

지렁이 양식을 이용한 슬러지 처리 최적조건에 관한 연구

최 훈 근

국립환경연구원 폐기물연구부

A Study on Optimal Conditions of Sludge Treatment by Vermistabilization

Hun Geun Choi

Waste Management Research Department, National Institute of Environmental Research

ABSTRACT

Vermistabilization is the stabilization of organic wastes using earthworms. The worms maintain aerobic conditions in the waste, accelerating and enhancing the biological decomposition of the waste. This study was carried out to find out fundamental factors affecting the performance of the process such as temperature, moisture content and pH condition of nightsoil sludge, and to evaluate the worms excreta (casting) as fertilizer.

The results could be summarized as follows; the optimum range of temperature was observed 10~30°C while survival rate of earthworm decreased rapidly at 35°C within 6 days and death occurred at 5°C. Those of moisture content and pH condition were 50~70% and 5~8, respectively.

Earthworms were revealed to change the composition of N in nightsoil sludge consisting of NH₃-N (71%), NO₂-N (2%) and NO₃-N (27%) into that NH₃-N (24%), NO₂-N (1%), NO₃-N (75%) in earthworm excreta, respectively. The concentrations of NH₃ and H₂S gas in pig manure were reduced by 59.2% and 45.2% in case of mixing pig manure with casting.

緒 論

전국의 분뇨처리장은 149개로써 처리용량 12,677 kl/일('88 기준), 하수처리장은 17개소에서 509만 톤/일 및 산업체 9,000여개 업소에서 폐·하수 및 분뇨를 처리한 후 다량의 슬러지를 개량, 농축, 탈수 및 소화 등의 과정을 거쳐 매립지에 최종처분되는 바 이러한 적정처리를 위해서는 처리장 시설비의 약 30~40% 정도 소요되고 운전비도 그와 상응하는 것으로 알려져 있다.

또한, 공공하수처리시설의 필연적인 확충, 수세식변소의 증가로 인한 정화조오니의 증가, 산업시설의 증가 등으로 인한 각종 폐·하수 및 분뇨처리 과정에서 발생하는 슬러지의 처리량은 급진적으로 증가될 것이며, 이것은 처리시설 설치비, 운영비 등의 비용부담 및 매립지난을 가중시킬 것이다. 따라서 위와 같은 문제를 해결하고 슬러지의 혁신적인 관리방안을 모색하기 위하여 분뇨처리장 및 산업처리장에서 발생하는 슬러지 소각처리법이 대두되고 있으나, 이것 역시 고가의 시설설치비와 처리 후 발생하는 오염물질을 제거하기 위하여 대기오염방지시설 등을 설치해야 하는 등 그 나름대로의 장단점을 내포하고 있는 실정이다.

한편, 우리나라와 같이 슬러지 처리 문제에 당면하고 있는 선진외국에서는 이 문제를 해결하는 방법으로서 지렁이를 이용한 연구가 진행되고 있다. 지렁이는 잡식성 동물로써 자연계에 존재하는 모든 식물의 잔재물이나 동물사체 등을 유기영양원으로 섭취한 후 분변토(Casting)를 배출하는데 이는 농업에 매우 유익하다는 찰스다아윈의 100여년 전의 발표를 기점으로 하여 생물, 동물 학자들에 의하여 지렁이의 생태 및 구조¹³⁾에 대한 연구가 수행되었으며, 토양학자는 지렁이의 토양정화능력^{11,21)} 및 토양의 물리적 특성 변화¹⁷⁾에 대한 연구를 하였으며, 농업학자들은 농산물 증식을 위한 지렁이의 활용^{4,5)}과 농경지, 목초지, 산림 등의 비옥도 증식¹²⁾을 위한 연구가 진행되어 왔다. 1980년도 들어서는 슬러지 처리하는 목적에 지렁이를 이용하는 방안으로 M.J.

Mitchell 등²⁵⁾이 하수슬러지의 분해, R.C. Loehr²⁾ 액체슬러지의 안정화, Roy Hartenstein 등¹⁹⁾이 활성슬러지의 처리시 물리화학적 변화 등에 관하여 연구하여 슬러지 처리 문제를 해결하는 방안으로 지렁이의 유기물 섭취능력을 이용하는 새로운 처리개념¹⁵⁾이 대두되고 있는 실정이다.

본 연구에서는 지렁이를 이용한 슬러지 처리시 지렁이의 환경요인에 대한 영향, 지렁이 분변토의 비효성과 탈취효과 등에 대한 기초적 연구를 수행하였다.

實驗材料 및 方法

1. 실험재료

실험용 지렁이는 뉴시용 미끼로 공급하기 위하여 인공양식하고 있는 붉은 지렁이(Red worm: *Lumbricus rubellus*) 중 0.2~0.4 g 범위내의 지렁이를 양식장에서 채취한 후 실험실에서 사육하면서 실험에 이용하였고, 슬러지는 안양시 위생처리장의 분뇨 탈수케임을 실험재료로 사용하였으며, 사육용기는 18 cm×20 cm×4 cm 크기로서 공기가 유통될 수 있도록 한 스티로폴 용기를 사용하였다.

2. 실험내용 및 방법

① 환경조건(온도) 적응능력 실험

Incubator와 thermostat를 이용하여 지렁이 사육용기의 온도를 5°C, 10°C, 20°C, 30°C, 35°C로 조절하면서 슬러지 120 g과 지렁이 20마리씩을 사육용기에 입식시켜 온도에 따른 변화를 관찰하였다(사육용기의 함수율은 67%로 유지 및 3일 간격으로 생존수 파악).

② 환경조건(함수율) 적응능력 실험

Incubator(20°C 유지)내에서 지렁이 사육용기에 각각 함수율, 40, 50, 60, 70, 80, 90%로 조절한 슬러지 120 g(pH 6.2)에 지렁이 20마리씩을 입식시켜 관찰하였으며, 3일 간격으로 생존수를 관찰하였다.

③ 환경조건(pH) 적응능력 실험

슬러지를 1N~5N의 HCl 또는 1N~5N NaOH

용액을 사용하여 pH 4, 5, 6, 7, 8, 9, 10으로 조절하여(단, 함수율은 67%로 유지) 슬러지 120 g에 지렁이 20마리씩 사육용기에 입식시킨 후 incubator에서 (20°C 유지) 사육하면서 변화를 관찰하였으며, 3일 간격으로 생존수 파악.

④ 지렁이 분변토의 비효성 실험

슬러지 섭취후 발생하는 분변토의 이화학적 성상을 TKN, T-P, K (standard method), 함수율, pH(환경오염공정시험법) NH₃-N, NO₂-N, NO₃-N, PO₄-P(비료시험법) 등을 분석하였다.

⑤ 지렁이 분변토(casting)의 악취제거 효율 실험

밀폐된 플라스틱 용기(30×26×20 cm)에 돈사에서 채취한 돈분을 넣은 대조군과 돈분에 지렁이 분변토를 혼합하여 넣은 비교군을 각각의 용기에 2 kg 씩 넣은 후 20시간 후에 가스를 포집하여 NH₃ 및 H₂S 가스를 환경오염공정시험법에 의하여 분석하였다.

實驗結果 및 考察

1. 온도변화에 따른 지렁이 성장영향

지렁이는 주변의 환경변화에 매우 민감하게 작용하는 것으로 알려져 있으며, 특히 온도에 대해서는 생활활동에 민감하게 영향을 받는 것으로 알려져 있는데 일반적으로 봄, 가을에는 먹이의 섭취, 성장, 번식 등이 왕성하게 일어나 여름의 고온이나 겨울의 저온 상태에서는 휴면상태를 유지하기 때문에 일년에 약 6개월 정도 활동하는 것으로 알려져 있고¹⁴⁾ Evans 등³⁾은 목초지에서 지렁이 개체수는 토양 온도변화에 따라 민감한 영향을 받는다고 하였다.

이러한 온도변화에 따른 지렁이 성장영향에 대하여 실험한 결과는 Table 1에 나타낸 바와 같다.

Table 1에서 알 수 있는 바와 같이 5°C 및 35°C의 온도에서는 지렁이 생육조건에 부적합하여 정상적인 생활활동에 지장을 초래하는 것으로 나타났으며, 10~30°C에서는 60~90% 정도가 생존되는 것으로 관찰되었다. 시간이 경과할수록 지렁이가 사멸되는 경향을 나타내는 것은 생존수를 파악하기 위

Table 1. Relationship between survival rate of earthworm and different temperature conditions. (unit : No. of worm)

Sample	Time (days)	Temp.	3	6	9	12	Survival rate (%)
1	5°C						0
2							
3							
1	10°C		18	17	15	15	75
2			18	16	16	15	75
3			18	17	17	14	75 (73)
1	20°C		15	14	14	12	60
2			20	17	13	13	65
3			20	15	14	13	65 (63)
1	30°C		20	15	13	12	60
2			20	20	18	18	90
3			20	19	17	16	80 (76.7)
1	35°C		7	2	2	—	0
2			16	3	—		
3			17	4	—		

한 확인과정에서 외부로 자주 노출되어 야행성이며 광선에 의해 해를 입는 지렁이의 특이성에 기인한 것으로 판단된다. 본 실험결과를 Kaplan 등⁸⁾이 말뚝과 활성슬러지를 시료로 페트리접시(20×100 mm)에 지렁이 한마리를 넣어 온도에 따른 생체량 증감, 생존수 등을 조사한 결과와 비교하여 보면 5°C에서 생존율이 50%에 이르고 20~29°C에서 지렁이 생존율이 100%에 가까우며, 30°C 넘어서는 급격히 사멸하는 양상을 보였으며, 생체량 증감에 있어서는 5°C에서 약 20% 증가를 시작하여 20°C에서 최대를 이르고 30°C 이후에서는 급격히 감소하는 현상을 나타내고 있다. 또한 Hartenstein⁶⁾이 온도 변화와 지렁이의 밀도에 따른 지렁이의 생존율 실험 자료에 의하면 온도 18~30°C에서 생존율이 100% 이으나 밀도가 높아지면 동일 온도내에서도 생존율이 감소되는 현상을 나타내고 있는 바, 지렁이가 온도에 대한 성장영향은 온도 뿐만 아니라 사육밀도

등과 같은 환경요인이 복합적으로 미치는 것으로 판단된다.

한편, 본 실험에서는 생존율이 10~30°C에 높게 나타난 반면 5°C에서는 3일만에 사멸하는 것으로 나타나 지렁이 생장의 적정온도는 10~30°C가 적합한 것으로 판단되나, 자료에 있어서 다소의 차이를 보이고 있는 것은 두 실험간의 서로 다른 시료의 선택(분뇨슬러지 대 말뚥 혹은 활성슬러지), 입식밀도의 차(1마리/72 cm³ 대 1마리/157 cm³) 등의 차이에 기인한 것으로 사료된다.

한편 5°C 이하에서는 지렁이의 생존율이 낮아 지렁이의 성장에 부적합한 온도로 판단되나, Dimo²⁰⁾가 소련의 Georgia 지방의 건조하고 추운 지방에서 봄에 50~60일 정도 활동을 하면서 성장을 하고 있다는 자료를 보면 지렁이 종류에 따라서도 매우 넓은 범위의 온도에서 걸쳐 생장이 가능한 것으로 판단된다.

2. 함수율 조건에 따른 지렁이의 성장영향

함수율 변화에 따른 지렁이 성장영향에 대한 실험 결과는 Table 2에 나타낸 바와 같다.

지렁이는 원래 수생생물이고 자신의 체중중 85%가 수분을 함유하고 있는 것으로 알려져 있으며, 서식하는 토양이 너무 과도하게 건조시 토양 깊숙히 들어가 휴면 상태를 유지하는데 건조기간이 장기간일 경우 체중이 감소되다가 사멸되며, 이와 반대로 수분이 너무 많을 시는 공기유통이 원활하며 산소가 풍부한 지역으로 이동하는 것으로 알려져 있는데⁹⁾ 그 이유는 수분이 많을 시 토양 및 먹이가 혐기성 상태가 되고 호흡에 의해 생성된 CO₂가 축적되므로써 지렁이의 생존에 영향을 주기 때문인 것으로 알려져 있다.

한편 본 실험에서는 함수율이 매우 높은 90%에서와 낮은 40%에서는 지렁이 생존율이 17%와 47%로서 매우 낮았으며, 함수율이 50~70%에서는 지렁이의 생존율이 80~90%에 이르는 것을 보아 이 범위가 지렁이에 적합한 성장조건으로 사료된다.

한편 지렁이 사육용기에 슬러지를 함수율 70, 80, 90%로 하여 지렁이 1마리를 넣고 무게증감 현상을

Table 2. Relationship between survival rate of earthworm and different moisture contents. (unit : No. of Earthworm)

Sample	Time (days) 함수율 (%)	Time (days)				Survival rate (%)
		3	6	9	12	
1	40	17	14	14	11	
2		16	15	14	11	47
3		19	15	10	6	
1	50	20	17	18	16	
2		20	19	19	15	80
3		19	19	19	17	
1	60	18	16	15	16	
2		16	15	15	14	80
3		19	19	19	18	
1	70	20	20	20	20	
2		20	19	19	16	93
3		20	20	20	20	
1	80	14	13	13	13	
2		18	18	17	10	58
3		20	20	15	12	
1	90	17	14	10	5	
2		14	13	12	3	17
3		18	18	11	2	

관찰한 결과는 Table 3과 같다.

Table 3에 나타낸 바와 같이 함수율 변화에 따른 지렁이의 생체량 증감현상을 보면 함수율 70~90%에서 무게의 증가가 기간에 따라 증가 또는 감소되면서 증가되는 경향을 보이고 있다. 또한 함수율이 같더라도 무게 증감율은 서로 다르게 나타나며, 함수율에 따른 무게 증가율은 80%, 90%, 70% 순으로 증가되는 것으로 관찰하였다. 한편 본 실험결과와 타 연구자들의 자료를 비교하여 보면 Loehr 등²¹⁾이 지렁이의 최적 성장조건을 알기 위해 25°C에서 함수율 변화에 따른 생체량 증가를 조사한 바 함수율이 84~91%(TS 9-16)인 경우 최대의 생체량 증가를 나타내는 것으로 조사되었으며, 아울러 지렁이는 좀더 함수율이 높은 상태에서도 유기물이 존재하고 호기성 상태가 유지된다면 체표면의 호흡기관을 통하여 O₂를 흡입하고 CO₂를 배출하여 약

Table 3. Live weight of earthworm in relation to moisture contents.

(unit : g)

Sample	Moisture Content (%)	Time (days)					Weight Change
		1	3	6	9	12	
1	70	0.328	0.357	0.412	0.443	0.446	+140.0
2		0.376	0.427	0.455	0.450	0.444	+118.6
3		0.393	0.426	0.422	0.398	0.376	- 95.7 (118.1)
1	80	0.415	0.531	0.572	0.575	0.579	+140.0
2		0.454	0.556	0.651	0.692	0.733	+176.6
3		0.370	0.417	0.323	0.613	0.498	+134.6 (150.4)
1	90	0.365	0.407	*0.473	0.436	0.562	+118.8
2		0.311	0.353	*0.195	0.239	0.277	+142.1
3		0.330	0.383	0.400	0.535	0.452	+113.0 (124.6)

*Earthworm was changed owing to death.

31~50주 정도 생존가능한 것으로 알려져 있는데, 이 수중 생활시 제한적 요인은 섭취할 수 있는 먹이가 되는 것으로 알려져 있고 아울러 지렁이의 알도 수중에서 부화되고 생존할 수 있다고 한다.

또한 Kaplan 등⁸⁾이 온도별로 함수율을 변화시켜 지렁이 생체 증가율을 조사한 자료에 의하면 온도 20°C의 경우 함수율이 72, 90, 87, 60%의 순으로 증가되는 것으로 나타났으며, 본 실험에서도 80, 90, 70% 순으로 증가되는 것으로 조사되어 함수율 70~90% 범위가 지렁이의 생체량 증가에 적합한 것으로 판단된다.

그러나 Table 2의 생존율 실험에서는 함수율 90%에서 높은 사망율을 나타내었고 Kaplan 등⁸⁾도 함수율 90%에서 생체량 증가가 원활하나 사망율이 온도 20~28°C의 범위에서 73~33%로 매우 높게 나타난다고 한 것을 보아 함수율 90%는 지렁이 생체량 증가 뿐만 아니라 사망율 증가에도 큰 영향을 동시에 줄 수 있는 요인이 내재되어 있는 것으로 판단된다.

3. pH 조건에 따른 지렁이의 생장영향

각각의 pH 조건에 대한 지렁이의 생장영향을 살펴본 결과는 Table 4에 나타낸 바와 같다.

지렁이는 소화기관의 조직 및 기능이 단순하기 때문에 섭취한 음식물의 원활한 소화작용을 위하여 음식물을 예비 소화시켜야 하는데 이 경우 산 물질을 필요로 하나 과도할 시 손상 또는 사멸하는 것으로 알려져 있다.

본 실험에서는 Table 4에 나타낸 바와 같이 pH 4, 9, 10에서는 생존에 적합하지 않아 거의 사멸되는 것으로 나타났는데 관찰기간에 따른 생존율을 보면 pH 4, 9에서는 실험초기에 (6일) 거의 사멸하는 것으로 밝혀졌다. 한편 Kaplan 등⁸⁾의 연구에서는 pH 2~4 및 10에서는 7일 정도 견디다 사멸하며 슬러지의 초기 pH가 산성은 알카리로, 알카리는 산성으로 변화되면서 중성으로 변하는 양상을 보였는데 이는 본 연구에서도 동일하게 관찰되었다. 이러한 현상은 pH 4, 9에서 초기에 생존한 지렁이는 초기의 pH가 중성화되는 관계로 생존에 미치는 악영향이 감소되어 생존할 수 있었던 것으로 설명될 수 있을 것으로 판단된다. 한편, 실험을 위하여 제조한 슬러지의 pH가 시간이 지남에 따라 중성쪽으로 접근되는 이유가 지렁이의 물질대사의 결과에 의한 것인지 아니면 슬러지내에 존재하는 미생물 작용에 의한 것인지를 알아보기 위하여 초기에 각각의 pH를 4~10까지 조제한 분뇨슬러지에 지렁이를 투입한 것과 지렁이

Table 4. Relationship between survival rate of earthworm and different pH conditions. (unit : No. of worm)

Sample	Time (days) Initial pH					Final pH (Control)	Survival rate (%)
		3	6	9	12		
1	4	18	5	5	2	5.63(5.2)*	10
2		19	6	6	5		25
3		18	8	8	5		25 (20)
1	5	20	19	19	18	5.90(6.0)	90
2		20	20	20	18		90
3		20	18	18	18		90 (90)
1	6	20	20	20	19	6.20(6.7)	85
2		20	18	17	17		85
3		20	17	16	15		75 (85)
1	7	18	17	17	17	6.50(7.9)	85
2		17	16	15	14		70
3		20	19	19	19		95 (83.3)
1	8	20	19	19	19	7.00(7.3)	95
2		20	20	19	19		95
3		20	18	17	16		90 (90)
1	9	7	4	4	4	8.60(8.8)	20
2		3	2	dead			0
3		3	dead				0 (6.7)
1	10	dead				9.40(9.3)	
2		dead					
3		dead					

*() Control group (no worms)

를 투여하지 않고 동일 조건에서 유지한 대조군을 비교하여 보면 지렁이가 존재시 큰 차이를 보이지는 않으나 두 실험 모두 중성쪽으로 접근하는 것을 볼 수 있었다.

한편 지렁이의 생존율이 양호한 pH 5~8 사이에서 pH 변화를 보면 중성쪽으로 변화되면서도 대조군보다 항상 pH가 낮은 것으로 나타나는 것으로 밝혀졌는데 이는 Roy Hartenstein¹⁹⁾가 지렁이 분변토의 pH 변화를 관측한 자료와 같이 지렁이가 활동시 배출한 CO₂ 및 미생물의 대사작용에 의한 유기산 등이 방출되므로써 pH가 낮아진다는 이론과 일치하였다.

4. 지렁이 분변토의 물리적 특성과 비효성

슬러지를 섭취하고 난 후 배설되는 지렁이 분변토를 비료 또는 토양개량제로서의 비효성을 조사하여 본 결과는 Table 5와 같다.

앞서 서술한 실험결과와 같이 지렁이 분변토의 pH는 대조군에서 6.2인데 반하여 5.6로 낮아져 자연상태에서보다 낮은 상태로 유지시키는 작용을 하는 것으로 나타났다. 함수율은 67.5%에서 57.7%로 낮아져 좀더 고형화되어 고형성분이 농축되는 경향을 보였으나 고형분중 함유되어 있는 휘발성 고형물질은 감소되는 경향을 보였다. Loehr 등²⁰⁾의 연구

Table 5. Physicochemical characteristic between sludge and casting.

Items	Sludge	Casting
pH	6.2	5.6
Moisture contents (%)	67.5	57.7
TS (%)	32.5	42.3
VS (%)	21.0 (64.5% of TS)	25.9 (61.2% of TS)
K (ppm)	2295.5 (746.0)	2832.8 (1198.3)
TKN (%)	3.84 (1.25)	2.93 (1.24)
T-P (ppm)	11015.02 (3579.88)	9241.19 (3909.03)
NH ₃ -N (ppm)	1.029	0.360
NO ₂ -N (ppm)	0.023	0.011
NO ₃ -N (ppm)	0.396	1.124
PO ₄ -P (ppm)	2.196	0.874

(): dry basis

에 의하면 지렁이 종류에 따라 다르나 휘발성 고형물질이 32.3~27.6%까지 감소되고(대조군 고려시 19.3~14.6%) 지렁이의 생체량은 증가되는 현상을 밝히면서 유기성 슬러지를 이용하여 지렁이의 증식을 유도함과 아울러 슬러지의 안정화를 도모할 수 있다고 한 점을 고려한다면 본 실험에서 슬러지와 분변토의 휘발성 고형물질의 비교시 분변토의 휘발성 고형물질의 감소는 지렁이가 생체증식 및 활동에 필요한 에너지원으로 소모되어 감소된 것으로 판단된다.

한편, 실험결과중 TKN의 항목에 대하여 생각하여 보면 분변토의 경우 슬러지보다 TKN 성분이 상대적으로 낮은데, 이는 슬러지중의 일부를 지렁이가 물질대사 및 증식에 이용하기 때문에 총체적인 관점에서는 그 양이 일시적으로 감소되나 장기적인 관점에서는 지렁이 그 자체가 토양내에서 사멸하고 다시 분해되어 토양내에 존재하게^{9,22)} 되므로 그 차이는 별로 크지 않으리라 생각되며, 본 실험에서는 실험기간이 지렁이가 사멸할 수 있는 장기간의 연구가 아닌 바 지렁이가 항상 생존되어 있는 상태이므로 질소성분이 외부로부터 유입되지 않는 한 총량적인 관점에서는 감소되는 것이 당연할 것으로 생각된다.

다.

그러나 TKN의 성분중 NH₃-N, NO₂-N, NO₃-N의 무기성분에 대하여 생각하여 보면 작물영양분으로 필요한 질소화합물은 광물중에는 전혀 포함되어 있지 않고 주요한 공급원은 식물의 줄기, 동물의 분 등에 존재하는 유기계 질소화합물로 식물이 양분으로서 직접 이용하기가 불가능하며, 이러한 물질은 미생물의 도움으로 무기태 질소형태로 변환되어야 식물이 양분으로서 이용가능하다.

따라서 식물의 양분으로 이용되기 위해서는 첫째로 미생물에 의해 유기태 질소가 암모니아(NH₄⁺) 이온으로 변하고 암모니아(NH₄⁺)는 nitrite(NO₂⁻)로 변하고 이는 다시 nitrate(NO₃⁻)로 변화되어야 식물이 흡수할 수 있는 것으로 알려져 있는데, 대부분의 식물뿌리는 암모니아(NH₄⁻)나 nitrate을 흡수하는데 nitrate는 암모니아 보다 토양내에서 반응기전이 유동적이므로 쉽게 식물의 뿌리에 흡수되는데 일반적으로 질소성분의 90%가 nitrate 형태로 흡수되고 있는 것으로 알려져 있으며⁹⁾, Barley 등¹¹⁾은 6%의 유기태 질소성분을 함유하고 있는 식물 줄기를 지렁이에게 섭취시키고 배설된 분변토를 분석하여 본 결과 식물뿌리가 이용할 수 있는 무기태 질소로 변화되었다고 발표한 바 있다.

본 조사에서의 분뇨슬러지와 분변토의 NH₃-N, NO₂-N, NO₃-N의 성분변화 양상을 보면 슬러지는 NH₃-N이 많고 분변토는 NO₃-N이 높게 나타나는 것을 볼 수 있는데, 분변토에 NO₃-N이 많이 있다고 하는 사실은 식물뿌리가 직접 흡수하여 양분으로 활용가능한 질소가 많이 있다는 것을 의미한다. 이것은 지렁이가 토양내에 존재하는 질소를 식물의 생육에 직접 이용할 수 있는 형태로 전환시켜주는 중요한 역할을 한다는 것을 나타내며, 또한 슬러지내의 NH₃-N을 NO₃-N으로 변화시키는 역할은 슬러지의 안정화라는 측면에서도 매우 중요한 의의가 있는 것으로 판단된다.

지렁이의 분변토중의 비료성분인 질소, 인, 칼리에 대하여 최¹⁸⁾가 조사한 것과 본 조사에서 분변토를 분석한 결과를 상호 비교하여 보면 TKN은 다소 높게, T-P는 비슷하게, K는 낮게 나타났는데 이는

지렁이가 섭취한 물질에 따라 분변토의 성상이 변화되기 때문인 것으로 추측된다. 또한 여러동물 분과 지렁이 분변토를 비교시 비료성분이 다른 동물의 것보다 지렁이 분변토에 특별히 많이 함유되어 있다고 보기는 힘들 것이나, 지렁이 분의 경우는 다른 종류의 분변토와는 달리 몇가지 주요한 특징을 가지고 있는데, 첫째, 지렁이의 분은 그 크기가 작으면서도 단립구조로 되어 있어 공극율이 크므로 토양에 보수성과 통기성을 원활히 유지시켜 주는 물리적 특성과 지렁이가 먹이를 섭취하여 분변토를 배설하는 데는 12~20¹³⁾ 시간이 소요되는데 섭취된 분, 슬러지, 식물의 잎 등은 지렁이 체내의 사낭에서 분쇄되고 리그닌이나 헤미셀룰로즈 등을 분해시키는¹³⁾ 각종 효소 및 미생물 등에 의해서 식물이 흡수가능한 물질로의 전환이 이루어져 쉽게 식물체내에서 양분으로 활용될 수 있는 생물화학적 변화가 이루어진다^{4,5,11)}고 하였다.

그리고 지렁이에 의해 슬러지의 부식화가 이루어지면 양이온 치환능력^{23,24)}이 증가되어 중금속 이온의 유해작용을 감소시킬 수 있을 뿐만 아니라 슬러지내 함유된 중금속의 안정화라는 점에도 기여하는 것으로 알려져 있다.

이러한 지렁이 분변토의 비료효과성을 증명하고자 Hopp¹⁶⁾, Curry 등¹⁷⁾은 식물재배시 분변토를 이용하여 그 수확량을 증가시킨 연구를 통하여 분변토의 비료효과성을 입증한 바 있다.

5. 분변토의 악취제거 효율

지렁이 분변토를 탈취제로서의 탈취효과에 대한 실험에서는 악취의 주요항목인 NH₃, H₂S 가스를 실험대상으로 하여 분변토의 탈취효과를 조사하여 본 결과 Table 6에 나타낸 바와 같이 NH₃ 가스는 농도값의 59.2%가 H₂S 가스는 45.2%가 제거되는 것으로 나타났다.

이러한 원인으로 토양¹⁰⁾에는 여러 종류의 미생물이 있어서 폐수처리 및 악취를 제거하는데 토양이 활용될 수 있는 경우와 마찬가지로 지렁이 소화기관을 거쳐 배출된 분변토 역시 생물학적인 면에서 토양에 존재하는 각종 미생물은 물론 특이효소까지 포

함하고있다고 하였으며, Roy Hartemstein 등¹⁹⁾은 화학적 특성으로는 양이온 교환능력이 크고 물리적 특성으로는 비표면적 및 공극율이 증대된다고 한 것으로 미루어 보아 분변토는 호기성 상태 유지 및 악취물질을 흡착할 수 있는 능력이 매우 커서 악취제거에 큰 역할을 하였기 때문에 NH₃와 H₂S 가스가 감소된 것으로 판단된다.

Table 6. The effect of earthworm casting for deodorization.

	NH ₃ (G)	H ₂ S (G)	비 고
Control group	3,960 ppm	68,301 ppm	Pig manure only (2 kg)
Case group	1,616 ppm	37,408 ppm	Pig manure + Casting (1 kg+1 kg)

結 論

분뇨처리장 슬러지를 지렁이의 사료로서 공급하여 슬러지 처리시 지렁이의 환경요인에 대한 영향, 지렁이 분변토의 비효성과 탈취효과 등에 대한 연구 결과는 다음과 같다.

1. 지렁이가 슬러지를 섭취하며 성장하는데 적절한 환경조건은 온도가 10~30°C, pH가 5~8, 함수율이 50~70%이었다.
2. 지렁이의 분변토 pH는 5.6으로 슬러지 pH 6.2보다 낮은 것으로 나타났다.
3. 지렁이는 슬러지중의 암모니아성 질소를 작물이 흡수하기 용이한 형태로 변화시킨 분변토를 배출하며 이는 비료 또는 토지개량제에 좋을 것으로 판단되었다.
4. 지렁이의 배설물인 분변토는 악취물질인 암모니아(59.2%) 및 황화수소(45.2%)에 대해 악취제거 효과가 있는 것으로 나타났다.

REFERENCES

1. H.A. Lunt and H.G.M. Jacobson; The Chemical Composition of Earthworm Cast, *Soil Science*, **58**, 367 (1944)
2. Raymond C. Loehr, Edward F. Neuhauser and Michael R. Malecki; Factors Affecting The Vermistabilization Process, *Water Res.*, **19**(10), 1311 (1985)
3. A.C. Evans and W.J. mCL, Guild; Studies on the Relationships Between Earthworms and Soil Fertility, *Annals of Applied Biology*, **35**, 485 (1948)
4. K.P. Barely; The Influence of Earthworms on Soil Fertility, *Australian Jour. of Agri. Res.*, **10**, 179 (1959)
5. K.P. Barely; The Influence of Earthworms on Soil Fertility, *Australian Jour. of Agri. Res.*, **10**, 171 (1959).
6. Roy Hartenstein; Metabolic Parameters of The Earthworm *Eisenia Foetida* in Relation to Temperature, *Biotechnol. Bioeng.*, **24**, 1803 (1982)
7. W. Ehlers; Observation on Earthworm Channel and Infiltration on Tilled and Untilled Loess, *Soil Science*, **119**(3), 242 (1973)
8. David L. Kaplan, Roy Hartenstein, Edward F. Neuhauser and Michael; Physicochemical Requirements in the Environment of the Earthworm *Eisenia Foetida* *Soil, Biol. Biochem.*, **12**, 347 (1980)
9. Ronald E. Gaddie, Sr. and Donald E. Douglas; Earthworms of Ecology & Profit, Vol. (II).
10. 渡邊弘之 等 ; ミミスの有効利用とその技術, Scientist Inc. (1979)
11. K.P. Bariey; Earthworm and Soil Fertility (III, The Influence of Earthworm on The Availability of Nitrogen), *Australian Jour. of Agri. Res.*, **10**, 364 (1959)
12. Puh, P.C.; Beneficial Influence of Earthworms on Some Chemical Properties of the Soil, *Sci. Soc. China, Biol. Lab. Contrib., Zool. Ser.* **15**, 147 (1941)
13. J.N. Parle; Micro-Organisms In the Intestines of Earthworms, *J. Gen. Microbiol.*, **30**, 1 (1963)
14. 溝 哲哉 ; ミミスの養殖と農産物收穫向上への利用, *食品工學*, 57 (1977)
15. Camp, Dresser and Mckee; Engineering Assessment of Vermicoposting Municipal Wastewater Sludges, EPA 600/2-81-075 U.S.EPA Cincinnati, Ohio (1981)
16. Henry Hopp and Clarence S. Slater; Influence of Earthworms on Soil Productivity, 421 (1948)
17. J.P. Curry; Some Effects of Animal Manures on Earthworms in Grassland, *Pedobiologia*, Bd. **16**, 425 (1976)
18. 최직상, 이현인 ; 지렁이 (단행본), 내외출판사 (1990)
19. Roy Hartenstein and Frances Hartenstein; Physicochemical Changes Effected in Activated Sludges by the Earthworm *Eisenia Foetida*, *J. Environ. Qual.*, **10**(3), 377 (1981)
20. Dimo, N.A.; *Pedology Leningrad*, 524 (1938)
21. S.A. Hutchinson and Mustapha Kamel; The Effect of Earthworms on the Disposal of Soil Fungi, *J. of Sci.*, **7**(2), 213 (1956)
22. Edward John Russell; The Effect of Earthworms on Soil Productiveness, *J. of Agric. Sci.* **III**, 246
23. 조성진, 박천서, 염대익 ; 토양학, 향문사 (1983)
24. P. Aarne Vesilind; The Treatment and Disposal of Wastewater Sludges (Revised Edition), Ann Arbor Science (1974)
25. M.J. Mitchell, S.G. Hornor and B.I. Abrams; Decomposition of Sewage Sludge in Drying Beds and Potential Role of the Earthworm, *Eigenia Foetida*, *J. Environ. Qual.*, **9**(3), 373 (1980)