Journal of Environmental Science International
24(2); 175~188; February 2015
pISSN: 1225-4517 eISSN: 2287-3503
http://dx.doi.org/10.5322/JESI.2015.24.2.175

ORIGINAL ARTICLE

제주도 자연토양에서 중금속의 농도

김세라 · 현성수 · 송상택 · 이민규[1] · 감상규[2)*]
제주특별자치도 보건환경연구원, [1)]부경대학교 화학공학과, [2)]제주대학교 환경공학과

Concentration of Heavy Metals in Natural Soils of Jeju Island, Korea

Se-Ra Kim, Sung-Su Hyun, Sang-Taek Song, Min-Gyu Lee[1)], Sang-Kyu Kam[2)*]
Research Institute of Health & Environment, Jeju Special Self-Governing Province, Jeju 690-817, Korea
[1)]Department of Chemical Engineering, Pukyong National University, Busan 608-739, Korea
[2)]Department of Environmental Engineering, Jeju National University, Jeju 690-756, Korea

Abstract

For 63 soil series distributed in Jeju Island, natural uncultivated soils in each soil series were collected, and their physicochemical properties and their concentrations of 19 heavy metals including 8 heavy metals which are regulated by Korean Soil Environment Conservation Law, were analyzed. Moreover, the correlations between physicochemical properties and heavy metal concentrations, and between heavy metal concentrations were analyzed. The heavy metals distributed in the higher concentrations and the lower concentrations with arithmetric mean value, were Mn(730 mg/kg) and Ba(493 mg/kg), and Hg(0.146 mg/kg) and Tl(0.096 mg/kg), respectively. The correlations between pH(H_2O) and heavy metals(Hg, Ni, Co, Se), between pH(NaF) and heavy metals(Hg, Ba, Se, Tl), and between organic matter content and heavy metals(Hg, Tl) were significant at the 0.01 level. From the correlations between heavy metal concentrations, there were 22 where there were significant at the 0.01 level and they showed positive correlation. Among those, the heavy metals showing the correlation higher than r=0.5, were Sb-V(0.878), Mo-Sn(0.867), Co-V(0.654), Co-Sb(0.648), Be-Sn(0.546), and Sn-Tl(0.528).

Key words : Natural soil, Heavy metal concentration, Soil series, Correlation, Jeju Island

1. 서론

제주도는 수차례의 융기작용과 신생대 제3기말부터 제4기초까지 화산폭발로 형성된 원추형의 화산도로서, 토양의 주 모암은 현무암이고, 일부 조면암 및 조면암질 안산암에서 유래되었으며, 이들 모암이 화산활동시 화산회, 화산사 등으로 분출되어 퇴적된 화산회토가 제주도 토양의 대부분을 차지하고 있다(Shin과 Stoop, 1988; Um 등, 1978).

제주도 토양의 정밀조사에 의하면(NIAST, 2000) 제주도 토양은 4개 토양군(토양색에 의한 흑색 화산회토, 농암갈색 화산회토, 암갈색 비화산회토, 갈색 산림토)과 63개 토양통으로 구분되며 약 80%가 전형적인 화산회토(Andisols)의 특성을 지니고 있다. 이들 토양은 입도와 구조, 조직 등의 특이성 때문에 다량의 염기가 용탈됨에 따라 산성이 강해지고 탈규산작용이 진행되어 비정질 점

Received 25 October, 2014; **Revised** 26 December, 2014;
Accepted 7 January, 2015
[*]**Corresponding author** : Sang-Kyu Kam, Department of Environmental Engineering, Jeju National University, Jeju 690-756, Korea
Phone: +82-64-754-3444
E-mail: sakyukam@jejunu.ac.kr

ⓒ The Korean Environmental Sciences Society. All rights reserved.
This is an Open-Access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution Non-Commercial License (http://creativecommons.org/licenses/by-nc/3.0) which permits unrestricted non-commercial use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.

토광물인 알로판(allophane)이 형성되며, 이 알로판이 토양 pH의 변화에 따라 Al이 유리되어 활성화되는 성질(반토성)이 강하므로 Al 형태가 $Al(OH)_2^+$, $Al(OH)^{2+}$ 등으로 존재하여 타 점토광물에 비해 음이온의 흡착력이 커서 인산고정력이 강하고, 유기물의 함량은 높으나 유기물과의 결합이 강하여 난분해성의 유기물이 집적되어 토색은 농암갈색 또는 흑색의 암색을 띠며, 양이온 치환용량은 높으나 침투성이 과다하여 염기 용탈이 쉬운 특성을 지니고 있다.

토양 중 중금속은 미량으로 존재 시 식물의 생육에 유익하게 작용하나 과잉으로 토양 중에 존재하면 식물의 생육을 저해할 뿐 아니라 식물연쇄에 의해 인축에 영향을 미치고(Gil 등, 2004) 미생물의 활성을 저해시키며 토양이 지니고 있는 다양한 기능을 저해시키는 요인이 된다. 토양 중의 중금속은 모암자체로부터 파생된 것으로 중금속의 배경농도를 나타내는 자연적인 지구화학적 유입원(Baize와 Sterckeman, 2001)과 축분퇴비 등의 폐기물(Xue 등, 2003), 화학비료(Gray 등, 1999) 등의 인위적인 오염원 등 크게 2가지 유입원에 의해 분포하고 있다. 자연적인 유입원으로 화산회 토양은 자체적으로 중금속 농도가 높은 것으로 알려져 있다. 일본(Takeda 등, 2004), 미국 하와이(Burt 등, 2003), 프랑스의 La Reunion (Doelsch 등, 2006) 등지의 화산회 토양에서 Cu, Cr, Ni, Zn 등의 중금속 함량이 일반 토양에 비해 부화된 것으로 나타나고 있으며, 제주도의 경우에도 토양오염측정망 운영결과 Ni 함량이 토양오염우려기준을 초과하는 사례가 나타나며 이에 대한 정밀조사에서 화산회 토양 내 자연함유량이 높기 때문인 것으로 보고되었다(Ministry of Environment, 2006a, 2006b). 이와 같이 현무암질 용암 또는 화산회를 모재로 하는 토양에서는 지구화학적 수반관계가 있는 Cr, Ni, Zn 등의 중금속 함량이 높을 것으로 예상되며 이에 대한 면밀한 조사가 필요하다고 판단된다.

제주도 토양은 상기에 언급한 바와 같이 대부분 토양은 화산회토이고 자연적인 지구화학적 유입원에 의해 일부 중금속의 농도가 높은 것으로 사료되나 이에 대한 체계적인 연구가 수행되지 않았다. 본 연구에서는 제주도의 토양, 특히 자연토양 중의 중금속의 농도를 살펴보기 위해 제주도에 분포하고 있는 63개통에 대해 자연적인 지구화학적 유입원으로 사료되는 비경작지 토양을 채취하여 이들의 물리화학적 성질 및 중금속 농도를 살펴보았다. 또한 분포하고 있는 중금속의 관련성을 중금속간의 상관성과 중금속과 토양의 물리화학적 성질과의 상관성을 검토하였다.

2. 재료 및 방법

2.1. 시료채취 및 전처리

제주도 자연토양 중의 중금속 농도 조사를 위해 토양통과 토지이용도를 검토하여 자연농도를 대표할 수 있는 토양을 대상으로 현장에서 확인 후 시료채취를 하였다. 그러나 일부 토양통은 거의 모든 지역이 경작지 등으로 이용되고 있어 경작지내의 개간하지 않은 곳에서 시료채취를 하였다. 시료채취는 GPS(GARMIN, GPSmap 60CSx)로 시료채취 지점을 확인하고, 중간지점과 약 5 m 거리로 동서남북 각 방향에서 시료를 채취하여 총 5개의 부시료를 하나의 혼합시료로 하는 방법을 이용하였다. 시료는 표면의 잡초, 유기물 등의 이물질을 제거하고 15 cm 내외의 지표층을 대상으로 시료채취를 하였다. 시료채취는 간단한 작업이지만 수직으로나 수평적으로 균일하지 않으므로 채취한 시료가 대상지역의 토양을 대표할 수 있는 지점을 충분히 고려하여 채취하였다. 채취한 시료는 폴리에틸렌봉지에 보관하여 실험실로 운반하여 전처리를 실시하였다. Fig. 1은 시료채취 지점을 보여주고 있으며, Table 1은 토양통별 면적분포 및 시료채취지점의 토지이용도를 나타내고 있다.

실험실로 운반된 토양시료는 스테인레스제 밧트(vat) 위에 균일한 두께로 하여 직사광선이 닿지 않는 장소에서 통풍이 잘되게 헤쳐 놓고 풍건시킨 다음, 나무망치로 분쇄하여 눈금간격 0.15 mm의 표준체(100 mesh)로 체걸음 한 것을 분석용 시료로 하였다.

2.2. 실험 방법

토양 pH(H_2O)는 토양:물 = 1:5법, 화산회토 여부를 확인하는 토양 pH(NaF)는 Calhoun 등(1972)의 방법, 토양 유기물 함량은 Walkley와 Black법(1934)에 따라 측정하였다.

토양 중 중금속의 함량은 국내에서 중금속 토양오염물질로 지정되어 있는 As, Cd, Cu, Cr, Hg, Ni, Pb, Zn 등 8개 항목 외에 국외에서 지정되어 있는 Ag, Ba, Be, Co, Mo, Mn, Se, Sb, Sn, Tl, V 등 11개 항목을 포함하

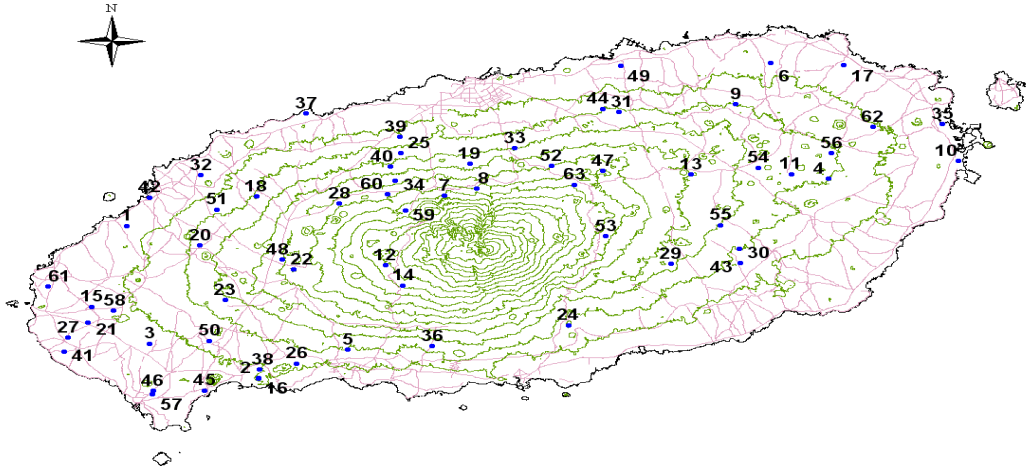

Fig. 1. Sampling sites by soil series in Jeju Island.

여 총 19개 항목에 대해서, 토양 중 중금속 전처리 방법으로 적용 될 수 있는 US EPA Method 3052 방법을 사용하였다. 즉, 시료 1.0 g에 HF(38%) 3 mL, HNO_3 (68%) 9 mL를 넣고 마이크로웨이브 분해장치를 이용하여 15분 동안 분해한 후 5B여과지로 여과 후 초순수로 25 mL 부피를 맞춰 최종 시료용액으로 하였다. 중금속 분석은 Ba, Cr, Mn, Ni, Zn 에 대해서는 ICP-OES (optima 5300DV, PE)를, Ag, Be, Cd, Co, Mo, Cu, Pb, Sb, Sn, Tl, V에 대해서는 ICP-MS(Elan DRC-e, PE)를, As 및 Se에 대해서는 ICP-OES Hydride(Vista -pro, Varian)기기를 사용하여 분석하였으며, 수은(Hg)은 토양 시료 1 g을 취하여 Hg analyzer(DMA-80, Milestone)를 이용해 분석하였다.

각 자연토양에 대한 중금속 농도는 건조토양에 대한 농도로 나타내었다. 각 중금속 농도는 매우 넓은 분포값을 보이므로 측정된 값에 대해 산술평균, 기하평균, 10% 절사평균(TM 10), 20% 절사평균(TM 20), 중앙값(median), 표준편차(SD, standard deviation), 변동계수(CV, coefficient of variation)을 계산하여 제시하였다. 상관분석은 하나의 요인이 다른 요인에 반응하여 어떻게 변화하는지를 명확히 보여주므로 미량 원소 분석에 널리 사용되고 있다(Tume 등, 2006). 토양의 물리화학적 성질과 중금속간 그리고 중금속 사이의 간단한 상관분석을 실시하였다.

3. 결과 및 고찰

3.1. 토양의 물리화학적 성질

채취한 토양의 물리화학적 성질을 Table 2에 나타내었다. 대부분의 중금속들은 산성 환경에서는 이동도가 큰 반면, 알칼리성 환경에서는 이동도가 낮아 광물 상태로 침전되거나 음이온들과 착물을 형성하여 침전되므로 환경지구화학에서 pH의 측정은 중요한 의미를 가진다. 채취토양 전체 및 아래의 pH(NaF)로 분류된 화산회토 및 비화산회토의 pH(H_2O)의 범위(평균)은 각각 4.6～8.3(5.5), 4.6～7.6(5.4), 4.8～8.3(5.7)으로 큰 차이를 보이지 않았다. 이는 토양측정망 및 실태조사 결과 값인 6.6(Ministry of Environment, 2005) 보다 상대적으로 낮은 값을 보였다.

화산회토는 다량의 활성 Al이 함유되어 있다. 이 때문에 화산회토는 NaF 용액을 첨가하면 활성 Al에 결합하고 있는 수산기(OH)와 F와의 교환반응이 일어나 높은 pH를 나타내게 된다. 이 반응은 allophane test로서 이용되어 미국 농무성 Soil Taxonomy Andepts의 중요한 기준(pH(NaF)>9.4)으로 되어 있다(Calhoun 등, 1972). 본 연구에 사용된 전체 토양의 pH(NaF)는 7.5～11.7 범위(평균 10.0)에 있으며, pH(NaF)>9.4를 화산회토의 분류기준 적용하면 채취토양 중 화산회토는 42개(9.4～11.7, 평균 10.9), 비화산회토는 21개(7.5～9.3, 평균 8.2)로 분류되었다.

Table 1. Area of soil series and land use at sampling site of each soil series in Jeju Island

Soil No	Soil series	Area (m^2)	Land use at sampling site	Soil No	Soil series	Area (m^2)	Land use at sampling site
1	Gapa	13,746,338	shrubbery	33	Yeongrag	2,358,986	forest
2	Gamsan	9,096,637	shrubbery	34	Ora	139,856,382	hybrid land of weed and shrubbery
3	Gangjeong	9,013,767	hybrid land of weed and shrubbery	35	Onpyeong	3,875,263	grassland
4	Gyorae	13,132,440	grassland	36	Yonggang	1,226,762	shrubbery
5	Gueom	32,171,890	shrubbery beside roads	37	Yongdang	1,461,662	natural grassland
6	Gujwa	136,421,125	grassland and shrubbery	38	Yongsu	1,528,541	pine tree near fields
7	Gunsan	16,950,731	forest	39	Yongheung	31,417,593	hybrid land of weed and shrubbery
8	Geumag	7,255,814	forest	40	Udo	8,700,824	shrubbery
9	Gimyeong	51,312,125	pasture	41	Weolryeong	1,280,839	shrubbery among the fields
10	Nagcheon	847,224	hybrid land of weed and shrubbery	42	Weolpyeong	1,796,157	reed and wild grass
11	Namweon	30,965,923	plantation beside pasture	43	Wuimi	15,910,268	forest
12	Noro	63,739,666	forest	44	Ido	18,483,158	forest composed of pine trees
13	Nogsan	19,678,837	plantation	45	Iho	441,089	weedland near the seashore
14	Nongo	20,168,297	shrubbery	46	Inseong	6,988,618	grassland
15	Daejeong	3,231,242	pine tree among the fields	47	Jeogag	27,311,907	forest
16	Daepyeong		forest	48	Jeju	122,678,028	grassland
17	Daeheul	91,018,355	pine tree among the fields	49	Jocheon	16,300,323	hybrid land of weed and shrubbery
18	Donggui	15,274,121	forest	50	Jungmun series	141,637,042	eulalia land
19	Donghong	6,428	hybrid land of weed and shrubbery	51	Jungeom	70,370,029	forest composed of pine trees
20	Mudeung	26,896,317	eulalia and grassland	52	Jisan	68,392	grassland
21	Mureung	15,803,263	hybrid land of weed and shrubbery	53	Tosan	24,787,583	forest
22	Miag	48,921,050	plantation near oreum climing way	54	Topyeong	9,713,863	forest
23	Minag	2,665,132	pasture	55	Pyeongdae	87,657,194	grassland and hybrid land
24	Byeongag	17,192,604	forest at the top of oreum	56	Pyoseon	5,480,173	hybrid land of weed and shrubbery
25	Sara	-	hybrid land of weed and shrubbery	57	Hamo	7,079,621	grassland
26	Sanbang	6,226,052	weedland near oreum	58	Haweon	27,679,410	natural glassland
27	Seogto	12,136	natural grassland	59	Hangyeong	5,800,983	pasture
28	Songdang	39,461,578	shrubbery	60	Hanrim	19,673,313	shrubbery
29	Songag	23,351,162	forest	61	Haean	1,693,381	hybrid land of weed and shrubbery
30	Sineom	18,687,715	forest	62	Haengweon	44,742,085	hybrid land of weed and shrubbery
31	Ara	59,261,003	weedland	63	Heunag eries	116,497,990	forest
32	Aeweol	3,462,833	eulalia and shrubbery	-			

Table 2. Physico-chemical properties of natural soil series collected in this study

Soil No	Soil series	pH		Organic matter (%)	Soil No	Soil series	pH		Organic matter (%)
		H_2O	NaF				H_2O	NaF	
1	Gapa	7.8	8.9	4.5	33	Yeongrag	5.2	8.4	3.7
2	Gamsan	5.8	9.6	4.8	34	Ora	5.7	7.9	4.1
3	Gangjeong	5.3	7.6	3.7	35	Onpyeong	7.5	10.1	9.4
4	Gyorae	5.0	11.5	7.1	36	Yonggang	5.2	11.5	11.9
5	Gueom	5.1	10.5	4.8	37	Yongdang	5.2	7.5	3.5
6	Gujwa	5.3	11.6	5.3	38	Yongsu	5.6	7.6	5.8
7	Gunsan	4.7	9.6	5.3	39	Yongheung	4.8	7.7	3.4
8	Geumag	5.1	9.9	8.0	40	Udo	5.7	9.9	6.9
9	Gimyeong	5.6	11.2	6.4	41	Weolryeong	5.4	7.5	3.3
10	Nagcheon	7.6	9.4	6.9	42	Weolpyeong	6.2	7.9	3.5
11	Namweon	4.9	11.5	12.8	43	Wuimi	5.2	11.3	11.4
12	Noro	4.7	10.9	11.5	44	Ido	4.8	9.8	9.9
13	Nogsan	5.7	11.5	6.4	45	Iho	8.3	8.5	3.0
14	Nongo	4.8	11.3	4.8	46	Inseong	5.3	9.5	7.4
15	Daejeong	5.7	8.2	3.3	47	Jeogag	5.5	11.4	11.0
16	Daepyeong	5.1	10.7	8.0	48	Jeju	5.2	11.6	13.2
17	Daeheul	7.6	10.2	6.6	49	Jocheon	5.3	10.1	11.4
18	Donggui	5.6	10.2	4.8	50	Jungmun	5.1	7.9	3.5
19	Donghong	5.4	11.4	2.3	51	Jungeom	4.8	8.5	4.8
20	Mudeung	6.0	8.0	3.2	52	Jisan	5.2	11.6	10.3
21	Mureung	5.4	9.3	3.4	53	Tosan	5.8	11.0	15.8
22	Miag	5.6	11.2	16.1	54	Topyeong	5.1	11.7	16.9
23	Minag	5.7	11.3	8.5	55	Pyeongdae	4.8	11.3	14.0
24	Byeongag	5.3	11.5	13.8	56	Pyoseon	4.6	10.7	17.6
25	Sara	4.9	8.7	1.6	57	Hamo	5.8	10.9	9.6
26	Sanbang	5.8	8.8	3.9	58	Haweon	5.1	8.9	4.1
27	Seogto	5.2	8.0	3.9	59	Hangyeong	5.4	11.5	12.5
28	Songdang	5.4	11.6	12.3	60	Hanrim	5.2	11.4	15.5
29	Songag	4.9	11.5	16.8	61	Haean	6.6	7.7	2.3
30	Sineom	4.9	11.3	17.3	62	Haengweon	5.3	11.5	12.5
31	Ara	5.7	11.3	16.8	63	Heunag	5.2	10.7	12.5
32	Aeweol	5.9	8.1	2.1	-	-	-	-	-
	Range (average)1	4.6∼8.3 (5.5)	7.5∼11.7 (10.0)	1.6∼17.6 (8.1)					
	Range (average)2	4.6∼7.6 (5.4)	9.4∼11.7 (10.9)	2.3∼17.6 (10.4)					
	Range (average)3	4.8∼8.3 (5.7)	7.5∼9.3 (8.2)	1.6∼5.8 (3.6)					

[1,2,3] are the values for total soils, volcanic soils and non-volcanic soils, respectively.

유기물은 동식물의 잔재가 토양으로 유입되어 분해되어 생성된 것으로 토양의 물리화학적 성질에 가장 크게 영향을 미치는 요인의 하나이다. 유기물 함량이 많을수록 중금속의 흡착량이 많아지며, 따라서 중금속의 농도도 높게 나타난다. 제주도 토양은 토양군에 따라 유기물 함량의 차이가 매우 크다. 비화산회토 유기물 함량 평균은 2.7%이고, 화산회토는 토색별로 평균 2.5%～15.7%까지 분포하고 있다(Hyun과 Oh, 1994). 본 연구에서 사용된 전체 토양의 유기물 함량은 1.6～17.6%(평균 8.1%), pH(NaF)로 분류한 화산회토 및 비화산회토의 유기물 함량은 각각 2.3～17.6%(평균 10.4%), 1.6～5.8%(평균 3.6%)로 화산회토의 평균농도는 비화산회토에 비해 약 3배 높은 농도를 보임을 알 수 있다. 또한 육지부 일반토양의 유기물이 2%를 약간 상회하는 것과 비교하면 매우 높은 수준임을 알 수 있다.

3.2. 제주도 자연토양 중 중금속의 농도 및 외국 토양과의 비교

3.2.1. 제주도 자연토양 중 중금속의 농도

우리나라의 토양환경보전법에서 규제하고 있는 토양오염물질 중 중금속은 8개 항목을 규정하고 있으며, 외국에서는 많게는 20개의 중금속을 토양오염물질로 규정하여 관리하고 있다. 본 연구에서는 채취한 제주도 자연토양 63개통에 대해 2.2에 언급한 19개 중금속에 대해 이들의 농도를 측정하였으며, 그 결과를 Table 3, 4 및 5에 나타내었다.

전체토양, 화산회토, 비화산회토에 대해 각 중금속의 농도 범위(단위 mg/kg)는 As의 경우 각각 0.44～29.87, 0.49～29.87, 0.44～20.3, Cd의 경우 각각 0.120～0.450, 0.125 ～0.450, 0.120～0.425, Cu의 경우 각각 3.7～65.8, 3.7～65.8, 5.0～55.6, Cr의 경우 각각 17.3～181.0, 17.3～181.0, 28.3～108.1, Hg의 경우 각각 0.010～0.374, 0.028～0.374, 0.010～0.143, Ni의 경우 각각 8.8～166.9, 13.9～166.9, 8.8～128.4, Pb의 경우 각각 6.9 ～38.6, 6.9～24.1, 10.1～38.6, Zn의 경우 각각 26.6～161.9, 26.6～161.9, 27.0～140.3, Ag의 경우 각각 0.03～3.61, 0.03～3.61, 0.11～2.49, Ba의 경우 각각 17.2～1053.0, 20.7 ～1053.0, 17.2～729.0, Be의 경우 각각 0.001～0.768, 0.001～0.768, 0.056～0.684, Co의 경우 각각 14.6～82.5, 14.6～70.5, 14.7～82.5, Mn의 경우 각각 275～1895, 275～1895, 388～1575, Mo의 경우 각각 0.005～2.290, 0.005～1.801, 0.059～2.290, Se의 경우 각각 0.019～1.677, 0.045～1.316, 0.019～1.677, Sb의 경우 각각 3.20～19.60, 3.20～16.28, 4.63～19.60, Sn의 경우 각각 0.04～4.38, 0.04～4.38, 0.16～2.95, Tl의 경우 각각 0.003 ～0.478, 0.003～0.317, 0.013～0.478, V의 경우 각각 27.6～182.9, 27.6～182.9, 45.6～174.0 으로 각 중금속은 토양 종류에 관계없이 넓은 농도로 분포하고 있다. 산술평균값으로 본 연구에서 조사된 제주도 전체 토양 중 매우 높은 농도로 분포하고 있는 중금속은(단위 mg/kg) Mn(730), Ba(493)이었고 Hg(0.146)과 Tl(0.096)은 가장 낮은 농도로 분포하고 있었으며, 산술평균값으로 중금속 사이에서는 Mn(730) > Ba(493) > V(87) > Cr(73), Zn(71) > Ni (52) > Co(36)> Cu(20) > Pb(14) > Sb(9) > As(6.14) > Sn(1.15), Ag(1.12) > Mo(0.527), Se(0.529) > Be(0.345) > Cd(0.238) > Hg(0.146) > Tl(0.096)의 순이었다. 산술평균값으로 화산회토와 비화산회토 사이의 중금속 농도를 비교하면 Ba(1.6배), Cr(1.2배), Zn(1.2배), Ni(1.2배), Cu(1.2배), As(1.3배), Ag(1.4배), Se(1.6배), Hg(2.4배)은 화산회토에 높은 농도로, Mn(1.2배) 및 Tl(1.7배)은 비화산회토에 높은 농도로 그리고 V, Co, Pb, Sb, Sn, Mo, Be, Cd 등은 비슷한 농도로 분포하고 있음을 알 수 있었다.

Takeda 등(2004)은 일본 토양에서 화산회토 중의 중금속 농도는 비화산회토에 비해 산술평균값으로 V은 1.9～2.3배, Zn은 1.0～1.4배, Co는 1.7～2.6배, Cd는 1.0～2.3배, Cu는 2.1～3.3배 높게 나타났으며, Cr은 0.81～0.94배로 낮게 나타났고, Be, Cd, Ni, Pb 등은 비슷한 농도로 나타났다고 보고하였다. 본 연구결과를 일본 토양과 비교하여 보면, 대부분의 중금속에서 상이한 결과를 보임을 알 수 있는데, 이러한 결과는 비록 화산회토, 비화산회토일지라도 토양의 모암, 풍화작용, 화산활동의 시기 등에 따른 토양의 물리화학적 성질에 따른 차이에 기인하는 것으로 사료된다.

본 연구에서 넓게 분포하고 있는 각 중금속에 대해 중앙값을 산술평균, 기하평균, 10% 절사평균(TM 10) 및 20% 절사평균(TM 20)과 비교하면, 대부분의 중금속이 산술평균, 절사평균보다 기하평균에 근접하는 것을 알 수 있는데, 이는 측정값이 양의 비대칭도를 나타내는 것

을 의미한다(Tume 등, 2006).

변동계수(CV, Coefficient of Variation)는 표준편차를 평균값으로 나눈 값으로 평균이 다르면 표준편차를 비교해서 산포도의 정도를 비교하기가 곤란한 경우에 사용되는 값으로 전체 토양, 화산회토, 비화산회토에 대해 각각 0.299～0.940, 0.234～0.974, 0.319～1.018 범위였고, 각 중금속에 대한 변동계수를 보면 전체 토양에 대해 As > Tl > Sn > Mo, Ag > Se > Be, Ba > Cu, Ni > Hg > Cr, Co, Mn > Zn > Cd > Sb > V > Pb 순으로, 화산회토에 대해 Sn > Tl > Ag > As, Mo > Be > Ni > Cu, Ba > Se > Cr > Mn > Co, Hg > Zn > Cd, Sb > V > Pb 순으로, 비화산회토에 대해 Se, Mo > As > Ag > Tl > Sn > Ba, Cu > Ni > Be > Co > Hg > Cd, Pb > Mn > Zn, Sb > V > Cr 순으로 제주도 토양내 중금속의 공간적 농도구배가 큰 것으로 나타났다.

기하평균과 변동계수를 비교한 결과 변동계수가 작을수록 기하평균은 산술평균 혹은 절사평균에 근접한 값을 보였다. 그러나 변동계수가 클수록 기하평균은 산술평균 값과 많은 차이를 보여주고 있고 이는 산술평균이 비교적 크거나 작은 수치가 다발적으로 존재할 경우 이런 극단적인 수치에 대한 영향을 받는 것을 막기 위해 절사평균과 마찬가지로 기하평균을 사용해야 할 것으로 판단된다. 따라서 일부 중금속 농도들이 상대적으로 변동이 매우 크게 존재하였으며 이는 제주도 토양 중 중금속의 농도 분포가 다양하게 나타날 것으로 사료된다.

3.2.2. 제주도 토양과 외국 토양과의 중금속 농도 비교

본 연구에서 조사된 화산회토 및 비화산회토의 자연토양에 대해 측정된 중금속 농도를 보고된 외국 토양의 화산회토 또는 비화산회토 자연토양 중의 중금속 농도와 비교한 결과를 Table 6에 나타내었다. Table 6에서 알 수 있는 바와 같이 토양 중의 전처리 방법에 차이가 있지만 화산회토, 비화산회토의 자연토양일지라도 지역에 따

Table 3. Concentrations of heavy metals in total natural soils of Jeju Island

(unit : mg/kg)

Heavy Metal	Range	AM[1]±SD[2]	GM[3]	TM[4]10	TM20	Median	CV[5]
As	0.44～29.87	6.14±5.77	4.23	5.40	5.11	5.07	0.940
Cd	0.120～0.450	0.238±0.081	0.225	0.235	0.233	0.225	0.340
Cu	3.7～65.8	20.1±12.4	16.9	18.8	18.4	18.5	0.617
Cr	17.3～181.0	73.4±30.9	67.0	71.7	70.9	67.1	0.421
Hg	0.010～0.374	0.146±0.077	0.123	0.144	0.142	0.147	0.528
Ni	8.8～166.9	52.3±32.1	44.8	49.4	46.9	44.6	0.614
Pb	6.9～38.6	14.4±4.3	13.9	14.0	13.9	13.8	0.299
Zn	26.6～161.9	33.3±27.1	67.0	69.0	67.3	68.2	0.380
Ag	0.03～3.61	1.12±0.99	0.66	1.07	1.02	0.78	0.884
Ba	17.2～1053.0	492.7±315.7	315.5	490.3	491.4	530.0	0.641
Be	0.001～0.768	0.345±0.223	0.221	0.342	0.340	0.350	0.641
Co	14.6～82.5	36.0±15.0	33.1	35.2	34.8	33.5	0.417
Mn	275.0～1895.0	729.5±300.6	675.4	705.7	701.5	690.0	0.412
Mo	0.005～2.290	0.537±0.477	0.340	0.490	0.465	0.384	0.888
Se	0.019～1.677	0.529±0.364	0.389	0.507	0.497	0.429	0.688
Sb	3.20～19.60	8.99±2.92	8.54	8.84	8.81	8.90	0.325
Sn	0.04～4.38	1.15±1.05	0.74	1.07	1.00	0.79	0.913
Tl	0.003～0.478	0.096±0.089	0.061	0.086	0.080	0.073	0.927
V	27.6～182.9	87.0±27.5	82.9	85.4	85.1	83.5	0.316

[1]arithmetric mean; [2]standard deviation; [3]geometric mean; [4]trimmed mean; [5]coefficient of variation.

Table 4. Concentrations of heavy metals in natural volcanic soils of Jeju Island

(unit: mg/kg)

Heavy Metal	Range	AM[1]±SD[2]	GM[3]	TM[4]10	TM20	Median	CV[5]
As	0.49∼29.87	6.61±5.52	4.73	5.78	5.47	5.52	0.835
Cd	0.125∼0.450	0.247±0.076	0.236	0.245	0.243	0.250	0.308
Cu	3.7∼65.8	21.4±12.3	18.5	20.1	19.9	20.5	0.575
Cr	17.3∼181.0	77.1±34.4	69.4	75.6	74.4	69.1	0.446
Hg	0.028∼0.374	0.181±0.069	0.165	0.180	0.180	0.177	0.381
Ni	13.9∼166.9	55.3±32.4	48.2	52.0	49.7	48.6	0.586
Pb	6.9∼24.1	14.1±3.3	13.7	14.0	13.8	13.8	0.234
Zn	26.6∼161.9	75.2±27.1	70.9	72.8	71.2	69.4	0.360
Ag	0.03∼3.61	1.24±1.08	0.70	1.19	1.14	0.88	0.871
Ba	20.7∼1053.0	561.4±323.1	362.3	564.6	573.9	602.5	0.576
Be	0.001∼0.768	0.333±0.240	0.188	0.328	0.325	0.289	0.721
Co	14.6∼70.5	37.0±14.1	34.3	36.4	36.1	34.6	0.381
Mn	275.0∼1895.0	677±290.1	627.4	654.3	647.6	622.5	0.428
Mo	0.005∼1.801	0.545±0.456	0.327	0.509	0.484	0.411	0.837
Se	0.045∼1.316	0.602±0.333	0.595	0.589	0.589	0.589	0.553
Sb	3.20∼16.28	8.91±2.69	8.48	8.86	8.86	9.19	0.302
Sn	0.04∼4.38	1.17±1.14	0.70	1.08	1.00	0.79	0.974
Tl	0.003∼0.317	0.078±0.075	0.049	0.070	0.064	0.058	0.962
V	27.6∼182.9	88.5±26.4	84.4	87.8	88.2	91.3	0.298

[1]arithmetric mean; [2]standard deviation; [3]geometric mean; [4]trimmed mean; [5]coefficient of variation.

Table 5. Concentrations of heavy metals in natural non-volcanic soils of Jeju Island

(unit: mg/kg)

Heavy Metal	Range	AM[1]±SD[2]	GM[3]	TM[4]10	TM20	Median	CV[5]
As	0.44∼20.30	5.20±4.94	3.38	4.66	4.36	4.21	0.950
Cd	0.120∼0.425	0.221±0.089	0.205	0.215	0.211	0.180	0.403
Cu	5.0∼55.6	17.5±12.6	14.2	16.2	15.3	13.2	0.720
Cr	28.3∼108.1	65.9±21.0	62.4	65.7	66.0	63.1	0.319
Hg	0.010∼0.143	0.077±0.033	0.068	0.077	0.076	0.077	0.429
Ni	8.8∼128.4	46.5±31.2	38.7	44.1	41.1	35.8	0.671
Pb	10.1∼38.6	14.9±6.0	14.2	13.9	13.8	13.9	0.403
Zn	27.0∼140.3	63.5±23.5	59.9	61.3	60.5	59.5	0.370
Ag	0.11∼2.49	0.89±0.77	0.57	0.85	0.81	0.60	0.865
Ba	17.2∼729.0	355.3±255.5	239.3	353.4	350.6	252.0	0.720
Be	0.056∼0.684	0.368±0.187	0.303	0.368	0.373	0.394	0.508
Co	14.7∼82.5	34.2±16.9	30.9	32.7	32.2	27.2	0.494
Mn	387.5∼1575.0	833.1±301.0	782.8	817.5	811.6	755.0	0.361
Mo	0.059∼2.290	0.521±0.528	0.365	0.452	0.421	0.336	1.013
Se	0.019∼1.677	0.381±0.388	0.250	0.332	0.310	0.253	1.018
Sb	4.63∼19.60	9.17±3.40	8.68	8.86	8.72	8.15	0.370
Sn	0.16∼2.95	1.11±0.89	0.82	1.07	1.01	0.78	0.802
Tl	0.013∼0.478	0.131±0.107	0.097	0.118	0.113	0.106	0.817
V	45.6∼174.0	84.0±30.0	79.9	81.3	79.8	75.8	0.358

[1]arithmetric mean; [2]standard deviation; [3]geometric mean; [4]trimmed mean; [5]coefficient of variation.

Table 6. Comparison of heavy metal concentrations in natural soils in this study with those in foreign countries

Region (Country)		Concentration (mg/kg), Range(arithmetric mean)										Pretreatment method	Ref.
		As	Cd	Cu	Cr	Hg	Ni	Pb	Zn	Ag	Ba		
Jeju Island	1	0.44-29.87 (6.14)	0.120-0.450 (0.238)	3.7-65.8 (20.1)	17.3-181.0 (73.4)	0.010-0.374 (0.146)	8.8-166.9 (52.3)	6.9-38.6 (14.4)	26.6-161.9 (71.3)	0.03-3.61 (1.12)	17.2-1053 (493)	Microwave assisted acid (HNO_3/HF) digestion	This study
	2	0.49-29.87 (6.61)	0.125-0.450 (0.247)	3.7-65.8 (21.4)	17.3-181.0 (77.1)	0.028-0.374 (0.181)	13.9-166.9 (55.3)	6.9-24.1 (14.1)	26.6-161.9 (75.2)	0.03-3.61 (1.24)	20.7-1053 (561)		
	3	0.44-20.30 (5.20)	0.120-0.425 (0.221)	5.0-55.6 (17.5)	28.3-108.1 (65.9)	0.010-0.143 (0.077)	8.8-128.4 (46.5)	10.1-38.6 (14.9)	27.0-140.3 (63.5)	0.11-2.49 (0.89)	17.2-729 (355)		
Susaki (Greece)	2	5-104 (22)	-	11-63 (23)	163-2346 (920)	-	183-2665 (994)	5-256 (33)	21-604 (95)	-	48-218 (125)	Digestion with a mixture of HF, HNO_3, HCl and $HClO_4$	Keleper--tsis et al.(2001)
Reunion (Indian Ocean)	2	-	-	6.5-164 (58)	35-1108 (300)	0.03-0.81 (0.19)	15-1038 (206)	-	57-398 (162)	-	-	Digestion with a mixture of HF, HNO_3 and $HClO_4$	Doelsch et al. (2006)
Sant Climent (Spain)	3	-	-	17.6-110 (37.7)	20.1-342.8 (51)	-	18.8-272.2 (50)	7.8-143.3 (52)	7.2-276.8 (69)	-	174.2-606 (305)	Digestion with aqua regia	Tume et al.(2006)
Auckland (New Zealand)	2	0.4-12	<0.1-0.65	20-90	3-125	<0.03-0.45	4-320	<1.5-65	54-1160	-	8-350	Microwave digestion (US EPA 3051a)	Auckland Regional Council (2001)
	3			1-45	2-55		0.9-35		9-180				
Oslo (Norway)	2	<3-69.6 (5.38)	0.06-3.10 (0.42)	4.76-43.7 (32.3)	2.85-224 (31.4)	<0.01-2.30 (0.136)	2.23-232 (27.6)	5-1000 (58.1)	22.9-1150 (162)	-	-	Extraction with HNO_3 and digestion with autoclave	Tijhuis et al.(2002)
Califonia (USA)	3	0.6-11.0 (3.5)	0.05-1.70 (0.36)	9.1-96.4 (28.7)	23-1579 (122)	0.10-0.90 (0.26)	9-509 (57)	14.3-107.9 (48.5)	88-236 (149)	0.10-8.30 (0.80)	33-1400 (509)	Digestion with a mixture of HF, HNO_3 and HCl	Bradford et al. (1996)

[1]Concentrations of heavy metals in total natural soils of Jeju Island collected in this study; [2,3]Concentrations of heavy metals in natural volcanic and non-volcanic soils of Jeju Island collected in this study or foreign countries, respectively.

<Table 6 continued>

Region (Country)		Concentration (mg/kg), Range(arithmetric mean)									Pretreatment method	Ref.
		Be	Co	Mn	Mo	Se	Sb	Sn	Tl	V		
Jeju Island	1	0.001-0.768 (0.345)	14.6-82.5 (36.0)	275-1895 (730)	0.005-2.290 (0.537)	0.019-1.677 (0.529)	3.20-19.60 (8.99)	0.04-4.38 (1.15)	0.003-0.478 (0.096)	27.6-182.9 (87.0)	Microwave assisted acid(HNO3/HF) digestion	This study
	2	0.001-0.768 (0.333)	14.6-70.5 (37.0)	275-1895 (678)	0.005-1.801 (0.545)	0.045-1.316 (0.602)	3.20-16.28 (8.91)	0.04-4.38 (1.17)	0.003-0.317 (0.078)	27.6-182.9 (88.5)		
	3	0.056-0.684 (0.368)	14.7-82.5 (34.2)	388-1575 (833)	0.059-2.290 (0.521)	0.019-1.677 (0.381)	4.63-19.60 (9.17)	0.16-2.95 (1.11)	0.013-0.478 (0.131)	45.6-174.0 (84)		
Susaki (Greece)	2	-	12-124 (54)	456-1434 (831)	-	-	-	-	-	21-84 (46)	Digestion with a mixture of HF, HNO3, HCl and HClO4	Kelepertsis et al.(2001)
Sant Climent (Spain)	3	-	-	-	-	-	-	-	-	7.2-276.8 (84.5)	Digestion with aqua regia	Tume et al.(2006)
Auckland (New Zealand)	2	0.4-12	10-170	10-2500	-	-	-	<0.7-4	-	15-370	Microwave digestion (US EPA 3051a)	Auckland Regional Council (2001)
	3		0.2-35		-	-	-		-	8-160		
Califonia (USA)	3	0.25-2.70 (1.28)	2.7-46.9 (14.9)	253-1687 (646)	0.1-9.6 (1.3)	0.015-0.430 (0.058)	0.15-1.95 (0.60)	0.25-2.44 (1.11)	0.17-1.10 (0.56)	39-288 (112)	Digestion with a mixture of HF, HNO3 and HCl	Bradford et al. (1996)

[1]Concentrations of heavy metals in total natural soils of Jeju Island collected in this study; [2,3]Concentrations of heavy metals in natural volcanic and non-volcanic soils of Jeju Island collected in this study or foreign countries, respectively.

라 중금속 종류에 따라 큰 차이를 보임을 알 수 있다. 산술평균값으로 비교하면, 본 지역에서 채취한 화산회토의 경우, 그리스의 Susaki 지역의 토양(Kelepertsis 등, 2001)과 비교하였을 때 As 0.3배, Cr 0.08배, Ni 0.06배, Pb 0.42배, Zn 0.79배, Co 0.69배, Mn 0.82배로 낮은 농도를 보였으나 Ba, V은 각각 4.5배, 1.92배로 높은 농도를 보였고, Cu는 비슷한 농도를 나타내었다. 노르웨이의 오슬로 지역의 토양(Tijhuis 등, 2002)과 비교하면, Cd 0.6배, Cu 0.7배, Hg 0.95배, Pb 0.24배, Zn 0.46배로 낮은 농도를 보였으나 As 1.2배, Cr은 2.5배, Ni 2배 높은 농도를 보임을 알 수 있다. 인도양의 Reunion 지역의 토양(Doelsch 등, 2006)과 비교하면, Cu 0.36배, Cr 0.26배, Ni 0.27배, Zn 0.46배 낮은 농도를 보였으나 Hg은 비슷한 농도를 나타내었다. 뉴질랜드 오클랜드지역의 토양(Auckland Regional Council, 2001)과 비교하면 이 지역의 평균농도가 제시되지 않아 명확히 알 수는 없지만 대체적으로 Cu, Pb, Zn, Be, Co은 낮은 농도를, Cr, Ba,는 높은 농도를, As, Cd, Sn은 비슷한 농도로 분포하고 있다고 사료된다.

본 조사지역의 비화산회토의 경우, 스페인의 Sant Climent 지역의 토양(Tume 등, 2006)과 비교하였을 때 Cu는 0.6배, Pb 0.27배로 낮은 농도를 보였으나 Cr 1.5배, Ba 1.2배로 높은 농도를 나타내었고 Ni, Zn, V은 비슷한 농도를 보였다. 미국 캘리포니아 지역의 토양(Bradford 등, 1996)과 비교하면, Cd, Cu 0.6배, Cr 0.54배, Hg 0.3배, Ni 0.82배, Pb 0.31배, Zn 0.43배, Ba 0.7배, Be 0.29배, Tl 0.23배, V 0.75배로 낮은 농도를, As 1.5배, Co 2.3배, Mn 1.3배, Mo 1.7배, Se 6.6배, Sb 15.3배로 높은 농도를, Ag, Sn은 비슷한 농도를 보였다.

본 연구결과로부터 각 지역의 토양의 특성에 따라 중금속 농도는 큰 차이를 보였으며, 이는 토양의 모암, 풍화작용, 화산활동의 시기 등의 차이 때문인 것으로 사료된다.

3.3. 토양 성질과 중금속 및 중금속 사이의 상관성

본 연구에 사용된 제주도 자연토양 중의 중금속간에 존재하는 관련성은 그들의 모재로부터 기원하고 있으며, 풍화작용, 화산활동 및 그 시기 등에 의해 영향을 받는다. 중금속과 토양 파라미터 사이의 상관성을 이해하는 것은 토양 중의 중금속의 거동을 명확히 이해하는데 도움이 될 것이다. 제주도 토양의 물리화학적 성질[pH(H_2O), pH(NaF), 유기물 함량]과 중금속과의 상관성 및 중금속 사이의 상관성을 분석하였다.

전체 토양의 물리화학적 성질인 pH(H_2O), pH(NaF), 유기물함량과 중금속과의 상관계수를 Table 7에 나타내었다. pH(H_2O)와 중금속간에는 Hg, Ni, Co, Se과 유의수준 0.01 수준에서 유의한 값을 보여주고 있다. 그러나 pH(H_2O)와 Ni, Co는 양의 상관성을, Hg, Se와는 음의 상관성을 보였다. 그리고 pH(H_2O)와 Mn은 유의수준 0.05 수준에서 유의한 양의 상관성을 보여주고 있다. pH(NaF)와 중금속간에는 Hg, Ba, Se, Tl과 유의수준 0.01 수준에서 유의한 값을 보여주고 있으며, Hg, Ba, Se와는 양의 상관성을 Tl과는 음의 상관성을 나타냈다. 유기물함량과 중금속간의 상관성은 Hg, Tl, Se 순으로 상관성이 높게 나타났으며, Hg, Tl 과는 유의수준 0.01 수준에서 유의한 값을 보여주었고, Se는 유의수준 0.05 수준에서 유의한 값을 보였다. 그리고 Hg, Se는 양의 상관관계를 Tl과는 음의 상관관계를 보였다.

본 연구에서 조사된 전체 토양 중의 중금속에 대해 이들 사이의 상관성을 검토한 결과를 Table 8에 나타내었다. 그 결과 총 171개의 상관계수 중에서 유의수준 0.01 수준에서 상관관계를 갖는 것이 22개이고, 모두가 양의 상관관계를 보였다. Sb-V간의 상관계수(r)가 0.878로 가장 높게 나타내고 있으며, Mo-Sn(r=0.867), Co-V(r=0.654), Co-Sb(r=0.648), Be-Sn(r=0.546), Sn-Tl(r=0.528) 순으로 나타났고, 나머지 상관계수는 0.5 이하로 나타났다.

유의수준 0.05 수준에서 상관관계를 갖는 것이 11개였다. 이들 중 As-Ni(-0.264), Ni-Be(-0.283), Be-Mn(-0.286)이 음의 상관관계를 나타냈고, 나머지는 양의 상관관계를 나타내었다.

유의확률 p값이 0.05 이하이면 그 결과는 통계적으로 유의하나 통계적 유의성은 자료 집합의 수가 증가함에 따라 유의확률 p값을 작게 산출하려는 경향을 가지고 있기 때문에 실제적으로 반드시 유의하다고 의미하는 것은 아니다. 따라서 화산회토와 비화산회토의 시료수가 각각 42개, 21개로 차이가 있어 비화산회토에서 상관계수가 높지만 유의성이 낮게 나오는 경향이 있다.

Table 7. Correlation coefficient (r) between heavy metal concentrations and soil properties in natural soils of Jeju Island

	As	Cd	Cu	Cr	Hg	Ni	Pb	Zn	Ag	Ba	Be	Co	Mn	Mo	Se	Sb	Sn	Tl	V
pH(H_2O)	-0.016	0.114	-0.055	0.048	-0.359**	0.523**	-0.243	-0.165	0.026	-0.136	-0.042	0.499**	0.249*	0.007	-0.434**	-0.007	0.083	-0.082	-0.103
pH(NaF)	0.103	0.091	0.232	0.121	0.666**	0.097	-0.116	0.191	0.064	0.329**	-0.136	0.066	-0.203	-0.072	0.403**	0.046	-0.105	-0.419**	0.157
Organic Matter(%)	0.036	0.163	0.231	0.134	0.425**	0.044	-0.085	0.229	0.057	0.221	-0.152	-0.069	-0.120	-0.080	0.264*	-0.092	-0.106	-0.351**	-0.062

*Correlation is significant at the 0.05 level; **Correlation is significant at the 0.01 level.

Table 8. Correlation coefficients (r) between heavy metal concentrations in natural soils of Jeju Island

	As	Cd	Cu	Cr	Hg	Ni	Pb	Zn	Ag	Ba	Be	Co	Mn	Mo	Se	Sb	Sn	Tl	V
As	1.000																		
Cd	-0.081	1.000																	
Cu	-0.086	0.315*	1.000																
Cr	-0.069	0.115	0.056	1.000															
Hg	0.029	0.137	0.216	-0.010	1.000														
Ni	-0.283*	0.099	0.038	0.459**	-0.095	1.000													
Pb	-0.019	0.109	-0.036	0.000	0.112	-0.143	1.000												
Zn	0.146	0.022	0.375**	0.006	0.252*	-0.094	-0.005	1.000											
Ag	-0.286*	0.047	0.029	-0.112	0.068	-0.052	0.122	0.061	1.000										
Ba	0.404**	-0.056	-0.045	-0.087	0.166	-0.264*	-0.125	0.154	-0.040	1.000									
Be	-0.063	-0.063	0.099	0.123	-0.035	-0.104	-0.113	0.003	0.295*	0.064	1.000								
Co	-0.063	-0.041	0.191	0.316*	-0.067	0.495**	-0.181	0.236	-0.008	-0.069	0.209	1.000							
Mn	0.040	0.029	0.063	-0.068	-0.066	0.015	-0.104	0.142	-0.199	0.008	-0.002	0.259*	1.000						
Mo	-0.221	0.058	0.127	0.073	0.008	0.164	0.022	-0.090	0.377**	-0.136	0.458**	0.103	-0.125	1.000					
Se	-0.064	0.032	0.194	-0.024	0.458**	-0.136	0.087	0.197	-0.029	0.124	0.037	0.132	-0.118	0.156	1.000				
Sb	0.085	-0.049	0.332**	0.224	0.100	-0.074	0.033	0.292*	-0.062	0.119	0.439**	0.648**	0.241	0.114	0.419**	1.000			
Sn	-0.170	0.056	0.231	0.031	-0.001	0.153	-0.024	-0.006	0.482**	-0.072	0.546**	0.129	-0.081	0.867**	0.009	0.109	1.000		
Tl	-0.055	0.005	-0.128	0.127	-0.245	-0.112	0.161	-0.243	0.190	-0.168	0.452**	-0.209	-0.162	0.385**	-0.241	-0.021	0.528**	1.000	
V	0.012	-0.070	0.294*	0.395**	0.200	0.096	0.073	0.280*	-0.048	0.047	0.401**	0.654**	0.095	0.217	0.463**	0.878**	0.165	0.011	1.000

*Correlation is significant at the 0.05 level; **Correlation is significant at the 0.01 level.

4. 결론

제주도에 분포하고 있는 63개 토양통에 대해 자연적인 지구화학적 유입원으로 사료되는 비경작지 토양을 채취하여 이들의 물리화학적 성질과 중금속 농도를 살펴보고, 토양의 물리화학적 성질과 중금속 및 중금속 사이의 상관성을 검토하였다. 채취된 토양의 물리화학적 특성은 pH(H_2O)는 4.6～8.3의 범위로 평균 5.5을 보였으며, pH(NaF)는 7.5～11.7 범위(평균 10.0)에 있으며, pH(NaF)>9.4를 화산회토의 분류기준 적용하면 채취토양 중 화산회토는 42개, 비화산회토는 21개로 분류되었다. 유기물 함량은 전체 토양에서 1.6～17.6%(평균 8.1%), pH(NaF)로 분류한 화산회토 및 비화산회토의 유기물 함량은 각각 2.3～17.6%(평균 10.4%), 1.6～5.8%(평균 3.6%)이었다.

본 연구에서 조사된 제주도 전체 토양 중 가장 높은 농도로 분포하고 있는 중금속은 Mn, Ba이었고 Hg과 Tl은 가장 낮은 농도로 분포하고 있었으며, 산술평균값(단위 mg/kg)으로 중금속 사이에서는 Mn(730) > Ba(493) > V(87) > Cr(73), Zn(71) > Ni(52) > Co(36)> Cu(20) > Pb(14) > Sb(9) > As(6.14) > Sn(1.15), Ag(1.12) > Mo(0.527), Se(0.529) > Be(0.345) > Cd(0.238) > Hg(0.146) > Tl(0.096)의 순이었다.

제주도 자연 화산회토 및 비화산회토 중의 중금속 농도는 외국의 토양과 비교하였을 때 각 지역의 토양의 특성에 따라 중금속 농도는 큰 차이를 보였으며, 이는 토양의 모암, 풍화작용, 화산활동의 시기 등의 차이 때문인 것으로 사료된다.

제주도 토양 전체에 대해 토양의 물리화학적 성질과 중금속과의 상관성을 검토한 결과, pH(H_2O)와 중금속 사이에서는 Hg, Ni, Co, Se, pH(NaF)와 중금속사이에서는 Hg, Ba, Se, Tl, 유기물과 중금속사이에서는 Hg, Tl 이 유의수준 0.01 수준에서 유의한 값을 보였으며, pH(H_2O)와 Mn, 유기물과 Se는 유의수준 0.05 수준에서 유의한 양의 상관성을 나타내었다.

중금속 사이의 상관성을 검토한 결과, 유의수준 0.01 수준에서 상관관계를 갖는 것이 22개이고, 모두가 양의 상관관계를 보였다. Sb-V간의 상관계수(r)가 0.878로 가장 높게 나타내고 있으며, Mo-Sn(r=0.867), Co-V (r=0.654), Co-Sb(r=0.648), Be-Sn(r=0.546), Sn-Tl (r=0.528) 순으로 나타났고, 나머지 상관계수는 0.5 이하로 나타났다. 유의수준 0.05 수준에서 상관관계를 갖는 것이 11개였으며, 이들 중 As-Ni(-0.264), Ni-Be(-0.283), Be-Mn(-0.286)이 음의 상관관계를 나타냈고, 나머지는 양의 상관관계를 나타내었다.

감사의 글

이 논문은 2014학년도 제주대학교 학술진흥연구비 지원사업에 의하여 연구되었음.

REFERENCE

Auckland Regional Council, 2001, TPI Background concentrations of inorganic elements in soils from the Auckland regions, ARC Technical Publication, No. 153.

Baize, D., Sterckeman, T., 2001, Of the necessity of knowledge of the natural pedo-geochemical background content in the evaluation of the contamination of soils by trace elements, Sci. Total Environ., 264 (1-2), 127-139.

Bradford, G. R., Change, A. C., Page, A. L., Bakhtar, D., Frampton, J. A., Wright, H., 1996, Background concentrations of trace and major elements in California soils, Kearney Foundation Special Report, 32.

Burt, R., Wilson, M. A., Mays, M. D., Lee, C. W., 2003, Major and trace elements of selected pedons in the USA, J. Environ. Qual., 32, 2109-2121.

Calhoun, F. G., Carlisle, V. W., Luna, C., 1972, Properties and genesis of selected Columbian Andosols, Soil Sci. Soc. Amer. Proc., 36, 480-485.

Doelsch, E., Van de Kerchove, V., Saint Macary, H., 2006, Heavy metal content in soils of Reunion (Indian Ocean), Geoderma, 134, 119-134.

Gil, C., Boluda, R., Ramos, J., 2004, Determination and evaluation of cadmium, lead and nickel in greenhouse soils of Almeria (Spain), Chemosphere, 55, 1027-1034.

Gray, C. W., McLaren, R. G., Roberts, A. H. C., Condron, L. M., 1999, The effect of long-term phosphatic fertilizer applications on the amounts and forms of cadmium in soils under pasture in New

Zealand, Nutrient Cycling in Agroecosystems, 54(3), 267-277.

Hyun, H. N., Oh, S. S., 1994, Adsorption capacity of contaminants by Jeju soils and groundwater contamination, Proceedings of workshop on groundwater resources of Jeju Island, Korean Society of Soil and Groundwater Environment, July 1, Jeju Island, 26-53.

Kelepertsis, A., Alexakis, D., Kita, I., 2001, Environmental geochemistry of soils and waters of Susaki area, Korinthos, Greece, Environ. Geochem. Health, 23, 117-135.

Ministry of Environment, 2005, Soil measuring network and results of research on the actural condition in 2004.

Ministry of Environment, 2006a, Soil measuring network and results of research on the actural condition in 2005.

Ministry of Environment, 2006b, Results of detailed research for the areas exceeding Soil Contamination Warning Standards in 2005.

NIAST, 2000, Taxanomical classification of Korean soils, National Institute of Agricultural Science & Technology.

Shin, J. S., Stoops, G., 1988, Composition and genesis of volcanic ash soils in Jeju Island 1. Physico-chemical and macro-micromorphological properties, J. Mineral. Soc. Korea, 1, 32-39.

Takeda, A., Kimura, K., Yamasaki, S., 2004, Analysis of 57 elements in Japanese soils, with special referene in soil group and agriculture use, Geoderma, 119, 291-307.

Tijhuis, L., Brattli, B., Saether, O. M., 2002, A geochemical survey of topsoil in the city of Oslo, Norway, Environ. Geochem. Health, 24, 67-94.

Tume, P., Bech, J., Longan, L., Tume, L., Reverter, F., Sepulveda, B., 2006, Trace elements in natural surface soils in Sant Climent (Catalonia, Spain), Ecol. Eng., 27, 145-152.

Um, K. T., Ju, Y. H., Rhee, G. S., Shin, Y. H., 1978, Studies on the soil characteristics for development planning of JeJu-Do, Rural Development Administration, 19, 1-18.

Walkley, A., Black, I. A., 1934, An examination of the Degtjareff method for determining soil organic matter and a proposed modification of the chromic acid titration method, Soil Sci., 37, 29-38.

Xue, H., Nhat, P. H., Gachter, R., Hooda, P. S., 2003, The transport of Cu and Zn from agricultural soils to surface water in a small catchment, Advances in Environmental Research, 8(1), 69-76.