

## 유기성 슬러지 급이에 따른 크롬과 망간의 줄지렁이 (*Eisenia andrei* (Annelida; Oligochaeta)) 체내 생물축적

배윤환 †, 최석순\*

대진대학교 생명과학과  
세명대학교 바이오환경공학과\*

### Bioaccumulation of Chromium and Manganese in the Earthworm *Eisenia andrei* (Annelida; Oligochaeta) in Relation to the Supply of Organic Sludges

Yoon-Hwan Bae †, Suk Soon Choi\*

Department of Life Science, Daejin University  
Department of Biological and Environmental Engineering, Semyung University\*

(Received: Aug. 30, 2016 / Revised: Sep. 12, 2016 / Accepted: Sep. 12, 2016)

**ABSTRACT:** Concentrations of Chromium(Cr) and Manganese(Mn) in several kinds of dewatered organic sewage sludges generated from wastewater treatment plants of Pocheon City, Gyeongii Province were examined. In addition, bioaccumulations of Cr and Mn in the body of earthworm *Eisenia fetida* were also investigated by changing of feed sludge amounts. Cr and Mn concentrations in sludges were in the range of 0.0~0.3 mg/kg and 3.6~17.6 mg/kg, respectively, which would not cause acute toxicities to earthworm population. Cr was bioaccumulated in the earthworm body but bioaccumulation was not proportional to the amount of sludges supplied. The degree of bioaccumulation of Cr decreased in later phase as the supplied amounts of sludges increased. Meanwhile, there were rare bioaccumulation with regard to Mn. In this study, the value ranges of bioaccumulation factor (BAF) for Mn were 0.00~0.12 when 60g of sludges was supplied. In the case of Cr, the value of BAF was 19.33 when 60g of human manure sludge was provided.

**Keywords:** Earthworm *Eisenia fetida*, Cr, Mn, Bioaccumulation, Ecotoxicity

**초 록:** 경기도 포천시 하수처리장에서 수처리후 탈수된 몇 가지 유기성 슬러지내 크롬과 망간 농도에 대하여 조사하였다. 또한, 슬러지 급이량 변화에 따른 줄지렁이(*Eisenia fetida*) 체내 크롬과 망간의 생물축적에 대하여 고찰하였다. 유기성 슬러지내의 크롬과 망간 농도는 각각 0.0~0.3 mg/kg, 3.6~17.6 mg/kg를 나타내었기에, 이러한 중금속 농도들은 지렁이 개체군에 대하여 급성독성을 유발시키지 않는 것으로 판단되었다. 그리고, 슬러지 급이량 증가에 의하여 지렁이 체내에 크롬의 생물축적이 이루어졌으나 슬러지 공급량에 비례해서 크롬 농도가 증가하지 않았으며, 일정한 농도로 유지되다가 감소하는 경향을 나타내었다. 한편, 망간에 대해서는 생물축적이 거의 일어나지 않았다. 본 실험으로부터 60 g의 슬러지를 공급하였을 때, BAF 값은 망간의 경우 0.00~0.12이었으며, 인분슬러지를 주입하였을 때 BAF 값은 크롬의 경우 19.33를 나타내었다.

† Corresponding Author (e-mail: yhbae@daejin.ac.kr)

주제어: 줄지렁이, 크롬, 망간, 생물축적, 생태독성

## 1. 서론

유기성 폐기물을 지렁이 먹이로 공급하여 환경적으로 안정화시키는 소위 ‘지렁이 퇴비화 (Vermicomposting 또는 Vermistabilization)’의 환경친화적, 경제적 기술성이 인정되어 지렁이 처리법을 하수슬러지 처리에 적용하기 위한 시도가 꾸준히 시도되어 왔다<sup>1~6)</sup>. 그러나 하수슬러지를 장기간 지렁이 먹이로 공급하였을 경우 지렁이 사육상에 서식하는 지렁이 개체군 밀도가 감소하기 시작하여 최종적으로 개체군이 소멸되는 현상이 일어나서 더 이상 하수슬러지를 처리할 수 없는 상황이 벌어지게 되었다<sup>6~8)</sup>.

본 연구자들은 하수슬러지 탈수시에 사용하는 무기응집제인 Alum과 Ferric chloride 및 플라스틱 제조시 사용하는 DEHP가 지렁이 개체군에 독성을 유발할 수 있음을 보고한 바 있다<sup>9~11)</sup>. 한편, 유기성 슬러지내에는 무기응집제에서 유래되거나 하수처리장 주변의 공산품 제조공장이나 축사 등에서 유입된 다종의 금속류가 함유되어 있으며, 이들 금속류 중 어떤 것은 지렁이에 대하여 독성을 유발하고 지렁이에 의해 체내로 흡수되어 생체내 축적되거나 먹이사슬을 통하여 지렁이의 상위 포식자들에게 생물축적이 일어날 수 있다<sup>12~15)</sup>.

그리고, 본 연구자들은 유기성 슬러지를 지렁이에게 지속적으로 공급하였을 경우 슬러지내 Zn, Cu, Fe, Al가 지렁이 생체내에 누적적으로 축적되지는 않으나 장기적으로는 아독성 또는 생태독성을 유발할 수 있음을 보고한 바 있다<sup>16)</sup>.

또한, 크롬(Cr)은 염색, 피혁, 도료 공장에서 배출되는데 특히 Cr<sup>6+</sup>이 환경문제를 야기시켜 토양환경보존법(1995) 토양오염물질로 지정되어 있으며<sup>17,18)</sup> 아치사 농도에서 지렁이에 대하여 유전독성이 있음이 알려져다<sup>19,20)</sup>. 망간(Mn)은 모든 생물에게 미량으로 필요한 필수원소인 반면, 생물체가 과량의 망간에 노출될 경우 신경독성을 유발하는 독성 금속이기도 하다<sup>21,22)</sup>.

본 연구에서는 크롬과 망간이 줄지렁이에 미치는 생태독성학적 영향을 고찰하기 위해서 포천시 관내에 설비되어 있는 하수처리장과 인분처리장에서 발생하는 유기성 슬러지내의 크롬, 망간 농도를 조사하고, 슬러지를 지렁이(*Eisenia fetida*)개체군에게 지속적으로 공급하였을 때, 유기성 슬러지 공급량에 따른 크롬과 망간의 지렁이 체내 생물축적 정도를 고찰하였다.

## 2. 실험재료 및 방법

슬러지 채취, 금속류 분석 방법은 전보<sup>16)</sup>와 동일하였으나, 본고에서는 편의상 재설명하였다.

### 2.1. 하수슬러지 채취 및 크롬, 망간 농도 분석

경기도 포천시 관내의 P., Y., 하수처리장 및 Y. 인분처리장에서 배출되는 탈수 슬러지를 사용하였으며, 각 처리장에서 적용하는 수처리 공법, 응집제 및 슬러지 탈수방법은 [Table 1]과 같다.

각 하수처리장과 분뇨처리장에서 당일 발생된 하수슬러지와 인분슬러지를 채취하였으며, 채취된 슬러지는 4°C 냉장고에 보관하면서 지렁이의 먹이로 공급하였다. 대조 먹이로 우분과 피트모스를 건중량비 2:1로 혼합한 것을 사용하였다.

슬러지 및 지렁이 체내의 크롬, 망간의 농도를 측정하기 위하여 하수슬러지를 105°C에서 건조시킨 후 막자사발을 이용하여 분쇄하였다. 분쇄된 시료 0.1g과 HNO<sub>3</sub> 4ml를 혼합하여 Microwave digestion (Model : Milestone ETHOS-D)하였다. Microwave digestion은 5단계로 진행하였다[Table 2].

Microwave digestion 후 실온에서 1시간 동안 냉각시키고 증류수 50ml를 가한 다음 ICP-OES (Model : OPTIMA 2000DV)로 금속이온 농도를 측정하였다. ICP의 운전 조건은 [Table 3]과 같았다.

**Table 1.** Method of treatment process, applied coagulant and sludge dewatering method in each sewage treatment plant (Cited from previously published paper<sup>16)</sup>)

Sewage trmt. plant	Method of treatment process	Applied coagulant	Sludge dewatering method	Treated material
Y. night soil trmt. plant	Bio Coal+Purge	Alum, Polymer	Belt press filter	Night soil
P. trmt. plant	DeNiPho	Polymer	Belt press filter	Sewage
Y. trmt. plant	SBR	Alum, FeCl <sub>3</sub> , Polymer	Belt press filter	Sewage, pig's feces and urine

**Table 2.** Operating conditions for microwave digestion systems (Cited from previously published paper<sup>16)</sup>)

Step	1	2	3	4	5
Power(W)	250	0	300	400	600
Hold time(min)	1	1	2	4	3

**Table 3.** Operating conditions for ICP-OES(Optical Emission Spectrometer) (Cited from previously published paper<sup>16)</sup>)

Forward RF power		1,300W
Pump flow rate		1,5 ml/min
Gas flows	Plasma	15 L/min
	Auxiliary	0.2 L/min
	Nebulizer	0.8 L/min

## 2.2. 지렁이에 대한 하수슬러지 공급

하수슬러지 공급량에 따른 줄지렁이 생체내 금속 농도 변화를 조사하기 위해 직경 18 cm, 높이 18 cm의 원통형 사육상자에 분변토 300 g을 깔아준 후 23.5 °C, L:D=16:8의 환경제어실에서 제지슬러지를 먹이로 누대사육 중인 줄지렁이 개체군을 15g씩 입식하였다. 하수슬러지는 고형물 기준으로 15 g씩 공급하였으며, 24시간 간격으로 지렁이의 섭식여부를 확인하였다. 공급된 하수슬러지를 지렁이가 모두 섭식하면 15 g의 하수슬러지를 반복하여 공급하였다. 15 g의 하수슬러지를 추가로 공급할 때마다 사육상내 생존 줄지렁이를 채취하여 생체내 금속 농도를 측정하였다. 채취된 지렁이는 증류수로 세척하고 12시간 동안 지렁이에 수분만 공급하여 장내의 슬러지 및 분변토를 모두 배설하도록 하였다.

하수슬러지내의 금속 농도와 지렁이 체내의 금속 함량을 이용하여 BAF(Bioaccumulation factor, 생물축적요인)를 다음 식으로 산출하였다.

BAF=지렁이 체내 금속 농도/슬러지내 금속 농도

## 2.3. 통계분석

각 분석항목의 조사수는 3반복이었으며, 하수슬러지 종류에 따른 금속 농도차이, 하수슬러지 급이량에 따른 지렁이 체내 금속 농도의 차이에 대한 ANOVA 및 평균간 통계적 유의성 분석을 수행하였다 (P<0.05, Duncan의 다중검정법, SPSS[ver. 12.0]).

## 3. 결과 및 고찰

### 3.1. 크롬, 망간의 슬러지내 농도 및 지렁이 체내 생물축적

생물체의 환경에 여러 가지 금속류가 존재할 경우 특정생물에 대한 특정 금속의 독성 발현에 다른 금속류들이 영향을 미치기 때문에 실험실에서 얻은 단일 금속에 대한 독성자료를 생물서식 현장에 그

대로 적용하기에 어려움이 있다<sup>23)</sup>. 그리고 특정 금속이 매질속에 어떤 형태로 존재하는가가 독성 발현에 매우 요소이다<sup>24)</sup>.

Lock과 Janssen(2002)<sup>25)</sup>은 줄지렁이(*Eisenia fetida*)의 난포 생산에 대한 크롬(III)의 21-day EC<sub>50</sub> (크롬에 21일간 줄지렁이를 노출시켰을 때, 난포 생산수가 대조구에 비해서 50% 감소하는 크롬 농도)는 892 mg/kg 이었고, Sivakumar와 Subbhuraam (2005)<sup>26)</sup>은 유기물질내 Cr(III)과 Cr(VI)의 줄지렁이에 대한 14-day LC<sub>50</sub> (Cr에 14일간 줄지렁이를 노출시켰을 때, 줄지렁이의 50%를 치사시키는 Cr 농도)은 각각 1,635, 219 mg/kg으로 보고하였다.

그러나 본 연구에서 조사된 유기성 슬러지내의 크롬 농도는 0.0~0.3 mg/kg[Table 4]으로 상기연구자들이 제시한 독성 유발 농도보다 현저히 낮은 농도를 나타내었다. 즉, 각 유기성 슬러지내의 Cr 농도는 줄지렁이에게 단기간내에 직접 독성을 유발하지 않을 것임을 시사하고 있다.

Kuperman 등(2004)<sup>27)</sup>은 Mn의 줄지렁이 난포 생산수에 대한 14-day EC<sub>20</sub>은 629mg/kg이었다고 하였다. Reinecke와 Reinecke (1997)<sup>20)</sup>는 Mn은 대부분의 생명체에 필수 미량원소로 작용하지만 생체내에 과량 존재하면 독성을 유발한다고 하면서, 줄지렁이에게 Mn을 MnSO<sub>4</sub> H<sub>2</sub>O 염의 분말형태로 4.3 mg/kg씩 먹이와 함께 8주간 공급하였을 때,

정소조직세포의 손상을 유발하였으며, Mn의 지렁이 생체내 축적 농도가 9.3 mg/kg 이었다고 보고하였다.

각 수처리장에서 발생된 슬러지내 망간의 농도는 3.6~17.6 mg/kg으로 우분+피트모스의 망간 농도는 66.8 mg/kg보다 현저하게 낮은 것으로 나타났다[Table 4]. 따라서 슬러지내 망간의 농도가 줄지렁이에게 급성독성현상을 일으키지는 않지만 장기적으로는 지렁이의 생식능력을 저하시켜 개체군밀도 감소 현상을 유발할 가능성이 있는 것으로 판단된다.

금속의 지렁이 체내 흡수 및 축적은 서식환경 내의 금속 총량보다는 화학적으로 체내 흡수가능량에 의존적이다<sup>30,31)</sup>.

[Table 5]는 건중량 60 g의 먹이를 공급한 후 먹이 종류별 지렁이 체내 크롬과 망간의 농도를 조사한 것이다. 크롬의 경우 먹이내 농도가 0.0~0.3 mg/kg으로 높지 않았음에도 불구하고[Table 4], 지렁이 체내의 농도는 1.6~5.8 mg/kg으로 나타나[Table 5] 지렁이 체내에 크롬의 생물축적이 어느 정도 이루어진 것으로 판단된다.

반면, 망간의 경우는 먹이내의 농도가 3.6~66.8 mg/kg으로 크롬보다 상대적으로 높았음에도 불구하고[Table 4], 지렁이 체내의 함량은 0.0~2.1 mg/kg으로 나타나[Table 5] 망간은 지렁이 체내에

Table 4. Cr and Mn contents of sewage sludges(mg/kg, mean±S.E.)

Metal \ Sludge	Cow dung+peat moss*	Y. night soil sludge	P. Sewage sludge	Y. Sewage sludge
Cr	0.2±0.15a	0.3±0.16a	0.0±0.00a	0.0±0.00a
Mn	66.8±1.23a	17.6±1.10b	3.6±0.09c	16.0±0.18b

\* Cow dung : peat moss=2:1(dw/dw), In a row, values followed by the same letter were not significantly different (p<0.05 :Duncan[SPSS 12.0]).

Table 5. Cr and Mn contents of earthworm's dewatered body when 60g of sewage sludge was fed to 15g of earthworm population biomass (mean±S.E., mg/kg)

Metal \ Sludge	Cow dung+peat moss*	Y. night soil sludge	P. Sewage sludge	Y. Sewage sludge
Cr	1.6±0.13a	5.8±0.19b	3.5±0.10c	2.0±0.5a
Mn	0.0±0.01a	2.1±0.03b	0.0±0.00a	0.0±0.00a

\* Cow dung : peat moss=2:1(dw/dw), In a row, values followed by the same letter were not significantly different (p<0.05 :Duncan[SPSS 12.0]).

Table 6. BAFs when 60 g of sewage sludge was fed to 15 g of earthworm population biomass

Metal \ Sludge	Cow dung+peat moss*	Y. night soil sludge	P. Sewage sludge	Y. Sewage sludge
Cr	8.00	19.33	- <sup>a</sup>	-
Mn	0.00	0.12	0.00	0.00

\* Cow dung : peat moss=2:1(dw/dw), BAF(Bioaccumulation factor) = Metal content of earthworm/Metal content of sewage sludge  
 a : not calculated because the value of Cr content in sewage sludge was nearly zero.

생물축적이 잘 이루어지지 않는 것으로 나타났다.

[Table 4]와 [Table 5]를 이용하여 금속의 지렁이 생체내 축적률을 나타내는 BAF 값<sup>16)</sup>을 계산하였을 때 [Table 6], 크롬의 경우 우분+피트모스 먹이 공급시 8.00, Y. 인분슬러지 공급시 19.33으로 나타났고, 망간의 경우에는 0.00~0.12로 매우 낮게 나타났다. Suthar 등(2014)<sup>31)</sup>은 줄지렁이에게 제지슬러지를 먹이로 공급하였을 경우 몇 가지 금속의 BAF 값이 Cd>Cr>Pb>Cu 순이었다고 보고하였다. 즉 크롬은 납이나 구리에 비해 상대적으로 생물축적이 잘 이루어지는 금속이라고 하였다.

### 3.2. 슬러지 급이량에 따른 지렁이 체내 크롬, 망간 농도 변화

[Table 7]은 전체 생체량 15 g인 지렁이 개체군에 매회 건중량 15 g씩의 먹이를 공급하면서 지렁이 생체내에 축적된 Cr의 농도를 공급된 먹이량에

따라 조사한 것이다.

Y. 하수처리장에서 발생한 슬러지를 공급하였을 경우 60 g 섭취후 지렁이 개체군이 모두 사멸하였고, P. 하수처리장의 경우 75 g의 섭취후 지렁이 개체군이 사멸하여 더 이상 먹이 공급을 할 수 없었다. 그러나 P. 하수슬러지의 경우 지렁이 체내 Cr 농도가 2.0~3.6 mg/kg, Y. 하수슬러지의 경우는 2.0~2.7 mg/kg으로 두 곳의 슬러지 모두 먹이 공급량에 따른 Cr의 생물농축현상이 일어나지는 않았던 것으로 판단된다. 슬러지내 Cr의 농도가 상대적으로 높았던 Y. 인분슬러지[Table 4]의 경우 다른 지역 슬러지를 공급하였을 때보다 지렁이 체내 Cr 농도가 높게 유지되는 경향을 나타내었으나, 먹이 공급량이 많아진다고 생물농축량이 많아지는 않는 것으로 나타났다. 전반적으로 우분+피트모스를 공급한 경우보다 유기성 슬러지를 공급하였을 경우 지렁이 체내 Cr 농도가 높았다. Maleri 등(2008)<sup>32)</sup>

Table 7. Cr contents of earthworm's dewatered body according to the amount of sludge fed to 15g of earthworm population biomass(mg/kg, mean±S.E.)

Sludge \ Amount of sludge (g,dw)	Cow dung+peat moss*	Youngjoong Night soil sludge	Pocheon Sewage sludge	Youngjoong Sewage sludge
15	0.0±0.00aA	3.3±1.28bBC	2.0±0.17bA	2.6±0.15bB
30	0.0±0.00aA	5.9±0.07dD	3.6±0.03cC	2.7±0.13bB
45	0.1±0.13aA	6.1±0.13dD	3.6±0.03cC	2.5±0.15bB
60	1.6±0.13aB	5.8±0.19cD	3.5±0.10bC	2.0±0.05aA
75	2.3±0.15aC	3.8±0.34aC	2.6±0.06a	
90	2.1±0.09C	2.8±0.19A		
105	2.3±0.09C	2.8±0.27AB		

In a row, values followed by the same small letter were not significantly different  
 In a column, values followed by the same capital letter were not significantly different  
 (P<0.05:Duncan[SPSS 12.0])

Table 8. Mn contents of earthworm's dewatered body according to the amount of sludge fed to 15g of earthworm population biomass(mg/kg, mean±S.E.)

Amount of sewage sludge (g,dw)	Sewage sludge			
	Cow dung+peat moss*	Youngjoong Night soil sludge	Pocheon Sewage sludge	Youngjoong Sewage sludge
15	0.0±0.00aA	1.4±0.70bB	0.3±0.07aB	0.7±0.07abC
30	0.0±0.00aA	2.7±0.15cCD	0.0±0.03abA	0.3±0.07bB
45	0.0±0.00aA	4.8±2.49bD	0.2±0.15aB	0.2±0.15aB
60	0.0±0.01aA	2.1±0.03bBC	0.0±0.00aA	0.0±0.00aA
75	0.1±0.02aA	0.8±0.52bAB	0.0±0.00aA	
90	0.0±0.00A	0.3±0.03A		
105	0.0±0.00A	0.3±0.09A		

In a row, values followed by the same small letter were not significantly different

In a column, values followed by the same capital letter were not significantly different (P<0.05:Duncan[SPSS 12.0])

은 크롬과 망간의 최대농도가 각각 2,894 mg/kg, 1,994 mg/kg인 극염기성 토양에 줄지렁이를 14주간 노출시켰을 때, 노출 초기에는 생물축적 농도가 증가하였으나, 이후 감소하는 것으로 보고하였다. 본 조사결과에서는 Y. 인분슬러지를 공급한 경우에서만 Maleri 등의 결과와 유사한 패턴을 보였다. Azizi 등(2013)<sup>33)</sup>은 Cr, Cd, Pb, Cu, Zn등이 함유된 하수슬러지를 붉은지렁이에게 공급하였을 때, 공급 10주차부터는 배설물인 분변토내의 중금속 농도가 지렁이 체내 농도보다 높게 나타났다고 하면서 지렁이가 이들 금속류를 체내에서 외부로 배출시킬 수 있음을 제시하였다.

망간의 경우 먹이내의 농도가 크롬에 비해 상대적으로 높았음[Table 4]에도 불구하고 먹이 공급량에 따른 생물축적이 거의 이루어지지 않고 있음을 알 수 있다[Table 8]. 따라서 망간의 생물축적에 의한 지렁이에 대한 독성현상은 발현되거나 지렁이 먹이연쇄에 의한 생물확대(Biomagnification) 현상이 유발되지는 않을 것으로 판단된다.

#### 4. 결론

통상 금속류의 지렁이 체내 생물축적에 관한 연구는 지렁이를 일종의 환경지표생물로 상정하고 토양 환경에 대한 금속류의 위해성 평가를 위한 지렁이의 활용이란 측면에서 이루어져 왔다. 그러나 본 연구에서는 지렁이를 이용하여 유기성슬러지를 처리하는 과정에서 지렁이 개체군 사멸현상을 유발하는 원 인물질을 탐색하는 과정의 일환으로 슬러지내의 크롬과 망간 농도 및 지렁이 생체내 생물축적 정도를 조사하여 이들 금속류가 지렁이 개체군에 급성독성과 생태독성을 유발할 수 있는지를 고찰하였다.

유기성 슬러지내의 크롬과 망간 농도는 각각 0.0~0.3 mg/kg, 3.6~17.6 mg/kg를 나타내었기에, 이러한 중금속 농도들은 줄지렁이에게 급성독성을 유발시키지 않는 것으로 판단되었다. 또한, 크롬의 경우 일정 정도는 생물축적현상이 일어났으나 먹이 공급량에 따라 누적적으로 지렁이 체내에 축적되지는 않는 것으로 판단된다. 망간의 경우는 슬러지내 농도가 크롬보다 상대적으로 높았음에도 불구하고 생물축적이 거의 이루어지지 않았다. 그러나 지렁이가 이들 금속이 아독성 농도 수준에서 장기적으로 노출되었을 때, 지렁이 개체군에 대하여 생태독성을 유발할 것인지에 대한 조사가 향후 이루어져야 할 것이다.

## References

1. Choi, H. G., "A study on sludge feed and breeding condition in vermicomposting of organic sludge", Ph. D. thesis, Dept. of Environmental Engineering, Univ. of Seoul City. p. 114. (1992).
2. Edwards C. A., and Bohlen, P. J., "Biology and Ecology of earthworm", Chapman and Hall, p. 426. (1996).
3. Garg, P., Gupta, A., Satya, S., "Vermicomposting of different types of waste using *Eisenia foetida*: A comparative study", Bior. Technol., 97, pp. 391~395. (2006).
4. Suthar, S., "Vermicomposting potential of *perionyx sansibaricus*(Perrier) in different waste materials", Biores. Technol., 98, pp. 1231~1237. (2007).
5. Khwairakpam, M., Bhargava, R., "Vermitechnology for sewage sludge recycling", J. of Hazardous Materials, 161, pp. 948~954. (2009).
6. Park, K. I., Bae, Y. H., "Feeding efficiency and growth rates of tiger worms (*Eisenia fetida* Savigny) when they were fed with differently pretreated sewage sludge", J. of the Korea organic waste recycling council, 11(4), pp. 66~78. (2003).
7. Kaushik, P., Garg, V. K., "Vermicomposting of mixed solid textil mill sludge and cow dung with the epigeic earthworm *Eisenia foetida*.", Biores. Technol., 90, pp. 311~316. (2003).
8. Gupta, R. Garg, V. K., "Stabilization of primary sewage sludge during vermicomposting", J. of Hazardous Materials, 153, pp. 1023~1030. (2008).
9. Park, K. I., Bae, Y. H., "Ecotoxicological effects of synthetic detergents on the population of *Eisenia fetida*", J. of the Korea organic resources recycling association, 19(1), pp. 115~122. (2011).
10. Park, K. I., Bae, Y. H., "Ecotoxicological effects of Alum and Ferric chloride on the population of *Eisenia fetida* (Annelida ; Oligochaeta)", J. of the Korea organic resources recycling association, 20(1), pp. 50~60. (2012).
11. Park, K. I., Bae, Y. H., "Effect of endocrine disrupter, Nonylphenol and DEHP(Di-(2ethylhexyl)phatalate) on the cocoon production and the hatchability of *Eisenia fetida* (Ennelida; Oligochaeta)", J. of the Korea organic resources recycling association, 20(2), pp. 89~95. (2012).
12. Hobbelen, P. H. F., Koolhaas, J. E., van Gastel, C. A. M., "Bioaccumulation of heavy metals in the earthworms *Lumbricus rubellus* and *Aporrectodea caliginosa* in relation to total and available metal concentration in field soils", Environmental Pollution, 144, pp. 639~646. (2006).
13. Nahmani, J., Hodson, M. E., Black S., "A review of studies performed to asses metal uptake by earthworms", Environmental Pollution, 145, pp. 402~424. (2007).
14. Andre, J., Sturzenbaum, S. R., Kille, P., Morgan, A. J., Hodson, M. E., "Metal bioaccumulation and cellular fractionation in an epigeic earthworm (*Lumbricus rubellus*) : the interactive influences of population exposure histories, site specific geometry and mitochondrial genotype", Soil biology and Biochemistry, 42, pp. 1566~573. (2010).
15. Li L., Xu Z., Wu J., Tian G., "Bioaccumulation of heavy metals in the earthworm *Eisenia fetida* in relation to bioavailable metal concentrations in pig manure", Bior. Technol., 101, pp. 3430~3436. (2010).
16. Park, K. I., Bae, Y. H., "Bioaccumulation of Zn, Cu, Fe and Al in the earthworm *Eisenia fetida* (Ennelida; Oligochaeta) in relation to the supply of sludge", J. of the Korea organic resources recycling association, 20(3), pp. 60~70. (2012).
17. Naver(<http://terms.naver.com/entry.nhn?docID=2700361&cid=51610&categoryID=51610>)
18. Naver(<http://terms.naver.com/entry.nhn?docID=481326&cid=55558&categoryID=55558>)
19. Manerikar, R. S., Apte, A. A., Ghole, V. S., "In vitro and in vivo genotoxicity assesment of Cr(VI) using comet assay in earthworm coelomycetes", Environmental Toxicology and Pharmacology, 25, pp. 63~68. (2008).
20. Bigorgne, E., Cossu-Leguille, C., Nahmani, J.,

- "Genotoxic effects of nickel, trivalent and hexavalent chromium on the *Eisenia fetida* earthworm", *Chemosphere*, 80, pp. 1109~1112. (2010).
21. Naver(<http://terms.naver.com/entry.nhn?docID=777432&cid=48192&categoryID=48288>)
  22. Naver([http://terms.naver.com/contents.nhn?rid=44&contents\\_id=7501](http://terms.naver.com/contents.nhn?rid=44&contents_id=7501))
  23. Pokarzhevskii, A. D., Van Straalen, N. M., "A multi-element view on heavy metal biomagnification", *Applied Soil Ecology*, 3, pp.95~98. (1996).
  24. Weltje, L., "Mixture toxicity and tissue interactions of Cd, Cu, Pb and Zn in earthworms (Oligochaeta) : A critical evaluation of data", *Chemosphere*, 36, pp. 2643~2660. (1998).
  25. Lock, K., Janssen, C. R., "Ecotoxicity of Chromium(III) to *Eisenia fetida*, *Enchytraeus albidus*, and *Folsomia candida*", *Ecotoxicology and Environmental Safety*, 51, pp. 203~205. (2002).
  26. Sivakumar, S., Subbhuraam, C.V., "Toxicity of Chromium(III) and Chromium(VI) to the earthworm *Eisenia fetida*", *Ecotoxicology and Environmental Safety*, 62, pp. 93~98. (2005).
  27. Kuperman, R. G., Checkai, R. T., Simini, M., Phillips, C. T., "Manganese toxicity in soil for *Eisenia fetida*, *Enchytraeus crypticus* (Oligochaeta), and *Folsomia candida* (Collembola)", *Ecotoxicology and Environmental Safety*, 57, pp. 48~53. (2004).
  28. Reinecke, S. A., Reinecke, A. J., "The influence of lead and manganese on spermatozoa of *Eisenia fetida* (Oligochaeta)", *Soil Biol. Biochem.*, 29, pp. 737~742. (1996).
  29. Dai, J., Rouiller, T., Reverset, J. H., Bernhard-Reversat, F., Nahmani, J., Laveele, P., "Heavy metal accumulation by two earthworm species and its relationship to total and DPTA-extractable metals in soils. *Soil Biol. Biochem.*, 36, pp. 91~98. (2004).
  30. Thakali, S., Allen, A. E., Di Tiro, D. M., Ponizovsky, A. A., Rooney, C. P., Zhao, F. J., Mcgrath, S. P., Criel, P., van Eechout, H., Jassen, C. R., Oorts, K., Smolders, E., "Terrestrial biotic ligand model. 2. Application to Ni and Cu toxicities to plants, invertebrates and microbes in soil. *Environmental Science & Technology*, 40, pp. 7094~7100. (2006).
  31. Suthar, S., Sajwan, P., Kumar, K., "Vermiremediation of heavy metals in wastewater sludge from paper and pulp industry using earthworm *Eisenia fetida*", *Ecotoxicology and Environmental Safety*, 109, pp. 177~184. (2014).
  32. Maleri, R. A., Reinecke, A. J., Reinecke, S. A., "Metal uptake of two ecophysiologicaly different earthworm (*Eisenia fetida* and *Aporrectodea caliginosa*) exposed to ultramafic soil", *Applied soil Ecology*, 38, pp. 42~50. (2008).
  33. Azizi, A. B., Lim, M. P. M., Noor, Z. M., Abdullah, N., "Vermiremoval of heavy metal in sewage sludge by utilizing *Lumbricus rubellus*", *Ecotoxicology and Environmental Safety*, 90, pp. 13~20. (2013).