

유기성슬러지 먹이공급에 따른 붉은줄지렁이 사육상의 pH, EC, 수용성 이온 농도변화

박광일, 배윤환[†]
대진대학교 생명화학부

Changes in pH, EC and Water Soluble Ions in the Rearing Beds of *Eisenia andrei* (Ennelida; Oligochaeta) in Relation to the Amount of Sludges Supplied to the Earthworm Populations

Kwang-Il Park, Yoon-Hwan Bae[†]

Department of Life Science and Chemistry, Daejin University

(Received: Aug. 24, 2017 / Revised: Sep. 13, 2017 / Accepted: Sep. 13, 2017)

ABSTRACT: Changes in pH, EC and water soluble cation and anion of the bed material in the rearing box of earthworms were investigated while sewage sludges or night soil sludge were cumulatively supplied to the 15 grams of initial earthworm population in the rearing box. Initial biochemical properties of sludges such as pH, EC, V.S. and water content were at the edible levels for earthworm. However, as the cumulative amount of sludges supplied to the earthworms were increased, pH of bed material in the rearing box was lowered and EC was increased, which meant that salt contents of bed material in the rearing box had been accumulated. Water soluble cations and anions were also accumulated in the bed material of the rearing box. Accumulation rates of NO_3^- were especially prominent. Consequently, feeding rates of earthworm populations were reduced to nearly zero and earthworm populations finally died.

Keywords: Earthworm, Sludge, Water soluble ion, Rearing bed, Cation, Anion

초 록: 경기도 포천시 관내 하수 및 인분 처리장들에서 발생하는 유기성 슬러지를 지렁이 먹이로 공급하였을 때, 지렁이 사육상의 수용성 양이온, 음이온 농도 및 pH, 전기전도도 등의 이화학 성상 변화를 추적하였다. 먹이로 공급된 슬러지의 pH, 전기전도도, 유기물 함량 및 함수율은 지렁이의 단기적 섭식이 가능한 범위였으나, 슬러지의 공급량이 늘어감에 따라 섭식속도가 느려지고 결국 지렁이 사멸현상이 나타났다. 또한 슬러지 공급량이 늘어감에 따라 지렁이 사육상이 산성화되었고, 전기전도도가 높아지는 것으로 보아 염류집적 현상이 일어난 것을 알 수 있었으며, 동시에 사육상의 수용성 음이온 및 양이온 농도가 높아졌다. 특히 수용성 이온 중 NO_3^- 의 농도 집적이 두드러졌다.

주제어: 지렁이, 슬러지, 수용성 이온, 사육상, 양이온, 음이온

[†] Corresponding author(e-mail : yhbae@daejin.ac.kr)

1. 서론

유기성 폐기물에 대한 환경친화적이고 경제적인 처리기술로 알려진 지렁이 처리법(Vermicomposting)^{1~3)}을 하수슬러지 처리에 적용할 경우 처리기간이 경과함에 따라 지렁이 개체군 사멸현상이 일어나^{4~6)} 그 원인을 구명하기 위한 노력이 있어왔다. 필자들은 하수슬러지 탈수시에 사용하는 무기응집제인 Alum과 Ferric chloride 및 플라스틱 제조시 사용하는 DEHP가 지렁이 개체군에 독성을 유발할 수 있음을 보고한 바 있다^{7~9)}. 또한 하수슬러지를 지렁이에게 반복하여 지속적으로 공급하였을 때 슬러지내 Zn, Cu, Fe, Al, Cr, Mn 등의 중금속이 지렁이 체내에 누적적으로 축적되지는 않으나 장기적으로는 지렁이 개체군에 생태독성을 유발할 수 있음을 보고하였다^{10~11)}.

유기성 슬러지 처리에 이용되는 붉은줄지렁이는 사육상 표면으로부터 깊이 20cm 이내에 서식한다¹²⁾. 지렁이 사육상 표면에 지렁이에게 먹이로서 공급되는 유기성슬러지나 슬러지를 섭취후 배설한 분변토는 사육상 표면에서 지렁이의 물리화학적 서식환경을 형성하게 된다. 따라서 섭취되지 않은 슬러지와 섭취 후 배설된 분변토내의 특정 물질은 지렁이의 생리활성을 저해할 가능성이 있다.

지렁이는 피부부를 통한 호흡과 물질교환이 활발하게 이루어지므로 지렁이 서식환경의 물리화학적 특성은 지렁이 생존 활동에 중요한 요인이 된다. 특히 서식환경을 형성하는 사육상 물질내의 염류 농도는 지렁이의 삼투압 조절 능력에 영향을 미친다²⁾. 그러나 현재까지 지렁이 사육상내 이화학 성상의 변화를 지렁이 생리활성 저해 가능성 차원에서 분석하고 검토한 연구는 미미하다.

본 연구에서는 지렁이 먹이로서 유기성 슬러지를 지속적으로 공급할 경우, 사육상에서 지렁이 생리활성과 밀접한 관련이 있는 염류농도에 영향을 미치는 수용성 용존 이온 농도, 전기전도도, pH의 변화를 추적하여 사육상의 이화학성상 변화와 지렁이 사멸현상과의 관련성을 조사하였다.

2. 재료 및 방법

2.1. 유기성슬러지 채취 및 먹이공급

슬러지 채취, 슬러지먹이 공급방법은 전보^{10~11)}와 동일하였으나, 본고에서는 편의상 재설명하였다.

2.1.1. 유기성 슬러지 채취

본 실험에 사용된 슬러지는 경기도 포천시 관내의 포천, 영중, 소흘 하수처리장 및 영중 분뇨처리장에서 배출되는 탈수슬러지를 사용하였다. 각 처리장에서 적용하는 수처리공법, 응집제 및 슬러지 탈수 방법은 Table 1과 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.

2.1.2. 줄지렁이 먹이로서 하수슬러지 공급

직경 18cm, 높이 18cm의 원통형 사육상자에 분변토 300g을 깔아준 후 23.5°C, L:D=16:8의 환경제어실에서 제지슬러지를 먹이로 누대사육 중인 줄지렁이

Table 1. Method of treatment process, applied coagulant and sludge dewatering method in each sewage treatment plant (Cited from previously published paper^{10~11)})

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 ₃ , Polymer	Belt press filter	Sewage, pig's feces and urine
S. trmt. plant	DeNiPho	Alum, Polymer	Centrifuge	Sewage

이 개체군을 15g씩 입식하였다. 하수슬러지는 고형물 기준으로 15g씩 공급하였으며, 24시간 간격으로 지렁이의 섭식여부를 확인하였다. 공급된 하수슬러지를 지렁이가 모두 섭식하면 15g의 하수슬러지를 반복하여 공급하였다.

2.2. 사육상의 이화학 성상 조사

먹이로 사용된 슬러지와 사육상을 이루고 있는 물질(슬러지+분변토)의 몇 가지 이화학 성상을 조사하였다. 사육상 시료는 매회 먹이를 공급하기 직전에 사육상 표면으로부터 3 cm 이내의 물질을 채취하였다.

시료의 pH는 시료 5 g를 증류수 25 ml(1:5)를 혼합하여 100rpm으로 1시간 교반 후 pH meter(Moderl : Orion 420A)를 이용하여 측정하였다. 전기전도도(EC :electric conduction)는 시료와 증류수를 1:5로 혼합하여 1시간 교반하였고, No.2 여과지로 여과한 후 Conductivity meter(Model : Orion 3-star conductivity)로 측정하였다. 유기물함량은 시료를 dry oven(105°C)에서 24시간 건조시킨 다음 600°C에서 8시간 연소 후 측정하였다. 수용성 이온 농도는 105°C에서 건조된 시료 5g을 분쇄하여 증류수와 1:5로 혼합 후 100 rpm에서 2시간 동안 교반한 다음 증류수로 20배 희석하여 Ion-Chromatography(IC, model: ICS-1500)로 측정하였다.

2.3. 통계분석

각 분석항목의 조사수는 3반복이었으며, 하수슬러지 종류에 따른 사육상의 이화학 성상 차이에 대

한 통계적 유의성 검정을 SPSS[ver. 12.0]를 이용하여 Duncan의 다중검정법으로 수행하였다(P<0.05).

3. 결과 및 고찰

3.1. 하수슬러지의 이화학적 성상

일반적으로 생물은 여러 가지 물리, 화학적 요인에 영향을 받는다. 이러한 환경적 요인에 대한 내성 한계 범위를 가지고 있으며, 그 범위는 생물의 종류에 따라 다르다. 지렁이를 이용한 폐기물 처리에 있어서 지렁이가 이화학적 환경요인에 대해서 나타내는 내성한계 범위에 관한 정보는 해당 폐기물의 지렁이 처리 가능성 여부를 판단하는 효율적인 지표(indicator)가 된다¹⁾.

포천시 관내에서 발생하는 하수슬러지의 pH는 포천, 소홀하수슬러지가 6.2로 약산성이었으며, 영중인분슬러지는 7.2로 중성, 영중하수슬러지는 8.2로 약알칼리성이었다(Table 2).

지렁이는 중성의 pH를 선호하는 것으로 알려져 있으며¹³⁾, 산성도의 내성범위는 pH 5.4~8.5인 것으로 보고되었다¹⁾. 따라서 지렁이 먹이로서 하수슬러지의 pH는 적정범위를 나타냈다.

영중하수슬러지의 전기전도도 값이 7.0 mS/cm로 가장 높았으며 포천, 소홀 및 영중인분슬러지는 4.7~5.9 mS/cm로 우분+피트모스 혼합시료 2.6 mS/cm보다 높았다. 수분함량은 82.4~84.3%였으며, 유기물 함량은 74.9~82.8%으로 우분+피트모스 혼합시료보다 높게 나타났다(Table 2).

Table 2. Several physico-chemical properties of sewage sludges

Items analysed	sewage sludge	Cow dung+peat moss* (mean±S.E.)	Youngjoong Night soil sludge (mean±S.E.)	Pocheon Sewage sludge (mean±S.E.)	Youngjoong Sewage sludge (mean±S.E.)	Soheul Sewage sludge (mean±S.E.)
pH		7.2±0.07b	7.2±0.02b	6.4±0.04b	8.2±0.03c	6.4±0.02a
EC(mS/cm)		2.6±0.24a	4.7±0.23b	5.5±0.50bc	7.0±0.18d	5.9±0.08c
Volatile solid(%)		69.5±0.17a	75.5±0.89b	79.8±0.66c	74.9±0.25b	82.8±0.47d
Water content (%)		60.0±0.00a	84.1±0.04c	82.4±0.61b	82.6±0.35b	84.3±0.44c

*, CD+P: Cow dung : peat moss (2:1 w/w)

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

먹이의 수분함량에 대한 지렁이의 내성범위는 60~85%로 알려져 있어²⁾ 슬러지의 수분함량은 지렁이 생장에 적합한 것으로 나타났다. 지렁이의 전기전도도에 대한 내성범위는 줄지렁이의 경우 5.0~8.0 mS/cm로 그 이상을 초과하면 생육에 영향을 미치는 것으로 보고되었으며^{14~15)}, Kaplan 등¹⁶⁾은 먹이의 적정 전기전도도 값을 1.5~3.0 mS/cm로 보고한 바 있다. 따라서 하수슬러지내 염류농도는 먹이로서의 적정 범위보다 높게 나타나 지렁이의 생육과 하수슬러지 처리효율에 부정적 영향을 미쳤을 것으로 판단된다.

염류농도는 지렁이의 체내 삼투압 조절에 영향을

미치는데 생체내의 각 기관은 일정한 삼투압이 유지되어야 대사, 호흡과정을 유지할 수 있다. 그러나 지렁이는 토양 내 고농도의 용존염이 존재할 때에는 삼투압 조절능력이 약한 것으로 알려져 있다²⁾.

Table 3과 Table 4는 슬러지내 용존염 구성 및 수용성 이온의 농도를 조사한 것이다. 포천하수슬러지에서 수용성 음이온 함량이 낮게 검출되었지만, 그 외 슬러지들에서는 차이를 보이지 않았다. 그러나 수용성 음이온을 구성하는 이온의 함량에서는 큰 차이를 보였다. 우분+피트모스 혼합시료의 경우 Cl^- 이 0.15%으로 수용성 음이온 중 절반이상을 차지하고 있었으며, 영중인분슬러지는 NO_3^- 의 농도가

Table 3. Concentrations of water-soluble anions in sewage sludges (%^{***})

Anion	Sewage sludge	Cow dung+peat moss* (mean±S.E.)	Youngjoong Night soil sludge (mean±S.E.)	Pocheon Sewage sludge (mean±S.E.)	Youngjoong Sewage sludge (mean±S.E.)	Soheul Sewage sludge (mean±S.E.)
Cl^-		0.15±0.01c	0.08±0.00b	0.05±0.00a	0.16±0.00c	0.07±0.00b
NO_2^-		0.00±0.00	-**	-	-	-
NO_3^-		0.06±0.01c	0.14±0.01d	0.03±0.00b	0.02±0.00a	0.03±0.00b
PO_4^{3-}		0.07±0.01a	0.08±0.001a	0.11±0.00a	0.10±0.00a	0.19±0.00b
SO_4^{2-}		0.03±0.00ab	0.08±0.01d	0.04±0.00b	0.02±0.00a	0.03±0.00ab
Total		0.32±0.02b	0.39±0.03c	0.22±0.01a	0.30±0.02b	0.32±0.10b

* , CD+P: Cow dung : peat moss (2:1 w/w)

** , -not detect

*** , % on dry weight

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

Table 4. Concentrations of water-soluble cations in sewage sludges(%^{**})

Cation	Sewage sludge	Cow dung+peat moss* (mean±S.E.)	Youngjoong Night soil sludge (mean±S.E.)	Pocheon Sewage sludge (mean±S.E.)	Youngjoong Sewage sludge (mean±S.E.)	Soheul Sewage sludge (mean±S.E.)
Na^+		0.22±0.06ab	0.30±0.01b	0.14±0.01a	0.46±0.01d	0.19±0.01a
NH_4^+		0.03±0.01a	0.04±0.00ab	0.04±0.00ab	0.08±0.00c	0.05±0.00b
K^+		0.56±0.16b	0.20±0.00a	0.24±0.01a	0.88±0.03c	0.45±0.03b
Mg^{2+}		0.03±0.01a	0.06±0.01a	0.04±0.07a	0.11±0.00b	0.11±0.01b
Ca^{2+}		0.05±0.02a	0.14±0.01c	0.08±0.02a	0.10±0.08b	0.12±0.06b
Total		0.89±0.26b	0.74±0.02ab	0.54±0.02a	1.63±0.08c	0.92±0.06ab

* , CD+P: Cow dung : peat moss (2:1 w/w)

** , % on dry weight

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

0.14%로 포천, 영중 및 소홀하수 0.02%~0.03%보다 5배 높게 함유하고 있었다.

포천하수슬러지와 소홀하수슬러지는 PO_4^{3-} 의 농도가 0.11%, 0.19%으로 수용성 음이온 농도 중 절반을 차지하고 있었으며, 영중하수슬러지는 Cl^- 와 PO_4^{3-} 가 주를 이루는 것으로 나타났다(Table 3).

하수슬러지내 PO_4^{3-} 의 비율이 높았던 것은 합성 세제의 활성을 돕는 보조제인 인산염 때문으로 특히 소홀하수슬러지에서 높았던 것은 소홀 지역이 타 지역에 비해 인구밀도가 높아 상대적으로 합성 세제의 소비가 높았기 때문인 것으로 판단된다. 그러나 Lee and Lee¹⁷⁾는 우분에 2%의 인을 첨가했을 때 지렁이 생체중, 증체속도가 증가되는 것으로 보고한 바 있어 하수슬러지 내의 인산염은 지렁이에게 직접적인 치사를 유발하지는 않았을 것으로 판단된다.

하수슬러지내 수용성 양이온 농도는 영중하수슬러지가 1.63%로 가장 높았으며, 포천하수슬러지가 0.54%로 가장 낮은 농도를 나타냈다(Table 4). 슬러지내 수용성 양이온 중에서는 Na^+ 와 K^+ 의 함량이 높았으며 영중하수슬러지의 경우 Na^+ 와 K^+ 의 농도가 0.46%와 0.88%로 가장 높았다. NH_4^+ , Mg^{2+} 및 Ca^{2+} 의 농도는 Na^+ 와 K^+ 에 비해 상대적으로 낮은 농도였으

며, 슬러지들 간에도 큰 차이는 없었다.

3.2. 슬러지에 대한 지렁이의 섭식속도

Table 5는 슬러지 건중량 15 g을 반복적으로 급이 하였을 때 줄지렁이 생체량 15 g이 먹이 15 g를 섭식하는데 걸리는 시간이다. 우분+피트모스 혼합시료의 경우 6.0~8.3일이 소요되었다. 영중인분슬러지의 경우 누적 급이량이 60 g일 때까지는 6.3~7.0일이 소요되었으나 이후 지속적으로 공급하게 되면 13.0~15.3일이 소요되어 처리효율이 떨어지는 것으로 나타났다. 포천하수슬러지와 영중하수슬러지는 각각 23.0~27.3일과 19~25.0일로 소요되었으며 소홀하수슬러지의 경우 28.0~38.0일이 소요되어 처리효율이 가장 낮았다.

소홀하수슬러지를 줄지렁이에게 45 g 이상 공급하게 되면 줄지렁이 개체군이 사멸되어 섭식이 불가능 하였으며 포천, 영중하수슬러지의 경우도 75 g 이상 공급되면 줄지렁이 개체군 사멸로 인해 처리가 불가능한 것으로 나타났다.

Table 5. Feeding rates of earthworm population on sewage sludges (days/15 g of sewage sludge(d.w.)/15 grams of initially introduced earthworms). 15 grams of earthworm population were initially introduced to the rearing box.

Sewage sludge	Cow dung+peat moss* (mean±S.E.)	Youngjoong Night soil sludge (mean±S.E.)	Pocheon Sewage sludge (mean±S.E.)	Youngjoong Sewage sludge (mean±S.E.)	Soheul Sewage sludge (mean±S.E.)
Cumulative amount of supplied sewage sludge(g)					
15	6.0±0.00a	6.3±0.33a	25.7±0.67c	19.0±0.00b	38.0±0.00d
30	6.0±0.00a	6.7±0.33a	23.3±0.67c	20.0±0.00b	28.0±0.00d
45	7.7±0.33a	7.0±0.00a	23.0±2.54b	25.0±2.00b	-
60	7.7±0.58a	7.0±0.00a	27.3±2.73b	25.0±2.00b	
75	8.3±0.33a	13.0±0.00b	-**	-	
90	7.0±0.00a	15.3±1.33b			
105	8.0±0.00a	14.3±0.33b			

*, CD+P: Cow dung : peat moss (2:1 w/w)

** , - : Earthworms couldn't feed anymore or died.

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

($p < 0.05$:Duncan[SPSS 12.0]).

3.3. 사육상의 이화학 성상 변화

3.3.1. pH 변화

슬러지 공급량에 따른 줄지렁이 사육상의 pH 변화는 30 g의 소홀하수슬러지를 급이한 사육상자내 bed material이 6.4로 가장 빠르게 낮아졌으며, 60 g의 포천하수슬러지와 영중하수슬러지를 급이한 사육상자내 bed material은 6.5~6.7로 낮아졌다. 105 g까지 섭식이 가능했던 인분슬러지는 pH가 5.8까지 떨어져 슬러지를 급이할 수록 사육상의 pH가 낮아지는 경향을 보였다(Table 6).

인분슬러지를 급이한 사육상자내 bed material의 pH는 급이량이 증가될수록 낮아져 105 g를 공급할 때 사육상자내 bed material이 5.8까지 낮아졌다.

지렁이 처리 과정 중 pH가 낮아지는 것은 미생물에 의해 CO₂와 유기산이 생성되거나¹⁸⁾ N과 P가 각각 NO₂⁻/NO₃⁻와 PO₄³⁻로 분해되기 때문인 것으로 보고되었다^{3), 19)}.

3.3.2. 전기전도도 변화

슬러지를 급이한 줄지렁이 사육상내 bed material의 전기전도도는 공급량이 늘어날수록 증가되었으며, 하수슬러지를 급이한 사육상이 우분+피트모스 혼합시료와 영중인분슬러지보다 빠르게 높아졌다(Table 7). 45 g의 슬러지를 공급한 시기에 개체군 사

멸현상이 발생한 소홀하수슬러지(Table 5)는 전기전도도가 13.5 mS/m로 높아졌다. 75 g의 슬러지를 공급할 때 개체군 사멸이 발생한 포천하수슬러지와 영중하수슬러지의 전기전도도가 14.3 mS/m와 14.0 mS/m로 크게 높아지는 것으로 나타났다. 영중인분슬러지 경우 섭식속도와 생체량이 감소된 시기의 전기전도도 값이 11.5 mS/m로 증가되었다(Table 7).

사육상내 bed material의 전기전도도는 하수슬러지가 분해되면서 PO₄³⁻, NH₄⁺, K⁺ 염이 방출되기 때문에 증가되는 것으로 보고되었다^{20~21)}.

Table 2에서 하수슬러지의 높은 염분 농도뿐만 아니라 줄지렁이에 의해서 하수슬러지가 처리되면서 지렁이 사육상내의 과도한 염류의 증가가 줄지렁이 개체군 사멸에 직접적인 영향을 미쳤던 것으로 판단된다.

3.3.3. 수용성 이온 농도 변화

우분+피트모스 혼합시료를 급이한 줄지렁이 사육상내 bed material의 수용성 음이온 농도는 일정하게 유지되었으나 하수슬러지 또는 인분슬러지를 급이한 사육상의 bed material은 먹이량에 따라 수용성 음이온 농도가 큰 폭으로 증가되었다(Table 8). 소홀하수슬러지의 경우 15 g의 먹이를 공급하였을 때 수용성 음이온 농도는 6.65%이었는데, 45 g의 먹이가 공급되어 지렁이 개체군 사멸현상이 발생하였던 당

Table 6. Changes in pH of the bed material of earthworm rearing box according to the cumulative amount of sewage sludge supplied to 15 grams of initial earthworm population

Sewage sludge Amount of sewage sludge(g)	Cow dung+peat moss* (mean±S.E.)	Youngjoong Night soil sludge (mean±S.E.)	Pocheon Sewage sludge (mean±S.E.)	Youngjoong Sewage sludge (mean±S.E.)	Soheul Sewage sludge (mean±S.E.)
15	7.0±0.24a	7.2±0.04a	7.0±0.06a	7.2±0.04a	7.0±0.08a
30	6.9±0.13bc	6.9±0.02b	6.9±0.0b	7.1±0.06c	6.4±0.04a
45	7.0±0.03c	6.7±0.06b	6.9±0.03c	6.6±0.01b	6.4±0.03a
60	7.1±0.15b	6.7±0.14a	6.7±0.09a	6.5±0.04a	
75	6.8±0.06b	6.5±0.06a	6.7±0.09b	6.3±0.02a	
90	6.9±0.02b	6.1±0.06a			
105	6.9±0.07b	5.8±0.11a			

*, CD+P: Cow dung : peat moss (2:1 w/w)

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

Table 7. Changes in EC of the bed material of earthworm rearing box according to the cumulative amount of sewage sludge supplied to the 15 grams of initial earthworm population (mS/cm)

Sewage sludge Amount of sewage sludge(g)	Cow dung+peat moss* (mean±S.E.)	Youngjoong Night soil sludge (mean±S.E.)	Pocheon Sewage sludge (mean±S.E.)	Youngjoong Sewage sludge (mean±S.E.)	Soheul Sewage sludge (mean±S.E.)
15	7.5±0.66a	10.4±0.07c	10.3±0.25c	9.0±0.23b	11.9±0.20d
30	5.1±0.36a	9.3±0.36b	10.1±0.43b	12.3±0.38c	11.5±0.37bc
45	8.1±0.42ab	7.4±0.03a	9.1±0.42b	13.3±0.64c	13.5±0.35c
60	9.6±0.12a	9.0±1.17a	14.0±1.18b	14.5±0.65b	
75	8.0±1.13a	9.4±0.75a	14.3±0.50b	14.0±1.42b	
90	7.6±0.44a	11.5±1.55b			
105	9.7±0.44a	10.6±1.44a			

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

Table 8. Total concentrations of water-soluble anions in the bed material of earthworm rearing box according to the cumulative amount of sewage sludge supplied to the 15 grams of initial earthworm population(%**)

Sewage sludge Amount of sewage sludge(g)	Cow dung+peat moss* (mean±S.E.)	Youngjoong Night soil sludge (mean±S.E.)	Pocheon Sewage sludge (mean±S.E.)	Youngjoong Sewage sludge (mean±S.E.)	Soheul Sewage sludge (mean±S.E.)
15	4.52±0.48ab	4.60±0.51ab	5.39±0.15ab	4.08±0.30a	6.65±1.45b
30	4.54±0.05a	4.56±0.52a	5.10±0.52a	5.80±0.55a	6.72±1.45a
45	4.40±0.35a	4.43±0.29a	5.44±0.11ab	6.46±0.26bc	9.25±0.95c
60	4.55±0.53a	5.25±0.36ab	6.36±0.32b	7.85±0.02c	
75	3.98±0.30a	6.49±0.36b	7.16±0.58b	7.72±1.10b	
90	4.33±0.51a	7.97±0.61b			
105	4.45±0.47a	8.62±0.49b			

*, CD+P: Cow dung : peat moss(2:1 w/w)
 **, % on dry weight
 In a row, values followed by the same letter were not significantly different.
 (p<0.05 :Duncan[SPSS 12.0]).

시 Table 5에는 수용성 음이온 농도가 9.25%로 크게 증가되었다. 포천하수슬러지와 영중하수슬러지도 75g의 먹이를 공급하였을 때 개체군 사멸현상이 일어났는데, 이때 사육상자내 bed material의 수용성 음이온 농도가 각각 7.16, 7.72%로 높게 나타났다. 영중인분슬러지의 경우 75g의 먹이를 공급하였을 때부터 줄지렁이의 활력이 급격히 감소하였는데 이때의 수용성 음이온 농도는 6.49%였다. 105g까지 추가 공급하였을 때 사육상자내 bed material의 수용성 음이온 농도가 8.62%까지 증가되는 것으로 나타났

다(Table 8).

영중인분슬러지와 영중하수슬러지를 급이한 사육상자내 bed material의 수용성 양이온 농도의 경우 (Table 9), 처음 먹이를 공급한 후의 bed material의 수용성 양이온농도보다 지렁이가 사멸하기 시작할 때의 양이온 농도가 1%이상 증가하였다. 그러나 포천하수슬러지와 소홀하수슬러지를 먹이로 공급한 줄지렁이 사육상자내 bed material의 수용성 양이온 농도는 우분+피트모스 혼합시료의 농도와 차이가 없었다. 특히 소홀하수슬러지를 45 g 공급한 후 줄

Table 9. Total concentrations of water-soluble cations in the bed material of earthworm rearing box according to the cumulative amount of sewage sludge supplied to the 15 grams of initial earthworm population (%^{**})

Sewage sludge Amount of sewage sludge(g)	Cow dung+peat moss* (mean±S.E.)	Youngjoong Night soil sludge (mean±S.E.)	Pocheon Sewage sludge (mean±S.E.)	Youngjoong Sewage sludge (mean±S.E.)	Soheul Sewage sludge (mean±S.E.)
15	0.99±0.09a	1.79±0.13b	1.28±0.05a	1.65±0.07b	1.30±0.08b
30	1.08±0.07a	1.96±0.24c	1.39±0.09ab	1.78±0.03b	1.39±0.12ab
45	1.01±0.08a	2.01±0.26b	1.51±0.12ab	1.55±0.30ab	1.32±0.05ab
60	1.10±0.10a	2.11±0.26b	1.80±0.07b	2.16±0.06b	
75	1.14±0.09a	2.52±0.13b	1.63±0.05ab	2.61±0.07b	
90	1.19±0.10a	3.05±0.07b			
105	1.37±0.55a	2.86±0.04b			

*, Cow dung : peat moss=2:1(dw/dw)

** , % on dry weight

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

(p<0.05 :Duncan[SPSS 12.0]).

Table 10. Concentrations of water-soluble ions in the bed material of earthworm rearing box when cumulative 45 grams of sewage sludge were supplied to 15 grams of initial earthworm population (%^{**})

Sewage sludge Water- soluble ion(%)	Cow dung+peat moss* (mean±S.E.)	Youngjoong Night soil sludge (mean±S.E.)	Pocheon Sewage sludge (mean±S.E.)	Youngjoong Sewage sludge (mean±S.E.)	Soheul Sewage sludge (mean±S.E.)	
anion	Cl ⁻	0.30±0.01c	0.23±0.01b	0.21±0.01b	0.38±0.05a	0.23±0.01b
	NO ₂ ⁻	0.02±0.00a	0.02±0.00a	0.02±0.00a	0.02±0.00a	0.02±0.01a
	NO ₃ ⁻	3.74±0.33a	3.84±0.25a	4.43±0.15b	5.28±0.19c	8.53±0.30d
	PO ₄ ³⁻	0.03±0.01b	0.02±0.02a	0.02±0.05ab	0.02±0.10b	0.02±0.06ab
	SO ₄ ²⁻	0.32±0.001a	0.60±0.02b	0.78±0.05c	0.78±0.10c	0.47±0.06ab
	Total	4.40±0.32a	4.72±0.34ab	5.44±0.12b	6.46±0.22c	9.25±0.26d
cation	Na ⁺	0.18±0.01a	0.32±0.03b	0.27±0.01ab	0.21±0.01ab	0.19±0.01a
	NH ₄ ⁺	0.02±0.00a	0.05±0.01c	0.04±0.00b	0.04±0.00b	0.04±0.00b
	K ⁺	0.02±0.00a	0.07±0.01c	0.04±0.00b	0.04±0.00b	0.04±0.00b
	Mg ²⁺	0.10±0.01a	0.13±0.02a	0.21±0.02b	0.11±0.0a	0.12±0.01a
	Ca ²⁺	0.75±0.05a	1.41±0.20c	0.84±0.05a	1.39±0.06c	1.39±0.10c
	Total	1.08±0.07a	1.96±0.24c	1.39±0.03b	1.78±0.09c	1.80±0.12bc

*, Cow dung : peat moss=2:1(dw/dw)

** , % on dry weight

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

(p<0.05 :Duncan[SPSS 12.0]).

지렁이 사육상자 내 bed material의 전기전도도가 크게 상승하였지만 총 수용성 양이온 농도는 증가되지 않는 것으로 나타났다.

슬러지를 줄지렁이 먹이로 공급한 사육상의 수용성 음이온 중 NO₃⁻의 농도가 가장 높았으며, 45 g의

슬러지를 줄지렁이에게 먹이로 공급한 사육상의 NO₃⁻농도는 소홀하수슬러지가 8.53%로 높게 나타났다(Table 10).

영중하수슬러지와 포천하수슬러지를 급이한 사육상은 NO₃⁻가 4.43~5.28%로 우분+피트모스 혼합

Table 11. Concentrations of water-soluble ions in the bed material of earthworm rearing box when cumulative 75 grams of sewage sludge were supplied to 15 grams of initial earthworm population (%**)

Sewage sludge		Cow dung+peat moss* (mean±S.E.)	Youngjoong Night soil sludge (mean±S.E.)	Pocheon Sewage sludge (mean±S.E.)	Youngjoong Sewage sludge (mean±S.E.)
Water-soluble ion(%)					
Anion	Cl ⁻	0.33±0.02b	0.30±0.02b	0.18±0.01a	0.23±0.01a
	NO ₃ ⁻	3.28±0.28a	5.56±0.57b	6.17±0.46b	6.51±1.04b
	PO ₄ ³⁻	0.05±0.01c	0.03±0.01bc	0.02±0.00b	0.01±0.00a
	SO ₄ ²⁻	0.32±0.04a	0.60±0.10b	0.78±0.12b	0.78±0.04b
	Total	4.00±0.30a	6.49±0.69b	7.16±0.58b	7.80±1.13b
Cation	Na ⁺	0.26±0.01a	0.40±0.03b	0.32±0.01b	0.27±0.02a
	NH ₄ ⁺	0.03±0.00a	0.07±0.01b	0.07±0.01b	0.06±0.01b
	K ⁺	0.03±0.00a	0.07±0.01b	0.07±0.01b	0.06±0.01b
	Mg ²⁺	0.18±0.01a	0.19±0.02a	0.26±0.02b	0.17±0.01a
	Ca ²⁺	0.65±0.03a	1.79±0.09c	0.92±0.13b	2.05±0.13c
	Total	1.14±0.04a	2.52±0.13c	1.63±0.15b	2.61±0.14c

*, Cow dung : peat moss=2:1(dw/dw)

** , % on dry weight

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

시료를 급이한 사육상의 3.74%보다 높았다. SO₄²⁻의 경우 슬러지를 급이한 사육상에서 모두 높게 나타났으며, Cl⁻와 PO₄³⁻는 차이가 없었다. 수용성 양이온 중 Na⁺, NH₄⁺, K⁺ 그리고 Mg²⁺는 큰 차이를 보이지 않았다. 그러나 Ca²⁺은 0.84~1.41%로 하수슬러지를 급이한 사육상에서 높게 나타났다.

줄지렁이 사육상내 bed material의 수용성 음이온 중 Cl⁻, PO₄³⁻, SO₄²⁻와 양이온 중 Na⁺, NH₄⁺, K⁺, Mg²⁺은 75 g의 슬러지를 공급해도 큰 변화가 없었으며 처리군들 간에도 차이가 없었다. 반면 Ca²⁺와 NO₃⁻은 크게 증가되는 것으로 나타났다. Ca²⁺의 경우 45 g의 슬러지를 공급할 때 보다 75 g의 슬러지를 먹이로 공급한 사육상에서 0.1~0.7%가 증가되었으며, NO₃⁻의 경우 우분+피트모스 혼합시료를 먹이로 공급한 사육상에서 0.46%가 증가된 것에 비해 슬러지를 공급한 사육상에서 1.23~1.82%까지 증가되어 수용성 이온 중 증가 폭이 가장 큰 것으로 나타났다 (Table 11).

식물이 질소원을 이용되기 위해서 미생물에 의해 유기태 질소가 NH₄⁺로 변하고 NH₄⁺는 NO₂⁻로 변하고 이는 다시 NO₃⁻로 변화되어야 식물이 흡수할 수

있는 것으로 알려져 있다¹⁾. Frederickson 등²²⁾은 가정 쓰레기를 vermicomposting을 하게 되면 전형적인 퇴비화를 거칠 때 보다 NO₃⁻의 농도가 더 높다고 보고 하였다.

슬러지를 지렁이 먹이로 공급하게 되면 슬러지내의 NH₄⁺가 지렁이 장내를 통과하면서 NO₃⁻으로 전환되어 지렁이 사육상내 bed material의 NO₃⁻가 증가된다^{23~24)}. NO₃⁻는 식물이 질소성분을 잘 흡수할 수 있는 상태로 식물의 생육과 성장을 촉진시킬 수 있다. 그러나 지렁이 사육상내 과도한 NO₃⁻의 증가는 지렁이 사육상내의 pH를 감소시키고 염류 농도를 상승시켜 지렁이의 사육환경에 부정적인 영향을 미치는 것으로 판단된다.

박과 배⁴⁾는 지렁이 급이를 위한 전처리 방법으로 하수슬러지 퇴비화시 인분슬러지 또는 제지슬러지를 혼합하여 부숙시킬 때 인분슬러지보다는 제지슬러지를 혼합한 것이 더 안정적으로 처리가 가능한 것으로 보고하였다.

따라서 위의 결과는 하수슬러지에도 다량의 질소를 함유하고 있기 때문에 인분슬러지와 같은 질소원이 풍부한 부자재를 혼합하면 지렁이 사육상내

bed material의 NO_3^- 농도가 더 증가되었기 때문인 것으로 생각된다. 그리고 지렁이를 이용한 하수슬러지 처리를 위해서 전처리용 부자재를 혼합할 경우 제지슬러지와 같은 질소 함량이 낮고 사육상내 염류 농도를 증가시키지 않는 부자재 선택이 중요할 것으로 사료된다.

4. 결 론

지렁이 생리활성과 밀접한 관련이 있는 염류농도에 영향을 미치는 수용성 용존 이온 농도, 전기전도도, pH의 변화를 추적하여 사육상의 이화학적상 변화와 지렁이 사멸현상과의 관련성을 조사하였다. 경기도 포천시 관내에서 발생하는 하수슬러지 및 인분 슬러지를 지렁이 개체군에게 건중량 기준 15 g 씩 반복하여 지속적으로 공급하였을 때, 소홀하수슬러지의 경우 45 g 공급 이후, 포천하수슬러지와 영중하수슬러지의 경우 60 g 공급 이후부터 지렁이 개체군의 섭식활동이 중단되거나 사멸현상이 일어났다. 영중인분슬러지에서는 상기 슬러지와 달리 사멸현상이 나타나진 않았으나 75g 이상 먹이공급을 하였을 때 섭식 속도가 느려지는 현상이 나타났다. 이때 슬러지가 공급된 모든 처리구의 지렁이 사육상에서 대조구(우분+피트모스)보다 pH는 낮아지고 EC 값 및 수용성 이온농도(특히 NO_3^- 농도)가 높아졌다. 특히 지렁이 사멸현상이 조기에 나타난 소홀하수슬러지에서는 그 정도가 심하였다. 이것은 지렁이 먹이로서 슬러지의 이화학 성상이 열악할 경우 슬러지 공급량이 증가할수록 지렁이 사육상에 염류 집적이 빨리 일어나고 있으며, 사육상에 집적된 과다한 염류가 하수슬러지 먹이 공급시 지렁이 개체군 사멸현상 유발원인 중 하나일 수 있음을 시사한다. 따라서 유기성 슬러지를 지렁이 먹이로 활용하기 위해서는 먹이공급 당시 슬러지내의 염류 농도를 낮출 수 있는 다각적인 방법과 기술의 적용이 필요하다.

사 사

본 논문은 대진대학교에서 지원된 연구비에 의해 수행되었습니다. 이에 감사드립니다.

References

1. Choi, H. G., "A study on sludge feed and breeding condition in vermicomposting of organic sludge", Ph. D. thesis, p.114, Dept. of Environmental Engineering, Univ. of Seoul City. (1992).
2. Edwards C. A., Bohlen, P. J., "Biology and Ecology of earthworm", Chapman and Hall, pp. 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. 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).
5. 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).
6. Gupta, R. Garg, V. K., "Stabilization of primary sewage sludge during vermicomposting", J. of Hazardous Materials, 153, pp. 1023~1030. (2008).
7. 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).
8. 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).
9. Park, K. I., Bae, Y. H., "Effect of endocrine disrupter,

- Nonylphenol and DEHP(Di-(2ethylhexyl)phthalate) 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).
10. 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).
 11. Bae, Y. H., Choi, S. S., "Bioaccumulation of Chromium and Manganese in the earthworm *Eisenia andrei* (Annelida; Oligochaeta) in relation to the supply of organic sludges", J. of the Korea organic resources recycling association, 24(3), pp.101~108. (2016).
 12. Park, K. I., Kim, B. W., Bae, Y. H., "Vertical distribution of tiger worm(Oligochaeta : *Eisenia fetida*) population in the rearing bed", J. of the Korea organic resources recycling association, 15(4), pp.93~99. (2008).
 13. Rivero-Hernandez, R., "Influence of pH on the production of *Eisenia fetida*" *Avanc. Animent. Anim.*, 31(5), pp.215~217. (1991).
 14. Frank M., Hartenstein R., "Growth of earthworm *Eisenia foetida* on microorganisms and cellulose", *Soil Biol. Biochem.*, 16(5), pp.491~495. (1984).
 15. Mitchell A., "Production of *Eisenia fetida* and vermicompost from feed-lot cattle manure", *Soil Biol. Biochem.*, 29, pp.763~766. (1997).
 16. Kaplan D. L., Hartenstein R., Neuhauser E. F., Malecki M. R., "Physicochemical requirements in the environment of the earthworm *Eisenia foetida*", *Soil Biol. Biochem.*, 12(4), pp.347~352. (1980).
 17. Lee J. S., Lee P. W., "Estimation of optimal phosphorus and calcium levels on the growth and cast production of earthworm (*Eisenia foetida*)", J. of KOWREC., 10(4), pp.96~102. (2002).
 18. Haimi J., Hutha V., "Capacity of various oranic residues to support adequate earthworm biomass in vermicomposting", *Biol. Fertil. Soil*, 2, pp. 23~27. (1986).
 19. Yadav A. V., Garg K., "Feasibility of nutrient recovery from industrial sludge by vermicomposting technology", *J. Hazardous Materials*, 168, pp.262~268. (2009).
 20. Kaviraj, Sharma S., "Municipal soil waste management through vermicomposting employing exotic and local species of earthworm", *Biores. Technol.*, 90(2), pp.169~173. (2003).
 21. Wong J. W. C., Li S. W. Y., Wong, M. H., "Coal fly ash as a composting material for sewage sludge : effect on microbial activity", *Environ. Technol.*, 16, pp.237~527. (1995).
 22. Frederickson J., Howell G., Hobson A. M., "Effect of pre-composting and vermicomposting on compost characteristics", *European J. Soil Biology*, 43(4), pp.345~352. (2007).
 23. Gunadi B., Edwards C. A., Blount IV C., "The influence of different moisture levels on the growth, fecundity and survival of *Eisenia fetida* (Savigny) in cattle and pig manure solids", *European J. Soil Biology*, 39, pp. 19~24. (2003).
 24. Atiyeh R. M., Dominguez J., Subler S., Edwards C. A., "Changes in biochemical properties of cow manure during processing by earthworms (*Eisenia andrei*, Bouche) and the effects on seedling growth", *Pedobiologia*, 44, pp.709~724. (2000).