

Arsenic toxicity and accumulation of earthworms (*Eisenia fetida*) ; the significance of initial earthworm maturity

이병태^{1)*} · 김경웅¹⁾ · 신경희²⁾

1. 서 론

생태독성의 대표적인 지표생물 중 하나인 지렁이는 토양 내에서 토양의 비옥화(fertilization)와 통기(ventilation) 또는 토양 입자(soil aggregates)의 형성 등에 중요한 역할을 한다. 지렁이를 이용한 토양의 생태위해 평가는 독성학적인 용량-반응 평가, 노출 평가 등으로 수행되어 진다. 토양의 대표적인 생태영향 지표생물인 지렁이를 이용한 유해물질의 독성 평가는 1990년대를 거치면서 급성독성평가와 만성독성평가 기법에 대한 표준화가 진행되어졌다(OECD 207, 222; ISO11268-1,2,3; Suter, 1993; 2000). 표준화된 지렁이를 이용한 생태독성평가 기법은 토양 내 오염물질에 의한 지렁이의 급성 또는 만성 독성을 정량화하는데 이용되었으며(안윤주 와 정승우, 2005; Loureiro et al., 2005), 생태영향의 저감 측면에서 토양오염정화기술을 평가하는 기법으로 적용되어졌다(Shin et al., 2005; Son et al., 2003). 지렁이는 오염토양으로부터 체내에 오염물질을 축적하는 특성을 지니고 있다(Spurgeon and Hopkin, 1996, 1999). 지렁이 체내의 오염물질 축적은 지렁이의 생물학적 특성, 오염물질의 특성 또는 지질환경 내 존재하는 오염물질의 거동 특성에 의해 영향을 받는다. Peijnenburg 등(1999)은 카드뮴, 구리, 납과 아연 등에 대한 지렁이의 체내 흡수에 대해 one compartment model을 적용하여 지렁이의 생체기작을 통해 아연과 구리의 체내 흡수가 생물학적으로 조절됨을 밝혀냈다. Janssen 등(1997)은 토양 내 오염물질의 거동에 영향을 미치는 지구화학적 특성에 따른 지렁이 체내 중금속의 축적 특성을 평가하여 지구화학적 특성인자에 의한 중금속 별 지렁이의 생체축적계수(Bioconcentration Factors) 모델을 제시하였다. 표준화된 독성평가 기법 뿐만 아니라, 오염토양에 대한 생태 독성 실험에서는 환대(clitellum)가 뚜렷한 성숙한 지렁이를 사용한다. 지금까지의 지렁이 독성연구는 지렁이의 성장상태에 의한 영향은 고려되지 않았으며, 따라서 오염토양에 존재할 수 있는 다세대(multi-generation)에 대한 영향, 즉 성숙도(maturity)에 따른 오염물질의 체내 축적 또는 독성 발현에 대한 연구는 진행되지 않았다. 본 연구에서는 비소로 오염된 토양에 지렁이를 노출시켜, 지렁이 체내 비소의 축적 양상을 관찰하였으며, 특히 지렁이의 노출 전에 지렁이를 3단계(mature, formative, immature)로 구분하여 지렁이의 성장상태에 따른 독성 및 비소축적 양상을 비교하고자 하였다.

2. 연구방법

지표생물인 지렁이는 표준화된 독성평가에 이용되는 *Eisenia foetida*를 사용하였다(Carolina Biological Supply, USA). 공급된 지렁이는 약 8주간 실험실 내에서 배양(20℃, dark)되었으며, 배양기간 동안 지렁이의 성장상태를 관찰하며 수분과 먹이를 공급하여 실험 전에 최적의 성장상태가 유지되도록 하였다. 비소로 오염된 토양은 전남 보성군 명봉광산의

주요어 : 비소, 지렁이, 생태영향, 존재형태, 생체축적계수(BCF)

1) 광주과학기술원 환경공학과 (kwkim@gist.ac.kr)

2) 한국환경정책평가연구원 정책분석실 (khshin@kei.re.kr)

광미를 이용하였다. 명봉광산의 광미는 비소의 함량이 지렁이의 급성독성을 일으킬 정도로 높으므로, OECD artificial soil을 이용하여 지렁이가 노출되는 토양에 오염된 광미가 10%, 5%, 2%가 되도록 토양을 단계적으로 희석하여, 노출 농도에 따른 지렁이의 비소 축적 특성을 관찰하였다. 지렁이는 오염토양에 노출하기 전에 무게를 달아, 지렁이의 체중에 따라 3개 그룹(표 1)으로 구분하여 성장상태에 따른 비소의 축적특성을 관찰하였다. 노출 특성별로 광미를 포함하지 않은 대조군 실험을 통해 전체 실험과정의 유효성을 검증하였다. 노출 조건에 따른 처리의 특성을 표 1에 정리하였다. 지렁이의 노출을 위해 준비된 50mL 용기에 단계적으로 희석된 토양 30g을 넣고 증류수를 넣어 수분함량이 40%가 되도록 하였다. 토양을 넣은 용기에 미리 무게를 단 지렁이 1마리를 넣고 20℃에서 14일간 배양하였다. 처리단계별로 12개의 중복시료를 준비하여, 노출시간에 따른 지렁이 체내 비소의 양과 지렁이의 체중 변화를 관찰하였다. 토양 및 지렁이 체내의 비소 함량을 정량하기 위해 질산을 이용하여 추출하였으며, 추출된 용액은 GF-AAs(Graphite Furnance AAs, Zeeman 5100, Perkin Elmer, USA)를 이용하여 분석하였다.

표 1. 지렁이의 성장상태에 따른 구분

구분	초기 지렁이의 무게 (g)		
	M (mature)	F (formative)	IM (immature)
최대값	0.513	0.376	0.309
최소값	0.379	0.313	0.219
평균 (±SD)	0.432 (±0.037)	0.347 (±0.020)	0.272 (±0.027)
노출된 지렁이 수	48	48	48

3. 연구결과.

미성숙(immature) 지렁이는 10%의 오염토양이 혼합된 OECD 표준토양에 14일간 노출된 후 체중의 감소를 나타내었다. 비소의 지렁이 체내 축적은 10% 오염토양에서 14일간 시간에 따라 선형적으로 증가하는 경향을 나타내었으며, 5%와 2% 오염토양이 혼합된 처리군에서는 14일 동안 지렁이 체내 비소의 농도가 꾸준히 증가하다가 정상상태(steady-state)에 도달하는 경향을 나타내었다. 비소의 지렁이 체내 흡수에 대해 one-compartment model을 적용하였다. 모델의 적용 결과에 있어서 초기 지렁이의 성장상태에 따른 차이점은 나타나지 않았다. 결국 지렁이의 성장에 대한 독성발현은 초기 지렁이의 성장상태와 오염물질의 농도에 의한 것임을 알 수 있었다. 미성숙 지렁이의 비소 축적은 성숙한 지렁이의 비소축적과 비교하여 유의한 차이를 나타내지 않았으나, 성장에 대한 독성을 받은 것으로 나타났으며, 이는 지렁이의 오염물질에 대한 저항성에 의한 것이며, 다시 말하면, 성장상태에 따라 비소에 대한 저항력이 달라 낮은 단계의 저항력을 지닌 미성숙 지렁이에서 성장장애가 나타남을 의미하는 것이다.

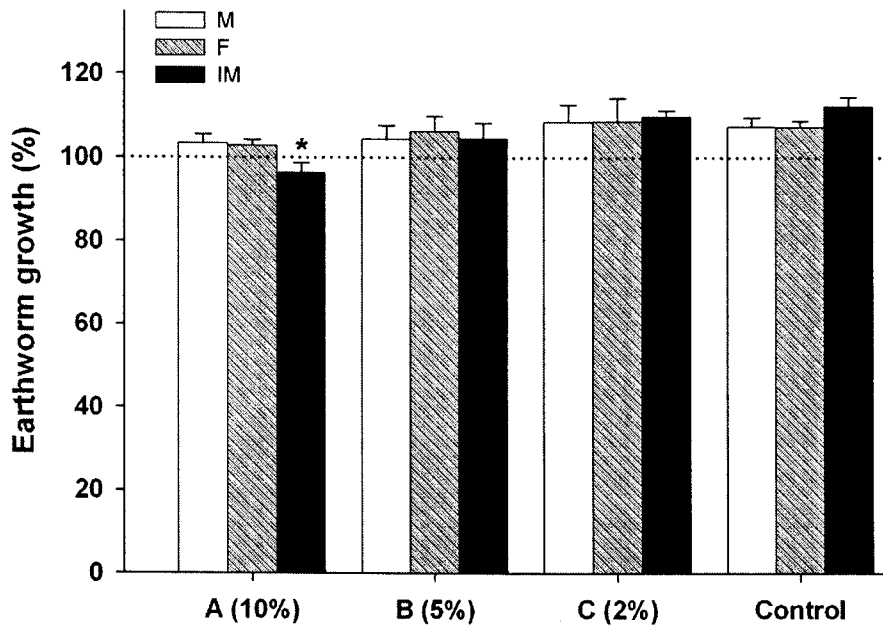


그림 1. 비소오염토양이 혼합된 OECD 표준토양에 노출된 지렁이의 체중 변화 (A=10% 명봉광산 광미, B=5%, C=2%).
 (* ; the significant difference from the growth of control test, ANOVA, $P < 0.05$)