량을 체중의 1/2~1/3로 추정할 경우(李 등, 1992), 사육기간중 지렁이의 먹이요구량은 생존율×개체수×평균개체중×1일 섭취량×생육기간×8(먹이/중량비)이 된다. 이상의 계산에 의하여 얻어진 사육기간중의 먹이요구량 범위는 1주에서 0.29~0.43 kg, 2주에서 0.57~0.86 kg, 3주에서 0.79~1.18 kg이므로, 최초 먹이급여량 1kg을 기준으로 할 때 3주 이후의 사육기간부터 먹이부족에 의한 개체간 경쟁이 유발되었다고 추정할 수 있어, 3주이후의 사육기간에서 생존율이 급격히 저하되었다고 생각된다. 또한 최대 증체속도와 현존량은 3주째에서 얻을 수 있었고(표 6), 증체속도와 현존량과는 0.1% 수준의 유의한 정상관을 나타내었으며(그림 1), 생존율과 증식효율(난포수+산자수)과는 유의한 부의 상관성이 인정된 것으로 보아서(표 3), 증체속도 의존적인 생육결과를 나타내었다고 생각된다. 이와 관련하여 李 등(1992)은 먹이조건이 좋을 경우 증체속도보다는 증식효율을 향상시키고, 먹이조건이 나쁠 경우에는 증식효율은 낮아지나 증체속도는 빨라진다고 하였고, 이(1995)는 좋은 먹이조건에서 지렁이의 생육은 증식효율 의존적이며, 나쁜 먹이조건에서는 증체속도 의존적인 생육결과를 나타낸다고 하였다.

특히 7주에서는 생존율이 가장 낮았으나 개체당 난포수는 가장 많았다(표 3). 이상과 같은 결과는 먹이조건과 사육밀도가 적당할 때 섭취량 증가에 의하여 증식효율은 높아지지만, 같은 먹이조건에서 사육기간이 길 경우 개체간 경쟁이 심하여져 생존율이 저하하는 대신에 증체속도는 느리나 증식효율이 높아진다고 한 이 등(1993)의 연구결과와, 증식효율을 나타내는 난포생산수와 산자수는 먹이조건, 환경조건 및 종에 따라서 큰 차이가 인정되며, 최적환경조건에서 증식효율이 높아지지만 환경이 불량한 경우에는 생존을 최대한 가능케 하기 위한 생존전략으로서 증식효율이 높아질 수 있다고

보고한 渡邊 등(1979)의 결과와 일치한다고 생각된다.

Vermicomposting의 목적은 유기성 폐기물자원을 효율적으로 처리하여 재활용율을 높히는데 있지만, 그 과정에서 동물성 단백질자인 지렁이와 토양개량제인 분립을 대량으로 얻을 수 있으므로, Vermicomposting의 경제성을 고려할 경우 지렁이의 현존량이 최대가 되는 시기와 분립을 대량으로 생산할 수 있는 시기를 추정하는 것이 중요하다고 생각된다.

지렁이를 최대로 생산할 수 있는 시기는 증체속도가 높아서 현존량이 가장 많은 시기라고 할 수 있으며, 생존율의 저하에 의한 개체밀도의 감소가 인정되지만, 분립축적량이 가장 많은 시기에서 분립의 채취시기를 결정하는 것이 중요하다고 생각된다. 본 실험의 결과 지렁이에 의한 먹이 섭취량이 3주까지는 증체를 위하여 이용되어(표 4), 증체속도가 높았고 그에 따른 현존량이 많아서(표 6, 그림 1), 3주째에서의 지렁이 채취가 가장 유리하다고 할 수 있다.

또한 3주이후의 사육기간중에는 먹이 섭취량의 50% 이상이 분립생산에 이용되었고(표 4), 개체속도와 현존량이 급격히 저하하였으나(표 6), 분립생산량의 증가경향으로 볼 때(그림 2), 분립의 채취시기는 7주째가 가장 유리하다는 것을 시사하였다. 岡田 등(1980)도 적정밀도조건에서 지렁이의 현존량이 최대가 되는 시기는 먹이 급여후 15~30 일이라고 보고하여 본 실험에서 현존량이 최대가 되는 시기와 일치하였으며, Edwards(1988)는 지렁이의 현존량을 최대로 얻을 수 있는 시기는 분립생산량이 최대가 되는 시기보다 이르다고 보고하였다.

Vermicomposting의 과정에서 얻어지는 분립은 식물체의 생육을 위한 토양개량제 또는 유기질 비료로 사용되어 토양으로 환원되므로 토양생태계의 보전을 위한 분립의 안전성 평가가 우선되어야



한다고 생각된다. 특히 중금속과 무기물중 유해이온이 분립속에 함유되어 토양으로 환원될 경우 식물체의 생육과 토양잔류에 미치는 영향이 크기때문이다. 분뇨슬러지와 분립의 무기물 함량을 분석한 결과(표 6), 분립에서는 Ca을 제외한 모든 무기물 함량이 분뇨슬러지의 함량보다 낮았다. 또한 분립의 무기물 함량은 유기질비료의 중금속 허용규제치인 비소(As) 50ppm 이하, 카드뮴(Cd) 5ppm 이하, 납(Pb) 150ppm, 크롬(Cr) 150ppm 이하(농림수산부, 1995)의 값을 나타내어, Vermicomposting에 의하여 분뇨슬러지를 처리할 경우 생산되는 분립은 안전성이 높아서 토양으로의 환원이 가능하다고 생각된다. 특히 분립에서 Ca함량이 높았던 것은 지렁이 체내에 있는 Calcium gland의 작용에 의한 Ca생성에 기인된 것으로 추정된다(Lee, 1985). 또한 분립의 중금속 함량이 분뇨슬러지보다 낮았던 것은 생육기간중 지렁이의 체내에 중금속이 축적되었기 때문이라고 추정된다. Hartenstein 등(1980, 1981)은 지렁이의 생물학적 활동에 영향을 미치는 주요한 무기물은 카드뮴(Cd), 니켈(Ni), 납(Pb), 아연(Zn) 및 구리(Cu)라고 하였는데, 이 중에서 카드뮴(Cd)은 토양의 함량보다 지렁이 체내에 축적된 양이 많았다고 하였고, Morgan과 Morgan(1988)도 카드뮴(Cd)의 생물학적 농축(bioconcentration) 가능성이 가장 높다고 하였으며, 토양중의 유기물 함량이 높을 수록 지렁이 체내의 카드뮴(Cd)의 축적량이 많다고 하였다(Gish와 Christensen, 1973; Ireland, 1983). 또한 조 등(1996)도 여러가지 유기성 폐기물을 Vermicomposting에 의하여 처리하였을 때, 지렁이에 의한 중금속 축적효과가 컸음을 보고하였다. 이상과 같이 지렁이에 의한 중금속 농축효과가 크다고 고려할 때, 분뇨슬러지보다 중금속 함량이 높은 하수슬러지와 같은 유기성 폐기물을 Vermicomposting에 의하여 처리할 경우, 중금속의 생물고정화를 위한 Vermicom-

posting의 활용가능성은 매우 높다고 생각된다.

## 5. 결 론

분뇨슬러지를 Vermicomposting에 의하여 처리하였을 때, 지렁이의 생육과정을 추적하고 분립의 안전성을 평가하여 효율적인 Vermicomposting운용을 위한 기초적인 자료를 수집하려고 하였으며, 그 결과를 요약하면 다음과 같다.

1. 사육기간이 길어짐에 따라서 지렁이의 생존율은 1주에서 99.3%가 7주에서는 52.0%로 감소하였다.
2. 분뇨슬러지의 섭취량에 대한 분립생산량의 비율로서 사육기간을 2단계로 구분할 수 있다. 즉, 3주까지의 사육기간에서는 먹이 섭취량이 주로 지렁이의 중체에 이용된 반면에, 3주에서 7주까지의 사육기간에서는 먹이 섭취량이 분립생산에 이용되었다.
3. 3주에서의 지렁이의 중체속도와 현존량은 각각 10.549 mg/day와 14.48g으로 다른 사육기간보다 높은 값을 나타내었으며, 중체속도와 현존량과의 관계는 0.1% 수준의 유의한 정상관을 나타내었다.
4. 지렁이의 현존량은 3주에서 가장 높은 값을 나타내었으나, 분립생산량은 3주부터 7주까지 점차적으로 증가하여 7주에서 가장 많았다. 이상과 같은 결과는 동물성 단백질자원으로 지렁이를 이용할 경우에는 3주에서의 채취가, 토양개량제로 분립생산량을 최대로 얻기 위해서는 7주에서의 채취가 가장 유리하다는 것을 의미한다.
5. 칼슘(Ca)을 제외한 분립의 무기물함량은 분뇨슬러지보다 낮은 값을 나타내었는데, 이는 Vermicomposting의 과정에서 지렁이에 의한 체내축적이 많았기 때문이라고 생

각된다.

6. 분립의 무기물함량(중금속)은 유기질 비료의 허용규제치 이하의 값을 나타내어 안전성이 높은 토양개량제로서 활용가능성이 높다고 생각된다.

이상에서 얻어진 결과는 그동안 매립처리에 의존하여 왔던 분뇨슬러지를 Vermicomposting에 의하여 처리할 경우, 동물성 단백질자원으로서 지렁이와 토양개량제로서 안전성이 높은 분립을 대량으로 생산할 수 있다는 잇점이 있어, Vermicomposting은 분뇨슬러지의 자원화율을 높이고 환경보전에도 크게 기여할 수 있는 유용한 유기성 폐기물 처리방법이라고 생각되었다.

### 참 고 문 헌

1. AOAC., 1980. Official methods of analysis. Association of official analytical chemists. Washington D. C. U. S. A.
2. Edwards, C.A., 1988. Breakdown of animal, vegetable and industrial organic wastes by earthworms. Earthworm in waste and environmental management.(ed.) by C.A. Edwards and E.F. Neuhauser. pp.21-31. Academic Publishing, The Hague, The Netherlands.
3. Gish, C.D. and R.E. Christensen, 1973. Cadmium, Nickel, Lead and Zinc in earthworms from roadside soil. Environmental Science & Technology 7(11): 1060-1062.
4. Hartenstein, R., E.F. Neuhauser and J. Colliter, 1980. Accumulation of heavy metal in the earthworm *Eisenia foetida*. J. Environ. Qual., 9(1):23-26.
5. Hartenstein, R., E.F. Neuhauser and A. Narahara, 1981. Effect of heavy metal and other elemental additive to activated sludge on growth of *Eisenia foetida*. J. Environ Qual. 10(3):372-376.
6. Ireland, M.P., 1983. Heavy metal uptake and tissue distribution in earthworms. In Earthworm Ecology; From Darwin to Vermiculture. ed. by J.E. Satchell. pp.247-265. London, Chapman & Hall.
7. Lee, K.E., 1985. Earthworms, their ecology and relationships with soils and land use. Academic Press.
8. 岡田光正, 森忠一, 須藤降一, 1980. シマミミズによる汚泥處理の可能性に関する研究-ミミズ個體群の動態に関するシミュレーションと汚泥處理のため最適條件の推定-. 國立環境研究所 研究報告 第 14號 223-247.
9. 渡邊弘之, 森 忠一, 平田俊道, 1979. ミミズの有効利用とその技術.サイエンティスト社. pp.11-24.
10. 농림수산부, 1995. 비료관리법
11. 李柱三, 鄭在春, 曹益煥, 1992. 제지 sludge와 우분의 혼합비율이 붉은 지렁이의 생육과 분립의 화학적 조성에 미치는 영향. 한국 폐기물학회지 9(2):19-26.
12. 이주삼, 김성진, 조고영, 1993. Vermicomposting에 의한 우분의 처리. - 사육밀도가 지렁이의 생육과 증식에 미치는 영향 -. 한국유기성자원화협의회 학회지 1(2):259-266.
13. 이주삼, 1995. Vermicomposting에 의한 우분의 처리 - 먹이의 탄질율과 사육밀도가 지렁이의 생육과 분립의 생산에 미치는 영향 -

한국축산시설환경학회지 1(1):65-75.

14. 조익환, 이주삼, 전하준, 1996. 지렁이에 의한 유기성 폐기물의 처리. 한국유기농업학회

지 5(1):투고중

15. 환경부, 1992. 환경오염공정시험법 폐기물편  
16. 환경부, 1996. 환경백서