

제주도 대표토양의 이화학 및 광물학적 특성과 중금속원소의 분포
The physico-chemical properties, mineralogical characteristics and heavy
metal distribution of soils in Jeju island

전철민 · 안주성 · 김구영 · 박기화

Chul-Min Chon · Joo Sung Ahn · Kue-Young · Kim, Ki-Hwa Park

한국지질자원연구원, Korea Institute of Geoscience and Mineral Resources
femini@kigam.re.kr

요 약 문

제주도 대표토양을 대상으로 이들의 모재 및 토양단면의 토양 특성을 조사하고, 제주도 대표토양의 주요 유해 중금속 원소의 총 함량을 분석하여 그 분포특성과 이화학 및 광물학적 특성을 비교 평가하였다. 주성분분석 결과 전형적인 화산회토의 특성을 보이는데 하부 층위에서 Si, Al, Fe 함량의 증가 및 표토에서의 염기용탈을 보여주었다. 현무암질 모재 기원임을 보여주는 ferromagnesian 광물들이 주로 관찰되었으며 심토에서는 상당량의 김사이트가 관찰되는 것이 특징인데 이는 표토에서 과잉 생성된 알루미늄이 하부토양으로 이동하여 이차적으로 생성집적된 것으로 판단된다. 중금속 총함량 분석결과, Zn, Ni, Co, Cr의 함량이 세계 토양 내 함량범위를 초과하였으며 향후 진행될 연구에서 제주도 화산회 토양의 주 점토구성광물인 알로페인을 비롯한 점토광물 및 비정질 물질에 대한 특성 및 정량적 조사와 중금속원소별 화학적 형태 파악을 위한 연속추출분석 등을 수행하여 중금속원소의 존재상을 규명하고 지표 토양 및 지하수 환경으로의 중금속 이동성을 평가하고자 한다.

1. 서론

제주도의 지표는 약 90% 까지 화산회(volcanic ash)로 구성되어 있기 때문에 화산회 모재 특성은 제주도 토양의 생성 및 발달에 중요한 인자가 된다(Shin and Stoops, 1988).

대부분의 화산회는 제주도 중앙의 한라산 분출에 의한 낙진에 기인하지만, 360개 이상의 소형 기생화산인 분석구(cinder cones)에 의한 화산회 낙진과 중첩되어 존재하기 때문에 그 기원을 밝히는 것은 매우 어렵다. 제주도 정밀토양 조사(농업기술연구소, 1976; NIAST, 2000)에 의하면 토양은 4개 토양군과 63개 토양통으로 구분되며 약 80%가 전형적인 화산회토(Andisols)의 특성을 지니고 있다. 이들 토양의 특성은 농암갈색 혹은 흑색이며 가볍고 영성하고 인산고정력이 강하며 염기 용탈이 쉽게 일어나는 특성을 갖고 있는데 이는 주 점토광물이 무정형인 알로판이기 때문에 반토성(토양광물로부터 알루미늄이 유리되어 활성화하는 성질)이 강하여 알루미늄 형태가 수산화알루미늄 형태인 $Al(OH)_2^+$, $Al(OH)_2^{2+}$ 등으로 존재하여 인산고정의 원인이 된다. 또한 유기물함량이 높으나 유기물과의 결합력이 매우 강하여 암색을 띠며 타 점토광물에 비하여 음이온의 흡착력이 큰 특성이 있기 때문에 인산고정력이 크고 염기의 흡착력이 약하다. 물리적 특성으로서는 토성이 양토내지 미사질양토이며 토심은 매우 불균일하여 20~150cm정도지만 토양공극율이 70~80%이어서 투수성과 통기성은 양호하다. 또한 친수성과 보수력이 커서 유효수분 보유력이 일반토양에 비하여 2~3배 크다.

일본(Takeda et al., 2004) 및 미국 하와이(Burt et al., 2003) 등의 대표적인 화산회토양에서 Cu, Cr, Ni, Zn 등의 중금속 함량이 일반토양에 비해 부화된 것으로 보고되었다. 제주도의 경우에도 토양오염측정망 운영결과 Ni 함량이 우려기준을 초과하는 결과가 일부 시료에서 나타났으며 이는 자연함유량이 높기 때문으로 보고되었다(환경부, 2005).

본 연구는 제주도 대표토양을 대상으로 이들의 모재 및 토양단면의 토양 이화학과 광물학적 특성의 차이를 조사함으로써 풍화특성에 의한 이화학 조성의 변화 및 광물학적 특성변화를 고찰하였다. 또한 제주도 대표토양의 주요 유해 중금속 원소의 함량을 분석하여 그 분포특성과 이화학 및 광물학적 특성을 비교 평가하였다.

2. 연구방법

제주도 토양시료는 분포면적이 넓은 대표토양종을 주 대상으로 하여 총 10개 지점에서 수집되었으며, 토양단면 층위를 고려하여 총 20개의 시료를 채취하였다. 우리나라 토양분류상의 토양종, 토양단면 시료의 채취구간, 토색, 위치 등의 시료채취에 대한 자세한 정보는 Table 1에 제시하였다. 수집된 토양은 대기상태에서 자연건조한 후 토양시험을 위한 입도인 2mm 이하로 체질하여, 토양 pH (토양:증류수=5g:25ml, 1 h shaking) 및 입도분포가 분석되었다. 수분함량측정을 위한 시료는 습도를 유지한 채 이중 비닐백에 보관되었으며 100℃에서 16시간 가열 후 건조한 후 데시케이터에서 방냉하여 무게를 측정함으로써 수분함량을 측정하였다. 유기물함량을 간접적으로 유추하기 위하여 400℃와 950℃에서 각각 16시간과 2시간씩 시료를 강렬하여 방냉한 후 강열감량(loss on ignition)을 측정하였다. 주성분원소 및 주구성광물 분석을 위하여, 건조 시료는 다시 150mesh 이하로 분쇄하였으며 X-선형광분석 및 X-선회절분석을 수행하였다. 마지막으로 모든 토양 시료에 대하여 불산을 사용하는 완전분해 방식으로 중금속원소의 총함량 분석을 실시하였다.

Table 1. Description of soil order and soil samples.

site#	soil_order	elevation (m)	Sample ID	depth (cm)	field color	Munsell color
site#01	Pyeongdae series, Typic Melaundands	330	JS-A	0-45	black	10 YR 3/1
			JS-B	45-120	brown	7.5 YR 3/2
			JS-C	120-	red brown	5 YR 3/2
site#02	Heugag series, Typic Fulvudands	860	SP-A	0-20	red brown	7.5 YR 2/1
			SP-B	55-	light brown	10 YR 3/2
site#03	Nongo series, Typic Hapludands	580	BG-A	0-30	red	2.5 YR 3/2
site#04	Gimyeong series, Lithic Melanundands	330	NJ-A	0-15	dark gray	7.5 YR 3/1
site#05	Gujwa series, Lithic Fulvudands	55	BC-A	0-10	dark gray	5 YR 3/1
site#06	Gimyeong series, Lithic Melanundands	123	GS-A	0-25	gray	7.5 YR 3/2
site#07	Minag series, Typic Melaundands	151	MG-A	0-15	black	10 YR 2/1
			MG-B1	15-30	gray	7.5 YR 3/2
			MG-B2	30-50	dark gray	7.5 YR 3/2
			MG-B3	50-70	gray	7.5 YR 3/2
site#08	Pyeongdae series, Typic Melaundands	435	GR-A	0-33	red brown	7.5 YR 3/3
			GR-B	33-60	red brown	5 YR 3/3
site#09	Pyeongdae series, Typic Melaundands	261	DC-A	0-20	dark gray	7.5 YR 2/2
			DC-C	20-70	red brown	7.5 YR 3/2
site#10	Noro series, Typic Hapludands	622	NR-A	0-20	black	7.5 YR 2/1
			NR-B	20-40	dark gray	7.5 YR 3/1
			NR-C	40-	red	5 YR 3/1

3. 연구결과 및 토의

분석된 토양 pH, 수분함량, 강열감량, 유기물함량, 토성, 광물조성 등의 토양 특성 결과들은 Table 2에 나타내었다. 토양 pH 4.84-5.92의 범위에서 표토가 높은 경향을 보이며 수분함량은 32.7-60.45%로 일반토양에 비해 높은 값을 보인다. 총유기탄소 및 LOI는 A 층위에서 상대적으로 매우 큰 값을 보이는데 각각 10%와 20% 정도의 값을 가진다. 입도분포는 실트질이 우세하여 대부분의 시료의 토성은 silt에서 silty loam으로 결정되었다.

Table 2. Soil properties and mineralogical composition of bulk soil samples.

Sample ID	pH	Moisture	LOI (400°C)	LOI (950°C)	OH related LOI	TOC	Mineralogy
JS-A	5.38	52.78	22.48	24.69	2.21	7.86	Q, Pl, Ac, En, Mag, Chl, Il
JS-B	5.41	42.43	11.53	13.69	2.16	1.15	Q, Pl, Gib, Kf, Tr, Mag, Chl, Il
JS-C	5.41	43.43	12.74	14.64	1.90	0.63	Gib, Fo, Q, Pl, Kf, Mag, K
SP-A	4.84	60.47	26.08	27.81	1.73	11.19	Q, Mag, Kf, Cr, Pl, Chl, Il
SP-B	5.14	54.25	16.89	19.31	2.42	2.94	Q, Kf, Gib, Mag, Pl, Cr, Chl, Il
BG-A	5.34	47.68	16.92	18.55	1.63	3.00	Gib, Fo, Q, Mag
NJ-A	5.30	46.73	26.97	28.68	1.71	5.27	Q, En, Mag, Pl, K, Il, H
BC-A	5.40	28.04	27.69	29.29	1.61	11.22	Q, Pl, Di, Cal, Ac, Il, Chl
GS-A	5.35	40.60	20.46	22.87	2.40	6.61	Q, Pl, En, Kf, Cr, Mag, Il, Chl
MG-A	5.19	47.10	27.46	29.23	1.76	10.76	Q, Pl, En, Kf, Ac, Mag, Il, Chl
MG-B1	5.38	46.62	16.23	18.24	2.01	4.88	Q, Kf, Pl, Ac, Il, Chl, Mag, Gib
MG-B2	5.40	44.66	14.02	16.27	2.25	3.58	Q, Pl, Ac, Kf, Il, Chl, Mag, Gib
MG-B3	5.52	38.29	9.77	12.07	2.31	1.93	Q, Pl, Kf, Il, Chl, Mag, Gib
GR-A	5.82	40.65	11.80	13.73	1.93	1.16	Pl, Q, Gib, En, Mag, H, Fo, Chl, Il
GR-B	5.92	47.13	11.89	13.76	1.86	0.77	Q, Gib, Pl, Kf, Chl, Il, H
DC-A	5.48	34.39	18.15	21.32	3.16	4.77	K, Mag, Pl, Q
DC-C	5.71	34.40	9.88	14.51	4.63	0.80	K, Mag, Q
NR-A	5.15	55.23	30.33	31.91	1.58	10.68	Q, En, Gib, Mag, Pl, Fo, Chl, Il
NR-B	5.43	54.08	22.65	24.09	1.44	4.75	Gib, En, Mag, Pl, Si, Sp, Q
NR-C	5.64	32.72	7.69	8.42	0.73	0.87	Gib, En, Pl, Fo, Mag, Q, Al, Au

Note: LOI is loss on ignition and TOC is total organic carbon. Major minerals are bold and italic.

Abbreviations: Q; quartz, Pl; plagioclase, Ac; actinolite, En; enstatite, Mag; magnetite, Chl; chlorite, Il; illite, Gib; gibbsite, Kf; K-feldspar, Tr; tremolite, Fo; fosterite, Cr; cristobalite, H; hematite, Di; diopside, Cal; calcite, K; kaolin, Si; siderite, Sp; spinel, Al; aluminite, Au; augite.

주성분분석 결과 일반적인 토양에 비해 Si의 함량이 낮으며 Al 및 Fe의 함량이 높은 특징을 보이는데 이는 전형적인 화산회토의 특성이다. 일반적으로 하부 층위에서 Si, Al, Fe의 함량이 증가하는 경향을 보여주었는데, 표토의 풍화과정에서 용탈된 이 원소들이 상대적으로 하부에 집적되는 것으로 여겨지며, 표토에서의 Ca, Mg, K, Na 등의 염기용탈도 이와 같은 현상으로 파악된다. 주구성광물의 특징은 현무암질 모재 기원임을 보여주는 ferromagnesian 광물들(olivine, augite, enstatite, actinolite)이 주로 관찰된다는 점이며, 이와 더불어 표토에서는 염기성화산분출물의 낙진 기원으로 추정되는 석영 및 운모류 등의 산성광물들도 일부시료에서 상당량 관찰되었다. 또한 심토에서는 상당량의 깁사이트가 관찰되는 것이 특징이며 이는 표토에서 과잉 생성된 알루미늄이 하부토양으로 이동하여 이차적으로 생성집적된 것으로 판단되는데 중금속 등의 오염물질 이동에 중요한 영향을 미칠 수 있다.

기존 연구(Burt et al., 2003, Takeda et al., 2004)에서 보고된 바와 같이 현무암질 용암 또는 화산재를 모재로 하는 화산회 토양에는 지구화학적 수반관계가 있는 Cr, Ni, Zn 등의 중금속 원소 함량이 높다. 중금속 총함량 분석결과, Zn, Ni, Co, Cr의 함량이 세계 토양 내 함량범위

(Kabata-Pendias and Pendias, 2001)를 초과하였으며 일부 시료에서는 Cr의 함량이 1,000 ppm 초과하기도 하였다(Table 3). 이들 중금속원소는 ferromagnesian 광물들의 규산염 자리에 치환상으로 존재하거나, 특별히 높은 함량의 유기물, 알루미늄수산화물, 비정질 및 철(수)산화물과 결합된 형태로 존재할 것으로 예상된다.

Table 3. Concentrations of selected heavy metals (mg/kg).

Sample	Horizon	Cu	Pb	Zn	Ni	Co	Cr	Cd	As
JS	A	44	42	104	144	66	558	0.3	5.1
	B	42	44	136	198	90	580	0.2	5.1
	C	42	40	110	304	120	1,056	0.2	2.1
SP	A	28	52	102	56	38	464	0.2	4.9
	B	38	48	138	110	68	472	0.2	5.2
BG	A	74	38	192	414	150	1,164	0.7	1.1
NJ	A	44	38	156	110	76	494	0.6	2.8
BC	A	42	44	112	92	52	516	0.4	2.8
GS	A	70	42	98	122	58	568	0.3	5.0
MG	A	34	46	102	100	48	434	0.3	4.5
	B1	42	44	116	140	62	498	0.2	5.4
	B2	44	42	114	140	58	478	0.2	5.7
	B3	38	46	106	124	60	448	0.2	5.8
GR	A	50	46	134	258	110	872	0.4	3.8
	B	52	40	156	230	112	720	0.5	2.6
DC	A	74	40	152	270	104	738	0.3	2.0
	C	76	34	162	252	114	750	0.4	1.5
NR	A	32	48	102	132	72	812	0.5	3.3
	B	50	40	114	230	118	1,024	0.3	2.3
	C	50	42	124	228	108	900	3.4	1.0

향후 진행될 연구에서는 제주도 화산회 토양의 주 점토구성광물인 알로페인을 비롯한 점토광물 및 비정질 물질에 대한 특성 및 정량적 조사와 중금속원소별 화학적 형태 파악을 위한 연속추출분석을 추가하여 해석함으로써, 중금속원소의 존재상을 규명하고 지표 토양 및 지하수 환경으로의 중금속 이동성을 평가하는데 기본적인 자료를 생산하고자 한다.

4. 참고문헌

- 농업기술연구소 (1976) 제주도 정밀토양도.
- 환경부 (2005) 2004년도 토양측정망 및 실태조사 결과.
- Burt, R., Wilson, M.A., Mays, M.D. and Lee, C.W. (2003) Major and trace elements of selected pedons in the USA. *J. Environ. Qual.*, v.32, p.2109-2121.
- Kabata-Pendias, A. and Pendias, H. (2001) Trace elements in soils and plants. CRC Press, Boca raton, Fla. 413pp.
- NIAST (2000) Taxonomical Classification of Korean Soils, NIAST.
- Shin Jae Sung , George Stoops (1988) Composition and Genesis of Volcanic Ash Soils in Jeju Island .I. Physico - Chemical and Macro - Micromorphological Properties. *한국광물학회지*, 제1권, p. 32-39.
- Takeda, A., Kimura, K. and Yamasaki, S. (2004) Analysis of 57 elements in Japanese soils, with special reference to soil group and agriculture use. *Geoderma*, v.119, p.291-307.