

연구논문

토양 내 서식하는 공벌레의 중금속 축적에 따른 생태적 연구

이 상 돈

이화여자대학교 환경공학과

(2011년 7월 5일 접수, 2011년 8월 12일 승인)

Ecological study on effects of heavy metal accumulation on pillbugs

Sang-Don Lee

Dept of Environmental Sciences & Engineering, College of Engineering, Ewha Womans University

(Manuscript received 5 July 2011; accepted 12 August 2011)

Abstract

In nature, the overall effect of heavy metals on the biota can be influenced by a number of environmental factors like soil characteristics and air pollution by elevated CO₂.

Pillbugs (Isopoda, *Armadillium vulgare*) take up heavy metals with their food and store them mainly in the vesicles of hepatopancreas. They accumulate certain metals, occur in relatively large numbers, are easily collected and identified, and provide sufficient material for analysis. The species are decomposing litter well and soil impurities into N and P. Therefore, it has been suggested that total body concentration of metals in pillbugs could be positively correlated to the levels of environmental exposure and that pillbugs could be used as biological indicators of metal pollution and global change by CO₂. The aim of the study is to determine effects of heavy metal concentrations in soil and elevated CO₂ on pillbugs' body accumulation of heavy metal and growth rate.

In this study, the concentrations of six metals (Fe, Mg, Cu, Zn, Pb, Cd) have been determined. Pillbugs (N=287) were collected at five sites during Jul-Aug, 2006. Cu and Zn concentrations in the body were much higher than in the soils (1.39-41.70 times). This indicated that bioaccumulation of some of the heavy metals were increasing in the food-chain. The high bioconcentration of lead in Sangam may be partly associated with reclaimed land uses.

Keywords : soil, pillbugs, heavy metals, reclamation sites, bioaccumulation

1. 서론

공벌레(*Armadillium vulgare*)는 주로 산림의 바위 및 표토층이 풍부한 지역, 도시의 오래된 빌딩이나 도로변에도 서식하는데 등각목(Isopod)의 육상 갑각류로 번식기는 6-7월이며 수명은 3-5년이고 최고 20 mm 정도까지 자란다(Hattenschwiler and Bretsher, 2001). 잡식성이지만 주로 식물의 낙엽과 토양 부식질을 섭취하며 때로 동물의 사체도 먹는다. 토양 생태계에서 공벌레의 물질 분해능력은 millipedes(노래기류)의 4배에 달한다(Neuhauser and Hartenstein, 1978). 유충에서 성충이 되기까지 1주일에 1번 정도 허물을 벗으며, 성충이 된 후에도 성장은 계속된다.

공벌레의 주 서식처이며 생태계의 근원이 되는 토양은 다양한 종류의 광물을 이루는 무기물질, 동·식물의 사체가 분해되어 나오는 유기물질, 수분 등으로 이루어져 생태계 구성원들에게 필요한 영양을 공급한다. 따라서 토양의 자정능력을 넘어서는 오염은 지하수 및 토양 생물의 독성을 증가시킨다. 일반적인 토양 중금속으로는 Pb, Cd, Cu, Zn, Cr, 그리고 Hg을 들 수 있다(Lasat, 2000). 중금속의 대부분은 이동성이 없어 토양 내 잔류시간이 길고 그 축적 농도에 따라 생물에 미치는 영향이 다른데, 일반적으로 저농도일 때는 영양 염류로 작용하고 고농도일 때는 세포의 사멸 등을 일으켜 생물체에 치명적인 영향을 미치는 것으로 알려져 있다. 또한, 생물체내에서 일어나는 여러 가지 대사 작용에 혼란을 일으키기도 한다(Alloway, 1995). 그 중 가장 크게 우려되는 것이 Pb에 의한 오염으로 보고되고 있다(Chaney *et al.*, 1999). 과도한 Pb의 노출은 식물의 성장과 발달을 감소시키며 동물의 경우 발작, 정신지체, 행동 장애를 유발할 수 있다(Greszta, 1982).

중금속은 토양에 저농도로 분포되어있다 하더라도 시간이 지남에 따라 먹이연쇄를 거쳐 생물의 체내에 흡수되며, 유기물질과 결합하여 잘 분해되지 않는 유기복합체를 형성하게 된다. 따라서 생물에 미치는 영향을 고려한 토양의 중금속 분포 모니터

링은 중요하게 여겨지고 있으며, 여러 방식으로 연구되어 왔다. 그러나 토양 내 중금속 축적에 대한 생물학적 반응과 관련된 연구의 대부분은 식물환경복원(phytoremediation)과 같이 식물을 중심으로 진행되고 있다(Peter and Sauder, 2006). 1980년대부터 공벌레가 유럽과 미국에서 생태학적 '지표종'으로 쓰일 수 있다는 보고가 있었는데 그 이유는 이들이 청정한 산림뿐 아니라 도심이나 초지 등에서도 발견되는 등 채집이 용이하고, 모여 살기 때문에 한 번에 여러 개체 수를 채집할 수 있으며, 섭식 활동 중에 중금속 등 토양 독극물을 체내에 축적하기 때문이다(Alikhan, 1990; Coenen-Stass, 1998; Paoletti and Hassall, 1999). 영국에서는 Isopoda가 Cu, Zn, Pb에 대해 이제까지 연구된 다른 종보다 건조무게량당 축적량이 높다고 보고되었다. 중금속 오염에 대한 Isopoda의 반응 기작은 생체표면에 중금속이 흡착되어 존재하는 경우, 소장에 축적되어 생장을 저해하는 경우, 미생물에 의해 중금속의 methylation이 진행되어 독성이 완화되는 경우 등으로 구분 지을 수 있다(William, 1997; Saikkonen *et al.*, 1998; Romero-Puertas *et al.*, 2002). 주된 반응은 두 번째 경우로서 산림생태계에서 고농도의 중금속에 계속 노출되었을 경우 공벌레 체내에 축적되면서 독성을 나타내고(Adrian *et al.*, 2002), 중금속이 식물의 생장을 저해함에 따라 식물에 의한 유기물 공급, 서식처 제공 등이 약화되면서 공벌레의 활성이 감소할 수 있다(Singh and Madhulika, 2003). 또한 중금속이 토양 내 과량 존재하면서 토양 입자와 흡착된 이온성 영양염류가 중금속과 치환되면서 토양 밖으로 유출되며, 따라서 미소동물의 영양염류 공급이 감소하여 공벌레의 활성이 감소할 것으로 예상할 수 있다(William, 1997).

현재까지 진행되어 온 공벌레의 환경독성학적, 생태적 특성과 중금속 축적에 대한 연구는 실험실에서의 중금속 농축(Hopkin and Hames, 1991; Witzel, 1998), 중금속의 독성(Joosse *et al.*, 1981, 1983; Crommentuijn *et al.*, 1994; Drobne

and Hopkin, 1995; Coenen-Stass, 1998; Knigge and Kohler, 2000), 극심하게 오염된 지역에서의 공벌레 발생 정도(Hopkin and Hames, 1994; Rabitsch, 1995), 제련소나 광산에 서식하는 공벌레 관찰 연구(Hopkin and Hames, 1994; Rabitsch, 1995; Grelle *et al.*, 2000) 등이 있다. 이 연구들은 고농도의 중금속에 의한 독성 평가가 중심으로, 자연 토양에 분포되어 있는 중금속과 토양 내 서식하는 공벌레의 체내 중금속 농도를 비교한 연구는 드물며 국내에서는 공벌레를 이용한 중금속 모니터링 연구가 아직 수행되지 않았다.

따라서 본 연구는 토양오염에 대한 생물농축을 측정하기 위하여 공벌레를 대상으로 총 5개의 연구 지역을 선택하였으며, 중금속 축적에 대한 결과와 지역의 토양오염을 연계하고자 수행되었다.

II. 연구지역 및 조사방법

1. 연구 지역

연구 지역은 총 5곳으로 1) 서울 관악구 신림동 관악산 내 산림 2) 경기 안산시 본오동 공유수면 일원의 시화호 갈대습지공원 관찰로 주변 3) 서울 서대문구 대현동 이화여자대학교 자연과학대학 부근 산림 4) 서울 마포구 상암동 지역난방공사 주변 매립지 비탈면 5) 인천 부평구 갈산동 굴포천 부근 산림으로 선정하였다. 각 지역의 토양 표토층은 비교적 단일화(homogeneous)하며 이들 지역은 낙엽층 및 암석 등이 혼재한 지역으로 각각 다른 특징을 나타낸다(Table 1).

1) 관악은 서울시 관악구 신림동 관악산 산림으로 이 지역은 서울 도심 한복판에 위치하여 각종 비점오염원으로부터 중금속이 대기를 통해 이동해 올 수 있다. 지질은 대부분 절리와 박리가 발달한 미립질의 화강암으로 구성되어 있으며 곡간에는 배수 양호한 화강암 유래의 토양층이 형성되어 있다. 조사 구역의 지형과 관련한 식생은 암석지에는 리기다소나무(*Pinus rigida*)가, 곡간의 퇴적토양에는 신갈나무(*Quercus mongolica*)가 우점하고 있다.

2) 시화는 경기도 안산시 사동의 공유수면을 기반으로 1999년부터 매립한 지역이며, 이 지역은 안산 및 반월공단의 산업체 공장의 폐수가 유입된 지역으로 중금속오염에 대한 우려가 높은 지역이다(현상민 외, 1999; 이종현 외, 1998). 2001년 환경부 국정감사의 조사에 따르면 시화호 내해 2/3 정도의 안쪽 해역과 배수갑문에서 시화 반월공단의 상류지역으로 갈수록 Hg, Cu, Cd, Zn 오염 정도가 심해지는 양상을 나타내고 있다. 현재 이 지역은 반월공단에서 유입되는 오염물질을 저감하기 위해 갈대를 주종으로 하는 인공습지공원을 조성하고 있으며 이 인공습지는 하천수를 표면수로 유입시키고 토양, 갈대(*Phragmites communis*)와의 접촉 과정에서 흡수, 침전, 분해 등의 과정을 통해 수질을 정화하고 표면부터 처리수를 배출시키는 표면류 방식이다(김인성 외, 2004). 습지 하부는 전형적으로 여러 가지 크기의 자갈, 쇄석, 토양으로 이루어져 있으며 표면에는 일년생 초본이 서식한다.

Table 1. Characteristics of the sites used in this study.

	Latitude	Longitude	Soil character	Dominant vegetation
Kwanak	37 ° 27 28 N	126 ° 56 57 E	granite, efflorescence	<i>Pinus rigida</i> , <i>Quercus mongolica</i>
Sihwa	37 ° 17 17 N	126 ° 50 50 E	gravel, broken stone, sand	<i>Phragmites communis</i>
Ewha	37 ° 33 34 N	126 ° 56 57 E	granite, efflorescence, concrete	<i>Pinus rigida</i> Mill. <i>Quercus variabilis</i> Blume
Sangam	37 ° 34 35 N	126 53 53 E	sand, silt	<i>Robinia pseudo-acacia</i> L. <i>Ailanthus altissima</i> Swingle
Gulpo	37 ° 30 30 N	126 ° 43 44 E	clay, silt	Herbs

3) 이대는 서울시 서대문구 대현동 이화여대 자연과학대학 부근 산림으로 학교 내에 차량 통행이 잦은 곳이다. 차량의 통행은 NO₂, SO_x 같은 공해 물질이 배출되는 지역으로 이 지역은 서울의 도심 지역으로 급화터널이 인근에 존재하므로 차량의 통행으로 인해 질소 및 황 계열의 물질의 축적이 우려되는 지역이다. 이 지역의 기반은 화강암이며 리기다소나무와 굴참나무(*Quercus variabilis*)가 주종을 이루고 토양 표면에서 하부 5~7cm까지 식생에 의해 생성된 낙엽과 표토층, 노출된 화강암의 풍화토로 덮여 있다. 조사 구역의 토양은 차량 통행로 바로 옆에 위치하여 콘크리트 입자와도 섞여 있다.

4) 상암은 서울 마포구 상암동의 과거 난지도 매립지 자리에 조성된 안정화 구역의 사면으로, 난지도는 1978년부터 1993년까지 서울시 및 인근지역의 각종 폐기물이 분별 없이 매립되어 폐기물과 침출수에 의한 중금속 용출이 발생하는 지역으로 알려져 있다(여환주 외, 2005). 토양은 2002년 공원이 조성되기 전 복토 작업을 거친 것으로, 하부에는 하수 슬러지와 토사가 지지층을 이루고, 상부복토 60 cm까지 모래와 미사가, 표면에는 식생층과 식생에 의해 생성된 낙엽과 부식질로 덮여 있다.

5) 굴포는 인천시 부평구 갈산동에 위치하며 인천 수도권 매립지의 영향을 받는 하천 주변 지역이다. 이 지역은 과거에 탄광이 존재하던 지역으로 현재 폐광복구사업이 진행되는 곳이며 인천 수도권 매립지에서 배출되는 침출수의 영향을 받을 것으로 예상되는 지역이다. 하천은 악취가 발생하며 검은 점토와 미사가 토양층 하부에 분포하고 상부는 각종 잡·초본에 의한 부식질로 덮여 있다.

공벌레는 크기가 작은 동물이므로 전처리 방법, 중금속 체내 이동 특성, 개체의 크기와 무게에 따라 검출되는 중금속 함량이 달라질 수 있다. 따라서 중금속 분석에는 무게가 20 mg 이상인 성충만을 사용하였다. 채집은 2006년 7월-9월에 이루어졌다(Table 2). 공벌레는 주로 표토 하부 10cm 내외에서 서식하므로 표토층을 제거하는 것으로 개체군을 확

Table 2. Number of *Armadillium vulgare* used in this study (No. of spot).

Location	Collecting date	Number
Kwanak	2006. Sep.	38(4)
Sihwa	2006. Sep.	57(5)
Ewha	2006. Jul.	87(7)
Sangam	2006. Jul.	60(9)
Gulpo	2006. Aug.	45(4)
Total		287(29)

보할 수 있었다. 연구지역의 토양은 각 지역의 채집 지점에서 1 m × 1 m의 정방형 조사구를 지정하고 방형구 모서리 4개 지점에서 지표 5cm 이하의 표토층을 채취하여 물리화학적 성질 분석과 중금속 총량 분석을 실시하였다.

2. 토양의 물리화학적 특성 분석

채집한 토양은 물리화학적 분석을 위하여 돌, 자갈, 식물뿌리 등을 제거한 후 2 mm 체로 쳤다. pH는 토양 10g에 증류수 25 ml을 넣고 혼합한 뒤, 30 분간 정치한 후 pH meter(pH 300, Hanna instruments)를 이용하여 측정하였다. 토양 함수량(moisture content)은 토양 5 g을 110℃ 건조기에서 24시간 항량 건조하여 건조량당 백분율로 계산하였다. 유기물 함량(organic matter)은 건조된 토양을 도가니에 담아 700℃ 회화로에서 1시간 가열한 후 건조량당 백분율로 계산하였다. 토양의 양이온치환용량(Cation-exchange capacity)은 EPA method 9081에 따라 분석하였다. 건조된 토양 5 g에 1 M sodium acetate 33 ml를 넣고 2000 rpm에서 5분간 원심분리 후 부유용액을 따라내는 과정을 4번 반복한 뒤 isopropyl alcohol 33 ml를 넣고 같은 과정을 3번 반복하고 처리된 시료에 1 M ammonium acetate 33 ml를 넣고 원심분리 후 부유용액을 모으는 과정을 3번 반복하여 최종적으로 모아진 시약을 Whatman filter paper No.44로 여과하여 희석 후 Atomic Flame Atomic Absorption Spectrophotometer(AAS, Vario 6, Analytikjena AG, Germany)로 Na농도를 측정하였다. 토양 탈수소효소 활성도(dehydrogenase

activity)는 Rossel(1993) 방법을 사용하였다. 멸균한 glass tube에 토양 3g을 넣고 CaCO_3 0.03g, 3% TTC(2,3,5-Triphenyl-2H-tetrazolium chloride, 98%)용액 1 ml, 멸균수 2.5 ml를 가하고 vortexing 후 알루미늄 호일로 감싸서 빛을 차단한 상태로 37°C에서 24시간 배양하였다. 배양 후 methanol을 가한 다음 100 ml volumetric flask에 추출 여과하였다. 토양 미생물의 호흡 결과 생긴 탈수소효소와 무색의 테트라졸리움 용액이 함께 있으면 환원상태로 있는 탈수소효소부터 수소이온이 산화상태의 테트라졸리움과 결합하여 적색의 formazan이 된다. 1시간 후 적색의 여과액을 methanol을 blank로 하여 485 nm에서 흡광도를 측정하였다(Agilent Technologies 8453 UV-Vis, Youngin Scientific Co., Ltd.).

3. 중금속 분석

채집한 토양은 110°C 건조기에서 24시간 항량 건조하여 건조중량 0.5g을 pyrex glass beaker에 넣었다. 여기에 HCl 1.8 ml와 37% HNO_3 0.6 ml을 가한 후 시계접시를 덮고 hot plate에서 백연이 발생할 때까지 가열분해 하였다. 가열분해 후 실온에서 방냉하고 증류수 10 ml로 희석하여 Whatman filter paper No.44로 여과하였다. 채집한 공벌레는 증류수에 적신 스폰지를 담은 폴리에틸렌 용기에 투입하여 18°C에서 2일간 배설활동만을 하게 한 후 -24°C에서 24시간 냉동시켜 토양과 같은 방법으로 분석하였다. 2일간 섭식활동을 배제하고 배설활동만을 하게 하는 것은 소장 내부에 축적된 중금속 농도를 더 정확히 알기 위함이다

(Hendrickx, 2003). 기기분석은 AAS를 사용하였으며 중금속 분석은 토양 중 축적비가 높은 Fe, Mg과 주요 중금속으로 분류된 Cd, Pb, Cu, Zn에 대해 실시하였다. 분석 시 calibration은 검량선법을 사용하였다.

4. 통계 분석

본 연구는 5개 지역에 대한 토양의 중금속분석을 실시하고 이를 배경농도로 활용한다. 또한 5개 지역에 대해 채집한 공벌레의 중금속 오염현황을 파악하고 이를 바탕으로 토양의 배경농도와 비교한다. 공벌레와 토양의 중금속 농도의 비교를 위해 토양농도와 공벌레 농도의 상관관계를 파악하는 2원 배치법을 사용한다. 본 실험에서 얻어진 결과의 통계학적 유의성 검정은 SPSS(ver. 12.0K) program을 이용하여 실시하였다. 토양 성질, 토양과 공벌레 체내 중금속 농도 관측치들의 정규성 검정을 실시하였으며 정규분포를 만족할 시 각 지역별 유의한 차이가 있는지 알기 위해 One-way ANOVA test를 시행하였다. 정규분포를 만족하지 않는다고 판단되어질 때는 Kruskal-Wallis ANOVA test를 시행하였다($P < 0.05$). 또 각 지역별 토양의 평균 중금속 총 함량과 공벌레 체내에 축적된 중금속 총 함량간의 단순 상호관계를 보기 위하여 산포도를 그리고 상관 분석을 실시하였다. 상관계수는 pearson의 계수를 사용하였다($P < 0.05$). 반복 실험의 결과는 평균±표준편차로 나타내었다.

Table 3. pH, moisture content (MC, %), organic matter (OM, %), cation exchange capacity (CEC, meq 100g⁻¹), and dehydrogenase (DHA, $\mu\text{g g}^{-1}$ dry soil 24h⁻¹) concentration in the soil samples.

Location	pH	MC	OM	CEC	DHA
Kwanak	6.7±0.03 *	12.0±0.9 *	9.7±0.3 **	4.23±0.09 *	386.0±13.05 *
Sihwa	7.6±0.03 *	16.7±1.2 *	7.1±0.2 **	2.79±0.18 *	204.5±15.37 *
Ewha	6.7±0.06 *	21.8±3.0 *	8.3±0.2 **	3.49±0.16 *	255.2±45.41 *
Sangam	7.7±0.03 *	24.1±0.5 *	6.2±0.1 **	2.70±0.05 *	337.2±17.87 *
Gulpo	7.0±0.01 *	15.9±1.7 *	6.8±0.2 **	3.35±0.32 *	23.2±6.59 *

Values are means ± standard deviation. * $P < 0.05$, ** $P < 0.01$, *** $P < 0.001$

III. 결 과

1. 토양의 물리화학적 성질

다섯 지역 토양의 물리화학적 성질은 Table 3과 같다. pH, 토양 함수량, 유기물함량, 양이온치환용량, 탈수소효소 활성도는 다섯 지역 간에 유의한 차이를 나타내었다($P < 0.05$). 토양의 함수량은 12.0%~24.1%이고 유기물함량은 6.2%~9.7%였다. 토양의 미생물 활성을 나타내는 탈수소효소 활성도는 관악이 보다 높게 나타났다. 토양효소 중 dehydrogenase는 미생물의 에너지생산과정인 호흡과 유기물의 초기 분해단계에 매우 중요한 효소이며, 살아있는 미생물에만 존재하므로 실질적인 미생물의 활력을 측정할 수 있으며 농약, 중금속 등에 매우 민감하므로 오랜 기간 독성물질을 평가하는데 이용되어 왔다(박, 1998). 토양의 CEC는 유기 및 무기 교질, 즉 점토와 부식질의 이온교환 부위로 구성된다. 일반적 토양에서 유기교질의 CEC는 200meq 정도이지만, 자연토양의 경우에는 여러 가지 점토광물의 혼합물로서 그 CEC는 대략 50meq 정도이다. 모래와 마사의 CEC는 미량이므로 일반적으로 무시한다. CEC의 값을 볼 때 다섯 지역의 토양 모두 5meq 이하로 점토와 부식물질의 함량이

매우 낮음을 알 수 있다.

2. 각 지역별 토양의 중금속 농도 비교

2006년 7월-9월 중순 관악, 시화, 이대, 상암, 굴포 5곳에서 채집한 토양에 대해 중금속 분석을 실시하였다. 오염물질의 농도분석은 모두 6개의 중금속을 대상으로 분석을 수행하였으며, Fe, Mg, Cu, Pb은 각 지역별로 유의한 차이를 나타내었다($P < 0.05$). 토양 중 다량 분포된 것으로 알려진 Fe와 Mg는 5곳에서 모두 높은 값을 보였다(Table 4). 중금속은 Zn > Pb > Cu 순으로 높게 축적되었다(상암 제외 Pb > Zn > Cu). Cd은 관악과 시화에서 높은 농도로 관찰되었으며, 이화, 상암, 굴포에서는 불검출 되었다. Pb는 전 지역에서 모두 검출되었으며 특히, 과거 매립지였던 상암은 Pb 오염 농도는 $385\mu\text{g/g}$ 로 다른 지역에 비해 월등히 높은 농도를 나타내었다($P < 0.05$). 이들 지역에 분포된 Pb의 농도가 토양에 반영되는 것으로 판단된다. 이런 높은 농도는 우리 나라 토양오염대책기준($300\mu\text{g/g}$)보다 높다.

Table 4. Average concentration of metals (mean \pm SD) in the soil samples.

Location	Fe	Mg	Cu	Zn	Pb	Cd
Kwanak	23345.3 \pm 5146.2*	5090.8 \pm 673.9*	14.2 \pm 4.3*	120.0 \pm 39.3	43.6 \pm 18.3*	1.43 \pm 0.78
Sihwa	27056.3 \pm 7899.5*	3329.3 \pm 8.6*	22.7 \pm 8.5*	228.0 \pm 2.7	49.3 \pm 8.5*	0.25 \pm 0.11
Ewha	12487.5 \pm 1555.3*	791.8 \pm 83.6*	13.7 \pm 3.0*	104.4 \pm 9.7	94.6 \pm 1.5*	n.d
Sangam	7459.4 \pm 234.4*	1504.5 \pm 58.2*	38.0 \pm 4.0*	142.3 \pm 7.4	385.4 \pm 70.1*	n.d
Gulpo	13094.3 \pm 954.2*	418.9 \pm 52.3*	37.7 \pm 0.8*	106.3 \pm 20.9	79.5 \pm 5.7*	n.d

Values are means \pm standard deviation in $\mu\text{g/g}$ dry weight. * $P < 0.05$

Table 5. Average concentration of heavy metals (mean \pm SD) in *Armadillium vulgare* samples.

Location	Fe	Mg	Cu	Zn	Pb	Cd
Kwanak	9614.5 \pm 3096.9*	4326.0 \pm 536.2*	592.2 \pm 140.7	256.9 \pm 44.6	11.6 \pm 5.1*	1.19 \pm 0.30
Sihwa	3462.7 \pm 1861.1*	1863.9 \pm 1175.5*	888.9 \pm 122.8	317.8 \pm 78.6	18.9 \pm 14.2*	0.43 \pm 0.33
Ewha	1573.2 \pm 20.0*	4807.5 \pm 119.9*	331.7 \pm 101.7	296.0 \pm 99.9	343.1 \pm 7.8*	n.d
Sangam	733.9 \pm 41.2*	3524.0 \pm 112.2*	160.7 \pm 30.4	219.0 \pm 21.0	1238.5 \pm 27.6*	n.d
Gulpo	683.8 \pm 30.2*	5041.3 \pm 128.9*	1049.9 \pm 221.3	254.2 \pm 5.6	983.9 \pm 34.6*	n.d

Values are means \pm standard error in $\mu\text{g/g}$ dry weight. * p-value < 0.05

3. 각 지역별 공벌레 체내 중금속 농도 비교와 상관 분석

2006년 7월 중순~9월 중순에 관악, 시화, 이대, 상암, 굴포 5곳에서 채집한 토양과 공벌레에 대해 중금속 분석을 실시하고 비교하였다(Table 5). 공벌레 체내 Fe, Mg, Pb 축적 농도는 각 지역별로 유의한 차이를 나타내었다($P < 0.05$). 공벌레에 축적된 중금속은 토양보다 대체로 높았으며 Zn은 1.39배에서 2.84배에 이르는 축적비를, Cu는 4.23배에서 최고 41.70배까지 높았다. Pb는 굴포가 12.38배로 가장 많은 축적을 보였으며 이대와 상암도 공벌레 체내 축적량이 토양 축적량보다 각각 3.63배와 3.21배였다. 토양과 공벌레 체내 중금속 상관 분석 결과 Fe, Zn, Pb가 양의 상관 관계를 나타내었다($P < 0.05$).

IV. 고 찰

공벌레는 토양 생태계의 중요한 macrofauna이며, 토양 부식질을 섭취하면서 토양의 독극물도 함께 축적한다(Hussein *et al.* 2006). 이러한 성질은 공벌레가 인위적으로 배출된 여러 화학 물질에 의한 토양 환경의 오염도와 위해성을 평가하는데 좋은 근거가 된다. 또한 유럽 등에서는 토양의 건강성은 나타내는 지표종으로 사용된다.

토양 중 Fe는 시화> 관악> 굴포> 이화> 상암, Mg는 관악> 시화> 상암> 이화> 굴포 순으로 많이 검출되었다. 토양중의 Fe 및 Mg는 대부분 높은 농도로 관찰되는 게 일반적이므로 이들 지역의 토양 농도와 관련하여 심각성을 언급하는 것은 곤란하다. 그러나 관악은 우리나라의 대표적인 화강암지역임에도 Fe 농도가 높게 나타났는데, 이는 지각에서 기인한 것 외에도 관악산이 서울 한복판에 위치하고 있어 Fe이 분진과 함께 토양 표층으로 이동하기 때문으로 보인다(정구복, 2000). 시화는 안산 반월 공단의 공업단지에 의한 하천수와 대기오염물질 유입이 진행된 곳이다. Mg의 농도가 높은 것은 반월 공단에 Mg를 비롯한 비철금속 합금 공장들이 산재한 것에서 기인한 것으로 해석된다.

중금속에 의한 자연 토양 오염도를 조사한 결과 Cu는 상암> 굴포> 시화> 관악> 이화, Zn은 시화> 상암> 관악> 굴포> 이화, Pb는 상암> 이화> 굴포> 시화> 관악, Cd은 관악> 시화 순으로 높게 검출되었다. 상암, 굴포, 이화는 Cd이 불검출 되었다. 관악지역에서 Cd이 검출된 것은 관악산 대부분이 화강암 지질인 것에 기인한 것으로 보인다. Cd은 토양 물질 중 화강암에 0.001~1.6ppm 존재하는 것으로 알려져 있다(정구복, 2000). 상암은 Cd을 제외한 다른 세 중금속에서 모두 높은 수치를 기록했으며 특히 Pb 농도가 높게 나타났다(Table 3). 이는 과거 이 지역이 서울시 및 주변지역의 쓰레기 매립장으로 활용되었으며, 지정된 매립장에 쓰레기를 매립한 것 이외에도 주변지역에 불법쓰레기를 매립하여 전체적으로 중금속의 농도가 높게 나온 것으로 보인다. 이러한 연구는 다른 연구사례와도 동일한 것으로 특히 중금속이 중요하게 관리되어야 하는 Pb 농도가 높게 나온것은 이러한 사례를 반영하는 것이라 할 수 있다(김인성 외, 2001).

이화의 Pb 농도가 높게 나타난 것은 교내 차량의 빈번한 이동으로 차량 통행로의 아스팔트와 주변 콘크리트 입자가 토양 표층에 축적된 것에 기인하며, 특히 납의 농도가 본 연구에서 상관관계가 높은 것으로 조사된 바 공벌레의 납축적에 대한 생물학적 농축이 중요한 고려사항으로 나타났다(Fig 1).

공벌레 체내에 축적된 Fe는 관악에서, Mg와 Cu는 굴포지역에서, Zn은 시화에서, Pb는 상암에서 높게 나타났다. 다른 중금속인 Cd은 관악에서 높게 검출되었다. 상암, 굴포, 이화는 Cd이 불검출 되었다. 공벌레와 토양의 축적비는 Fe와 Cu는 관악에서 Mg, Pb는 굴포에서, Zn은 이화에서 높게 나타났으며, Cd은 시화가 높았다. 상암과 굴포의 Pb, Cu의 공벌레 체내 축적 정도가 높게 나타난 것은 폐기물에서 용출된 Cu와 Pb가 많은 매립지 토양의 영향을 받기 때문인 것으로 사료된다. 또한 Cu는 토양 중 농도에 비해 공벌레 체내 축적 정도가 가장 높게 나타났는데 이는 Cu가 공벌레 체내 산소운반 단백질인 haemocyanin를 이루는 중요 물질이므로

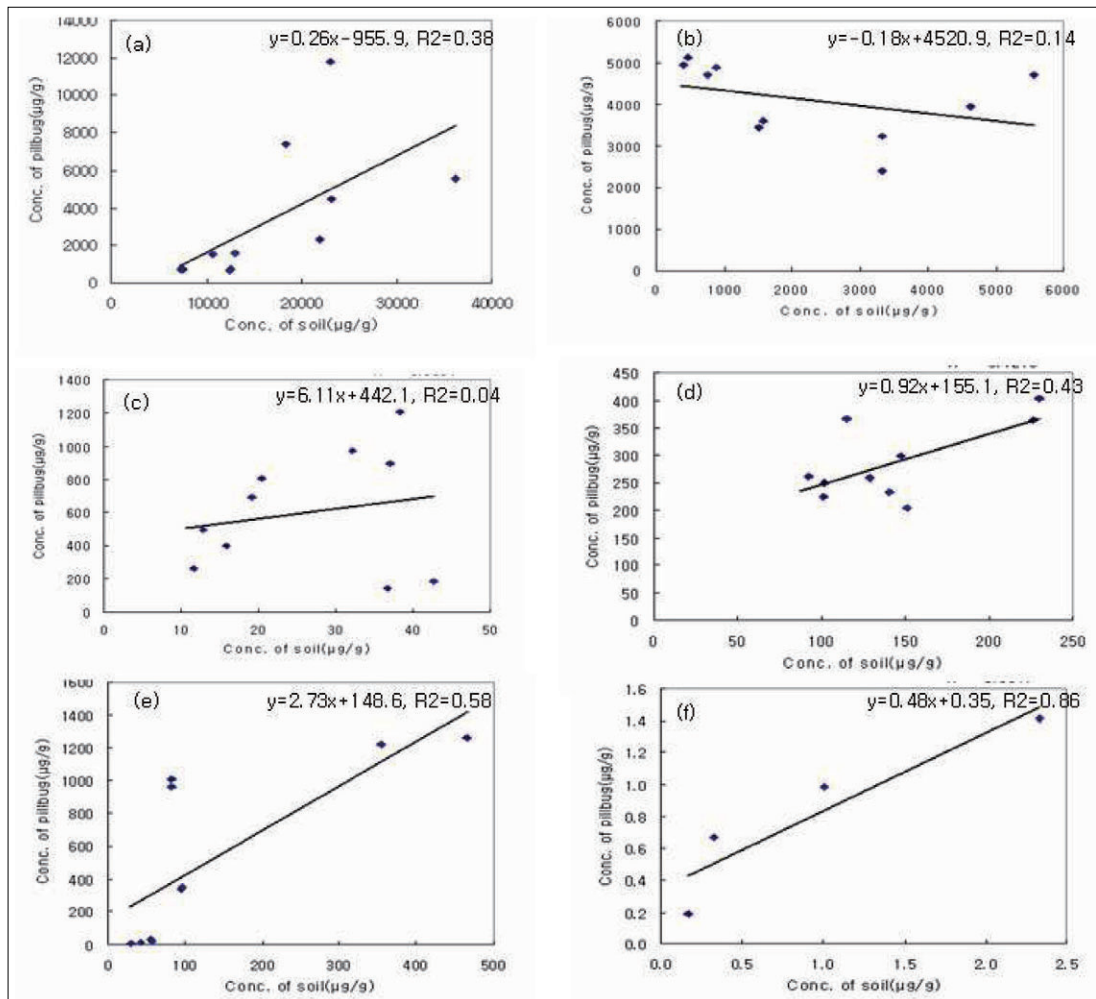


Fig 1. Correlation of (a) Fe, (b) Mg, (c) Cu, (d) Zn, (e) Pb, (f) Cd in the concentration of soil and *Armadillium vulgare*.

(Zidar *et al.*, 2004), Cu를 섭취 후 축적하는 것으로 보인다. Cu와 Cd은 공벌레의 표면 세포에 축적되지 않고 내장에 축적되므로(Raessler *et al.*, 2005), 보다 많은 지역의 연구가 진행된다면 공벌레를 통한 Cu와 Cd 모니터링이 더욱 정확하게 이루어질 수 있을 것으로 보인다. 또한 토양과 공벌레 체내의 농도 상관 분석에서 Pb가 양의 상관관계를 보였으며 상관계수도 높게 나타났다($P < 0.05$). AAS를 이용한 실험은 Cu와 Zn의 간섭 현상 때문에 ICP를 이용한 실험보다 정확도가 다소 떨어질 수 있다. 이 점은 본 연구에서 보완해야 할 점이라 하겠다.

사사

본 연구는 서울지역환경기술개발센터(2011), KRF(2009-1449-1-6)의 지원으로 수행되었습니다.

참고문헌

- 김인성, 조용주, 최홍근, 이은주. (2004) 갈대-상(床)을 이용한 쓰레기 매립지 침출수의 생물학적 연속흐름 처리. 한국생태학회지, 27(6): 375-381.
- 여환주, 이상필, 백난영, 이재근. (2005) 난지도 쓰

- 레기 매립지 비탈면 생태복원 특성에 관한 연구 -자연표토복원공법과 원지반식생정착 공법 시공지역을 중심으로-. 한국환경보원 녹화기술학회지. 8(3): 1-12.
- 이종현, 이정석, 김범수, 이창복, 고철환. (1998) 경 기만 퇴적물의 중금속 분포 특성. 한국해양 학회지. 3(3): 103-111.
- 정구복. (2000) 화강암 유래 토양의 중금속 자연함 량 평가. 농업과학기술원 보고서.
- 조재범, 현재혁. (2001) 토양 중 중금속 거동에 대한 휴믹산과 인산염의 영향. 한국폐기물학회 지. 18, 526-531.
- 현상민, 천중화, 이희일. (1999) 시화호의 퇴적환경 과 중금속오염. 한국해양학회지. 4(3): 198-207.
- Alloway, B. J. (1995) Heavy metals in Soils. Blackie Academic and Professional, London. 354.
- Crommentuijn, T., Doodeman, C. J. A. M., Doornekamp, A., Vanderpol, J. J. C., Bedaux, J. J. M., and Vangestel, C. A. M. (1994) Lethal body concentrations and accumulation patterns determine time-dependent toxicity of cadmium in soil arthropods. Environ. Toxicol. Chem. 13: 1781-1789.
- Drobne, D., and Hopkin, S. P. (1995) The toxicity of zinc of terrestrial isopods in a standard laboratory test. Ecotoxicol. Environ. Saf. 31: 1-6.
- Grelle, C., Fabre, M.-C., Lepretre, A., and Descamps, M. (2000) Myriapod and isopod communities in soil contaminated by heavy metals in northern France. Eur. J. Soil Sci. 51: 425-433.
- Hattenschwiler, S. and D. Bretscher. 2001. Isopod effects on decomposition of litter produced under elevated CO₂, N deposition and different soil types. Global Change Biology. 7: 565-579.
- Hopkin, S. P., and Hames, C. A. C. (1994) Zinc, among a cocktail of metal pollutants, is responsible for the absence of the terrestrial isopod *Porcellio scaber* from the vicinity of a primary smelting works. Ecotoxicology. 3: 68-78.
- Hussein, M. A., Obuid-Allah, A. H., Mohammad, A. H., Scott-Fordsmand, J., and Abd El-Wakeil, K.F. (2006) Seasonal variation in heavy metal accumulation in subtropical population of the terrestrial isopod, *Porcellio laevis*. Ecotoxicology and Environmental Safety. 63: 168-174.
- Joose, E. N. G., Wulffraat, K. J., and Glas, H. P. (1981) Tolerance and acclimation to zinc of the isopod *Porcellio scaber* Latr. In Proceedings of International Conference of Heavy Metals in the Environment. 425-428. CEP Consultants Ltd, Edinburgh.
- Knigge, T., and Kohler, H. R. (2000) Lead impact on nutrition, energy reserves, respiration and stress protein (hsp 70) level in *Porcellio scaber* (Isopoda) populations differently preconditioned in their habitats. Environ. Pollut. 108: 209-217.
- Lasat, M. M. (2000) Phytoextraction of metals from contaminated soil : a review of plant/soil/metal interaction and assessment of peritinent agronomic issues. Journal of Hazardous Substance Research 2(5) : 1-25.
- Mohan, J.E., Ziska, L.H., Schlesinger, W.H., Thomas, R.B., Sicher, R.C., George, K.

- and Clark, J.S. (2006) Biomass and toxicity responses of poison ivy (*Toxicodendron radicans*) to elevated atmospheric CO₂. Proceedings of the National Academy of Sciences, USA 103, 9086-9089.
- Paoletti, M. G., and Hassall, M. (1999) Woodlice (Isopoda: Oniscidea): Their potential for assessing sustainability and use as bioindicators. *Agricult. Ecosyst. Environ.* 74, 157-165.
- Peter R. and W. R. Sauder (2006) Effects of heavy metal contaminated soil on growth, phenology and biomass turnover of *Hieracium piloselloides*. *Environmental Pollution*. 140, 52-61.
- Rabitsch, W. B. (1995) Metal accumulation in arthropods near a lead/zinc smelter in Arnoldstein, Austria, I. *Environ. Pollut.* 90: 221-237.
- Raessler M., Rothe J., and Hilke I. (2005) Accurate determination of Cd, Cr, Cu and Ni in woodlice and their skins-is moulting a means of detoxification?. *Science of the Total Environment* 337: 83-90.
- Romero-Puertas M. C., Palma J. M., Gomez M., Del Rio, L. A and Sandalio L. M. (2002) Cadmium causes the oxidative modification of proteins in pea plants. *Plant, Cell and Environment*. 25: 677-686.
- Saikkonen, K., Koivunen, S., Vuorisalo, T and Mutikainen, P. (1998) Interactive effects of reproductive manipulation and growth-limiting heavy-metal pollution on resource allocation in *Potentilla anserina*. *L. Ecology*. 79: 1620-1629.
- Singh, G. and Madhulika B. (2003) Mineral toxicity and physiological functions in tree seedlings irrigated with effluents of varying chemistry in sandy soil of dry region. *Journal of Environmental Science and Health, Part C*. 21: 45-63.
- Witzel, B. (1998) Uptake, storage and loss of cadmium and lead in the woodlouse *Porcellio scaber* (Crustacea, Isopoda). *Water, Air Soil Pollut.* 108: 51-68.
- Zidar. P., D. Drobne, J. Štrus, C.A.M. Van Gestel and M. Donker. (2004) Food selection as a means of Cu intake reduction in the terrestrial isopod *Porcellio scaber*(Crustacea, Isopoda). *Applied Soil Ecology*. 25: 257-265.