

Vermicomposting에 의한 카드뮴 (Cd)의 생물적 농축

박 보 라, 이 주 삼

연세대학교 생물자원공학과

Bioconcentration of Cadmium by Vermicomposting

Bo-Rha Park, Ju-Sam Lee

Department of Biological Resources & Technology, Yonsei University

ABSTRACT

This study was performed to investigate the growth response of earthworm (*Eisenia foetida*) in cow manure added Cadmium (Cd) and therefore, to estimate the toxic threshold level of Cadmium and the levels of Cadmium in cow manure for obtaining the maximum Cadmium-concentration enable to accumulate in earthworm tissue.

Seven different concentrations of Cadmium added in cow manure were 0 (control), 50, 100, 200, 400, 800, 1600 mg/kg, respectively. Survival rate (SR), mean fresh weight of adult worm at final time (FW_2), increasing rate (IR), number of cocoon (NC), number of young worm (NY) and residual matter (RW) were not significantly different among Cadmium concentrations in cow manure. Of the measured growth-characteristics, survival rate (SR) had a significantly positive correlation ($p < 0.001$) with number of cocoon (NC). But mean fresh weight of adult worm at final time (FW_2) had a significantly negative correlation ($p < 0.05$) with residual matter of cow manure. The maximum Cadmium concentration accumulated in tissue was ranged from 283.8 mg/kg to 396.2 mg/kg. It was obtained at the level of 956.5 mg/kg and 1116.6 mg/kg in cow manure added Cadmium, respectively.

Key words : cadmium (Cd), growth response, toxic threshold level, accumulated maximum level

초 록

카드뮴(Cd)에 대한 지렁이의 독성한계를 결정하고, 생물적 농축능력을 평가함으로써, 잠재적 독성 원소가 높은 유기성 폐기물의 안전한 처리를 위한 vermicomposting의 이용가능성을 검토하였다.

우분내 카드뮴 함량은 0 (대조구), 50, 100, 200, 400, 800, 1600 mg/kg의 7수준 이었다. 우분내 카드뮴 함량의 차이에 따른 지렁이의 생존율, 사육종료시의 개체당 평균생체중, 증체율, 난포수, 산자수 및 잔식량에서는 유의한 차이가 인정되지 않아서, 우분내 카드뮴 함량이 1600 mg/kg까지는 지렁이의 생육에 별다른 영향을 미치지 않는 것으로 판단되었다. 생육형질간의 상호관계를 살펴본 결과, 생존율과 난포수간에는 0.1% 수준의 유의성이 인정되었고, 실험종료시 평균생체중과 잔식량간에는 5% 수준의 유의한 부(-)의 상관성이 인정되었다. 지렁이 체내의 카드뮴 축적량은 카드뮴 함량 956.8~1116.6 mg/kg범위에서 최대 축적량인 283.8~396.2 mg/kg을 나타낸 후 점차 감소하였다.

핵심용어 : 카드뮴(Cd) 생육형질, 독성한계, 최대축적량

1. 서 론

급격한 도시화 및 산업화로 의 이행과정에서 대량으로 배출되는 산업폐기물은 중금속과 같은 잠재적 독성원소(potentially toxic elements, PTEs)를 다량 함유하고 있어 우리나라를 비롯한 각국에서 심각한 환경오염원 중의 하나로 자리하고 있다. 그리고 현재까지 이러한 산업폐기물은 그 처리에 있어서 주로 매립이라고 하는 물리적 방법에 의존하고 있는 실정이다. 그러나 현재와 같은 물리적 처리방법은 매립부지의 부족과 매립비용의 급격한 상승, 그리고 매립 이후의 2차오염 등의 문제가 발생될 우려가 높아, 이러한 처리방법의 지속적인 사용에는 한계가 있다고 생각된다.

특히, 산업폐기물에 의한 토양오염은 중금속의 축적, 영양염류의 과다집적, 토양생물의 감소, 유기물 분해의 지연 등을 유발시켜 토양생태계를 파괴하는 것은 물론, 식물의 생육을 저해하여 안전한 농산물의 생산을 불가능하게 한

다. 이 중에서도 카드뮴(Cadmium), 구리(Copper), 납(Lead), 크롬(Chromium)과 같은 중금속에 의한 토양오염은 물질의 전류에 따라서 생물로 전이되어 생태계의 보전에 커다란 위협이 되고 있다.

이상과 같은 문제점을 해소하기 위한 방법의 하나로 토양생물의 분해와 생산기능을 이용한 폐기물 처리방법인 vermicomposting을 이용할 수 있다고 생각된다. 즉, 여기서 말하는 vermicomposting이란 vermistabilization과 같은 개념으로, 각종 산업장이나, 오폐수 처리시설에서 발생하는 유기성 슬러지와 폐기물을 지렁이 먹이로 공급하여 처리하고, 이 처리산물을 안전한 상태로 토양으로 환원시키는 것을 말한다. 특히 지렁이는 중금속 농도가 낮은 토양 중에 서식하더라도 체내에 축적하는 중금속 농축능력이 높아서 중금속의 생물적 농축(bioconcentration) 가능성이 높다고 알려져 있으며(Hartenstein 등, 1978; Morgan 등, 1988), 중금속 중에서도 카드뮴이 지렁이에 대한 독성한계 및 생물적 농축가능성이 가장 높다고 보고된 바 있다(Har-

tenstein 등, 1981; Morgan 등, 1988).

이상의 관점에서 본 실험에서는 먹이로 이용되는 우분에 카드뮴의 함량을 달리하여 첨가하였을 때 지렁이의 생육과 번식효율에 미치는 영향을 조사하고 지렁이 분립과 체내에 축적된 카드뮴 함량을 측정하여 지렁이에 의한 생물적 농축가능성을 제시함으로써, 잠재적 독성원소의 함량이 높은 산업폐기물을 vermicomposting에 의하여 안전하게 처리할수 있는 가능성을 검토하려고 하였다.

2. 재료 및 방법

공시 지렁이는 우리나라에서 자생하고 있는 줄무늬 지렁이 (*Eisenia foetida*)를 사용하였다. 지렁이의 먹이는 우분(牛糞)을 사용하였으며, 우분에 첨가한 카드뮴 함량은 0 (대조구), 50, 100, 200, 400, 800, 1600 mg/kg (건물 기준)의 7 수준을 인위적으로 조절하여, 1 kg의 우분을 1L 용량의 beaker에 충전한 후, 성체 지렁이 25마리 (개체당 평균생체중 약 1.5 g)를 방사하였다. 생육온도를 25°C로 고정한 growth chamber내에서 수분조건을 65±5%로 하여 40일간 사육하였으며, 처리당 3반복 하였다. 공시한 우분의 성분을 분석한 결과는 표 1과 같다.

총고형분(TN)은 80°C에서 48시간 건조후 측정된 건물중으로 하였으며, 유기물 함량(OM)은 건물을 550°C의 회화로에서 3시간 동안 태운 후 남은 조회분량(100-ash%)으로부터 구하였다.

Table 1. Characteristics of the cow manure used for this experiment

Moisture	74.8%
Total solids (TS)	25.2%
Organic matter (OM)	56.3%
Total nitrogen (TN)	3.15%
C/N ratio	9.9
pH	7.9

다. 전질소함량(TN)은 micro-kjeldahl법 (AOAC, 1980)으로, C/N ratio는 총탄소함량과 전질소함량의 비율로 구하였으며, pH는 pH meter기로 측정하였다.

실험종료 후, 지렁이의 생존율, 증체율, 번식효율(난포수, 산자수)을 조사하였으며, beaker내의 고형물을 건조기내에서 80°C, 48시간 건조하여, 고형물의 입자가 2 mm 이하인 것은 분립생산량(CW)으로, 2 mm 이상인 것은 잔식량(RW)으로 하여 각각의 무게를 측정하였다.

또 지렁이의 생물적 농축능력을 조사하기 위하여 각각의 처리구에서 지렁이의 건물 2g씩을 채취한 후, 환경오염공정시험법(환경부, 1992)에 준하여 원자흡광광도계(PS-series ICP 900, Leeman Labs, Inc.)로 분석하였다.

3. 결 과

3.1 지렁이 생육결과에 대한 분산분석

우분내 카드뮴 함량의 차이에 따른 지렁이의 생육결과를 분산분석한 것이 표 2이다.

생존율(SR), 실험종료시의 개체당 평균생체중(FW2), 증체율(IR), 난포수(NC), 산자수(NY), 잔식량(RW)에서는 유의성이 인정되지 않았으며, 분립생산량(CW)에서만 0.1% 수준의 유의성이 인정되었다.

3.2 카드뮴 함량의 차이에 따른 지렁이의 생육 결과

우분내 카드뮴 함량의 차이에 따른 지렁이의 생육결과를 나타낸 것이 표 3이다.

지렁이의 생존율(SR)은 카드뮴 함량의 증가에 따라 유의한 차이를 나타내지 않았다. 즉 대조구에서의 지렁이 생존율은 33.3%로 가장 낮은 경향이었고, 200 mg/kg과 800 mg/kg에서

Table 2. Analysis of variance for the values on measured characteristics of the earthworm grown in different Cadmium-concentrations of cow manure

SV	df	SR	FW ₁	FW ₂	IR	NC	NY	CW	RW
Content	6	339.3	0.000078	0.00306	0.000256	284.2	6.9365	10.2694***	116.00
Error	14	763.4	0.000512	0.00600	0.000401	989.6	5.2380	0.7548	70.56

Note. *** is significant difference at 0.1% level

SR: survival rate(%), FW₁: mean fresh weight(g) of adult worm at initial time,

FW₂: mean fresh weight (g) of adult worm at final time, IR: increasing rate, $(FW_2 - FW_1) / t_1 - t_2$,

NC: number of cocoons, NY: number of young worms, CW: dry weight of cast (g, < 2.0 mm), RW: residual matter (g, > 2.0 mm).

Table 3. The values on the measured characteristics of the earthworm grown in different Cadmium-concentration of cow manure

Cadmium-concentration (mg/kg)	SR	FW ₁	FW ₂	IR	NC	NY	CW	RW
control	33.3 ^a	1.52 ^a	0.50 ^a	-0.009 ^a	71.0 ^a	4.0 ^a	18.68 ^b	226.7 ^a
50	48.0 ^a	1.52 ^a	0.54 ^a	-0.009 ^a	60.0 ^a	3.7 ^a	22.89 ^a	220.6 ^a
100	56.0 ^a	1.51 ^a	0.55 ^a	-0.025 ^a	70.0 ^a	2.3 ^a	18.33 ^b	226.7 ^a
200	64.0 ^a	1.52 ^a	0.58 ^a	-0.009 ^a	73.3 ^a	0.3 ^a	18.20 ^b	213.3 ^a
400	54.7 ^a	1.51 ^a	0.53 ^a	-0.003 ^a	71.0 ^a	1.7 ^a	18.37 ^b	216.6 ^a
800	60.0 ^a	1.52 ^a	0.59 ^a	-0.024 ^a	56.7 ^a	2.3 ^a	19.13 ^b	213.3 ^a
1600	42.7 ^a	1.51 ^a	0.51 ^a	-0.028 ^a	47.3 ^a	0.0 ^a	21.48 ^a	226.7 ^a

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

의 생존율은 60%~64%의 범위를 나타내었으며, 카드뮴 함량이 높아질수록 생존율이 낮아지는 경향을 나타내었으나, 처리간에는 유의한 차이가 인정되지 않았다.

사육기간 종료시의 개체당 평균생체중(FW₂) 역시 카드뮴 함량의 증가에 따라 유의한 차이가 인정되지 않았다. 카드뮴 함량 200 mg/kg과 800 mg/kg 수준에서의 개체당 평균생체중이 각각 0.58 g, 0.59 g으로 상대적으로 높은 경향이었으나, 카드뮴 함량간에는 유의한 차이가 없었다.

단위기간동안의 증체량이라고 할 수 있는 증체율(IR)은 카드뮴 함량이 높아짐에 따라서 감소되는 경향을 나타내어, 카드뮴 함량 1600 mg/kg의 수준에서 -0.028g으로 증체율이 가장 낮았으나, 처리간에는 유의한 차이가 인정되

지 않았다.

난포수(NC)와 산자수(NY)에서의 카드뮴 함량 증가에 따른 변화 역시 유의한 차이가 인정되지 않았다. 난포수는 카드뮴 함량 200 mg/kg의 수준에서 73.3개로 가장 많았고, 카드뮴 함량 1600 mg/kg에서는 47.3개로 가장 적었으나, 처리간에는 유의한 차이가 인정되지 않았다. 산자수 또한 대조구에서 4.0마리였던 것이, 1600 mg/kg의 수준에서의 산자수가 없었으나, 처리간 유의한 차이는 인정되지 않았다.

분립량(CW)은 카드뮴 함량 50 mg/kg과 1600 mg/kg의 수준에서 각각 22.89 g과 21.48 g의 분립량을 나타내어 다른 수준보다 유의하게 많았다. 그러나 잔식량(RW)에서는 카드뮴 함량의 차이에 따른 유의한 차이가 인정되지 않았다.

3.3 지렁이의 생육형질간의 상호관계

지렁이의 생육형질간의 상호관계를 나타낸 것이 표 4이다.

생존율(SR)은 난포수와 0.1% 수준의 유의한 정상관을 나타내었으며, 개체당 평균생체중(FW₂)은 잔식량(RW)과 5% 수준의 유의한 부(-)의 상관관을 나타내었다.

3.4 지렁이 체내의 카드뮴 축적량

우분내 첨가한 카드뮴 함량에 따른 지렁이 체내의 카드뮴 축적량의 변화를 나타낸 것이 그림 1이다.

카드뮴 함량의 차이에 따른 지렁이 체내의 카드뮴 축적량을 2차방적식(y₁)과 3차방적식(y₂)

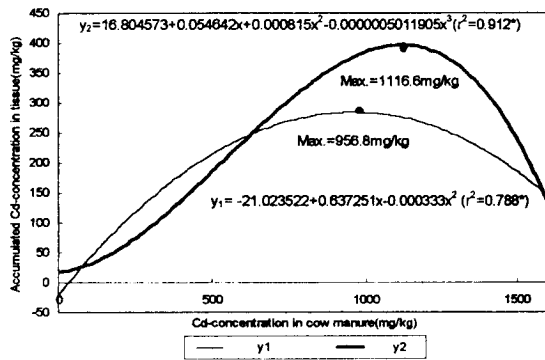


Fig. 1. Regressions of accumulated Cadmium-concentration in tissue to Cd-concentration in cow manure

에 대입한 결과, 956.8~1116.6 mg/kg 범위에서 최대 축적량인 283.8~396.2 mg/kg을 나타내었다.

4. 고찰

각종 산업장에서 발생하는 유기성 폐기물을 잠재적 독성원소가 낮은 안전한 상태로 토양으로 환원하는 일은 토양생태계를 비롯한 환경보전을 위하여 반드시 선행되어야 할 과제이다. 이러한 관점에서 중금속의 생물적 농축능력이 높다고 알려진(Hartenstein 등, 1978; Morgan 등, 1988; 이 등, 1996) 지렁이에게 유기성 산업폐기물을 공급하여, 이를 처리하는 vermicomposting은 가장 자연 친화적인 처리방식이라 생각된다. 즉 생물의 생산과 분해능력을 이용한 vermicomposting은 독성원소의 잠재적 함유량이 높은 산업폐기물의 처리를 위한 방법의 하나로써 유용하다고 판단된다. 그러나 산업폐기물 중의 독성원소함량을 효과적으로 감소시키기 위해서는 산업폐기물 중의 독성원소함량이 생물의 생존을 보장할 수 있는 독성한계치(치사한계치) 이하의 조건이거나, vermicomposting에 이용되는 생물의 독성한계치가 높고 생물적 농축능력이 뛰어나야 한다고 생각된다.

본 실험에서는 먹이로 이용된 우분내 카드뮴 함량의 차이에 따른 지렁이의 독성한계와 지렁

Table 4. Correlation coefficients among the measured characteristics of the earthworms

	FW ₁	FW ₂	IR	NC	NY	CW	RW
SR	0.2597	0.2216	-0.1000	0.7613***	-0.3450	-0.0485	-0.2157
FW ₁		0.1097	0.1184	-0.0440	-0.2297	0.0750	-0.2319
FW ₂			0.1719	0.1305	0.0854	-0.0985	-0.4498*
IR				-0.0887	0.0808	-0.1230	-0.2348
NC					-0.0106	-0.1367	-0.0575
NY						-0.0491	0.1056
CW							0.0420

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

이 체내의 축적경향 및 최대 축적량을 나타내는 우분중의 카드뮴 함량을 추정하려고 하였다.

본 실험의 결과, 우분내 카드뮴 함량 1600 mg/kg 수준까지는 생존율(SR), 사육기간 종료시의 개체당 평균생체중(FW₂), 중체율(IR), 난포수(NC), 산자수(NY), 잔식량(RW) 등의 생육 및 번식형질에서 처리간 유의한 차이가 인정되지 않았다(표 3). 따라서 우분내 카드뮴의 최대 함량인 1600 mg/kg은 독성한계 이내의 수준으로 추정되었으며, 이러한 결과는 줄무늬 지렁이(*Eisenia foetida*)에 대한 하수오니내 카드뮴의 최저 독성한계가 1800 mg/kg이었다는 Hartenstein 등(1981)의 결과를 입증하고 있다.

대량으로 산업폐기물을 처리하기 위해서는 처리효율의 증대가 필수적이므로, 이를 위해서는 지렁이의 생존율을 높힘으로써 번식효율(난포수)을 증대시킬 필요가 있다고 사료된다(표 4) 또, 사육과정에 있어서 지렁이의 평균생체중을 증가시키는 것이 잔식량을 감소케하므로, 산업폐기물의 처리속도를 보다 높힐 수 있다고 생각된다(표 4). 즉, vermicomposting에 의한 산업폐기물의 처리효율을 높이기 위해서는 독성한계수준 이하의 조건에서 생존율을 증대시키므로써 번식효율을 높이고, 평균개체중의 증가를 통하여 잔식량을 감소시키는 것이 유리하다고 판단되었다.

먹이로 이용된 우분내 카드뮴 함량에 대한 지렁이 체내의 카드뮴 축적량의 변화를 2차 방정식과 3차 방정식에 각각 대입한 결과, 지렁이 체내의 카드뮴 최대 축적량을 나타내는 우분내 카드뮴 함량은 2차 방정식에서 956.6 mg/kg, 3차 방정식에서 1116.6 mg/kg의 수준을 나타내었다(그림 1). 또 이때 지렁이 체내의 최대 카드뮴 축적량은 각각 283.8 mg/kg과 396.2 mg/kg를 나타내었다. 따라서 지렁이 체내의 카

드뮴 농축능력을 극대화시킬 수 있는 우분내 카드뮴 함량의 범위는 956.6~1116.6 mg/kg의 범위라고 판단되며, 이 때의 체내 카드뮴 축적량은 283.8~396.2 mg/kg의 범위를 나타내어 지렁이에 의한 카드뮴의 농축능력은 매우 높은 것으로 추정되었다. 이상과 같은 결과는 산업폐기물 중의 독성원소의 함량이 독성한계이하의 조건일때는 지렁이의 체내축적을 통하여 폐기물내 독성원소를 충분히 제거할 수 있다는 가능성을 시사하고 있다.

그러나 지렁이에 의한 생물적 농축범위는 먹이의 유기물 함량, pH의 변화, 양이온 치환능력(CEC) 및 지렁이의 종에 따라 크게 변화될 수 있다는 것을 고려하여야 하며(Ma, 1984), 산업폐기물의 생물적 처리능력을 향상시키기 위해서는 지렁이의 농축능력의 확대, 농축능력이 높은 종의 선발, 적정밀도의 추정 등이 필요하다고 생각된다. 특히 산업폐기물 중에서도 독성원소의 함량이 낮으며, 유기물 함량이 높은 분뇨 슬러지, 하수 슬러지 및 음식물 쓰레기는 vermicomposting에 의하여 완전처리가 가능하다고 판단되므로(이 등, 1996), 처리과정에서 대량으로 생산되는 분립내의 독성원소함량이 허용규제치 이하의 조건에서 토양으로 환원된다는 것에 유의하여 분립의 안전성과 생물적 농축능력과의 관계를 검토할 필요가 있다고 생각된다.

5. 결 론

본 연구는 잠재적 독성원소가 높은 폐기물 처리법으로서의 vermicomposting를 위한 기초자료를 마련하기 위한 것으로, 먹이내 카드뮴 함량에 따른 지렁이의 생육과 체내 카드뮴 축적량을 조사하여 지렁이에 의한 중금속의 생물적 농축가능성을 제시하고자 한 것으로, 결과는 다음과 같다.

1. 우분내 카드뮴 함량의 증가(1600 mg/kg 까지)에 따라서 분립생산량을 제외한 생존율, 사육종료시의 개체당 평균생체중, 증체율, 난포수, 산자수, 잔식량 등은 처리간 유의한 차이가 인정되지 않았다. 따라서 카드뮴 최대 함량인 1600 mg/kg을 독성한계 이내의 수준으로 추정할 수 있다.
2. 생육형질 가운데, 생존율과 난포수간에는 0.1% 수준의 유의성이 인정되었고, 실험종료 시 평균개체중은 잔식량과 5%의 유의한 부(-)의 상관을 나타내었다.
3. 지렁이 체내의 카드뮴 최대 축적량을 나타내는 우분내 카드뮴 함량은 2차 방정식에서는 956.5 mg/kg의 범위를, 3차 방정식에서는 1116.6 mg/kg의 범위를 나타내었다. 또 이때, 지렁이 체내의 최대 카드뮴 함량은 각각 283.8 mg/kg, 396.2 mg/kg를 나타내어 지렁이에 의한 카드뮴의 농축능력은 매우 높은 것으로 생각된다.

이상과 같이 지렁이는 카드뮴을 비롯해 중금속에 대한 독성한계가 높고, 체내 및 분립내의 농축능력이 뛰어나기 때문에, 잠재적 독성원소가 높은 폐기물의 처리에 vermicomposting을 이용할 경우 침출수 유출 등으로 인한 토양오염 등 산업폐기물의 매립이 야기했던 기존 문제를 해결하는데 있어 유용한 해법이 될 수 있을 것으로 전망된다.

참 고 문 헌

- 이주삼, 이무춘(1996), "Vermicomposting에 의한 분뇨슬러지의 처리", 한국유기성폐기물학회지 4(2): 35-45.
- 이주삼, 정재춘, 조익환(1992), "Vermicomposting에 의한 산업폐기물의 처리 - 제지 sludge와 우분의 혼합비율이 붉은 지렁이

(*Lumbricus rubellus*)의 생육과 분립의 화학적 조성에 미치는 영향", 한국폐기물학회지 9(1): 16-26.

환경부(1992), "환경오염공정시험법 폐기물편", 한국유기성폐기물자원화협의회(1994), "유기성 폐기물의 퇴비화 기술", 동화기술.

A.O.A.C.(1980), "Official method of analysis. Association of official analytical chemists", Washington D.C., U.S.A.

Hartenstein, R., Neuhauser E.F. and Narahara A.(1981), "Effects of the heavy metal and other elemental additives to activated sludge on growth of *Eisenia foetida*", Jr. the Environmental Quality 10: 372-376.

Lee, K.E.(1985), "Earthworms - Their ecology and relationships with soils and land use-", Academic Press.

Ma, W.(1982), "The influence of soil properties and worm-related factors on the concentration of heavy metals in earthworms", Pedobiologia 24: 109-119.

Ma, W.(1984), "Sublethal toxic effects of copper on growth, reproduction and litter breakdown activity in the earthworm *Lumbricus rubellus* with observations on the influence of the temperature and soil pH", Environmental Pollution (Series A) 33: 933-938.

Morgan, J.E. and Morgan, A.J.(1988), "Earthworms as biological monitors of the Cadmium, Copper, Lead and Zinc in metalliferous soils", Environmental Pollution 54: 123-138.

Smith, S.R.(1996) "Agricultural recycling of sewage sludge and the environment", CAB International.