JOURNAL OF THE KOREAN SOCIETY OF AGRICULTURAL ENGINEERS, JAN. 2006, pp. 3-10

한국농공학회논문집
제48권 제1호

우리나라 서남해안 간척지 및 간석지 토양의 화학적 특성 (Ⅰ)
- 중금속 오염물질의 형태별 함량 분포 -

Chemical Properties in the Soils of Reclaimed and Natural Tidelands of Southwest Coastal Area of Korea (Ⅰ)
- Distribution of Heavy Metal Fractions -

조 재 영* · 구 자 웅** · 손 재 권**

Cho, Jae Young · Koo, Ja Woong · Son, Jae Gwon

Abstract

The chemical fractions of heavy metals were investigated in the soils of reclaimed and natural tidelands of southwest coastal area of Korea. The distribution pattern of each heavy metal in different fractions was in the order: 1) Cu : organic bound > organic complex > residual > exchangeable = water soluble. 2) Cr : residual > organic bound > organic complex > water soluble > exchangeable. 3) Pb : organic bound > residual > organic complex > water soluble > exchangeable. 4) Cd : residual > organic bound > organic complex > water soluble = exchangeable. 5) Zn : organic bound > residual > organic complex > water soluble > exchangeable. The content of residual Zn showed positive correlation with organic matter content but organic bound Zn showed negative correlation with CEC. The content of residual and exchangeable Cd showed highly positive correlation with organic matter content but residual, organic bound, and exchangeable Cd showed negative correlations with CEC. Water soluble Pb showed positive correlation with CEC but organic bound Pb showed negative correlation with CEC.

Keywords : Heavy metals, Reclaimed tidelands, Fraction, Soil pollution

Ⅰ. 서 론

우리나라의 간척자원은 서남해안의 402,000 ha 정도로서 간척개발 가능면적 중 1993년까지 약 60,000 ha을 개발 완료하였고, 2004년 현재 새만금 간척지 약 40,000 ha를 비롯하여 약 68,000 ha 정도가 개발 중에 있으며 앞으로도 개발 가능한 274,000 ha 정도의 대상면적이 서남해안에 걸쳐

* 전북대학교 농업생명과학대학 농업과학기술연구소
** 전북대학교 농업생명과학대학 생물자원시스템공학부
* Corresponding author. Tel.: +82-63-270-2547
Fax: +82-63-270-2550
E-mail address: soilcosmos@chonbuk.ac.kr

광범위하게 분포되어 있다. 이와 같이 개발된 간척지는 농지의 외연적 확대로 쌀의 자급율을 높이고 산업화, 도시화로 인한 급증하는 토지수요를 충족시키는데 많은 기여를 하고 있다 (Koo *et al.*, 1998).

개발된 간척지가 농지로 활용될 경우 가장 우선되어야 할 선결조건 중의 하나가 간척 농지에서 재배되는 작물의 안정성 확보라 할 수 있다. 이를 위해서는 간척 농지 중에 존재하는 유해성분들에 대한 체계적인 모니터링이 수행되어야 한다. 여러 가지 유해성분 가운데 특히 중금속 오염물질은 토양 내에서 이동성이 낮고, 토양 내에서 불용성 상태로 존재하고 있다. 토양 중 중금속 오염물질의 용해성 및 식물에 흡수되는 특성은 토양조건에 따라 변이가 매우 큰 것으로 알려져 있다. 또 오염된 농지에 중금속이 축적되어 일어날 수 있는 해로운 영향은 식물이 흡수하는 중금속의 화학적 형태와 관련이 있는 것으로 보고되어 있다.

McLaren와 Crawford (1973)는 Cu를 토양용액의 것과 치환 가능한 형태로 존재하는 것, 특정위치에 약하게 결합된 것, 유기물에 결합된 것, 산화물로 둘러싸인 것 및 격자내에 잔류하는 것으로 구분하여 분별 분석하였으며, Miller와 McFee (1983)는 토양 중금속을 수용태, 치환태, 유기물과 결합된 형태 등 8가지로 분별 분석하였다.

지금까지 국내에서 이루어진 농지 토양에 대한 중금속의 환경영향평가는 주로 총량적인 개념과 혼용하여 가용성 중금속의 모니터링에 치우쳐 왔다. 수행된 연구의 상당부분이 폐광산 주변 식물에 중금속 흡수이행량 등 단순조사에 치우친 경향으로 (Cho *et al.*, 2000; Kim *et al.*, 1991; Lim and Kim, 1983), 토양 중 중금속의 형태별 분포양상을 조사하여 식물과의 흡수관계를 명확히 구명해야 할 필요성이 제기되고 있다. 이와 같은 환경생태학적인 필요성에도 불구하고 새로이 조성되는 간척지나 간석지를 대상으로 존재하는 중금속 오염물질의 형태별 함량분포 및 성상에 대한 연구는 거의 이루어지지 않은 상태이다.

본 연구는 우리나라 서남해안 간척지 및 간석지 토양에 분포하는 중금속 오염물질의 화학적 특성을

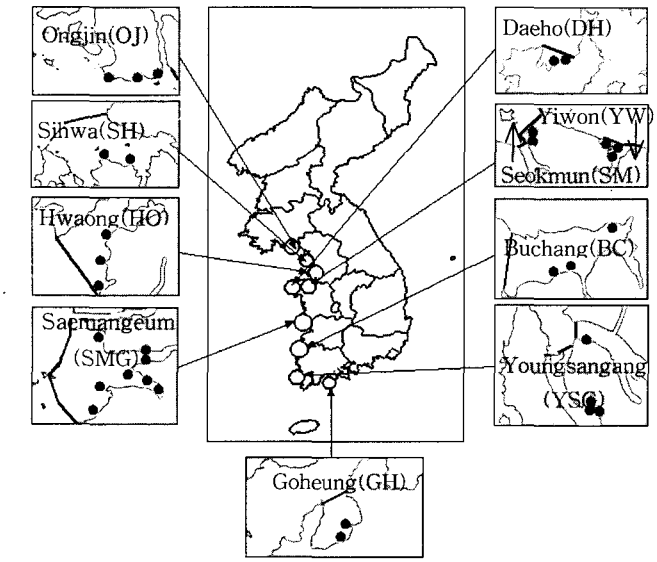


Fig. 1 Map showing sampling sites in the soils of reclaimed and natural tidelands of southwest seacoast of Korea. The thick solid line is sea dike

구명하여 간척농지에서 생산되는 농산물의 안정성을 확보하기 위한 연구의 일부로서 서남해안 4개 지역 중 총 10개 지구를 대상으로 102점의 토양시료를 채취하여 간척지 및 간석지 토양에 존재하는 중금속 오염물질의 화학적 형태별 함량을 비교하였다.

Ⅱ. 재료 및 방법

우리나라 서남해안 간척지 및 간석지 토양에 분포하는 중금속 오염물질의 화학적 형태별 함량을 조사하기 위하여 서남해안 4개 지역에 걸쳐 대표성이 있다고 판단되는 10개 지구에서 총 102점의 토양시료를 채취하였다.

시료채취는 1997년 1월부터 3월 사이에 이루어졌으며, 표토층 (0~20 cm) 토양을 4 kg씩 채취하였으며, 채취한 시료는 폴리에틸렌 비닐팩에 밀봉하여 냉동보관한 후 화학분석에 이용하였다. 상기 지점에서 채취한 토양시료 가운데 간척지 토양은 시화지구 (SH, 9지점, 1994년 방조제 체절), 대호지구 (DH, 6지점, 1996년 방조제 체절), 석문지구 (SM, 9지점, 1995년 방조제 체절), 고흥지구 (GH, 9지점, 1998년 방조제 체절), 영산강 3-1지구(YSG, 12지점, 영암 · 금호방조제, 1993년 방조제 체절)이고 간석지 토양은 옹진지구 (OJ, 9지점), 화옹지구 (HO, 9지점), 새만금지구 (SMG, 24지점), 부창지구 (BC, 9지점) 및 이원지구 (IW, 6지점)이다. 토양채취 지점별 오염원 현황에 대해서는 Table 1에 나타나 있다. 본 연구에 사용된 간척지 및 간석지 토양의 물리 · 화학적 특성은 Koo *et al.* (1998)에 자세히 제시되어 있다.

토양시료는 실온에서 풍건 후 20 mesh 체에 통과시킨 다음 Methods of Soil Analysis (Page *et al.*, 1982)에 기준하여 분석하였다. 토양 pH는 토양과 증류수를 1:5의 비율로 현탁액을 만들어 2시

Table 1 Soil samples used for heavy metals in the soils of reclaimed and natural tidelands of southwest seacoast of Korea

Classification	Location	Site characteristics
Urbanization and industrial complex area	DH	steel manufacturing thermo-electric power station
	OJ	industrial wastewater treatment
	SH	industrial wastewater treatment municipal sewage treatment, planting manufacturing Banwol-Sihwa industrial complex
	SMG	industrial chemical distribution wood product manufacturing, automobile manufacturing Kunsan-Changhang industrial complex,
Un-urbanization and agriculture area	HO	industrial chemical distribution
	YSG	wood product manufacturing, steel manufacturing
	SM	agriculture and aquatic-products industry
	YW	agriculture and aquatic-products industry
	GH	agriculture and aquatic-products industry
	BC	agriculture and aquatic-products industry

간 왕복진탕 시킨 후 pH-meter (TOA HM 20-S)를 사용하여 측정하였으며, 유기물 함량은 Walkley-black법, 양이온치환용량은 1N-NH_4OAc (pH: 7.0)을 이용한 침출법, 토성은 USDA 삼각분류법을 기준으로 하였다. 토양 중 총 중금속 (total heavy metal)의 함량은 시료 5 g을 정확히 칭량한 다음 250 mL 킬달플라스크에 넣고 진한 질산 30 mL를 가하여, 가열판 위에서 100~120℃로 약 6시간 가열하였다. 가열이 끝난 시료를 방냉한 후 진한 황산 5 mL를 가하여 분해액이 거의 백색이 될 때까지 다시 분해 여과시킨 후 유도결합 플라즈마 발광광도계 (Varian liberty 110)로 측정하였다. 토양 중 중금속의 화학적 형태별 함량분석은 McLaren과 Crawford (1973)의 방법을 이용하였다. 풍건토양 5 g을 취하여 각각의 침출액으로 침출한 후 원심분리하여 상등액 중 Cd, Zn, Cu, Pb, 및 Cr의 농도를 측정하였다. 증류수 침출성 중금속을 수용태, 점토광물, 유기물질 및 비정형 물질의 표면에 흡착되어 있는 교환가능한 중금속을 1.0M KCl을 이용하여 추출한 치환태, 복합체 형성, 흡착, 킬레이트화에 의해 유기물에 결합되어 있는 중금속을 0.1 M $Na_4P_2O_7$을 이용하여 추출한 유기태, 탄산염으로 침전 또는 공침전 되어 있거나, 토양의 확산이중층 내부에 흡착되어 있는 중금속은 산화환경에서 불안정하게 되므로 0.1 M NaOH를 이용하여 추출한 sulfide태, 규산염 광물이나 기타 풍화에 강한 광물들의 격자 속에 존재하는 중금속을 진한 HNO_3로 완전 분해하여 추출한 것을 residual 태로 구분하여 유도결합 플라즈마 발광광도계로 측정하였다.

Ⅲ. 결과 및 고찰

1. 토양 중 중금속 오염물질의 함량분포

우리나라 서남해안 간척지 및 간석지 토양 중 중금속 오염물질의 시료채취 지점별 전체 함량을 평균값으로 Fig. 2에 나타내었다.

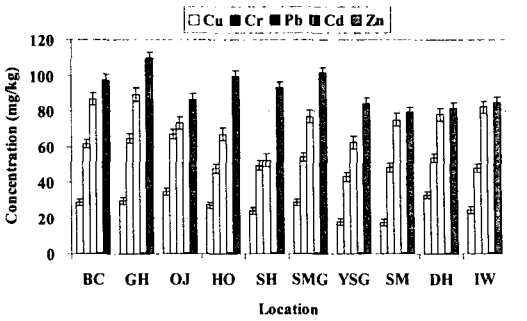


Fig. 2 Total content of Cu, Cr, Pb, Cd, and Zn in the soils of reclaimed and natural tidelands of southwest seacoast of Korea

간척지 및 간석지 토양 중 조사대상 중금속 오염물질의 전체 양은 Cu의 경우 7.7 ~54.1 mg/kg의 범위로 평균 26.5 mg/kg, Cr은 27.9~80.8 mg/kg의 범위로 평균 53.7 mg/kg, Pb은 45.8~133.7 mg/kg의 범위로 평균 74.0 mg/kg, Cd은 0.1~1.4 mg/kg의 범위로 평균 0.5 mg/kg, 그리고 Zn은 40.7~174.4 mg/kg의 범위로 평균 93.4 mg/kg을 나타내었다. Kim *et al.* (1995)이 우리나라 논토양 1,196점을 대상으로 0.1N-HCl 가용성 중금속의 함량을 조사한 결과 평균함량은 Cd 0.133 mg/kg, Cu 4.52 mg/kg, Pb 4.62 mg/kg, Zn 3.90 mg/kg, Cr 0.36 mg/kg, Ni 1.38 mg/kg으로 나타났다. 본 조사에서는 0.1N-HCl 가용성 중금속의 함량이 아닌 토양 중에 존재하는 전체 중금속의 함량을 측정한 결과이기에 이들 조사결과보다는 높게 나타나고 있다.

현재 우리나라에서는 토양환경기준을 토양오염 대책기준과 토양오염 우려기준으로 설정하여 관리하고 있다. 토양오염 대책기준은 '오염의 정도가 사람의 건강과 동·식물의 생육에 지장을 초래할 우려가 있어 토지의 이용 중지, 시설의 설치 금지 등 규제 조치가 필요한 정도의 오염 기준'이고 이 기준을 초과하면 토양보전대책지역으로 지정할 수 있다. 또한 토양오염 우려기준은 '더 이상 오염이 심화되는 것을 예방하기 위한 오염 수준 (대책기준의

약 40%) 이다.' 이 기준을 초과하면 오염물질의 제거, 방지시설의 설치, 오염물질의 사용 제한 등 시정 명령이 내려진다. 농지에서 토양오염 우려기준은 Cd 1.5 mg/kg, Cu 50 mg/kg, As 6 mg/kg, Hg 4 mg/kg, Pb 100 mg/kg, Cr^{+6} 4 mg/kg으로 지정하고 있다. 실제적으로 환경부의 2001년 토양측정망 운영결과를 보면, 우리나라 토양중 평균 중금속 농도는 Cd 0.147 mg/kg, Cu 5.3 mg/kg, As 0.256 mg/kg, Hg 0.071 mg/kg, Pb 6.503 mg/kg, Cr^{+6} 0.028 mg/kg으로 조사되었다.

농지에서 토양오염 우려기준과 비교시 본 조사에서 나타난 중금속 오염물질의 농도는 Cu의 경우 옹진지구의 1개 지점에서 50 mg/kg을 초과한 54.1 mg/kg이 검출되었고, Pb의 경우는 부창, 고흥, 옹진, 화옹, 석문, 이원지구에서 각각 100 mg/kg을 초과한 지점이 간헐적으로 나타났다. Cr의 경우에는 본 조사에서는 Cr을 분석하였기에 환경부에서 관리하고 있는 Cr^{+6}과의 직접 비교는 어려울 것으로 판단된다. 지역별로는 고흥지구, 부창지구에서 전체 중금속 오염물질의 함량이 높게 나타난 반면, 영산강지구, 석문지구, 그리고 시화지구에서 낮게 나타났다. 아울러 공업활동이 활발히 이루어지는 지역과 전형적인 농업지역간에 중금속 원소의 농도가 유의성 있는 차이를 나타내지 않았다.

상기에서 논의한 바와 같이 일부 지점에서 환경부의 농경지 토양오염 우려기준을 초과한 경우도 있었지만, 평균값을 기준으로 할 경우 그다지 우려할 수준은 아니었으나, 간척농경지에서 생산되는 작물의 안전성과 건전한 토양환경을 유지하기 위해서는 추후 지속적인 모니터링과 관리가 필요할 것으로 판단된다.

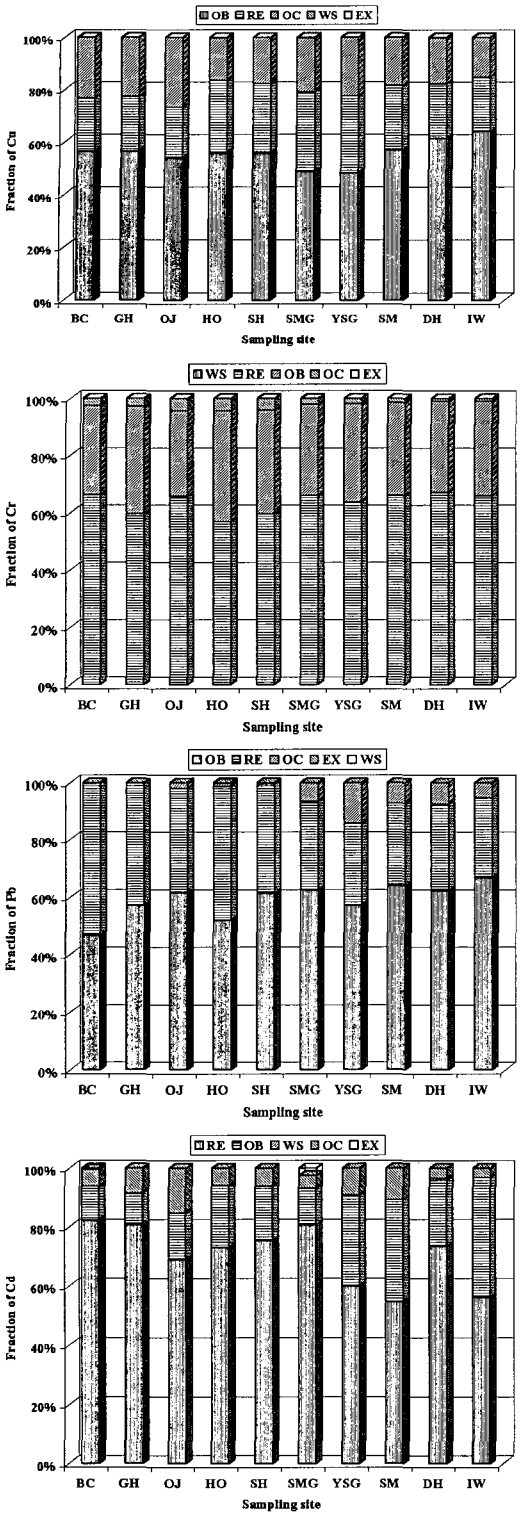
2. 토양 중 중금속 오염물질의 화학적 형태별 함량 비교

우리나라 서남해안 간척지 및 간석지 토양 중 중금속 오염물질의 화학적 형태별 함량을 백분율로 비교한 결과는 Fig. 3에 나타나 있다. Cu의 화학적 형태별 함량은 0.1M NaOH-extracted > 0.1M $Na_2P_2O_7$-extracted > residual > 1M KCl-extracted = water soluble fraction의 순이었고, Cr의 경우 residual > 0.1M NaOH-extracted > 0.1M $Na_2P_2O_7$-extracted > water soluble > 1M KCl-extracted의 순이었고, Pb의 경우 0.1M NaOH-extracted > residual > 0.1M $Na_2P_2O_7$-extracted > water soluble > 1M KCl- extracted의 순이었고, Cd의 경우 residual > 0.1M NaOH-extracted > 0.1 M $Na_2P_2O_7$-extracted > water soluble = 1M KCl-extracted의 순이었고, Zn의 경우 0.1M NaOH-extracted > residual > 0.1M $Na_2P_2O_7$-extracted > water soluble > 1M KCl-extracted의 순서로 나타났다.

Yoo *et al.* (1996)이 가학 광산 인근 저니토양중에 분포하는 중금속 (카드늄, 구리, 납, 아연)의 형태별 함량을 조사한 결과, 수용태는 아연 그리고 치환태는 납만이 미량으로 검출되었고, 전체적으로 황화물 잔류태의 비율이 높았으며, 카드늄과 납은 유기물 결합태가 다른 중금속과 달리 많은 비중을 차지하였다고 보고한 바 있다.

중금속 오염물질의 분획별 함량분포를 조사한 결과, 각각의 중금속 원소별로 간척지 및 간석지 토양 내에서 분포하는 형태가 다르게 나타났다. Water soluble과 치환태 (1M KCl-extracted) 중금속 형태는 조사대상 중금속 오염물질에서 미량 검출되었고 거의 대부분이 잔류태 (residual) 및 유기물과 결합된 형태 (organic complex, organic bound)로 나타났다. 아울러 지역별로 간척지 및 간석지가 위치한 지리적인 특성으로 인하여 같은 중금속일지라도 일부 유기물 복합체 (organic complex) 형태의 중금속과 유기물에 결합된 형태 (organic bound)의 중금속의 분포 경향이 다르게 나타나고 있었다 (Table 2).

일반적으로 유기물질 및 비정형 물질의 표면에 흡착되어 있어 교환가능한 중금속의 분획인 치환



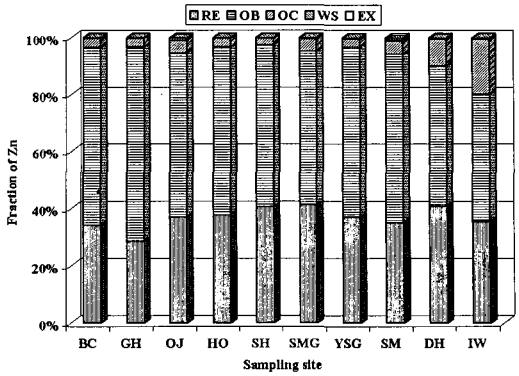


Fig. 3 Fractions of Cu, Cr, Pb, Cd, and Zn in the soils of reclaimed and natural tidelands of southwest seacoast of Korea. (RE, residual; OB, 0.1M NaOH- extracted; OC, 0.1M $Na_2P_2O_7$-extracted; EX, 1M KCl-extracted; WS, water-soluble fraction)

Table 2 Distribution of heavy metal fractions in the soils of reclaimed and natural tidelands of southwest seacoast of Korea *(unit: mg/kg)*

Element		WS	OC	OB	RE	EX
Cu	Mean	0.018	4.96	13.07	5.99	ND
	SD	0.003	0.23	0.44	0.23	
	Min	0	0.45	4.39	0.98	
	Max	0.140	17.48	27.21	12.22	
Cr	Mean	0.048	1.26	16.17	30.92	ND
	SD	0.003	0.07	0.34	0.87	
	Min	0	0.09	10.02	10.86	
	Max	0.131	3.09	26.54	52.12	
Pb	Mean	0.025	3.36	40.04	24.28	ND
	SD	0.008	0.32	1.21	1.14	
	Min	0	0.04	10.67	7.39	
	Max	0.562	16.93	72.04	79.89	
Cd	Mean	Tr	0.03	0.08	0.32	0.003
	SD		0.003	0.007	0.02	0.001
	Min		0.005	0	0.035	0
	Max		0.25	0.39	1.035	0.045
Zn	Mean	0.222	4.05	49.45	32.18	0.103
	SD	0.031	0.36	1.64	0.97	0.021
	Min	0.021	0.67	17.69	9.89	0
	Max	2.402	21.20	92.34	62.34	1.182

1) RE, residual; OB, 0.1M NaOH- extracted; OC, 0.1M $Na_2P_2O_7$-extracted; EX, 1M KCl-extracted; WS, water-soluble fraction
2) Tr: trace, ND: not detected

태, 증류수 침출성 중금속 분획인 수용태, 그리고 유기물과의 복합체 형성, 흡착, 킬레이트화에 의해 유기물에 결합되어 있는 중금속 분획인 유기물 결합태 등의 일부만이 식물체로 흡수이행되어 식물독성을 나타낼 수 있는 것으로 알려져 있다. 그러나 유기물 결합 형태의 중금속 분획을 포함한 다른 형태의 중금속 분획도 토양내부의 산화환원조건의 변화, pH의 변화에 의해 일부 다른 형태로 전이되어 식물생육이나 토양환경에 영향을 끼칠 수 있는 것으로 널리 알려져 있다.

앞에서 논의한 바와 같이 본 조사결과 치환태와 수용태의 검출농도가 극미량이었기 때문에 이들 형태의 중금속으로 인한 식물독성의 우려는 그다지 크지 않을 것으로 판단되지만 유기물 결합형태의 중금속 분획이 토양환경의 변화에 따라 일부 치환태로 전이될 경우 토양 중 중금속 농도가 증가할 가능성도 전혀 배제할 수 없는 바 지속적으로 관심을 가지고 모니터링을 수행하여야 할 것으로 판단된다.

3. 토양특성과 중금속의 화학적 형태별 함량과의 관계

조사대상 중금속 오염물질의 화학적 형태별 함량과 토양특성 (pH, CEC, OM)과의 관계를 조사한 결과가 Table 3에 나타나 있다. 잔류태 Zn과 유기물 함량간에는 유의성있는 정(正)의 상관을 유기태 Zn과 양이온교환용량 간에는 부(負)의 상관을 보였다. 잔류태 Cd와 치환태 Cd은 유기물함량과 고도의 유의성 있는 정의 상관을 보였으나 잔류태, 유기태, 치환태 Cd은 양이온교환용량과 부의 상관을 나타내고 있었다. 수용태 Pb은 양이온교환용량과 정의 상관을 보인 반면, 유기태와 유기복합태 Pb은 양이온교환용량과 부의 상관을 나타내었다. 유기태 크롬은 유기물 함량, 양이온교환용량과 유의성 있는 정의 상관을 나타내었다. 수용태, 유기복합태, 잔류태 Cu의 경우는 유기물 함량과 유의성 있는 정의 상관을 나타내었다. 전반적으로 간척지 토양 중에 존재하는 중금속의 화학적 형태별 함량은 각각의 개별원소의 화학적인 특성에 따라 토양내에서 반응하는 정도가 다르게 나타나고 있으며,

Table 3 Correlation coefficients for relationships between heavy metal fractions and soil properties.

Soil properties	Zn					Cd				
	WS	OB	OC	RE	EX	WS	OB	OC	RE	EX
pH	0.08	0.12	0.05	-0.02	-	-0.16	-0.10	0.15	-0.07	-
O.M.	0.06	0.14	-0.08	0.22*	-0.11	-0.06	0.02	0.04	0.30**	0.26**
CEC	0.05	-0.22*	0.09	-0.18	0.01	0.07	0.21*	0.02	-0.24*	-0.39**
					Pb					Cr
pH	-0.05	-0.09	0.01	0.17	-	-0.08	0.01	0.09	-0.04	-
O.M.	0.09	-0.12	0.05	-0.11	-	0.18	0.27**	0.02	0.08	-
CEC	0.23*	-0.22*	-0.39**	-0.04	-	0.02	0.20*	0.08	-0.10	-
					Cu					
pH	-0.13	-0.15	-0.11	-0.17	-					
O.M.	0.24*	0.09	0.20*	0.19*	-					
CEC	-0.05	-0.17	-0.17	-0.07	-					

*, ** : Significant at the 0.05 and 0.01 levels, respectively.

본 조사대상 중금속 오염물질의 경우 토양 pH에 의한 영향보다는 토양유기물과 양이온교환용량에 많은 영향을 받고 있는 것으로 조사되었다.

Ⅳ. 요약 및 결론

우리나라 서남해안 간척지 및 간석지 토양 중에 분포하는 중금속 오염물질의 화학적 형태별 함량을 조사한 결과는 다음과 같다.

1. 우리나라 서남해안 간척지 및 간석지 토양 중 중금속 오염물질의 함량은 일부 조사지점에서 환경부의 농경지 토양오염 우려기준을 초과하는 경우도 있었지만 평균농도는 토양오염 우려기준 보다 낮은 상태로 나타났다.

2. 우리나라 서남해안 간척지 및 간석지 토양 중 중금속 오염물질의 화학적 형태별 분포를 조사한 결과, 수용성과 치환태 중금속의 형태는 미량 검출되었고 거의 대부분이 잔류태 및 유기물과 결합된 형태로 나타났다.

3. 간척지 및 간석지 토양층의 교란 및 산화-환원조건의 변화 또는 유기물의 분해가 가속화 될 경우 유기물과 결합된 형태의 중금속 오염물질은 토양으로부터 용출되어 생물농축에 의한 생태계 파괴 문제가 제기될 수도 있기에 지속적인 환경오염물질 모니터링과 토양환경 변화와의 상호관계에 대해 관심을 가지고 환경영향평가를 수행해 나가야 할 것으로 사료된다.

4. 간척지 및 간석지 토양 중에 존재하는 중금속의 화학적 형태별 함량은 각각의 개별원소의 화학적인 특성에 따라 토양 내에서 반응하는 정도가 다르게 나타나고 있으며, 토양 pH에 의한 영향보다는 토양유기물과 양이온교환용량에 많은 영향을 받고 있는 것으로 조사되었다.

References

1. Cho, J. Y., E. H. Kim, and K. W. Han, 2000. Sequential extraction of heavy metals in the vicinity of the Oksung Cu-Zn mine, *Korean Society of Soil Science and Fertilizer* 33(6): pp. 446-452. (in Korean)
2. Kim, B. Y., B. K. Jung, J. W. Choi, E. S. Yun, and S. Choi, 1995. Heavy metals in paddy soil of Korea, *Korean Society of Soil Science and Fertilizer* 28(4): pp. 295-300. (in Korean)
3. Koo, J. W., J. K. Choi, and J. G. Son, 1998. Soil properties of reclaimed tidelands and tidelands of western sea coast in Korea, *Korean Society of Soil Science and Fertilizer* 31(2): pp. 120-127. (in Korean)
4. Lim, S. U., and S. K. Kim, 1983. Distribution of cadmium fractions in paddy soils and their relation to cadmium content in brown rice, *Korean Society of Soil Science and Fertilizer* 16(1): pp. 28-35. (in Korean)
5. McLaren, R. G., and D. V. Crawford, 1973. Studies on soil copper. - The fractionation of copper in soils-, *Journal of Soil Science* 24: pp. 172-181.
6. Miller, W. P., and W. W. McFee, 1983. Distribution of cadmium, zinc, copper and lead in soils of industrial northwestern Indiana, *Journal of Environmental Quality*. 12: pp. 29-33.
7. Page, A. L., R. H. Miller, and D. R. Keeny, 1982. Methods of Soil Analysis. *Soil Science Society of America*, Inc. Madison, Wisconsin, USA
8. Yoo, S. H., K. J. Ro, S. M. Lee, M. E. Park., and K. H. Kim. 1996. Characterization of heavy metals in the stream sediment around an old Zinc mine, *Korean Society of Soil Science and Fertilizer* 29(4): pp. 432-438. (in Korean)